

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Ολοκληρωμένο Σύστημα Μέτρησης, Μετάδοσης,
Επεξεργασίας & Απεικόνισης Περιβαλλοντικών
Δεδομένων»



Των φοιτητών
Αμοιρίδη Ανδρέα
Αρ. Μητρώου: 2019/005
Κολέτε Ανδρονίκης
Αρ. Μητρώου 2019/074

Επιβλέπων
Χατζόπουλος Αργύριος
Αναπληρωτής Καθηγητής

Ημερομηνία 24/05/2026

Τίτλος Δ.Ε. “Ολοκληρωμένο Σύστημα Μέτρησης, Μετάδοσης, Επεξεργασίας & Απεικόνισης
Περιβαλλοντικών Δεδομένων”

Κωδικός Δ.Ε. 25197

Όνοματεπώνυμο φοιτητών: Αμοιρίδης Ανδρέας, Κολέτε Ανδρονίκη

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Χατζόπουλος Αργύριος

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 20/03/2025

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 24/05/2026

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

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία των φοιτητών Αμοιρίδη Ανδρέα και Κολέτε Ανδρονίκης που την εκπόνησαν. 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 απαραίτητα και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

«Στους γονείς μου, που με τη γαλουχία τους αποφάσισα να γίνω κι εγώ Μηχανικός»

Ανδρέας Αμοιρίδης

«Στους γονείς μου και τον αδερφό μου Αλέξανδρο για την απέραντη στήριξη και αγάπη τους»

Ανδρονίκη Κολέτε

Πρόλογος

Η επιλογή του θέματος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας έγινε μετά από ανταλλαγή σκέψεων μεταξύ των σπουδαστών, έχοντας ως έναυσμα την ιδέα ενός ολοκληρωμένου συστήματος που θα καλύπτει ένα ευρύ φάσμα των διδασκόμενων στη σχολή αντικειμένων. Με προτροπή του διδάσκοντα καταλήξαμε σε ένα σύστημα που συνδυάζει γνώσεις σύνθεσης αναλογικών κυκλωμάτων, προγραμματισμού μικροελεγκτών, σχεδίασης ενσωματωμένου συστήματος, πρωτοκόλλων ασύρματων επικοινωνιών, οργάνωσης βάσεων δεδομένων και τεχνολογιών απεικόνισης σε διαδικτυακές ιστοσελίδες. Ολοκληρώνοντας την εργασία μας θα έχουμε φέρει εις πέρας το στόχο μας σε αυτή τη σχολή καθότι πέραν της εφαρμογής γνώσεων στα αντικείμενα που διδαχθήκαμε, αποκομίσαμε δεξιότητες συνεργασίας, εργαστήκαμε με σαφές χρονοδιάγραμμα και σε ορισμένες περιπτώσεις αξιοποιήσαμε ο καθένας γνώσεις πέραν των διδαχθέντων. Τέλος, μας έκανε πιο σίγουρους στην επιλογή του αντικειμένου που καθένας μας θέλει να ασχοληθεί στην μετέπειτα επαγγελματική μας πορεία.

Περίληψη

Αντικείμενο αυτής της διπλωματικής είναι η μελέτη, σχεδίαση και κατασκευή ενός συστήματος μέτρησης περιβαλλοντικών παραμέτρων στο πεδίο. Με την μελέτη παρόμοιων συστημάτων, ήτοι μετεωρολογικών σταθμών, επιλέχθηκαν οι παράμετροι που βοηθούν στην βέλτιστη επιλογή διαχείρισης ενός καλλιεργήσιμου εδάφους. Εν τέλει επιλέχθηκαν ως παράγοντες μελέτης η θερμοκρασία, η υγρασία και η πίεση του ατμοσφαιρικού αέρα, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου, το ύψος βροχής, καθώς και μετρήσεις θερμοκρασίας και υγρασίας χώματος του σημείου που βρίσκεται ο σταθμός μέτρησης. Τα δεδομένα των μετρήσεων αυτών συλλέγονται με τη χρήση ενός μικροελεγκτή ESP32 και έπειτα μεταδίδονται μέσω ασύρματης επικοινωνίας από τον κόμβο σε ένα σταθμό βάσης, απ' όπου και αποθηκεύονται σε βάση δεδομένων. Έπειτα, στην βάση είναι δυνατή η πραγματοποίηση επεξεργασίας αυτών των δεδομένων και τελικά πραγματοποιείται η απεικόνιση τους σε δυναμική ιστοσελίδα. Στη συγκεκριμένη ιστοσελίδα δίνεται η ικανότητα στον χρήστη να προβάλλει τα δεδομένα σε διάφορα χρονικά βάρη, ξεκινώντας από την τελευταία μέτρηση που πραγματοποιήθηκε και πηγαίνοντας μέχρι την πρώτη διαθέσιμη στη βάση δεδομένων.

«Integrated System for Measurement, Transmission, Processing & Visualization of Environmental Data»

«Andreas Amoiridis, Androniki Koletē»

Abstract

The objective of this thesis is the study, design and implementation of a system capable of measuring environmental parameters in situ. By examining similar systems, such as meteorological stations, the parameters selected were those conducive to the optimal management of arable land. Ultimately, the selected parameters for monitoring include air temperature, humidity, atmospheric pressure, wind speed and direction, precipitation levels, as well as soil temperature and moisture at the measurement site. The data from these measurements are collected via an ESP32 microcontroller and subsequently transmitted wirelessly from the node to a gateway, where they are stored in a database. This allows for subsequent data processing and visualization. The interface provides the user with the ability to visualize the data across various time ranges, starting from the most recent measurement and extending back to the earliest record available in the database.

Ευχαριστίες

Κατά πρώτον θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής κ. Αργύρη Χατζόπουλο για την εμπιστοσύνη του σε εμάς αλλά και για την καθοδήγησή του σε αρκετά από τα επιστημονικά θέματα που αγνοούσαμε πλήρως ως την εκπόνηση της εργασίας.

Έπειτα, ευχαριστούμε τους διδάσκοντες στο τμήμα κ. Βασίλη Βάσσιο, για τις θεωρητικές και τεχνικές συμβουλές σχετικά με την υλοποίηση των προσομοιώσεων και την υλοποίηση των κυκλωμάτων της εργασίας σε θεωρητικό και πρακτικό επίπεδο, αλλά και για την ανοχή του απέναντί μας, όταν «κατασκευάσαμε» στο παρασκευαστήριο του εργαστηρίου του, & κ. Άγγελο Γιακουμή για την επίλυση αποριών μας σχετικά με τους μικροελεγκτές.

Στην συνέχεια, ευχαριστούμε τους συναδέλφους – συμφοιτητές: 1) Γιάννη Παπαδημητρίου για την βοήθειά του σε θέματα υλοποίησης κυκλωμάτων και σχεδίασης μοντέλων για τρισδιάστατες εκτυπώσεις, καθώς και τις πληροφορίες που μας παρείχε σχετικά με τους μικροελεγκτές τύπου ESP32, 2) Βασίλη Κουφογιώργο για τις άπειρες ώρες που σπατάλησε προσπαθώντας να μας καθοδηγήσει σωστά στην υλοποίηση της εργασίας σε όλους τους τομείς, 3) Δημήτρη Αγαπίου για την πολύτιμη βοήθεια του σχετικά με την υλοποίηση μοντέλων τρισδιάστατης εκτύπωσης και μηχανολογικής λειτουργίας, 4) Νίκο Παπαδόπουλο για την συμβολή του σε θέματα οργάνωσης βάσεων δεδομένων και σχεδιασμού ιστοσελίδων και περιβάλλοντος χρήστη, 5) Βασίλη Καραγιαννίδη για την συμβολή του σε θέματα σχεδίασης και προγραμματισμού μικροελεγκτών, 6) Γιώργο Αμπρικήδη για την συμβολή του στο κατασκευαστικό κομμάτι της εργασίας, 7) Παύλο Ποτόλια για την πολύτιμη καθοδήγησή του σε θέματα σχεδίασης της πλακέτας και 8) Φίλιππο Μαραγκό για την συμμετοχή του και την συμβολή του σε θέματα συγγραφής και μορφοποίησης της εργασίας, καθώς και για γενικότερη ψυχική υποστήριξη κατά την εκπόνησή της.

Επιπλέον, ευχαριστούμε τους γονείς μας για την ηθική και οικονομική συνεισφορά τους, χωρίς την οποία δεν θα είχαμε φτάσει σε ένα τόσο ικανοποιητικό αποτέλεσμα.

Για την βοήθεια στην επιμέλεια του κειμένου και τις σχετικές διορθώσεις που υπέδειξαν, ευχαριστούμε την φίλη Νεφέλη Δώδου και τη γιαγιά Κλεοπάτρα Αμοιρίδου που υπέμειναν την δυσκολία ανάγνωσης ενός αναλυτικού τεχνικού κειμένου.

Τέλος, ευχαριστούμε και όλους / όλες τους διδάσκοντες / διδάσκουσες του τμήματος, που αυτά τα 6 χρόνια μας έδωσαν τα πολύτιμα εφόδια που χρειάζεται κάθε φαρέτρα νέου απόφοιτου ενός πολυτεχνικού τμήματος, ώστε να μπορεί στο μέλλον να ασκεί το επάγγελμα που θα επιλέξει, πάντα από την σκοπιά του μηχανικού.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	v
Περίληψη.....	vi
Abstract	vii
Ευχαριστίες	viii
Περιεχόμενα	ix
Κατάλογος Σχημάτων	xiii
Κατάλογος Πινάκων.....	xvi
Συνομογραφίες.....	xix
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή - Τα Περιβαλλοντικά Δεδομένα.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Περιβαλλοντικά Δεδομένα από τον αέρα – Μετεωρολογία.....	2
1.2.1 Ιστορική αναδρομή της μετεωρολογίας	2
1.2.2 Μετεωρολογικά Φαινόμενα.....	3
1.3 Περιβαλλοντικά Δεδομένα από το έδαφος.....	9
1.3.1 Θερμοκρασία Εδάφους.....	9
1.3.2 Υγρασία Εδάφους.....	12
1.4 Επίλογος.....	15
Κεφάλαιο 2ο: Όργανα Μέτρησης Περιβαλλοντικών Δεδομένων	16
2.1 Εισαγωγή.....	16
2.2 Παραδοσιακά Όργανα Μέτρησης Μετεωρολογικών Φαινομένων	16
2.2.1 Όργανα Μέτρησης Θερμοκρασίας	16
2.2.2 Όργανα Μέτρησης Υγρασίας	18
2.2.3 Όργανα Μέτρησης Ατμοσφαιρικής Πίεσης	20
2.2.4 Όργανα Μέτρησης Ανέμου	22
2.2.5 Όργανα Μέτρησης Ύψους Βροχής	24
2.3 Οι μετεωρολογικοί κλωβοί.....	25
2.3.1 Παραδοσιακοί μετεωρολογικοί κλωβοί Stevenson	25
2.3.2 Οι αυτόματοι σταθμοί καιρού στην εποχή του IoT	26
2.4 Όργανα Μέτρησης Χαρακτηριστικών Εδάφους	28
2.4.1 Όργανα Μέτρησης Θερμοκρασίας Εδάφους.....	28
2.4.2 Όργανα Μέτρησης Υγρασίας Εδάφους.....	30
2.5 Επίλογος.....	33

Κεφάλαιο 3ο:	IoT – Ενσωματωμένα Συστήματα	34
3.1	Εισαγωγή.....	34
3.2	Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT).....	34
3.2.1	Δομή Συσκευών στο IoT	34
3.2.2	Αρχιτεκτονική 3 Επιπέδων του IoT.....	35
3.2.3	Χαρακτηριστικά IoT εφαρμογών	36
3.2.4	Τυπικές IoT εφαρμογές – Τομείς επιρροής	37
3.3	Ενσωματωμένα Συστήματα.....	39
3.3.1	Γενική Δομή Ενσωματωμένων Συστημάτων	39
3.3.2	Ιστορική Αναδρομή Ενσωματωμένων Συστημάτων	41
3.3.3	Χαρακτηριστικά Ενσωματωμένων Συστημάτων	43
3.3.4	Τομείς Εφαρμογής των Ενσωματωμένων Συστημάτων	44
3.4	Επίλογος.....	44
Κεφάλαιο 4ο:	Επίπεδο Αντίληψης (Perception Layer).....	45
4.1	Εισαγωγή.....	45
4.2	Σύστημα Μέτρησης.....	45
4.3	Αναλογικοί Αισθητήρες	46
4.3.1	Ωμικός Αισθητήρας Θερμοκρασίας Εδάφους με χρήση NTC Thermistor	46
4.3.2	Χωρητικός Αισθητήρας Υγρασίας Εδάφους.....	53
4.4	Ψηφιακοί Αισθητήρες	59
4.4.1	Πλήρης αισθητήρας ατμόσφαιρας BME – 280	59
4.4.2	Ψηφιακός Αισθητήρας Hall Effect 3144 για την υλοποίηση ανεμοδείκτη, ανεμόμετρου και βροχόμετρου.....	62
4.5	Τμήμα Ισχύος	69
4.5.1	Επιλογή φωτοβολταϊκού πάνελ βάσει των ενεργειακών αναγκών.....	70
4.5.2	Επιλογή τύπου και μεγέθους μπαταρίας.....	72
4.5.3	Διαχειριστής Ηλιακής Ενέργειας (Solar Power Manager)	75
4.5.4	Τοποθέτηση στοιχείων ισχύος στην κατασκευή.....	78
4.6	Ο Μικροελεγκτής ESP32 ως καρδιά του συστήματος.....	80
4.6.1	Τεχνικά Χαρακτηριστικά του ESP32	80
4.6.2	Λόγοι επιλογής του ESP32.....	82
4.6.3	Η ανάγκη χρήσης εξωτερικού ADC.....	83
4.6.4	Η ανάγκη χρήσης Logic Level Shifter.....	85
4.6.5	Ενσωμάτωση LoRa module στο σύστημα.....	87
4.6.6	Ψηφιακά Πρότυπα Μεταφοράς Δεδομένων (I ² C & SPI)	89

4.6.7	Επεξήγηση Κώδικα Συστήματος Μέτρησης	92
4.7	Υλοποίηση Τυπωμένου Κυκλώματος Συστήματος Μέτρησης	104
4.7.1	Γενικές Πληροφορίες σχετικά με τα PCB	105
4.7.2	Διαδικασία Σχεδίασης του PCB με χρήση προγράμματος Altium Designer	106
4.7.3	Διαδικασία Παραγγελίας του PCB από εργοστάσιο παραγωγής.....	111
4.8	Επίλογος	113
Κεφάλαιο 5ο: Επίπεδο Δικτύου (Network Layer)		114
5.1	Εισαγωγή.....	114
5.2	Επιλογές Τεχνολογιών Μετάδοσης Δεδομένων μεταξύ Transmitter & Receiver.....	114
5.2.1	Γενικές Πληροφορίες για τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	114
5.2.2	Επιλεγμένη Υλοποίηση	116
5.3	Τοπολογίες Δικτύων.....	116
5.3.1	Δισημειακή Τοπολογία (Point – to – point).....	116
5.3.2	Τοπολογία Διαύλου (Bus)	117
5.3.3	Τοπολογία Αστέρα (Star)	117
5.3.4	Κατανεμημένη Τοπολογία (Mesh)	118
5.3.5	Τοπολογία Δέντρου (Tree)	119
5.4	Το LoRa για χρήση στο IoT	119
5.4.1	LoRa & LoRaWAN Protocol Stack	120
5.4.2	Συχνότητες Μετάδοσης	120
5.4.3	LoRa modules.....	121
5.4.4	Η χρήση του Sync Word.....	121
5.5	Υλοποίηση Υλικού Μέρους LoRa Receiver	122
5.6	Κώδικας για τον LoRa Receiver	123
5.6.1	Χρήση του ESP Wi-Fi Manager.....	125
5.7	Επίλογος	126
Κεφάλαιο 6ο: Επίπεδο Εφαρμογής (Application Layer)		127
6.1	Εισαγωγή.....	127
6.2	Συνοπτική Επισκόπηση του Επιπέδου Εφαρμογής	127
6.3	Επικοινωνία μεταξύ ESP32 Receiver και Backend.....	127
6.3.1	HTTP Request	127
6.4	Frontend	129
6.4.1	User Interface / User Experience (UI / UX)	130
6.4.2	Χρησιμοποιούμενες Τεχνολογίες στο Frontend	130
6.4.3	Οπτικοποίηση Δεδομένων (Data Visualization).....	131

6.5	Web API.....	132
6.6	Backend.....	133
6.6.1	Χρησιμοποιούμενες Τεχνολογίες στο Backend.....	134
6.6.2	Επεξεργασία Αιτήματος στο Backend.....	134
6.6.3	Αποθήκευση Δεδομένων	136
6.6.4	Αντιστοίχιση Τιμών σε Μεταβλητές.....	137
6.7	Βάση Δεδομένων (Database)	138
6.7.1	Χρησιμοποιούμενη Τεχνολογία για τη Βάση Δεδομένων.....	138
6.7.2	Αποθήκευση στη βάση δεδομένων.....	138
6.7.3	Διάγραμμα Σχέσεων Οντοτήτων (Entity – Relationship Diagram / ER)	139
6.7.4	Διαχειριστικός Πίνακας (CRUD Admin Panel).....	142
6.7.5	Εξαγωγή Δεδομένων από τη βάση	143
6.8	Επίλογος.....	147
Κεφάλαιο 7ο: Λειτουργία Γραφικής Διεπαφής Συστήματος.....		148
7.1	Εισαγωγή.....	148
7.2	Γενικές Πληροφορίες για τη δομή της Διεπαφής.....	148
7.3	User Interface / User Experience (UI / UX).....	148
7.3.1	Κεντρική Σελίδα (Homepage).....	149
7.3.2	Οθόνη Επιλογής Κόμβου (Node Selection)	150
7.3.3	Κύρια Οθόνη Κόμβου	152
7.3.4	Admin CRUD Panel	157
7.3.5	Σύνοψη Λειτουργιών Admin Panel.....	159
7.4	Επίλογος.....	160
Κεφάλαιο 8ο: Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης.....		161
8.1	Εισαγωγή.....	161
8.2	Συμπεράσματα από την δοκιμή λειτουργίας.....	161
8.3	Προτάσεις Βελτίωσης	163
8.3.1	Βελτιώσεις στο επίπεδο αντίληψης	163
8.3.2	Βελτιώσεις στο επίπεδο δικτύου.....	165
8.3.3	Βελτιώσεις στο επίπεδο εφαρμογής	166
8.4	Επίλογος.....	167
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		168
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Σχηματικά Κυκλωμάτων		176
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Παράθεση Υλοποιημένου Κώδικα		182

Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 1.1: Ο σταθμός εδάφους της EUMETSAT στο Καβούρι Αττικής [3].....	2
Εικόνα 1.2: Δείκτης Θερμότητας του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών [7]	4
Εικόνα 1.3: Γράφημα συσχέτισης ατμοσφαιρικής πίεσης και υψομέτρου [9].....	5
Εικόνα 1.4: Χάρτης ισοβαρών καμπυλών ατμοσφαιρικής πίεσης Ευρωπαϊκής ηπείρου [10].....	6
Εικόνα 1.5: Αντιστοίχιση και επεξήγηση της κλίμακας Beaufort [12].....	7
Εικόνα 1.6: Παραδείγματα χειμερινών συνθηκών υετού [1]	8
Εικόνα 1.7: Γραφήματα μεταβολής θερμοκρασίας εδάφους σε σχέση:.....	10
Εικόνα 1.8: Γράφημα συσχέτισης θερμοκρασίας εδάφους με χημικές & μικροβιολογικές διαδικασίες [18]	11
Εικόνα 1.9: Καταστάσεις σχετικής υγρασίας εδάφους από αριστερά προς τα δεξιά:.....	12
Εικόνα 1.10: Κατηγοριοποίηση εδαφών βάσει υψής από USDA [22].....	13
Εικόνα 1.11: Γράφημα συσχέτισης ογκομετρικής περιεκτικότητας νερού σε διαφορετικά είδη εδαφών με τα σημεία FC και PWP [23]	14
Εικόνα 2.1: Τυπικό Υδραργυρικό Θερμόμετρο για μετεωρολογική πρόγνωση [24].....	16
Εικόνα 2.2: Ζεύγος Ακροβάθμιου Θερμόμετρου:.....	17
Εικόνα 2.3: Δείγμα χαρτιού θερμογράφου – υδρογράφου [30]	18
Εικόνα 2.4: Θεωρία Λειτουργίας Υγρομέτρου διά τριχών [32].....	19
Εικόνα 2.5: Θεωρία Λειτουργίας Ψυχρόμετρου [33].....	19
Εικόνα 2.6: Σύνθετη συσκευή θερμογράφου - υγρογράφου [34]	20
Εικόνα 2.7: Δομή Ανηροειδούς Βαρόμετρου [36].....	21
Εικόνα 2.8: Βαρογράφος [37]	21
Εικόνα 2.9: Δομή και Λειτουργία Ανεμόμετρου Κυπέλλων [39]	22
Εικόνα 2.10: Απλός Μετεωρολογικός Ανεμοδείκτης [40].....	22
Εικόνα 2.11: Δομή και λειτουργία Ανεμογράφου με σωλήνες πίεσης Dines [41].....	23
Εικόνα 2.12: Δομή δεκαπλασιαστικού βροχόμετρου [42]	24
Εικόνα 2.13: Δομή βροχόμετρου ανατρεπόμενου κάδου [42]	25
Εικόνα 2.14: Ένας παραδοσιακός μετεωρολογικός κλωβός Stevenson [43].....	25
Εικόνα 2.15: Το εσωτερικό ενός κλωβού Stevenson [46].....	26
Εικόνα 2.16: Μετεωρολογικός σταθμός τύπου Davis Vantage Pro 2 [47]	27
Εικόνα 2.17: Κατασκευαστική δομή ενός RTD στοιχείου [50].....	29
Εικόνα 2.18: Διάφοροι τύποι θερμίστορ [52]	29
Εικόνα 2.19: Γράφημα σύγκρισης μεταβολής τιμών αντίστασης και θερμοκρασίας σε RTD, NTC και PTC θερμίστορ [53]	30
Εικόνα 2.20: Σύνοψη μεθόδου Βαρυμετρικής Περιεκτικότητας Ύδατος [54]	31
Εικόνα 2.21: Δομή αισθητήρα TDR [55].....	31
Εικόνα 2.22: Διάταξη αισθητήρων για α) χωρητική μέθοδο μέτρησης & b)μέθοδο FDR [54]	32
Εικόνα 2.23: Ωμικός αισθητήρας μέτρησης υγρασίας εδάφους [56].....	32
Εικόνα 3.1: Δομή διασύνδεσης στο IoT [72].....	35
Εικόνα 3.2: Αρχιτεκτονική 3 Επιπέδων στο IoT [73]	35
Εικόνα 3.3: Αρχιτεκτονική Επιπέδων του IoT συστήματος μέτρησης περιβαλλοντικών δεδομένων ..	38
Εικόνα 3.4: Γενική Δομή Ενσωματωμένου Συστήματος [74]	39
Εικόνα 3.5: Συστατικά Στοιχεία Υλικού & Λογισμικού ενός γενικού Ενσωματωμένου Συστήματος [75]	40
Εικόνα 3.6: Διεπαφή Χρήστη του συστήματος Apollo Guidance Computer [61]	41

Εικόνα 3.7: Εσωτερική δομή ο.κ. μικροεπεξεργαστή Intel 4004 (αριστερά)	42
Εικόνα 3.8: Εσωτερική δομή μικροελεγκτή TMS1000 [76].....	42
Εικόνα 4.1: Θεμελιώδης δομή συστήματος μέτρησης	45
Εικόνα 4.2: Το στέλεχος NTC θερμίστορ που χρησιμοποιεί ο αισθητήρας	46
Εικόνα 4.3: Γέφυρα Αντιστάσεων Wheatstone [78]	47
Εικόνα 4.4: Διατάξεις γέφυρας τροφοδοτούμενης από πηγή τάσης [78].....	47
Εικόνα 4.5: Κύκλωμα Μέτρησης Θερμοκρασίας με NTC θερμίστορ	49
Εικόνα 4.6: Αποτελέσματα Προσομοίωσης Κυκλώματος Μέτρησης Θερμοκρασίας με χρήση NTC θερμίστορ	51
Εικόνα 4.7: Δοκιμαστική Υλοποίηση του κυκλώματος αισθητήρα θερμοκρασίας με NTC θερμίστορ σε ράστερ	52
Εικόνα 4.8: Διάγραμμα Λειτουργίας Χωρητικού Αισθητήρα Υγρασίας Εδάφους.....	54
Εικόνα 4.9: Κύκλωμα Χωρητικού Αισθητήρα Υγρασίας Εδάφους.....	54
Εικόνα 4.10: Αποτελέσματα Προσομοίωσης Κυκλώματος Αισθητήρα Υγρασίας Εδάφους	55
Εικόνα 4.11: Υλοποίηση Κυκλώματος Αισθητήρα Υγρασίας Εδάφους.....	56
Εικόνα 4.12: Μοντέλο Ηλεκτροδίων Αισθητήρα Υγρασίας.....	57
Εικόνα 4.13: Υλοποιημένο τμήμα ηλεκτροδίων αισθητήρα υγρασίας εδάφους.....	57
Εικόνα 4.14: Εργαστηριακή διαδικασία βαθμονόμησης του αισθητήρα υγρασίας εδάφους.....	58
Εικόνα 4.15: Ολοκληρωμένο κύκλωμα BME - 280 [83]	59
Εικόνα 4.16: Απλοποιημένο Διάγραμμα Αισθητήρα BME - 280 [83]	60
Εικόνα 4.17: Breakout Board BME-280 της Adafruit [84].....	61
Εικόνα 4.18: Υλοποιημένος Κλωβός Stevenson.....	61
Εικόνα 4.19: Αναπαράσταση του φαινομένου Hall [85]	62
Εικόνα 4.20: Δομικό διάγραμμα αναλογικού αισθητήρα Hall [86].....	63
Εικόνα 4.21: Δομικό διάγραμμα ψηφιακού αισθητήρα Hall [86].....	63
Εικόνα 4.22: Αισθητήρας Hall A3144 [88].....	63
Εικόνα 4.23: Η βάση του ανεμοδείκτη σε φάση υλοποίησης	64
Εικόνα 4.24: Η τελική μορφή του υλοποιημένου ανεμοδείκτη	65
Εικόνα 4.25: Βάση Ανεμόμετρου.....	66
Εικόνα 4.26: Υλοποιημένο Ανεμόμετρο.....	67
Εικόνα 4.27: Σασί και δοχεία βροχόμετρου	68
Εικόνα 4.28: Υλοποιημένο Βροχόμετρο	68
Εικόνα 4.29: Δομικό διάγραμμα τμήματος ισχύος συστήματος	69
Εικόνα 4.30: Απλουστευμένη οπτική απεικόνιση φωτοβολταϊκού φαινομένου [89]	70
Εικόνα 4.31: Κύριοι τύποι PV πάνελ	71
Εικόνα 4.32: Διάφοροι τύποι και μεγέθη μπαταριών [92]	74
Εικόνα 4.33: Το Solar Power Manager DFR0559 [93].....	76
Εικόνα 4.34: Κύκλος φόρτισης μπαταρίας λιθίου από το DFR0559 [93].....	78
Εικόνα 4.35: Κλίση ηλιακού πάνελ και ηλιακή θέση [94].....	79
Εικόνα 4.36: Τοποθέτηση PV πάνελ στην κατασκευή με φορά προς Νότο	79
Εικόνα 4.37: Διάγραμμα Λειτουργιών μικροελεγκτή ESP32 [95].....	80
Εικόνα 4.38: Επεξήγηση Λειτουργίας Ακίδων του ESP32 [96]	81
Εικόνα 4.39: Γράφημα συσχέτισης ιδανικού με πραγματικό εσωτερικό ADC του ESP32 [100]	83
Εικόνα 4.40: Το ADS1015 module της Adafruit [101].....	84
Εικόνα 4.41: Η λογική του αμφίδρομου Logic Level Shifting [103].....	86
Εικόνα 4.42: Το module TXB0104 της Soldered Electronics [105].....	86

Εικόνα 4.43: Το module Level Converter της Soldered Electronics [106]	86
Εικόνα 4.44: Γράφημα συσχέτισης bandwidth και απόστασης κόμβων ασύρματων μεθόδων επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται στο IoT [108]	88
Εικόνα 4.45: Ολοκληρωμένο κύκλωμα τύπου SX1278 για χρήση με LoRa	88
Εικόνα 4.46: Ο διάλογος I ² C [110]	90
Εικόνα 4.47: Περιπτώσεις Χρήσης Προτύπου SPI [111]	91
Εικόνα 4.48: Διάγραμμα Ροής Προγράμματος Κόμβου Μέτρησης (Transmitter)	93
Εικόνα 4.49: Εισαγωγή βιβλιοθηκών και καθορισμός σταθερών λέξεων	94
Εικόνα 4.50: Καθορισμός Μεταβλητών προγράμματος	95
Εικόνα 4.51: Καθορισμός Εισόδων / Εξόδων και Έλεγχος I ² C συνδέσεων	96
Εικόνα 4.52: Ρυθμίσεις LoRa και έλεγχος SPI σύνδεσης	96
Εικόνα 4.53: Κύρια Ρουτίνα Προγράμματος (1)	97
Εικόνα 4.54: Κύρια Ρουτίνα Προγράμματος (2)	98
Εικόνα 4.55: Κύρια Ρουτίνα Προγράμματος (3)	98
Εικόνα 4.56: Κύρια Ρουτίνα Προγράμματος (4)	99
Εικόνα 4.57: Υπορουτίνα wind_speed_fucntion()	99
Εικόνα 4.58: Υπορουτίνα rain_depth()	99
Εικόνα 4.59: Υπορουτίνα ads_readings()	100
Εικόνα 4.60: Υπορουτίνα bme_readings()	101
Εικόνα 4.61: Υπορουτίνα wind_direction()	102
Εικόνα 4.62: Υπορουτίνα loraMegaString_create()	103
Εικόνα 4.63: Υπορουτίνα lora_packet_send()	104
Εικόνα 4.64: Υπορουτίνα empty_strings()	104
Εικόνα 4.65: Ανατομία ενός απλού PCB [113]	105
Εικόνα 4.66: Τμήμα της Multilayer απεικόνισης της πλακέτας από το Altium Designer. Διακρίνονται διακλαδώσεις γραμμών με αμβλείες γωνίες και pads σε σχήμα σταδίου.	108
Εικόνα 4.67: Δύο οπές via της πλακέτας	108
Εικόνα 4.68: Multilayer View του Altium Designer με χάραξη όλων των αγωγικών γραμμών της πλακέτας	108
Εικόνα 4.69: Multilayer προβολή του τελικού σχεδίου της πλακέτας με προβολή των Top και Bottom Copper Layer αντιστοίχως	109
Εικόνα 4.70: Δισδιάστατη Απεικόνιση της πλακέτας στο Altium Designer	110
Εικόνα 4.71: Τρισδιάστατη Απεικόνιση της πλακέτας στο Altium Designer	110
Εικόνα 4.72: Η πλακέτα που παραλάβαμε από το εργοστάσιο της εταιρείας JLCPCB	112
Εικόνα 4.73: Η πλακέτα μετά την κόλληση των υλικών	112
Εικόνα 4.74: Η ολοκληρωμένη κατασκευή σε φάση μέτρησης	113
Εικόνα 5.1: Στοιχειώδης δομή ενός Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων (WSN) [116]	114
Εικόνα 5.2: Μέση κατανάλωση ενέργειας στα WSN [117]	115
Εικόνα 5.3: Δισημειακή Τοπολογία Δικτύου [118]	116
Εικόνα 5.4: Τοπολογία Διαύλου [118]	117
Εικόνα 5.5: Τοπολογία Αστέρα [118]	118
Εικόνα 5.6: Κατανεμημένη Τοπολογία Δικτύου [118]	118
Εικόνα 5.7: Τοπολογία Δέντρου ενός δικτύου [118]	119
Εικόνα 5.8: Στοιβή πρωτοκόλλων για το LoRa [119]	120
Εικόνα 5.9: Υλοποιημένη διάτρητη πλακέτα του τμήματος Receiver	122
Εικόνα 5.10: Εκτυπωμένο κουτί για την πλακέτα του τμήματος Receiver	122

Εικόνα 5.11: Διάγραμμα Ροής Τμήματος Receiver	124
Εικόνα 5.12: Αρχική Οθόνη Wi-Fi Manager	126
Εικόνα 5.13: Επιλογή δικτύου από το Wi-Fi Manager	126
Εικόνα 6.1: Δομή πακέτου LoRa	128
Εικόνα 6.2: HTTP Response με κωδικό 202 (Status: Pending)	129
Εικόνα 6.3: HTTP Response με κωδικό 200 (Status: Success).....	129
Εικόνα 6.4: Απλουστευμένο Παράδειγμα λειτουργίας των τεχνολογιών HTML, CSS, JavaScript [123]	131
Εικόνα 6.5: Ρόλος του Web API στην επικοινωνία Frontend με Backend	133
Εικόνα 6.6: Χαρακτηριστικά της PHP [124]	134
Εικόνα 6.7: Τα πεδία του πίνακα της βάσης δεδομένων	138
Εικόνα 6.8: Δείγμα δεδομένων από πίνακα της βάσης	139
Εικόνα 6.9: Διάγραμμα Σχέσεων - Οντοτήτων για τη βάση δεδομένων του συστήματος.....	140
Εικόνα 7.1: Διάγραμμα Ροής Πλοήγησης Χρήστη στην ιστοσελίδα	149
Εικόνα 7.2: Κεντρική Σελίδα σε Ανοιχτόχρωμη (Light) προβολή	150
Εικόνα 7.3: Κεντρική Σελίδα σε Σκουρόχρωμη (Dark) προβολή	150
Εικόνα 7.4: Μενού Επιλογής Κόμβων σταθμού	151
Εικόνα 7.5: Κάρτες Πληροφορίας Χρήστη για λειτουργίες του συστήματος.....	151
Εικόνα 7.6: Κύρια Οθόνη Κόμβου.....	152
Εικόνα 7.7: Μενού Επιλογής Χρονικού Βάθους Γραφήματος	153
Εικόνα 7.8: Γράφημα Δεδομένων Κατεύθυνσης Ανέμου	154
Εικόνα 7.9: Επεκταμένη Προβολή Γραφήματος.....	154
Εικόνα 7.10: Διαδραστικός Μηχανισμός Προβολής Δεδομένων σε γράφημα συνεχών τιμών	155
Εικόνα 7.11: Διαδραστικός Μηχανισμός Προβολής Δεδομένων σε γράφημα διακριτών τιμών.....	155
Εικόνα 7.12: Προβολή γραφημάτων πλασματικού κόμβου «Μέσου Όρου Κόμβων»	156
Εικόνα 7.13: Κουμπί εξαγωγής δεδομένων	157
Εικόνα 7.14: Browser Prompt για αυθεντικοποίηση του admin	157
Εικόνα 7.15: Το Admin Panel της σελίδας	157
Εικόνα 7.16: Εικονίδιο ειδοποίησης στο Admin Panel.....	158
Εικόνα 7.17: Μήνυμα ειδοποίησης στο Admin Panel	158
Εικόνα 7.18: Browser prompt για εξουσιοδότηση σταθμού	158
Εικόνα 7.19: Μήνυμα επιβεβαίωσης προσθήκης σταθμού στο σύστημα	159
Εικόνα 7.20: Αναζήτηση σταθμών με χρήση γραμμής αναζήτησης.....	159
Εικόνα 7.21: Διάγραμμα Σύνοψης Λειτουργιών Διαχειριστικού Πίνακα Εφαρμογής	160
Εικόνα 8.1: Γράφημα Σύγκρισης Μετρήσεων Θερμοκρασίας.....	161
Εικόνα 8.2: Γράφημα Δοκιμαστικών Μετρήσεων Αισθητήρα Υγρασίας Εδάφους	162
Εικόνα 8.3: Συγκριτικό Γράφημα Πολυμερών ASA, ABS, PETG, PLA [125].....	165

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1: Ανεμολόγιο 16 ανέμων	7
Πίνακας 1.2: Κατηγοριοποίηση Βροχοπτώσεων βάσει παρατηρούμενου ύψους	8
Πίνακας 2.1: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Αισθητήρων σταθμού Davis Vantage Pro 2 [47].....	27

Πίνακας 2.2: Τιμές ειδικής αντίστασης και θερμικού συντελεστή κοινών μεταλλικών υλικών κατασκευής ωμικών στοιχείων [49].....	28
Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά LITTLEFUSE USP-10972 NTC Thermistor Probe.....	46
Πίνακας 4.2: Δεδομένα Τιμής Αντίστασης Θερμίστορ / Θερμοκρασίας.....	48
Πίνακας 4.3: Δεδομένα Τιμής Αντίστασης Θερμίστορ / Θερμοκρασίας μετά την επίδραση της αντίστασης γραμμικοποίησης R_p	49
Πίνακας 4.4: Δεδομένα Βαθμονόμησης Αισθητήρα Θερμοκρασίας με NTC θερμίστορ.....	53
Πίνακας 4.5: Δεδομένα Βαθμονόμησης Αισθητήρα Υγρασίας Εδάφους.....	59
Πίνακας 4.6: Βασικά Τεχνικά Χαρακτηριστικά Αισθητήρα BME – 280 [83].....	60
Πίνακας 4.7: Σύγκριση Χαρακτηριστικών τύπων PV πάνελ [90].....	71
Πίνακας 4.8: Ενεργειακές Απαιτήσεις συστημάτων IoT διαφορετικών πεδίων εφαρμογής [91].....	73
Πίνακας 4.9: Ενεργειακές Απαιτήσεις συστημάτων IoT ανάλογα με την τεχνολογία επικοινωνίας [91].....	73
Πίνακας 4.10: Ενεργειακές Απαιτήσεις συστημάτων IoT διαφορετικών πεδίων εφαρμογής [91].....	74
Πίνακας 4.11: Χαρακτηριστικά των τύπων SPM.....	76
Πίνακας 4.12: Τεχνικά Χαρακτηριστικά του DFR0559	77
Πίνακας 4.13: Συγκριτική Κατανάλωση Ενέργειας του ESP32 [98].....	82
Πίνακας 4.14: Τεχνικά Χαρακτηριστικά του ADS1015 [102].....	84
Πίνακας 4.15: Τεχνικά Χαρακτηριστικά του SX1278 [109]	89
Πίνακας 4.16: Αντιστοίχιση Ακίδων LoRa module και ESP32 για SPI επικοινωνία	89
Πίνακας 4.17: Συγκριτική Επισκόπηση προτύπων I ² C και SPI.....	92
Πίνακας 4.18: Κατάσταση Αισθητήρων Hall για την ανίχνευση κάθε ανέμου	103
Πίνακας 4.19: Σχεδιαστικές οδηγίες για εκτύπωση της πλακέτας	111
Πίνακας 5.1: Συγκριτική Παράθεση Χαρακτηριστικών Πρωτοκόλλων Ασύρματης Επικοινωνίας για WSN.....	115
Πίνακας 5.2: Χειροκίνητη Ανάθεση Τιμών SSID και Password για σύνδεση ESP32 με Wi-Fi	125
Πίνακας 5.3: Χρήση Εργαλείου Wi-Fi Manager	125
Πίνακας 6.1: Η συνάρτηση <code>httpsPostPlainText()</code>	128
Πίνακας 6.2: Καθορισμός endpoint για τα δεδομένα.....	128
Πίνακας 6.3: Ρύθμιση των προς αποστολή δεδομένων.....	128
Πίνακας 6.4: Ρουτίνα Αποστολής Δεδομένων	128
Πίνακας 6.5: Συνάρτηση <code>postSmart()</code> του αρχείου <code>graph.js</code>	132
Πίνακας 6.6: Δημιουργία του γραφήματος με το αρχείο <code>graph.js</code>	132
Πίνακας 6.7: Συνάρτηση <code>trim(file_get_contents("php://input"))</code> ;.....	135
Πίνακας 6.8: Καταχώρηση νέου σταθμού (<code>stations_approve.php</code>).....	135
Πίνακας 6.9: Απόρριψη σταθμού (<code>stations_reject.php</code>)	135
Πίνακας 6.10: Parsing Δεδομένων πακέτου (<code>post_data.php</code>).....	136
Πίνακας 6.11: Δημιουργία πίνακα στη βάση για νέο σταθμό (<code>post_data.php</code>).....	136
Πίνακας 6.12: Εισαγωγή σταθμού στη βάση (<code>post_data.php</code>)	137
Πίνακας 6.13: Ενημέρωση Δεδομένων πίνακα (<code>post_data.php</code>)	137
Πίνακας 6.14: Αντιστοίχιση Δεδομένων σε Μεταβλητές (<code>post_data.php</code>)	137
Πίνακας 6.15: Ορισμός πεδίων πίνακα βάσης δεδομένων (MySQL).....	139
Πίνακας 6.16: Ρυθμίσεις στο αρχείο <code>.htaccess</code>	143
Πίνακας 6.17: Συνάρτηση <code>exportCsvBtn()</code> του αρχείου <code>graph.js</code>	144
Πίνακας 6.18: Αντιστοίχιση του <code>n_name</code> που επιλέγεται με καταχωρημένο σε βάση (<code>export_data.php</code>).....	144

Πίνακας 6.19: Αρχικοποίηση αρχείου CSV (export_data.php)	145
Πίνακας 6.20: Δομή Ελέγχου Ονόματος Κόμβου (export_data.php)	145
Πίνακας 6.21: Ενσωμάτωση εγγραφών βάσης στο αρχείο CSV (export_data.php)	146

Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΠΙΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
IoT	Internet of Things
Ε.Α.Α.	Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών
Ε.Μ.Υ.	Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία
Η.Π.Α.	Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής
Ε.Σ.Σ.Δ.	Ένωση Σοβιετικών Σοσιαλιστικών Δημοκρατιών
EUMETSAT	Ευρωπαϊκός Οργανισμός για την εκμετάλλευση των Μετεωρολογικών Δορυφόρων
SI	Διεθνές Σύστημα Μονάδων
ESDAC	European Soil Data Center
USDA	United States Department of Agriculture
GWC	Gravimetric Water Content
VWC	Volumetric Water Content
RTD	Resistance Temperature Detectors
NTC	Negative Temperature Coefficient
PTC	Positive Temperature Coefficient
TDR	Time Domain Reflectometry
FDR	Frequency Domain Reflectometry
IoT	Internet of Things
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
FPGA	Field Programmable Gate Array
RTOS	Real – Time Operating Systems
AGC	Apollo Guidance Computer
PLC	Programmable Logical Controller
AI	Artificial Intelligence
ML	Machine Learning
MRI	Magnetic Resonance Imaging
CT	Computerized Tomography
CMRR	Common Mode Rejection Ratio
SR	Slew Rate

AWG	American Wire Gauge
SMD	Solder Mount Device
I ² C	Inter – Integrated Circuit
SPI	Serial Peripheral Interface
PLA	Polylactic Acid
SIP	Single – In Package
RPM	Revolutions Per Minute
PV	Photovoltaic
SPM	Solar Power Manager
TFSC	Thin Film Solar Cells
CPU	Central Processing Unit
RAM	Random Access Memory
ROM	Read Only Memory
RTC	Real Time Clock
GPIO	General Purpose Input / Output
ADC	Analog to Digital Converter
PGA	Programmable Gain Amplifier
LoRa	Long Range
AM	Amplitude Modulation
FM	Frequency Modulation
THT	Through – Hole Technology
SMD	Surface Mount Devices
HASL	Hot Air Solder Leveling
ENIG	Electroless Nickel Immersion Gold
WSN	Wireless Sensor Network
ETSI	European Telecommunication Standards Institute
ISP	Internet Service Provider
HTML	Hyper Text Markup Language
CSS	Cascading Style Sheets
UI	User Interface
UX	User Experience
UI/UX	User Interface / User Experience
API	Application Programming Interface

PHP	HyperText Pre Processor
RDBMS	Relational Data Base Management System
SQL	Structured Query Language
ER	Entity – Relationship
PK	Primary Key
CSV	Comma – Separated Values
BOM	Byte Order Mark
ASA	Acrylonitrile Styrene Acrylate
PETG	Polyethelene Terephthalate Glycol
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή - Τα Περιβαλλοντικά Δεδομένα

1.1 Εισαγωγή

Οι δραστηριότητες των ανθρώπων εξαρτώνται και επηρεάζονται άμεσα από το φυσικό περιβάλλον στο οποίο ζουν, γεγονός που ισχύει από τα αρχαία χρόνια μέχρι και τις μέρες μας. Τα διάφορα φυσικά φαινόμενα εξιτάρουν τον άνθρωπο από την αυγή της ύπαρξης του. Τρανταχά παραδείγματα που επικυρώνουν τον ισχυρισμό αυτό υπάρχουν αμέτρητα στην ελληνική μυθολογία. Ο παραλληλισμός των φυσικών φαινομένων με θεϊκά πρόσωπα ή καταστάσεις (λ.χ. ο συσχετισμός των κεραυνών με την οργή του Δία και οι «Αλκυονίδες μέρες») δείχνουν την κατωτερότητα που αισθάνεται ο άνθρωπος απέναντι στη φύση, όπως και την ανάγκη του να γνωρίζει όσο περισσότερα είναι ικανός γι' αυτά. Έτσι, από εκείνα τα χρόνια ο άνθρωπος ξεκίνησε την αναζήτηση μεθόδων που θα τον βοηθούσαν να ερμηνεύσει τα φυσικά φαινόμενα και να μπορεί να προγραμματίζει τις δραστηριότητές του. [1]

Με την πάροδο των χρόνων και την πρόοδο της επιστήμης και της τεχνολογίας, η ανάγκη αυτή καθώς και οι μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν γύρω από αυτήν, πέρασαν από την απλή παρατήρηση του περιβάλλοντος σε έναν επιστημονικό κλάδο, αυτόν των επιστημών περιβάλλοντος, ο οποίος ασχολείται με την συσχέτιση όλων των φυσικών, χημικών, βιολογικών, οικονομικών και κοινωνικών συνιστωσών του φυσικού περιβάλλοντος.

Όπως και σε όλες τις άλλες επιστήμες, έτσι και στις επιστήμες περιβάλλοντος αρχή για την δημιουργία θέσεων είναι η συγκέντρωση δεδομένων μέσω των οποίων γίνεται η εξαγωγή συμπερασμάτων. Τα δεδομένα αυτά καλούνται περιβαλλοντικά δεδομένα.

Τα περιβαλλοντικά δεδομένα που αντλούμε από το φυσικό περιβάλλον προέρχονται από τον αέρα, το νερό ή το έδαφος. Τα δεδομένα που αντλούμε από τον αέρα βρίσκουν χρήση στους κλάδους της μετεωρολογίας, σχετικά με τις καιρικές προγνώσεις, καθώς και για την ατμοσφαιρική ρύπανση. Τα δεδομένα του νερού προσφέρουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τη σύσταση και τη μόλυνση των υδάτων, αλλά και για την ζωή που αναπτύσσεται σε υδάτινα οικοσυστήματα. Τέλος, τα δεδομένα που συλλέγουμε από το έδαφος βρίσκουν ποικιλία χρήσεων σε όλους τους κλάδους της επιστήμης.

Στην πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας θα ασχοληθούμε με συλλογή και επεξεργασία δεδομένων που λαμβάνονται από τον ατμοσφαιρικό αέρα για μετεωρολογικές προγνώσεις και από το έδαφος για ζητήματα που αφορούν σε κλάδους της γεωπονίας. Εν τέλει θα δημιουργήσουμε μία Internet of Things (IoT) εφαρμογή σταθμού συλλογής περιβαλλοντικών δεδομένων.

Αρχικά, στο 1^ο Κεφάλαιο θα κάνουμε μία επεξήγηση των περιβαλλοντικών δεδομένων που θα συλλέξουμε με το σύστημα μας. Στη συνέχεια, στο 2^ο Κεφάλαιο θα δούμε τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιούνται στους μετεωρολογικούς σταθμούς για τις μετρήσεις που θα πραγματοποιήσουμε, ενώ στο 3^ο Κεφάλαιο θα γίνει επεξήγηση των συστατικών των IoT εφαρμογών και των ενσωματωμένων συστημάτων. Έπειτα, στο 4^ο Κεφάλαιο θα γίνει αναλυτική παρουσίαση της σχεδίασης και υλοποίησης των αισθητήρων και της κατασκευής που θα χρησιμοποιηθούν στην εφαρμογή μας, δηλαδή μία ανάλυση του υλικού επιπέδου. Στο 5^ο Κεφάλαιο θα αναφερθούμε αντιστοίχως στο ενδιάμεσο επίπεδο, αυτό της δικτύωσης, όπου θα αναφερθούμε στα πρωτόκολλα επικοινωνίας που χρησιμοποιήσαμε στην εφαρμογή μας. Στο 6^ο Κεφάλαιο, θα γίνει μία αναφορά στην προεπεξεργασία των δεδομένων και την αποθήκευσή τους σε βάση, ενώ στο 7^ο Κεφάλαιο θα αναφερθούμε στον σχεδιασμό της ιστοσελίδας με γνώμονα τον τελικό χρήστη. Τέλος, στο 8^ο Κεφάλαιο η εργασία κλείνει με προτάσεις για επέκταση – βελτίωσή της.

1.2 Περιβαλλοντικά Δεδομένα από τον αέρα – Μετεωρολογία

1.2.1 Ιστορική αναδρομή της μετεωρολογίας

Τα περιβαλλοντικά δεδομένα που αντλούνται από τον ατμοσφαιρικό αέρα, όπως προαναφέρθηκε, έχουν συσχέτιση κατά κόρον με την επιστήμη της μετεωρολογίας. Από την αρχαιότητα, ο όρος συσχετίστηκε με τη μελέτη του αέρα, του νερού και του σεισμού από τον Αριστοτέλη, ενώ το έργο του «Μετεωρολογικά» αποτέλεσε τη βάση της επιστήμης της μετεωρολογίας μέχρι και τον 17^ο αιώνα. [1]

Συστηματικά, η καταγραφή δεδομένων και μετεωρολογικών παρατηρήσεων γίνεται από την εποχή της 1^{ης} Βιομηχανικής Επανάστασης, συγκεκριμένα από το 1820, όταν και αρχίζει η συλλογή μετεωρολογικών παρατηρήσεων, καθώς και η επεξεργασία τους. Στην χώρα μας, δεδομένα συλλέγονται από το 1839 όταν ξεκινούν οι μετεωρολογικές μετρήσεις από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (Ε.Α.Α.), ενώ από το 1890 πραγματοποιείται η πρώτη απόπειρα δημιουργίας δικτύου μετεωρολογικών σταθμών, με μόλις 7 σταθμούς σε όλη τη χώρα.

Το 1931, αποτελεί μία ακόμη χρονιά ορόσημο για την επιστήμη της μετεωρολογίας στην Ελλάδα, καθώς ξεκινά η λειτουργία της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (Ε.Μ.Υ.) ως κρατικής υπηρεσίας υπαγόμενη στο Γενικό Επιτελείο Αεροπορίας. Αποστολή της είναι η παροχή μετεωρολογικής υποστήριξης επ' ωφελεία της Εθνικής Άμυνας, της Εθνικής Οικονομίας και του Κοινωνικού συνόλου της χώρας. [2] Η συγκεκριμένη υπηρεσία διαθέτει δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών από τους οποίους συλλέγονται παρατηρήσεις και στη συνέχεια εκδίδει μετεωρολογικά δελτία, τα οποία παραμένουν και η κύρια πηγή μετεωρολογικής ενημέρωσης της χώρας μέχρι και σήμερα.

Σημαντική συμβολή στο έργο της μετεωρολογίας ήταν και οι νεότερες ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές, όπως το ραντάρ, μία εφεύρεση της περιόδου του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, αλλά και μέσα στη δεκαετία του 1960, όταν εκτοξεύθηκαν οι πρώτοι μετεωρολογικοί δορυφόροι (TIROS 1 από τις Η.Π.Α. και COSMOS από την Ε.Σ.Σ.Δ.). Στην Ευρώπη, το 1986 ιδρύθηκε ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός για την εκμετάλλευση των Μετεωρολογικών Δορυφόρων (European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites / EUMETSAT), στον οποίο συμμετέχει και η ΕΜΥ. Έτσι, της δίνεται η δυνατότητα χρήσης των δεδομένων από τους δορυφόρους πολικής τροχιάς που διαθέτει η EUMETSAT, όπως επίσης και τον έναν εκ των πέντε κύριων σταθμών εδάφους του οργανισμού, ο οποίος βρίσκεται στην τοποθεσία Καβούρι έξω από το μητροπολιτικό σύμπλεγμα των Αθηνών. [2]



Εικόνα 1.1: Ο σταθμός εδάφους της EUMETSAT στο Καβούρι Αττικής [3]

1.2.2 Μετεωρολογικά Φαινόμενα

Μετεωρολογικά φαινόμενα ονομάζονται οι φυσικές καταστάσεις που λαμβάνουν χώρα εντός της ατμόσφαιρας που περιβάλλει τον πλανήτη. Στη σύγχρονη μελέτη της μετεωρολογίας, τα φαινόμενα αυτά έχουν εξηγηθεί μέσω παρατηρήσεων. Υπάρχει μία εκτενής λίστα των σημαντικότερων μετεωρολογικών φαινομένων [4], ωστόσο ακρογωνιαίους λίθους αποτελούν τα στοιχεία θερμοκρασίας ατμόσφαιρας, υγρασίας ατμόσφαιρας και ατμοσφαιρικής πίεσης, τα οποία καλούνται και «μετεωρολογικά στοιχεία». Παρακάτω γίνεται μία σύντομη αναφορά σε κάθε ένα από τα κύρια αυτά στοιχεία, καθώς και στα φαινόμενα για τα οποία συλλέγουμε μετρήσεις στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας.

1.2.2.1 Θερμοκρασία Ατμόσφαιρας

Ως θερμοκρασία ατμόσφαιρας θεωρούμε την θερμοκρασία που έχει ο ατμοσφαιρικός αέρας πάνω από μία δεδομένη περιοχή. Η θερμοκρασία είναι ο βασικότερος συντελεστής που καθορίζει το κλίμα και επομένως και τις κοινωνικές και οικονομικές δραστηριότητες των ανθρώπων που ζουν σε κάθε περιοχή. Η μέτρηση της θερμοκρασίας γίνεται πάντα με αναφορά μία δεδομένη περιοχή που μπορεί να είναι μεγάλης ή μικρής έκτασης, στην περίπτωση των μετεωρολογικών δεδομένων, νοείται η θερμοκρασία αέρα γύρω από τον σταθμό.

Η θέρμανση του ατμοσφαιρικού αέρα είναι κατά κύριο λόγο αποτέλεσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην ατμόσφαιρα και επιπλέον από την επιφάνεια του εδάφους που θερμαίνεται επίσης απ' τις ηλιακές ακτίνες, ωστόσο σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό απ' ότι οι αέριες μάζες της ατμόσφαιρας. Αυτός είναι και ο λόγος που τα κατώτερα ατμοσφαιρικά σώματα είναι θερμότερα των υπερκειμένων. [4]

Μονάδα μέτρησης της θερμοκρασίας στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI), το οποίο χρησιμοποιείται στην Ευρωπαϊκή Ένωση είναι ο βαθμός Kelvin (°K)[5], ωστόσο συχνότερη μονάδα που χρησιμοποιείται στην πράξη στα περισσότερα μετεωρολογικά δελτία παγκοσμίως είναι ο βαθμός Κελσίου (Celsius, °C), με την εξαίρεση 6 χωρών που χρησιμοποιούν την κλίμακα βαθμών Φαρενάιτ (Fahrenheit, °F). Η κλίμακα βαθμών Κελσίου ορίζεται με σημείο 0 την μετατροπή του νερού σε πάγο και με σημείο 100 την μετατροπή του νερού σε υδρατμούς. Η αντιστοίχιση της κλίμακας Κελσίου με την κλίμακα Κέλβιν είναι γραμμική, και δίνεται απ' τη σχέση (1.1), ενώ η αντιστοίχιση της κλίμακας Κελσίου με την κλίμακα Φαρενάιτ απ' την σχέση (1.2):

$$\text{Θερμοκρασία Kelvin} = \text{Θερμοκρασία Κελσίου} + 273^{\circ} \quad (1.1)$$

$$\text{Θερμοκρασία Fahrenheit} = 1,8 \times \text{Θερμοκρασία Κελσίου} + 32^{\circ} \quad (1.2)$$

1.2.2.2 Υγρασία ατμόσφαιρας

Υγρασία καλείται η παρουσία υδρατμών στον ατμοσφαιρικό αέρα, οι οποίες προέρχονται από την εξάτμιση υγρών επιφανειών, κυρίως των θαλασσών. Είναι μία ποσότητα που διαφοροποιείται κατά τόπο και κατά χρόνο, ενώ είναι απολύτως εξαρτώμενη και από την θερμοκρασία της ατμόσφαιρας. [1]

Απαραίτητο είναι να αναφέρουμε ότι υπάρχει μία διάκριση της ατμόσφαιρας σε απόλυτη και σχετική υγρασία. Ως απόλυτη υγρασία (absolute humidity) ορίζεται η μάζα των υδρατμών σε γραμμάρια που περιέχονται σε κάθε κυβικό μέτρο ατμοσφαιρικού αέρα (g/m^3). Η ικανότητα του αέρα να συγκρατεί μεγάλη ή μικρή ποσότητα υδρατμών είναι ανάλογη της θερμοκρασίας. Έτσι, για κάθε δεδομένη θερμοκρασία, η μέγιστη τιμή των υδρατμών που μπορεί να συγκρατήσει η ατμόσφαιρα έχει μία μέγιστη τιμή, καθοριζόμενη από την εξίσωση Magnus – Tetens (1.3):

$$e_s(T) = 6,1094 \exp\left(\frac{17,625T}{T+243,04}\right) \quad (1.3)$$

όπου e_s είναι η μέγιστη τάση υδρατμών σε hPa ως συνάρτηση της θερμοκρασίας T της ατμόσφαιρας, μετρούμενη σε βαθμούς Κελσίου [5].

Ως σχετική υγρασία (relative humidity), από την άλλη πλευρά, είναι ο λόγος ποσότητας υδρατμών που περιέχει ο αέρας προς εκείνη την ποσότητα υδρατμών που μπορεί θεωρητικά να συμπεριλάβει σε αυτή τη θερμοκρασία και πίεση που βρίσκεται, μέχρις ότου κορεσθεί. Εκφράζεται ποσοστιαία, ως %w/w ή %v/v περιεκτικότητα και είναι αυτή που βλέπουμε στα δελτία καιρού.

Ατμοσφαιρικός αέρας που είναι κορεσμένος, δηλαδή περιέχει τη μέγιστη δυνατή ποσότητα υδρατμών έχει σχετική υγρασία 100%, ενώ ένας πλήρως ξηρός αέρας έχει σχετική υγρασία 0%. Όταν σε ένα μέρος υπάρχει σχετική υγρασία 100%, τότε παρατηρείται το φαινόμενο της ομίχλης. Το ενδιαφέρον σχετικά με τις μετρήσεις αυτές, είναι πως όταν η θερμοκρασία αέρος ελαττώνεται, η σχετική υγρασία του αυξάνει και αντιστρόφως.

Με βάση την μέτρηση σχετικής υγρασίας και την θερμοκρασία, οι μετεωρολόγοι έχουν δημιουργήσει έναν πίνακα, αυτόν της Εικόνας 1.2, ο οποίος ονομάζεται Δείκτης Θερμότητας (Heat Index) και αποτελεί ένα μέτρο του κατά πόσο η θερμοκρασία του αέρα σε συνδυασμό με τα ποσοστά σχετικής υγρασίας επηρεάζουν την αίσθηση άνεσης ή δυσφορίας του πληθυσμού, όπως και τις συνέπειες που μπορεί να υποστεί ο ανθρώπινος οργανισμός. [6]

ΔΕΙΚΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ - HEAT INDEX (C)

	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
42°	48	50	52	55	57	59	62	64	66	68	71	73	75	77	80	82
41°	46	48	51	53	55	57	59	61	64	66	68	70	72	74	76	79
40°	45	47	49	51	53	55	57	59	61	63	65	67	69	71	73	75
39°	43	45	47	49	51	53	55	57	59	61	63	65	68	68	70	72
38°	42	44	45	47	49	51	53	55	58	58	60	62	64	66	67	69
37°	40	42	44	45	47	49	51	52	54	56	58	59	61	63	65	66
36°	39	40	42	44	45	47	49	50	52	54	55	57	59	60	62	63
35°	37	39	40	42	44	45	47	48	50	51	53	54	56	58	59	61
34°	36	37	39	40	42	43	45	46	48	49	51	52	54	55	57	58
33°	34	36	37	39	40	41	43	44	46	47	48	50	51	53	54	55
32°	33	34	36	37	38	40	41	42	44	45	46	48	49	50	52	53
31°	32	33	34	35	37	38	39	40	42	43	44	45	47	48	49	50
30°	30	32	33	34	35	36	37	39	40	41	42	43	45	46	47	48
29°	29	30	31	32	33	35	36	37	38	39	40	41	42	43	45	46
28°	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43
27°	27	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
26°	26	26	27	28	29	30	31	32	33	34	34	35	36	37	38	39
25°	25	25	26	27	27	28	29	30	31	32	33	34	34	35	36	37
24°	24	24	24	25	26	27	28	28	29	30	31	32	33	33	34	35
23°	23	23	23	24	25	25	26	27	28	28	29	30	31	32	32	33
22°	22	22	22	22	23	24	25	25	26	27	27	28	29	30	30	31

< 29 C° Καθόλου δυσφορία
 30 - 34 C° Ελαφρά αίσθηση δυσφορίας
 35 - 39 C° Έντονη αίσθηση δυσφορίας : να αποφεύνεται η έντονη κόπωση
 40 - 45 C° Υψηλή αίσθηση δυσφορίας : να αποφεύνεται η κόπωση
 46 - 53 C° Σημαντικός κίνδυνος : να αποφεύγεται κάθε δραστηριότητα

Εικόνα 1.2: Δείκτης Θερμότητας του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών [7]

Από την παραπάνω εικόνα, για τα δεδομένα της χώρας μας εξάγουμε το συμπέρασμα ότι αισθανόμαστε άνετα όταν το καλοκαίρι η θερμοκρασία βρίσκεται σε ένα χώρο στους 27°C (με τη συμβολή κλιματισμού) και με μία σχετική υγρασία γύρω στο 55%, ενώ τον χειμώνα με την ίδια σχετική υγρασία, αισθανόμαστε άνετα στους 20 ~ 22°C.

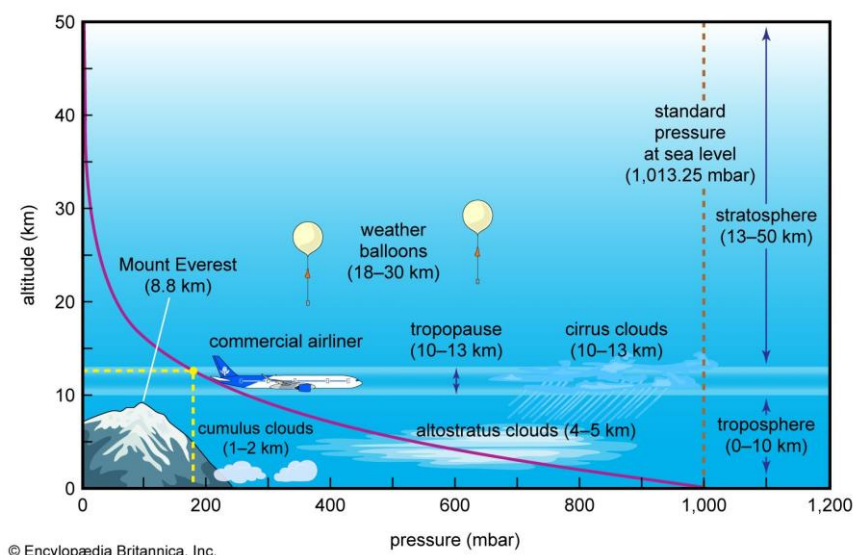
1.2.2.3 Ατμοσφαιρική Πίεση

Ατμοσφαιρική ή βαρομετρική καλείται η πίεση που ασκεί η ατμόσφαιρα με το βάρος της στην επιφάνεια της Γης. Δηλαδή, το λεπτό στρώμα αερίων που σχηματίζει την ατμόσφαιρα ασκεί δύναμη σε ό,τι

υπάρχει εντός αυτής. Αυτός είναι και ο λόγος που το νερό και τα αέρια στην επιφάνεια της γης δεν δραπετεύουν στο διάστημα. [8]

Στην επιφάνεια της Γης η ατμοσφαιρική πίεση ισούται κατά μέσο όρο με το βάρος μίας στήλης υδραργύρου ύψους 760mm, όπως αποδείχτηκε με το πείραμα του Evangelista Torricelli. Από το συγκεκριμένο πείραμα καθορίστηκε αρχικά η μονάδα μέτρησης της ατμοσφαιρικής πίεσης ως mmHg (χιλιοστά στήλης υδραργύρου).

Η τιμή της ατμοσφαιρικής πίεσης εξαρτάται από το ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας. Όσο μεγαλύτερο είναι το υψόμετρο του σημείου στο οποίο βρισκόμαστε, τόσο μικρότερο είναι και η ατμοσφαιρική πίεση γιατί είναι λιγότερη η ποσότητα αέρα που βρίσκεται πάνω από εμάς και μας πιέζει με το βάρος της. Στην επιφάνεια της θάλασσας λέμε ότι έχουμε πίεση 1 ατμόσφαιρας (1 atm). Αυτό είναι εμφανές αν παρατηρήσουμε και την παρακάτω Εικόνα 1.3, στην οποία φαίνεται η αντιστρόφως ανάλογη σχέση μεταξύ υψομέτρου και ατμοσφαιρικής πίεσης. Από εδώ συμπεραίνουμε ότι σε ύψος περίπου 16000 μέτρων, η ατμοσφαιρική πίεση έχει πέσει από τα 1000 millibar στα μόλις 100, επομένως σε εκείνο το σημείο το 90% περίπου της ατμόσφαιρας βρίσκεται κάτω από εμάς.



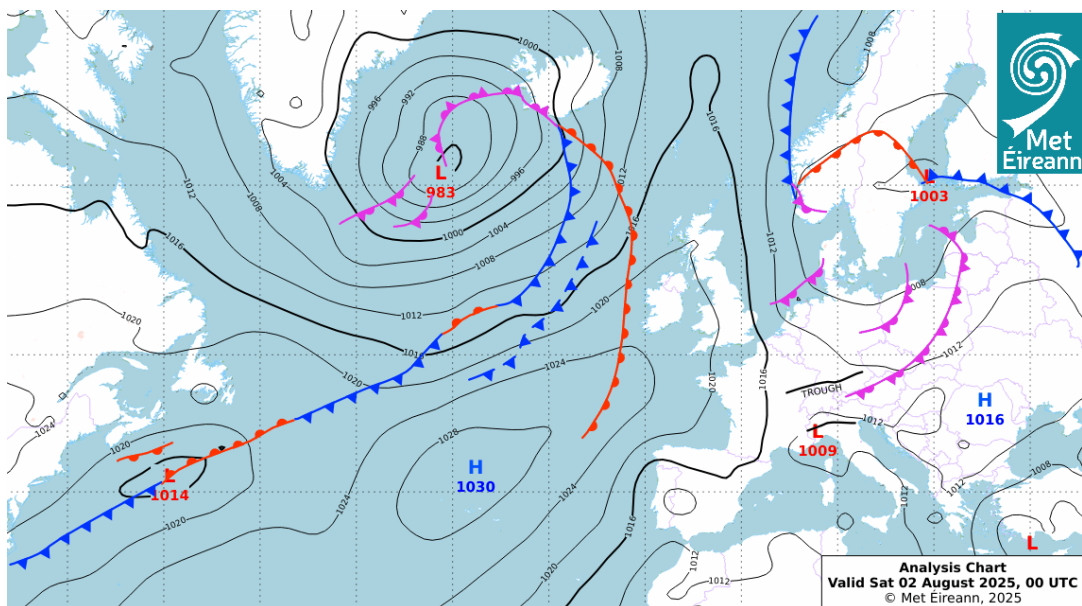
Εικόνα 1.3: Γράφημα συσχέτισης ατμοσφαιρικής πίεσης και υψομέτρου [9]

Σχετικά με τις μονάδες μέτρησης της ατμοσφαιρικής πίεσης, επικρατεί ένα σχετικό χάος. Στο SI, μονάδα μέτρησης της πίεσης είναι το Pascal (Pa), προς τιμήν του Blaise Pascal, ο οποίος ασχολήθηκε με την μελέτη της υδροστατικής πίεσης. [6] Ωστόσο, στην μετεωρολογία συνηθέστερη είναι η χρήση του millibar ως μονάδα μέτρησης, το οποίο είναι ίσο με 100 Pa, ενώ υπάρχει και η περίπτωση χρήσης του hectoPascal (hPa), όπου «hecto» σημαίνει εκατό, δηλαδή 1hPa = 100 Pa, δηλαδή υπάρχει ισοτιμία του millibar με το hectoPascal. Για παράδειγμα, στην ιστοσελίδα του meteo.gr που λειτουργεί με σταθμούς του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, η μέτρηση βαρομετρικής πίεσης εμφανίζεται σε hPa. Έτσι, η προαναφερθείσα πίεση στην επιφάνεια της θάλασσας είναι, με βάση τις διάφορες μονάδες:

$$1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} = 1013 \text{ millibar} = 1013 \text{ hPa.}$$

Μελετώντας τα δεδομένα ατμοσφαιρικών πιέσεων, οι μετεωρολόγοι κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι αν ο αέρας που βρίσκεται πάνω μας είναι θερμότερος, η πίεση είναι μικρή, ενώ αν είναι ψυχρότερος, η πίεση είναι μεγάλη. Επίσης, παρατηρείται ότι όταν ο αέρας κινείται προς τα κάτω, πιέζει τα αντικείμενα προς το έδαφος, ενώ αν κινείται προς τα πάνω δημιουργεί αναρρόφηση, δηλαδή η πίεση ελαττώνεται.

Τοποθετώντας όλα τα δεδομένα πιέσεων σε χάρτες, θα παρατηρήσουμε ότι υπάρχουν σημεία στα οποία υπάρχει την ίδια δεδομένη στιγμή η ίδια πίεση. Αν ενώσουμε αυτά τα σημεία με καμπύλες γραμμές, δημιουργούμε τις λεγόμενες «ισοβαρείς καμπύλες». Τέτοιου τύπου χάρτες είναι που δημοσιεύονται από τις μετεωρολογικές υπηρεσίες, όπως και αυτός της Εικόνας 1.4 που δείχνει τα δεδομένα πίεσης στην Ευρωπαϊκή Ήπειρο και μεγάλο μέρος του Ατλαντικού Ωκεανού για το Σάββατο 2 Αυγούστου του 2025, ώρα 00:00 UTC. Τα σημεία που σημειώνονται με ένδειξη «L» (LOW) είναι αυτά στα οποία παρατηρείται χαμηλό βαρομετρικό (στην προκειμένη περίπτωση ορίζεται κάτω από τα 1012 hPa) και εκεί επικρατούν συνθήκες βροχής, έντονου ανέμου, χαλαζιού, χαμηλών θερμοκρασιών ή και χιόνι. Το πόσο εκτεταμένα είναι τα φαινόμενα εξαρτάται πάντα από το «βάθος» του χαμηλού βαρομετρικού, δηλαδή πόσο χαμηλά είναι η πίεση στο κέντρο του. Αντιθέτως, τα σημεία που σημειώνονται με την ένδειξη «H» (HIGH) είναι σημεία με υψηλή βαρομετρική πίεση, στην περίπτωση του συγκεκριμένου χάρτη άνω των 1012 hPa, στα οποία επικρατεί ηλιοφάνεια και καθόλου άνεμος.



Εικόνα 1.4: Χάρτης ισοβαρών καμπυλών ατμοσφαιρικής πίεσης Ευρωπαϊκής ηπείρου [10]

1.2.2.4 Άνεμος

Ως άνεμοι ορίζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις των αερίων μαζών της ατμόσφαιρας που προκαλούνται από τις διαφορές της ατμοσφαιρικής πίεσης κατά τόπους. Από αρχαιοτάτων χρόνων, οι άνεμοι υπήρξαν υψίστης σημασίας για τις δραστηριότητες των ανθρώπων, κυρίως για την ναυσιπλοΐα, στην οποία ακόμη και σήμερα είναι καθοριστικός παράγοντας. [1] Επιπροσθέτως, τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει προσπάθειες και για την εκμετάλλευση του ανέμου ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας με την δημιουργία αιολικών πάρκων παγκοσμίως, ειδικά από την δεκαετία του 2000 που το κόστος εγκατάστασης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες μειώθηκε κατά 80%. [11]

Δύο είναι τα κύρια χαρακτηριστικά του ανέμου, η διεύθυνση και η έντασή του. Ως προς την διεύθυνση, ο άνεμος ορίζεται από το σημείο του ορίζοντα από το οποίο προέρχεται και όχι από αυτό στο οποίο κατευθύνεται. Η διάρεση των ανέμων σε 16 διευθύνσεις (μία ανά 22,5°) λέγεται ανεμολόγιο. Στον παρακάτω Πίνακα 1.1 παρατίθενται οι 16 αυτές διευθύνσεις ανέμων ονομαστικά, με τις μοίρες στις οποίες βρίσκονται, καθώς και το διεθνές σύμβολο με το οποίο αναγνωρίζονται, ενώ δίδεται και ιστορικά το όνομα που έχουν στην κοινή ελληνική γλώσσα. Με λοξά γράμματα εικονίζονται οι 4 βασικοί άνεμοι.

Πίνακας 1.1: Ανεμολόγιο 16 ανέμων

Όνομασία Ανέμου	Διεθνής Συμβολισμός	Μοίρες	Κοινό Ελληνικό Όνομα
<i>Βόρειος</i>	<i>N</i>	<i>360</i>	<i>Τραμουντάνα</i>
Βόρειο-Βόρειο-Ανατολικός	NNE	22,5	Γραιγοτραμουντάνα
Βορειοανατολικός	NE	45	Γραίγος
Ανατολικός-Βόρειο-Ανατολικός	ENE	67,5	Γραιγολεβάντες
<i>Ανατολικός</i>	<i>E</i>	<i>90</i>	<i>Λεβάντες</i>
Ανατολικός-Νότιο-Ανατολικός	ESE	112,5	Σιροκολεβάντες
Νοτιοανατολικός	SE	135	Σιρόκος
Νότιο-Νότιο-Ανατολικός	SSE	157,5	Ωστριασιρόκος
<i>Νότιος</i>	<i>S</i>	<i>180</i>	<i>Ωστρια</i>
Νότιο-Νότιο-Δυτικός	SSW	202,5	Ωστριογαρμπής
Νοτιοδυτικός	SW	225	Γαρμπής
Δυτικός-Νότιο-Δυτικός	WSW	247,5	Πουνεντογαρμπής
<i>Δυτικός</i>	<i>W</i>	<i>270</i>	<i>Πουνέντες</i>
Δυτικός-Βόρειο-Δυτικός	WNW	292,5	Πουνεντομαΐστρος
Βορειοδυτικός	NW	315	Μαΐστρος
Βόρειο-Βόρειο-Δυτικός	NNW	337,5	Μαΐστροτραμουντάνα

Αναφορικά με την ταχύτητα του ανέμου, βάσει του συστήματος SI, μονάδα μέτρησής της θα είναι τα m/s ή τα km/h [5], ωστόσο επειδή η χρήση της κλίμακας αυτής στην ναυσιπλοΐα δεν ήταν τόσο ευρεία, εξαιτίας της απουσίας ανεμομέτρων από τα πλοία, επικράτησε μία εμπειρική κλίμακα, βασιζόμενη σε οπτικές παρατηρήσεις, την οποία επινόησε ο Άγγλος Ναύαρχος Beaufort. Σε πολλά μετεωρολογικά δελτία, πέραν της τυπικής κλίμακας του SI, γίνεται και η χρήση της κλίμακας Beaufort. Η επεξήγηση και αντιστοίχιση της κλίμακας αυτής με την κλίμακα του SI αλλά και τις αντίστοιχες ναυτικές (σε κόμβους) δίνεται στην παρακάτω Εικόνα 1.5:

Force (Beaufort)	Wind speed			Description	Observed conditions	
	mph	km/h	knots		Sea	Land
0	<1	<1	<1	Calm	Like a mirror	Smoke rises vertically
1	1-3	1-5	1-3	Light air	Ripples	Wind motion visible in smoke
2	4-7	6-11	4-6	Light breeze	Small wavelets	Wind felt on exposed skin
3	8-12	12-19	7-10	Gentle breeze	Large wavelets	Leaves in constant motion
4	13-18	20-28	11-16	Moderate breeze	Small waves	Small branches begin to move
5	19-24	29-38	17-21	Fresh breeze	Moderate waves	Small trees begin to sway
6	25-31	39-49	22-27	Strong breeze	Large waves	Large branches in motion
7	32-38	50-61	28-33	Moderate gale	Sea heaps up	Whole trees in motion
8	39-46	62-74	34-40	Fresh gale	Moderately high waves	Small branches break
9	47-54	75-88	41-47	Strong gale	High waves	Larger branches break
10	55-63	89-102	48-55	Whole gale	Very high waves	Trees broken or uprooted
11	64-72	103-117	56-63	Storm	Exceptionally high waves	Widespread damage
12	>73	>118	>64	Hurricane	Sea completely white	Violence

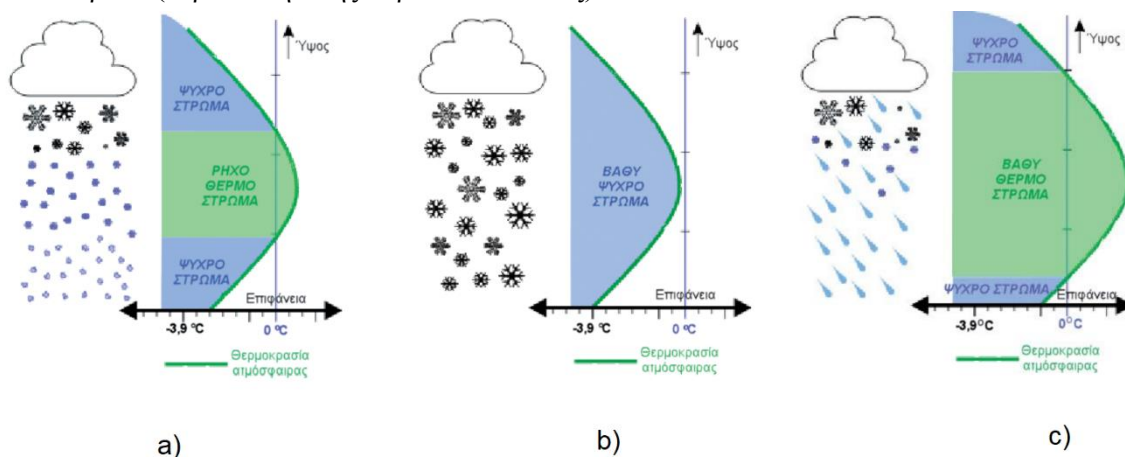
Εικόνα 1.5: Αντιστοίχιση και επεξήγηση της κλίμακας Beaufort [12]

1.2.2.5 Βροχή

Ο όρος βροχή ή βροχόπτωση αναφέρεται σε μία υγρή κατακρήμνιση και ανήκει στα φαινόμενα του υετού, δηλαδή της πτώσης προϊόντων ύδατος που προέρχονται από συμπύκνωση υδρατμών της ατμόσφαιρας. Πέραν της βροχής, κυριότερα είδη υετού είναι το χαλάζι και το χιόνι. [4]

Η βροχή σχηματίζεται όταν μόρια υδρατμών που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα δημιουργούν νέφη τα οποία συμπυκνώνονται σε κάποιο κέντρο συμπύκνωσης, συνήθως έναν κόκκο σκόνης, αρχίζοντας να σχηματίζουν σταγόνες. Όταν η μάζα των σταγόνων ξεπεράσει ένα όριο, τότε έλκεται από το βαρυτικό πεδίο της Γης και πέφτει στην επιφάνειά της. Εδώ υπάρχουν ενδεχόμενα:

- Αν ο αέρας ανάμεσα στα σύννεφα και το έδαφος είναι αρκετά ξηρός, η βροχή δεν φτάνει στο έδαφος.
- Αν το στρώμα αέρα ανάμεσα στη νέφωση και την επιφάνεια της Γης είναι αρκετά ψυχρό, μπορεί να παγώσουν, δημιουργώντας χαλάζι.
- Αν οι υδρατμοί συμπυκνώνονται σε θερμοκρασία ατμόσφαιρας υπό του μηδενός, σχηματίζονται παγοκρύσταλλοι χιονιού, οι οποίοι θα πέσουν στη Γη ως χιόνι, αν το ενδιάμεσο στρώμα αέρα μεταξύ νέφους και επιφάνειας είναι ψυχρό (περίπτωση b της παρακάτω εικόνας) ή ρηχό θερμό (περίπτωση a της παρακάτω εικόνας), ή ως χιονόνερο, αν το στρώμα αυτό είναι βαθύ (περίπτωση c της παρακάτω εικόνας).



Εικόνα 1.6: Παραδείγματα χειμερινών συνθηκών υετού [1]

Οι βροχοπτώσεις κατηγοριοποιούνται με κριτήριο την ένταση, λαμβάνοντας ως δεδομένο μέτρησης το ύψος βροχής (rain depth), το οποίο μετράται σε mm/h, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 1.2: Κατηγοριοποίηση Βροχοπτώσεων βάσει παρατηρούμενου ύψους

Κατηγορία Βροχόπτωσης	Παρατηρούμενο Ύψος	Σημειώσεις
Ασθενής	< 2 mm/h	Συνήθως φτάνει τα 0,5 mm/hr
Μέτρια	2 – 6 mm/h	
Ισχυρή	> 6 mm/h	Σε ξαφνικές μπόρες μεγάλης έντασης ξεπερνά τα 10 mm/h
Καταρρακτώδης	> 50 mm/h	Στατιστικά σπάνια, συνοδεύεται από πρόκληση πλημμύρας

Μονάδα μέτρησης που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της βροχής είναι το mm βροχής, δηλαδή τη βροχή που απέδωσε 1 kg /m² ή 1 m³ / στρέμμα. [4]

1.3 Περιβαλλοντικά Δεδομένα από το έδαφος

Ο όρος «Περιβαλλοντικά Δεδομένα Εδάφους» (Soil Data), αναφέρεται στις πληροφορίες που συλλέγονται και αναλύονται σχετικά με τις φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες του εδάφους. Τα δεδομένα αυτά περιλαμβάνουν σύσταση χώματος, ποσοστό σχετικής υγρασίας, επίπεδα pH, αλατότητα, γονιμότητα και πολλά ακόμη.

Χρησιμότητα για τα δεδομένα βρίσκεται σε πληθώρα επιστημών, όπως είναι η γεωπονία έτσι ώστε να βοηθή επιστήμονες και αγρότες να διαπιστώνουν ποια είναι η ορθότερη χρήση της γης τους και να βελτιώνουν τις τεχνικές αγροκαλλιέργειών. Ταυτοχρόνως χρησιμοποιούνται και σε χημικές αναλύσεις που στόχο έχουν να καθορίσουν την υγεία του εδάφους, την σύστασή του και την περιεκτικότητα σε θρεπτικές ουσίες. [13]

Μέχρι πρόσφατα το πρόβλημα των επιστημόνων που ασχολούνται με την μελέτη του εδάφους ήταν κυρίως ότι οι τεχνικές ανάλυσης των εδαφών παρέμεναν δαπανηρές, ενώ υπήρχε έλλειψη σχετικών πληροφοριών και δεδομένων, επομένως δεν καλύπτονταν οι απαιτήσεις δημιουργίας μοντέλων πιθανοτήτων, από τα οποία να μπορεί να γίνει εξαγωγή συμπερασμάτων. [14]

Με την ραγδαία ανάπτυξη των τεχνολογιών αισθητήρων ανάλυσης εδαφών (soil sensors), πλέον γίνεται συλλογή δεδομένων από διαφορετικά εδάφη, οι οποίες αποθηκεύονται σε εκτενείς βάσεις δεδομένων και παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σε όλα τα επιστημονικά μέτωπα. Στην πηγή [15] για παράδειγμα παρατίθενται οι βάσεις δεδομένων του ESDAC (European Soil Data Center), δηλαδή του Ευρωπαϊκού Κέντρου Δεδομένων Εδάφους.

Στα πλαίσια της δικής μας διπλωματικής εργασίας, τα δεδομένα που θα αποκομίσουμε είναι η θερμοκρασία των εδαφών πλησίον του συστήματος μας και το ποσοστό σχετικής υγρασίας, τη σημαντικότητα των οποίων θα δούμε στις επόμενες υποενότητες.

1.3.1 Θερμοκρασία Εδάφους

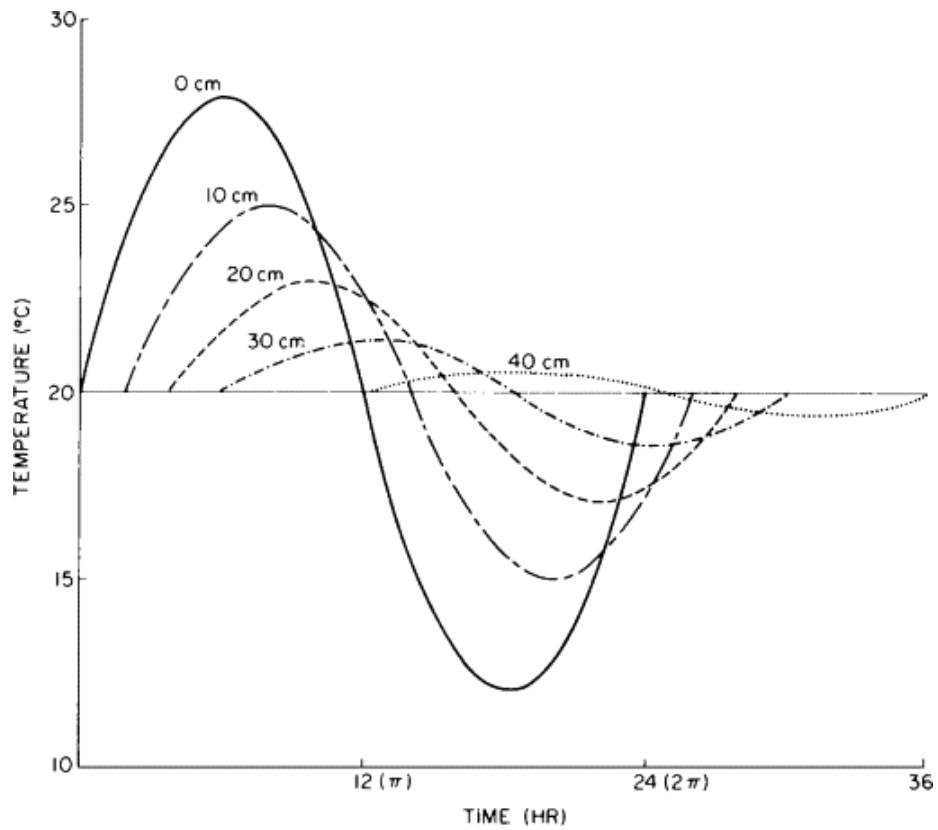
Με τον όρο θερμοκρασία εδάφους (soil temperature) εννοούμε την μετρούμενη τιμή θερμοκρασίας που λαμβάνεται από ένα δείγμα εδάφους σε δεδομένο βάθος και χρόνο. Η θερμοκρασία αυτή είναι μεταβαλλόμενη και καθοριζόμενη από διάφορους παράγοντες, οι οποίοι έχουν κυρίως να κάνουν λόγω της διεπαφής μεταξύ εδάφους και ατμόσφαιρας. Δηλαδή, η θερμοκρασία και οι μετεωρολογικές συνθήκες της ατμόσφαιρας (βροχοπτώσεις, ξηρασία, θερμά ή ψυχρά στρώματα αέρα) επηρεάζουν και τις συνθήκες του χώματος. [16]

Φυσικά, η θερμοκρασία του χώματος δεν επηρεάζεται μόνο από τις μεταβολές της ατμόσφαιρας, αλλά και από ίδιους παράγοντες, όπως είναι οι αλλαγές στην ανακλαστικότητα, την θερμική περιεκτικότητα και την αγωγή θερμότητας, καθώς το έδαφος είναι άλλοτε ξηρότερο και άλλοτε υγρότερο. Επιπλέον μεταβλητή σε όλες αυτές τις συναρτήσεις πέραν του χρόνου είναι και το βάθος της μέτρησης, ενώ καθοριστικό ρόλο παίζουν το ανάγλυφο της περιοχής αλλά και η εκάστοτε βλάστηση.

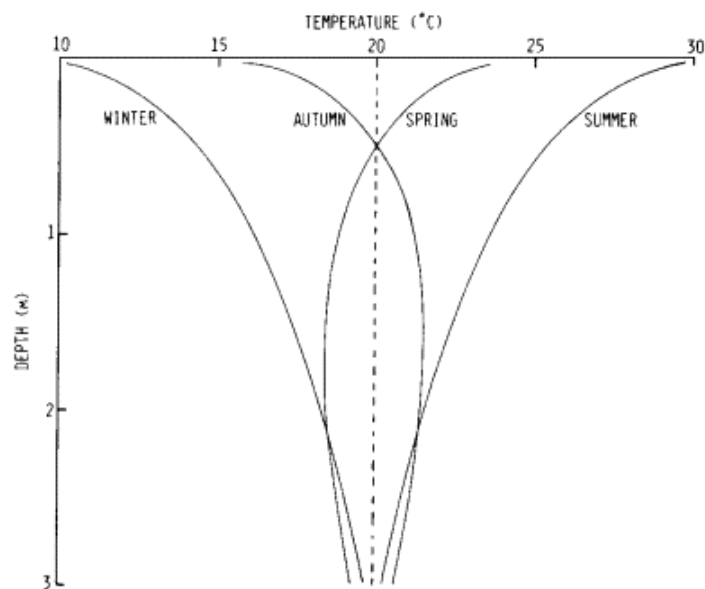
Στην Εικόνα 1.7 της επόμενης σελίδας παρουσιάζονται 2 γραφήματα που σχετίζονται με την μεταβολή της θερμοκρασίας του χώματος σε σχέση με το χρόνο και με το βάθος. Στο μεν γράφημα a) υπάρχουν οι καμπύλες μεταβολής θερμοκρασίας εντός ενός 24ώρου για διάφορα βάθη μέτρησης, από 0 ~ 40 cm, με την παραδοχή ότι η μεταβολή της θερμοκρασίας είναι καθαρή αρμονική, δηλαδή παρουσιάζει ημιτονική συμπεριφορά. Στο δε γράφημα b) υπάρχουν 4 καμπύλες που παρουσιάζουν την μεταβολή της

Κεφάλαιο 1

θερμοκρασίας του εδάφους για κάθε μία από τις 4 εποχές σε σχέση με το βάθος μέτρησης για μία περιοχή που δεν είναι παγόπληκτη.



(a)



(b)

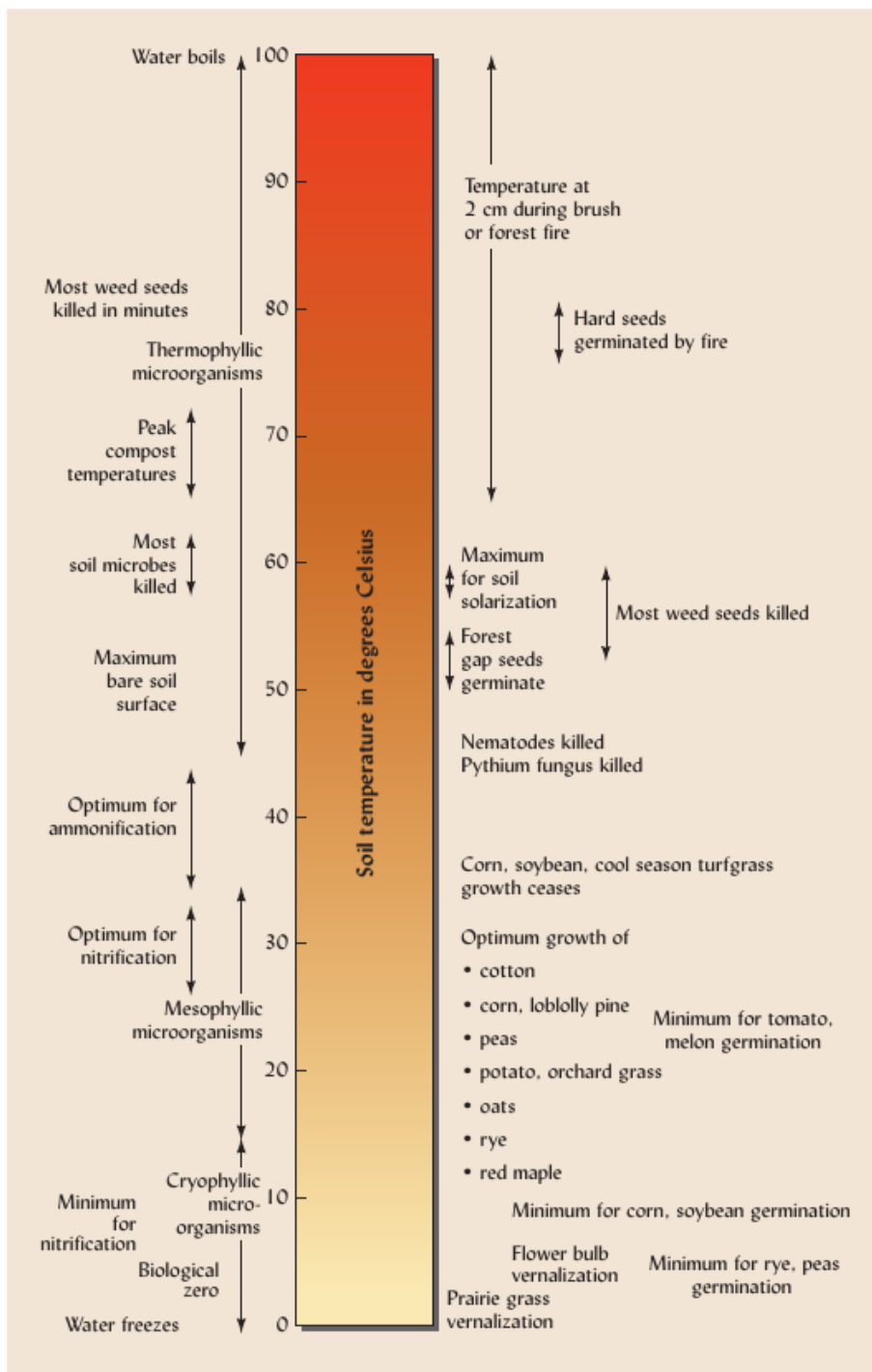
Εικόνα 1.7: Γραφήματα μεταβολής θερμοκρασίας εδάφους σε σχέση:

a) με το χρόνο & b) με το μετρούμενο βάθος [16]

Όπως πληροφορούμαστε και από την πηγή [17], η θερμότητα που προσπίπτει στην επιφάνεια του εδάφους απορροφάται σταδιακά όλο και βαθύτερα μέσα στο χώμα με έναν ρυθμό περίπου 2 cm/h, ενώ

κατά τις νυχτερινές ώρες η επιφάνεια του εδάφους αρχίζει να κρυώνει, επομένως η αποθηκευμένη στο χώμα θερμότητα απελευθερώνεται.

Η σημαντικότητα της θερμοκρασίας εδάφους σαν παράγοντας για την γεωργία και την διαχείριση γαιών είναι τεράστια, καθώς η ανάπτυξη των βιολογικών συστημάτων εξαρτάται πρωτίστως από την θερμοκρασία των εδαφών και κατ' επέκταση και από τις μετεωρολογικές συνθήκες. Επιπλέον ασκεί επιρροή σε όλες τις μικροβιολογικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στο έδαφος, όπως και τις χημικές διεργασίες. Στο γράφημα της Εικόνας 1.8 φαίνεται η συσχέτιση της θερμοκρασίας του εδάφους με τις διάφορες χημικές διεργασίες αλλά και τα είδη βλάστησης που αναπτύσσονται σε αυτό.



Εικόνα 1.8: Γράφημα συσχέτισης θερμοκρασίας εδάφους με χημικές & μικροβιολογικές διαδικασίες [18]

1.3.2 Υγρασία Εδάφους

Με τον όρο υγρασία εδάφους (soil moisture) εννοείται η περιεκτικότητα νερού εντός του εδάφους. Είναι ένα σχετικό μέγεθος εκφραζόμενο ποσοστιαία επί του όγκου του μετρούμενου δείγματος εδάφους ή επί του βάρους του δείγματος. Σημαντική παρατήρηση στον συγκεκριμένο ορισμό είναι ότι αυτή η ποσότητα νερού βρίσκεται στο ενεργό στρώμα του εδάφους, ήτοι σε μέγιστο βάθος 2m από την επιφάνεια. [19]

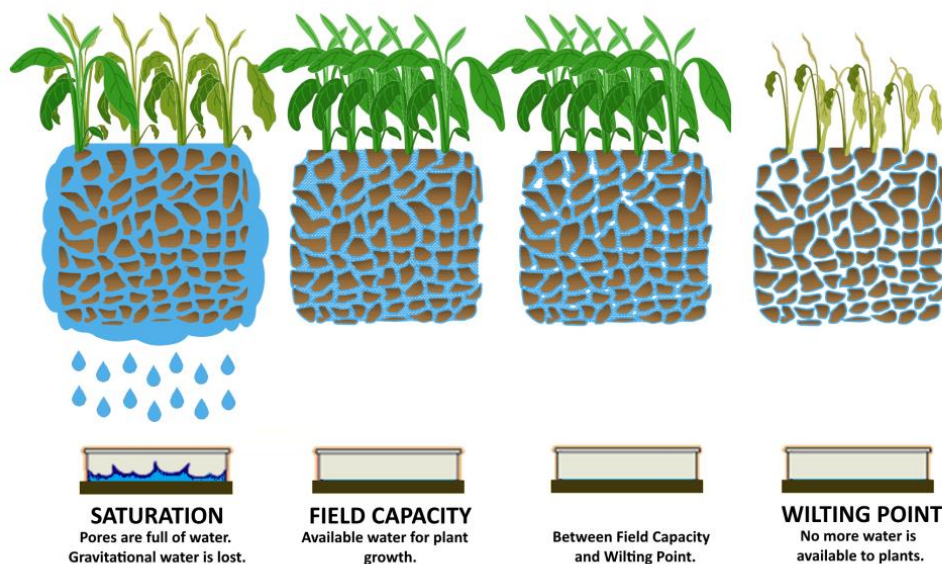
1.3.2.1 Επιρροή της υγρασίας εδάφους στα οικοσυστήματα

Η επιρροή της υγρασίας του εδάφους είναι σημαντική σε όλες τις πτυχές ενός οικοσυστήματος, καθώς πέραν της ποιότητας βλάστησης, καθορίζει και την διάσπαση της επιφανειακής ενέργειας του πλανήτη σε αισθητή και λανθάνουσα ανταλλαγή θερμότητας με την ατμόσφαιρα, συνδέοντας έτσι τα ισοζύγια νερού και ενέργειας με την θερμοκρασιακή κατάσταση του εδάφους και την σχετική υγρασία του. Επιπροσθέτως, αξιωσημείωτη είναι και η συσχέτισή του με τον καθορισμό του κλίματος μίας περιοχής, εφόσον σχετίζεται με την απορροφητική ικανότητα του εδάφους, την διάβρωση, την ξηρασία αλλά και την δημιουργία νεφώσεων. [19]

Σχετικά με τον παράγοντα της βλάστησης, η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό είναι αυτή που καθορίζει και την υγεία των φυτών ή την πορεία μίας καλλιέργειας, καθότι το νερό είναι ο βασικός διαλύτης μέσα στον οποίο βρίσκονται όλα τα θρεπτικά στοιχεία που απαιτούνται για την ανάπτυξη των φυτών. Επιπλέον αποτελεί ένα από τα βασικά στοιχεία της φωτοσύνθεσης, διαδικασίας απαραίτητης για την επιβίωση των έμβιων οργανισμών στον πλανήτη, ενώ τέλος προκαλεί την σπαργή (turgor) των φυτικών κυττάρων, βοηθώντας τα φυτά να διατηρούν σωστή θέση και ισορροπία.

1.3.2.2 Κατηγοριοποίηση καταστάσεων σχετικής υγρασίας εδάφους και συσχέτιση με τη βλάστηση

Η βασικότερη κατηγοριοποίηση των εδαφών βάσει της κατάστασης που βρίσκεται το νερό σε αυτά είναι σε 4 κατηγορίες, οι οποίες παρουσιάζονται και στην παρακάτω Εικόνα 1.9:



Εικόνα 1.9: Καταστάσεις σχετικής υγρασίας εδάφους από αριστερά προς τα δεξιά:

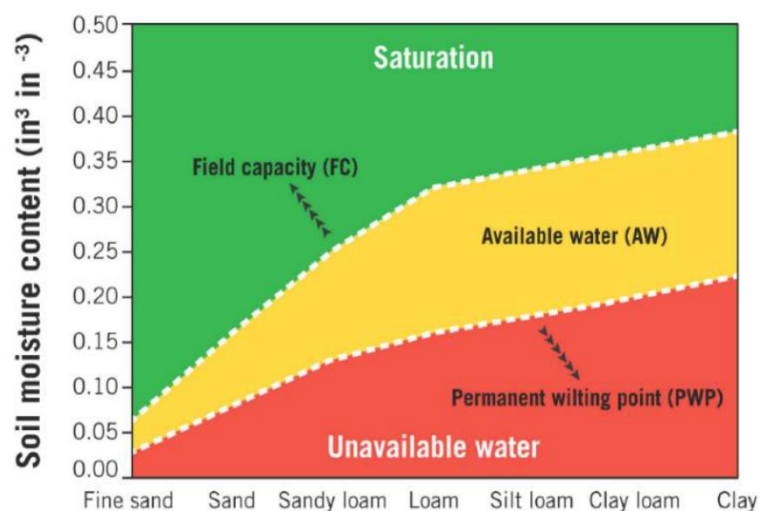
Κορεσμός, Υδατοϊκανότητα, Ενδιάμεση, Μόνιμο Σημείο Μάρανσης [20]

- Η άμμος αποτελείται από κόκκους στρογγυλεμένους, γωνιώδεις ή ακανόνιστους. Συγκρατεί ελάχιστο νερό, λόγω του μεγάλου πορώδους μεταξύ των κόκκων της.
- Η ιλύς αποτελείται από κόκκους ακανόνιστους. Δημιουργεί λεπτούς πόρους και συγκρατεί μεγάλες ποσότητες νερού. Δεν συγκρατεί θρεπτικά στοιχεία. Προκαλεί δυσμενείς συνθήκες αερισμού για την ανάπτυξη των φυτών.
- Η άργιλος αποτελείται από κόκκους πεπλατυσμένους. Συγκρατεί μεγάλες ποσότητες νερού και σε πολλές περιπτώσεις (τριχοειδείς πόροι) με τόσο μεγάλες δυνάμεις, που το νερό έχει ιδιότητες πάγου, δηλαδή ιδιότητες στερεού σώματος. Συγκρατεί θρεπτικά στοιχεία λόγω της μεγάλης χημικής της επιφάνειας.

Η ανάγκη διαχωρισμού της υφής των εδαφών έχει βάση στο ότι κάθε υφή έχει διαφορετικά σημεία κορεσμού, υδατοϊκανότητας και μόνιμου σημείου μάρανσης, τα οποία σχετίζονται με την περιεκτικότητα κάθε είδους εδάφους σε νερό, καθώς και με τις διαστάσεις των κόκκων που απαρτίζουν το καθένα.

Ενδεικτικά, παρατίθεται παρακάτω η Εικόνα 1.11, στην οποία γίνεται η συσχέτιση μεταξύ ογκομετρικής περιεκτικότητας νερού σε 7 διαφορετικούς τύπους εδαφών. Οι τύποι είναι με τη σειρά που εμφανίζονται στο γράφημα: λεπτό αμμώδες (fine sand), αμμώδες (sand), αμμοπηλώδες (sandy loam), πηλώδες (loam), ιλοσηλώδες (silt loam), αργιλοπηλώδες (clay loam) και τέλος αργιλώδες (clay). Στο γράφημα ορίζονται 3 διαφορετικές περιοχές:

- Η **πράσινη περιοχή** καλύπτει την περιοχή από τον κορεσμό του χώματος μέχρι και το όριο της υδατοϊκανότητας (field capacity)
- Η **κόκκινη περιοχή** είναι αυτή που ξεκινάει από το μόνιμο σημείο μάρανσης (permanent wilting point) και καταλήγει σε πλήρη ξηρασία του εδάφους και ουσιαστικά καλύπτει την περίπτωση ύπαρξης νερού μέσα στο έδαφος, όμως σε στρώματα που τα φυτά δεν είναι ικανά να απορροφήσουν, όπως είπαμε και στην υποενότητα 1.3.2.2.
- Η **κίτρινη ενδιάμεση** περιοχή ορίζει την ενδιάμεση κατάσταση από το σημείο FC μέχρι και το PWP και ουσιαστικά είναι η περιοχή που ορίζουμε ως διαθεσιμότητα νερού για την ανάπτυξη των φυτών.



Εικόνα 1.11: Γράφημα συσχέτισης ογκομετρικής περιεκτικότητας νερού σε διαφορετικά είδη εδαφών με τα σημεία FC και PWP [23]

1.3.2.4 Μέθοδοι Μέτρησης Υγρασίας Εδάφους

Η υγρασία του εδάφους μπορεί να μετρηθεί με παραπάνω από μία μεθόδους, μία εκ των οποίων είναι άμεση, ενώ οι υπόλοιπες εξαρτώνται από την χρήση αισθητήρων.

Η άμεση μέθοδος με την οποία γίνεται η μέτρηση ονομάζεται Βαρυμετρική Περιεκτικότητα Ύδατος (Gravimetric Water Content / GWC). Ο τρόπος αυτός περιλαμβάνει αποκομιδή δείγματος συγκεκριμένου όγκου από το σημείο που πραγματοποιείται η μέτρηση και στη συνέχεια, αφού το δείγμα ζυγιστεί, μπαίνει σε θερμαινόμενο περιβάλλον, δηλαδή σε έναν φούρνο και ζεσταίνεται έτσι ώστε να εξατμιστεί πλήρως όλο το νερό που περιλαμβάνεται στο δείγμα. Έπειτα το δείγμα ζυγίζεται ξανά και βγάζοντας τον λόγο μεταξύ υγρού και ξηρού δείγματος, προκύπτει η τιμή της GWC, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε ποσοστό επί τοις εκατό, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση 1.4:

$$GWC \% = \frac{m_{wet} - m_{dry}}{m_{dry}} \times 100 \quad (1.4)$$

όπου m_{wet} είναι η μετρούμενη μάζα υγρού δείγματος, ενώ m_{dry} είναι η μετρούμενη μάζα ξηρού δείγματος.

Το αρνητικό με την συγκεκριμένη μέθοδο είναι ότι δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί *in situ*, δηλαδή στο σημείο της μέτρησης, καθ' ότι απαιτείται κατεργασία του δείγματος σε εργαστήριο. [20]

Έπειτα, υπάρχουν έμμεσες μέθοδοι υπολογισμού της υγρασίας του εδάφους, ανάλογα με την τεχνολογία του αισθητήρα που χρησιμοποιείται. Εμείς θα αναφερθούμε στην μέθοδο Ογκομετρικής Περιεκτικότητας Ύδατος (Volumetric Water Content / VWC), η οποία είναι αντίστοιχα με την GWC ο ποσοστιαίος λόγος μεταξύ του όγκου που έχει το νερό προς τον συνολικό όγκο του δείγματος εδάφους που μελετούμε, όπως φαίνεται και στην παρακάτω σχέση 1.5:

$$VWC\% = \frac{V_{water}}{V_{soil}} \times 100 \quad (1.5)$$

Όπου V_{water} είναι ο όγκος νερού που περιέχεται στο δείγμα ενώ V_{soil} είναι ο συνολικός μετρούμενος όγκος του δείγματος που περιλαμβάνει τον όγκο των στερεών κόκκων, του νερού που περιέχεται στο δείγμα, αλλά και του αέρα που εμπεριέχεται σε αυτό. Αν στο δείγμα υπάρχει πάγος, συνυπολογίζεται και ο δικός του όγκος. [20]

1.4 Επίλογος

Κλείνοντας το συγκεκριμένο κεφάλαιο, έχοντας συνοψίσει τους ορισμούς των περιβαλλοντικών δεδομένων, παρατηρήσαμε τη σημαντικότητά τους για τις θετικές επιστήμες, ενώ στη συνέχεια κάναμε μία μικρή επεξήγηση, αρχικά σχετικά με τα μετεωρολογικά δεδομένα που πρόκειται να μετρήσουμε στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, και στη συνέχεια με τα δεδομένα που πρόκειται να αποκομίσουμε από τις μετρήσεις μας στο έδαφος, καθώς και τις συσχετίσεις που εμφανίζουν μεταξύ τους.

Κεφάλαιο 2ο: Όργανα Μέτρησης Περιβαλλοντικών Δεδομένων

2.1 Εισαγωγή

Αφού δώσαμε ορισμούς και είδαμε τη σημαντικότητα των δεδομένων που μας προσφέρει το περιβάλλον για πληθώρα δραστηριοτήτων μας, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα δούμε και τα όργανα με τα οποία γίνονται αυτές οι μετρήσεις, τόσο των μετεωρολογικών φαινομένων, όσο και του εδάφους.

Ως όργανο μέτρησης ορίζουμε κάθε συσκευή που δύναται να μετρήσει όσο το δυνατόν αξιόπιστα ένα φυσικό μέγεθος, είτε αυτό είναι απλό, όπως είναι ο χρόνος, είτε είναι πιο σύνθετο, όπως είναι η ροή ενός ρευστού ή η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος. Στην εποχή μας, με την εξέλιξη της τεχνολογίας, πέραν από ένδειξη και μέτρηση, πολλά όργανα μέτρησης διαθέτουν και ικανότητες καταγραφής των μετρούμενων μεγεθών, ώστε να πραγματοποιούν αυτόματα μία ανάλυση του μετρούμενου μεγέθους, συνήθως στο πεδίο του χρόνου, ενώ υπάρχουν και ορισμένα που μπορούν να πραγματοποιήσουν αναλύσεις και στο πεδίο της συχνότητας.

2.2 Παραδοσιακά Όργανα Μέτρησης Μετεωρολογικών Φαινομένων

Από την στιγμή που έκαναν την εμφάνισή τους τα όργανα μέτρησης των μετεωρολογικών φαινομένων, άλλαξε διά παντός ο τρόπος πρόγνωσης των καιρικών συνθηκών, που μέχρι τότε στηριζόταν εξ' ολοκλήρου σε πρακτικούς κανόνες και παροιμίες λαϊκού τύπου με καμία επιστημονική βάση. Από τον 18^ο αιώνα και έπειτα ξεκίνησε η συστηματική καταγραφή δεδομένων, αρχικά θερμοκρασίας και έπειτα υγρασίας και πίεσης, όπως αναφέραμε και στο 1^ο Κεφάλαιο.

2.2.1 Όργανα Μέτρησης Θερμοκρασίας

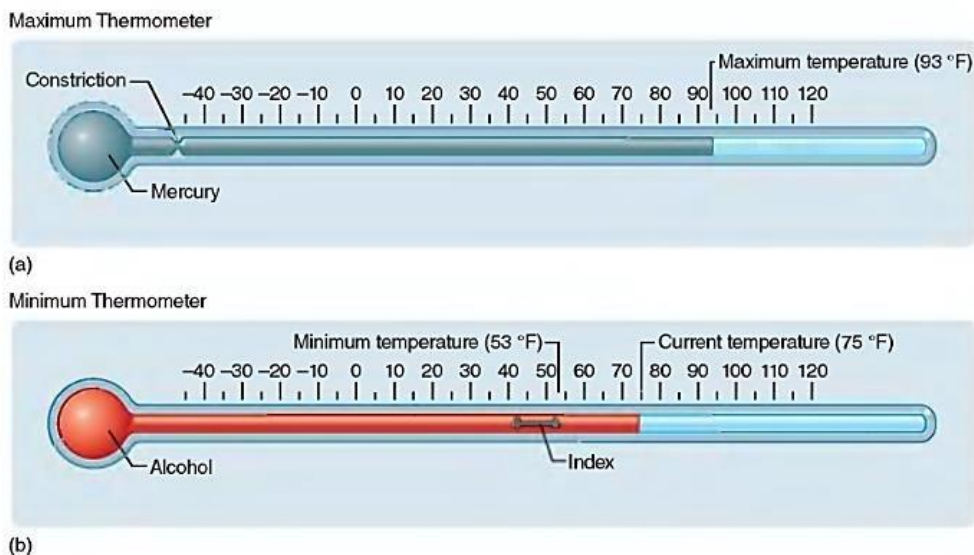
Η μέτρηση των τιμών θερμοκρασίας γίνεται με ειδικά βαθμονομημένα όργανα που ονομάζονται θερμόμετρα. Ως προς την λειτουργία τους, τα θερμόμετρα εκμεταλλεύονται την ιδιότητα των λεγόμενων «θερμομετρικών» σωμάτων, όπως είναι ο υδράργυρος, να διαστέλλονται ή να συστέλλονται ανάλογα με την αυξομείωση της θερμοκρασίας.



Εικόνα 2.1: Τυπικό Υδραργυρικό Θερμόμετρο για μετεωρολογική πρόγνωση [24]

Τα υδραργυρικά θερμοόμετρα αποτελούνται από ένα στενό και μακρύ σωλήνα εντελώς κλειστό, στο άκρο του οποίου υπάρχει μία πλάτυνση μέσα στην οποία περιέχεται ο υδράργυρος. Στο παρελθόν είχαν ποικιλία χρήσεων, από την απλή μέτρηση θερμοκρασίας του σώματός μας, μέχρι και εργαστηριακές παρατηρήσεις. Ακόμη και σήμερα χρησιμοποιούνται κατά κόρον στις μετεωρολογικές μετρήσεις, καθ' ότι προσφέρουν ακρίβεια στην μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα ίση με $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ [25]. Το μόνο μειονέκτημα που παρουσιάζει ο υδράργυρος ως επιλογή για τα θερμοόμετρα είναι ότι η θερμοκρασία πήξης του είναι αρκετά υψηλή, στους -38.4°C , επομένως δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες [26]. Ένα τυπικό υδραργυρικό θερμοόμετρο που χρησιμοποιείται σε μετεωρολογικές μετρήσεις είναι αυτό της παραπάνω Εικόνας 2.1.

Πέραν των τυπικών υδραργυρικών θερμομέτρων που δείχνουν την στιγμιαία θερμοκρασία, στις μετεωρολογικές μετρήσεις μας ενδιαφέρει η μέτρηση της ημερήσιας υψηλότερης και χαμηλότερης θερμοκρασίας. Εδώ είναι που βρίσκουν χρησιμότητα τα λεγόμενα ακροβάθμια θερμοόμετρα, τα οποία αποτελούν ζεύγος που τοποθετείται σε οριζόντια διάταξη και αποτελούνται από το μέγιστοβάθμιο και το ελαχιστοβάθμιο θερμοόμετρο. Στο μεν πρώτο, ο σωληνίσκος που περιέχει τον υδράργυρο παρουσιάζει στένωση, έτσι ώστε να αποκλειστεί η πιθανότητα επιστροφής του υδραργύρου λόγω ψύξης. Για να επανέλθει ο υδράργυρος, αρκεί να «τινάξουμε» το θερμοόμετρο. Στο δε ελαχιστοβάθμιο θερμοόμετρο, αντί υδραργύρου περιέχεται οινόπνευμα, μέσα στο οποίο κινείται ένας μικρός δείκτης, ο οποίος με τη συστολή του οινοπνεύματος παρασύρεται από την ελεύθερη άκρη του θερμομέτρου, προς την λεκάνη. Όταν αρχίσει η διαστολή του υγρού λόγω αύξησης θερμοκρασίας, ο δείκτης αυτός παραμένει ακίνητος, σημειώνοντας την ελάχιστη θερμοκρασία του 24ώρου [27]. Η μέτρηση του μέγιστοβάθμιου θερμομέτρου γίνεται στις 20:00 τοπικής ώρας, ενώ του ελαχιστοβάθμιου στις 08:00 τοπικής ώρας. Ένα τέτοιο ζεύγος θερμομέτρων είναι αυτό της Εικόνας 2.2.

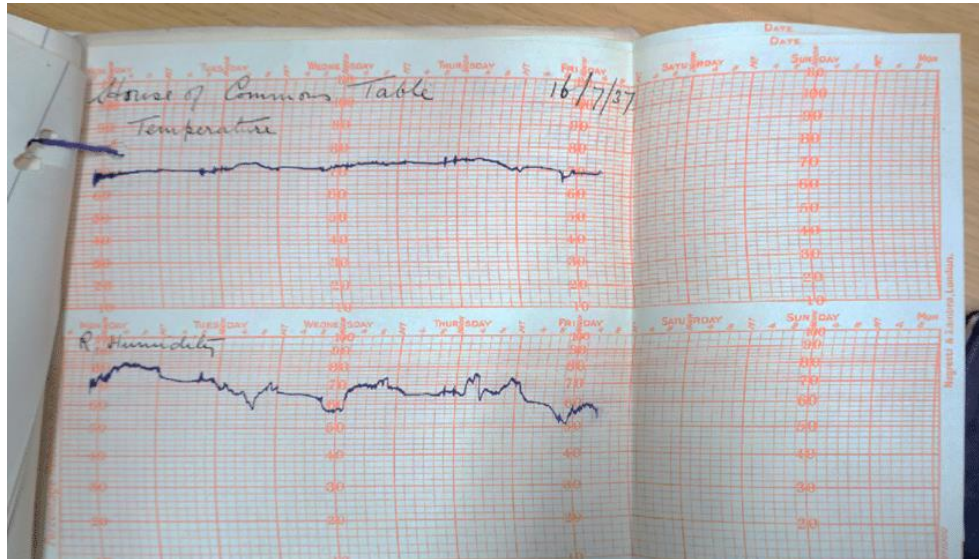


Εικόνα 2.2: Ζεύγος Ακροβάθμιου Θερμομέτρου:

a) Μέγιστοβάθμιο Θερμοόμετρο & b) Ελαχιστοβάθμιο Θερμοόμετρο [28]

Το βασικό μειονέκτημα των υδραργυρικών θερμομέτρων σε αυτόνομα μετεωρολογικά συστήματα, δηλαδή όσα δεν απαιτούν ανθρώπινη παρέμβαση για την καταγραφή των μετρήσεων, είναι ότι δεν μπορούν να πραγματοποιήσουν καταγραφή των δεδομένων που απεικονίζουν. Τον ρόλο αυτό έρχεται να συμπληρώσει ένα τρίτο όργανο που χρησιμοποιείται στην καταγραφή μετεωρολογικών δεδομένων και ονομάζεται θερμογράφος.

Ο θερμογράφος είναι όργανο διαρκούς καταγραφής της θερμοκρασίας του αέρα πάνω σε ειδικά βαθμονομημένο χαρτί με δύο άξονες, τον οριζόντιο για τον χρόνο, τμηματοποιημένο ανά 2 ώρες και τον κατακόρυφο για την θερμοκρασία, μετρούμενη σε κλίμακα βαθμών Κελσίου. Το όργανο λειτουργεί πλήρως αναλογικά. Η γραφίδα του οργάνου αντιλαμβάνεται τις μεταβολές της θερμοκρασίας βασισόμενη στην συστολή και διαστολή ενός ευαίσθητου μεταλλικού ελάσματος, κατασκευασμένο από υλικό με θερμομετρικές ιδιότητες. [29] Τα περισσότερα όργανα που λειτουργούν ως θερμογράφοι λειτουργούν ταυτόχρονα και ως υγραγράφους, τους οποίους θα μελετήσουμε στην επόμενη υποενότητα. Ένα δείγμα χαρτιού από σύνθετο όργανο θερμογράφου – υδρογράφο είναι αυτό της Εικόνας 2.3.



Εικόνα 2.3: Δείγμα χαρτιού θερμογράφου – υδρογράφου [30]

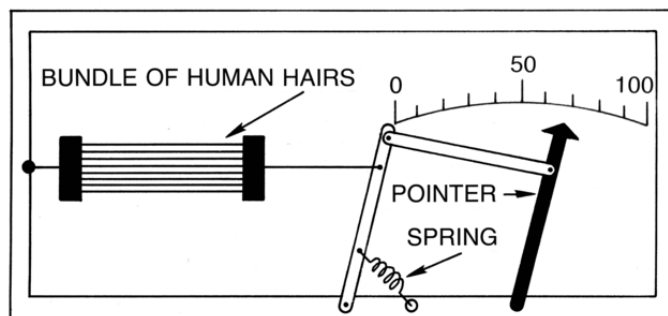
Τις τελευταίες δεκαετίες, με την ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας, τα υδραργυρικά θερμόμετρα τείνουν να εκλείψουν όχι μόνο από το οικιακό περιβάλλον αλλά και από αυτό της συγκέντρωσης μετεωρολογικών δεδομένων, καθώς οι σύγχρονοι μετεωρολογικοί σταθμοί συνήθως βασίζονται σε κάποιο ηλεκτρονικό όργανο ή διάταξη, όπως είναι τα θερμίστορ, τα θερμοζεύγη ή τα RTD (Resistive Temperature Detectors), ενώ υπάρχουν και ολοκληρωμένα κυκλώματα μέτρησης θερμοκρασίας, όπως είναι το LM35 της Texas Instruments, τα οποία ωστόσο δεν προτιμούνται λόγω χαμηλότερης ακρίβειας [31]. Οι διατάξεις αυτές τοποθετούνται πάντοτε εντός μετεωρολογικού κλωβού (Stevenson screen) διότι η αντικειμενικότερη μέτρηση θερμοκρασίας γίνεται πάντοτε υπό σκιά. Σε επόμενη υποενότητα θα αναφερθούμε περισσότερο στους κλωβούς.

2.2.2 Όργανα Μέτρησης Υγρασίας

Γενικώς, η σχετική υγρασία δύναται να μετρηθεί με μία ποικιλία οργάνων, τα υγρόμετρα, τα ψυχρόμετρα και τους υγραγράφους.

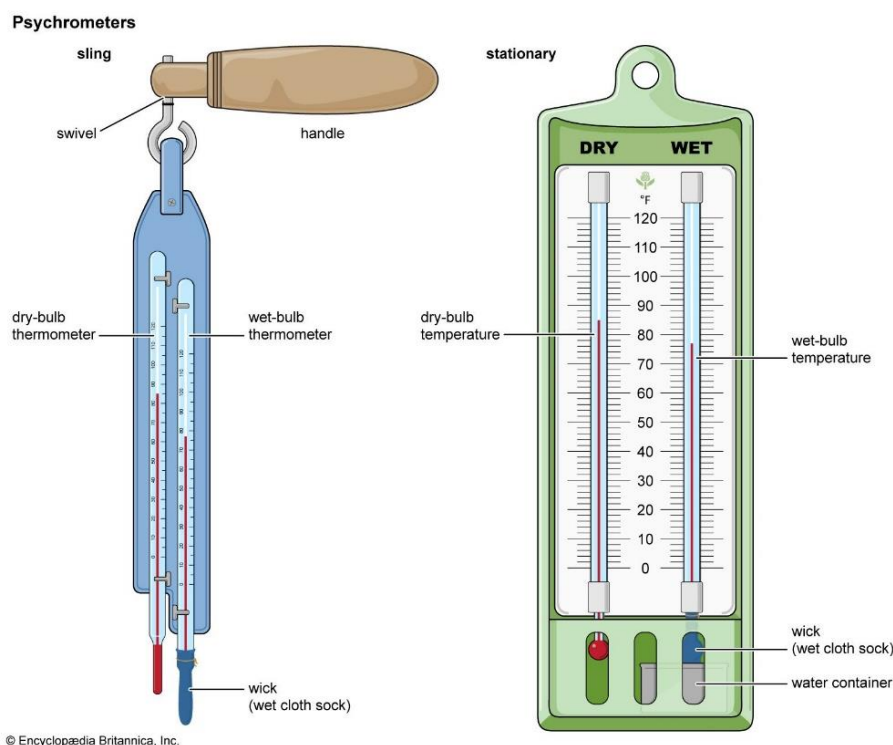
Τα υγρόμετρα που χρησιμοποιούνται για μετεωρολογικές αναλύσεις ανήκουν στην κατηγορία υγρομέτρων διά τριχών. Τα υγρόμετρα διά τριχών είναι συσκευές που εσωκλείουν τρίχες ανθρώπων, κατά προτίμηση ξανθών ή παλαιότερα και αλόγων, καθαρισμένες από λίπη. Η λειτουργία των οργάνων βασίζεται στην παρατήρηση των Ινδιάνικων φυλών ότι το μήκος της τρίχας αυξομειώνεται ανάλογα με τις υγρασιακές συνθήκες που επικρατούν στην ατμόσφαιρα. Έτσι λοιπόν, όταν ο αέρας είναι υγρός οι τρίχες απορροφούν υγρασία και επιμηκύνονται, ενώ αντίθετα, όταν ο αέρας είναι ξηρός, το μήκος των τριχών μειώνεται αφού γίνεται εξάτμιση της υγρασίας [31]. Φυσικά, τα μήκη των τριχών

βαθμονομούνται καταλλήλως και το όργανο πραγματοποιεί απεικόνιση σε ποσοστιαία κλίμακα. Η θεωρία λειτουργίας του οργάνου είναι αυτή της Εικόνας 2.4.



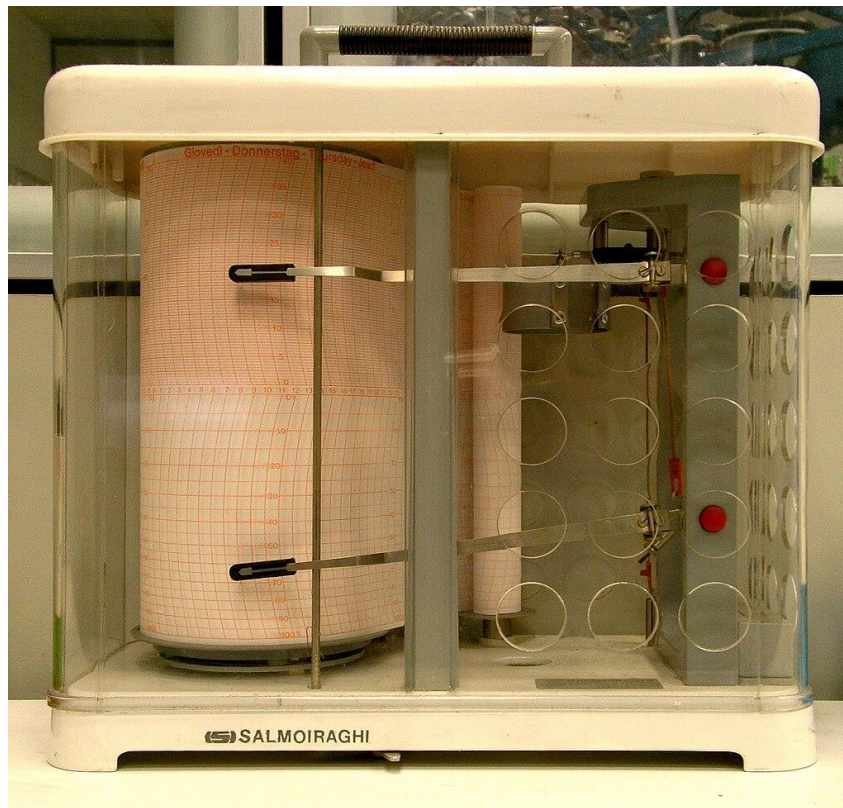
Εικόνα 2.4: Θεωρία Λειτουργίας Υγρομέτρου διά τριχών [32]

Το ψυχρόμετρο, αλλιώς αποκαλούμενο και wet-and-dry bulb thermometer, είναι όργανο που ανήκει στην κατηγορία των υγρομέτρων, αλλά η λειτουργία του βασίζεται ουσιαστικά σε ένα ζεύγος θερμομέτρων και θεωρείται το ακριβέστερο όργανο μέτρησης σχετικής υγρασίας της ατμόσφαιρας. Η αγγλική ονομασία «wet-and-dry» που δίδεται στο όργανο συνοψίζει την δομή και λειτουργία του. Δομικά, το ένα από τα δύο θερμομέτρα που χρησιμοποιούνται έχει την άκρη της λεκάνης υδραργύρου του τυλιγμένη με ύφασμα και βουτηγμένη σε υγρό με απεσταγμένο νερό. Το άλλο θερμομέτρο παραμένει διαρκώς ξηρό. Όταν η ατμόσφαιρα είναι υγρή, δεν υπάρχει διαφορά στην τιμή θερμοκρασίας των δύο θερμομέτρων, όμως όταν η ατμόσφαιρα ξεραίνεται, τότε η εξάτμιση στο υγρό θερμομέτρο είναι μεγάλη κι έτσι παρουσιάζει διαφορές σε σχέση με την αναγραφόμενη θερμοκρασία του ξηρού θερμομέτρου. Με βάση τις διαφορές αυτές προσδιορίζεται η σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας, βάσει πινάκων που ονομάζονται πίνακες σχετικής υγρασίας. Στην παρακάτω Εικόνα 2.5 απεικονίζεται ένα ψυχρόμετρο και συνοψίζεται η θεωρία λειτουργίας του. [33]



Εικόνα 2.5: Θεωρία Λειτουργίας Ψυχρόμετρου [33]

Όπως και με την περίπτωση της θερμοκρασίας, ένα παραδοσιακό υγρόμετρο είναι ικανό για απεικόνιση μέτρησης του μεγέθους που μετρά, όμως δεν έχει ικανότητες καταγραφής της μεταβολής αυτού του μεγέθους με την πάροδο του χρόνου. Το έργο αυτό συμπληρώνει ο υγρογράφος, που όπως αναφέραμε στην προηγούμενη υποενότητα, συχνά είναι μέρος ενός σύνθετου οργάνου μαζί με τον θερμογράφο. Η λειτουργία του υγρογράφου είναι ακριβώς η ίδια με του υγρομέτρου διά τριχών, με την μόνη διαφορά ότι στην άκρη του δείκτη της μέτρησης υπάρχει μία γραφίδα η οποία αποτυπώνει τις μεταβολές της σχετικής υγρασίας της ατμόσφαιρας σε ειδικά βαθμονομημένο χαρτί, όπως αυτό της Εικόνας 2.3. Μία παραδοσιακή σύνθετη συσκευή θερμογράφου – υγρογράφου είναι αυτή της Εικόνας 2.6.



Εικόνα 2.6: Σύνθετη συσκευή θερμογράφου - υγρογράφου [34]

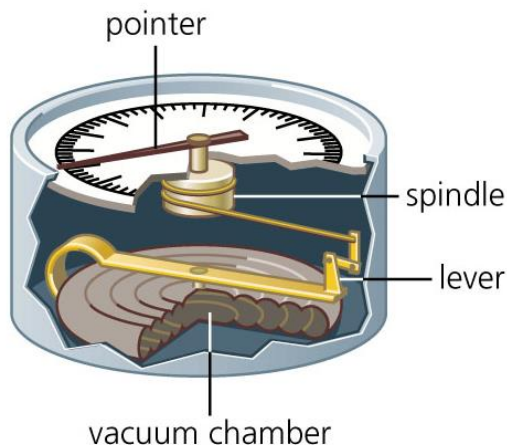
Υπάρχουν και άλλοι τύποι υγρομέτρων που βασίζονται σε χημικές αντιδράσεις, καθώς και ηλεκτρονικές διατάξεις, βασιζόμενες σε χωρητικές αντιδράσεις πυκνωτών ή διαφορές σε τιμές αντιστάσεων που έχουν αντικαταστήσει τα τελευταία χρόνια τα παραδοσιακά προαναφερθέντα όργανα. Τέτοιου τύπου διατάξεις θα αναφέρουμε σε επόμενη υποενότητα.

2.2.3 Όργανα Μέτρησης Ατμοσφαιρικής Πίεσης

Όργανα μέτρησης της ατμοσφαιρικής πίεσης είναι τα βαρόμετρα. Τα βαρόμετρα έχουν καίρια χρήση στις μετεωρολογικές προγνώσεις, διότι από τα δεδομένα των μετρήσεών τους προκύπτουν οι πληροφορίες σχετικά με τα καιρικά φαινόμενα που πρόκειται να επικρατήσουν σε κάθε περιοχή τις επόμενες ώρες, είτε πρόκειται για βροχοπτώσεις, ανέμους ή κυμάνσεις της θερμοκρασίας.

Ο παλαιότερος τύπος βαρόμετρου είναι το υδραργυρικό βαρόμετρο, όμως πλέον δεν χρησιμοποιείται στις μετεωρολογικές προγνώσεις διότι εμφανίζει ορισμένα σφάλματα στις μετρήσεις, τα οποία μπορούν να αποφευχθούν με τις χρήσεις άλλου τύπου βαρομέτρων.

Τα βαρόμετρα που χρησιμοποιούνται στις μετεωρολογικές προγνώσεις είναι τα λεγόμενα μεταλλικά βαρόμετρα, τα οποία ονομάζονται και ανηροειδή βαρόμετρα. Το όργανο διαθέτει έναν θάλαμο κενού μεταλλικού τυμπάνου (κυτίο Vidi), ο οποίος είναι ιδιαίτερα ευπαθής στις όποιες μεταβολές της εξωτερικής πίεσης. Μέσω ειδικά κατασκευασμένου μηχανισμού, οι μεταβολές αυτές μεγεθύνονται και απεικονίζονται με τη χρήση βελόνας στον βαθμονομημένο πίνακα του οργάνου. [35] Η μηχανολογική δομή του ανηροειδούς βαρόμετρου βρίσκεται στην Εικόνα 2.7.



Εικόνα 2.7: Δομή Ανηροειδούς Βαρόμετρου [36]

Όπως και με τα όργανα των 2 προηγούμενων υποενοτήτων, τα ανηροειδή βαρόμετρα δεν είναι ικανά για καταγραφή των μεταβολών της ατμοσφαιρικής πίεσης στην πάροδο του χρόνου. Το κενό αυτό έρχονται να καλύψουν τα αυτογραφικά βαρόμετρα ή βαρογράφοι. Οι βαρογράφοι είναι επέκταση των ανηροειδών βαρόμετρων, με την προσθήκη ειδικού μηχανισμού που περιλαμβάνει γραφίδα κινούμενη από τις μεταβολές ατμοσφαιρικής πίεσης που αντιλαμβάνεται το όργανο. Οι κινήσεις της γραφίδας αποτυπώνονται σε ειδικά βαθμονομημένο χαρτί, όπως και με τα προηγούμενα 2 αυτογραφικά όργανα που αναφέραμε. Στην Εικόνα 2.8 φαίνεται ένας βαρογράφος που χρησιμοποιείται για καταγραφές μετεωρολογικών δεδομένων.

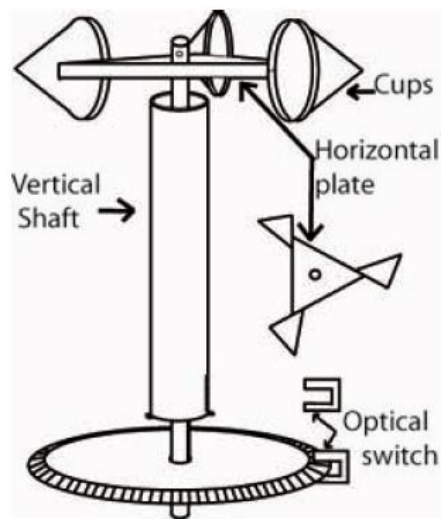


Εικόνα 2.8: Βαρογράφος [37]

2.2.4 Όργανα Μέτρησης Ανέμου

Όπως αναφέραμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, σχετικά με την μέτρηση του ανέμου, μας απασχολούν 2 χαρακτηριστικά, η ταχύτητα του ανέμου και η διεύθυνσή του. Τα 2 αυτά χαρακτηριστικά μετρώνται με το ανεμόμετρο και τον ανεμοδείκτη αντίστοιχα. Τα όργανα αυτά ονομάζονται ανεμομετρικά.

Το απλούστερο και συνηθέστερο εν χρήση ανεμόμετρο είναι το ονομαζόμενο «ανεμόμετρο τριών κυπέλλων» (three cup anemometer), το οποίο όπως ορίζει και η ονομασία του, αποτελείται από 3 πανομοιότυπα κύπελλα τοποθετημένα σε έναν οριζόντιο ρότορα. Η πνοή του ανέμου προκαλεί στροφή του ρότορα όταν έρχεται σε επαφή με κάποιο από τα κύπελλα και η διάταξη φροντίζει να στρέφεται με τον ίδιο ρυθμό όταν η ταχύτητα του ανέμου δεν αλλάζει. Επιπλέον, η κατασκευή των κύπελλων είναι από ελαφρύ υλικό, όπως ορισμένα πλαστικά πολυμερή ή αλουμίνιο, ούτως ώστε ακόμη και ο ασθενής άνεμος να είναι ικανός να ανιχνευθεί από το όργανο. [38]



Εικόνα 2.9: Δομή και Λειτουργία Ανεμόμετρου Κυπέλλων [39]

Η λογική λειτουργίας του ανεμόμετρου κυπέλλων είναι αυτή που παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.9, και είναι αυτή που χρησιμοποιούν τα ακριβότερα τέτοιου τύπου όργανα. Στην άκρη του ρότορα που βρίσκεται στη βάση του οργάνου υπάρχει ένας βαθμονομημένος δίσκος και ένας οπτοζεύκτης που χρησιμοποιείται για την μέτρηση διαδοχικών τμημάτων πάνω στον δίσκο. Με την μέθοδο αυτή υπολογίζεται η ταχύτητα με την οποία γυρνάει ο άξονας των κυπέλλων και κατ' επέκταση αυτή θα είναι και η ταχύτητα του ανέμου. Σε απλούστερες υλοποιήσεις ο δίσκος αντικαθίσταται από έναν μαγνήτη, ο οποίος πολώνει μαγνητικούς διακόπτες ή ανιχνευτές φαινομένου Hall.

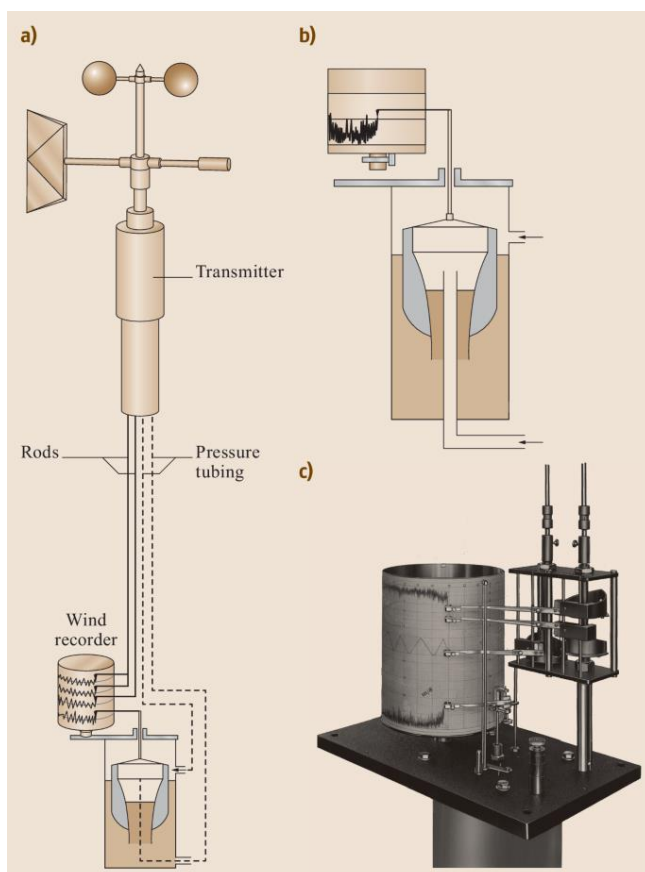


Εικόνα 2.10: Απλός Μετεωρολογικός Ανεμοδείκτης [40]

Σχετικά με τους ανεμοδείκτες, είναι όργανα που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της διεύθυνσης πνοής του ανέμου και η υλοποίησή τους είναι αρκετά απλή. Όπως ορίζει και το όνομά τους, είναι δείκτες τοποθετημένοι σε άξονα, ικανοί να περιστρέφονται ελεύθερα με την παραμικρή πνοή ανέμου. Η εμφάνισή τους αλλάζει αναλόγως με το περιβάλλον στο οποίο χρησιμοποιούνται, λ.χ. σε κορυφές σπιτιών είναι πιο ευπαρουσίαστοι, ενώ σε μετεωρολογικούς σταθμούς είναι όπως αυτοί της παραπάνω Εικόνας 2.10.

Σε αρκετές παρατηρείται συνδυαστικός σχεδιασμός των 2 παραπάνω οργάνων σε 1, το οποίο διατηρεί επίσης το όνομα ανεμόμετρο. Στόχος του σχεδιασμού αυτού είναι λόγοι πρακτικότητας και εξοικονόμησης χώρου, καθότι οι νέου τύπου μετεωρολογικοί σταθμοί είναι πολύ μικρότεροι σε μέγεθος απ' ότι στο παρελθόν, όπως θα δούμε σε επόμενη ενότητα.

Εκτός των απλών οργάνων που αναφέραμε, χρήση στην μετεωρολογία έχουν και τα αντίστοιχα αυτογραφικά όργανα μέτρησης ανέμου, οι λεγόμενοι ανεμογράφοι. Οι ανεμογράφοι είναι ουσιαστικά ανεμόμετρα με αντίστοιχο σύστημα γραφίδων όπως και τα υπόλοιπα αυτογραφικά όργανα και κάνοντας χρήση ειδικού χαρτιού αποτυπώνουν τις μεταβολές των φαινομένων του ανέμου ως προς τον χρόνο. Τέτοιο όργανο είναι αυτό που απεικονίζεται στην Εικόνα 2.11. Ονομάζεται και ανεμογράφος σωλήνων πίεσης Dines, καθότι οι πνοές ανέμου μέσω του σωλήνα καταλήγουν στο καταγραφικό σύστημα, το οποίο διεγείρεται από έναν πλωτήρα που βρίσκεται σε μία δεξαμενή νερού στη βάση του δοχείου. Οι μεταβολές του ανέμου είναι που κάνουν τον πλωτήρα να κινείται.

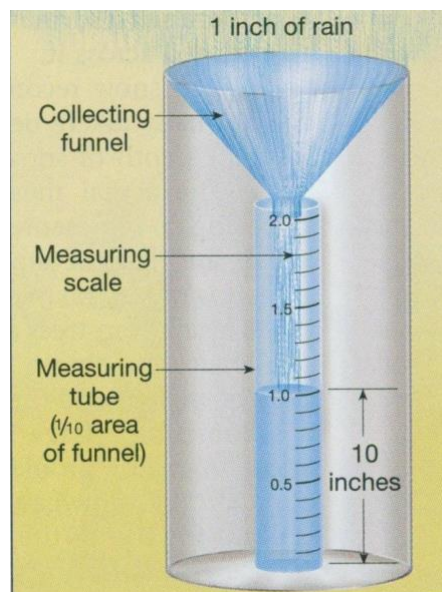


Εικόνα 2.11: Δομή και λειτουργία Ανεμογράφου με σωλήνες πίεσης Dines [41]

- a) Σχεδιαστική απεικόνιση ολόκληρου του οργάνου,
- b) Το καταγραφικό σύστημα του οργάνου,
- c) Φωτογραφία πραγματικού οργάνου

2.2.5 Όργανα Μέτρησης Ύψους Βροχής

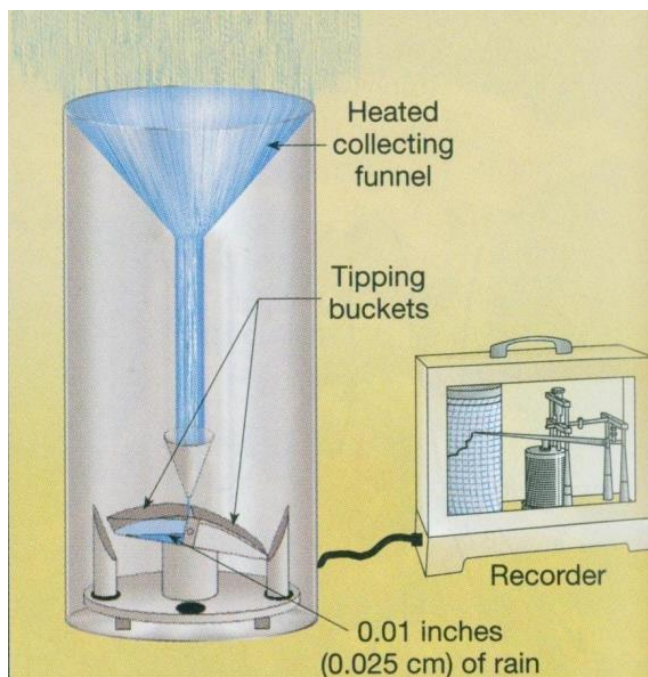
Ιστορικά, το πρώτο εκ των μετεωρολογικών στοιχείων που μετρήθηκε ήταν το ύψος βροχοπτώσεων, όπως μας παραθέτουν πηγές της αρχαίας ελληνικής ιστορίας, κατά τον 5^ο π.Χ. αιώνα. Επομένως, το απλούστερο όργανο μέτρησης μετεωρολογικού φαινομένου είναι το απλό βροχόμετρο, που μέχρι προσφάτως ήταν σε χρήση στους σταθμούς μετεωρολογικών παρατηρήσεων. Το απλό αυτό όργανο αποτελείται από έναν βαθμονομημένο σωλήνα και ένα κωνικό χωνί στην κορυφή το οποίο πραγματοποιεί συλλογή υετού (βροχής, χιονιού, χαλαζιού). Το όργανο αυτό φαίνεται στην Εικόνα 2.12 και παίρνει συχνά την ονομασία «δεκαπλασιαστικό βροχόμετρο», διότι το πραγματικό ύψος του ενδεικνυόμενου ύψους στον βαθμονομημένο σωλήνα του οργάνου είναι το δεκαπλάσιο από το συνολικό ύψος βροχής που έπεσε κατά την διάρκεια της μέτρησης. Επομένως, το εμβαδόν του σωλήνα αυτού είναι το 1/10 του εμβαδού της μεγάλης πλευράς του κωνιού συλλογής. [42]



Εικόνα 2.12: Δομή δεκαπλασιαστικού βροχόμετρου [42]

Αυτά τα απλά δεκαπλασιαστικά βροχόμετρα υπολείπονται της ικανότητας αυτόματης καταγραφής του μετρούμενου ύψους βροχής, καθώς και της αυτόματης επαναφοράς τους σε αρχική κατάσταση μέτρησης, δηλαδή χωρίς καθόλου ποσότητα νερού στο σωλήνα. Έτσι, ως αυτογραφικό όργανο καταγραφής ύψους βροχής χρησιμοποιείται ο επόμενος συνηθέστερος τύπος βροχόμετρου, το λεγόμενο βροχόμετρο «ανατρεπόμενου δοχείου» (tipping bucket rain gauge), όπως αυτό της Εικόνας 2.13 παρακάτω.

Τα συγκεκριμένα όργανα διαθέτουν κι αυτά κωνί συλλογής, το οποίο όπως τονίζεται και στην εικόνα είναι θερμαινόμενο για να μπορεί να λιώσει όγκους όπως το χιόνι και το χαλάζι και να πραγματοποιήσει μέτρηση. Στη βάση του κωνιού συλλογής υπάρχουν 2 μικρά δοχεία, ενωμένα σε έναν οριζόντιο άξονα που λειτουργεί σαν ένα είδος ζυγισμένης τραμπάλας. Κάθε φορά, ένα από τα 2 δοχεία βρίσκεται κάτω από το κωνί. Όταν ο υδάτινος όγκος εξέρχεται από τη βάση του κωνιού πέφτει στο δοχείο και μόλις συμπληρωθεί μία ποσότητα που αντιστοιχεί σε 0.25mm βροχής, το δοχείο ανατρέπεται από το βάρος του και τότε έρχεται στη θέση του το δεύτερο δοχείο κ.ο.κ. Επομένως, το όργανο μετράει πόσες φορές μέσα σε έναν ορισμένο χρόνο έγινε ανατροπή των δοχείων και πραγματοποιεί ταυτόχρονη καταγραφή.



Εικόνα 2.13: Δομή βροχόμετρου ανατρεπόμενου κάδου [42]

2.3 Οι μετεωρολογικοί κλωβοί

Όπως αναφέραμε και στην αρχή της ενότητας, οι μετρήσεις θερμοκρασίας και υγρασίας στην ατμόσφαιρα είναι προτιμότερο να εκτελούνται υπό σκιά και με τα όργανα σχετικά προστατευμένα από τις αντίξοες καιρικές συνθήκες, διότι αυτές συχνά επηρεάζουν την ακεραιότητα της μέτρησης, ειδικά στα παραδοσιακά υδραργυρικά όργανα.

2.3.1 Παραδοσιακοί μετεωρολογικοί κλωβοί Stevenson

Για την επίλυση του ζητήματος προστασίας των οργάνων μέτρησης, στα 1864 ο Σκωτικής καταγωγής πολιτικός μηχανικός Thomas Stevenson πρότεινε ένα σχέδιο ενός ξύλινου κλωβού, ο οποίος διαθέτει διπλές περσίδες, όπως τα κοινά ξύλινα παντζούρια των σπιτιών. Ο παραδοσιακός αυτός κλωβός φαίνεται στην Εικόνα 2.14 παρακάτω.



Εικόνα 2.14: Ένας παραδοσιακός μετεωρολογικός κλωβός Stevenson [43]

Ο ρόλος της κατασκευής τοιχωμάτων του κλωβού με διπλές περσίδες είναι να επιτρέπουν την ελεύθερη κυκλοφορία του ατμοσφαιρικού αέρα στο εσωτερικού του κυτίου, έτσι ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί μέτρηση των χαρακτηριστικών της ατμόσφαιρας και ταυτοχρόνως να προστατεύονται τα όργανα στο εσωτερικό από τις ριπές του ανέμου που μπορεί να επηρεάζουν τις μετρήσεις. Το εξωτερικό του κλωβού είναι βαμμένο με αρκετές στρώσεις λευκού χρώματος, το οποίο βοηθά στην ανάκλαση των ηλιακών ακτίνων. Το ξύλινο αυτό κυτίο, που ονομάζεται προς τιμήν του εφευρέτη κλωβός Stevenson, τοποθετείται πάνω σε μεταλλικό ή ξύλινο ικρίωμα (βάση), με τρόπο τέτοιο ώστε να απέχει απ' το έδαφος 1,25 με 2m. [44]

Ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι ανοιγόμενη πλευρά του κλωβού που επιτρέπει στον μετεωρολόγο να παρακολουθεί τα όργανα αλλάζει προσανατολισμό, αναλόγως του ημισφαιρίου. Στο βόρειο ημισφαίριο, η πόρτα τοποθετείται στην πλευρά του κλωβού που κοιτάζει προς Βορρά, ενώ στο νότιο ημισφαίριο στην πλευρά του κλωβού που βλέπει προς Νότο. Η εξήγηση είναι απλή και αφορά στην απευθείας ηλιακή έκθεση των οργάνων που βρίσκονται μέσα στον κλωβό, οι μετρήσεις των οποίων μπορεί να επηρεαστούν, έστω και από τον ελάχιστο χρόνο που η πόρτα παραμένει ανοιχτή. [45]

Σε έναν παραδοσιακό μετεωρολογικό κλωβό περιλαμβάνονται απαραίτητως τυπικά υδραργυρικά θερμομέτρα, απλά και ακροβάθμια, ψυχρόμετρα ή υγρόμετρα, βαρόμετρα για απλή οπτική παρατήρηση από τους μετεωρολόγους, αλλά συνήθως υπάρχουν και τα αντίστοιχα αυτογραφικά όργανα, όπως οι θερμογράφοι, υγρογράφοι και βαρογράφοι. Ενδεικτικά, ορισμένα από αυτά τα όργανα φαίνονται σε έναν ανοιχτό κλωβό Stevenson στην Εικόνα 2.15 παρακάτω.



Εικόνα 2.15: Το εσωτερικό ενός κλωβού Stevenson [46]

2.3.2 Οι αυτόματοι σταθμοί καιρού στην εποχή του IoT

Στην εποχή της 4^{ης} Βιομηχανικής Επανάστασης που διανύουμε, καθότι πλέον υπάρχει η τάση ηλεκτρονικοποίησης όλων των οργάνων μέτρησης καθώς και η εξ' αποστάσεως ικανότητα χειρισμού και λήψης των μετρήσεων και οι μετεωρολογικοί σταθμοί δεν πηγαίνουν πίσω. Συγκεκριμένα πλέον, οι περισσότερες υπηρεσίες μετεωρολογικών προγνώσεων έχουν περάσει από τους τυπικούς μετεωρολογικούς κλωβούς Stevenson στους σύγχρονους αυτόματους μετεωρολογικούς σταθμούς

(weather stations), οι οποίοι μπορεί να αποτελούν πλέον και συσκευές του Διαδικτύου των Πραγμάτων, όπως θα δούμε και στο επόμενο κεφάλαιο.

Οι σταθμοί αυτοί, περιλαμβάνουν μία πληθώρα από όργανα τα οποία είναι κατά κόρον ηλεκτρονικά, όπως είναι τα όργανα μέτρησης θερμοκρασίας, υγρασίας και πίεσης, αλλά και ορισμένα μηχανικά, όπως είναι οι ανεμοδείκτες και τα ανεμόμετρα, αλλά και τα βροχόμετρα. Χάριν ευκολίας, η διάταξη που περιλαμβάνει τα ηλεκτρονικά όργανα μέτρησης θερμοκρασίας, υγρασίας και πίεσης διατηρεί την ονομασία κλωβός Stevenson.



Εικόνα 2.16: Μετεωρολογικός σταθμός τύπου Davis Vantage Pro 2 [47]

Συγκεκριμένα, όπως πληροφορούμαστε από την [47], το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών από το 2006 και έπειτα έχει ξεκινήσει την εγκατάσταση τέτοιου τύπου σταθμών σε σημεία μετεωρολογικού ενδιαφέροντος σε όλη την ελληνική επικράτεια. Οι σταθμοί είναι τύπου Davis Vantage Pro 2, όπως αυτός της Εικόνας 2.16. Οι σταθμοί βρίσκονται σε διαρκή σύνδεση με ιστοσελίδα η οποία λαμβάνει από αυτούς μετρήσεις ανά περίπου 10' της ώρας. Στον παρακάτω Πίνακα 2.1 αναφέρονται τα χαρακτηριστικά των διαφόρων αισθητήρων που περιλαμβάνουν οι συγκεκριμένοι σταθμοί, όπως ο τύπος του κάθε αισθητήρα, τα εύρη λειτουργίας και η διακριτική τους ικανότητα.

Πίνακας 2.1: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Αισθητήρων σταθμού Davis Vantage Pro 2 [47]

Φαινόμενο	Τύπος Αισθητήρα	Εύρος Λειτουργίας	Διακριτική Ικανότητα	Ακρίβεια
Θερμοκρασία	Ηλεκτρονικός – Δίοδος πυριτίου PN	-40 έως +65 °C	0.1 °C	±0.3 °C
Υγρασία	Ηλεκτρονικός – Πυκνωτής Film	1% έως 100%	1%	±2%
Ατμοσφαιρική Πίεση	Ηλεκτρονικός	540 έως 1100 hPa	0.1 hPa	±1 hPa
Ταχύτητα Ανέμου	Κυπελλοφόρο με μαγνητικό διακόπτη	1 έως 320 km/h	1 km/h	±5%
Διεύθυνση Ανέμου	Ανεμοδείκτης με ποτενσιόμετρο	0 έως 360°	1°	±3°
Βροχόπτωση	Ανατρεπόμενου δοχείου	0 έως 6553 mm	0.2mm	±3-4%

Οι συγκεκριμένοι σταθμοί είναι επαγγελματικής χρήσεως και αρκετά ακριβείς, επομένως και το κόστος προμήθειάς τους δεν είναι αμελητέο. Όπως παρατηρούμε, οι συγκεκριμένοι σταθμοί φροντίζουν έτσι ώστε τα όργανα να μην χρειάζονται την παρουσία προσωπικού για την καταγραφή των δεδομένων από τις μετεωρολογικές παρατηρήσεις κι έτσι μπορούν να τοποθετούνται σε απομακρυσμένες τοποθεσίες, όπως είναι τα σημεία σε υψηλά υψόμετρα ή δυσπρόσιτα ορεινά μονοπάτια, προσφέροντας σημαντικές πληροφορίες στους επισκέπτες του βουνού.

2.4 Όργανα Μέτρησης Χαρακτηριστικών Εδάφους

Αναφορικά με τα χαρακτηριστικά του εδάφους, τα όργανα που χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις είναι κυρίως ηλεκτρονικές διατάξεις οι οποίες μεταφράζουν τις διηλεκτρικές ιδιότητες του μείγματος του εδάφους σε μετρούμενα μεγέθη. Τα χαρακτηριστικά του εδάφους που μας ενδιαφέρουν στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας είναι η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του χώματος, τα οποία και προαναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο.

2.4.1 Όργανα Μέτρησης Θερμοκρασίας Εδάφους

Σχετικά με την μέτρηση θερμοκρασίας στο έδαφος, υπάρχει ποικιλία ηλεκτρονικών διατάξεων που χρησιμοποιούνται, μεταξύ των οποίων τα θερμοζεύγη, τα θερμίστορ, οι ανιχνευτές θερμοκρασίας με αντίσταση (Resistance Temperature Detectors / RTD), τα ολοκληρωμένα κυκλώματα αισθητήρων θερμοκρασίας, αλλά και τα υπέρυθρα θερμόμετρα. Υπάρχουν διάφορα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα στη χρήση της κάθε μίας εκ των ανωτέρω αναφερθέντων διατάξεων, ωστόσο η επιλογή γίνεται πάντοτε με βάση τον σκοπό της κάθε εφαρμογής, όπως επίσης και των διαθέσιμων πόρων (ενεργειακών, οικονομικών κτλ.). [48] Εμείς θα αναφερθούμε μόνο στα RTD και τα θερμίστορ στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας.

Ως ωμικά στοιχεία μέτρησης θερμοκρασίας θεωρούμε τα RTD και τα θερμίστορ. Τα στοιχεία αυτά βασίζονται στο αξίωμα ότι η ειδική αντίσταση ενός μεταλλικού υλικού μεταβάλλεται με την θερμοκρασία του. Αυτή η σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και ηλεκτρικής αντίστασης είναι μοναδική για κάθε διαφορετικό μέταλλο και μπορεί να αξιοποιηθεί καταλλήλως με σκοπό τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του υλικού αυτού. Η ειδική αντίσταση ενός αγωγού κατασκευασμένου από μέταλλο δίνεται από την παρακάτω σχέση 2.1:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (2.1)$$

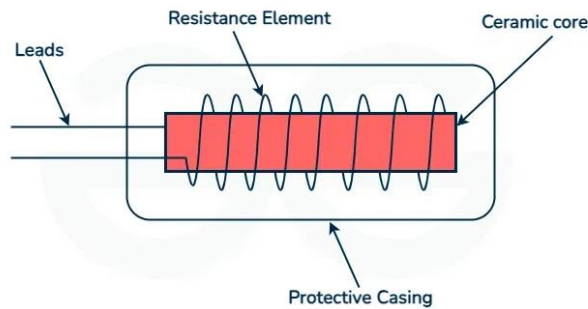
Όπου ρ_0 η ειδική αντίσταση στους $0\text{ }^\circ\text{C}$, ΔT η μεταβολή της θερμοκρασίας από τους $0\text{ }^\circ\text{C}$ και α ο θερμικός συντελεστής του υλικού κατασκευής του αγωγού. Στον παρακάτω Πίνακα 2.2 δίνεται και μία σύγκριση σχετικά με την ειδική αντίσταση και τον θερμικό συντελεστή των κοινότερων υλικών κατασκευής ωμικών στοιχείων θερμοκρασίας.

Πίνακας 2.2: Τιμές ειδικής αντίστασης και θερμικού συντελεστή κοινών μεταλλικών υλικών κατασκευής ωμικών στοιχείων [49]

Μέταλλο	Ειδική Αντίσταση ρ_0 ($\mu\Omega / \text{cm}$)	Θερμικός συντελεστής α ($^\circ\text{C}^{-1}$)
Χαλκός	1.72	0.0043
Νικέλιο	7.80	0.0068
Λευκόχρυσος (Πλατίνα)	10.00	0.00393

Από πλευράς υλικού, η πλατίνα θεωρείται η σοφότερη επιλογή για την υλοποίηση ενός ωμικού οργάνου μέτρησης θερμοκρασίας εξαιτίας της ανθεκτικότητάς της στην οξείδωση αλλά και της χημικής της αδράνειας. Επιπλέον, μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, κυμαινόμενο από τους -260 °C έως τους +850 °C.

Δομικά, τα RTD κατασκευάζονται από λεπτά τριχίδια μεταλλικού υλικού τυλιγμένα σε κάποιο μονωτικό υλικό, όπως το γυαλί ή η πορσελάνη, ώστε να διασφαλίζεται η ακρίβεια των μετρήσεων βάσει ειδικής αντίστασης και θερμικού συντελεστή. [48] Η σύνδεση του στοιχείου στο υπόλοιπο κύκλωμα γίνεται με 2 ακροδέκτες που είναι ελεύθεροι και που το μήκος τους είναι προκαθορισμένο και βαθμονομημένο ώστε να επιτυγχάνεται η ακρίβεια των μετρήσεων. Η δομή που περιγράψαμε φαίνεται στην Εικόνα 2.17 παρακάτω.



Εικόνα 2.17: Κατασκευαστική δομή ενός RTD στοιχείου [50]

Τα θερμίστορ είναι επίσης στοιχεία που παρουσιάζουν μεταβολή της ειδικής τους αντίστασης με την διακύμανση της θερμοκρασίας. Στις εφαρμογές μέτρησης θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται κυρίως θερμίστορ με αρνητικό θερμοκρασιακό συντελεστή (Negative Temperature Coefficient / NTC). Κατασκευάζονται από υλικά ημιαγωγών που έχουν υποστεί επεξεργασία με οξείδια χρωμίου, κοβαλτίου, μαγγανίου, νικελίου και σιδήρου. [51]

Λόγω του αρνητικού θερμοκρασιακού συντελεστή που έχουν τα NTC θερμίστορ, η αντίστασή τους μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας με βάση την παρακάτω σχέση 2.2:

$$R_T = R_{REF} \exp \left[\beta * \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{REF}} \right) \right] \quad (2.2)$$

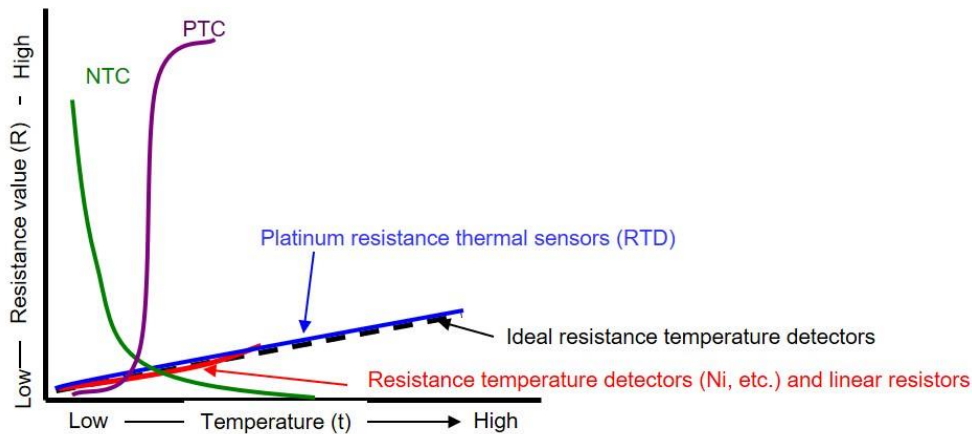
Όπου R_{REF} είναι η αντίσταση σε θερμοκρασία T_{REF} (θερμοκρασία αναφοράς εκφρασμένη σε βαθμούς Kelvin, συνήθως οι 25°C) και β είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από το κάθε θερμίστορ και τη θερμοκρασία, με τυπικό εύρος μεταξύ 3000 και 5000 K. Ο κάθε κατασκευαστής θερμίστορ, δύναται να παρέχει ή πίνακα αντιστοίχισης θερμοκρασιών με τιμές αντίστασης που εμφανίζει το θερμίστορ, είτε τον συντελεστή β από τον οποίο υπολογίζονται αυτές οι τιμές. Επίσης, η τιμή του β δύναται να μην είναι σταθερή σε όλο το εύρος τιμών θερμοκρασίας που μπορεί να λειτουργήσει το θερμίστορ. [51]



Εικόνα 2.18: Διάφοροι τύποι θερμίστορ [52]

Δομικά, τα θερμίστορ ποικίλλουν ανάλογα με την εφαρμογή τους, από μικρά δισκίδια, μέχρι και ανοξείδωτους στυλίσκους, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.18 της προηγούμενης σελίδας που παρουσιάζει μία τέτοια ποικιλία από διάφορους τύπους θερμίστορ.

Αντίστοιχα με τα NTC θερμίστορ, υπάρχουν και τα PTC, με θετικό θερμικό συντελεστή, που προκύπτουν από ορισμένες προσμείξεις υλικών. Ωστόσο, τα PTC χρησιμοποιούνται περισσότερο σε εφαρμογές ανίχνευσης θερμοκρασίας και όχι μέτρησης, εξαιτίας της μη γραμμικότητάς τους ως στοιχεία. [49]



Εικόνα 2.19: Γράφημα σύγκρισης μεταβολής τιμών αντίστασης και θερμοκρασίας σε RTD, NTC και PTC θερμίστορ [53]

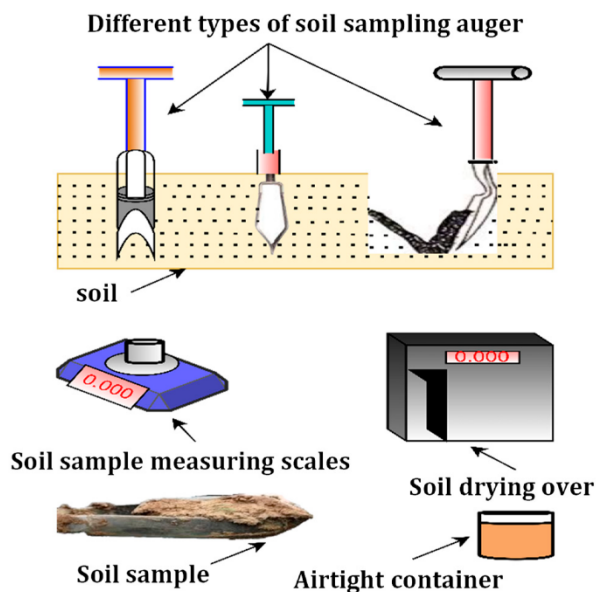
Αναφορικά με την γραμμικότητα των ωμικών στοιχείων, όπως μπορούμε να διακρίνουμε και από το γράφημα της παραπάνω Εικόνας 2.19, την βέλτιστη γραμμικότητα παρουσιάζουν τα RTD, ενώ τα θερμίστορ είτε PTC είτε NTC είναι μη γραμμικά στοιχεία, επομένως δεν μπορούμε πάντοτε να έχουμε την ακρίβεια στις μετρήσεις που έχουμε με τα RTD. Ωστόσο, εξαιτίας των υψηλότερων τιμών αντιστάσεων που εμφανίζουν τα θερμίστορ, σε εφαρμογές με μικρότερο θερμοκρασιακό εύρος, όπως είναι οι μετρήσεις στο χώμα, η κατανάλωση ενέργειας των θερμίστορ είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τα RTD, επομένως σε IoT εφαρμογές που τείνουν να καταναλώνουν λιγότερους ενεργειακούς πόρους, προτιμάται η χρήση θερμίστορ.

2.4.2 Όργανα Μέτρησης Υγρασίας Εδάφους

Όπως αναφέραμε και στο 1^ο κεφάλαιο, τα όργανα μέτρησης υγρασίας του εδάφους εξαρτώνται από την μέθοδο μέτρησης. Στις επόμενες υποενότητες παρατίθενται συνοπτικά οι 4 βασικότερες μέθοδοι μέτρησης του μεγέθους, καθώς και τα απαιτούμενα όργανα για τις μετρήσεις αυτές.

2.4.2.1 Μέθοδος GWC (Gravimetric Water Content)

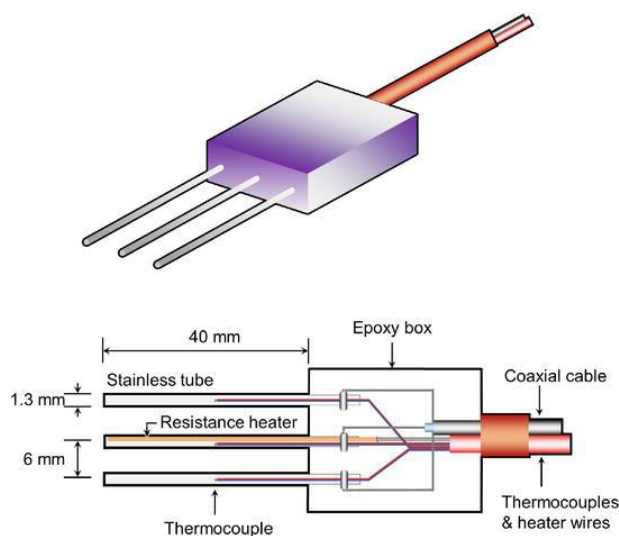
Χρησιμοποιώντας την μέθοδο της Βαρυμετρικής Περιεκτικότητας Ύδατος, όργανο μέτρησής μας είναι μία κοινή ζυγαριά, ωστόσο μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο εντός εργαστηριακού περιβάλλοντος, με την μέθοδο που αναλύσαμε, δηλαδή αποκομιδή δείγματος και μέτρηση υγρού και ξηρού δείγματος. Στην Εικόνα 2.20 της επόμενης σελίδας υπάρχει μία συνοπτική αναπαράσταση αυτής της μεθόδου μέτρησης.



Εικόνα 2.20: Σύνοψη μεθόδου Βαρυμετρικής Περιεκτικότητας Ύδατος [54]

2.4.2.2 Μέθοδος TDR (Time Domain Reflectometry)

Δεύτερη μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να μετρηθεί η περιεκτικότητα ύδατος στο έδαφος είναι η λεγόμενη μέθοδος TDR. Αποτελεί έμμεση μέθοδο μέτρησης, στην οποία χρησιμοποιείται ένας αισθητήρας με 3 διακριτά καρφιά που τοποθετούνται στο έδαφος. [54] Το κεντρικό καρφί είναι ουσιαστικά μία θερμική γεννήτρια παλμών, ενώ τα ακριανά είναι ένα θερμοζεύγος που αντιλαμβάνεται την διαφορά στην θερμοκρασία του χώματος με το σήμα της γεννήτριας. [55] Τα καρφιά αυτά συνδέονται σε ένα ομοαξονικό καλώδιο, στην άκρη του οποίου υπάρχει ένας υποτυπώδης παλμογράφος. Η γεννήτρια αυτή στέλνει ένα σήμα και ο παλμογράφος πραγματοποιεί μέτρηση χρόνου από την στιγμή της αποστολής μέχρι και την λήψη του σήματος. Με δεδομένο το μήκος των καρφιών, υπολογίζοντας ουσιαστικά την ταχύτητα του σήματος, εύκολα γίνεται αντιστοίχιση της περιεκτικότητας ύδατος στο χώμα ανάλογα με την αγωγιμότητά του. Η δομή ενός αισθητήρα TDR είναι αυτή της Εικόνας 2.21 παρακάτω.

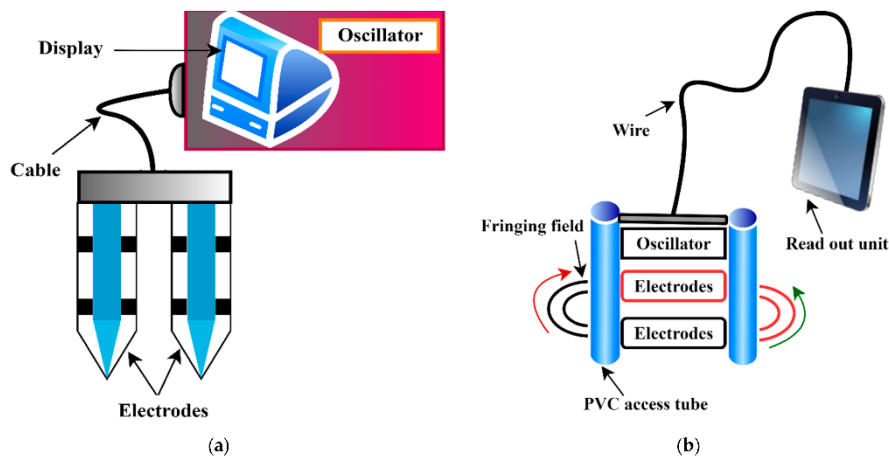


Εικόνα 2.21: Δομή αισθητήρα TDR [55]

Η συγκεκριμένη μέθοδος προσφέρει εξαιρετικά ακριβή δεδομένα, με μία ακρίβεια της τάξης του ± 1 με 2% ωστόσο απαιτεί σχετική βαθμονόμηση σε αμμώδη, αλατώδη ή πηλώδη εδάφη [18]. Ο βασικότερος λόγος που αποφεύγεται είναι το κόστος του ίδιου του αισθητήρα, χαρακτηρίζοντας την όλη μέθοδο ασύμφορη.

2.4.2.3 Μέθοδος Μέτρησης Χωρητικότητας / Μέθοδος FDR (Frequency Domain Reflectometry)

Οι δύο αυτές μέθοδοι βασίζονται στην εκτίμηση της διηλεκτρικής σταθεράς ενός μέσου, στην προκειμένη περίπτωση του εδάφους, μετρώντας τον χρόνο φόρτισης ενός πυκνωτή στο μέσο αυτό. Εξαιτίας της διαφορετικότητας στα χαρακτηριστικά που εμφανίζουν οι τύποι εδαφών (βλ. υποενότητα 1.3.2.3), απαιτείται τακτική βαθμονόμηση των αισθητήρων. Στην παρακάτω Εικόνα 2.22 δίνονται οι διατάξεις των αισθητήρων για την χρήση των 2 αυτών μεθόδων.

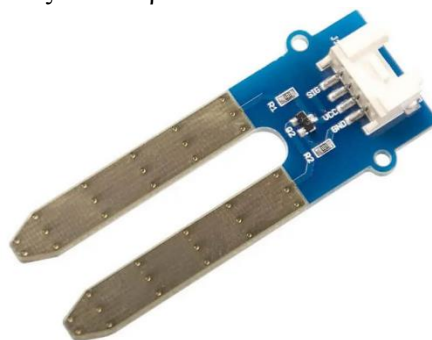


Εικόνα 2.22: Διάταξη αισθητήρων για a) χωρητική μέθοδο μέτρησης & b) μέθοδο FDR [54]

Το κόστος των αισθητήρων για τη χρήση αυτής της μεθόδου είναι σαφώς χαμηλότερο σε σχέση με την μέθοδο TDR και τα δεδομένα είναι αρκετά ικανοποιητικά, με μία εκτίμηση υδατικής περιεκτικότητας σε εδάφη που αγγίζει ένα ποσοστό ακρίβειας ± 2 με 4% [54, 18].

2.4.2.4 Μέθοδος Μέτρησης Αντίστασης

Όπως και στην περίπτωση της θερμοκρασίας υπάρχει και στην υγρασία μία σχέση μεταξύ της τιμής αντίστασης και της περιεκτικότητας σε νερό στο έδαφος. Συγκεκριμένα αυτή η σχέση είναι αντιστρόφως ανάλογη, δηλαδή η αύξηση σε περιεκτικότητα της υγρασίας στο έδαφος μειώνει την αντίσταση του εδάφους. Αυτή η αντίσταση μπορεί να μετρηθεί με αισθητήρες που διαθέτουν 2 ηλεκτρόδια, όπως αυτός της Εικόνας 2.23 παρακάτω.



Εικόνα 2.23: Ωμικός αισθητήρας μέτρησης υγρασίας εδάφους [56]

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη μέθοδο είναι οι φθηνότεροι από άποψη τιμής, ωστόσο υπόκεινται εύκολα σε φθορές, λόγω ηλεκτρόλυσης, διότι για να πραγματοποιείται μέτρηση, τα ηλεκτρόδια του αισθητήρα, τα οποία είναι επαφές χαλκού βρίσκονται διαρκώς υπό σταθερή DC τάση. Επιπλέον, όπως αναφέρεται στις πηγές [54,18] η μέθοδος αυτή ενδέχεται να είναι αρκετά ανακριβής καθώς και μη επαναληπτική σε μετρήσεις ίδιων συνθηκών.

2.5 Επίλογος

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο κάναμε μία συνοπτική αναφορά στα απλά και αυτογραφικά παραδοσιακά όργανα μέτρησης των μετεωρολογικών φαινομένων, αναλύσαμε την δομή και τα μέρη που απαρτίζουν τους μετεωρολογικούς κλωβούς του παρελθόντος αλλά και τους σύγχρονους ασύρματους σταθμούς μέτρησης. Τέλος, αναλύσαμε τις ηλεκτρονικές διατάξεις, τα όργανα και τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις των χαρακτηριστικών του εδάφους που θα μας απασχολήσουν στα πλαίσια της εργασίας.

Κεφάλαιο 3ο: IoT – Ενσωματωμένα Συστήματα

3.1 Εισαγωγή

Τα Ενσωματωμένα Συστήματα (Embedded Systems) θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως ο τομέας που ενώνει το υλικό και λογισμικό μέρος ενός συστήματος. Γενικά, στην εποχή της 4ης Βιομηχανικής Επανάστασης έχουν άπειρες εφαρμογές σε πολλούς τομείς της καθημερινότητας των ανθρώπων. Στο κεφάλαιο αυτό, κάνουμε μία μικρή επισκόπηση της δομής και χρήσης των ενσωματωμένων συστημάτων σε διάφορους τομείς της καθημερινότητας και φυσικά αναφερόμαστε στην έννοια και την βασική δομή του Διαδικτύου των Πραγμάτων.

Στην περίπτωση της εργασίας μας, το υλοποιούμενο σύστημα συλλογής και επεξεργασίας περιβαλλοντικών δεδομένων αποτελεί μια εφαρμογή ενός ενσωματωμένου συστήματος καθότι η βάση του, όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο αναλυτικά, είναι ένας κοινός μικροελεγκτής τύπου ESP32 διασυνδεδεμένος με διάφορα είδη αισθητήρων. Οι αισθητήρες αυτοί συλλέγουν δεδομένα από το περιβάλλον, τα οποία στη συνέχεια, ερμηνεύονται από τον μικροελεγκτή. Ως εδώ μιλάμε απλά για ένα ενσωματωμένο σύστημα. Στη συνέχεια τα δεδομένα αποστέλλονται μέσω πρωτοκόλλου επικοινωνίας σε έναν δεύτερο μικροελεγκτή, ο οποίος μπορεί να είναι ίδιου ή διαφορετικού τύπου. Στα πλαίσια της εργασίας, και για λόγους κόστους, επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε ίδιου τύπου μικροελεγκτή. Επομένως αυτό άμεσα καθιστά το σύστημα IoT εφαρμογή, μιας και σκοπός της ασύρματης ζεύξης, αποστολής, επεξεργασίας και αποθήκευσης των δεδομένων απομακρυσμένα είναι ο χρήστης να λαμβάνει τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. [60, 61, 66]

3.2 Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT)

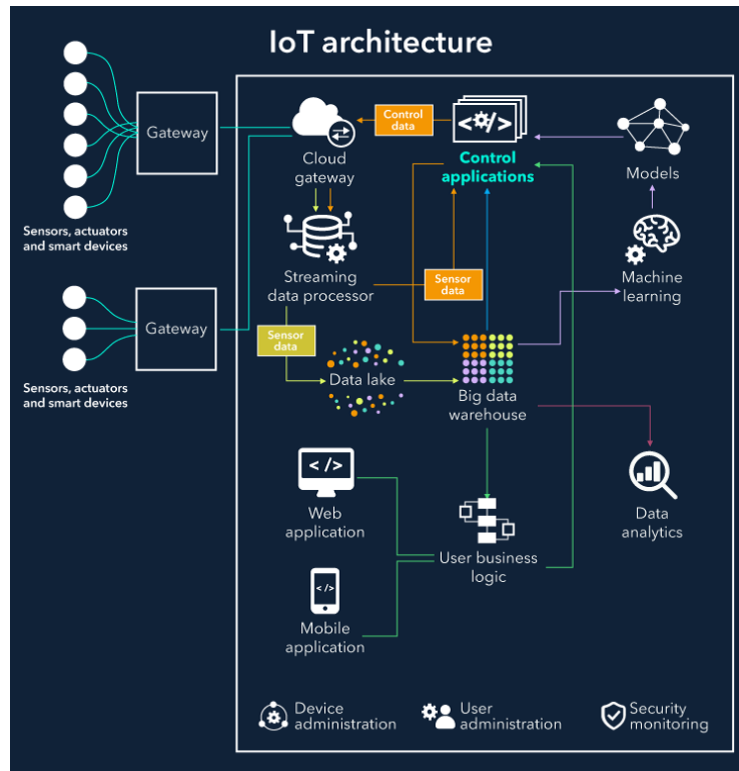
Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things), εφεξής καλούμενο ως IoT, είναι ένας όρος στον τομέα των δικτύων, ο οποίος επινοήθηκε στα τέλη του 1990. Ουσιαστικά αποτελεί τη διασύνδεση ορισμένων φυσικών συσκευών με ικανότητες ανταλλαγής, συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Στη σημερινή εποχή, τα συστήματα IoT χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στην καθημερινότητα, μιας και συμβάλλουν στην διευκόλυνση των καθημερινών αναγκών της ανθρωπότητας. Συνεπώς, οι βιομηχανίες παραγωγής, παροχών υπηρεσιών και εταιρίες υλικού - λογισμικού επενδύουν σε συσκευές και τεχνολογίες IoT [57, 66]. Αξίζει να σημειωθεί ότι το διαδίκτυο των πραγμάτων αποτελεί μια από τις καινοτομίες που προέκυψαν κατά την εποχή της 4ης Βιομηχανικής Επανάστασης [63].

3.2.1 Δομή Συσκευών στο IoT

Όπως διακρίνεται και στην Εικόνα 3.1, η δομή της διασύνδεσης των συσκευών IoT αποτελείται από 3 μεγάλα τμήματα. Το πρώτο και πολυπληθέστερο είναι τα λεγόμενα “things”, δηλαδή οι αισθητήρες, οι ενεργοποιητές και οι έξυπνες συσκευές. Το δεύτερο είναι τα “gateways”, βρισκόμενα στο edge – side των συσκευών. Όλα τα things διαθέτουν κάποιο gateway, μέσω του οποίου διασυνδέονται με το τρίτο και σημαντικότερο τμήμα που είναι το “cloud – side”. Σε αυτό, γίνεται όλη η επεξεργασία και αποθήκευση των δεδομένων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω του τεράστιου όγκου δεδομένων που διαχειρίζονται τα IoT συστήματα, ειδικά αν πρόκειται για κάποια τεράστια εφαρμογή τους όπως ένα δάσος, μερικές φορές απαιτείται να

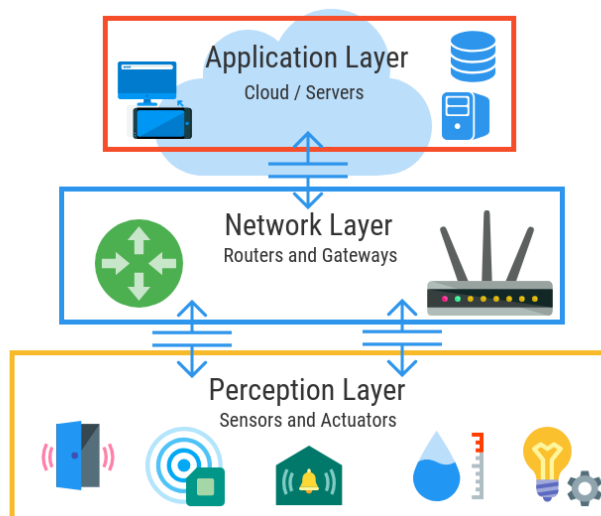
γίνεται φιλτράρισμα των δεδομένων και στο “edge – side”, δηλαδή στα gateways έτσι ώστε να μην οδηγούμαστε σε σπατάλη πόρων στο cloud (δηλαδή στις βάσεις που αποθηκεύονται τα δεδομένα).



Εικόνα 3.1: Δομή διασύνδεσης στο IoT [72]

3.2.2 Αρχιτεκτονική 3 Επιπέδων του IoT

Η αρχιτεκτονική επιπέδων του IoT είναι ένας εύκολος τρόπος με τον οποίο μπορούμε να οργανώσουμε και να κατανοήσουμε τα κύρια μέρη ενός συστήματος IoT [58, 59, 69] και την αλληλεξάρτησή τους. Κατά κύριο λόγο, ένα τέτοιο σύστημα περιγράφεται με 3 επίπεδα, το Επίπεδο Αντίληψης (Perception Layer), το Επίπεδο Δικτύου (Network Layer) και το Επίπεδο Εφαρμογής (Application Layer), τα οποία εξηγούμε αναλυτικότερα παρακάτω. Το μοντέλο της δομής επιπέδων μπορούμε να διακρίνουμε και στην παρακάτω Εικόνα 3.2. [59]



Εικόνα 3.2: Αρχιτεκτονική 3 Επιπέδων στο IoT [73]

3.2.2.1 Επίπεδο Εφαρμογής (Application Layer)

Στο επίπεδο εφαρμογής που είναι και το ανώτερο επίπεδο, τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί και αποθηκευτεί μέσω των δύο κατώτερων επιπέδων, αναλύονται και υποβάλλονται σε επεξεργασία, με στόχο την αξιοποίησή τους σε παροχές υπηρεσιών και στη λήψη αποφάσεων. Για παράδειγμα, εδώ αποφασίζεται ο τρόπος με τον οποίο θα παρουσιαστούν τα δεδομένα στον τελικό χρήστη. Αν υπάρχουν διαδικτυακές εφαρμογές που σχετίζονται με το σύστημα, βρίσκονται σε αυτό το επίπεδο. [69]

3.2.2.2 Επίπεδο Δικτύου (Network Layer)

Το επίπεδο αυτό αποτελεί τον συνδετικό κρίκο μεταξύ επιπέδου αντίληψης και επιπέδου εφαρμογής. Συσκευές σε αυτό το επίπεδο είναι οι δρομολογητές διαδικτύου (routers) καθώς και τα gateways. Απαρτίζεται από τεχνολογίες διασύνδεσης, όπως είναι η ενσύρματη και η ασύρματη ασφαλή σύνδεση, ήτοι η Ethernet και η Wi-Fi αντίστοιχα. Όσα δεδομένα λαμβάνονται από το επίπεδο αντίληψης μεταφέρονται στο επίπεδο εφαρμογής μέσω του επιπέδου δικτύου. Τα πιο κοινά πρωτόκολλα ασύρματης επικοινωνίας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αυτό το επίπεδο περιλαμβάνουν το Wi-Fi, το Bluetooth, το LoRaWAN και το Zigbee. [59, 69]

3.2.2.3 Επίπεδο Αντίληψης (Perception Layer)

Αποτελεί το κατώτατο επίπεδο και χαρακτηρίζεται και ως φυσικό επίπεδο, όπως και όλα τα κατώτατα επίπεδα σε δομές επιπέδων δικτύου, διότι εμπεριέχει όλες τις φυσικές συσκευές (things). Αλλού συναντάται ως επίπεδο αισθητήρων διότι οι φυσικές συσκευές που το απαρτίζουν είναι κυρίως αισθητήρες. Οι αισθητήρες αυτοί συλλέγουν δεδομένα από τις συσκευές και τα μεταφέρουν στο επίπεδο δικτύου. Ταυτοχρόνως, στο φυσικό επίπεδο μεταφέρονται και τα αποτελέσματα επεξεργασίας των δεδομένων, σε περιπτώσεις που τα IoT συστήματα δεν έχουν μοναδικό ρόλο τη συλλογή δεδομένων, αλλά διαθέτουν και ενεργοποιητές. [69] Ένα τυπικό παράδειγμα ενός τέτοιου συστήματος είναι ένας έξυπνος ανιχνευτής καπνού ή πυρκαγιάς. Αφού γίνει η ανίχνευση μέσω των αισθητήρων, δίνεται σήμα από το επίπεδο δικτύου για ενεργοποίηση των μέτρων πυρασφάλειας, γεγονός που θα ενεργοποιούσε αντίστοιχους φυσικούς μηχανισμούς κατάσβεσης (sprinklers).

3.2.3 Χαρακτηριστικά IoT εφαρμογών

Οι συσκευές IoT αποτελούν βασικό συντελεστή για την υλοποίηση έξυπνων συστημάτων και εφαρμογών που συνδέουν τον φυσικό με τον ψηφιακό κόσμο. Κάθε τέτοια συσκευή σχεδιάζεται ώστε να διέπεται από ορισμένα χαρακτηριστικά, τα οποία την διαφοροποιούν από τις παραδοσιακές συσκευές και επιτρέπουν την αποδοτική συλλογή, επεξεργασία και μετάδοση δεδομένων [57, 66]. Τα βασικότερα από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι τα εξής τρία:

- **Ικανότητα ανίχνευσης (Sensing / Monitoring):** Οι IoT συσκευές ενσωματώνουν αισθητήρες που καταγράφουν φυσικά μεγέθη, όπως θερμοκρασία, υγρασία, πίεση, κίνηση ή γεωγραφική τοποθεσία. Παράλληλα, αρκετές από αυτές διαθέτουν ενεργοποιητές που επιτρέπουν την εκτέλεση ενεργειών βάσει των συλλεγόμενων δεδομένων.
- **Συνδεσιμότητα (Connectivity):** Οι συσκευές απαραίτητως επικοινωνούν μέσω κάποιας τεχνολογίας ενσύρματης ή ασύρματης μετάδοσης και σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούν παραπάνω από μία. Συνήθεις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται είναι η Wi-Fi, η Bluetooth, η Zigbee, η LoRaWAN ή τα κυψελλωτά δίκτυα (4G/5G). Η αξιόπιστη και ασφαλής επικοινωνία εγγυάται τη συνεχή ροή δεδομένων προς τα συστήματα επεξεργασίας ή το υπολογιστικό νέφος. [59]

- **Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας (Low power):** Από τις πιο θεμελιώδεις απαιτήσεις, καθώς πολλές IoT συσκευές λειτουργούν με μπαταρία, ιδίως αν βρίσκονται σε «απομακρυσμένα» περιβάλλοντα. Για τον σκοπό αυτό εφαρμόζονται τεχνικές ενεργειακής βελτιστοποίησης και ενεργειακή ανάκτηση μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Για παράδειγμα, σε χώρες όπως η Ελλάδα συχνά οι συσκευές διαθέτουν φωτοβολταϊκά πάνελ για χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας ως πηγή ισχύος.

Επιπροσθέτως, σημαντικό να τονιστεί είναι ότι οι περισσότερες IoT συσκευές διαθέτουν κάποιο τύπο μικροελεγκτή ή επεξεργαστή με ενσωματωμένη «νοημοσύνη», έτσι ώστε να επιχειρούν τοπική επεξεργασία δεδομένων προς άμεση λήψη αποφάσεων. Αυτή η λογική ονομάζεται “edge – computing”. Στο παράδειγμα που είχαμε αναφέρει παραπάνω σχετικά με τα έξυπνα συστήματα πυρασφάλειας, η απόφαση να ενεργοποιηθούν οι μηχανισμοί κατάσβεσης της πυρκαγιάς είναι ένα παράδειγμα τέτοιου τύπου υπολογιστικού σχεδιασμού.

Τέλος, υπάρχουν και ορισμένα ελάσσονα χαρακτηριστικά που διέπουν τα IoT συστήματα, όπως η **διαλειτουργικότητα (interoperability)**, δηλαδή η ικανότητα διαφορετικών συσκευών να συνεργάζονται μεταξύ τους προς τη λήψη αποφάσεων, η **επεκτασιμότητα (scalability)**, δηλαδή η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού ενός συστήματος ώστε να μπορεί να λειτουργήσει σε οποιοδήποτε μεγέθους περιβάλλον, η **δυνατότητα απομακρυσμένης πρόσβασης (remote access)**, δηλαδή η ικανότητα των συστημάτων να δρουν αυτόματα χωρίς την παρουσία ανθρώπινης παρέμβασης στο πεδίο, καθώς και τα ενσωματωμένα **χαρακτηριστικά ασφάλειας (security features)** και **προστασίας ιδιωτικότητας (privacy protection)** συμβάλλουν σημαντικά στην υιοθέτηση και τη μακροχρόνια αξιοπιστία των IoT εφαρμογών. [66]

3.2.4 Τυπικές IoT εφαρμογές – Τομείς επιρροής

Το IoT με την επερχόμενη επανάσταση που έχει φέρει, έχει καταλάβει σημαντικό ρόλο σε πολλούς και σημαντικούς τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας, όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή του κεφαλαίου. Ο λόγος για αυτή του την εγκαθίδρυση είναι απλούστατος: διευκολύνει τον τρόπο λειτουργίας των συστημάτων σε αυτούς τους τομείς.

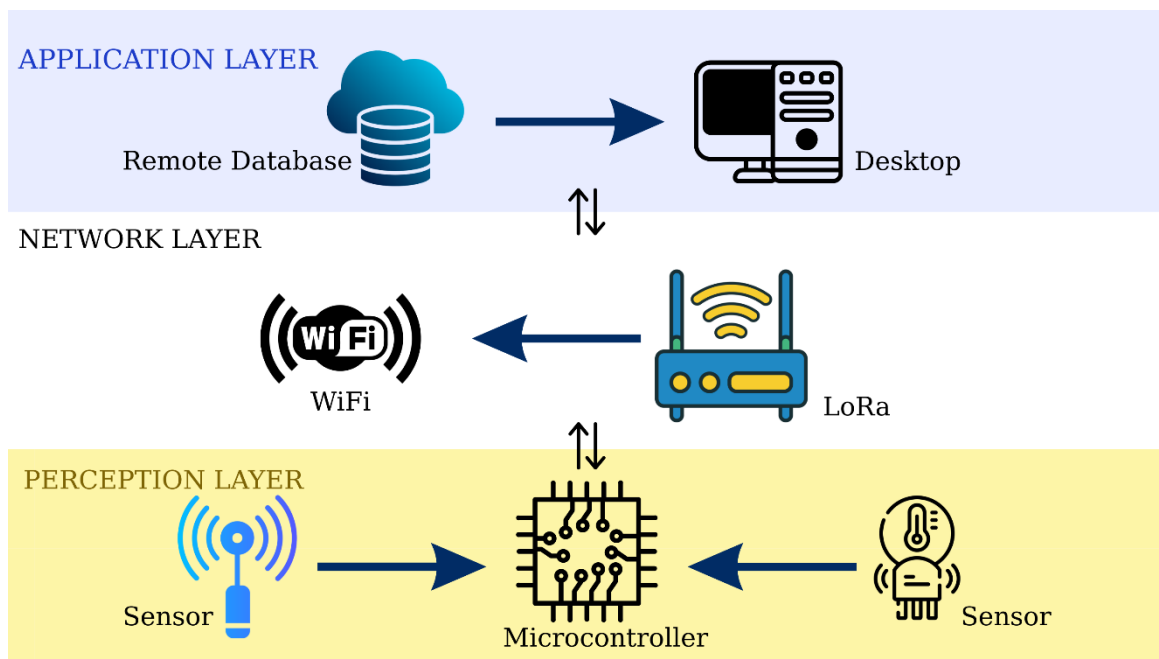
Μπορεί ο όρος IoT να επινοήθηκε στα τέλη της προηγούμενης χιλιετίας, σύμφωνα όμως με την Forbes η μετάβαση από την υποθετική έννοια στην πράξη πραγματοποιήθηκε περίπου 20 χρόνια αργότερα, μόλις το 2015. Βάσει ερευνών, ο αριθμός των συσκευών που θα συνδέονται σε αυτή τη νέα μορφή του διαδικτύου αναμένεται να φτάσει τα 75.44 δισεκατομμύρια, γεγονός που αποδεικνύει την επίδρασή του στην κοινωνία. [57, 66]

Ορισμένες από τις συνηθέστερες εφαρμογές του IoT, σύμφωνα με τις πηγές [57] και [66] είναι οι εξής:

- **Υγειονομική Περίθαλψη**, με την δημιουργία έξυπνων υγειονομικών μονάδων και της τηλεϊατρικής, της ρομποτικής χειρουργικής αλλά και του telehospital.
- **Έξυπνα Σπίτια**, τα οποία κατακτούν με σταθερούς ρυθμούς τις αγορές των ανεπτυγμένων χωρών του πρώτου κόσμου.
- **Έξυπνη Γεωργία**, κάνοντας χρήση συστημάτων καιρικής πρόγνωσης και ανάλυσης στοιχείων εδάφους, με εφαρμογές που αποσκοπούν στην μεγιστοποίηση της αγροτικής παραγωγής.
- **Αυτοματοποίηση Εργοστασίων (Βιομηχανία 4.0)**, με χρήση αυτόνομων ρομποτικών συστημάτων σε όλα τα στάδια παραγωγής και εξάλειψη του φυσικού προσωπικού, έχοντας ως στόχο την αύξηση της παραγωγής όλων των βιομηχανικών προϊόντων, καθώς και την μείωση στην τελική τιμή.

- **Έξυπνα Συστήματα Μεταφορών**, όπως είναι τα αυτόνομα οχήματα ή τα αυτόνομα μέσα μαζικής μεταφοράς, έχοντας ως στόχο την ασφάλεια πεζών και επιβατών, μιας και στοχεύει στην εξάλειψη των περιπτώσεων ανθρώπινου λάθους στον χειρισμό των οχημάτων.
- **Έξυπνες Πόλεις**, που θα αξιοποιούν εις βάθος έναν συνδυασμό συστημάτων αυτοματοποίησης (έξυπνες μετακινήσεις, έξυπνη υγεία, παρακολούθηση ατμοσφαιρικής και εδαφικής ρύπανσης κλπ.) με στόχο την εύρυθμη ζωή των κατοίκων
- **Παρακολούθηση Υποδομών**, όπως στο παράδειγμα των συστημάτων πυρασφάλειας ή δεδομένων στατικότητας μεγάλων κατασκευαστικών έργων (λ.χ. Flyover Θεσσαλονίκης)
- **Λιανικό Εμπόριο**, με στόχο την αύξηση των ωρών λειτουργίας των καταστημάτων και μείωση του κόστους από τις πληρωμές των υπαλλήλων.
- **Παρακολούθηση Περιβάλλοντος**, όπως για παράδειγμα τα συστήματα παρακολούθησης δασικών πυρκαγιών ή μόλυνσης ατμοσφαιρικού αέρα γύρω από τις βιομηχανικές ζώνες ή τα μεγάλα κατασκευαστικά έργα.
- **Διαχείριση Ύδατος**, που αποτελεί μείζον πρόβλημα της χώρας με την λειψυδρία τους καλοκαιρινούς μήνες να μαστίζει την Αθήνα, τα νησιά των Κυκλάδων και την Κρήτη, περιοχές που είναι σημαντικές για τον τριτογενή τομέα της χώρας, μιας και αποτελούν τουριστικούς προορισμούς
- **Δικτύων Ηλεκτρικής Ενέργειας**, τα οποία είναι διαρκώς επιβαρυνόμενα εξαιτίας του όγκου των συσκευών που διασυνδέονται σε συνδυασμό με την απαρχαιωμένη τους υποδομή.

Το προς κατασκευή σύστημα μετρήσεων που πραγματεύεται αυτή η εργασία, αφού αφορά σε συλλογή περιβαλλοντικών δεδομένων, εμπίπτει στην έξυπνη γεωργία, μιας και σε πραγματικό χρόνο συλλέγει και αποστέλλει στον χρήστη δεδομένα θερμοκρασίας και υγρασίας εδάφους, ενώ ταυτόχρονα μετρά θερμοκρασία, υγρασία και πίεση ατμοσφαιρικού αέρα, ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου, ενώ ανιχνεύει και το ύψος βροχής. Το σύστημα αυτό βοηθά τον χρήστη (δηλαδή τον γεωργό), να λάβει αποφάσεις σχετικά με το εάν το έδαφος είναι κατάλληλο για καλλιέργεια καθώς και για το προτεινόμενο είδος της καλλιέργειας. Στο παρακάτω σχεδιάγραμμα της Εικόνας 3.3 μπορούμε να διακρίνουμε την λογική επιπέδων του συστήματος IoT που υλοποιούμε.



Εικόνα 3.3: Αρχιτεκτονική Επιπέδων του IoT συστήματος μέτρησης περιβαλλοντικών δεδομένων

3.3 Ενσωματωμένα Συστήματα

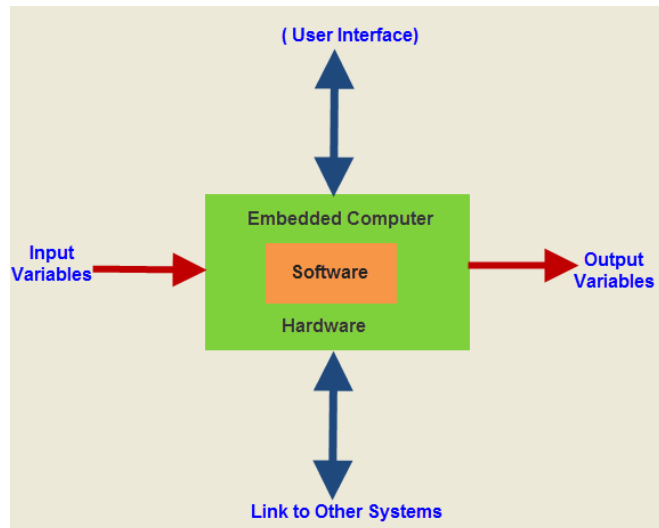
Τα Ενσωματωμένα Συστήματα (Embedded Systems) αποτελούν εξειδικευμένα υπολογιστικά συστήματα (dedicated systems), τα οποία έχουν σχεδιαστεί για να εκτελούν συγκεκριμένες λειτουργίες, συνήθως σε πραγματικό χρόνο και είναι μέρος μιας μεγαλύτερης ηλεκτρονικής ή μηχανικής διάταξης. Σε αντίθεση με τους υπολογιστές γενικού σκοπού που μπορούν να εκτελέσουν ποικίλες εφαρμογές, τα ενσωματωμένα συστήματα είναι προσανατολισμένα σε έναν περιορισμένο και σαφώς καθορισμένο στόχο. [60, 61]

3.3.1 Γενική Δομή Ενσωματωμένων Συστημάτων

Η βασική δομή ενός ενσωματωμένου συστήματος, περιλαμβάνει το υλικό μέρος (hardware) και το λογισμικό (software), όπως διακρίνεται και στην διπλανή Εικόνα 4.4.

Το υλικό συνήθως αποτελείται από μικροελεγκτές ή μικροεπεξεργαστές, μνήμες, μονάδες εισόδου/εξόδου και διάφορους αισθητήρες ή ενεργοποιητές, αναλόγως της εφαρμογής.

Το λογισμικό από την άλλη πλευρά, είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο των λειτουργιών και βελτιστοποιείται ως προς την κατανάλωση πόρων και να την αξιόπιστη λειτουργία υπό περιορισμούς χρόνου και ενέργειας. [60, 61]



Εικόνα 3.4: Γενική Δομή Ενσωματωμένου Συστήματος [74]

Κεντρικό στοιχείο όλου του συστήματος είναι ο μικροελεγκτής, ο οποίος διαχειρίζεται και συντονίζει τις λειτουργίες όλων των υπομονάδων. Οι εισοδοί του συστήματος συνίστανται σε επιλογές χρήστη και μετρήσεις αισθητήρων, ενώ οι έξοδοι εκφράζονται μέσω της απεικόνισης πληροφορίας, της ρύθμισης εξωτερικών υπομονάδων ή μέσω ακουστικών σημάτων. Επιπροσθέτως, ένα ενσωματωμένο σύστημα δύναται να διασυνδέεται και με άλλα ενσωματωμένα συστήματα, με τα οποία μπορεί να έχει αμφίδρομη επικοινωνία. [60]

Παραδείγματος χάριν, ένα τυπικό ενσωματωμένο σύστημα θα μπορούσε να θεωρηθεί ένας φούρνος μικροκυμάτων. Το παράδειγμα αυτό θα αξιοποιήσουμε κατά την ανάλυση των στοιχείων που απαρτίζουν ένα ενσωματωμένο σύστημα.

3.3.1.1 Υλικό ενός Ενσωματωμένου Συστήματος

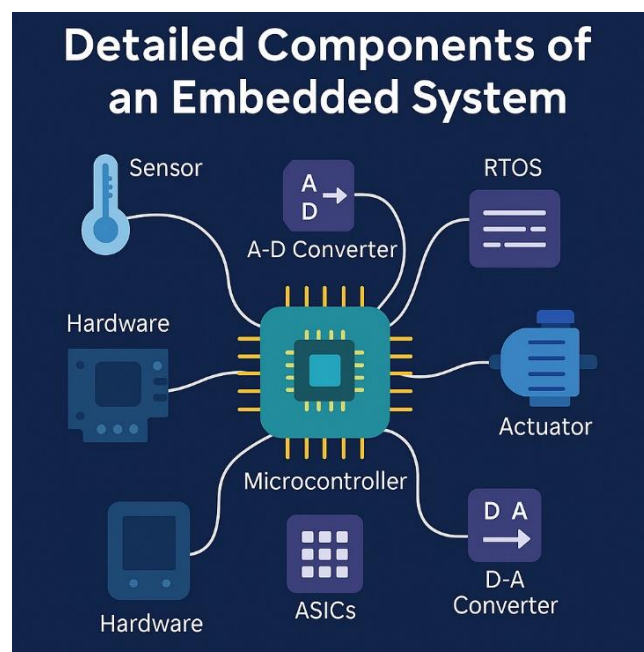
Τα υποσυστήματα υλικού που απαντώνται σε τυπικά ενσωματωμένα συστήματα περιλαμβάνουν:

- **Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας (CPU)**, υπεύθυνη για την εκτέλεση εντολών.
- **Μνήμη προγράμματος και δεδομένων (program memory, data memory)**.
- **Θύρες Εισόδου/Εξόδου (I/O)** για αλληλεπίδραση με το εξωτερικό περιβάλλον.
- **Διεπαφές επικοινωνίας** (π.χ. USB, RF, υπέρυθρες).
- **Διεπαφές χρήστη** (πληκτρολόγια, οθόνες, ηχητικοί μηχανισμοί).
- **Αισθητήρες και ενεργοποιητές** για παρακολούθηση φυσικών παραμέτρων και εκτέλεση εντολών.
- **Μετατροπείς ADC/DAC** για τη γεφύρωση ψηφιακών και αναλογικών σημάτων.

- **Δευτερεύοντα κυκλώματα** όπως τροφοδοτικά, χρονιστές, διαχειριστές διακοπών, DMA controllers.
- **Εξειδικευμένα ολοκληρωμένα κυκλώματα (ASIC ή FPGA)** όπου απαιτείται αυξημένη απόδοση.

Για παράδειγμα, στην περίπτωση με τον φούρνο μικροκυμάτων που αναφέραμε παραπάνω, το υλικό του συστήματος περιλαμβάνει το μάγνητρο (magnetron) που παράγει τα μικροκύματα και αποτελεί ενεργοποιητή, τον κινητήρα περιστροφής του δίσκου που είναι επίσης ενεργοποιητής, το κύκλωμα ισχύος, την διεπαφή με το χρήστη μέσω του πληκτρολογίου, καθώς και οθόνη απεικόνισης όλων των παραμέτρων προς ρύθμιση από τον χρήστη, ενώ ακόμη υπάρχει και ο βομβητής για ηχητική ειδοποίηση.

Οι είσοδοι του συστήματος συνίστανται σε επιλογές χρήστη (χρόνος, ισχύς, πρόγραμμα μαγειρέματος) και μετρήσεις αισθητήρων (θερμοκρασία, κατάσταση λειτουργίας), ενώ οι έξοδοι εκφράζονται μέσω της απεικόνισης πληροφορίας, της ρύθμισης της ισχύος, της ενεργοποίησης κινητήρων και της εκπομπής ηχητικών σημάτων. Στην παρακάτω Εικόνα 3.5 διακρίνονται τα συστατικά στοιχεία υλικού ενός ενσωματωμένου συστήματος.



Εικόνα 3.5: Συστατικά Στοιχεία Υλικού & Λογισμικού ενός γενικού Ενσωματωμένου Συστήματος [75]

3.3.1.2 Λογισμικό ενός Ενσωματωμένου Συστήματος

Το λογισμικό σε ένα ενσωματωμένο σύστημα λειτουργεί ως ο «τροχονόμος», καθορίζοντας τη σειρά εκτέλεσης των λειτουργιών. Στο προαναφερθέν παράδειγμα με το φούρνο μικροκυμάτων, το πρόγραμμα αναγνωρίζει την είσοδο του χρήστη, υπολογίζει τον απαιτούμενο χρόνο και την ισχύ, δρομολογεί την ενεργοποίηση των επιμέρους μονάδων και παρακολουθεί σε πραγματικό χρόνο την κατάσταση του φαγητού και του συστήματος. Σε περίπτωση δυσλειτουργίας, το λογισμικό προβλέπει διαδικασίες ασφαλείας, λ.χ. την άμεση διακοπή λειτουργίας.

Τα λογισμικά υποσυστήματα οργανώνονται γύρω από ένα λειτουργικό σύστημα ή σε πιο σύνθετες περιπτώσεις από Λειτουργικά Συστήματα Πραγματικού Χρόνου (Real – Time Operating Systems / RTOS). Οι κύριες λειτουργίες είναι:

- Οι **εργασίες (Tasks)**, υπεύθυνες για συγκεκριμένες λειτουργίες.
- Ο **πυρήνας (Kernel)** που διαχειρίζεται τους πόρους και προγραμματίζει την εκτέλεση των εργασιών.
- Οι **υπηρεσίες (Services)** που υλοποιούν τη λειτουργικότητα των συσκευών μέσω ρουτινών ή οδηγών.

Η σύζευξη αυτών των στοιχείων καθιστά τα ενσωματωμένα συστήματα κρίσιμα για εφαρμογές που απαιτούν ακρίβεια, ασφάλεια και αποδοτικότητα, από απλές οικιακές συσκευές έως σύνθετες βιομηχανικές και διαστημικές εφαρμογές. [60, 61]

3.3.2 Ιστορική Αναδρομή Ενσωματωμένων Συστημάτων

Η έννοια του ενσωματωμένου συστήματος επινοήθηκε πολλά χρόνια πριν, προτού επινοηθεί η έννοια του υπολογιστή γενικής χρήσης. Αν διερευνήσουμε τις πρώτες μορφές υπολογιστικών συσκευών, θα συμπεράνουμε πως ταυτίζονται κατά κύριο λόγο με τον ορισμό των ενσωματωμένων συστημάτων και όχι τόσο με αυτόν του υπολογιστή γενικής χρήσης. [60, 65] Τρανό παράδειγμα αποτελούν οι πρώτες ηλεκτρονικές υπολογιστικές συσκευές, όπως οι Colossus Mark I & II, σχεδιασμένοι για να «σπάσουν» κρυπτογραφημένα γερμανικά μηνύματα τηλετυπίας κατά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο.

Παρά το γεγονός ότι δεν βασίζονταν στην έννοια ενός υπολογιστή αποθηκευμένου προγράμματος (stored – program computer), οι μηχανές αυτές μπορούσαν να εκτελέσουν μία και μόνο λειτουργία. Η λειτουργία τους ήταν ιδιαίτερα δύσχρηστη, ωστόσο αφού τροφοδοτούνταν με τα κατάλληλα δεδομένα, η ανθρώπινη παρέμβαση που απαιτούνταν ήταν ελάχιστη για την ολοκλήρωση των εργασιών τους. Οι μηχανές αυτές, δεν θεωρούνταν ολοκληρωμένα συστήματα, παρά την εννοιολογική τους ομοιότητα.

Ένα από τα πρώτα ηλεκτρονικά υπολογιστικά συστήματα που χαρακτηρίζεται ως ενσωματωμένο σύστημα ήταν ο Υπολογιστής Καθοδήγησης των διαστημικών αποστολών Apollo (Apollo Guidance Computer – AGC).

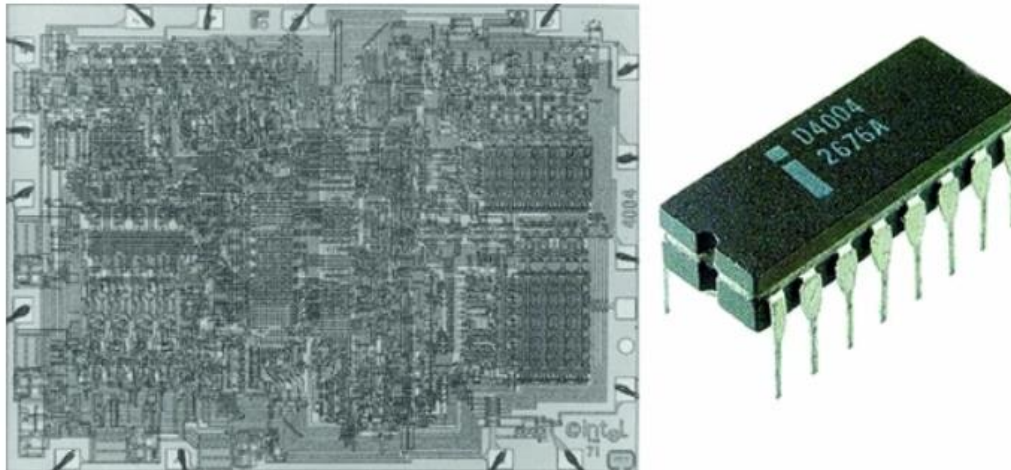
Ο AGC αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Οργάνων του MIT υπό την καθοδήγηση του Charles Stark Draper στις αρχές της δεκαετίας του 1960. Αποτελέσει αναπόσπαστο τμήμα του συστήματος καθοδήγησης και πλοήγησης που χρησιμοποίησε η NASA στο διαστημικό πρόγραμμα Apollo, σε διαστημόπλοια με αποστολή τη Σελήνη. Στην διπλανή Εικόνα 3.6 δεσπόζει η διεπαφή χρήστη του AGC.



Εικόνα 3.6: Διεπαφή Χρήστη του συστήματος Apollo Guidance Computer [61]

Αρχικά, η χρήση του θεωρήθηκε ιδιαίτερα ριψοκίνδυνη, καθώς βασιζόταν στη χρήση των τότε νέων μονολιθικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (monolithic integrated circuits). Παρά τις αβεβαιότητες, η υιοθέτηση της τεχνολογίας αυτής αποδείχθηκε καταλυτική για την επιτυχία του έργου, αφού προσέφερε σημαντικά πλεονεκτήματα σε ό,τι αφορά το μέγεθος, την κατανάλωση ισχύος και την αξιοπιστία. Επιπλέον, μπορεί να υποθεθεί ότι «άνοιξε το δρόμο» για την ευρεία χρήση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων σε όλα τα επίπεδα. Ταυτοχρόνως, αποτελεί ορόσημο στην ιστορία των ενσωματωμένων συστημάτων μιας και συνδυάζει μικρό μέγεθος, υψηλή αξιοπιστία και λειτουργικότητα σε πραγματικό χρόνο.

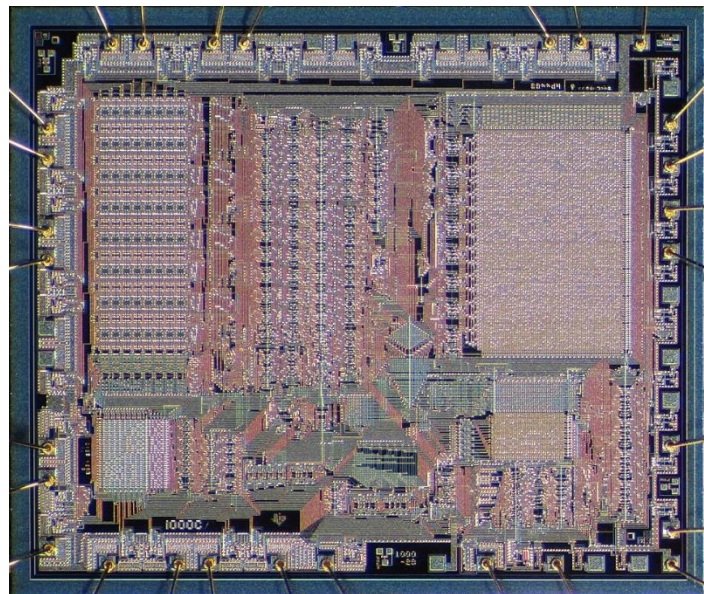
Μετά την επιτυχία του AGC, η τεχνολογία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων εξελίχθηκε ραγδαία. Την δεκαετία του 1970 εμφανίστηκαν οι πρώτοι μικροεπεξεργαστές Intel 4004 που αποτελούσαν πλήρεις Κεντρικές Μονάδες Επεξεργασίας ενσωματωμένες σε ένα και μόνο τσιπ. Η καινοτομία αυτή έφερε επανάσταση στον τρόπο σχεδιασμού των ηλεκτρονικών συστημάτων, επιτρέποντας τη δημιουργία ακόμη μικρότερων, αποδοτικότερων και οικονομικότερων συσκευών. [60] Στην παρακάτω Εικόνα 3.7 διακρίνεται σε μεγέθυνση η εσωτερική δομή του ολοκληρωμένου κυκλώματος του συγκεκριμένου μικροεπεξεργαστή καθώς και το ίδιο το ολοκληρωμένο κύκλωμα σε συσκευασία DIP-16.



Εικόνα 3.7: Εσωτερική δομή ο.κ. μικροεπεξεργαστή Intel 4004 (αριστερά)

Εξωτερική δομή ο.κ. μικροεπεξεργαστή (δεξιά) [77]

Λίγο αργότερα παρουσιάστηκαν οι πρώτοι μικροελεγκτές (microcontrollers), οι οποίοι συνδύαζαν σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα τον μικροεπεξεργαστή, τη μνήμη και τις μονάδες εισόδου-εξόδου [61]. Αυτή η ολοκλήρωση μείωσε το κόστος και την πολυπλοκότητα των σχεδίων στο ελάχιστο, καθιστώντας τα ενσωματωμένα συστήματα πιο προσιτά για εμπορικές και βιομηχανικές εφαρμογές. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο πρώτος μικροελεγκτής που κυκλοφόρησε στην αγορά ήταν ο TMS1000 της Texas Instruments, το εσωτερικό του οποίου διακρίνεται σε μεγέθυνση στην Εικόνα 3.8.



Εικόνα 3.8: Εσωτερική δομή μικροελεγκτή TMS1000 [76]

Τη δεκαετία του 1980 οι μικροελεγκτές ενσωματώθηκαν σταδιακά σε βιομηχανικές διεργασίες, συσκευές αυτοματισμού και καταναλωτικά προϊόντα. Δημιουργήθηκαν οι πρώτοι Προγραμματιζόμενοι Λογικοί Ελεγκτές (Programmable Logical Controllers / PLC), οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν εκτενώς στη βιομηχανία για τον έλεγχο μηχανημάτων και παραγωγικών γραμμών.

Παράλληλα τα ενσωματωμένα συστήματα εισχώρησαν σε οικιακές συσκευές, όπως πλυντήρια, φούρνους μικροκυμάτων και τηλεοράσεις, αναβαθμίζοντας με αυτόν τον τρόπο την απόδοση και την

αξιοπιστία τους. Στον χώρο της αυτοκινητοβιομηχανίας, άρχισαν να χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση του κινητήρα, την ασφάλεια και την ψυχαγωγία των επιβατών.

Ορόσημο αποτέλεσε η δεκαετία του 1990, με την εμφάνιση του Διαδικτύου και την ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών, καθώς πλέον οι συσκευές είχαν την δυνατότητα επικοινωνίας και με τον χρήστη. Τοιουτοτρόπως, διαμορφώθηκαν οι πρώτες εφαρμογές που θυμίζουν το IoT και κατά την έναρξη του 21ου αιώνα, οι συσκευές αυτές εξαπλώθηκαν ραγδαία.

Αναλυτικότερα, το κόστος κατασκευής μειώθηκε, η υπολογιστική ισχύς αυξήθηκε, ενώ ταυτόχρονα αναπτύχθηκαν ασύρματες τεχνολογίες, όπως το Wi-Fi και το Bluetooth. Με αυτές τις εξελίξεις, τα ενσωματωμένα συστήματα κατέληξαν να γίνουν η ραχοκοκαλιά του IoT. Συσκευές από διαφορετικούς τομείς διέθεταν πλέον δυνατότητες διασύνδεσης, συλλογής δεδομένων και αυτόνομης συνεργασίας.

Τελικά, με την εισχώρηση της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence / AI) και της Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning / ML) στα ενσωματωμένα συστήματα, επιτρέπεται η επεξεργασία δεδομένων τοπικά (edge computing), καθιστώντας τις συσκευές πλήρως αυτόνομες. Πλέον, από την έξυπνη κατοικία και την υγεία έως τη Βιομηχανία 4.0 και τα αυτόνομα οχήματα, τα ενσωματωμένα συστήματα αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας. [60, 61, 65]

3.3.3 Χαρακτηριστικά Ενσωματωμένων Συστημάτων

Εν αντιθέσει με τους υπολογιστές γενικής χρήσης που έχουν την δυνατότητα να υποστηρίξουν πληθώρα εφαρμογών, τα ενσωματωμένα συστήματα λειτουργούν για ένα συγκεκριμένο και σαφώς καθορισμένο σκοπό. Τα χαρακτηριστικά που διαθέτουν, τα καθιστούν αποδοτικά, αποτελεσματικά και απαραίτητα στους τομείς της βιομηχανίας, των τηλεπικοινωνιών, της ιατρικής τεχνολογίας και των οικιακών συσκευών. Ορισμένα τέτοια χαρακτηριστικά είναι: [60, 61]

- **Εξειδικευμένη λειτουργία (Application Specific):** Κάθε ενσωματωμένο σύστημα έχει σχεδιαστεί για να επιτελεί μία συγκεκριμένη αποστολή ή έναν περιορισμένο αριθμό λειτουργιών, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνει υψηλή αποδοτικότητα και χαμηλή κατανάλωση πόρων.
- **Λειτουργία σε πραγματικό χρόνο (Real – Time Operation):** Απαιτείται να ανταποκρίνονται σε εξωτερικά ερεθίσματα εντός αυστηρών χρονικών ορίων, καθώς η καθυστέρηση στην εκτέλεση μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές δυσλειτουργίες.
- **Περιορισμένοι πόροι:** Λειτουργούν με περιορισμένη μνήμη, μειωμένη επεξεργαστική ισχύ και χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση. Η χαμηλή κατανάλωση ισχύος αποτελεί βασική προϋπόθεση, ειδικότερα σε φορητές ή αυτόνομες συσκευές, όπου η διάρκεια ζωής της μπαταρίας είναι καθοριστικός παράγοντας.
- **Αξιοπιστία και σταθερότητα:** Τα περιβάλλοντα στα οποία χρησιμοποιούνται απαιτούν διαρκή λειτουργία χωρίς σφάλματα και χωρίς κενά ασφαλείας.
- **Συμπαγής δομή και υψηλή ενσωμάτωση:** Όλα τα απαραίτητα στοιχεία – επεξεργαστής, μνήμη, θύρες εισόδου/εξόδου, αισθητήρες και ενεργοποιητές – ενσωματώνονται σε μία μικρή πλακέτα. Έτσι, εξοικονομείται χώρος και ενσωματώνεται εύκολα στη συνολική διάταξη.
- **Αλληλεπίδραση με το περιβάλλον:** Μέσω αισθητήρων συλλέγουν δεδομένα από το εξωτερικό περιβάλλον, τα οποία επεξεργάζονται ώστε να λαμβάνουν αποφάσεις. Στη συνέχεια, μέσω ενεργοποιητών, εκτελούν ενέργειες όπως η κίνηση κινητήρων, η παραγωγή ήχων ή η απεικόνιση πληροφοριών σε οθόνες. Ανάλογα με την εφαρμογή, η διεπαφή χρήστη μπορεί να είναι απλή (πλήκτρα, λυχνίες LED) ή πιο σύνθετη (οθόνες αφής, γραφικά περιβάλλοντα).

3.3.4 Τομείς Εφαρμογής των Ενσωματωμένων Συστημάτων

Ενδεικτικά παραθέτουμε ορισμένους από τους σημαντικότερους για την εποχή μας τομείς που γίνεται χρήση ενσωματωμένων συστημάτων: [60, 61, 64, 66]

- **Αυτοκινητοβιομηχανία:** Μονάδες Ελέγχου Κινητήρα (Engine Control Unit / ECU) που ρυθμίζουν την έγχυση καυσίμου, τον χρονισμό της ανάφλεξης και τον έλεγχο εκπομπών. Παράλληλα, τα Συστήματα Υποβοήθησης Οδηγού (Automated Driving Assistance Systems / ADAS) προσφέρουν λειτουργίες όπως αυτόματο φρενάρισμα, διατήρηση λωρίδας και προσαρμοστικό cruise control.
- **Τομέας υγείας:** Συστήματα παρακολούθησης ασθενών, όπως παλμικά οξύμετρα, πιεσόμετρα, και γλυκοζόμετρα αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα, ενώ πιο πολύπλοκες εφαρμογές περιλαμβάνουν ιατρικό απεικονιστικό εξοπλισμό, όπως μαγνητικούς τομογράφους (MRI) και αξονικούς τομογράφους (CT).
- **Βιομηχανία / Αυτοματισμοί:** Για τον έλεγχο διεργασιών, τη ρομποτική και την προγνωστική συντήρηση, οι Προγραμματιζόμενοι Λογικοί Ελεγκτές (PLC) και οι μικροελεγκτές ρυθμίζουν μηχανές, ελέγχουν ταινιόδρομους και παρακολουθούν αισθητήρες, διασφαλίζοντας παραγωγική αποδοτικότητα.
- **Τηλεπικοινωνίες:** Δρομολογητές, μεταγωγείς και σταθμοί βάσης διαχειρίζονται τη δρομολόγηση πακέτων, την ανίχνευση σφαλμάτων και την επεξεργασία σήματος. Στην εποχή του 5G, οι ενσωματωμένοι επεξεργαστές των μικροκυψελών και IoT πυλών εξασφαλίζουν υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων και χαμηλή καθυστέρηση.
- **Αεροδιαστημική και Αεράμυνα:** Απαραίτητα για την πλοήγηση, τη διαχείριση πτήσης, την παρακολούθηση κινητήρων και την ασφάλεια των πτήσεων. Σε στρατιωτικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται για ραντάρ, καθοδήγηση πυραύλων και ασφαλείς επικοινωνίες.
- **«Έξυπνες πόλεις»:** Έξυπνα φανάρια, ενεργειακά αποδοτικός προσαρμοστικός φωτισμός δρόμων και περιβαλλοντική παρακολούθηση εξαρτώνται από αισθητήρες και μικροελεγκτές που συλλέγουν και επεξεργάζονται δεδομένα, τα οποία στη συνέχεια μεταδίδονται σε κεντρικές πλατφόρμες για ανάλυση και λήψη αποφάσεων.

3.4 Επίλογος

Ολοκληρώνοντας το κεφάλαιο 3, έχουμε ολοκληρώσει την ανάλυση των εννοιών του IoT και των ενσωματωμένων συστημάτων, ενώ ταυτοχρόνως έχουμε δώσει παραδείγματα χρήσης τους στην σύγχρονη εποχή σε ένα ευρύ φάσμα τομέων, τονίζοντας τη σημαντικότητά τους. Στην δική μας εφαρμογή, η οποία μπορούμε να πούμε ότι αποτελεί ένα ενσωματωμένο σύστημα, συναντάται και δομή IoT εφαρμογής, καθώς γίνεται χρήση πρωτοκόλλων ασύρματης επικοινωνίας για την μετάδοση των δεδομένων από τους αισθητήρες στο σύστημα διαχείρισης, που είναι μία διαδικτυακή βάση δεδομένων με απεικονιστική μέθοδο σε ιστοσελίδα. Στα επόμενα κεφάλαια θα δούμε αναλυτικά τα στοιχεία που περιλαμβάνονται σε κάθε ένα από τα 3 επίπεδα της IoT εφαρμογής μας.

Κεφάλαιο 4ο: Επίπεδο Αντίληψης (Perception Layer)

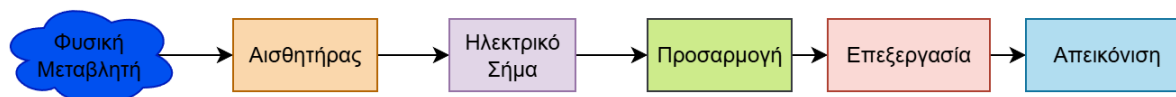
4.1 Εισαγωγή

Αφού είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο τη γενική δομή του συστήματος που θα υλοποιήσουμε, περνάμε σε αυτό το κεφάλαιο να αναλύσουμε την κατασκευή του υλικού τμήματος, το οποίο αποτελεί το επίπεδο αντίληψης (perception layer) του συστήματος. Αρχικά θα δούμε τους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στο σύστημα κι έπειτα το τμήμα ισχύος που μας παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια για την λειτουργία του συστήματος. Στη συνέχεια θα κάνουμε μία αναφορά στον κώδικα του μικροελεγκτή που αξιοποιείται για τη συλλογή των μετρήσεων και τέλος στην σχεδίαση και υλοποίηση όλου του συστήματος σε τυπωμένο κύκλωμα.

4.2 Σύστημα Μέτρησης

Γενικώς, ως σύστημα μέτρησης καλούμε οποιοδήποτε σύστημα αποδίδει το μέτρο μίας φυσικής μεταβλητής, όπως είναι η δύναμη, η θερμοκρασία, το μήκος κ.τ.λ., σε μία βαθμονομημένη κλίμακα μέτρησης του μεγέθους [49].

Τα συστήματα μέτρησης ποικίλουν σε πολυπλοκότητα, από ένα απλό δυναμόμετρο ή ένα ζυγό μέχρι και έναν πολύπλοκο φασματογράφο. Ωστόσο, ανεξαρτήτως πολυπλοκότητας του συστήματος, κάθε σύστημα μέτρησης περιλαμβάνει ορισμένες βαθμίδες, μέσω των οποίων η φυσική μεταβλητή αποκτάται από τα «αισθητήρια όργανα» του συστήματος, τα οποία είναι οι αισθητήρες κι έπειτα ως ηλεκτρικό σήμα πλέον προσαρμόζεται καταλλήλως, επεξεργάζεται και εν τέλει καταγράφεται σε βαθμονομημένο όργανο ή αποθηκεύεται σε βάση δεδομένων. Η δομή αυτή δίνεται στην παρακάτω Εικόνα 4.1.



Εικόνα 4.1: Θεμελιώδης δομή συστήματος μέτρησης

Οι αισθητήρες είναι οι διατάξεις που χρησιμοποιούμε για να μετατρέψουμε ένα φυσικό μέγεθος σε πληροφορία ηλεκτρικού μεγέθους. Δηλαδή αποτελούν μόνα τους συστήματα μετατροπής που ως είσοδο έχουν ένα φυσικό μέγεθος και στην έξοδό τους παράγουν ένα ηλεκτρικό σήμα, το οποίο χρησιμοποιείται από το σύστημα μέτρησης ως πληροφορία.

Μπορούν να γίνουν αρκετές διακρίσεις των αισθητήρων, βάσει της απαίτησής τους σε ισχύ (σε ενεργούς που απαιτούν μία τάση τροφοδοσίας και σε παθητικούς που δεν απαιτούν τάση τροφοδοσίας), βάσει της μεθόδου κατασκευής και λειτουργίας (ηλεκτρονικοί, μηχανικοί, χημικοί), βάσει της ενεργειακής μετατροπής που πραγματοποιούν (φωτοηλεκτρικοί, ηλεκτρομαγνητικοί, θερμοηλεκτρικοί), όμως στο επίπεδο σχεδιασμού του κυκλώματος, το βασικότερο στοιχείο είναι ο τύπος της πληροφορίας που παρέχεται στην έξοδό τους.

Αναλόγως του τύπου πληροφορίας, οι αισθητήρες διακρίνονται σε αναλογικούς και ψηφιακούς. Οι μεν πρώτοι, έχουν ως έξοδο ένα συνεχές φάσμα τάσεων εξόδου, ενώ οι δεύτεροι έχουν διακριτές τιμές εξόδου, δηλαδή τα σήματα είναι τύπου LOW / HIGH, και η τιμή του μεγέθους εξαρτάται από το εύρος και την συχνότητα των τετραγωνικών παλμών. [51]

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής θα χρησιμοποιήσουμε και από τα 2 είδη αισθητήρων, όμως θα ξεκινήσουμε την ανάλυση από τους αναλογικούς.

4.3 Αναλογικοί Αισθητήρες

Στην υλοποίηση του αυτόματου συστήματος μετρήσεων που πραγματοποιήσαμε, κάνουμε χρήση δύο αισθητηρίων με αναλογική έξοδο, συγκεκριμένα μία μετρούμενη τιμή τάσης. Τα δύο αυτά αισθητήρια χρησιμοποιούνται για μετρήσεις ιδιοτήτων του εδάφους, δηλαδή της θερμοκρασίας και της υγρασίας. Παρακάτω θα αναλύσουμε το θεωρητικό τους υπόβαθρο, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των κυκλωμάτων τους και την πραγματική τους υλοποίηση.

4.3.1 Ωμικός Αισθητήρας Θερμοκρασίας Εδάφους με χρήση NTC Thermistor

Οι ωμικοί αισθητήρες θερμοκρασίας λειτουργούν μεταβάλλοντας την ειδική αντίσταση των μεταλλικών υλικών από τα οποία κατασκευάζονται βάσει των διακυμάνσεων θερμοκρασίας, όπως αναφέραμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η μετρούμενη τιμή της αντίστασης ενός δεδομένου υλικού μεταβάλλεται σύμφωνα με την εκάστοτε σχέση που το συνοδεύει.

Δομικά, ο αισθητήρας που θα υλοποιήσουμε αποτελείται από ένα στέλεχος (probe) κατασκευασμένο από ανοξείδωτο υλικό, έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις εντός εδάφους, όπου είναι γνωστό ότι υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που θα μπορούσαν να προκαλέσουν την οξείδωσή του. Εντός του στελέχους υπάρχει ένα καταλλήλως βαθμονομημένο NTC θερμίστορ, το οποίο στους 25°C παρουσιάζει στα άκρα του αντίσταση τιμής 10 kΩ. Το probe είναι αυτό της παρακάτω Εικόνας 4.2 και τα τεχνικά του χαρακτηριστικά φαίνονται στον Πίνακα 4.1.



Εικόνα 4.2: Το στέλεχος NTC θερμίστορ που χρησιμοποιεί ο αισθητήρας

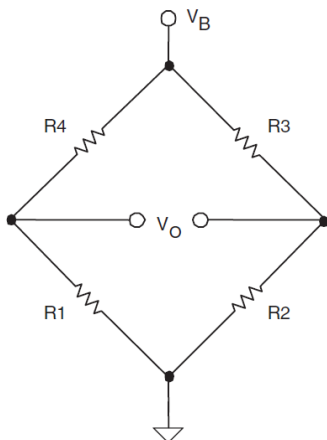
Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά LITTLEFUSE USP-10972 NTC Thermistor Probe

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Αντίσταση @25°C (Ω)	10000
Ανοχή Αντίστασης @25°C	±1%
β (0 ~ 50°C) (K)	3892
Εύρος Θερμοκρασίας (°C)	-55 ~ +105

Οι λόγοι που επιλέγουμε την χρήση ενός NTC θερμίστορ έναντι κάποιας επιλογής RTD είναι λόγω της χαμηλής τιμής του, αλλά και της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, διότι αποτελεί παθητικό στοιχείο. Ωστόσο, το αρνητικό στην επιλογή είναι η μη γραμμική συμπεριφορά του στοιχείου στις μεταβολές θερμοκρασίας, την οποία ωστόσο μπορούμε να διορθώσουμε, όπως θα δούμε παρακάτω.

Το θερμίστορ ανήκει στην κατηγορία των παθητικών αισθητήρων, δηλαδή δεν απαιτεί ξεχωριστή πηγή τάσης για να λειτουργήσει, αλλά συνδέεται στα άκρα ενός κυκλώματος. Το κύκλωμα αυτό αποτελείται από μία γέφυρα αντιστάσεων τύπου Wheatstone, η οποία είναι η συνηθέστερη διάταξη που χρησιμοποιείται σε κυκλώματα αισθητηρίων. Αποτελείται από 4 αντιστάσεις συνδεδεμένες σε 2

παράλληλους κλάδους των 2 αντιστάσεων σε σειρά, όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 4.3. Στα άκρα των κλάδων υπάρχει μία πηγή σταθερής τάσης, η V_B με αναφορά στη γείωση.



Εικόνα 4.3: Γέφυρα Αντιστάσεων Wheatstone [78]

Η βασική αρχή της γέφυρας Wheatstone, είναι ότι όταν οι 2 κλάδοι (R_1 με R_4 και R_2 με R_3) είναι σε ισορροπία, η τάση εξόδου $V_O = 0$. Φροντίζουμε έτσι ώστε αυτή η κατάσταση να επιτυγχάνεται όταν ο αισθητήρας βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας. Αυτή η ισότητα οδηγεί στις παρακάτω σχέσεις:

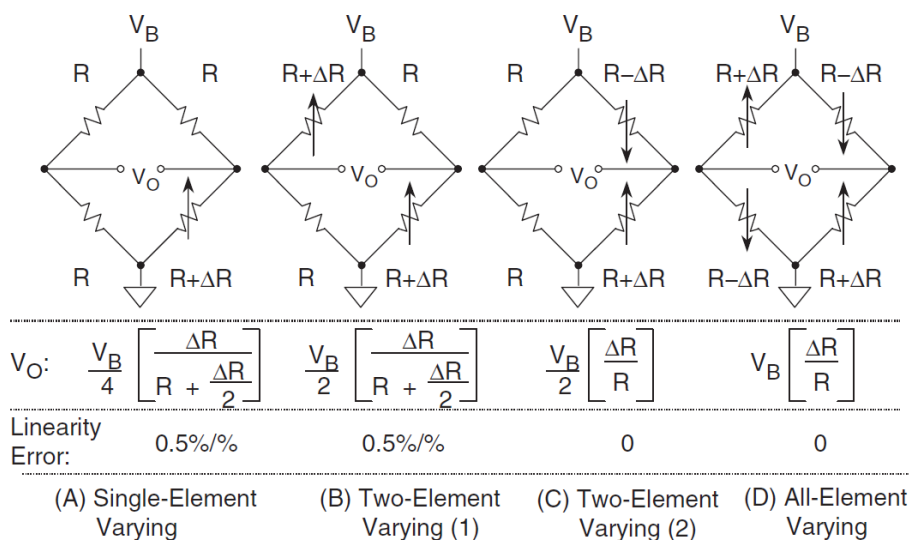
$$V_O = V_B \left(\frac{R_1}{R_1 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right) \quad (4.1)$$

Σε ισορροπία:

$$V_O = 0 \Rightarrow \frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} \quad (4.2)$$

Η παραπάνω σχέση 4.2 ονομάζεται και συνθήκη ισορροπίας (balance condition) της γέφυρας. [51]

Συνεπώς, οποιαδήποτε μεταβολή σε μία από τις 4 αντιστάσεις, αυτομάτως επηρεάζει την τιμή τάσης στην έξοδο της γέφυρας. Υπάρχουν περιπτώσεις που 2 ή 4 από τα στοιχεία της γέφυρας είναι μεταβλητά, ωστόσο στην δική μας περίπτωση που διαθέτουμε έναν αισθητήρα θερμοκρασίας, ακολουθούμε την περίπτωση A σε διάταξη γέφυρας που φαίνεται στην Εικόνα 4.4:



Εικόνα 4.4: Διατάξεις γέφυρας τροφοδοτούμενης από πηγή τάσης [78]

a) 1 μεταβλητό στοιχείο, b) / c) 2 μεταβλητά στοιχεία, d) 4 μεταβλητά στοιχεία

Παρατηρούμε ότι στην Εικόνα 4.4 τονίζεται για την Α περίπτωση ότι το σφάλμα γραμμικότητας (linearity error) ορίζεται ως 0.5%/%. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει σφάλμα 0.5% ανά 1% μεταβολής της αντίστασης R. Αυτό το αποτέλεσμα προκύπτει από την σχέση 4.3 παρακάτω, όπως αναφέρεται στην [51]:

$$\text{linearity error (\%/ \%)} = \max \left(\frac{\frac{\frac{E_S \Delta R}{4 R} \frac{E_S \Delta R}{4 R + \Delta R/2} \cdot 100\%}{\frac{E_S \Delta R}{4 R}}}{\frac{\Delta R}{R} 100\%} \right) \quad (4.3)$$

Λόγω της μη γραμμικότητας που εμφανίζει το NTC θερμίστορ στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας απαιτούμενο βήμα στην προσαρμογή των τιμών του αισθητήρα που σχεδιάστηκε είναι η γραμμικοποίηση. Με την μέθοδο αυτή πραγματοποιείται μεταβολή της συνάρτησης μεταφοράς του σχεδιαζόμενου αισθητήρα, έτσι ώστε η έξοδος του σήματος να είναι γραμμική ανάλογα με τη μεταβολή του ερεθίσματος. [49]

Η προσαρμογή γίνεται σε δύο φάσεις. Η πρώτη φάση λαμβάνει χώρα εντός του κυκλώματος, ενώ μικροδιορθώσεις γίνονται σε δεύτερο χρόνο από το πρόγραμμα του μικροελεγκτή, χρησιμοποιώντας τον πίνακα τιμών της βαθμονόμησης του αισθητήρα που παρατίθεται παρακάτω. Περισσότερα για την δεύτερη φάση θα δούμε στην υποενότητα 4.6.7 που γίνεται επεξήγηση του κώδικα του μικροελεγκτή.

Σχετικά με την πρώτη φάση γραμμικοποίησης, αυτή γίνεται εντός των στοιχείων του κυκλώματος τοποθετώντας μία αντίσταση παράλληλη με το θερμίστορ στον κλάδο της γέφυρας στον οποίο βρίσκεται το τελευταίο. Ο υπολογισμός της τιμής αυτής της αντίστασης προκύπτει με βάση την παρακάτω σχέση 4.4 και από τον Πίνακα 4.2 που δίδεται με τις τιμές αντίστασης του θερμίστορ σε διαφορετικές θερμοκρασίες από τον κατασκευαστή.

$$R_P = \frac{[R_{T2}(R_{T1} + R_{T3}) - 2R_{T1}R_{T3}]}{R_{T1} + R_{T3} - 2R_{T2}} \quad (4.4)$$

Όπου R_{T1} είναι η αντίσταση που παρουσιάζει το θερμίστορ στη χαμηλότερη θερμοκρασία της περιοχής μέτρησης, R_{T2} είναι η αντίσταση του θερμίστορ στην μέση θερμοκρασία της περιοχής μέτρησης και R_{T3} είναι η αντίσταση του θερμίστορ στην υψηλότερη θερμοκρασία της περιοχής μέτρησης.

Πίνακας 4.2: Δεδομένα Τιμής Αντίστασης Θερμίστορ / Θερμοκρασίας

Θερμοκρασία (°C)	Ονομαζόμενη Μεταβλητή	Αντίσταση Θερμίστορ (Ω)
-10	R_{T1}	62.92 kΩ
+15	R_{T2}	11.62 kΩ
+40	R_{T3}	4.11 kΩ

Εμείς ενδιαφερόμαστε για ένα θερμοκρασιακό εύρος από -10°C έως +40°C, επομένως η μέση θερμοκρασία θα είναι στους +15°C. Συνεπώς, η παραπάνω σχέση 4.4 μαζί με τα δεδομένα του παραπάνω πίνακα μας δίνει τα εξής αποτελέσματα:

$$R_P = \frac{[R_{T2}(R_{T1} + R_{T3}) - 2R_{T1}R_{T3}]}{R_{T1} + R_{T3} - 2R_{T2}} = \frac{[11620(62920 + 4110) - 2 * 62920 * 4110]}{62920 + 4110 - 2 * 11620}$$

$$\Rightarrow R_P = 5.98 \text{ k}\Omega$$

Αν για την τιμή της R_p που υπολογίσαμε παραπάνω, αξιοποιήσουμε την σχέση της παράλληλης αντιστάσεων, προκύπτουν τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.3 για τις τιμές του παράλληλου συνδυασμού στις θερμοκρασίες $T_1 = -10^\circ\text{C}$, $T_2 = +15^\circ\text{C}$ και $T_3 = +40^\circ\text{C}$ του Πίνακα 4.2, γεγονός που αποδεικνύει την επίδραση της αντίστασης γραμμικοποίησης:

Πίνακας 4.3: Δεδομένα Τιμής Αντίστασης Θερμίστορ / Θερμοκρασίας μετά την επίδραση της αντίστασης γραμμικοποίησης R_p

	-10 °C	+15 °C	+40 °C
R_{TH}	62.92 kΩ	11.62 kΩ	4.11 kΩ
$R_{TH} // R_p$	5.46 kΩ	3.95 kΩ	2.44 kΩ

Έπειτα, μας ενδιαφέρει η διαφορά μεταξύ των δύο ακραίων τιμών R_{T1} και R_{T3} να είναι μικρότερη από το 10% της τιμής των αντιστάσεων που θα αποτελέσουν τα στοιχεία της γέφυρας [79]. Αυτή η μέγιστη διαφορά βάσει των τιμών του Πίνακα 4.3 θα είναι:

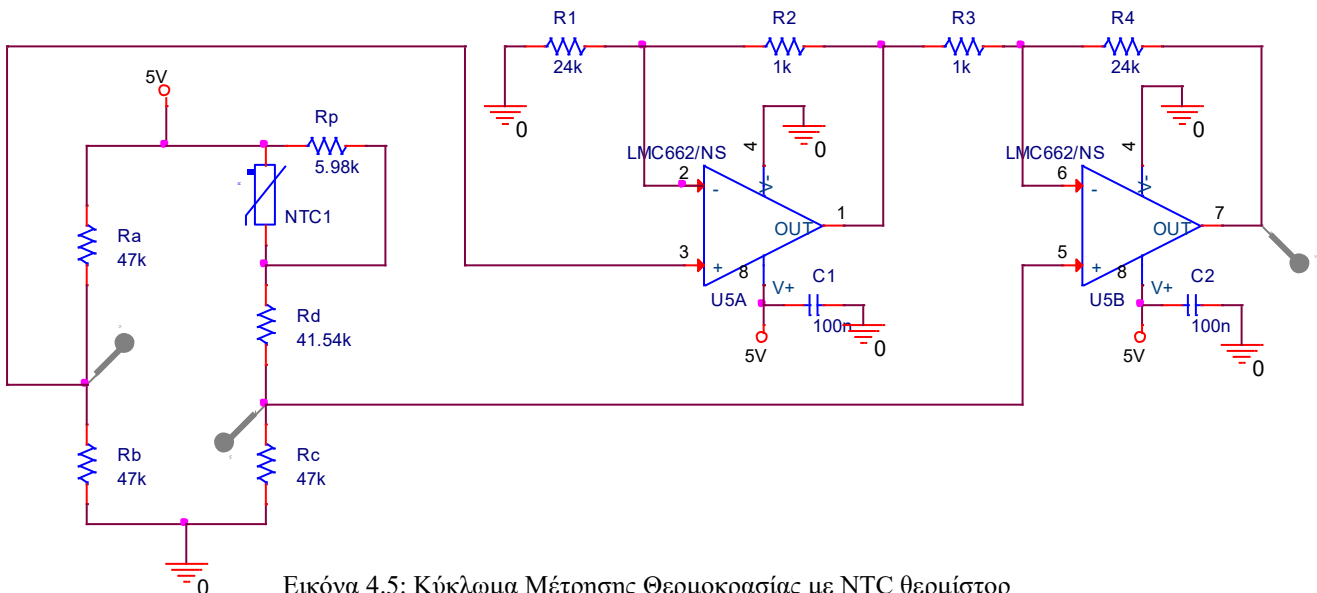
$$\Delta(R_p // R_{TH}) = R_{T3} // R_p - R_{T1} // R_p = 5.46 \text{ k}\Omega - 2.44 \text{ k}\Omega = 3.02 \text{ k}\Omega$$

Εμείς επιλέγουμε οι αντιστάσεις αυτές να έχουν την τιμή των 47 kΩ, άρα θέλουμε να ισχύει ότι:

$$\frac{\Delta(R_p // R_{TH})}{R} = \frac{3.02 \text{ k}\Omega}{47 \text{ k}\Omega} = 6.04\% < 10\%$$

Ως συμπλήρωμα του παράλληλου συνδυασμού των αντιστάσεων R_p και R_{TH} απαιτείται στον κλάδο που θα τοποθετηθούν, να τοποθετηθεί άλλη μία αντίσταση, η οποία θα ισοσκελίζει την τιμή με τις αντιστάσεις των υπόλοιπων κλάδων που έχουν τιμή $R = 47 \text{ k}\Omega$. Η αντίσταση αυτή είναι η R_d της παρακάτω Εικόνας 4.5 και λαμβάνει τιμή που υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$R_a = R_b = R_c = R_d + (R_p // R_{TH})_{MAX} = 47 \text{ k}\Omega \Rightarrow R_d = 47 \text{ k}\Omega - 5.46 \text{ k}\Omega = 41.54 \text{ k}\Omega$$



Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.5 παραπάνω, οι δύο έξοδοι της γέφυρας συνδέονται η κάθε μία στην μη αναστρέφουσα είσοδο δύο τελεστικών ενισχυτών που περιλαμβάνονται στο ολοκληρωμένο κύκλωμα LMC662 της Texas Instruments. Το κύκλωμα της Εικόνας υλοποιήθηκε στο πρόγραμμα Capture που περιλαμβάνεται στην σουίτα της Cadence (έκδοση 16.6).

Η συγκεκριμένη διάταξη λειτουργεί ως ενισχυτής οργανολογίας (instrumentation amplifier), μία ειδική διάταξη διαφορικού ενισχυτή, σχεδιασμένη ώστε να ενισχύει τα ασθενή σήματα που προκύπτουν από τους αναλογικούς αισθητήρες [51]. Τα ασθενή αυτά σήματα απαιτούν ενίσχυση από την συγκεκριμένη διάταξη διότι το διαφορικό σήμα είναι πολύ μικρό σε σχέση με την τιμή του κοινού σήματος (common mode signal), επομένως τα απλά κυκλώματα διαφορικών ενισχυτών με χρήση τελεστικών ενισχυτών δεν έχουν ικανότητα εξάλειψης τέτοιων θορύβων από το κοινό σήμα. [79]

Αν και υπάρχει στην αγορά ευρεία γκάμα έτοιμων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων ενισχυτών οργανολογίας, οι διατάξεις μπορούν εύκολα να υλοποιηθούν και με εξωτερικά διακριτά στοιχεία σε συνδυασμό με ολοκληρωμένα κυκλώματα τελεστικών ενισχυτών, όπως είναι το LMC662 που επιλέξαμε, το οποίο ανήκει στα λεγόμενα ολοκληρωμένα κυκλώματα rail-to-rail, επομένως μπορεί να αγγίζει με πολύ μεγάλη ακρίβεια τις τιμές της τάσης τροφοδοσίας. Επιπλέον, η τιμή του συγκεκριμένου ολοκληρωμένου είναι αισθητά χαμηλότερη από την τιμή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος ενισχυτή οργανολογίας.

Τα βασικότερα επιθυμητά χαρακτηριστικά ενός ενισχυτή οργανολογίας είναι τα παρακάτω [51]:

- Πολύ μικρές τάσεις μετατόπισης εισόδου και εξόδου (input / output offset voltage)
- Πολύ υψηλή σύνθετη αντίσταση εισόδου (της τάξης των GΩ)
- Πολύ χαμηλή σύνθετη αντίσταση εξόδου (της τάξης των mΩ)
- Πολύ υψηλός λόγος απόρριψης κοινού σήματος (Common Mode Rejection Ratio / CMRR), διότι τα διαφορικά σήματα που πρέπει να ενισχυθούν από τον ενισχυτή οργανολογίας είναι συνήθως της τάξης των μV, ενώ η τάση κοινού σήματος είναι πολλαπλάσια του διαφορικού σήματος (λόγω ηλεκτρομαγνητικών επιδράσεων).
- Πολύ σταθερή τιμή κέρδους (A_v), διότι το κέρδος επηρεάζει και τον ρυθμό ανύψωσης (Slew Rate / SR), αλλά και το εύρος ζώνης λειτουργίας (bandwidth) του ενισχυτή

Η συγκεκριμένη διάταξη ενισχυτή οργανολογίας που χρησιμοποιούμε στο κύκλωμα του αισθητήρα θερμοκρασίας εδάφους υλοποιείται με δύο τελεστικούς ενισχυτές, όμως υπάρχουν και διατάξεις που υλοποιούνται με τρεις ή και τέσσερις. Στην συγκεκριμένη διάταξη η σχέση 4.5 που μας δίνει την τάση εξόδου V_{OUT} (η οποία μετράται στον τέρμα δεξιό δείκτη μέτρησης της εικόνας) είναι η παρακάτω, με την προϋπόθεση ότι ισχύει $R_1 = R_4$ και $R_2 = R_3$:

$$V_{OUT} = (V_{(+)} - V_{(-)}) \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \quad (4.5)$$

όπου $V_{(+)}$ είναι η τάση στην μη αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού ενισχυτή U5B της Εικόνας 4.5 και $V_{(-)}$ η τάση στην μη αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού ενισχυτή U5A.

Για τον υπολογισμό των τιμών των αντιστάσεων R_1 , R_2 , R_3 και R_4 πρέπει πρώτα να πραγματοποιήσουμε έναν υπολογισμό των τάσεων στις εισόδους του ενισχυτή οργανολογίας για τις 2 ακραίες τιμές θερμοκρασίας, έτσι ώστε να πραγματοποιήσουμε προσαρμογή της διακύμανσης. Βάσει του θεωρήματος της υπέρθεσης και της σχέσης που διέπει τους διαιρέτες τάσης προκύπτουν οι παρακάτω διαπιστώσεις:

$$V_{(-)} = V_{CC} \frac{R_b}{R_a + R_b} = 5V \frac{47k\Omega}{47k\Omega + 47k\Omega} = 2.5V$$

$$V_{(+)-10} = V_{CC} \frac{R_c}{R_c + R_d + (R_p \parallel R_{TH})} = 5V \frac{47k\Omega}{47k\Omega + 41.54k\Omega + 5.46k\Omega} = 2.5V$$

$$V_{(+)\text{40}} = V_{CC} \frac{R_c}{R_c + R_d + (R_p \parallel R_{TH})} = 5V \frac{47 \text{ k}\Omega}{47 \text{ k}\Omega + 41.54 \text{ k}\Omega + 2.44 \text{ k}\Omega} = 2.58V$$

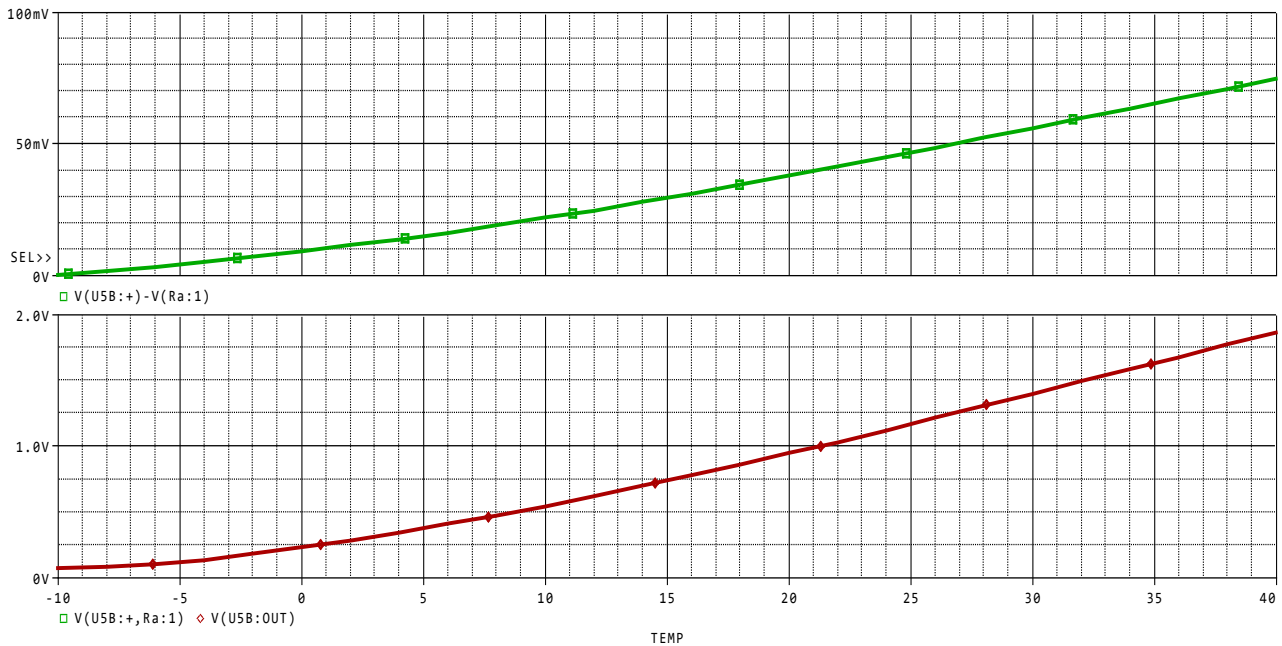
Συνεπώς, βάσει των παραπάνω σχέσεων, η διαφορική τάση εισόδου του ενισχυτή οργανολογίας θα κυμαίνεται από 0V για θερμοκρασία -10°C έως και 80mV για θερμοκρασία 40°C. Άρα, για προσαρμογή της τάσης εξόδου του ενισχυτή με διακύμανση από 0 έως και +2V, θα πρέπει για την απολαβή (κέρδος) να ισχύει η παρακάτω σχέση 4.6:

$$A_V = \frac{V_{OUT}}{V_{(+)} - V_{(-)}} = \frac{2V}{80mV} = 25 = 1 + \frac{R_1}{R_2} \quad (4.6)$$

Επομένως, αν θέσουμε ότι $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$, τότε από τη σχέση 4.6 και από την προϋπόθεση $R_1 = R_4$ και $R_2 = R_3$ ισχύει ότι:

$$A_V = 25 = 1 + \frac{R_1}{R_2} = 1 + \frac{R_1}{1k\Omega} \Rightarrow R_1 = 24 \text{ k}\Omega$$

Πράγματι, όπως προκύπτει από την προσομοίωση του κυκλώματος με τα παραπάνω υπολογισμένα δεδομένα στο πρόγραμμα PSpice της σουίτας Cadence, τα αποτελέσματα είναι πολύ ικανοποιητικά. Στην παρακάτω Εικόνα 4.6 παρατηρούμε τα αποτελέσματα μίας προσομοίωσης τύπου Temperature Sweep που συσχετίζει την μετρούμενη τιμή τάσης στα δύο σημεία του κυκλώματος με την θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται το κύκλωμα. Η πράσινη κυματομορφή αποτελεί την διαφορική τάση στα άκρα της γέφυρας των αντιστάσεων R_a , R_b , R_c , R_d , ενώ η κόκκινη κυματομορφή είναι η μετρούμενη τάση στην έξοδο του ενισχυτή U5B, ήτοι την έξοδο του ενισχυτή οργανολογίας.

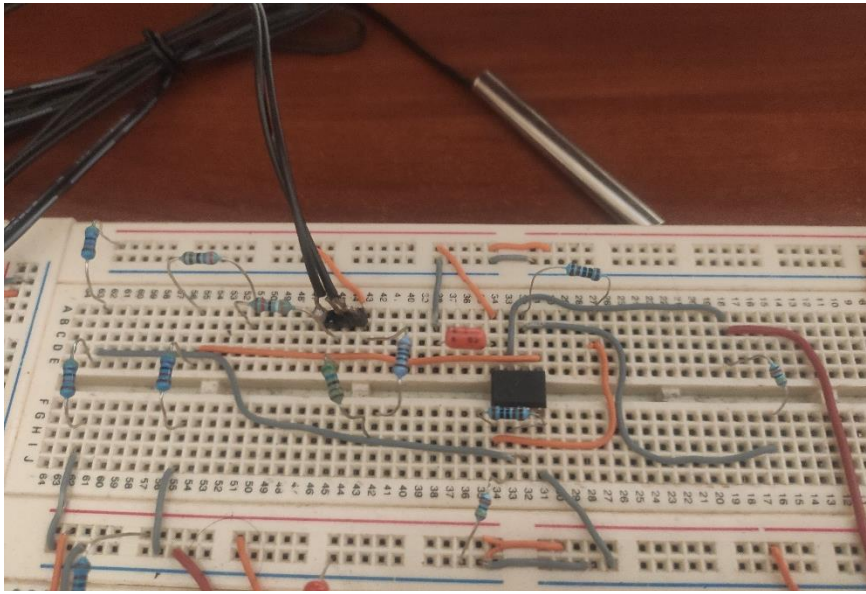


Εικόνα 4.6: Αποτελέσματα Προσομοίωσης Κυκλώματος Μέτρησης Θερμοκρασίας με χρήση NTC θερμίστορ

Όπως είχαμε αναφέρει παραπάνω, η αντίσταση γραμμικοποίησης R_p που τοποθετήθηκε παράλληλα με το θερμίστορ συνέβαλε στην εξάλειψη του σφάλματος μη γραμμικότητας που εμφανίζει το στοιχείο, ωστόσο αν παρατηρήσουμε την κόκκινη κυματομορφή στην παραπάνω Εικόνα 4.6, θα διαπιστώσουμε ότι ακόμη η απόκριση του κυκλώματος δεν είναι πλήρως γραμμική με βάση τις μεταβολές θερμοκρασίας. Ωστόσο, τώρα το σφάλμα είναι πολύ μικρότερο σε ποσοστό, επομένως είναι ευκολότερα διαχειρίσιμο μέσα από τον κώδικα του μικροελεγκτή, όπως θα δούμε στην υποενότητα 4.6.7.

Αφού λάβαμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, έπρεπε να πραγματοποιήσουμε μία δοκιμαστική υλοποίηση του κυκλώματος, η οποία για λόγους ευκολίας έγινε σε πλακέτα προτυποποίησης (ράστερ). Στην Εικόνα 4.7 παρακάτω φαίνεται η υλοποίηση αυτή. Το στέλεχος του NTC θερμίστορ έχει κι αυτό προστεθεί στο κύκλωμα προσωρινά με τη χρήση ενός ακροδέκτη που στη συνέχεια θα αποκολληθεί ώστε να τοποθετηθεί το θερμίστορ στην οριστική του θέση στην προς σχεδίαση πλακέτα που θα περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία του κυκλώματος.

Ο πυκνωτής χωρητικότητας 100 nF που τοποθετείται στο ποδαράκι 8 του ολοκληρωμένου κυκλώματος LMC662 ονομάζεται decoupling ή bypass capacitor και στόχος του είναι να περιορίζει τις διακυμάνσεις τροφοδοσίας και τους θορύβους που ενδέχεται να προκληθούν από ασταθείς πηγές τροφοδοσίας όπως είναι οι μπαταρίες με τις οποίες θα λειτουργεί τελικά το κύκλωμα, ώστε να προστατευθούν τα παθητικά αναλογικά εξαρτήματα του κυκλώματος.



Εικόνα 4.7: Δοκιμαστική Υλοποίηση του κυκλώματος αισθητήρα θερμοκρασίας με NTC θερμίστορ σε ράστερ

Με το κύκλωμα πάνω στο ράστερ και σταθερή μονοπολική τροφοδοσία τιμής +5V πραγματοποιήσαμε την διαδικασία βαθμονόμησης του αισθητήρα, χρησιμοποιώντας ένα RTD βιομηχανικού προτύπου PT-100. Το υλικό οποίο εμφανίζει διαφορές στην αντίσταση με σχεδόν γραμμικό τρόπο. Η αντίσταση του στοιχείου είναι ακριβώς 100 Ω όταν η μετρούμενη θερμοκρασία είναι στους 0°C.

Ως μετρούμενο μέγεθος για την βαθμονόμηση, χρησιμοποιήθηκε νερό μέσα σε μία κοινή κούπα, το οποίο αρχικά ψύχθηκε με κομμάτια πάγου και έπειτα ζεστάθηκε με τη χρήση ενός βραστήρα. Μέσα στην κούπα τοποθετήθηκαν και τα δύο συστήματα, ενώ έγινε καταγραφή της μετρούμενης τάσης του αισθητήρα ανά περίπου 5°C. Τα αποτελέσματα αυτής της μέτρησης δίνονται στον παρακάτω Πίνακα 4.4:

Πίνακας 4.4: Δεδομένα Βαθμονόμησης Αισθητήρα Θερμοκρασίας με NTC θερμίστορ

Αντίσταση RT – 100 (Ω)	Θερμοκρασία που αντιστοιχεί στην τιμή αντίστασης (°C)	Μετρούμενη Τάση Αισθητήρα (V)
96.98	-10	0.160
99.218	-2	0.387
100	0	0.418
102.4	6.1	0.51
103.9	9.99	0.617
106.2	15.9	0.827
107.9	20.5	1.0101
109.4	24.2	1.1641
110.6	27.2	1.2971
112	30.8	1.4321
113.8	35.49	1.6187
115.7	40.4	1.8048

Τα δεδομένα του Πίνακα 4.4 εισήχθησαν έπειτα σε ένα εργαλείο Προσαρμογής Καμπύλης (curve fitting), το οποίο υπάρχει εύκολα προσβάσιμο ως διαδικτυακό πρόγραμμα με ορισμένες δωρεάν αναλύσεις μηνιαίως και ονομάζεται MyCurveFit [62]. Τοποθετώντας τα δεδομένα και ζητώντας από το πρόγραμμα να υπολογίσει τη βέλτιστη δυνατή συνάρτηση, υπολογίσαμε ότι η σχέση 4.7 που συνδέει τις μετρούμενες τιμές τάσης στην έξοδο του αισθητήρα με τις τιμές θερμοκρασίας είναι η παρακάτω πολυωνυμική 4^{ης} τάξης:

$$y = -16.83369 + 40.60419x + 134579x^2 - 24.47073x^3 + 7.944197x^4 \quad (4.7)$$

όπου y είναι η ζητούμενη θερμοκρασία και x είναι η δεδομένη αναλογική τάση στην έξοδο του ενισχυτή οργανολογίας.

4.3.2 Χωρητικός Αισθητήρας Υγρασίας Εδάφους

Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι χωρητικοί αισθητήρες υγρασίας εδάφους λειτουργούν με βάση την αρχή της μεταβολής χωρητικότητας λόγω υδατικής παρουσίας στο μετρούμενο έδαφος. Δηλαδή με την μεταβολή της περιεκτικότητας εδάφους σε νερό, αλλάζει και η χωρητικότητα του αισθητήρα. Η μεταβολή αυτή γίνεται αντιληπτή ως ένα ηλεκτρικό σήμα, το οποίο είναι αντιπροσωπευτικό της υγρασίας του εδάφους.

4.3.2.1 Λόγοι επιλογής μεθόδου μέτρησης

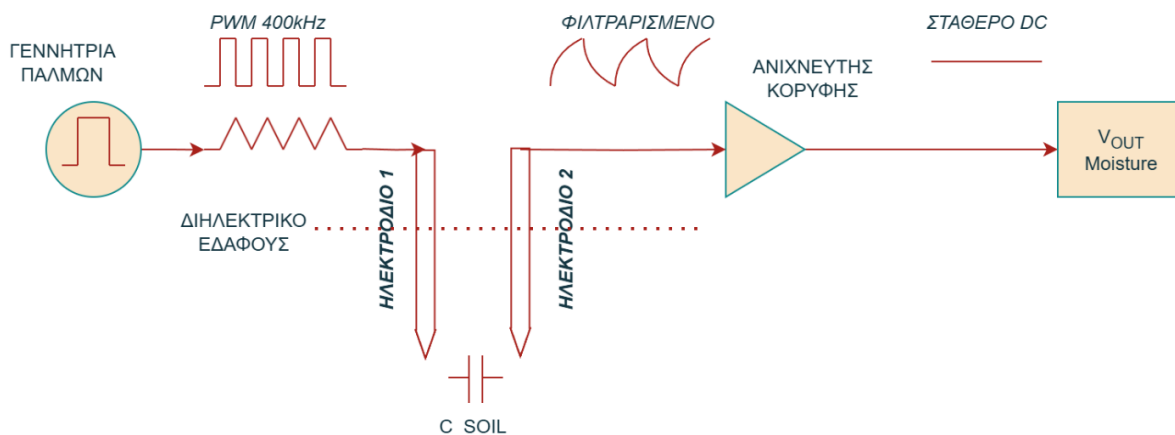
Οι λόγοι που μας οδηγούν στην επιλογή υλοποίησης ενός τέτοιου τύπου αισθητήρα είναι το χαμηλό κόστος προμήθειάς των υλικών, η ευκολία τους στη χρήση, καθώς και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Στον αντίποδα, η ακρίβειά της μεθόδου δεν είναι πάντοτε η ύψιστη, διότι επηρεάζεται από την θερμοκρασία που υπάρχει στο έδαφος, καθώς και από την αλατότητα. Συνεπώς, απαιτείται βαθμονόμηση πριν από τη χρήση τέτοιων αισθητηρίων σε οποιοδήποτε έδαφος, η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας την μέθοδο Βαρυμετρικής Περιεκτικότητας εδαφικού δείγματος σε εργαστηριακό περιβάλλον. Στην διαδικασία βαθμονόμησης θα αναφερθούμε στην υποενότητα 4.3.2.5 παρακάτω.

4.3.2.2 Δομική περιγραφή του αισθητήρα

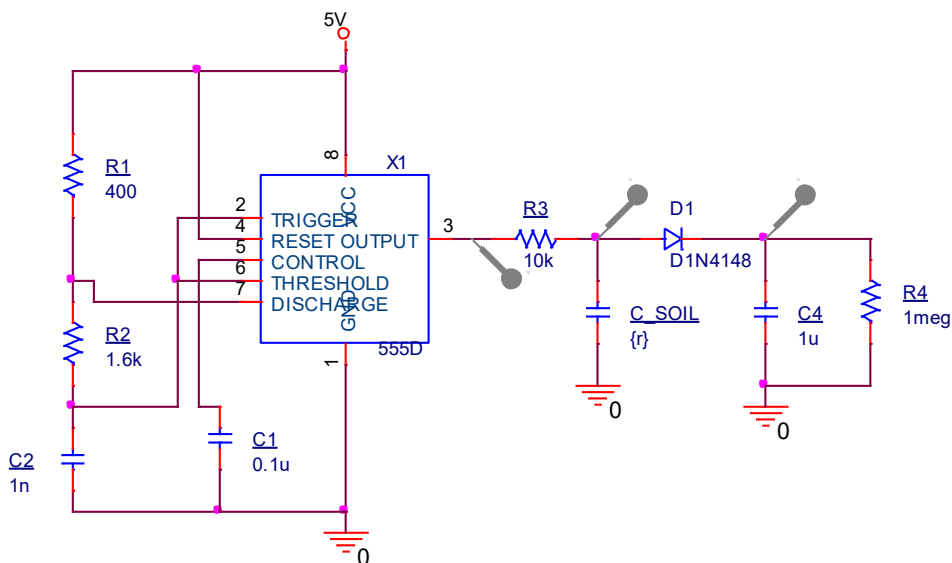
Τέτοιου τύπου αισθητήρες διαθέτουν συνήθως δύο ή περισσότερα ηλεκτρόδια που τοποθετούνται στο έδαφος, σχηματίζοντας μεταξύ τους ένα ηλεκτροστατικό πεδίο. Η μεταβολή περιεκτικότητας νερού στο έδαφος αλλάζει την διηλεκτρική σταθερά του εδάφους, επηρεάζοντας την χωρητικότητα του αισθητήρα. Οι αισθητήρες λειτουργούν σε συγκεκριμένες συχνότητες, όπως διαβάζουμε και στην [81], συνήθως σε κάποια της τάξης των μερικών εκατοντάδων kHz έως και κάποιες δεκάδες MHz, για τη διασφάλιση της ακρίβειας στις μετρήσεις. Η υψηλή συχνότητα μειώνει την επίδραση των προαναφερθέντων μεταβολών θερμοκρασίας.

4.3.2.3 Επεξήγηση λειτουργίας κυκλώματος αισθητήρα

Το κύκλωμα στο οποίο συνδέεται αυτό το αισθητήριο περιλαμβάνει τα στοιχεία της Εικόνας 4.8 παρακάτω. Όπως φαίνεται στην εικόνα, το ένα εκ των δύο ηλεκτροδίων συνδέεται στην έξοδο μίας γεννήτριας παραγωγής τετραγωνικού παλμού, ενώ το δεύτερο συνδέεται στην είσοδο ενός κυκλώματος ανίχνευσης κορυφής. Η έξοδος του κυκλώματος αυτού είναι μία σταθερή DC τιμή τάσης, η οποία αντιστοιχεί στο ποσοστό περιεκτικότητας ύδατος ενός δείγματος εδάφους. Καθώς η υγρασία στο έδαφος αυξάνεται, η διηλεκτρική σταθερά του εδάφους αυξάνεται επίσης, προκαλώντας αύξηση στην χωρητικότητα του αισθητήρα. Με την αύξηση της χωρητικότητας, υπάρχει εξασθένιση στο πλάτος του τετραγωνικού σήματος που παράγεται από την γεννήτρια.



Εικόνα 4.8: Διάγραμμα Λειτουργίας Χωρητικού Αισθητήρα Υγρασίας Εδάφους



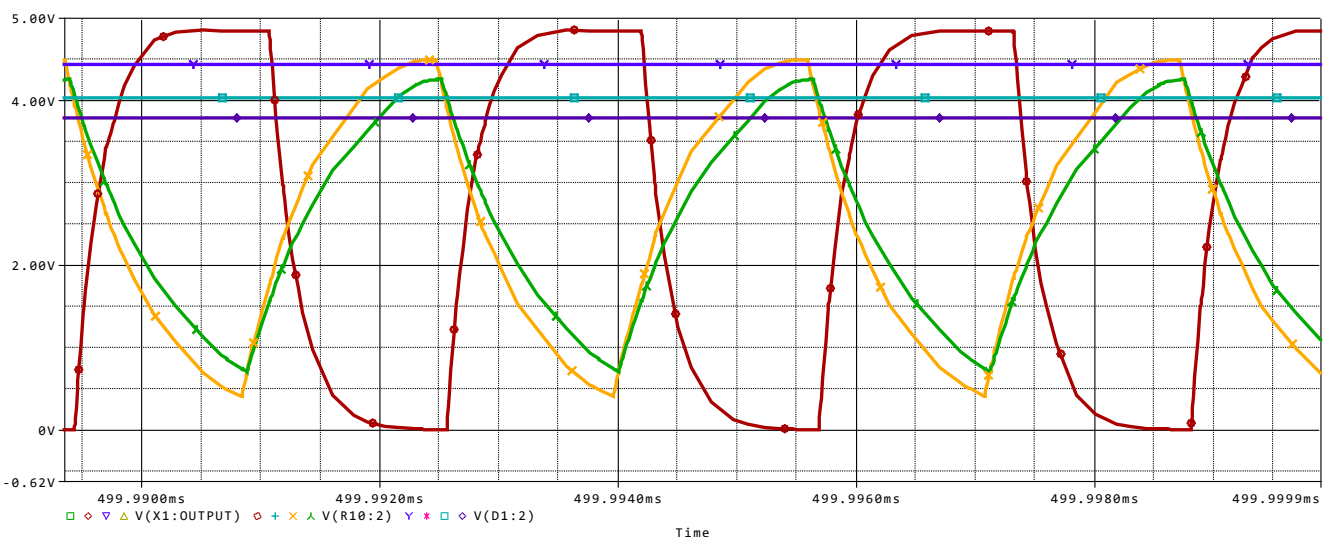
Εικόνα 4.9: Κύκλωμα Χωρητικού Αισθητήρα Υγρασίας Εδάφους

Πιο αναλυτικά, όπως φαίνεται και στην παραπάνω Εικόνα 4.9, που είναι από την υλοποίηση του κυκλώματος στο πρόγραμμα PSpice της σουίτας προγραμμάτων Cadence (έκδοση 16.6), η παραγωγή τετραγωνικών παλμών γίνεται από μία διάταξη ασταθή πολυδονητή, υλοποιημένη με ολοκληρωμένο κύκλωμα χρονιστή 555. Τα στοιχεία που απαρτίζουν τον ασταθή πολυδονητή (αντιστάσεις R1, R2 και πυκνωτές C1,C2) είναι υπολογισμένα για παραγωγή παλμού συχνότητας 400 kHz, ενώ ο κύκλος εργασίας (Duty Cycle) είναι 50%. Τα αποτελέσματα προέκυψαν χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα TLC555CALC της Texas Instruments υλοποιημένο σε περιβάλλον Excel το οποίο μας επιτρέπει να εισάγουμε την επιθυμητή συχνότητα και κύκλο εργασίας του παλμού και έπειτα πραγματοποιεί υπολογισμούς των τιμών για τα ωμικά και χωρητικά στοιχεία του κυκλώματος ή και το αντίστροφο [82]. Το πλάτος του παλμού είναι από 0 έως +5V, καθοριζόμενο από την μονοπολική τάση τροφοδοσίας του κυκλώματος που είναι πλάτους +5V. Ο παλμός αυτός διοχετεύεται σε μία διάταξη χαμηλοπερατού φίλτρου, με στόχο την εξασθένηση των σημάτων υψηλής συχνότητας, επιτρέποντας τη διέλευση των σημάτων χαμηλής συχνότητας.

Ο πυκνωτής C_SOIL που φαίνεται στο κύκλωμα είναι ο χωρητικός αισθητήρας που προαναφέραμε, τα ηλεκτρόδια του οποίου βυθίζονται στο μετρούμενο δείγμα εδάφους. Η χωρητικότητα του εδάφους μετράται βάσει της περιεχόμενης σε αυτό υγρασίας, η οποία επηρεάζει την διηλεκτρική σταθερά του. Με την μεταβολή της σταθεράς μεταβάλλεται και η χωρητικότητα. Όσο αλλάζει η χωρητικότητα του εδάφους, μεταβάλλεται και η τιμή αποκοπής του χαμηλοπερατού φίλτρου με αντιστρόφως ανάλογο τρόπο, δηλαδή όσο αυξάνει η τιμή της χωρητικότητας του εδάφους, τόσο εξασθενεί το πλάτος του σήματος. Η παρακάτω σχέση 4.8 είναι που καθορίζει την συχνότητα αποκοπής του φίλτρου:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4.8)$$

Η αντιστρόφως ανάλογη μεταβολή της τιμής χωρητικότητας και του πλάτους του φιλτραρισμένου σήματος είναι εμφανής και από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο πρόγραμμα, όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 4.10.



Εικόνα 4.10: Αποτελέσματα Προσομοίωσης Κυκλώματος Αισθητήρα Υγρασίας Εδάφους

Στην προσομοίωση, η χωρητικότητα του πυκνωτή C_SOIL ορίστηκε στα 20 pF για την κόκκινη κυματομορφή, στα 60 pF για την πορτοκαλί κυματομορφή και στα 80 pF για την πράσινη κυματομορφή.

Στη συνέχεια του κυκλώματος, αφού το σήμα περάσει από το φίλτρο, διέρχεται από ένα κύκλωμα ανίχνευσης κορυφής (peak detector) που πραγματοποιεί μετατροπή του AC σήματος σε σταθερή DC τάση, όπως αναφέρεται και στο [79]. Το AC σήμα που εξέρχεται από το φίλτρο είναι τριγωνικής μορφής. Το κύκλωμα ανιχνευτή κορυφής αποτελείται από την βασική διάταξη ημιανόρθωσης, δηλαδή μία κοινή πυριτική δίοδο 1N4148, η οποία συνδέεται σε σειρά με την έξοδο του φίλτρου, ώστε να παράξει ένα DC σήμα, το οποίο εμφανίζει μία σταθερή πτώση τάσης σε σχέση με την πραγματική κορυφή του τριγωνικού σήματος λόγω της μη γραμμικότητας του διόδικου στοιχείου, όπως είναι εμφανές και στην Εικόνα 4.10. Η μπλε κυματομορφή είναι η DC μετρούμενη τάση στην έξοδο του αισθητήρα για χωρητικότητα 20 pF, η πετρόλ κυματομορφή για χωρητικότητα 60 pF ενώ τέλος η μωβ κυματομορφή αντιστοιχεί σε χωρητικότητα 80 pF.

Τέλος, πριν το σημείο που πραγματοποιείται η μέτρηση της DC τάσης, υπάρχει άλλη μία διάταξη φίλτρου, που σκοπό έχει να βελτιώσει το μετρούμενο σήμα και να μειώσει την κυμάτωσή του. Η διάταξη αυτή αποτελείται από μία αντίσταση μεγάλης τιμής, συγκεκριμένα 1 MΩ, τοποθετημένη παράλληλα σε έναν πυκνωτή χωρητικότητας 1 μF, όπως φαίνεται και στο κύκλωμα της Εικόνας 4.9. Τα άκρα του πυκνωτή και της αντίστασης καταλήγουν στην γείωση, στην οποία συνδέεται και το ένα εκ των 2 ηλεκτροδίων.

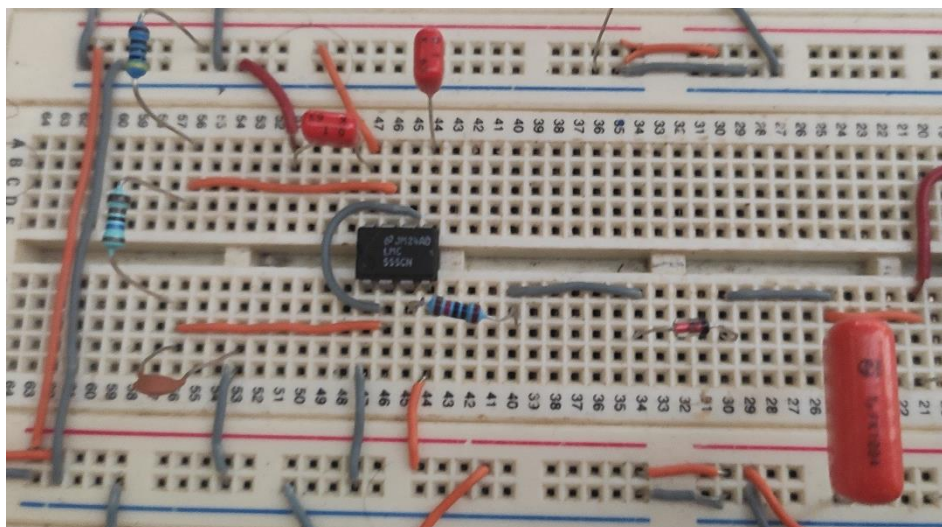
Ο λόγος τοποθέτησης της δίοδου σε σειρά με το φίλτρο είναι να αποτρέπει την πλήρη αποφόρτιση του πυκνωτή προς την γείωση όταν το εισερχόμενο σήμα είναι χαμηλής τάσης, έτσι η αποφόρτιση γίνεται πάντα μέσω της αντίστασης του 1 MΩ, δημιουργώντας μία σταθερά στον χρόνο αποφόρτισης της τάξης του 1 δευτερολέπτου, έτσι ώστε η μέτρηση να είναι σταθερή και αξιόπιστη. Η σχέση που επιβεβαιώνει τα προαναφερθέντα είναι η 4.9 παρακάτω:

$$t = R \times C \quad (4.9)$$

$$t = 1M\Omega * 1 \mu F = 1 * 10^6 * 1 * 10^{-6} = 1 s$$

4.3.2.4 Κατασκευή του αισθητήρα

Από πλευράς κυκλώματος, αφού η προσομοίωση κατέστη επαρκής για τον υπολογισμό μίας σχετικής περιεκτικότητας νερού στο έδαφος, πραγματοποιήθηκε υλοποίηση του κυκλώματος σε επίπεδο δοκιμών πάνω σε ράστερ. Η υλοποιημένη διάταξη του κυκλώματος είναι αυτή της παρακάτω Εικόνας 4.11. Τα χωρητικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι πυκνωτές πολυστερίνης.



Εικόνα 4.11: Υλοποίηση Κυκλώματος Αισθητήρα Υγρασίας Εδάφους

Ταυτοχρόνως, απαιτείται η κατασκευή του τμήματος των ηλεκτροδίων του αισθητήρα. Η κατασκευή βασίζεται σε παλαιότερο πρότυπο, αυτού του σχεδίου της διπλανής Εικόνας 4.12. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας διαθέτει 2 ζεύγη ηλεκτροδίων, το ένα εκ των οποίων χρησιμοποιείται για μέτρηση θερμοκρασίας του εδάφους με ωμική μέθοδο, ενώ το δεύτερο αξιοποιείται για μέτρηση υγρασίας του εδάφους μέσω της χωρητικής μεθόδου.

Η απόσταση των 2 ηλεκτροδίων των όμορων ζευγών είναι στο 1 cm μεταξύ τους και η απόσταση μεταξύ των δύο ζευγών είναι στα 3 cm. Το μήκος των ηλεκτροδίων είναι στα 14 cm, ώστε η μέτρηση να γίνεται σε κατάλληλο βάθος στο έδαφος, ενώ το υλικό κατασκευής τους είναι το ανοξείδωτο ατσάλι, υλικό που επιλέγεται για την ικανότητα αντίστασής του στην οξείδωση, καθώς και την σταθερή του απόδοση σε επαναλαμβανόμενες μετρήσεις.

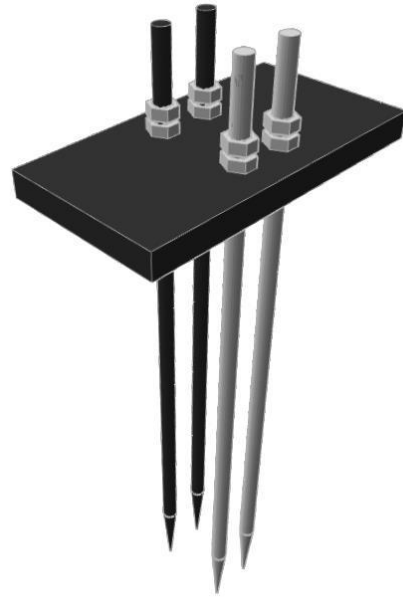
Το τμήμα των ηλεκτροδίων που εισέρχεται στο έδαφος είναι εντελώς λείο και μυτερό στις άκρες του, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ικανοποιητική επαφή με το μετρούμενο δείγμα εδάφους, ενώ το τμήμα που βρίσκεται εκτός του εδάφους διαθέτει σπειρώματα, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η γαλβανική ένωση μεταξύ των αγωγών σύνδεσης των ηλεκτροδίων και του υπολοίπου κυκλώματος. Για την στερεοποίηση του άκρου των αγωγών στα σπειρώματα χρησιμοποιούνται παξιμάδια ίδιας διατομής (4mm).

Τα καλώδια που χρησιμοποιούνται ως αγωγοί είναι τύπου UTP διατομής 30 AWG (American Wire Gauge), τα οποία εξασφαλίζουν μεταφορά των σημάτων υψηλής ταχύτητας χωρίς παραμόρφωση λόγω αντίστασης των καλωδίων.

Τα ζεύγος ηλεκτροδίων που χρησιμοποιείται για την μέτρηση υγρασίας μονώνεται με τη χρήση ενός σπρέι πλαστικοποίησης για πλακέτες, το οποίο προσθέτει ένα υποτυπώδες πάχος στον αισθητήρα, γεγονός που είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη για την ακρίβεια των μετρήσεων.

Η βάση στην οποία στηρίζονται τα ηλεκτρόδια κατασκευάζεται από πλαστικό πολυμερές ABS και πάνω της δημιουργούνται τρύπες στις κατάλληλες αποστάσεις. Οι τρύπες αυτές διαθέτουν σπειρώματα για να εξασφαλίζεται η σταθερότητα των ηλεκτροδίων.

Στην διπλανή Εικόνα 4.13 βλέπουμε τον υλοποιημένο αισθητήρα που περιγράφεται παραπάνω. Τα ηλεκτρόδια που αξιοποιούμε για τις μετρήσεις υγρασίας εδάφους είναι αυτά με τα θερμοσυστελλόμενα καλύμματα.



Εικόνα 4.12: Μοντέλο Ηλεκτροδίων Αισθητήρα Υγρασίας



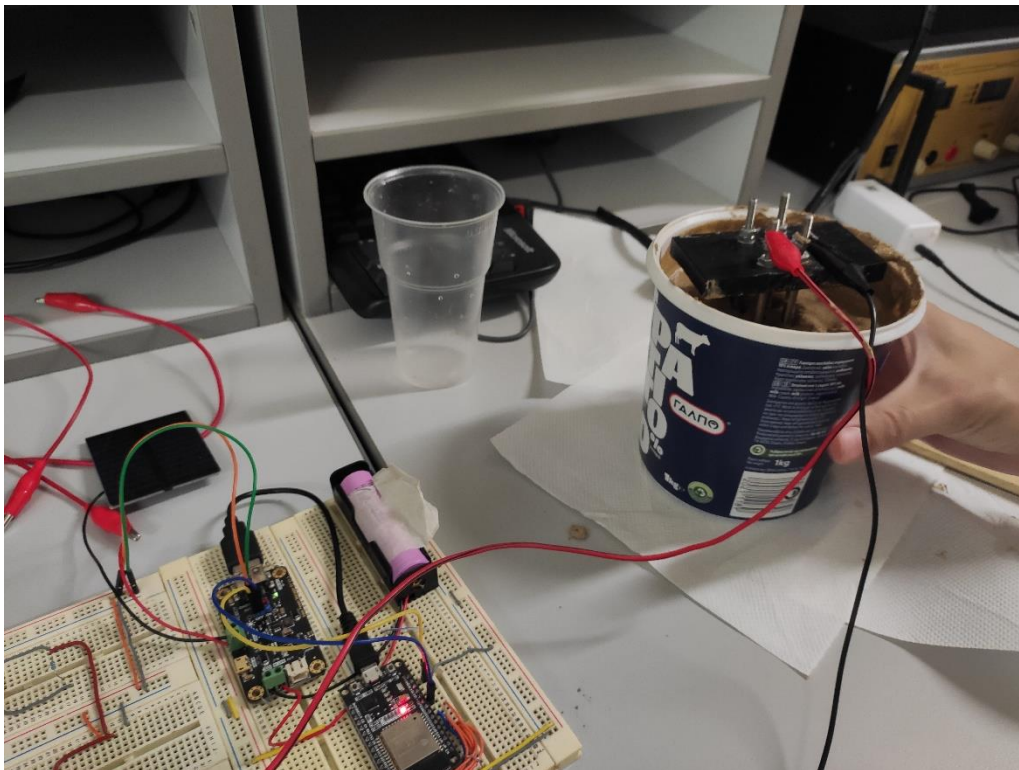
Εικόνα 4.13: Υλοποιημένο τμήμα ηλεκτροδίων αισθητήρα υγρασίας εδάφους

4.3.2.5 Διαδικασία Βαθμονόμησης Αισθητήρα

Η βαθμονόμηση του υλοποιημένου αισθητήρα έλαβε χώρα εντός εργαστηριακού περιβάλλοντος. Ως δείγμα για την βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκε αργιλοπηλώδες δείγμα εδάφους από χωράφι στη Νέα Ηράκλεια Θεσσαλονίκης. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για να διαπιστώσουμε την πραγματική υδατική περιεκτικότητα του δείγματος ήταν η μέθοδος Βαρυμετρικής Περιεκτικότητας Ύδατος στο έδαφος.

Το δείγμα εδάφους ζυγίστηκε στεγνό και η μάζα που καταγράφηκε ήταν $m_{dry} = 1.2$ kg. Ο όγκος του δείγματος εδάφους ήταν $V_{soil} = 0.00147$ m³ (δηλαδή 1.47 λίτρα).

Πριν ξεκινήσουμε την διαδικασία, αφού συνδέσαμε τα ηλεκτρόδια στο κύκλωμα του αισθητήρα, πραγματοποιήσαμε μία μέτρηση της τιμής του αισθητήρα με τα ηλεκτρόδια εκτός του εδάφους, έτσι ώστε να δούμε ποιο είναι το ανώτερο όριο DC τιμής που είναι αποδεκτό να λάβουμε στην έξοδο του αισθητήρα. Η Εικόνα 4.14 είναι από την εργαστηριακή διαδικασία βαθμονόμησης του αισθητήρα.



Εικόνα 4.14: Εργαστηριακή διαδικασία βαθμονόμησης του αισθητήρα υγρασίας εδάφους

Η πρώτη μέτρηση εντός του δείγματος εδάφους έγινε με πλήρως ξηρό δείγμα κι έπειτα αρχίσαμε να προσθέτουμε νερό με βήμα 100 mL κάθε φορά. Το δείγμα ζυγιζόταν μετά από κάθε προσθήκη νερού. Τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων αποτυπώνονται στον Πίνακα 4.5 της επόμενης σελίδας, όπου γίνεται συσχέτιση της GWC, της VWC και της DC μετρούμενης τιμής στην έξοδο του αισθητήρα. Οι μετρήσεις της DC τάσης έγιναν με εργαστηριακό πολύμετρο ακρίβειας 4 ½ ψηφίων.

Πίνακας 4.5: Δεδομένα Βαθμονόμησης Αισθητήρα Υγρασίας Εδάφους

Ποσότητα Νερού (mL)	GWC (%)	VWC (%)	DC τάση εξόδου (V)
<i>ΑΕΡΑΣ</i>			4.527
0	0	0	3.978
100	8.33	12.1	3.429
200	16.67	20.7	3.316
300	25	27.9	3.221
400	33.3	30.2	3.118
500	41.67	50	3.103
600	50	66.9	3.081

Όπως παρατηρούμε βάσει των αποτελεσμάτων, η συμπεριφορά του αισθητηρίου δεν είναι ούτε στο ελάχιστο γραμμική. Λαμβάνοντας τα δεδομένα αυτά ωστόσο, μπορούμε να δημιουργήσουμε μία συνάρτηση συσχέτισης μεταξύ της DC τάσης εξόδου και της περιεκτικότητας νερού στον όγκο του δείγματος εδάφους. Επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε τα αποτελέσματα από την VWC σε συσχέτιση με την DC τάση εξόδου του αισθητήρα. Χρησιμοποιώντας και πάλι το εργαλείο MyCurveFit [80], καταλήγουμε στην παρακάτω σχέση 4.10, η οποία είναι πολυωνυμική 3^{ης} τάξης, που δίνει και το ελάχιστο σφάλμα:

$$y = -213.286x^3 + 2335.220x^2 - 8521.883x + 10372.697 \quad (4.10)$$

όπου x είναι η DC τιμή τάσης και y είναι η κατά VWC υγρασία στο έδαφος.

4.4 Ψηφιακοί Αισθητήρες

Οι ψηφιακοί αισθητήρες αποτελούν μία άλλη κατηγορία αισθητήρων από τους ως τώρα αναφερθέντες αναλογικούς, από την άποψη ότι τα σήματα πληροφορίας στην έξοδό τους έχουν ήδη μετατραπεί σε ψηφιακή μορφή. Αυτό σημαίνει ότι τα σήματα είναι διακριτού πλάτους, όμως αυτό που αλλάζει είναι το εύρος των παλμών τους, οι οποίοι είναι τετραγωνικοί (επιπέδων HIGH / LOW). Στα πλαίσια της διπλωματικής μας θα χρησιμοποιήσουμε δύο τύπους τέτοιων ψηφιακών αισθητήρων, όμως με τη βοήθειά τους θα δημιουργήσουμε 4 διαφορετικά όργανα μέτρησης, τα οποία είναι υπεύθυνα για τη συλλογή μετεωρολογικών δεδομένων.

4.4.1 Πλήρης αισθητήρας ατμόσφαιρας BME – 280

Ο πλήρης αισθητήρας ατμόσφαιρας ή αισθητήρας περιβάλλοντος BME – 280 είναι ένα μικροσκοπικό ολοκληρωμένο κύκλωμα της Bosch, το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 4.15.

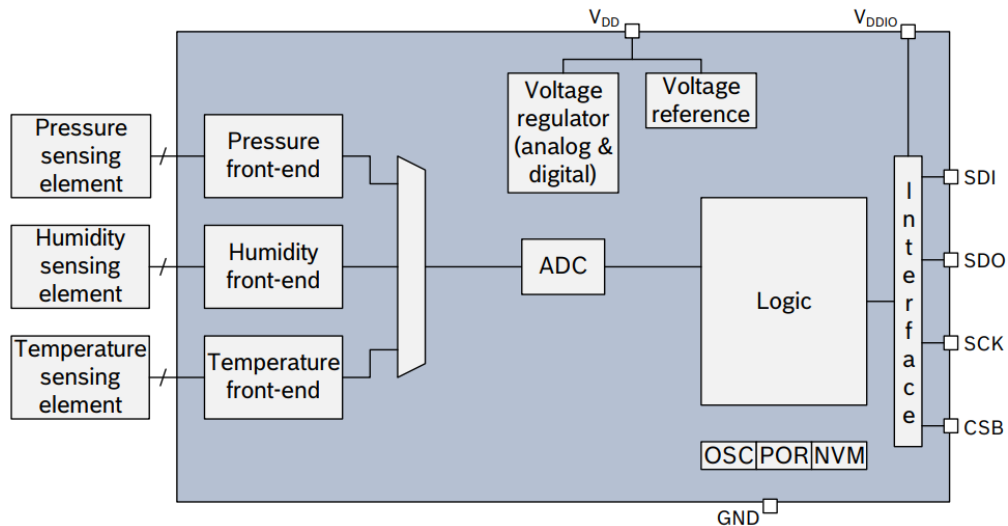
Το συγκεκριμένο διακριτό ολοκληρωμένο κύκλωμα αποτελεί μία SMD υλοποίηση που περιλαμβάνει αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας και ατμοσφαιρικής πίεσης, οι οποίοι καλύπτουν ένα αρκετά μεγάλο εύρος τιμών και με πολύ ικανοποιητική ακρίβεια. Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα είναι αυτά του Πίνακα 4.6 παρακάτω. Το πλήρες datasheet του αισθητήρα αποτελεί την [83] της βιβλιογραφίας.



Εικόνα 4.15: Ολοκληρωμένο κύκλωμα BME - 280 [83]

Πίνακας 4.6: Βασικά Τεχνικά Χαρακτηριστικά Αισθητήρα BME – 280 [83]

Παράμετρος	Εύρος	Ακρίβεια	Ανοχή
Θερμοκρασία	$-40^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$	0.1°C	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
Υγρασία	$0\% \sim 100\% \text{RH}$	$0.1\% \text{RH}$	$\pm 2\% \text{RH}$
Πίεση	$300 \sim 1100 \text{hPa}$	1hPa	$\pm 1.5 \text{hPa}$
Τάση Τροφοδοσίας	$1.7\text{V} \sim 5\text{V}$		
Ρεύμα Λειτουργίας	2 mA		
Χρόνος Δειγματοληψίας	1s		



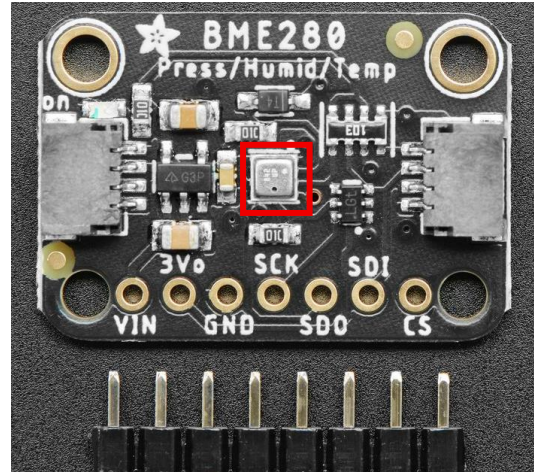
Εικόνα 4.16: Απλοποιημένο Διάγραμμα Αισθητήρα BME - 280 [83]

Ο συγκεκριμένος αισθητήρας χρησιμοποιείται κατά κόρον σε αυτόνομα συστήματα μετεωρολογικών μετρήσεων, δηλαδή IoT weather stations, λόγω του μικρού του μεγέθους, της ακρίβειας των μετρήσεων, αλλά και της ευκολίας στη συνδεσμολογία, καθώς υποστηρίζει σειριακά πρωτόκολλα μεταφοράς ψηφιακών δεδομένων με υψηλές ταχύτητες, συγκεκριμένα τα I²C και SPI.

Ένας ακόμη λόγος που επιλέγεται ο συγκεκριμένος αισθητήρας σε εφαρμογές ενσωματωμένων συστημάτων είναι η χαμηλή κατανάλωση ενέργειάς του σε σύγκριση με μηχανικά όργανα, αλλά και η δυνατότητα του να τροφοδοτείται με μονοπολική τροφοδοσία τιμής είτε 3.3V είτε 5V. Ταυτόχρονα, η έξοδός του παρέχει απευθείας ψηφιακά σήματα ίδιου πλάτους με αυτό της τάσης τροφοδοσίας, καθώς διαθέτει σταθεροποιητή τάσης (voltage regulator), όπως φαίνεται και στο μπλοκ διάγραμμα του εσωτερικού του στην Εικόνα 4.16 παραπάνω. [83].

Λόγω της ευρείας χρήσης που έχει ο συγκεκριμένος αισθητήρας, σε συνάρτηση με την δυσκολία στην τοποθέτηση και χρήση του σε ερασιτεχνικά και εκπαιδευτικά περιβάλλοντα, υπάρχουν αρκετές έτοιμες υλοποιήσεις μικρών πλακετιδίων (breakout boards) που στόχο έχουν να μετατρέψουν την SMD συνδεσμολογία σε σειρές από διακριτά pins, μετατρέποντας την SMD ολοκλήρωσή του σε υλικό τύπου SIP (Single-In-Package), ήτοι Through – Hole.

Για σχετικότερη ευκολία στις δοκιμές και την σύνδεση με το υπόλοιπο κύκλωμα της διπλωματικής, στην υλοποίησή μας χρησιμοποιούμε κι εμείς ένα τέτοιο έτοιμο board, συγκεκριμένα αυτό της εταιρείας Adafruit, για το οποίο υπάρχει και έτοιμη βιβλιοθήκη για επικοινωνία με μικροελεγκτές Arduino και ESP32, όπως θα δούμε παρακάτω. Το board αυτό φαίνεται στην διπλανή Εικόνα 4.17. Ο αισθητήρας BME – 280 είναι το μικρό ολοκληρωμένο που σημαίνεται στην Εικόνα.



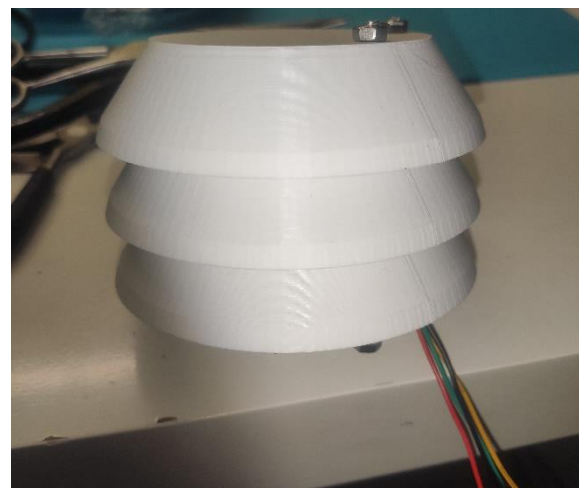
Εικόνα 4.17: Breakout Board BME-280 της Adafruit [84]

Όπως εύκολα διακρίνουμε, το board διαθέτει οπές στις οποίες μπορούν να κολληθούν pins για τοποθέτηση του module πάνω σε ράστερ και να πραγματοποιηθεί δοκιμαστική λειτουργία του κυκλώματος.

Κατά την διάρκεια των δοκιμών μας τοποθετήσαμε το module επάνω σε ράστερ, όμως έπειτα, έπρεπε να τοποθετηθεί οριστικά σε ένα σημείο που θα ήταν προστατευμένο από τις αντίξοες καιρικές συνθήκες. Όπως είχαμε αναφέρει και στο κεφάλαιο 2, τα όργανα που πραγματοποιούν μετρήσεις θερμοκρασίας, υγρασίας και πίεσης τοποθετούνται μέσα σε μετεωρολογικούς κλωβούς Stevenson, οι οποίοι στην νέα γενιά μετεωρολογικών σταθμών μοιάζουν με διάταξη από καπάκια εξαερισμών. Το σχήμα τους αποτρέπει την βροχή και τους ισχυρούς ανέμους να επηρεάζουν τις μετρήσεις των αισθητήρων. Έτσι, με την βοήθεια του προγράμματος Tinkercad τροποποιήσαμε ορισμένα μοντέλα που υπήρχαν διαθέσιμα στο διαδίκτυο για ένα τέτοιο κλωβό Stevenson και αφού το εκτυπώσαμε με την χρήση εκτυπωτή 3D, καταλήξαμε στο αποτέλεσμα της Εικόνας 4.18. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την εκτύπωση είναι λευκό πλαστικό PLA (πολυλακτίδιο).

Το μοντέλο της τρισδιάστατης εκτύπωσης μας έδωσε 4 διαφορετικά μέρη, τα οποία τοποθετήθηκαν σε σειρά και συγκρατήθηκαν μεταξύ τους με τη χρήση ντίζας και παξιμαδιών διατομής 4mm.

Εντός της εκτυπωμένης διάταξης της Εικόνας 4.18 τοποθετήθηκε το module με τον αισθητήρα BME – 280, ενώ η διασύνδεσή του με το υπόλοιπο κύκλωμα γίνεται με τη χρήση 4 αγωγών, καθώς η επικοινωνία του αισθητήρα με τον μικροελεγκτή γίνεται με τη χρήση πρωτοκόλλου I²C. Το πρωτόκολλο αυτό απαιτεί 2 καλώδια, ένα για σήματα χρονισμού (SCL) και ένα για δεδομένα (SDA). Τα άλλα 2 καλώδια είναι για την σύνδεση με 3.3V τροφοδοσίας από τον μικροελεγκτή και την γείωση. Οι αγωγοί που χρησιμοποιούνται είναι μονόκλωνοι 24 AWG και καλώδιο UTP τηλεφωνικών συνδέσεων.



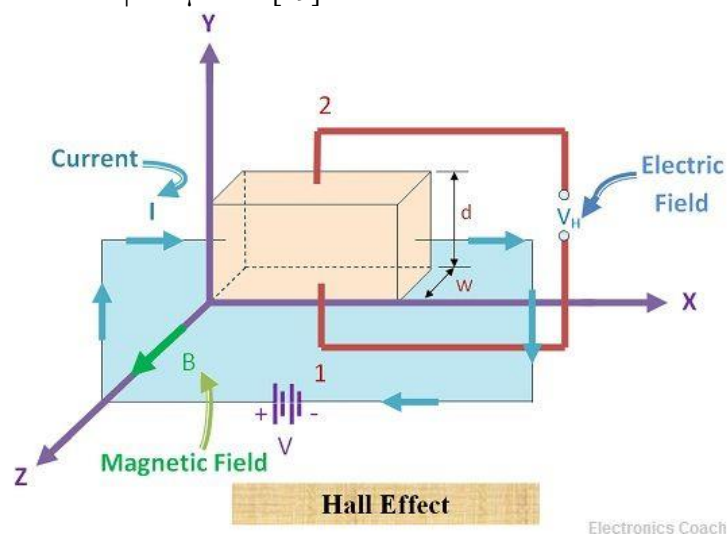
Εικόνα 4.18: Υλοποιημένος Κλωβός Stevenson

Ο τρόπος που πραγματοποιείται η λήψη μετρήσεων στον μικροελεγκτή από τον αισθητήρα θα αναλυθεί στην υποενότητα 4.6.7.

4.4.2 Ψηφιακός Αισθητήρας Hall Effect 3144 για την υλοποίηση ανεμοδείκτη, ανεμόμετρου και βροχόμετρου

Η υλοποίηση των υπόλοιπων 3 οργάνων μέτρησης μετεωρολογικών φαινομένων γίνεται με βάση την λειτουργία αισθητήρων φαινομένου Hall, δηλαδή ανίχνευσης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

Το φαινόμενο Hall ορίζει πως όταν ένα πλακίδιο διαρρέεται από ρεύμα έντασης I και βρεθεί μέσα σε μαγνητικό πεδίο B , τότε πάνω του εμφανίζεται εγκάρσια τάση. Η φυσική εξήγηση του φαινομένου δίνεται μέσω της επίδρασης της δύναμης Lorentz (F_L), η οποία ασκείται σε ηλεκτρικό φορτίο κινούμενο με ταχύτητα v εντός μαγνητικού πεδίου B . Όταν το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετο προς το ηλεκτρικό (βάσει του κανόνα δεξιού χεριού), τότε λόγω των διανυσματικών μεγεθών v και B υπάρχει εκτροπή των φορτίων κάθετα στη δομή του στοιχείου. Όσο η συσσώρευση των φορτίων συνεχίζεται, η εγκάρσια ηλεκτροστατική δύναμη που αναπτύσσεται εξισορροπεί την μαγνητική δύναμη. Η Εικόνα 4.19 δείχνει την αναπαράσταση αυτού του φαινομένου. [49]



Εικόνα 4.19: Αναπαράσταση του φαινομένου Hall [85]

Έτσι, ορίζεται η τάση Hall (V_H), η οποία είναι τάξεως μV , που αναπτύσσεται σε στοιχεία ημιαγωγών. Η τάση αυτή δίνεται από την παρακάτω σχέση 4.11.

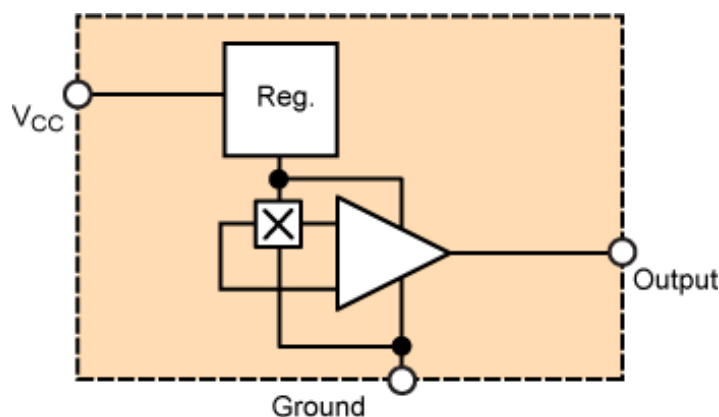
$$V_H = \frac{R_H B I}{d} \quad (4.11)$$

όπου d είναι το πάχος του ημιαγωγού, B είναι η μαγνητική επαγωγή, I η ένταση του ρεύματος και R_H η σταθερά Hall. Η σταθερά αυτή δίνεται από την σχέση 4.12 παρακάτω:

$$R_H = \frac{p\mu_h^2 - n\mu_n^2}{q_e(p\mu_h + n\mu_n)^2} \quad (4.12)$$

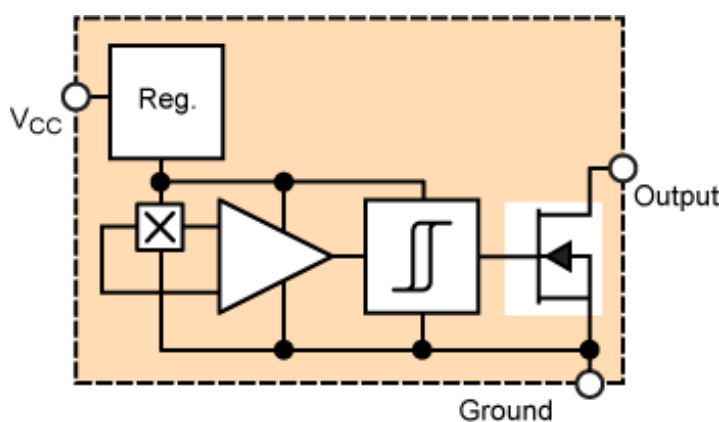
όπου n είναι η συγκέντρωση ηλεκτρονίων, p η συγκέντρωση οπών, μ_e η κινητικότητα ηλεκτρονίων, μ_h η κινητικότητα οπών και q_e το φορτίο του ηλεκτρονίου.

Οι αναλογικοί αισθητήρες Hall αποτελούν ολοκληρωμένα κυκλώματα που περιλαμβάνουν έναν σταθεροποιητή τάσης (voltage regulator), ένα ημιαγωγό στοιχείο πυριτίου που λειτουργεί ως αισθητήριο Hall καθώς και έναν διαφορικό ενισχυτή με μεγάλη αντίσταση εισόδου. Το μπλοκ διάγραμμα αυτών των αισθητήρων είναι αυτό της Εικόνας 4.20. Το σημειώμενο με X τετράγωνο είναι το πλακίδιο ημιαγωγού Hall. Τέτοιου τύπου αισθητήρες χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις αποστάσεων και έντασης μαγνητικών πεδίων, καθώς η απόκριση του αισθητήρα παρουσιάζει γραμμικότητα σε σχέση με την απόστασή του από οποιονδήποτε μαγνήτη.



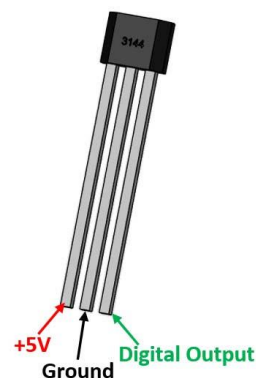
Εικόνα 4.20: Δομικό διάγραμμα αναλογικού αισθητήρα Hall [86]

Σε αντιδιαστολή με τους αισθητήρες Hall αναλογικής εξόδου, που είναι ικανοί να διαφοροποιούν την τάση εξόδου ανάλογα με την ένταση του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν, υπάρχει και η κατηγορία των αισθητήρων Hall με διακριτή τιμή εξόδου, δηλαδή ψηφιακοί αισθητήρες. Το μπλοκ διάγραμμα ενός τέτοιου αισθητήρα είναι αυτό της Εικόνας 4.21 και η ουσιαστική διαφορά του από αυτό της Εικόνας 4.20 είναι η τοποθέτηση ενός κυκλώματος Schmitt – Trigger με υστέρηση, δηλαδή ένα κύκλωμα σύγκρισης, το οποίο με τη σειρά του πολώνει ένα τρανζίστορ τύπου FET. Συνεπώς, το κύκλωμα γίνεται αυτομάτως ένας ηλεκτρονικός διακόπτης διεγερόμενος από έναν μαγνήτη. Αυτή η κατηγορία αισθητήρων Hall βρίσκει ευρεία χρήση σε εφαρμογές στροφομετρήσεων και μετρήσεων ταχύτητας, αναγνώσεις μαγνητικών καρτών καθώς και σε συστήματα συναγερού, όπου χρησιμοποιούνται για έλεγχο θέσης κλεισμένων θυρών.



Εικόνα 4.21: Δομικό διάγραμμα ψηφιακού αισθητήρα Hall [86]

Στην δική μας εφαρμογή θα κάνουμε χρήση του ψηφιακού αισθητήρα Hall τύπου A3144 της εταιρείας Allegro και είναι όπως αυτός της διπλανής Εικόνας 4.22. Όπως βλέπουμε είναι ένα ολοκληρωμένο σε συσκευασία όπως είναι και τα κοινά τρανζίστορ, όπερ σημαίνει ότι διαθέτει 3 ποδαράκια. Στο ένα ποδαράκι εφαρμόζεται η τάση τροφοδοσίας, στο δεύτερο η γείωση και το τρίτο είναι για την ψηφιακή έξοδο του σήματος. Είναι ο συνηθέστερος τύπος ψηφιακού αισθητήρα Hall που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές μικροελεγκτών, καθώς έχει ένα τεράστιο εύρος τάσεων τροφοδοσίας, από +4V έως και +24V, όπως διαβάζουμε από το φύλλο δεδομένων του κατασκευαστή. [87]



Εικόνα 4.22: Αισθητήρας Hall A3144 [88]

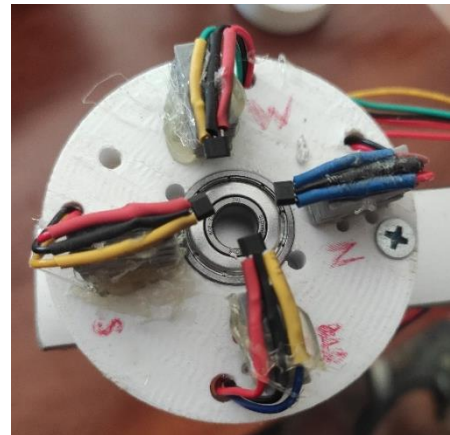
4.4.2.1 Υλοποίηση Ανεμοδείκτη με χρήση αισθητήρων Hall Effect

Στο κεφάλαιο 2 είχαμε αναφέρει πως ο ανεμοδείκτης είναι όργανο που λειτουργεί με βάση την οπτική παρατήρηση, έτσι ώστε να διαπιστώνουμε την κατεύθυνση από την οποία πνέει ένας άνεμος. Στην δική μας εφαρμογή, δεδομένου ότι είναι απαραίτητη η καταγραφή των διευθύνσεων πνοής του ανέμου διαρκώς χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, είναι απαραίτητη η αυτοματοποίηση της συγκεκριμένης διαδικασίας.

Οι ηλεκτρονικοί ανεμοδείκτες δεν διαφέρουν από κατασκευαστικής άποψης από τους φυσικούς, ωστόσο στην βάση του άξονα περιστροφής τοποθετούνται ανά 90 μοίρες 4 διαφορετικοί ψηφιακοί αισθητήρες Hall. Καθένας απ' αυτούς αντιπροσωπεύει ένα από τα σημεία του ορίζοντα (Βορράς, Ανατολή, Νότος, Δύση). Σε μία αρκούντως μικρή (σχεδόν οριακή) απόσταση από τους αισθητήρες τοποθετείται ένας δίσκος με έναν σταθερό μαγνήτη, ο οποίος περιστρέφεται μαζί με τον άξονα στον οποίο υπάρχει το βέλος κατεύθυνσης του ανέμου. Το βέλος έχει την ικανότητα στροφής έτσι ώστε η μύτη του να δείχνει την κατεύθυνση προς την οποία πνέει ο άνεμος. Επομένως, το σημείο από το οποίο πνέει ο άνεμος βρίσκεται στην ουρά του βέλους.

Σαφώς και για τον ανεμοδείκτη χρειαζόμασταν ένα τρισδιάστατο μοντέλο το οποίο αφού τροποποιήσαμε καταλλήλως, εκτυπώσαμε πάλι σε λευκό PLA πλαστικό με την χρήση ενός εκτυπωτή 3D. Το μοντέλο περιλάμβανε 6 διακριτά μέρη, τα οποία ενώνονται με τη χρήση ντίζας, βιδών και παξιμαδιών πάχους 4mm. Ο άξονας περιστροφής είναι στην ουσία μία ντίζα 4mm, ο οποίος πρέπει να περιστρέφεται ελεύθερα από τη βάση. Έτσι στην βάση τοποθετήθηκε ένα ρουλεμάν 608ZZ, οι διαστάσεις του οποίου είναι 22mm εξωτερική διάμετρος και 8mm εσωτερική. Για την προσαρμογή της ντίζας στην εσωτερική οπή του ρουλεμάν χρησιμοποιήθηκε ένα εκτυπωμένο κυλινδρικό κολάρο με εξωτερική διάμετρο 8mm και εσωτερική 4mm.

Αφού τοποθετήθηκε ο άξονας περιστροφής στην βάση, δημιουργήθηκαν μικρά βάραθρα με χρήση γκρίζου PLA, πάνω στα οποία κολλήθηκαν με χρήση σιλικονούχας θερμοκόλλας οι 4 αισθητήρες Hall. Στα ποδαράκια τους τοποθετήθηκαν μονόκλωνοι αγωγοί 24 AWG και αφού κολλήθηκαν μεταξύ τους, η σύνδεση καλύφθηκε με χρήση θερμοσυστελλόμενου. Ο λόγος τοποθέτησης των βαράθρων στα σημεία αυτά ήταν για την μείωση της απόστασης του μαγνήτη από τους αισθητήρες Hall ώστε να διασφαλίζεται η πόλωσή τους όταν βρίσκεται πάνω απ' αυτούς. Το σημείο αυτό της κατασκευής φαίνεται στην διπλανή Εικόνα 4.23.

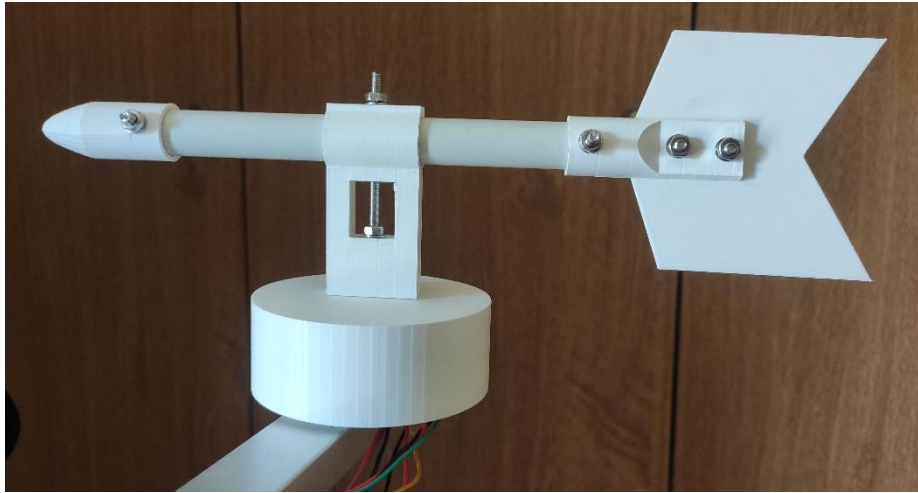


Εικόνα 4.23: Η βάση του ανεμοδείκτη σε φάση υλοποίησης

Πάνω απ' τη βάση τοποθετείται κυκλικό κάλυμμα για την προστασία των ηλεκτρονικών στοιχείων της κατασκευής από τις καιρικές συνθήκες. Στην εσωτερική πλευρά του καλύμματος, το οποίο διαθέτει στην μέση οπή για να περάσει από τον άξονα περιστροφής, τοποθετείται και ο σταθερός μαγνήτης, σε ένα σημείο έτσι ώστε όταν το βέλος δείχνει τον Βορρά, αυτός να είναι στην Δύση. Όπως όμως αναφέραμε παραπάνω, όταν το βέλος δείχνει τον Βορρά, ο άνεμος είναι Νοτιάς. Συνεπώς, αυτά τα στοιχεία πρέπει να ληφθούν υπόψη όταν ονοματίζουμε τους 4 αισθητήρες. Η ονομασία του κάθε αισθητήρα εν τέλει γίνεται με βάση την θέση του μαγνήτη για κάθε πνοή ανέμου. Στην Εικόνα 4.23 σημειώνεται δίπλα σε κάθε αισθητήρα η ονομασία του «φαινόμενου σημείου ορίζοντα» στην οποία αντιστοιχεί λαμβάνοντας υπόψιν τα προαναφερθέντα.

Ο ανεμοδείκτης που υλοποιούμε έχει διακριτική ικανότητα κυρίων και δευτερευόντων κατευθύνσεων ανέμου. Επομένως, όταν ο μαγνήτης βρίσκεται σε θέση που πολώνει 2 αισθητήρες, η κατεύθυνση πνοής του ανέμου είναι αυτή ενδιάμεσα από τα 2 σημεία του ορίζοντα που αντιπροσωπεύουν οι 2 αισθητήρες.

Στην συνέχεια, πάνω από το κάλυμμα τοποθετούμε την βάση από την οποία θα διέρχεται το στέλεχος του βέλους. Το πάχος αυτού του βέλους είναι τα 16mm και για την υλοποίησή του χρησιμοποιήσαμε ηλεκτρολογικό σωλήνα βαρέως τύπου $\varnothing 16$ και μήκους περίπου 20cm. Πάνω στον σωλήνα βιδώσαμε την μύτη του βέλους, την βάση της ουράς και δημιουργήσαμε τρύπες από τις οποίες διέρχεται ο άξονας περιστροφής του ανεμοδείκτη. Εν τέλει, το τελικό όργανο έχει την όψη της παρακάτω Εικόνας 4.24.



Εικόνα 4.24: Η τελική μορφή του υλοποιημένου ανεμοδείκτη

Για κάθε αισθητήρα Hall απαιτούνται 3 αγωγοί, συνεπώς από το όργανο εξέρχονται 12 καλώδια συνολικά, τα οποία οδηγούνται στην συνέχεια σε στεγανά κυτία (μπουάτ) στον σκελετό του συστήματος. Εντός των μπουάτ υπάρχουν μικρά πλακίδια τα οποία διαθέτουν ένα κύκλωμα οπτικής απεικόνισης της πόλωσης του κάθε αισθητήρα μέσω ενός μικρού LED. Έπειτα, από τα κυτία εξέρχονται μονόκλωνα UTP καλώδια τηλεφωνίας που συνδέονται στην πλακέτα του συστήματος, για την οποία γίνεται λόγος στην υποενότητα 4.7.

4.4.2.2 Υλοποίηση Ανεμόμετρου με χρήση αισθητήρα Hall Effect

Το ανεμόμετρο που θα υλοποιήσουμε είναι κυπελλοφόρο, όπως αυτά που αναφέραμε στο 2^ο κεφάλαιο. Προφανώς, η λογική κατασκευής μας θα είναι η ίδια με αυτή του ανεμοδείκτη, όμως εδώ η κατασκευή, υλοποίηση και προγραμματισμός είναι ευκολότερα, διότι απαιτείται η χρήση μόνο ενός αισθητήρα Hall.

Η χρήση του ψηφιακού αισθητήρα Hall στο συγκεκριμένο όργανο γίνεται με σκοπό την καταμέτρηση των περιστροφών του άξονα στον οποίο τοποθετούνται τα κύπελλα, κι έπειτα μέσω κατάλληλου προγράμματος πραγματοποιείται ο υπολογισμός της ταχύτητας του πνεόμενου ανέμου. Στον άξονα περιστροφής τοποθετείται ένας μικρός μαγνήτης ικανός να πολώσει τον αισθητήρα, ο οποίος βρίσκεται στην βάση του οργάνου. Περισσότερα στοιχεία για τον κώδικα θα δώσουμε στην υποενότητα 4.6.7.

Σχετικά με την κατασκευή, αρχικά πραγματοποιήσαμε αναζήτηση μοντέλων κυπελλοφόρων ανεμόμετρων και αφού εντοπίσαμε το κατάλληλο, το τροποποιήσαμε, το εκτυπώσαμε με τη χρήση 3D εκτυπωτή χρησιμοποιώντας το ίδιο λευκό PLA που χρησιμοποιήσαμε και για τα προηγούμενα όργανα.

Η λογική λειτουργίας ενός κυπελλοφόρου ανεμόμετρου είναι η μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής των κυπέλλων, έτσι ώστε να διαπιστώσουμε την ταχύτητα πνοής του ανέμου. Ο τρόπος για να το

πραγματοποιήσουμε είναι να βιδώσουμε τα κύπελλα πάνω σε έναν άξονα περιστροφής κι έπειτα να μετρήσουμε πόσες φορές περιστρέφεται ο δίσκος με τα κύπελλα μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, εν προκειμένω σε ένα λεπτό, εφ' όσον η μέτρηση των στροφών γίνεται συνήθως σε περιστροφές / λεπτό (Revolutions Per Minute / RPM).

Η μετατροπή από RPM σε km/h γίνεται με την χρήση της παρακάτω σχέσης 4.13:

$$Wind\ Speed\frac{km}{h} = N_{rpm} * d_{anemometer(km)} * 60 * \pi \quad (4.13)$$

όπου N_{rpm} είναι ο αριθμός των περιστροφών του ανεμόμετρου μέσα σε ένα λεπτό της ώρας, $d_{anemometer}$ είναι η διάμετρος του ανεμομέτρου εκφρασμένη σε km.

Στο δικό μας ανεμόμετρο η διάμετρος σε km είναι περίπου 0.0002. Αυτή τη σχέση θα αξιοποιήσουμε παρακάτω, όταν μιλήσουμε για τον κώδικα του μικροελεγκτή.

Επιστρέφοντας στην κατασκευή, η εκτύπωση 3D μας έδωσε τα 3 κύπελλα, μία βάση, καθώς και το κάλυμμα της βάσης, που λειτουργεί και ως στέλεχος για τα κύπελλα. Η ένωση των τριών γίνεται με χρήση βιδών πάχους 3mm και ο άξονας περιστροφής είναι ένα κομμάτι ντίζας πάχους 5mm. Όπως και με την περίπτωση του ανεμοδείκτη, στην βάση τοποθετείται ένα ρουλεμάν τύπου 608ZZ στην εσωτερική οπή του οποίου τοποθετείται ο άξονας περιστροφής. Και εδώ απαιτείται η εκτύπωση ενός αντίστοιχου με του ανεμοδείκτη κολάρου για να προσαρμοστεί ο άξονας περιστροφής στην οπή του ρουλεμάν.



Εικόνα 4.25: Βάση Ανεμόμετρου

Αφού προσαρμοστεί και ο άξονας περιστροφής στη βάση του οργάνου γίνεται και η τοποθέτηση του αισθητήρα Hall σε σημείο που η βάση σχηματίζει εσοχή, έτσι ώστε να μην εμποδίζει την περιστροφή των κυπέλλων. Τα καλώδια που χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία και μετάδοση σημάτων του αισθητήρα είναι μονόκλωνα 24 AWG, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις. Μετά την κόλληση, τα καλώδια μονώνονται με κατάλληλο θερμοσυστελλόμενο για αποφυγή βραχυκυκλώματος. Η βάση στο σημείο αυτό έχει τη μορφή της διπλανής Εικόνας 4.25.

Εντός του καλύμματος της βάσης τοποθετείται ο μαγνήτης σε οποιοδήποτε σημείο, φτάνει να είναι ικανός να πολώσει τον αισθητήρα Hall που βρίσκεται στην βάση του οργάνου. Έπειτα, αφού τα κύπελλα έχουν στερεωθεί επάνω στο στέλεχος, το στέλεχος στερεώνεται στον άξονα περιστροφής με την χρήση ενός παξιμαδιού αντίστοιχου πάχους με τον άξονα περιστροφής, ωστόσο σφίγγουμε τόσο ώστε τα κύπελλα να έχουν την ικανότητα ελεύθερης περιστροφής με τις πνοές ανέμου. Ένας εύκολος τρόπος να το δοκιμάσουμε αυτό είναι να φουσήξουμε στην κοιλότητα ενός από τα κύπελλα και να το διαπιστώσουμε.

Εν τέλει, η κατασκευή πρέπει να έχει την τελική μορφή της Εικόνας 4.26. Να σημειωθεί ότι τα καλώδια που εξέρχονται από το όργανο, καταλήγουν στο εσωτερικό ενός στεγανού κυτίου, όπως και του προηγούμενου οργάνου, όπου συνδέονται στο πλακετίδιο για οπτική απεικόνιση της κατάστασης του αισθητήρα. Από το κυτίο κι έπειτα, χρησιμοποιείται UTP καλώδιο τηλεφωνίας που καταλήγει στην κεντρική πλακέτα που θα σχεδιαστεί για το σύστημα.



Εικόνα 4.26: Υλοποιημένο Ανεμόμετρο

4.4.2.3 Υλοποίηση Βροχόμετρου με χρήση αισθητήρα Hall Effect

Αναφορικά με την μέτρηση υετού, δηλαδή βροχής, χαλαζιού και χιονιού υπάρχουν 2 βασικές υλοποιήσεις βροχόμετρου, οι οποίες μπορούν σχετικά εύκολα να μετατραπούν από απλό όργανο οπτικής παρατήρησης σε καταγραφικό. Εμείς επιλέγουμε να υλοποιήσουμε ένα βροχόμετρο με ανατρεπόμενα δοχεία, για τον λόγο ότι δεν απαιτεί την επαναφορά σε αρχική κατάσταση, μια και η ίδια η βαρύτητα αναλαμβάνει και αδειάζει τα δοχεία όταν γεμίζουν εναλλάξ.

Η χρήση του ψηφιακού αισθητήρα Hall στο συγκεκριμένο όργανο γίνεται με σκοπό την καταμέτρηση αριθμού ανατροπής των δοχείων. Βάσει σχεδιασμού, τα δοχεία βρίσκονται σε έναν άξονα που κινείται στερεωμένος από ένα σημείο, όπως μία τραμπάλα. Ο αισθητήρας θα ενεργοποιείται μόνο όταν το ένα εκ των δύο δοχείων γεμίζει, ενώ όταν γεμίζει το άλλο θα είναι απενεργοποιημένος. Έτσι, μέσω κατάλληλης μεθόδου στο πρόγραμμα του μικροελεγκτή, θα υπολογίζεται η ποσότητα νερού που έχει πέσει σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Αναφορικά με την κατασκευή του οργάνου, ξεκινήσαμε και πάλι αναζήτηση για την εύρεση ενός κατάλληλου μοντέλου βροχόμετρου με ανατρεπόμενα δοχεία. Το συγκεκριμένο εκτυπώθηκε αυτούσιο όπως ήταν στο τρισδιάστατο σχέδιο και πάλι σε λευκό PLA για ομοιομορφία με τα υπόλοιπα όργανα. Η τελική εκτύπωση μας έδωσε 3 διακριτά μέρη: το χωνί συλλογής υετού, την τραμπάλα με τα δύο δοχεία και το σασί του οργάνου, το οποίο διέθετε τις κατάλληλες οπές, έτσι ώστε να στερεωθεί ο άξονας στον οποίο θα ισορροπεί η τραμπάλα.

Ο άξονας ισορροπίας της τραμπάλας υλοποιήθηκε και πάλι με χρήση ντίζας πάχους 4 mm, ενώ για την στερέωσή του σε σωστή θέση χρησιμοποιήθηκαν αρκετά παξιμάδια ίδιας διατομής. Στο υλοποιημένο μοντέλο της τραμπάλας, όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 4.27, υπάρχει στην μία από τις πλαϊνές πλευρές ακριβώς στη γωνία κορυφής, μία εσοχή, στην οποία τοποθετήθηκε και ασφαλίστηκε με χρήση σιλικονούχας θερμόκολλας ένας μικρός μαγνήτης, ικανός να πολώνει τον αισθητήρα.

Έπειτα, αφού τοποθετήθηκε ο μαγνήτης, έπρεπε να γίνει η τοποθέτηση και του αισθητήρα Hall, η θέση του οποίου έπρεπε να βρίσκεται σε τέτοιο σημείο στο σασί του οργάνου, έτσι ώστε να είναι ικανός να πολώσει τον αισθητήρα μόνο όταν το ένα εκ των δύο δοχείων γεμίζει από το χωνί συλλογής. Αυτή η θέση βρέθηκε μετά δοκιμών και ο αισθητήρας στερεώθηκε στο σημείο με χρήση της ίδιας θερμόκολλας που κολλήθηκε και ο μαγνήτης. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.27, η οποία δείχνει το σασί του

οργάνου σε αυτή τη φάση κατασκευής, ο αισθητήρας σε αυτή την περίπτωση μπορούσε να κολληθεί με το πλακετίδιο που χρησιμοποιείται ως οπτική αναφορά της κατάστασης πόλωσης.



Εικόνα 4.27: Σασί και δοχεία βροχόμετρου

Τα καλώδια που χρησιμοποιήθηκαν για την παροχή τροφοδοσίας αλλά και την μεταφορά των σημάτων από τον αισθητήρα στον μικροελεγκτή ήταν κι εδώ μονόκλιωνα 24 AWG, όμως επειδή απαιτείτο μεγάλο μήκος καλωδίου μέχρι το κουτί της πλακέτας, χρησιμοποιήθηκε στην συνέχεια καλώδιο UTP τηλεφωνίας, το οποίο ήταν φθηνότερο, υπήρχε αρκετή ποσότητα διαθέσιμη, ήταν επαρκές για τις ανάγκες του αισθητήρα και παρείχε μία παραπάνω προστασία μια και η θωράκιση του είναι καλύτερη από τους απλούς μονόκλιωνους αγωγούς.

Αφότου ολοκληρώθηκε η καλωδίωση, έπρεπε να γίνει η προμήθεια ενός μικρού φύλλου ακρυλικού γυαλιού (PMMA) ή κοινώς γνωστό ως plexiglass για την κάλυψη της άνω ανοιχτής πλευράς του σασί του οργάνου, αφήνοντας μόνο μία μικρή τρύπα στο κέντρο έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η παροχή νετού στα δοχεία, αλλά παράλληλα να μην υπάρχει άμεση επαφή τους με τα ηλεκτρονικά συστήματα της κατασκευής. Η στήριξη του PMMA πάνω στο σασί εξασφαλίζεται με ντίζες διατομής 4 mm που διαπερνούν το σασί του οργάνου κατακόρυφα ώστε να το στηρίζουν και στον σκελετό του συστήματος.

Τέλος, έπειτα και από την στήριξη του σασί πάνω στον σκελετό του συστήματος μέτρησης, έπρεπε να τοποθετηθεί από πάνω και το χωνί, το οποίο διαθέτε έτοιμες τρύπες για την στήριξή του. Ο τρόπος που τοποθετείται το χωνί είναι συγκεκριμένος, έτσι ώστε το κέντρο του να βρίσκεται πάνω από το σημείο που γεμίζουν τα δοχεία χωρίς να ξεφεύγουν έξω σταγονίδια βροχής. Για την στήριξη του στην κατασκευή χρησιμοποιήθηκαν ντίζες διατομής 4 mm και αντίστοιχα παξιμάδια. Η τελική μορφή του οργάνου είναι αυτή της Εικόνας 4.28.

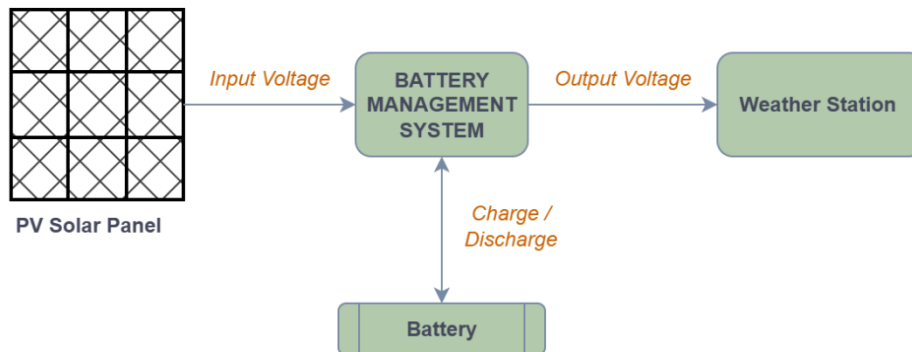


Εικόνα 4.28: Υλοποιημένο Βροχόμετρο

4.5 Τμήμα Ισχύος

Ως τμήμα ισχύος ορίζεται κάθε τμήμα ηλεκτρονικής διάταξης με στόχο την επεξεργασία, τον έλεγχο και την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για την λειτουργία του υπόλοιπου κυκλώματος. [11]

Η δική μας διάταξη δεν έχει υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις, ωστόσο επειδή επιθυμούμε να είναι αυτόνομο σύστημα, εισάγονται ορισμένοι περιορισμοί και χαρακτηριστικά, όπως και σε κάθε IoT εφαρμογή. Το σχήμα της Εικόνας 4.29 περιλαμβάνει τα στοιχεία που απαρτίζουν το τμήμα ισχύος της εφαρμογής.



Εικόνα 4.29: Δομικό διάγραμμα τμήματος ισχύος συστήματος

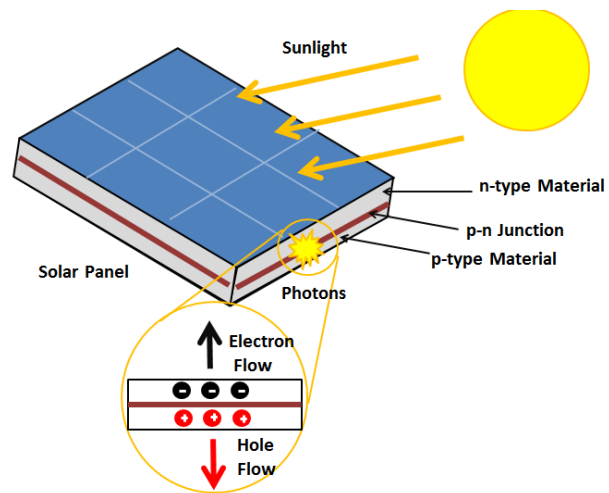
Αρχικά, εφ' όσον το σύστημα τοποθετείται για μετρήσεις στο πεδίο και συγκεκριμένα σε σημεία που ενδέχεται να μην υπάρχει σταθερή παροχή ρεύματος μέσω του ηλεκτρικού δικτύου, απαιτείται η χρήση κάποιας διάταξης μετατροπής ενέργειας βασισμένη σε κάποια ανανεώσιμη πηγή, όπως ο ήλιος, ο άνεμος ή το νερό. Στις περισσότερες υλοποιήσεις αυτόνομων συστημάτων χρησιμοποιείται ο ήλιος, διότι είναι μία αστέρευτη πηγή ενέργειας και με τις σύγχρονες λύσεις αρκετά αποδοτική. Περισσότερα για τους ηλιακούς συλλέκτες (φωτοβολταϊκά πάνελ / PV panel), τους τύπους και τον τρόπο επιλογής θα δούμε στην υποενότητα 4.5.1 παρακάτω.

Επιπλέον, κάθε αυτόνομο σύστημα που αξιοποιεί κάποια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας θα πρέπει να φροντίζει και για την αποθήκευσή της, καθότι ενδέχεται οι συνθήκες να μην είναι πάντα ευνοϊκές και να μην υπάρχει πλεόνασμα ενέργειας. Επομένως, απαιτείται η τοποθέτηση συσσωρευτών ενέργειας (μπαταριών) στο σύστημα, ειδικά εφ' όσον στην εφαρμογή μας επιλέγεται η χρήση PV πάνελ. Περισσότερα σχετικά με την επιλογή μπαταριών θα αναφέρουμε στην υποενότητα 4.5.2 παρακάτω.

Τέλος, όπως αναφέρεται και στην [11], κάθε διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος είναι στην ουσία ένας μετατροπέας ηλεκτρικής ενέργειας καθοριζόμενος από την τάση εισόδου και την τάση εξόδου, οι οποίες ενδέχεται να έχουν διαφορετικές μορφές (συνεχής ή εναλλασσόμενη), διαφορετικό πλάτος ή ακόμη και διαφορετικές συχνότητες σημάτων. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του ήλιου, ειδικά εφ' όσον υπάρχει στο κύκλωμα και μπαταρία, η οποία πρέπει να φορτίζεται και να αποφορτίζεται, καθώς και να επιλέγεται πάντα η βέλτιστη πηγή ενέργειας (ήλιος ή μπαταρία) με τελικό στόχο το ηλεκτρονικό κύκλωμα του συστήματος να διαρρέεται από ρεύμα χωρίς να υπάρχουν διακοπές ή αναπάντεχες υπερτάσεις που ενδέχεται να καταστρέψουν τα στοιχεία του. Αυτού του τύπου οι διατάξεις ονομάζονται Διαχειριστές Ηλιακής Ενέργειας (Solar Power Manager / SPM) και περισσότερα γι' αυτές θα αναφέρουμε στην υποενότητα 4.5.3 παρακάτω.

4.5.1 Επιλογή φωτοβολταϊκού πάνελ βάσει των ενεργειακών αναγκών

Τα PV πάνελ αποτελούν διάταξη πληθώρας φωτοβολταϊκών κυψελών (PV cells) σε μία σειρά. Οι κυψέλες αυτές είναι ημιαγωγοί πυριτίου, ικανοί να απορροφούν φωτόνια από την ηλιακή ακτινοβολία και να παράγουν ηλεκτρική τάση. Η άνω προσπίπτουσα επιφάνεια του PV στοιχείου είναι από p υλικό, η κάτω επιφάνεια από n υλικό και με την τάση των ηλεκτρονίων να επιφέρουν ισορροπία στο υλικό του ημιαγωγού δημιουργείται κίνηση και κατά συνέπεια ηλεκτρικό ρεύμα, όπως και με τα υπόλοιπα στοιχεία ημιαγωγών. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή στη φυσική ως «Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο» και η θεωρητική του εξήγηση δόθηκε από τον Albert Einstein έπειτα από παρατηρήσεις του Edmond Becquerel. Μία απλή οπτική απεικόνιση του φαινομένου είναι αυτή της Εικόνας 4.30.



Εικόνα 4.30: Απλουστευμένη οπτική απεικόνιση φωτοβολταϊκού φαινομένου [89]

Τα PV πάνελ χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με την φύση του πυριτίου που χρησιμοποιείται στους ημιαγωγούς, ανάλογα με την τεχνολογία προσπίπτουσας ακτινοβολίας και ανάλογα με τις χρήσεις σε οικιακές εφαρμογές ή στην βιομηχανία. Οι συνηθέστεροι τύποι που χρησιμοποιούνται σε απλές IoT εφαρμογές όπως αυτή που σχεδιάζουμε είναι οι παρακάτω, οι οποίοι διακρίνονται και στην Εικόνα 4.31 της επόμενης σελίδας:

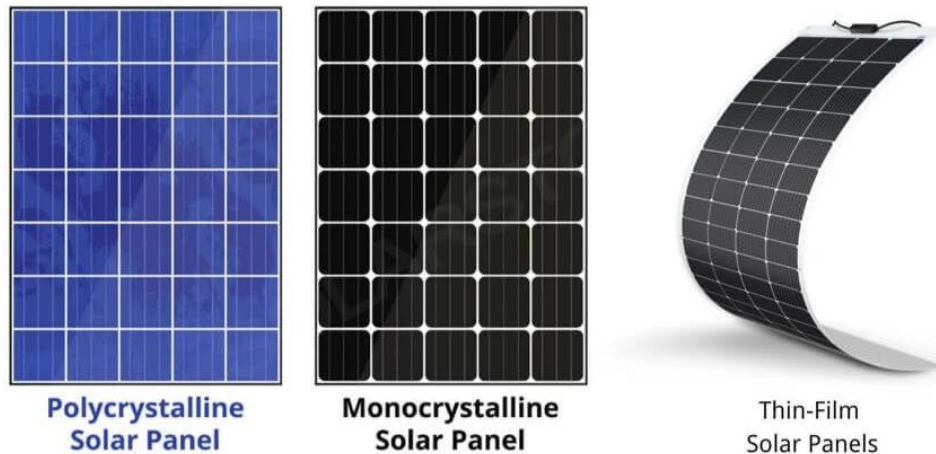
Μονοκρυσταλλικά Πάνελ (Si): Πρόκειται για ηλιακούς συλλέκτες που είναι κατασκευασμένοι από ένα και μόνο κρύσταλλο πυριτίου, γεγονός που τους προσδίδει μεγάλη απόδοση. Τα πάνελ δημιουργούνται από μία μονοκρυσταλλική ράβδο που λέγεται πλίνθος και στην συνέχεια τεμαχίζεται σε λεπτές φλούδες, τις γκοφρέλες. Διακρίνονται από τις κομμένες γωνίες των κυψελών και την ομοιόμορφη σκούρα μαύρη επιφάνεια. Η διάρκεια ζωής τους ξεπερνά τα 25 χρόνια, διατηρώντας ίδια την απόδοση στην πάροδο αυτού του διαστήματος, η οποία είναι της τάξης του 24.4% [90]. Ωστόσο, έχουν το υψηλότερο κόστος παραγωγής και η περιβαλλοντική επιβάρυνση κατά την κατασκευή τους είναι σημαντική.

Πολυκρυσταλλικά Πάνελ (pSi): Πρόκειται για μία από τις πιο διαδεδομένες και οικονομικές τεχνολογίες του τομέα. Η κατασκευή τους γίνεται από πολλούς μικρούς κρυστάλλους πυριτίου που συγχωνεύονται σε ένα ενιαίο φύλλο (μπλοκ), το οποίο στην συνέχεια κόβεται σε λεπτές πλάκες, τις λεγόμενες wafers. Με την συγκεκριμένη μέθοδο, το κόστος παραγωγής είναι χαμηλότερο από τα απλά Si πάνελ, και η ενεργειακή απόδοσή τους παραμένει ικανοποιητική, αγγίζοντας περίπου το 19% [90]. Η επιφάνειά τους έχει μία χαρακτηριστική μπλε απόχρωση και δεν είναι τόσο ομοιόμορφη όσο αυτή των Si. Έχουν μέση διάρκεια ζωής γύρω στα 20 χρόνια, ωστόσο η ευαισθησία τους στη θερμότητα τα κάνει μη παραγωγικά για χρήση σε θερμά κλίματα.

Λεπτά Ηλιακά Υμένια (Thin Film Solar Cells / TFSC): Τεχνολογία που χαρακτηρίζεται από την χρήση εξαιρετικά λεπτών στρωμάτων φωτοευαίσθητων υλικών για μετατροπή του ηλιακού φωτός σε ηλιακή ενέργεια. Το πάχος των TFSC είναι μόνο μερικά μm, επομένως είναι ελαφριά και ευέλικτα. Στον πυρήνα τους χρησιμοποιούν άμορφο πυρίτιο (aSi), κάδμιο – τελλούριο (CdTe) και οργανικά

υλικά. Η διαδικασία κατασκευής τους είναι λιγότερο ενεργοβόρα, γεγονός που ωστόσο δεν την κάνει φθηνότερη ούτε καν από τα Si πάνελ. Επιπλέον, η απόδοσή τους είναι η χειρότερη από όλες τις κατηγορίες, ενώ υπάρχουν περιβαλλοντικές ανησυχίες σχετικά με την διαβρωσιμότητά τους, καθώς κατασκευάζονται από ορισμένα τοξικά στοιχεία, όπως είναι το κάδμιο.

Στον παρακάτω Πίνακα 4.7 πραγματοποιείται μία σύγκριση των χαρακτηριστικών των πάνελ και των τριών κατηγοριών:



Εικόνα 4.31: Κύριοι τύποι PV πάνελ

Πίνακας 4.7: Σύγκριση Χαρακτηριστικών τύπων PV πάνελ [90]

Χαρακτηριστικό	<i>Si</i>	<i>pSi</i>	<i>TFSC</i>
Υλικό κατασκευής	Καθαρός κρύσταλλος πυριτίου	Κρυσταλλίδια πυριτίου ενωμένα μεταξύ τους	Διάφορα (ορισμένα τοξικά)
Μέση Απόδοση	24.4%	19.9%	18.9%
Κόστος	Ενδιάμεσο	Φθηνότερο	Ακριβότερο
Διάρκεια Ζωής	25 έτη	20 έτη	10 έτη
Περιβαλλοντικό Αποτύπωμα Κατασκευής	38.1 CO ₂ -eq / kWh	27.2 CO ₂ -eq / kWh	21.4 CO ₂ -eq / kWh

Στην δική μας περίπτωση επιλέγουμε την χρήση ενός μονοκρυσταλλικού πάνελ, ωστόσο πρέπει να υπολογίσουμε την απαιτούμενη ισχύ για την ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών του συστήματος. Η ισχύς προκύπτει ως το γινόμενο της σταθερής τάσης λειτουργίας του κυκλώματος με την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, όπως διαβάζουμε στην πηγή [11]. Επομένως η σχέση που συνδέει ισχύ, τάση τροφοδοσίας και ένταση ρεύματος είναι η ακόλουθη 4.14:

$$P = V_{CC} * I \quad (4.14)$$

όπου P είναι η ισχύς, V_{CC} είναι η τάση τροφοδοσίας του κυκλώματος και I είναι η ένταση του ρεύματος όταν το κύκλωμα είναι σε πλήρη λειτουργία.

Στην δοκιμαστική λειτουργία του κυκλώματος, αφότου είχε γίνει και προγραμματισμός του μικροελεγκτή έτσι ώστε να έχουμε την μέγιστη δυνατή κατανάλωση ενέργειας, τροφοδοτήθηκε το κύκλωμα με μονοπολική τροφοδοσία +5V, κι έπειτα έγινε χρήση ενός αμπερομέτρου για να υπολογιστεί η ένταση του ρεύματος που καταναλώνει το κύκλωμα σε πλήρη λειτουργία. Βάσει της παραπάνω

σχέσης 4.14 και της μέτρησης που λάβαμε από το αμπερόμετρο, η μέγιστη ισχύς που απαιτεί το κύκλωμα είναι:

$$(4.14) \rightarrow P_{max} = 5V * 100 mA = 500 mW$$

Συνεπώς, το μονοκρυσταλλικό PV πάνελ που επιλέξαμε θα πρέπει να έχει τιμή μεγαλύτερη από 500 mW κατά περίπου 4 φορές για να ικανοποιεί τις απαιτήσεις, βάσει του βαθμού απόδοσης κι έπειτα η επιλογή του εξαρτάται και από το μέγεθος της μπαταρίας που θα χρησιμοποιήσουμε, επομένως η επιλογή θα ξεκαθαριστεί μετά την υποενότητα 4.5.2.

4.5.2 Επιλογή τύπου και μεγέθους μπαταρίας

Οι μπαταρίες είναι συσκευές συσσώρευσης ενέργειας που βασίζονται σε ηλεκτροχημικές αντιδράσεις στοιχείων έτσι ώστε να λειτουργούν ως πηγές σταθερής τάσης, ικανές να τροφοδοτήσουν ένα οποιοδήποτε κύκλωμα. Διαθέτουν δύο ηλεκτρόδια, την άνοδο και την κάθοδο, τα οποία βυθίζονται σε κάποιο διάλυμα ηλεκτρολύτη.

Με την πάροδο των ετών και την εξελικτική πορεία της τεχνολογίας και των επιστημών, οι ενεργειακές απαιτήσεις αυξήθηκαν, ενώ παράλληλα μελέτες που έγιναν για την διαπίστωση των χημικών αντιδράσεων των μπαταριών άλλαξαν τα δεδομένα στον κλάδο κατασκευής τους.

Στην εποχή μας, οι μπαταρίες βρίσκονται σε μεγάλη πληθώρα στην αγορά με διαφορές σε μέγεθος, ενεργειακή χωρητικότητα, τάση τροφοδοσίας καθώς και πεδία εφαρμογής για κάθε τύπο. Συγκεκριμένα, μιας και οι IoT εφαρμογές καλύπτουν ένα τεράστιο φάσμα ενεργειακών απαιτήσεων και πεδίων, η γκάμα επιλογών σε μπαταρίες που χρησιμοποιούνται σε αυτές είναι επίσης τεράστια.

Αρχικά, για την επιλογή του κατάλληλου τύπου μπαταρίας για το IoT σύστημα, χρειάζεται να λάβουμε υπόψιν τις εξής παραμέτρους:

- **Πεδίο Εφαρμογής:** λ.χ. έξυπνη γεωργία, έξυπνη πόλη, έξυπνο σπίτι, έξυπνες μετακινήσεις
- **Τεχνολογίες Επικοινωνίας:** λ.χ. Bluetooth, LoRaWAN, Wi-Fi, Cellular Networks

Κάθε μία από τις 2 παραπάνω παραμέτρους, συσχετίζεται επίσης με υποπαραμέτρους σχετικά με την επιλογή των μπαταριών. Για το πεδίο εφαρμογής, οι υποπαραμέτροι είναι οι εξής:

- **Ενεργειακή Πυκνότητα:** Είναι ο λόγος της αποθηκευμένης ενέργειας μέσα σε ένα χώρο πεπερασμένων διαστάσεων
- **Εύρος Θερμοκρασίας Λειτουργίας:** Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες που επικρατούν στο σημείο που τοποθετείται το σύστημα
- **Μακροζωία:** Χρονικό διάστημα ικανής λειτουργίας των μπαταριών
- **Ενδεικνύομενη Τάση Μπαταριών**
- **Ασφάλεια**
- **Κόστος**
- **Ενεργειακή Απόδοση:** Είναι ο λόγος της ισχύος που προσφέρει η μπαταρία προς την ισχύ που απαιτείται για την φόρτισή της

Συσχετίζοντας τις παραπάνω παραμέτρους καταλήγουμε στα στοιχεία του Πίνακα 4.8 που αφορά τις ενεργειακές απαιτήσεις συστημάτων από διάφορα πεδία εφαρμογής IoT συστημάτων με τις αντίστοιχες υποπαραμέτρους που αναφέραμε.

Πίνακας 4.8: Ενεργειακές Απαιτήσεις συστημάτων IoT διαφορετικών πεδίων εφαρμογής [91]

	Ενεργειακή Πυκνότητα	Εύρος Θερμοκρασίας Λειτουργίας	Μακροζωία	Ασφάλεια	Κόστος	Απόδοση
Έξυπνη Πόλη	Σημαντική	Χαμηλό	Σημαντική	Ενδιάμεση	Σοβαρό	Σημαντική
Έξυπνο Σπίτι	Σημαντική	Ενδιάμεσο	Ενδιάμεση	Σοβαρή	Σοβαρό	Σημαντική
Έξυπνη Γεωργία	Χαμηλή	Χαμηλό	Σημαντική	Χαμηλή	Σοβαρό	Σημαντική
Έξυπνη Βιομηχανία	Ενδιάμεση	Χαμηλό	Σημαντική	Χαμηλή	Σοβαρό	Σημαντική
Έξυπνη Υγεία	Ενδιάμεση	Σημαντικό	Σημαντική	Σοβαρή	Σοβαρό	Σημαντική

Έπειτα, οι υποπαράμετροι σχετικά με τις τεχνολογίες επικοινωνίας είναι οι κάτωθι:

- **Ενεργειακή Κατανάλωση**
- **Απαιτούμενη Ενεργειακή Πυκνότητα**
- **Εύρος Λειτουργίας (απόσταση κόμβων)**
- **Αναμενόμενη Διάρκεια Ζωής Μπαταρίας**

Στον παρακάτω Πίνακα 4.9 γίνεται συσχέτιση των συνηθέστερων τεχνολογιών επικοινωνίας των συστημάτων IoT με τις προαναφερθείσες υποπαραμέτρους:

Πίνακας 4.9: Ενεργειακές Απαιτήσεις συστημάτων IoT ανάλογα με την τεχνολογία επικοινωνίας [91]

	Ενεργειακή Κατανάλωση	Απαιτούμενη Ενεργειακή Πυκνότητα	Εύρος Λειτουργίας	Αναμενόμενη Διάρκεια Ζωής Μπαταρίας
Bluetooth	Πολύ χαμηλή	Χαμηλή	Πολύ Μικρό	Μέση
LoRaWAN	Χαμηλή	Μέτρια	Μεγάλο	Μεγάλη
Cellular Network	Χαμηλή	Μέτρια	Μεγάλο	Μεγάλη
WiFi	Υψηλή	Υψηλή	Μικρό	Μικρή

Μετά την επισκόπηση των παραγόντων που καθορίζουν την επιλογή μπαταριών βάσει των ενεργειακών απαιτήσεων, θα κάνουμε μία επισκόπηση διαθεσιμότητας τύπων μπαταριών για τις διάφορες IoT εφαρμογές, καθώς και τα χαρακτηριστικά του καθενός απ' αυτούς τους τύπους. Οι μπαταρίες ανήκουν όλες στην κατηγορία των επαναφορτιζόμενων, διότι το σύστημα θέλουμε να είναι ενεργειακά αυτόνομο.

- **Μολύβδου – Οξέος (Lead – Acid):** Περιέχουν θειϊκό οξύ (H_2SO_4) και άνοδο / κάθοδο από μόλυβδο
- **Νικελίου – Μετάλλου Υδριδίου (Nickel – Metal Hydrid / NiMH):** Η κάθοδος είναι από υδροξύλιο του νικελίου ($Ni(OH)_2$), ενώ η άνοδος κατασκευάζεται από υδρίδια μετάλλων (εξού και το MH). Τα ηλεκτρόδια βρίσκονται εντός διαλύματος καυστικής ποτάσας (KOH).

- **Ιόντων Λιθίου (Li – Ion):** Η κάθοδος είναι από πρόσμειξη οξειδίου του λιθίου με κάποιο μεταλλικό στοιχείο, ενώ η άνοδος είναι από γραφίτη. Τα ηλεκτρόδια βρίσκονται εντός διαλύματος ηλεκτρολύτη, που περιλαμβάνει ιόντα λιθίου. Αποτελούν ολόκληρη κατηγορία μπαταριών, που περιλαμβάνει διάφορες μπαταρίες, ανάμεσά τους και τις Οξειδίου Λιθίου Κοβαλτίου (LCO), Οξειδίου Μαγγανίου Ιόντων Λιθίου (LMO) και Φωσφορικού Σιδήρου Λιθίου (LFP).
- **Στερεάς Κατάστασης (Solid State):** Ως στοιχείο καθόδου παραμένει το λίθιο, ωστόσο ο ηλεκτρολύτης έρχεται σε μορφή στερεού και όχι υγρού, με στόχο να είναι οι μπαταρίες λιθίου ασφαλέστερες από εκρήξεις.

Βάσει των βιβλιογραφικών αναφορών της πηγής [91], καταστρώνουμε τον Πίνακα 4.10, όπου βλέπουμε την βαθμολογία κάθε τύπου μπαταρίας (1 το ελάχιστο έως 5 μέγιστο) σε συσχέτιση με την κάθε προϋπόθεση από τις προαναφερθείσες παραμέτρους.

Πίνακας 4.10: Ενεργειακές Απαιτήσεις συστημάτων IoT διαφορετικών πεδίων εφαρμογής [91]

	Ενεργειακή Πυκνότητα	Εύρος Θερμοκρασίας Λειτουργίας	Μακροζωία	Ασφάλεια	Κόστος	Απόδοση
Μολύβδου Οξέος	2	2	4	2	3	2
NiMH	3	2	2	4	3	3
Li-Ion	4	3	5	3	3	5
Solid State	2	4	5	5	5	5



Εικόνα 4.32: Διάφοροι τύποι και μεγέθη μπαταριών [92]

Πάνω από αριστερά προς δεξιά: Ιόντων Λιθίου (Li-Ion), Νικελίου Καδμίου (Ni-Cd), Μολύβδου Οξέος
 Κάτω από αριστερά προς δεξιά: Αλκαλικές, Νικελίου Μετάλλου Υδριδίου (Ni-MH), Λιθίου

Συνεπώς, συμπεραίνουμε ότι η βέλτιστη επιλογή είναι αυτή των μπαταριών ιόντων λιθίου (Li-Ion), παραβλέποντας την υστέρησή τους σε θέματα ασφάλειας καθότι είναι γνωστές για την πρόκληση εκρήξεων και πυρκαγιών όταν υπερθερμανθούν, ωστόσο με την κατάλληλη προστασία τους μέσα σε προστατευτικό κυτίο μπορούν να λειτουργήσουν με ασφάλεια για τουλάχιστον 5 έτη μέχρι να καταστραφούν.

Τέλος, μένει να επιλέξουμε το κατάλληλο μέγεθος μπαταρίας για τις ενεργειακές απαιτήσεις της συσκευής μας. Το συνηθέστερο μέγεθος μπαταριών ιόντων λιθίου για χρήση σε ενσωματωμένα συστήματα είναι το 18650 και μας παρέχει μπαταρίες που κυμαίνονται μεταξύ 1500 mAh έως και 3500 mAh. Η κανονική τάση που παρέχει μία τέτοιου τύπου μπαταρία είναι +3.7V, ενώ πλήρως φορτισμένη αγγίζει τα +4.2V. Την μετατροπή αυτής της τάσης στα +5V αναλαμβάνει ο διαχειριστής (SPM) που θα δούμε στην επόμενη υποενότητα.

Αναφορικά με την διάρκεια ζωής της μπαταρίας, αν υποθέσουμε την χειρότερη περίπτωση για την εφαρμογή μας, ότι δηλαδή έχουμε συνεχές ρεύμα έντασης 100 mA που είχε μετρηθεί με την χρήση του αμπερόμετρου και χρησιμοποιήσουμε μία 18650 μπαταρία με χωρητικότητα 2600 mAh, τότε η σχέση που μας δείχνει τον χρόνο μέχρι την πλήρη αποφόρτιση της μπαταρίας είναι η 4.15 παρακάτω:

$$\text{Discharging Time} = \text{Battery Capacity} * \text{Battery Voltage} * \frac{0.9}{\text{Device Wattage}} \quad (4.15)$$

Άρα: $(4.15) \rightarrow \text{Discharging Time} = 2.6\text{Ah} * 3.7\text{V} * \frac{0.9}{0.5} = 17.316 \approx 17 \text{ ώρες}$

Αυτές οι 17 ώρες είναι επαρκές χρονικό διάστημα μεταξύ των διαδοχικών φορτίσεων της μπαταρίας από το PV πάνελ, έτσι ώστε η μπαταρία να μην καταλήξει ποτέ πλήρως αποφορτισμένη.

4.5.3 Διαχειριστής Ηλιακής Ενέργειας (Solar Power Manager)

Οι διαχειριστές ή ελεγκτές ηλιακής ενέργειας έχουν ως κύριο στόχο την διαχείριση ροής της ηλεκτρικής ενέργειας από τα PV πάνελ στις μπαταρίες καθώς και να εξασφαλίζουν τον ορθό τρόπο φόρτισης και αποφόρτισής τους. Ταυτοχρόνως, λειτουργούν ως δικλείδες ασφαλείας των μπαταριών και των πάνελ, προσφέροντας προστασία από υπερφόρτιση (overcharge), υπερβολική αποφόρτιση (overdischarge) ή αντιστροφή ρεύματος από τις μπαταρίες προς τα πάνελ κατά τη νύχτα (reverse current flow).

Ορισμένα σύγχρονα SPM προσφέρουν δικλείδες ασφαλείας και στην έξοδό τους προς το κύκλωμα, όπως προστασίες από βραχυκυκλώματα (short circuit protection) και υπερρένταση του ρεύματος (overcurrent protection). Επιπλέον, σε αρκετά σύγχρονα συστήματα υπάρχει η δυνατότητα αναγνώρισης του τύπου των μπαταριών που χρησιμοποιούνται, έτσι ώστε να προσαρμόζονται ανάλογα οι κύκλοι φόρτισης, η τάση και το ρεύμα φόρτισης χωρίς να ενδέχεται κίνδυνος καταστροφής τους.

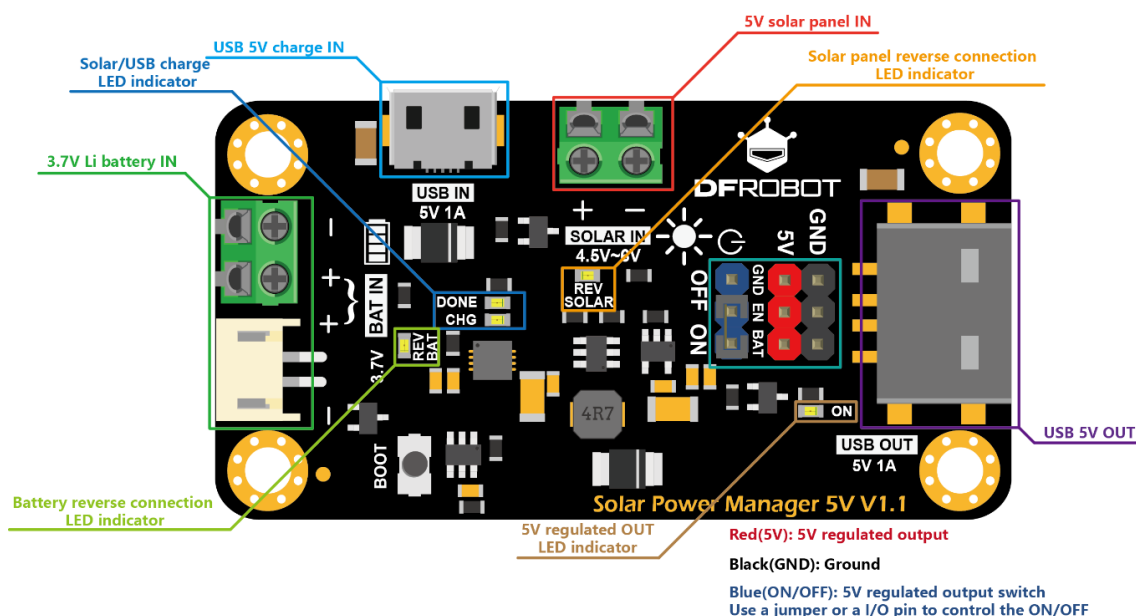
Οι SPM χωρίζονται σε 2 μεγάλες κατηγορίες, αναλόγως της λογικής λειτουργίας τους, στους PWM (Pulse Width Modulation) και τους MPPT (Maximum Power Point Tracking) διαχειριστές. Οι μεν πρώτοι είναι οικονομικότεροι και απλούστεροι στην λειτουργία, μειώνοντας σταδιακά την τάση φόρτισης των μπαταριών καθώς πλησιάζουν την πληρότητα. Η χρήση τους ενδείκνυται σε μικρότερων απαιτήσεων συστήματα όπου η απόδοση δεν είναι καθοριστικός παράγοντας. Οι δεύτεροι είναι ιδανικότεροι για μεγαλύτερα συστήματα καθώς εντοπίζουν το μέγιστο σημείο λειτουργίας των πάνελ και προσαρμόζουν τη φόρτιση έτσι ώστε να επιτυγχάνουν πάντα μέγιστη απόδοση, ενώ μπορούν να λειτουργήσουν με μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ πάνελ και μπαταριών, εξοικονομώντας περισσότερη ενέργεια. Ωστόσο, το κόστος προμήθειάς τους είναι μεγαλύτερο από τους PWM διαχειριστές [11]. Στον Πίνακα 4.11 παρακάτω συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του κάθε τύπου SPM:

Πίνακας 4.11: Χαρακτηριστικά των τύπων SPM

Χαρακτηριστικό	PWM	MPPT
Κόστος	Χαμηλότερο	Υψηλότερο
Απόδοση	75% ~ 80%	95% ~ 99%
Μέγεθος συστήματος	Κατάλληλο για μικρομεσαία συστήματα	Κατάλληλο για μεσαία και μεγάλα συστήματα
Λειτουργία με διαφορά τάσης (πάνελ – μπαταρίες)	Δεν προσφέρεται	Είναι δυνατή
Αξιοποίηση Ενέργειας	Χαμηλότερη, ειδικά σε χαμηλές θερμοκρασίες	Μέγιστη αξιοποίηση σε όλες τις συνθήκες
Θερμοκρασιακή Ευαισθησία	Λιγότερη επίδραση	Επωφελείται από χαμηλές θερμοκρασίες
Εφαρμογές	Απλές οικονομικές εγκαταστάσεις	Επαγγελματικές υψηλών απαιτήσεων

Η επιλογή του κατάλληλου SPM εξαρτάται από πληθώρα παραγόντων πέραν της λογικής λειτουργίας. Τέτοιοι παράγοντες περιλαμβάνουν την τάση λειτουργίας του συστήματος και των μπαταριών, με τα μικρότερα να ξεκινούν από τα 5V και να αγγίζουν μέχρι και τα 48V, το μέγιστο ρεύμα φόρτισης που προσφέρουν τα πάνελ, ξεκινώντας από μερικά mA και καταλήγοντας και σε ισχυρά συστήματα δεκάδων A, καθώς και από τις συνολικές ενεργειακές απαιτήσεις του συστήματος.

Στην δική μας εφαρμογή επιλέξαμε την ολοκληρωμένη λύση του DFR0559 module της εταιρείας DFROBOT, το οποίο είναι ένα SPM βασισμένο στο ολοκληρωμένο κύκλωμα φόρτισης μπαταριών Li-Ion CN3165 της Consonance Electronic. Το συγκεκριμένο module, όπως διαβάζουμε και στον ιστότοπο της εταιρείας [93], ανήκει στην κατηγορία των διαχειριστών MPPT. Στην Εικόνα 4.33 παρακάτω είναι το σχέδιο του module με αναφορά σε όλα τα στοιχεία που το απαρτίζουν. Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του module συνοψίζονται στον Πίνακα 4.12.



Εικόνα 4.33: To Solar Power Manager DFR0559 [93]

Πίνακας 4.12: Τεχνικά Χαρακτηριστικά του DFR0559

Solar Power Management IC	CN3165
Τάση Εισόδου Solar Panel	4.4V ~ 6V
Μέγιστο Ρεύμα Φόρτισης (από PV)	900mA
Τοπολογία	Linear Regulator
Υποστηριζόμενος Τύπος Μπαταρίας	3.7V Lithium Battery
MPPT	Fixed 5V
Προστασίες Μπαταρίας	Υπερφόρτιση / Υπερβολική Αποφόρτιση / Υπερένταση / Αντιστροφής ρεύματος
Προστασίες Εξόδου	Βραχυκύκλωση / Υπερένταση
Έξοδος USB	5V 1A (Always ON)
Σταθεροποιημένη Έξοδος	5V 1A Regulated

Βάσει των όσων διαβάζουμε στον παραπάνω πίνακα, το δικό μας PV panel που είναι 5V 1A μπορεί να υποστηριχθεί από το SPM, ενώ και η μπαταρία 18650 πληροί τις προϋποθέσεις.

Έπειτα, το ενδιαφέρον με το συγκεκριμένο SPM, και είναι και το χαρακτηριστικό που καθόρισε την τελική επιλογή μας, είναι η δυνατότητα απενεργοποίησης της σταθεροποιημένης εξόδου των 5V, η οποία φαίνεται και στην Εικόνα 4.33 παραπάνω. Είναι μία σειρά από 3 pins κόκκινου χρώματος, τα οποία χρησιμεύουν για την τροφοδοσία των αναλογικών και ψηφιακών αισθητήρων του κυκλώματος. Εμείς μπορούμε εύκολα να απενεργοποιήσουμε αυτά τα pins μέσω σήματος ελέγχου από τον μικροελεγκτή, έτσι ώστε όταν δεν απαιτείται να πραγματοποιηθεί μέτρηση, τα όργανα να μην τροφοδοτούνται και υπάρχει ενεργειακή σπατάλη. Αυτό γίνεται εύκολα με την σύνδεση του ενδιάμεσου pin της μπλε σειράς του SPM (που φέρει την σήμανση EN) σε κάποιο GPIO του μικροελεγκτή και στέλνοντας σήμα HIGH ώστε να ενεργοποιηθεί η 5V έξοδος, ενώ αντίστοιχα για την απενεργοποίηση της 5V εξόδου στέλνουμε αντίστοιχο σήμα LOW από τον μικροελεγκτή. Περισσότερα για την συγκεκριμένη λειτουργία θα δούμε στην υποενότητα επεξήγησης του κώδικα.

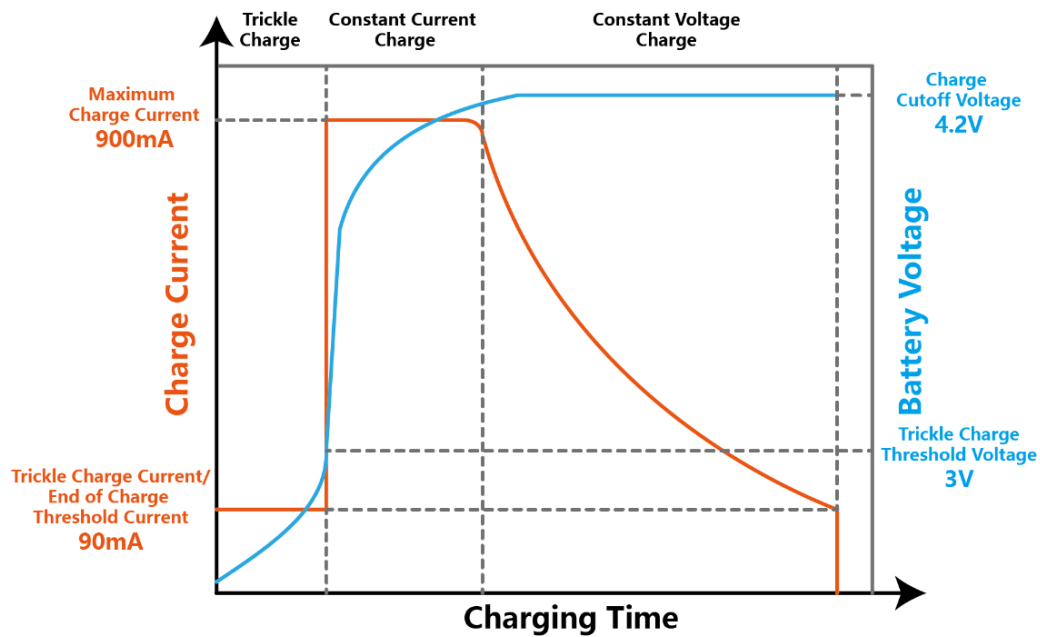
Τέλος, σχετικά με τον κύκλο φόρτισης της μπαταρίας ιόντων λιθίου, το φύλλο δεδομένων στον ιστότοπο του κατασκευαστή του συγκεκριμένου SPM δίνει το γράφημα της Εικόνας 4.34 παρακάτω, και ορίζει ότι υπάρχουν 3 διαφορετικά στάδια στην φόρτιση, με την μέθοδο MPPT:

Trickle charge: Επειδή η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας λιθίου είναι μεγάλη όταν η τάση στα άκρα της μπαταρίας είναι μικρή, είναι απαγορευτική η χρήση ρεύματος μεγάλης έντασης στην αρχή του κύκλου φόρτισης, διότι αυξάνεται γρήγορα η θερμοκρασία της μπαταρίας μειώνοντας την διάρκεια ζωής της. Έτσι, όταν η τάση στα άκρα της μπαταρίας είναι μικρότερη από το ελάχιστο κατώφλι των 3V, το module ξεκινά την διαδικασία trickle charge, φορτίζοντας την μπαταρία στο 10% του μέγιστου ρεύματος φόρτισης (μέχρι 90mA), μέχρι η τάση να αγγίξει τα 3V.

Constant current charge: Από τα 3V και πάνω, η φόρτιση γίνεται με σταθερό ρεύμα μέχρι 900mA.

Constant voltage charge: Όταν η τάση στα άκρα της μπαταρίας πλησιάζει το άνω κατώφλι των 4.2V, το module ξεκινάει την φόρτιση με σταθερή τάση. Όσο γίνεται αυτό, το ρεύμα φόρτισης φθίνει. Όταν η τιμή του ρεύματος αυτού φτάσει το 10% του μέγιστου ρεύματος φόρτισης, η φόρτιση σταματάει.

Στην ιστοσελίδα του module τονίζεται ότι σε περίπτωση που η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη και το module ανιχνεύει τάση στην είσοδο από το PV panel, μόλις η τάση της μπαταρίας πέσει κάτω από το κατώφλι των 4.05V, ξεκινάει αυτομάτως ένας νέος κύκλος φόρτισης.



Εικόνα 4.34: Κύκλος φόρτισης μπαταρίας λιθίου από το DFR0559 [93]

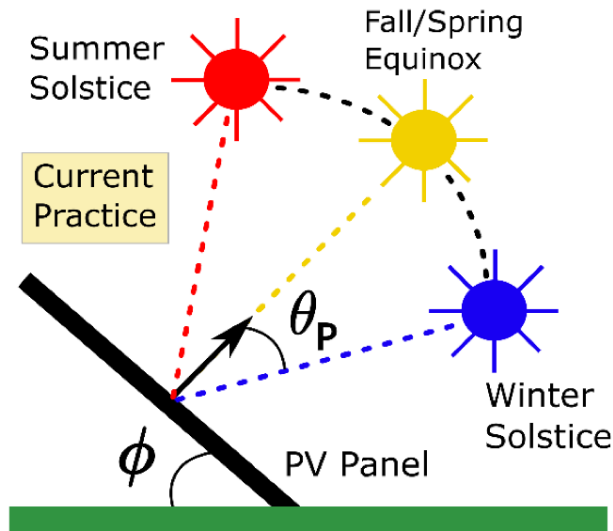
4.5.4 Τοποθέτηση στοιχείων ισχύος στην κατασκευή

Αφού ολοκληρώσαμε την ανάλυση σχετικά με τις επιλογές για το τμήμα ισχύος του συστήματος, τώρα μένει να αναλύσουμε τις θέσεις και τον τρόπο τοποθέτησής τους στο σύστημα.

Αρχικά, σχετικά με την τοποθέτηση των PV πάνελ, οι γενικές οδηγίες που ισχύουν έχουν να κάνουν με την γεωγραφική θέση που βρίσκονται. Ως γενικός κανόνας σχετικά με τα ημισφαίρια είναι ότι τα πάνελ που βρίσκονται στο βόρειο ημισφαίριο τοποθετούνται με προσανατολισμό προς τον Νότο, ενώ αντίστοιχα τα πάνελ στο νότιο ημισφαίριο τοποθετούνται με προσανατολισμό προς τον Βορρά. Ειδικότερα, για την περίπτωση της Ελλάδας, τα ηλιακά πάνελ τοποθετούνται με προσανατολισμό προς τον Νότο ή με μικρές αποκλίσεις όταν αυτό δεν είναι εφικτό, είτε προς Νοτιοανατολικά, είτε προς Νοτιοδυτικά. Αυτό εξασφαλίζει την μέγιστη έκθεση στον ήλιο καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας, έτσι ώστε η παραγωγή ενέργειας από τα πάνελ να είναι η μέγιστη δυνατή.

Σχετικά με την γωνία κλίσης που εμφανίζουν τα πάνελ σε σχέση με το έδαφος, είναι ένα μεταβλητό μέγεθος που καθορίζεται αναλόγως. Στην περίπτωση των σταθερών εγκαταστάσεων, δηλαδή εκεί που δεν είναι εφικτή η αλλαγή προσανατολισμού του πάνελ, επιλέγεται μία γωνία κλίσης περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής τοποθέτησης (δηλαδή $30^\circ \sim 35^\circ$ για την χώρα μας). Αντίθετα, στην περίπτωση που τα πάνελ ρυθμίζονται εποχιακά, επιλέγουμε για τον χειμώνα μεγαλύτερη γωνία κλίσης (περίπου $+15^\circ$ από το γεωγραφικό πλάτος), ενώ το καλοκαίρι μικρότερη γωνία κλίσης (-10° από το γεωγραφικό πλάτος).

Στην Εικόνα 4.35 της επόμενης σελίδας μπορούμε να δούμε τον λόγο που υπάρχει αυτή η αλλαγή στις γωνίες, διότι υπάρχει η αλλαγή στην καμπύλη που σχηματίζει ο ήλιος στην διάρκεια της ημέρας ανάλογα με την εποχή. Με μπλε συμβολίζεται η θέση του ήλιου κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο, ενώ με κόκκινο η θέση του ήλιου κατά το θερινό ηλιοστάσιο. Η θέση που σημαίνεται με κίτρινο ανάμεσα στις άλλες δύο θέσεις, είναι η θέση του ήλιου κατά την εαρινή και φθινοπωρινή ισημερία και θεωρείται η στατιστική μέση τροχιά που εν τέλει καθορίζει και τη γωνία κλίσης του πάνελ.



Εικόνα 4.35: Κλίση ηλιακού πάνελ και ηλιακή θέση [94]

Έπειτα, υπάρχουν 3 ακόμη επισημάνσεις που έχουν να κάνουν με την ορθή τοποθέτηση των PV πάνελ και αφορούν:

- **Τοποθεσία:** Όσο γίνεται σε πιο ανοικτούς χώρους, έτσι ώστε να μην σκιάζονται από δέντρα, κτίρια ή άλλα εμπόδια. Όσο πιο ορεινές οι περιοχές, τόσο χαμηλότερη είναι η ατμοσφαιρική υγρασία. Προτείνεται τοποθέτηση σε στέγες, ταράτσες ή επίγεια.
- **Περιβαλλοντικοί Παράγοντες:** Καλύτερη λειτουργία σε χαμηλές θερμοκρασίες, καθώς οι μεγάλες θερμοκρασίες μειώνουν την απόδοση, ενώ για περιοχές με ισχυρή αιολική δραστηριότητα μεριμνούμε για την σωστή στερέωσή τους.
- **Καθαριότητα:** Ατμοσφαιρική σκόνη, γύρη και αλάτι που κάθεται πάνω στην επιφάνεια του πάνελ μειώνει την απόδοσή του εάν δεν καθαρίζεται.

Εφαρμόζοντας τα παραπάνω, το σύστημα θα πρέπει να τοποθετηθεί σε έδαφος με ανοικτό περιβάλλον, ενώ το PV πάνελ θα πρέπει να στερεωθεί με προσανατολισμό προς Νότο. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.36 παρακάτω, η οποία μας δείχνει την νότια άποψη της υλοποιημένης κατασκευής, το πάνελ τοποθετείται σε ψηλό σημείο της κατασκευής με κατεύθυνση προς Νότο, ενώ για την στερέωσή του στον σκελετό αλουμινίου χρησιμοποιούνται αυτοδιάτρητες βίδες.

Οι μπαταρίες και ο SPM τοποθετούνται σε ειδικό μονωμένο κytίο που βρίσκεται κοντά στην βάση της κατασκευής, μαζί με τη σχεδιασμένη για το σύστημα πλακέτα που περιλαμβάνει όλα τα αναλογικά ηλεκτρονικά στοιχεία του κυκλώματος, καθώς και τον μικροελεγκτή. Το κytίο αυτό φροντίζουμε να είναι από υλικό που δεν ανεβάζει υψηλές θερμοκρασίες λόγω της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.



Εικόνα 4.36: Τοποθέτηση PV πάνελ στην κατασκευή με φορά προς Νότο

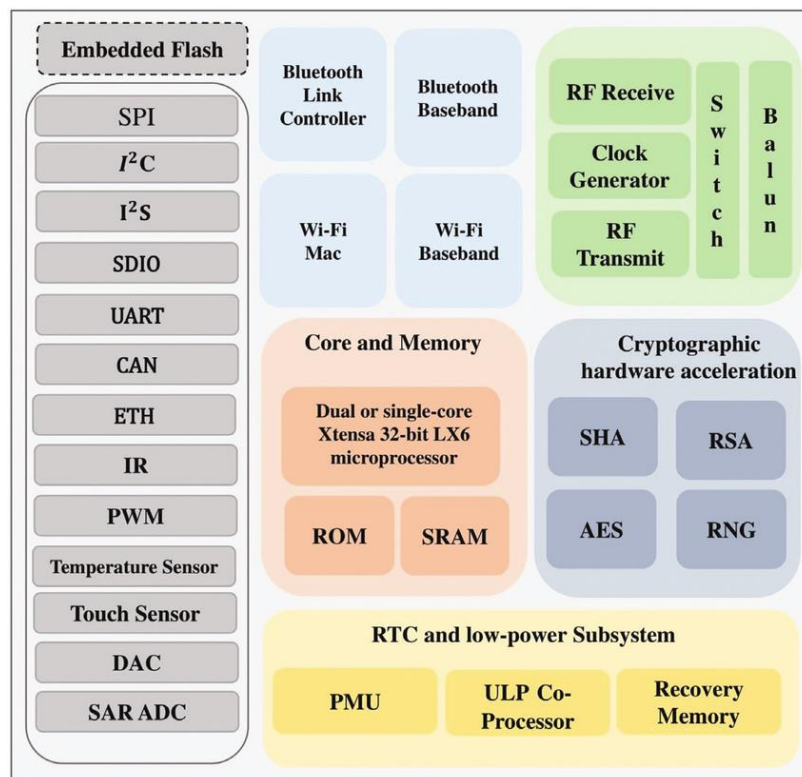
4.6 Ο Μικροελεγκτής ESP32 ως καρδιά του συστήματος

Οι μικροελεγκτές είναι στοιχεία που χρησιμοποιούνται ως βάση σε όλα τα ενσωματωμένα συστήματα, όπως αναφέραμε και στο 3^ο κεφάλαιο. Αυτό συμβαίνει διότι στις εφαρμογές ενσωματωμένων, πρώτος παράγοντας που μας απασχολεί είναι το χαμηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας, παρά η υπολογιστική ισχύ.

Στην δική μας υλοποίηση ως κέντρο του συστήματος μετρήσεων χρησιμοποιείται ένας μικροελεγκτής τύπου ESP32. Αυτός ο μικροελεγκτής αποτελεί υλοποίηση της Espressif Systems και είναι μετεξέλιξη του ESP8266. Οι περισσότερες σύγχρονες IoT εφαρμογές τον αξιοποιούν ως βάση του συστήματός τους για λόγους που θα αναφέρουμε παρακάτω.

4.6.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά του ESP32

Στην παρακάτω Εικόνα 4.37 βλέπουμε το διάγραμμα λειτουργιών του συγκεκριμένου μικροελεγκτή.



Εικόνα 4.37: Διάγραμμα Λειτουργιών μικροελεγκτή ESP32 [95]

CPU και μνήμη: Ο μικροελεγκτής διαθέτει έναν διπύρρηνο επεξεργαστή Xtensa 32bit με αρχιτεκτονική RISC, υλοποιημένο από την εταιρεία Cadence. Η ταχύτητα ρολογιού του επεξεργαστή είναι προσαρμοζόμενη με εύρος από 160 έως 240 MHz. Οι δύο πυρήνες λειτουργούν ως διαφορετικοί επεξεργαστές και διαθέτουν ξεχωριστές ονομασίες, ο μεν πρώτος ως «PRO_CPU» και διατίθεται για τα διάφορα πρωτόκολλα επικοινωνίας, ενώ ο δεύτερος ως «APP_CPU» και χρησιμοποιείται για τις εφαρμογές.

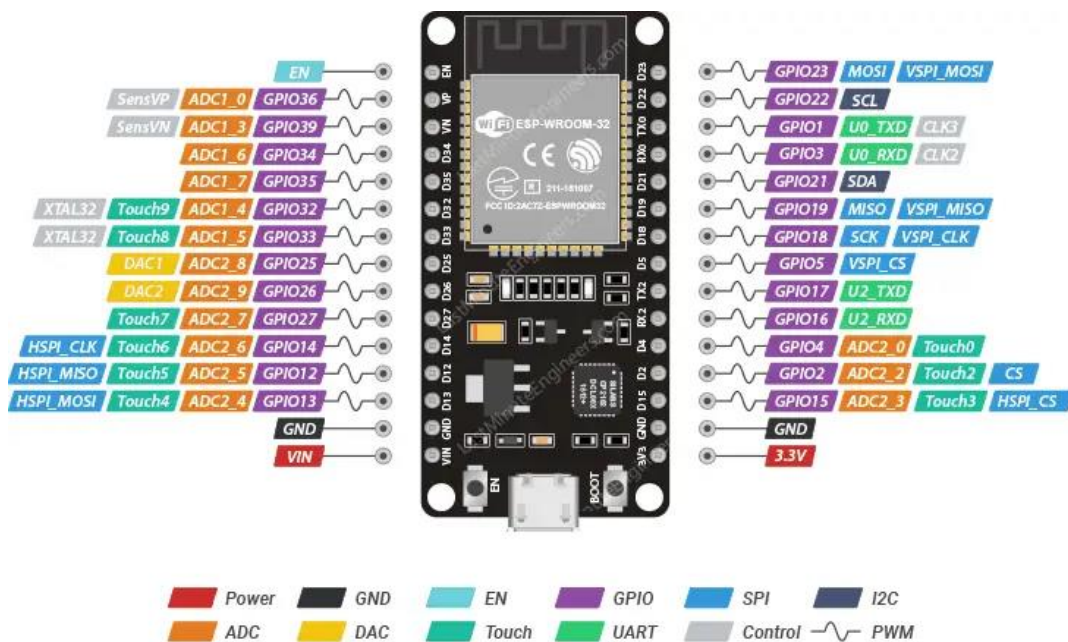
Με την ενσωμάτωση δύο επεξεργαστών στο σύστημα δίνεται η δυνατότητα στον μικροελεγκτή να εκτελεί παράλληλα σύνθετες εργασίες, ενώ προσφέρει μεγαλύτερες ταχύτητες και στην επεξεργασία δεδομένων. Επιπλέον δίνεται στους προγραμματιστές του συστήματος μεγαλύτερη δυνατότητα να αξιοποιούν τον κάθε επεξεργαστή για συγκεκριμένες διεργασίες, εάν αυτό κριθεί απαραίτητο κατά τον σχεδιασμό των εφαρμογών τους.

Αναφορικά με την μνήμη, ο ESP32 διαθέτει εσωτερική μνήμη (on – chip) και εξωτερική μνήμη (on – board). Η στατική RAM (SRAM) και η ROM που φαίνονται ως blocks στην παραπάνω Εικόνα 4.37 έχουν προκαθορισμένη λειτουργία: 448 kB ROM χρησιμοποιούνται για την εκκίνηση και τις βασικές λειτουργίες, ενώ 520 kB SRAM χρησιμοποιούνται για δεδομένα και οδηγίες.

Είσοδοι / Έξοδοι (I/O): Το ολοκληρωμένο κύκλωμα του ESP32 διαθέτει συνήθως 48 ακίδες. Ωστόσο, ανάλογα της υλοποίησης του development board διατίθεται κάθε φορά διαφορετικός αριθμός ακίδων στον σχεδιαστή του συστήματος. Στην δική μας εργασία χρησιμοποιούμε development board τύπου WROOM32 που διαθέτει 30 ακίδες. Οι ακίδες αυτές χρησιμοποιούνται ως εξής:

- 15 κανάλια μετατροπής Αναλογικού σε Ψηφιακό (ADC)
- Διεπαφές SPI (9 ακίδες)
- 2 Διεπαφές UART (4 ακίδες)
- Διεπαφή I²C (2 ακίδες)
- 25 κανάλια εξόδου PWM
- 2 κανάλια μετατροπής Ψηφιακού σε Αναλογικό (DAC)
- 9 GPIO Touch για ανίχνευση χωρητικότητας

Τα παραπάνω δεδομένα προκύπτουν από την παρακάτω Εικόνα 4.38, όπου έχουμε την απεικόνιση και επεξήγηση λειτουργιών όλων των ακίδων, όπως δίνεται από τον κατασκευαστή.



Εικόνα 4.38: Επεξήγηση Λειτουργίας Ακίδων του ESP32 [96]

Να αναφέρουμε ότι από πλευράς τάσεων, όλα τα pins του ESP32 έχουν ανοχή για τάσεις έως και 3.3V, εν αντιθέσει με τους μικροελεγκτές της οικογένειας Arduino που έχουν ανοχή μέχρι 5V. Το μόνο pin στη συγκεκριμένη υλοποίηση που μπορεί να δεχτεί μεγαλύτερη τάση από 3.3V είναι το VIN, καθώς και η θύρα USB που τροφοδοτείται επίσης με 5V.

Μέθοδοι Επικοινωνίας: Ο μικροελεγκτής διαθέτει δύο κύριες προσεγγίσεις αναφορικά με την επικοινωνία του με τον έξω κόσμο, την ενσύρματη και ασύρματη επικοινωνία. Η ασύρματη επικοινωνία επιτυγχάνεται με Wi-Fi και Bluetooth σε όλες τις υλοποιήσεις, ωστόσο ενδέχεται το Development Board να διαθέτει και ενσωματωμένο πομποδέκτη για επικοινωνία LoRa. Ο ESP32 περιλαμβάνει πλήρες 802.11 b/g/n/e/i WLAN MAC. Επομένως μπορεί να λειτουργήσει ως σταθμός και να συνδεθεί

στο Internet ή στο διακομιστή και ως σημείο πρόσβασης για να παρέχει μια διεπαφή που επιτρέπει στον χρήστη να ελέγχει ένα ενσωματωμένο σύστημα μέσω εφαρμογής για κινητές συσκευές. Αναφορικά με το Bluetooth, ο ESP32 παρέχει v4.2 BR/EDR και Bluetooth Low-Energy (BLE) με ταχύτητα λειτουργίας έως 4 Mbps. [97]

Sleep Modes: Μία ιδιαίτερη λειτουργία του ESP32, η οποία αποτελεί και τον βασικό λόγο χρήσης του σε IoT συστήματα, είναι η καινοτομία του στη διαχείριση και εξοικονόμηση ενέργειας. Η καινοτομία αυτή επιτυγχάνεται μέσω των λεγόμενων «sleep modes», που είναι 3 ξεχωριστές καταστάσεις.

Η πρώτη απ' αυτές τις καταστάσεις είναι η λειτουργία «Βαθύ Ύπνου» (Deep Sleep), κατά την οποία ο μικροελεγκτής απενεργοποιεί τα περισσότερα από τα εσωτερικά του κυκλώματα, αφήνοντας σε λειτουργία μόνο τα απαραίτητα υποσυστήματα για την επαναφορά του. Αυτά είναι το κύκλωμα ρολογιού RTC, ο υποεπεξεργαστής ULP καθώς και το κύκλωμα Interrupt, έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επανέλθει σε πλήρη λειτουργία. Η επαναφορά του μικροελεγκτή μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε εσωτερικά με τη χρήση του RTC, είτε εξωτερικά με τη χρήση κάποιου σήματος trigger σε συγκεκριμένα pins.

Η δεύτερη κατάσταση είναι η κατάσταση «Ελαφρύ Ύπνου» (Light Sleep), κατά την οποία τα περισσότερα υποσυστήματα είναι σε λειτουργία. Η CPU και τα περιφερειακά κυκλώματα απενεργοποιούνται, όμως το μεγαλύτερο τμήμα της μνήμης RAM είναι σε λειτουργία και τα κυκλώματα διατήρησης του RTC είναι επίσης ενεργά, έτσι ώστε να είναι ικανή η επαναφορά του μικροελεγκτή σε πλήρη λειτουργία. Με την μνήμη να μένει ενεργή, διατηρείται η κατάσταση των μεταβλητών του προγράμματος του μικροελεγκτή και φυσικά η αφύπνιση διαρκεί λιγότερο χρόνο, αφού το πρόγραμμα είναι ήδη φορτωμένο στην μνήμη.

Τελευταία κατάσταση είναι η κατάσταση «Αδρανοποίησης» (Hibernation), κατά την οποία το μόνο κύκλωμα που λειτουργεί στον μικροελεγκτή είναι το RTC Timer, χωρίς όμως να διατηρεί μνήμη. Η λειτουργία αυτή είναι η λιγότερο ενεργοβόρα, όπως φαίνεται και από τον παρακάτω Πίνακα 4.13, ωστόσο η χρήση της δεν συνίσταται.

Πίνακας 4.13: Συγκριτική Κατανάλωση Ενέργειας του ESP32 [98]

<i>Mode</i>	<i>Περιγραφή</i>	<i>Ενεργειακή Κατανάλωση</i>
Normal	Μετάδοση / Λήψη πακέτων WLAN ή BLE	100 ~ 250 mA
Light Sleep	Περισσότερα υποσυστήματα ενεργά	0.8 mA
Deep Sleep	RTC και ULP κυκλώματα ενεργά	10 ~ 150 μ A
Hibernation	Μόνο RTC Timer κύκλωμα	5 μ A

4.6.2 Λόγοι επιλογής του ESP32

Με βάση τα παραπάνω τεχνικά χαρακτηριστικά του ESP32 είναι εύκολο να αντιληφθούμε τους λόγους χρήσης του στις περισσότερες IoT εφαρμογές.

Αρχικά το κόστος προμήθειάς του είναι υποτυπώδες, μιας και υπάρχει μεγάλη πληθώρα υλοποιήσεων από πολλούς κατασκευαστές. Το χαμηλότερο κόστος προμήθειας στην λιανική βρίσκεται στο ύψος των 2 με 3€ για ένα απλό ESP32 Development Board με 30 ή 38 ακίδες.

Έπειτα, είναι ένα ευρέως υποστηριζόμενο σύστημα με μεγάλη πληθώρα συνεργαζόμενων περιφερειακών modules, είτε αισθητήρων, είτε ενεργοποιητών, είτε συσκευών I/O, ήτοι οθόνες και πληκτρολόγια (keypads).

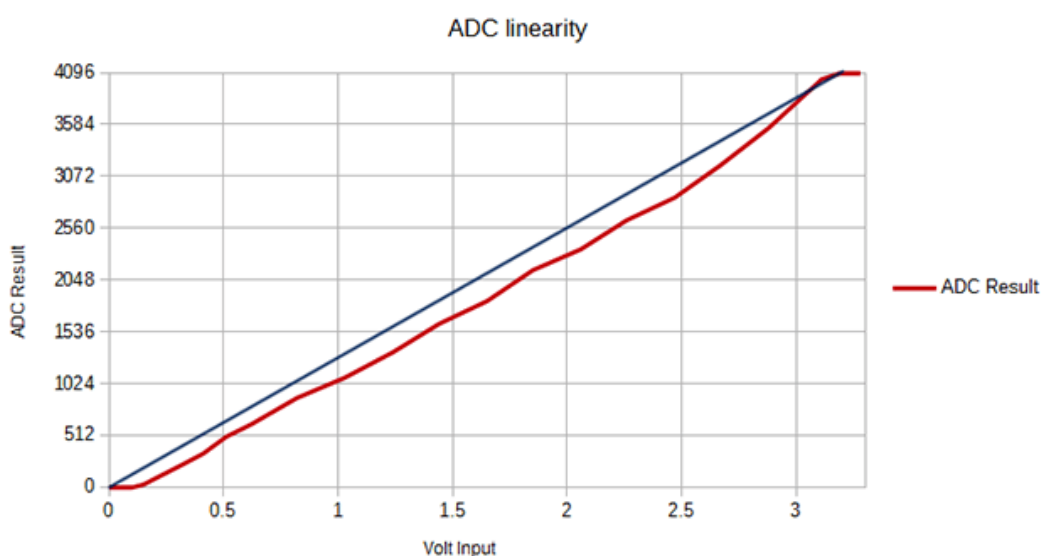
Επιπλέον ο μικροελεγκτής υποστηρίζει αρκετά πρωτόκολλα σειριακής επικοινωνίας, όπως είναι το UART, το SPI, το I²C, ενώ διαθέτει αρκετά GPIO για αναλογικά ή ψηφιακά δεδομένα. Ταυτοχρόνως υποστηρίζει αρκετά πρωτόκολλα ασύρματων δικτύων, όπως το WLAN, το Bluetooth ή ακόμη και το LoRa, γεγονός που το κάνει ιδανικό για εφαρμογές IoT με ασύρματη ζεύξη μεταξύ των σταθμών βάσης και των διαφόρων υποσυστημάτων αισθητήρων ή ενεργοποιητών.

Τέλος, υπάρχει ακόμη μία προϋπόθεση των συστημάτων για εφαρμογές IoT, την οποία επίσης πληροί ο ESP32 ως μικροελεγκτής κι αυτή είναι η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Με τα sleep modes που διαθέτει, επιτυγχάνεται η μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας, ειδικά σε συστήματα που δεν είναι απαραίτητο να λειτουργούν διαρκώς, όπως είναι η περίπτωση του συστήματος της συγκεκριμένης εργασίας.

4.6.3 Η ανάγκη χρήσης εξωτερικού ADC

Όπως αναφέραμε σε προηγούμενη ενότητα του κεφαλαίου, το σύστημα μέτρησης που υλοποιήσαμε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας διαθέτει πληθώρα αισθητήρων μέτρησης δεδομένων εδάφους, οι οποίοι εμφανίζουν στην έξοδο είτε αναλογικές τιμές τάσης είτε ψηφιακή πληροφορία. Η ψηφιακή πληροφορία μπορεί να διαβαστεί από όλες τις GPIO ακίδες που διαθέτει ο ESP32.

Η αναλογική πληροφορία, δηλαδή αυτές οι τιμές τάσης, δύναται να διαβαστούν μόνο από τις ακίδες που στην Εικόνα 4.38 παραπάνω έχουν πορτοκαλί σήμανση, δηλαδή επικοινωνούν με τα κανάλια ADC του μικροελεγκτή. Αναφέραμε παραπάνω ότι ο ESP32 διαθέτει ενσωματωμένο ADC, ωστόσο όπως αναφέρεται σε πληθώρα βιβλιογραφικών πηγών καθώς και στο ίδιο το forum της εταιρείας Espressif [99], ο ADC του μικροελεγκτή εμφανίζει τεράστια σφάλματα γραμμικότητας, ιδίως στις ακραίες τιμές. Να αναφέρουμε ότι ο εσωτερικός ADC του ESP32 έχει διακριτική ικανότητα 12 bit, ήτοι ένα εύρος τιμών από 0 ~ 4095. Στην παρακάτω Εικόνα 4.39 υπάρχει ένα σχετικό γράφημα που απεικονίζει σε συσχέτιση την ιδανική γραμμική απόκριση τιμών ενός ADC ίδιας διακριτικής ικανότητας και με ίδιο εύρος τιμών τάσης που αναγνωρίζει ο ADC του ESP32 (μπλε κυματομορφή) με την πραγματική απόκριση τιμών του ADC του ίδιου του ESP32 (κόκκινη κυματομορφή).



Εικόνα 4.39: Γράφημα συσχέτισης ιδανικού με πραγματικό εσωτερικό ADC του ESP32 [100]

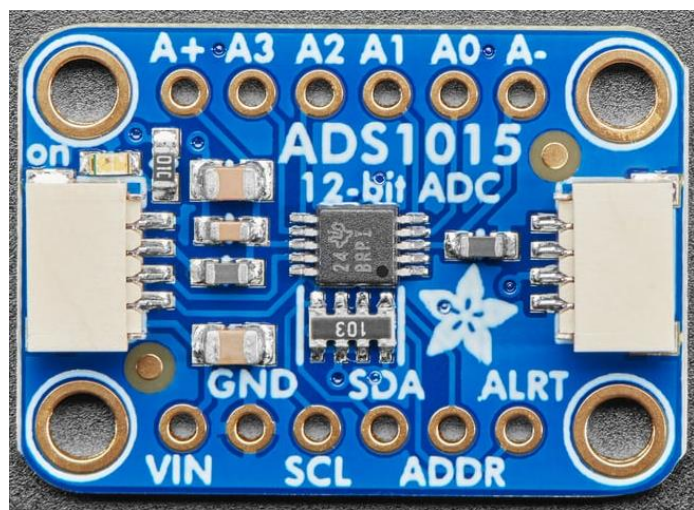
Όπως αντιλαμβανόμαστε με μεγάλη ευκολία, όντως στις ακραίες τιμές τάσης πλησίον των 0V και των 3.3V η απόκριση του ADC αποκλίνει από την ιδανική γραμμική μορφή, ενώ και σε όλο το εύρος παρουσιάζει διακυμάνσεις, έτσι ώστε η απόκριση να μην μπορεί πλέον να χαρακτηριστεί ιδανική.

Το συγκεκριμένο σφάλμα διορθώνεται εύκολα μέσα από τον κώδικα του προγράμματος χρησιμοποιώντας κάποιο Curve Fitting εργαλείο, ωστόσο προτιμάται η χρήση εξωτερικού module ADC και για μερικούς ακόμη λόγους.

Από την εταιρεία Espressif υπάρχει πάλι προειδοποίηση για διακυμάνσεις και αποκλίσεις του εσωτερικού ADC του μικροελεγκτή από την πραγματικότητα λόγω ηλεκτρομαγνητικών θορύβων. Η αντιμετώπιση των θορύβων που προτείνεται από την εταιρεία είναι με την χρήση ενός πυκνωτή στις εισόδους του ADC, ωστόσο, όπως αναφέρεται στην [100], αυτή δεν είναι μία βέλτιστη λύση για ασθενή και ταχέως μεταβαλλόμενα σήματα. Στην δική μας εφαρμογή αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί διότι τα σήματα τάσης είναι κατά κόρον σταθερά DC.

Τέλος, υπάρχει και ένα σφάλμα που έχει να κάνει με την τάση αναφοράς V_{REF} του ADC και διαφέρει μεταξύ των διαφορετικών υλοποιήσεων ESP32. Συνήθως η τιμή αυτής της τάσης είναι στα 1.1V. Η κατασκευάστρια εταιρεία προτείνει μία διαδικασία βαθμονόμησης για την εξάλειψη και αυτού του σφάλματος.

Ωστόσο, στα πλαίσια της υλοποίησης του συστήματος της εργασίας με στόχο την αποφυγή επιπλέον πολυπλοκότητας στην βαθμονόμηση των αισθητήρων και την επίτευξη ικανοποιητικής ακρίβειας στις μετρήσεις τους, χρησιμοποιούμε ένα διακριτό module της Adafruit. Το module αυτό βασίζεται στο ADC ολοκληρωμένο κύκλωμα ADS1015 της Texas Instruments και είναι αυτό της διπλανής Εικόνας 4.40.



Εικόνα 4.40: Το ADS1015 module της Adafruit [101]

Όπως διαβάζουμε στο φύλλο δεδομένων της Texas Instruments για το συγκεκριμένο ολοκληρωμένο [102],

πρόκειται για κύκλωμα ADC που διατίθεται σε συσκευασία τύπου SMD, με διακριτική ικανότητα 12 bit, ακριβώς όπως και ο εσωτερικός ADC που διαθέτει ο ESP32. Όπως αντιλαμβανόμαστε, λόγω της φύσης του υλικού, η χρήση του κατά την δοκιμαστική λειτουργία του κυκλώματος σε ράστερ θα ήταν δύσκολη, επομένως το module είναι χρήσιμο, καθ' όσον δίνει δύο διακριτές σειρές από ακίδες, τοποθετημένες έτσι ώστε το υλικό να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε ράστερ.

Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του ADS1015 είναι αυτά του παρακάτω Πίνακα 4.14:

Πίνακας 4.14: Τεχνικά Χαρακτηριστικά του ADS1015 [102]

Εύρος Τάσης Τροφοδοσίας	2V ~ 5.5V
Full Scale Input Voltage Range (FSR)	$\pm 0.256V \sim \pm 6.144V$
Absolute Input Voltage	GND ~ V_{DD}
Κατανάλωση Ρεύματος	150 μA
Κανάλια	4 μονοπολικά (ως προς GND) ή 2 διαφορικά (A1 – A0 και A3 – A2)
Ψηφιακό Πρότυπο Επικοινωνίας	I ² C

Αναφορικά με το FSR, δηλαδή το πλήρες εύρος τιμών τάσης εισόδου, καθορίζεται με βάση έναν εσωτερικό Ενισχυτή Προγραμματιζόμενου Κέρδους (Programmable Gain Amplifier / PGA) που ρυθμίζεται από τον χρήστη και ουσιαστικά καθορίζει το μέγεθος που θα έχει το Least Significant Bit (LSB) του ADC. Για παράδειγμα, με πλήρες εύρος $\pm 6.144\text{V}$ που θα χρησιμοποιήσουμε στα πλαίσια της εργασίας, το μέγεθος του LSB είναι 3 mV , και γενικώς υπάρχει μία ανάλογη σχέση σχετικά με το μέγεθος του LSB και το εύρος των τιμών τάσης εισόδου. [101]

Όπως αναφέρθηκε στον Πίνακα 4.14, ο ADC υποστηρίζει ως ψηφιακό πρότυπο σειριακής επικοινωνίας το I²C. Στο συγκεκριμένο πρότυπο θα αναφερθούμε λεπτομερώς στην υποενότητα 4.6.6.1, ωστόσο όπως παρατηρούμε και στην Εικόνα 4.38, ο μικροελεγκτής διαθέτει 2 pins που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την σύνδεση εξωτερικών συσκευών που χρησιμοποιούν αυτό το πρότυπο για επικοινωνία. Να θυμίσουμε ότι στην συγκεκριμένη εργασία κάνουμε χρήση ενός ακόμη module που χρησιμοποιεί το I²C. Το πρότυπο λειτουργεί με δεκαεξαδικές διευθύνσεις, επομένως ενδέχεται η διεύθυνση που έχει προκαθορισμένη ένα module να χρησιμοποιείται ήδη από κάποιο άλλο. Για τον λόγο αυτό, όπως αναφέρει και ο κατασκευαστής [101] του ολοκληρωμένου, δίνεται η δυνατότητα αλλαγής της προκαθορισμένης διεύθυνσης. Για τα συγκεκριμένα 2 modules που θα χρησιμοποιήσουμε, δεν προκύπτει κάποια υπερκάλυψη διευθύνσεων, καθώς το ένα «μιλάει» στην 0x48 και το άλλο στην 0x76. Η σύνδεση του module με τον μικροελεγκτή πραγματοποιείται με τη χρήση 2 καλωδίων, που συνδέονται στα pins SCL και SDA στο module και D22 και D21 αντίστοιχα στον μικροελεγκτή.

Οι λόγοι χρήσης του συγκεκριμένου ολοκληρωμένου και module ως ADC έχουν να κάνουν με την ευκολία στην επικοινωνία και την χρήση, καθώς η εταιρεία Adafruit που κατασκευάζει το module διαθέτει έτοιμη βιβλιοθήκη για μικροελεγκτές Arduino και ESP32. Με την χρήση της, η λήψη δεδομένων και ο προγραμματισμός των παραμέτρων του κυκλώματος γίνεται αρκετά απλή. Στις βιβλιοθήκες θα αναφερθούμε στην υποενότητα 4.6.7 παρακάτω.

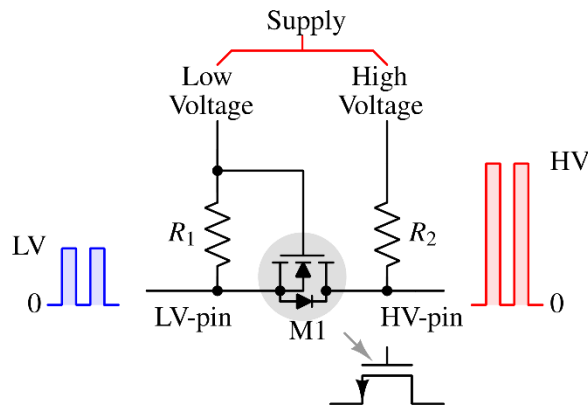
4.6.4 Η ανάγκη χρήσης Logic Level Shifter

Βάσει των τεχνικών χαρακτηριστικών του ESP32 (υποενότητα 4.6.1), όλες οι GPIO ακίδες του μικροελεγκτή έχουν ανοχή σε τιμές τάσης μέχρι και 3.3V , εν αντιθέσει με άλλους μικροελεγκτές που έχουν ανοχή μέχρι και 5V τάση στις αντίστοιχες ακίδες.

Αυτή η ιδιαιτερότητα του μικροελεγκτή ενδέχεται να δημιουργήσει ορισμένα προβλήματα σχετικά με το πλάτος των ψηφιακών σημάτων πληροφορίας που αποστέλλονται από εξωτερικές συσκευές, όπως για παράδειγμα ορισμένοι ψηφιακοί αισθητήρες, οι οποίοι λειτουργούν στο συνηθές επίπεδο τάσης των 5V . Αντιστοίχως, τα ψηφιακά σήματα που παράγει στις εξόδους του ο μικροελεγκτής ενδέχεται να μην γίνουν αντιληπτά από ορισμένες συσκευές που αναμένουν ψηφιακά σήματα HIGH του επιπέδου των 5V από τον μικροελεγκτή και αντ' αυτού δέχονται σήματα HIGH χαμηλότερου επιπέδου.

Συνεπώς, σε οποιαδήποτε από τις δύο παραπάνω περιπτώσεις δημιουργήσουμε μία απευθείας σύνδεση μεταξύ των GPIO ακίδων του μικροελεγκτή και των εξωτερικών συσκευών, ενδέχεται να προξενήσουμε ανεπανόρθωτη ζημιά και στην εξωτερική συσκευή αλλά και στις ακίδες του μικροελεγκτή.

Το πρόβλημα αυτό έρχονται να επιλύσουν οι απλές διατάξεις που ονομάζονται Μετατοπιστές Λογικής Στάθμης (Logic Level Shifters). Οι διατάξεις αυτές περιλαμβάνουν συνήθως MOSFET, δουλειά των οποίων είναι να μεταβιβάζουν το πλάτος του διακριτού σήματος αν οι συσκευές έχουν ως έξοδο ψηφιακά σήματα πληροφορίας ή να τροποποιούν μία αναλογική τάση από ένα εύρος τιμών ($0 \sim 5\text{V}$) σε ένα άλλο εύρος τιμών ($0 \sim 3.3\text{V}$). Η λογική αυτής της μετατροπής παρουσιάζεται στην παρακάτω Εικόνα 4.41.



Εικόνα 4.41: Η λογική του αμφίδρομου Logic Level Shifting [103]

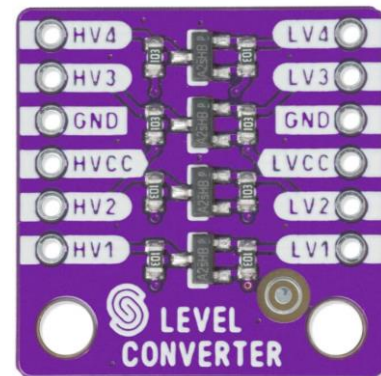
Στα πλαίσια της δικής μας εργασίας απαιτείται μετατόπιση στάθμης στα σήματα εξόδου των αισθητήρων Hall, εφόσον το πλάτος του σήματος είναι ίσο με αυτό της τάσης τροφοδοσίας τους, η οποία πρέπει να είναι άνω των 4V (βλ. υποενότητα 4.4.2). Επομένως, τα τροφοδοτούμε με τάση 5V απευθείας από αντίστοιχη σειρά ακίδων του Solar Power Manager. Επομένως το πλάτος των ψηφιακών σημάτων εξόδου τους θα είναι κι αυτό στα 5V, άρα θα πρέπει να μετατοπιστεί σε σήμα πλάτους 3.3V πριν εισέλθει στον μικροελεγκτή.

Για ευκολία στην συνδεσμολογία και την εξασφάλιση της ποιότητας των σημάτων χωρίς θορύβους, χρησιμοποιούμε ένα έτοιμο Logic Level Shifter module με 4 κανάλια αμφίδρομης επικοινωνίας, δηλαδή υποστηρίζει μετατροπή και από την υψηλή στη χαμηλή στάθμη τάσης και αντίστροφα. Το module αυτό είναι μία υλοποίηση της εταιρείας Soldered Electronics και αποτελεί μία υλοποίηση βασισμένη στο ολοκληρωμένο κύκλωμα TXB0104 της Texas Instruments, το οποίο όπως αναφέρεται και στο φύλλο δεδομένων [104], μπορεί να υποστηρίξει όλα τα είδη ψηφιακών προτύπων επικοινωνίας που δεν βασίζονται σε open drain λογική των MOSFET. Όπερ σημαίνει ότι το συγκεκριμένο ολοκληρωμένο δεν δύναται να χρησιμοποιηθεί σε I²C επικοινωνία, γεγονός που τονίζεται και στην ιστοσελίδα της Soldered Electronics [105]. Το module είναι αυτό της Εικόνας 4.42.



Εικόνα 4.42: Το module TXB0104 της Soldered Electronics [105]

Επίσης, έχουν υλοποιηθεί δύο αισθητήρες οι οποίοι έχουν ως έξοδο αναλογικά σήματα τάσης με εύρος 0 ~ 5V, μιας και η τροφοδοσία τους είναι μονοπολική με πλάτος +5V. Αυτά τα σήματα τάσης θα μπορούσαν να είχαν μεταβληθεί με χρήση διαιρέτη τάσης ή signal conditioner, ωστόσο αυτή η μέθοδος θα προσέθετε παραπάνω ενεργειακή κατανάλωση και θα επηρέαζε την ακρίβεια των αισθητήρων. Επιπλέον, τα αναλογικά αυτά σήματα, όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 4.6.3, μετατράπηκαν σε ψηφιακά σήματα πληροφορίας με χρήση ενός εξωτερικού ADC module πριν φτάσουν στον μικροελεγκτή. Το module αυτό τροφοδοτείται με 5V μονοπολικής τροφοδοσίας απευθείας από το Solar Power Manager, όπως και οι αισθητήρες Hall, επομένως τα ψηφιακά σήματα που παράγει στην έξοδό του έχουν επίσης πλάτος 5V. Επομένως κι εδώ



Εικόνα 4.43: Το module Level Converter της Soldered Electronics [106]

απαιτείται ανάγκη μετατροπής λογικής στάθμης. Ωστόσο, στην προκειμένη περίπτωση το πρότυπο επικοινωνίας που χρησιμοποιεί ο ADC είναι I²C, συνεπώς το προαναφερθέν module δεν δύναται να χρησιμοποιηθεί με αυτό το πρωτόκολλο. Αντ' αυτού θα χρησιμοποιηθεί ένα αντίστοιχο module της ίδιας κατασκευάστριας εταιρείας με τα ίδια χαρακτηριστικά, δηλαδή 4 αμφίδρομων καναλιών, που όμως υποστηρίζει το I²C πρωτόκολλο. Το module αυτό φαίνεται στην Εικόνα 4.43, κι όπως παρατηρούμε δεν διαθέτει κάποιο ολοκληρωμένο κύκλωμα όπως το παραπάνω αλλά χρησιμοποιεί 4 διακριτά MOSFET [106].

Η συνδεσμολογία των συγκεκριμένων modules είναι πολύ απλή και παραμένει ίδια και στις δύο περιπτώσεις. Στο ποδαράκι HVCC ή VCCH συνδέεται η υψηλή στάθμη τροφοδοσίας (εν προκειμένω τα 5V), ενώ στο αντίστοιχο LVCC ή VCCL η χαμηλή στάθμη τροφοδοσίας, δηλαδή τα 3.3V, τα οποία λαμβάνονται απ' ευθείας από την ακίδα 3V3 του ESP32. Οι γραμμές σημάτων υψηλής στάθμης τοποθετούνται στα ποδαράκια B1~B4 για το TXB0104 module, ενώ για το Level Converter module στα HV1~HV4 αντίστοιχα. Οι γραμμές σημάτων χαμηλής στάθμης τοποθετούνται στα ποδαράκια A1~A4 για το TXB0104 module, ενώ για το Level Converter module στα LV1~LV4 αντίστοιχα.

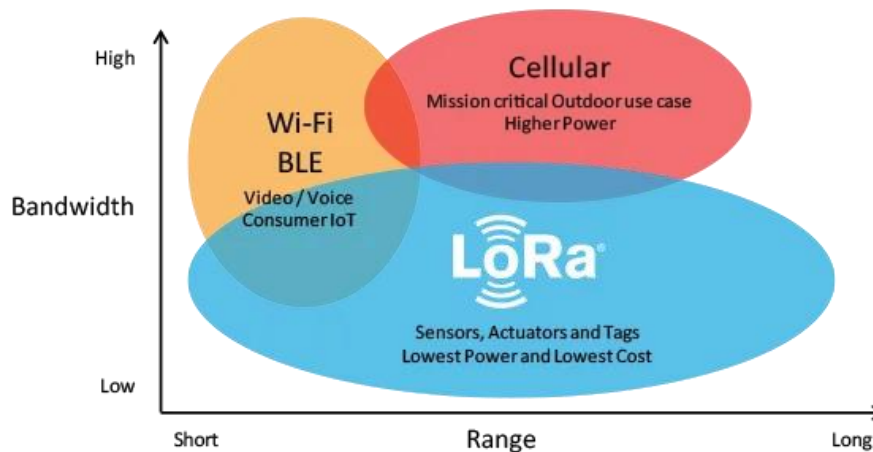
Αυτό που πρέπει σε κάθε περίπτωση να φροντίσουμε έτσι ώστε να είναι πάντα κοινό για όλα, είναι η γείωση. Εφ' όσον μιλάμε για διαφορετικές στάθμες τάσης, οι οποίες είναι όλες από πηγές float, δηλαδή που δεν έχουν αναφορά στην πραγματική γείωση, ενδέχεται να έχουν διαφορετικά σημεία αναφοράς κι αυτό να εμφανίσει προβλήματα στις μετρήσεις αν το σημείο αναφοράς δεν είναι κοινό. Εφ' όσον χρησιμοποιούμε τον μικροελεγκτή για την χαμηλή στάθμη τροφοδοσίας και το Solar Power Manager για την υψηλή στάθμη τροφοδοσίας, φροντίζουμε έτσι ώστε η γείωση των 5V από το Manager να είναι κοινή με την System Ground του μικροελεγκτή, γεγονός που εξασφαλίζεται από το ίδιο το module. Στην συνέχεια φροντίζουμε έτσι ώστε και η πλευρά υψηλής στάθμης των modules αλλά και η πλευρά χαμηλής στάθμης να συνδέονται στην System Ground του μικροελεγκτή.

4.6.5 Ενσωμάτωση LoRa module στο σύστημα

Όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 4.6.2, κύριος λόγος επιλογής του ESP32 ως μικροελεγκτή για συστήματα που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές IoT είναι η υποστήριξη των ασύρματων μεθόδων επικοινωνίας. Μία από αυτές τις μεθόδους είναι η επικοινωνία μέσω LoRa, η οποία ωστόσο δεν είναι ενσωματωμένη στο ολοκληρωμένο κύκλωμα του ESP32.

Η τεχνολογία LoRa είναι μέθοδος ασύρματης επικοινωνίας βασισμένη στην διαμόρφωση ραδιοκυμάτων (radio modulation) για την μετάδοση δεδομένων [107]. Με την μέθοδο αυτή ουσιαστικά τα χαρακτηριστικά ενός φέροντος κύματος υψηλής συχνότητας τροποποιούνται από ένα σήμα πληροφορίας (δεδομένα), για τη μετάδοση πληροφορίας μέσω του αέρα. Αυτή είναι και η μέθοδος που χρησιμοποιείται και για την μετάδοση ραδιοφωνικών σταθμών, είτε με διαμόρφωση πλάτους (amplitude modulation / AM), είτε με διαμόρφωση συχνότητας (frequency modulation / FM).

Με την χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας, επιτυγχάνεται επικοινωνία χαμηλής ποσότητας δεδομένων, επομένως απαιτείται χαμηλό εύρος ζώνης στα κανάλια επικοινωνίας για μεγάλες αποστάσεις. Παράλληλα, επιτυγχάνεται μία επικοινωνία που δεν είναι επιρρεπής στις παρεμβολές, ενώ η κατανάλωση ενέργειας είναι αντιστοίχως χαμηλή. Στην Εικόνα 4.44 δίνεται ένα γράφημα που συσχετίζει το εύρος ζώνης καναλιών (bandwidth) των μεθόδων ασύρματης επικοινωνίας με την απόσταση μεταξύ των κόμβων του δικτύου που μπορεί θεωρητικά να επιτευχθεί.

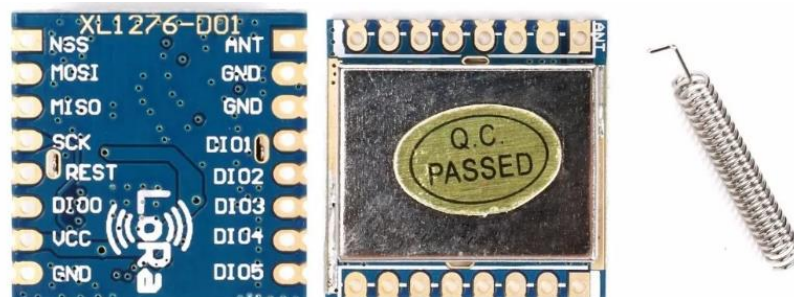


Εικόνα 4.44: Γράφημα συσχέτισης bandwidth και απόστασης κόμβων ασύρματων μεθόδων επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται στο IoT [108]

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω γράφημα, το LoRa είναι το ιδανικό μοντέλο επικοινωνίας για εφαρμογές που περιλαμβάνουν αισθητήρες μέτρησης διασκορπισμένους σε μεγάλες αποστάσεις, όπως ένα μεγάλο χωράφι ή μία δασική έκταση στην οποία πραγματοποιούνται μετρήσεις ποιότητας ατμοσφαιρικού αέρα.

Σχετικά με τις συχνότητες λειτουργίας του LoRa, επειδή δεν είναι αδειοδοτημένο πρωτόκολλο επικοινωνίας όπως το Wi-Fi (με άδειες χρήσης και πιστοποίηση IEEE 802.11b/c... κ.ο.κ.), οι συχνότητες στις οποίες γίνεται χρήση του διαφέρουν κατά περιοχές. Υπάρχουν 3 διαφορετικές μπάντες συχνοτήτων στις οποίες λειτουργεί το LoRa παγκοσμίως, οι οποίες είναι: 433 MHz για την Ασία, 868 MHz για την Ευρώπη και 915 MHz για την Βόρεια Αμερική. Πάντως όλες αυτές οι συχνότητες είναι κάτω του 1 GHz, καθ' ότι δεν απαιτείται μεγάλο εύρος ζώνης για τα κανάλια επικοινωνίας. [107]

Στην υλοποίηση της συγκεκριμένης διπλωματικής, για την ενσωμάτωση της τεχνολογίας LoRa στο σύστημά μας θα χρησιμοποιήσουμε το ολοκληρωμένο κύκλωμα πομποδέκτη SX1278 της εταιρείας Semtech, το οποίο ωστόσο δεν λειτουργεί σε συχνότητες 868 MHz που απαιτείται για την Ευρώπη. Συγκεκριμένα στην Ελλάδα δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός για την χρήση της συχνότητας των 433 MHz, επομένως η μπάντα μπορεί να χρησιμοποιηθεί κανονικά για επικοινωνίες LoRa. Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του ολοκληρωμένου κυκλώματος είναι αυτά του παρακάτω Πίνακα 4.15, ενώ στην παρακάτω Εικόνα 4.45 φαίνεται το ίδιο το ολοκληρωμένο.



Εικόνα 4.45: Ολοκληρωμένο κύκλωμα τύπου SX1278 για χρήση με LoRa

Πίνακας 4.15: Τεχνικά Χαρακτηριστικά του SX1278 [109]

Εύρος Τάσης Τροφοδοσίας	1.8V ~ 3.7V
RF Input Level	+ 10 dBm
Κατανάλωση Ρεύματος κατά την λήψη (Supply Current in Receiver mode)	9.9mA ~ 13.8 mA
Κατανάλωση Ρεύματος κατά την μετάδοση (Supply Current in Transmitter mode)	20mA ~ 28mA
Ψηφιακό Πρότυπο Επικοινωνίας	SPI

Όπως αναφέρεται και στο φύλλο δεδομένων του κατασκευαστή, το συγκεκριμένο ολοκληρωμένο υποστηρίζει το πρωτόκολλο SPI για ψηφιακή επικοινωνία, εν αντιθέσει με τα υπόλοιπα στοιχεία του κυκλώματος που έκαναν χρήση του I²C. Για το πρωτόκολλο αυτό, απαιτείται σύνδεση 6 διαφορετικών καλωδίων στον μικροελεγκτή, πέραν των 2 που χρησιμοποιούνται για τροφοδοσία και γείωση. Οι προκαθορισμένες ακίδες που χρησιμοποιούνται στην SPI επικοινωνία φαίνονται στην Εικόνα 4.38 στην υποενότητα 4.6.1. Περισσότερες λεπτομέρειες για το πρότυπο SPI θα δούμε στην επόμενη υποενότητα. Παρακάτω παρατίθεται και ο Πίνακας 4.16, ο οποίος αντιστοιχίζει τις ακίδες του μικροελεγκτή με αυτές του ολοκληρωμένου για SPI επικοινωνία:

Πίνακας 4.16: Αντιστοίχιση Ακίδων LoRa module και ESP32 για SPI επικοινωνία

<i>SX1278</i>	<i>ESP32</i>
NSS	D5
MOSI	D23
MISO	D19
SCK	D18
REST	D14
DIO0	D2
VCC	3V3
GND	GND

Σχετικά με τον προγραμματισμό του LoRa module, η εταιρεία διαθέτει έτοιμη βιβλιοθήκη LoRa για χρήση με τον μικροελεγκτή ESP32, οπότε θα αξιοποιήσουμε τις δυνατότητες της βιβλιοθήκης αυτής, όπως θα δούμε στην υποενότητα 4.6.7.

4.6.6 Ψηφιακά Πρότυπα Μεταφοράς Δεδομένων (I²C & SPI)

Οι ψηφιακοί αισθητήρες και γενικώς οι εξωτερικές ψηφιακές συσκευές που συνδέονται με μικροελεγκτές και γενικά με υπολογιστικά συστήματα, χρησιμοποιούν κάποιο πρότυπο μεταφοράς δεδομένων που βασίζεται στην σειριακή επικοινωνία, δηλαδή ασχέτως του μεγέθους bit των πακέτων που μεταφέρονται, όλα περνούν μέσα από ένα μοναδικό αγωγό. Με τα χρόνια, αναπτύχθηκαν πολλά πρότυπα μεταφοράς δεδομένων, τα οποία χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνολογίες ή ρυθμούς μετάδοσης των δεδομένων αυτών.

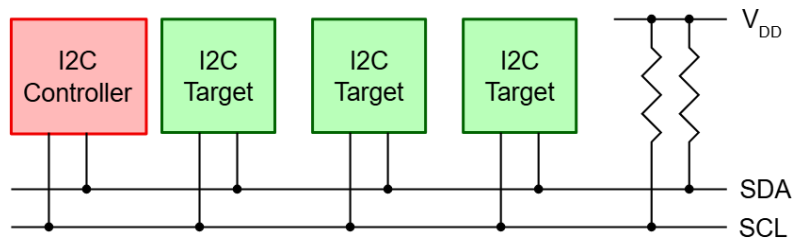
Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (baud rate) μετράται σε bits / second. Ανάλογα με το σειριακό πρότυπο επικοινωνίας που χρησιμοποιείται, ενδέχεται να παίρνει τιμές 75, 110, 150, 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600, 14400 και 19200, 38400, 57600, 115200, 128000 bps κλπ. Για παράδειγμα, το πρότυπο RS232 που χρησιμοποιείται κατά κόρον στους υπολογιστές, ορίζει μία μέγιστη τιμή baud rate στα 20 kbps [51].

Ο μικροελεγκτής ESP32 που επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε, υποστηρίζει αρκετά πρότυπα σειριακής επικοινωνίας, όπως το I²C, το SPI, το UART και το CAN, πληροφορία που εξάγεται από την Εικόνα 4.37 με το λειτουργικό διάγραμμα του μικροελεγκτή. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας θα κάνουμε χρήση των δύο πρώτων από τα αναφερθέντα πρότυπα, δηλαδή το I²C και το SPI.

4.6.6.1 Πρότυπο I²C

Το πρότυπο I²C αναπτύχθηκε από τον πρώην ευρωπαϊκό κολοσσό ηλεκτρονικών, την Philips στην δεκαετία του 1980. Η σημασία της ονομασίας είναι «Inter-Integrated Circuit», (IIC) και ως πρότυπο, υποστηρίζει την επικοινωνία διαφόρων συσκευών μεταξύ τους, με τη χρήση μόνο 2 αγωγών (πέραν των γραμμών τροφοδοσίας). Σχεδιαστικά, είναι μία απλή γραμμή αμφίδρομης μεταφοράς δεδομένων, που βασίζεται σε σχέση συσκευών master / slave. Η ευκολία που προσφέρει η χρήση του συγκεκριμένου προτύπου είναι η μείωση των γραμμών μεταφοράς, καθώς όλες οι συσκευές που επικοινωνούν με το συγκεκριμένο πρότυπο, συνδέονται στον ίδιο διάλυο. Αυτή η σχεδιαστική ιδέα επιλύει αρκετά προβλήματα διασύνδεσης που προκύπτουν κατά τον σχεδιασμό κυκλωμάτων ψηφιακού ελέγχου [49].

Στην παρακάτω Εικόνα 4.46, βλέπουμε τον τρόπο διασύνδεσης των συσκευών πάνω στον διάλυο I²C. Ως controller νοείται ο master της επικοινωνίας, δηλαδή ο μικροελεγκτής, ενώ ως slaves οι targets.



Εικόνα 4.46: Ο διάλυος I²C [110]

Τα κύρια χαρακτηριστικά του προτύπου αυτού είναι τα εξής:

- Υπάρχουν μόνο 2 γραμμές, η σειριακή γραμμή δεδομένων (Serial Data / SDA) και η σειριακή γραμμή ρολογιού (Serial Clock / SCL).
- Κάθε συσκευή που συνδέεται στην γραμμή είναι μοναδικά διευθυνσιοδοτημένη από το λογισμικό.
- Στην σχέση master / slave, οι master ενδέχεται να λειτουργήσουν ως πομποί ή ως δέκτες.
- Είναι half – duplex πρότυπο επικοινωνίας, δηλαδή κάθε φορά στον αγωγό SDA γίνεται ή εκπομπή ή λήψη δεδομένων.
- Οι γραμμές υποστηρίζουν πολλαπλούς masters, με υποστήριξη ανίχνευσης συγκρούσεων και επίβλεψη για αποφυγή απώλειας δεδομένων σε ταυτόχρονη μεταφορά των masters.
- Η μεταφορά δεδομένων διπλής κατεύθυνσης γίνεται με ταχύτητες από 100 kbit/s έως και 3.4 Mbit/s.
- Ο αριθμός των συσκευών που συνδέονται στην ίδια γραμμή περιορίζεται μόνο από την χωρητικότητα του διαύλου δεδομένων.

Το πρότυπο αυτό βοήθησε τους σχεδιαστές ολοκληρωμένων κυκλωμάτων στη μείωση των ακροδεκτών στα ολοκληρωμένα κυκλώματα και τους μικροελεγκτές, ενώ ταυτόχρονα συνέβαλε στην μείωση των πιστών μεταφοράς σημάτων σε πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων [49].

Στην υλοποίηση της δικής μας εργασίας, στον διάλυο I²C συνδέονται 2 συσκευές, ο μετατροπέας A/D ADS1015 και ο ψηφιακός αισθητήρας περιβάλλοντος BME280.

4.6.6.2 Πρότυπο SPI

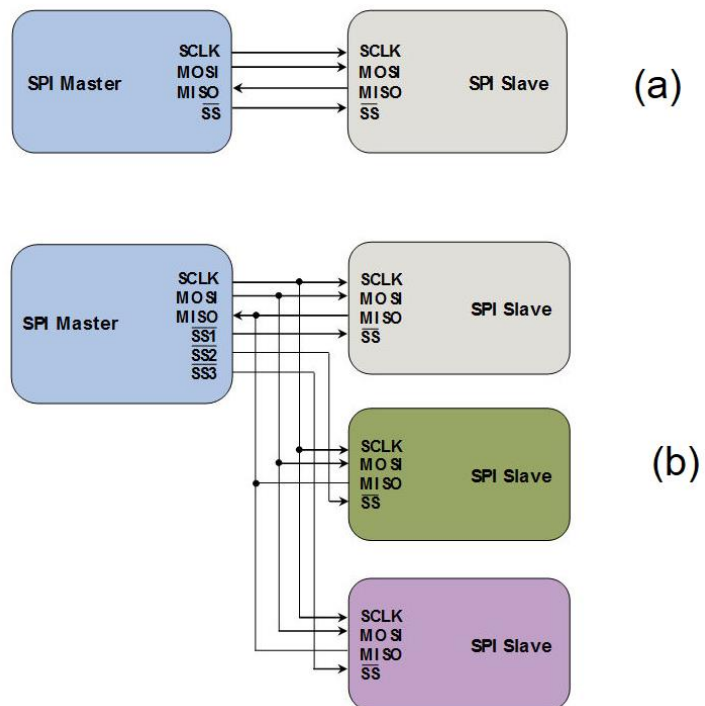
Ένα ακόμη πρότυπο που χρησιμοποιείται για σειριακή επικοινωνία μεταξύ ψηφιακών ολοκληρωμένων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων είναι το SPI (Serial Peripheral Interface), το οποίο σχεδιάστηκε από την εταιρεία Motorola, επίσης την δεκαετία του 1980. Είναι κι αυτό πρωτόκολλο που βασίζεται στην λογική master / slave, όπως ακριβώς το I²C, ωστόσο αυτό είναι full duplex, δηλαδή υποστηρίζει ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη δεδομένων από τις διάφορες συσκευές. Η χρήση του δεν είναι τόσο ευρεία όσο του I²C, κι αυτό επειδή δεν υπάρχει τυποποιημένος τρόπος σχεδιασμού για την διασύνδεση των συσκευών όπως με το I²C.

Με τη χρήση του συγκεκριμένου προτύπου επιτυγχάνουμε μεγαλύτερο ρυθμό μεταφοράς δεδομένων σε σχέση με το I²C, ωστόσο ο αριθμός των γραμμών που χρησιμοποιούνται είναι μεγαλύτερος, καθώς οι γραμμές αυτές είναι 4:

- **Γραμμή Χρονισμού Δεδομένων (SCLK):** Οδηγείται από τον master και παράγει έναν τετραγωνικό παλμό σε συχνότητες 1 ~ 70 MHz ώστε να γίνονται αντιληπτοί από τον κάθε slave.
- **Γραμμή Εξόδου Δεδομένων του Master και Εισόδου του Slave (Master Output Slave Input / MOSI):** Είναι η γραμμή από την οποία τα δεδομένα μεταφέρονται από τον master στον slave.
- **Γραμμή Εισόδου Δεδομένων του Master και Εξόδου του Slave (Master Input Slave Output / MISO):** Είναι η γραμμή από την οποία τα δεδομένα μεταφέρονται από τον slave στον master.
- **Γραμμή \overline{SS} (ή NSS ή CS):** Είναι η γραμμή επιλογής του ολοκληρωμένου slave. Αν υπάρχουν πολλαπλοί slaves συνδέουμε μία γραμμή \overline{SS} του master σε κάθε slave, όπως στην περίπτωση b) της παρακάτω Εικόνας 4.47. Η περίπτωση (a) ισχύει σε περίπτωση που ο slave είναι ένας.

Για εκκίνηση της επικοινωνίας με κάποιον slave ρυθμίζεται από τον master ο ρυθμός του ρολογιού με τον οποίο δύναται να λειτουργήσει ο slave κι έπειτα η γραμμή \overline{SS} για τον συγκεκριμένο slave τίθεται σε χαμηλή κατάσταση (σήμα LOW). Έπειτα, σε κάθε παλμό ρολογιού (είτε ανερχόμενο είτε κατερχόμενο, καθορίζεται από την συσκευή), εκτελείται μία πλήρως αμφίδρομη μεταφορά δεδομένων στις γραμμές MOSI και MISO. [49]

Στην δική μας υλοποίηση γίνεται χρήση του προτύπου SPI για την διασύνδεση του SX1278, δηλαδή του LoRa module που χρησιμοποιείται για την αποστολή δεδομένων από τον κόμβο του συστήματος μέτρησης (transmitter) στον σταθμό βάσης (receiver).



Εικόνα 4.47: Περιπτώσεις Χρήσης Προτύπου SPI [111]

4.6.6.3 Συγκριτική Αναφορά των χρησιμοποιούμενων προτύπων

Στον παρακάτω Πίνακα 4.17 γίνεται μία συγκριτική επισκόπηση των δύο προτύπων σειριακής μεταφοράς δεδομένων που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Πίνακας 4.17: Συγκριτική Επισκόπηση προτύπων I²C και SPI

<i>Χαρακτηριστικό</i>	<i>I²C</i>	<i>SPI</i>
Ταχύτητα μεταφοράς	Χαμηλότερη	Υψηλότερη
Αριθμός Αγωγών	2	4+ (εξαρτάται από τον αριθμό των slaves)
Αμφιδρόμηση	Half – Duplex	Full – Duplex
Σύνδεση Συσκευών	Διευθυνσιοδότηση Συσκευών	Ξεχωριστός αγωγός Select για κάθε slave
Καθυστερήση Ρολογιού	Οι slaves ενδέχεται να καθυστερούν	Δεν υπάρχει

Όπως αντιλαμβανόμαστε από τον Πίνακα, το πρότυπο SPI είναι σαφώς ταχύτερο και με υψηλότερες δυνατότητες επικοινωνίας, ωστόσο η χρήση του είναι περισσότερο περιορισμένη, διότι το πλήθος απαιτούμενων αγωγών του είναι μεγαλύτερο και εξαρτάται από τον αριθμό των συσκευών που συνδέονται στον δίαυλο.

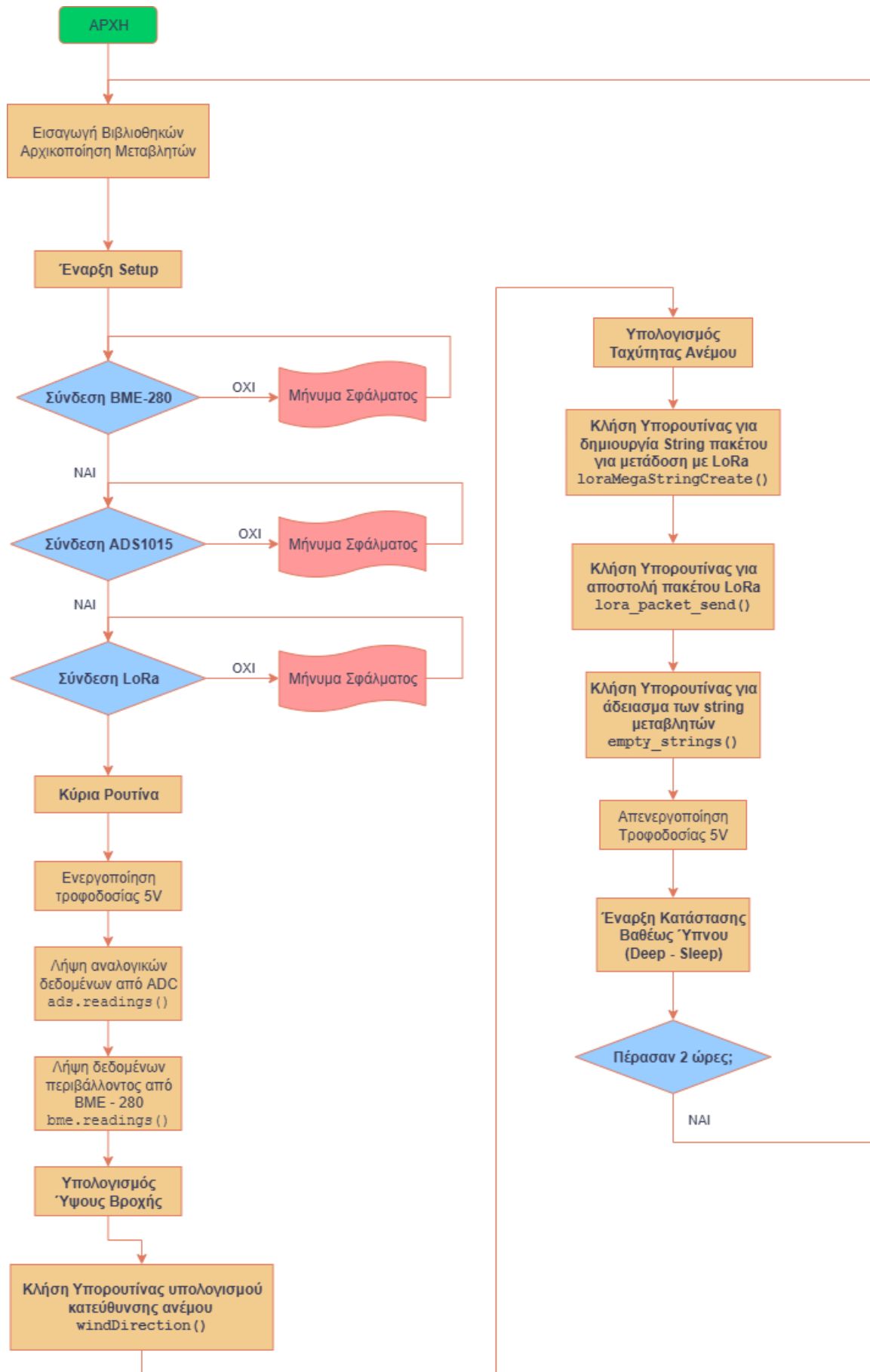
4.6.7 Επεξήγηση Κώδικα Συστήματος Μέτρησης

Αφού γίνει η φυσική διασύνδεση όλων των ξεχωριστών συστημάτων και συσκευών που χρησιμοποιούνται στο σύστημα της εργασίας (η αναλυτική συνδεσμολογία δίνεται στο Παράρτημα Α), επόμενο βήμα είναι η συγγραφή του κώδικα για τον κόμβο μέτρησης. Ο αντίστοιχος κώδικας για τον σταθμό βάσης θα επισκοπηθεί στο κεφάλαιο 5, ενώ βρίσκεται ολόκληρος και στο Παράρτημα Β της εργασίας.

Η συγγραφή του κώδικα γίνεται σε μείγμα γλώσσας C / C++, το οποίο υποστηρίζεται από το περιβάλλον στο οποίο πραγματοποιείται η υλοποίηση του κώδικα. Καθότι η εταιρεία Esspresif δεν παρέχει ένα αξιόπιστο περιβάλλον ανάπτυξης κώδικα για τον ESP32, το περιβάλλον που χρησιμοποιείται για την συγγραφή του κώδικα είναι το Arduino IDE, στο οποίο έχει προστεθεί η υποστήριξη μικροελεγκτών ESP32. Το περιβάλλον αυτό είναι εύχρηστο και απευθύνεται σε χρήστες κάθε ηλικίας και επιπέδου τεχνογνωσίας, καθώς έχει σχεδιαστεί με πρωταρχικό στόχο την εκμάθηση συγγραφής κώδικα για ενσωματωμένα συστήματα.

Ο κώδικας που γράφεται στο συγκεκριμένο περιβάλλον ακολουθεί πάντα μία συγκεκριμένη δομή, με ορισμένα απαραίτητα στοιχεία. Πέραν των βιβλιοθηκών και των global μεταβλητών που ορίζονται στην αρχή του προγράμματος, απαιτούμενες είναι δύο συναρτήσεις τύπου void, η πρώτη εκ των οποίων λέγεται void setup() και η δεύτερη void loop(). Οι ονομασίες αυτές δεν πρέπει να τροποποιηθούν, διότι το πρόγραμμα απαιτεί τα εξής: το όνομα setup ως ρουτίνα που εκτελείται μία φορά, ενώ το όνομα loop σημαίνει την «κύρια» ρουτίνα που επαναλαμβάνεται διαρκώς, αφού εκτελεστεί πρώτα μία φορά η setup.

Για την ευκολία στην επεξήγηση του κώδικα θα ξεκινήσουμε παρουσιάζοντας μία γενική δομή του μέσα από ένα διάγραμμα ροής, το οποίο θα μας βοηθήσει ευκολότερα στην κατανόηση. Το διάγραμμα ροής αυτό δίνεται στην Εικόνα 4.48 στην επόμενη σελίδα.



Εικόνα 4.48: Διάγραμμα Ροής Προγράμματος Κόμβου Μέτρησης (Transmitter)

4.6.7.1 Εισαγωγή Βιβλιοθηκών – Αρχικοποίηση Μεταβλητών

Πρώτο βήμα στην συγγραφή του κώδικα είναι να εισάγουμε τις απαραίτητες βιβλιοθήκες έτσι ώστε να ενεργοποιήσουμε τις δυνατότητες όλων των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων που συνδέουμε. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω Εικόνα 4.49, εισάγουμε τις βιβλιοθήκες <Adafruit_ADS1X15.h>, η οποία επιτρέπει την επικοινωνία με το ολοκληρωμένο κύκλωμα ADC που χρησιμοποιούμε, καθώς και την <Adafruit_BME280.h>, η οποία χρησιμοποιείται για την επικοινωνία με τον αισθητήρα περιβάλλοντος BME 280. Η βιβλιοθήκη <Adafruit_Sensor.h> επίσης χρησιμοποιείται για ολοκληρωμένα κυκλώματα αισθητήρων της Adafruit. Η <Wire.h> και <SPI.h> βιβλιοθήκες χρησιμοποιούνται για την χρήση των προτύπων σειριακής μετάδοσης δεδομένων I²C και SPI αντίστοιχα, ενώ η <LoRa.h> για την χρήση επικοινωνίας LoRa. Τέλος, η βιβλιοθήκη <esp_sleep.h> χρησιμοποιείται για την εκμετάλλευση των λειτουργιών Sleep που υποστηρίζει ο ESP32.

```

1  #include <Adafruit_ADS1X15.h>
2  #include <Adafruit_Sensor.h>
3  #include <Adafruit_BME280.h>
4  #include <Wire.h>
5  #include <LoRa.h>
6  #include <SPI.h>
7  #include <esp_sleep.h>
8
9  #define ENABLE 27 // D27 PIN AS ENABLE
10 #define NORTH 34 // D34 PIN AS NORTH WIND SENSOR
11 #define EAST 35 // D35 PIN AS EAST WIND SENSOR
12 #define WEST 32 // D32 PIN AS WEST WIND SENSOR
13 #define SOUTH 33 // D33 PIN AS SOUTH WIND SENSOR
14 #define RAIN 25 // D25 PIN AS RAIN SENSOR
15 #define WIND_SP 26 // D26 PIN AS WIND SPEED SENSOR
16 #define ss 5 // D5 PIN AS LORA SS PIN
17 #define rst 14 // D14 PIN AS LORA RST PIN
18 #define dio0 2 // D2 PIN AS LORA DIO PIN
19
20 #define uS_TO_S_FACTOR 1000000ULL // Conversion factor for micro seconds to seconds
21 #define TIME_TO_SLEEP 7200 // Time for ESP to go to sleep (in seconds) 7200 for 2 hours
22
23 Adafruit_ADS1015 ads; // I2C for ADC (0x48)
24 Adafruit_BME280 bme; // I2C for BME280 (0x77)

```

Εικόνα 4.49: Εισαγωγή βιβλιοθηκών και καθορισμός σταθερών λέξεων

Πέραν των βιβλιοθηκών, στις γραμμές 9 ~ 21 ορίζουμε ορισμένες σταθερές λέξεις, οι οποίες είναι οι αριθμοί των ακίδων του ESP32 που χρησιμοποιούνται σε ορισμένα σημεία του κώδικα για να αποφευχθεί η συμφόρηση. Η ακίδα 27 ορίζεται ως το Enable Pin για την τροφοδοσία των 5V, οι ακίδες 34, 35, 32 και 33 ως τα σημεία του ορίζοντα για τα σήματα των αισθητήρων Hall του ανεμοδείκτη, η ακίδα 25 για τα σήματα από τον αισθητήρα Hall που υπάρχει στο βροχόμετρο, ενώ η ακίδα 26 για τα σήματα του αισθητήρα Hall του ανεμομέτρου. Οι ακίδες 5, 14 και 2 χρησιμοποιούνται ως το Slave Select, RESET και DIO0 για το LoRa module. Έπειτα, ορίζουμε μερικές χρονικές σταθερές, όπως ο πολλαπλασιαστικός παράγοντας για την μετατροπή των μs σε seconds, και ο χρόνος ύπνου του ESP32, ο οποίος ορίζεται στις 2 ώρες.

Στις γραμμές 23 και 24 δημιουργούνται δύο αντικείμενα για την I²C βιβλιοθήκη, ένα τύπου Adafruit_ADS1015 που ονομάζουμε ads και ένα Adafruit_BME280 που ονομάζουμε bme. Με τον τρόπο αυτό, το πρόγραμμα γνωρίζει απευθείας σε ποιες διευθύνσεις πρέπει να απευθύνεται για επικοινωνία με τα συγκεκριμένα ολοκληρωμένα κυκλώματα.

Σχετικά με τις μεταβλητές του προγράμματος, αυτές ορίζονται στις γραμμές κώδικα 26 ~ 51, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.50 παρακάτω.

```

26 float soil_temp_volts, soil_moist_volts; // Volts counted on ADC pins variables
27 float soil_temp = 0; // Final Soil Temp variable
28 float soil_moist = 0; // Final Soil Moisture variable
29
30 float air_temp = 0; // Air Temperature Reading variable
31 float air_humid = 0; // Air Humidity Reading variable
32 float air_press = 0; // Air Pressure Reading variable
33
34 float revolutions = 0; // Wind Speed revolutions variable
35 float windSpeed = 0; // Wind Speed Reading variable
36
37 const float mmPerPulse = 0.173; // Value of rain in mm for each bucket movement
38 float mmTotal = 0; // Rain Depth Reading variable
39 float pulses = 0; // Number of rain sensor movement variable
40
41 char soilTempString[10]; // Soil Temperature float to String variable
42 char soilMoistString[10]; // Soil Moisture float to String variable
43 char airTempString[10]; // Air Temperature float to String variable
44 char airHumidString[10]; // Air Humidity float to String variable
45 char airPressString[10]; // Air Pressure float to String variable
46 char rainDepthString[10]; // Rain Depth float to String variable
47 char windSpeedString[10]; // Wind speed float to String variable
48 char windDirection[10]; // Wind direction String variable
49 char n_name[10] = "NW_Corner"; // Node Name for database
50
51 char loraMegaString[100]; // The combined string sent via LoRa
52

```

Εικόνα 4.50: Καθορισμός Μεταβλητών προγράμματος

Στην γραμμή 26 δημιουργούνται οι μεταβλητές `soil_temp_volts` και `soil_moist_volts`, στις οποίες αποθηκεύεται η αναλογική τιμή τάσης που καταγράφεται από τον ADC για τα κυκλώματα ανίχνευσης θερμοκρασίας και υγρασίας εδάφους αντίστοιχα. Στις γραμμές 27 και 28 ορίζονται οι μεταβλητές στις οποίες αποθηκεύεται η τελική τιμή θερμοκρασίας και υγρασίας για το έδαφος, μετά τους υπολογισμούς.

Οι γραμμές 30 ~ 32 αφορούν στις μεταβλητές που αποθηκεύονται οι τιμές θερμοκρασίας, υγρασίας και ατμοσφαιρικής πίεσης που λαμβάνουμε από τον αισθητήρα BME-280.

Στις γραμμές 34 και 35 δημιουργούμε τις μεταβλητές `revolutions` και `windSpeed` που αφορούν στον αριθμό των περιστροφών του ανεμόμετρου μέσα σε ένα λεπτό της ώρας, καθώς και την τελική τιμή που καταγράφεται ως ταχύτητα ανέμου, στο τέλος της διαδικασίας υπολογισμού.

Οι γραμμές 37 ~ 40 αφορούν στην σταθερά `mmPerPulse` που είναι η τιμή mm βροχής που έχει μετρηθεί ότι χωράνε σε κάθε δοχείο του βροχόμετρου, καθώς και τις μεταβλητές `pulses` και `mmTotal` που αντιστοιχούν στον αριθμό των ανατροπών των δοχείων του βροχόμετρου σε ένα λεπτό της ώρας και τα συνολικά χιλιοστά βροχής που έπεσαν μέσα σε αυτό το λεπτό, μετά το τέλος του υπολογισμού.

Στις γραμμές 41 ~ 49 καθορίζονται οι 9 μεταβλητές τύπου πίνακα `char`, οι οποίες είναι ουσιαστικά strings. Σε αυτές αποθηκεύονται οι τιμές των τελικών μεταβλητών, με σκοπό στη συνέχεια να τοποθετηθούν σε ένα μεγάλο string που θα αποτελεί το πακέτο δεδομένων που θα σταλεί με LoRa. Ιδιαίτερη προσοχή αξίζει να δώσουμε στην μεταβλητή `n_name`, η οποία είναι το όνομα του κόμβου που ορίζουμε, έτσι ώστε αν υπάρχουν πολλοί κόμβοι μέτρησης που συνδέονται σε έναν σταθμό βάσης, να μπορεί να είναι εύκολο να αναζητούνται δεδομένα για ένα μόνο κόμβο μέσα στην βάση δεδομένων, όπως θα δούμε παρακάτω. Επιπλέον, ορίζονται οι μεταβλητές τύπου πίνακα `char s_id` και `s_name` για παρόμοια χρήση.

Τέλος, στην γραμμή 51 ορίζεται το συνολικό string που θα συντεθεί από τα επιμέρους string των γραμμών 41 ~ 49.

4.6.7.2 Καθορισμός Εισόδων / Εξόδων και Έλεγχος Συνδέσεων περιφερειακών

Αφού οριστούν οι μεταβλητές, το πρόγραμμα εισέρχεται στην ρουτίνα `void_setup()`, η οποία όπως προαναφέραμε εκτελείται μία φορά, ενώ η `void_loop()` εκτελείται διαρκώς. Να αναφέρουμε εδώ ότι επειδή πραγματοποιούμε χρήση της λειτουργίας Deep Sleep του ESP32, απαιτείται η `void_loop()` να μείνει κενή, επομένως όλο το πρόγραμμα γράφεται στην `setup`. Λόγος γι' αυτό είναι ότι η ρουτίνα θα εκτελείται μόνο μια φορά πριν ο μικροελεγκτής μπει σε Deep Sleep.

Στην παρακάτω Εικόνα 4.51 γίνεται ο καθορισμός των ακίδων ως είσοδοι ή έξοδοι (γραμμές 54 ~ 60), έπειτα καθορίζεται η έναρξη της σειριακής επικοινωνίας με baud rate τα 115200 bps και πραγματοποιούνται οι έλεγχοι συνδέσεων των I2C συνδεδεμένων συσκευών, στις γραμμές 64 ~ 68 για τον αισθητήρα BME-280 και στις γραμμές 71 ~ 75 για τον μετατροπέα A/D ADS1015.

```

53 void setup() {
54     pinMode(ENABLE, OUTPUT); // 5V Enable Pin
55     pinMode(NORTH, INPUT); // North Wind Sensor Input
56     pinMode(EAST, INPUT); // East Wind Sensor Input
57     pinMode(WEST, INPUT); // West Wind Sensor Input
58     pinMode(SOUTH, INPUT); // South Wind Sensor Input
59     pinMode(RAIN, INPUT); // Rain Sensor Input
60     pinMode(WIND_SP, INPUT); // Wind Speed Sensor Input
61     Serial.begin(115200);
62
63     /*If BME280 fails to initialize*/
64     if (!bme.begin()) {
65         Serial.println("Could not find a valid BME280 sensor, check wiring!");
66         while (1);
67     }
68     else Serial.println("BME280 connected succesfully!");
69
70     /*If ADS1015 fails to initialize */
71     if (!ads.begin()) {
72         Serial.println("Failed to initialize ADS.");
73         while (1);
74     }
75     else Serial.println("ADS connected succesfully!");
76

```

Εικόνα 4.51: Καθορισμός Εισόδων / Εξόδων και Έλεγχος I²C συνδέσεων

Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί ο έλεγχος συνδέσεων είναι αρκετά απλός. Με την χρήση της απλής δομής `if – else` γίνεται ένας έλεγχος για το αν κάθε εξωτερική συσκευή ξεκινά σειριακή επικοινωνία. Αν δεν έχει ξεκινήσει η επικοινωνία εμφανίζεται αντίστοιχο μήνυμα σφάλματος και με μία πάντα αληθή συνθήκη το μήνυμα αυτό επαναλαμβάνεται, δημιουργώντας ατέρμονα βρόγχο. Αν η επικοινωνία έχει ξεκινήσει εμφανίζεται αντίστοιχο μήνυμα επιβεβαίωσης και το πρόγραμμα συνεχίζει παρακάτω.

```

77 /* LoRa Settings */
78 LoRa.setPins(ss, rst, dio0); //setup LoRa transceiver module
79
80 while (!LoRa.begin(433E6)) //433E6 - Asia, 866E6 - Europe, 915E6 - North America
81 {
82     Serial.println("LoRa not initialized!");
83     delay(500);
84 }
85 LoRa.setSyncWord(0xA5); // To synchronize transmitter and receiver modules
86 Serial.println("LoRa Initializing OK!");
87

```

Εικόνα 4.52: Ρυθμίσεις LoRa και έλεγχος SPI σύνδεσης

Στην Εικόνα 4.52 της προηγούμενης σελίδας, συγκεκριμένα στη γραμμή 78 του κώδικα γίνεται η κλήση της συνάρτησης `setPins()` της βιβλιοθήκης `LoRa.h`, όπου καθορίζονται οι ακίδες που δεν είναι σταθερές στις SPI συνδέσεις, όμως απαιτούνται για την επικοινωνία με το `SX1278 module`. Έπειτα, στις γραμμές 80 ~ 84 γίνεται ο έλεγχος της σειριακής επικοινωνίας μέσω του προτύπου SPI με το οποίο γίνεται η επικοινωνία μεταξύ του μικροελεγκτή και του συγκεκριμένου module. Τέλος, στην γραμμή 85 γίνεται κλήση της συνάρτησης `setSyncWord()` για να καθοριστεί η λέξη – κλειδί, στην προκειμένη περίπτωση η λέξη «0xA5». Η `Sync Word` χρησιμοποιείται στην επικοινωνία ενός πομπού και ενός δέκτη που χρησιμοποιούν `LoRa`. Αν η λέξη δεν είναι ίδια, τότε τα δεδομένα που θα λαμβάνονται είναι πλήρως κρυπτογραφημένα και δεν υπάρχει δυνατότητα ανάγνωσής τους ή επεξεργασίας τους.

4.6.7.3 Δομή Κύριας Ρουτίνας Προγράμματος

Μετά από τους ελέγχους των σειριακών συνδέσεων, το πρόγραμμα εισέρχεται στην «κύρια ρουτίνα». Το πρώτο μέρος αυτής της ρουτίνας φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 4.53. Να σημειωθεί ότι μέσα στην κύρια ρουτίνα καλούνται αρκετές υπορουτίνες κατά την ροή του προγράμματος, τις οποίες θα μελετήσουμε αφού πρώτα κάνουμε μία ανασκόπηση της δομής της κύριας ρουτίνας.

```

88  /* MAIN ROUTINE */
89  digitalWrite(ENABLE, HIGH); // 5V Enable
90  ads_readings(); // calls the ads_readings function
91  delay(1000);
92  bme_readings(); // calls the bme_readings function
93  delay(1000);
94
95  //RAIN DEPTH CALCULATION
96  Serial.println("Calculating Rain Depth...");
97  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(RAIN), rain_depth, CHANGE); // Begin Interrupt to find rain mm per minute
98  delay(60000);
99  detachInterrupt(RAIN); // End Interrupt
100 mmTotal = (pulses * mmPerPulse) * 60;
101 dtostrf(mmTotal, 4, 2, rainDepthString); // Float rainDepth to String conversion
102
103 Serial.print("Estimated Rain Depth: ");
104 Serial.print(mmTotal); Serial.println("mm/hr"); // Return estimated rain depth for next hour
105 pulses = 0;

```

Εικόνα 4.53: Κύρια Ρουτίνα Προγράμματος (1)

Στην γραμμή 89 γίνεται η ενεργοποίηση των ακίδων τροφοδοσίας +5V μέσω του Enable Pin, το οποίο συνδέεται στο αντίστοιχο pin του Solar Power Manager. Για την ενεργοποίηση, αρκεί απλά η αποστολή ενός σήματος HIGH.

Στην γραμμή 90 καλείται η υπορουτίνα `ads_readings()`, η οποία μας επιστρέφει τα δεδομένα (αναλογική τάση και θερμοκρασία / υγρασία εδάφους μετά από ανάλογο υπολογισμό) των αναλογικών αισθητήρων εδάφους που υλοποιήσαμε. Να υπενθυμίσουμε ότι τα σήματα αυτά μετατρέπονται σε ψηφιακή πληροφορία από το ολοκληρωμένο κύκλωμα `ADS1015` προτού εισέλθουν στην μνήμη του μικροελεγκτή.

Αντίστοιχα, στην γραμμή 92 καλείται η υπορουτίνα `bme_readings()`, στόχος της οποίας είναι η ανάγνωση των δεδομένων ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας, υγρασίας και πίεσης από τον αισθητήρα περιβάλλοντος `BME-280`.

Έπειτα, στις γραμμές 96 ~ 105 γίνεται ο υπολογισμός του αναμενόμενου ύψους βροχής για την επόμενη ώρα, με πολύ ενδιαφέρον τρόπο. Γίνεται χρήση του συστήματος `interrupt` του μικροελεγκτή, επομένως το κυρίως πρόγραμμα παγώνει στην γραμμή 97 για 60 δευτερόλεπτα. Στη διάρκεια του `interrupt`, το πρόγραμμα μεταβαίνει στην υπορουτίνα `rain_depth()`, η οποία είναι ένας counter που γράφει στην μεταβλητή `pulses` των αριθμό των φορών που υπήρχε αλλαγή (`CHANGE`) στην κατάσταση του σήματος της ακίδας `RAIN`. Στην ακίδα είναι συνδεδεμένος ο αισθητήρας `Hall` που υπάρχει μέσα στο βροχόμετρο.

Ο αισθητήρας αλλάζει κατάσταση κάθε φορά που συμβαίνει ανατροπή ενός δοχείου συλλογής νετού. Επομένως, το πρόγραμμα μετράει πόσες φορές έγινε ανατροπή των δοχείων αυτών σε διάρκεια 60 δευτερολέπτων. Ύστερα, πραγματοποιεί μία αναγωγή αυτής της ποσότητας νετού για τον υπολογισμό του αναμενόμενου ύψους βροχής μέσα στην επόμενη μία ώρα υποθέτοντας ότι η ένταση της βροχής θα παραμείνει σταθερή. Η αναγωγή αυτή γίνεται στην γραμμή 100. Στην γραμμή 101 χρησιμοποιείται η εντολή `dtostrf()`, η οποία πραγματοποιεί μετατροπή μίας float μεταβλητής σε string, συγκεκριμένα το `rainDepthString`, κρατώντας 2 δεκαδικά ψηφία και έχοντας μέγιστο μέγεθος 4 ψηφία. Τέλος, αφού γίνει η εμφάνιση της τιμής της μεταβλητής μέσω του Serial Monitor (γραμμές 103 ~ 104), στην γραμμή 105 γίνεται επαναφορά της μεταβλητής `pulses` στο 0, έτσι ώστε να μην επηρεάζονται οι υπόλοιπες μετρήσεις.

```

107   wind_direction(); // calls the windDirection function
108   delay(1000);
109
110   // WIND SPEED CALCULATION
111   Serial.println("Calculating Wind Speed...");
112   attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(WIND_SP), wind_speed_function, RISING);
113   // Begin Interrupt to find RPM of wind
114   delay(60000); // Stop everything for 60s
115   detachInterrupt(WIND_SP); // End Interrupt
116
117   windSpeed = revolutions * 60 * 3.14; // calculate RPM, π = 3.14
118   dtostrf(windSpeed, 4, 2, windSpeedString); // Float windSpeed to String conversion
119
120   Serial.print("Wind Speed: "); Serial.print(windSpeed); Serial.println(" km/h"); // Return windspeed
121   revolutions = 0;
122

```

Εικόνα 4.54: Κύρια Ρουτίνα Προγράμματος (2)

Στη γραμμή 107, όπως φαίνεται από την Εικόνα 4.54, γίνεται κλήση της συνάρτησης `wind_Direction()`, η οποία υπολογίζει την κατεύθυνση του ανέμου και αφού την εμφανίσει στο Serial Monitor, αποθηκεύει την string τιμή αυτή για μετέπειτα αποστολή.

Στις γραμμές 111 ~ 121 πραγματοποιείται υπολογισμός της ταχύτητας πνοών ανέμου, με αντίστοιχο τρόπο όπως και με τον υπολογισμό του ύψους βροχής, ήτοι με χρήση των interrupts. Η διαφοροποίηση έγκειται στην υπορουτίνα που χρησιμοποιείται, η οποία ονομάζεται `wind_speed_function()`. Μετράται ο αριθμός των μεταβολών στην τάση της ακίδας `WIND_SP` από κατάσταση `LOW` σε κατάσταση `HIGH`, χρησιμοποιώντας το όρισμα `RISING` αντί του ορίσματος `CHANGE`. Κι εδώ το interrupt διαρκεί 60 δευτερόλεπτα. Η υπορουτίνα `wind_speed_function()` που καλείται είναι κι αυτή ένας counter που μετράει τον αριθμό των περιστροφών του ανεμόμετρου και έπειτα αποθηκεύει τον αριθμό αυτό στη μεταβλητή `revolutions`. Ο υπολογισμός της ταχύτητας του ανέμου σε km/h γίνεται με την χρήση της σχέσης 4.13 που αναφέραμε στην υποενότητα 4.4.2.2, στην γραμμή 117 του κώδικα. Τέλος, στην γραμμή 118 η τιμή αυτή αποθηκεύεται στο string `windSpeedString`. Τέλος, αφού γίνει η εμφάνιση της τιμής της μεταβλητής στο Serial Monitor (γραμμή 120), γίνεται μηδενισμός της τιμής της μεταβλητής `revolutions` στην γραμμή 121, έτσι ώστε να μην υπάρχουν επιρροές σε επόμενη μέτρηση.

```

123   // LORA PACKET
124   loraMegaString_create(); // calls the loraMegaString_create function
125   lora_packet_send(); // calls the lora_packet_send function
126   Serial.println("LoRa packet sent!");
127   empty_strings(); // calls the empty_strings function
128   Serial.println("Strings are now empty.");
129   digitalWrite(ENABLE, LOW); // 5V Disable

```

Εικόνα 4.55: Κύρια Ρουτίνα Προγράμματος (3)

Στην Εικόνα 4.55 φαίνονται οι γραμμές κώδικα 123 ~ 126 όπου γίνεται η όλη διεργασία σχετικά με την αποστολή των πακέτων LoRa. Ειδικότερα, στην γραμμή 124 καλείται η υπορουτίνα `loraMegaString_create()`, η οποία είναι υπεύθυνη για την σύνθεση των επιμέρους `string` στα οποία έχουν αποθηκευτεί οι μεταβλητές από τις μετρήσεις σε ένα μεγάλο `string`, το οποίο ενσωματώνεται μέσα στο πακέτο LoRa. Στην γραμμή 125 καλείται η υπορουτίνα `lora_packet_send()`, η οποία είναι υπεύθυνη για την ενσωμάτωση και αποστολή του πακέτου LoRa που περιέχει το `MegaString`. Στην γραμμή 126 δίνεται η σύνθεση του `loraMegaString` για επιβεβαίωση στο Serial Monitor.

Στην γραμμή 127 καλείται μία ακόμη υπορουτίνα, η `empty_strings()`, η οποία φροντίζει να αδειάσει το περιεχόμενο των `string` μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκαν παραπάνω για την αποθήκευση των τιμών των διαφόρων μεταβλητών του προγράμματος. Στην επόμενη γραμμή υπάρχει επιβεβαίωση πραγματοποίησης της εργασίας αυτής στο Serial Monitor.

Έπειτα, στην γραμμή 129 στέλνουμε μέσω του Enable Pin ένα χαμηλό σήμα στο αντίστοιχο pin του Solar Power Manager, ώστε να απενεργοποιηθούν οι ακίδες τροφοδοσίας των +5V.

```

131 // DEEP SLEEP
132 Serial.println("Going to deep sleep...");
133 esp_sleep_enable_timer_wakeup(TIME_TO_SLEEP * uS_TO_S_FACTOR);
134 Serial.flush();
135 esp_deep_sleep_start();
136 }

```

Εικόνα 4.56: Κύρια Ρουτίνα Προγράμματος (4)

Με τον κώδικα των γραμμών 132 ~ 135 που φαίνεται στην Εικόνα 4.56, κλείνει η κύρια ρουτίνα του προγράμματος για τον κόμβο μέτρησης (transmitter). Στην γραμμή 133 χρησιμοποιείται η συνάρτηση `esp_sleep_enable_timer_wakeup()`, η οποία δέχεται ως όρισμα ένα χρονικό διάστημα σε ms για να επαναφέρει τον μικροελεγκτή σε κανονική λειτουργία μετά από κάποια κατάσταση `sleep`. Εδώ επιλέξαμε 7200 δευτερόλεπτα, δηλαδή 2 ώρες ύπνου. Στην γραμμή 134 αδειάζουμε τον buffer της σειριακής επικοινωνίας και τέλος στην γραμμή 135 καλούμε την συνάρτηση `esp_deep_sleep_start()`, η οποία θέτει τον μικροελεγκτή σε κατάσταση βαθέως ύπνου (deep sleep).

4.6.7.4 Υπορουτίνες `wind_speed_function()` και `rain_depth()`

Στις παρακάτω Εικόνες 4.57 και 4.58 φαίνεται ο κώδικας των 2 πανομοιότυπων ρουτίνων `wind_speed_function()` και `rain_depth()`, οι οποίες λειτουργούν ως αύξοντες counters που μετρούν περιστροφές του ανεμόμετρου και ανατροπές των δοχείων συλλογής βροχής αντίστοιχα. Στην δοκιμαστική λειτουργία του κυκλώματος, εισάγεται και μία γραμμή κώδικα η οποία εμφανίζει μία τελεία στο Serial Monitor για κάθε αύξηση της τιμής της μεταβλητής του counter (revolutions και pulses αντίστοιχα).

```

138 void loop() {}
139
140 void wind_speed_function() {
141     revolutions++;
142     Serial.print(".");
143 }

```

Εικόνα 4.57: Υπορουτίνα `wind_speed_functon()`

```

182
183 void rain_depth() {
184     // RAIN DEPTH SENSOR
185     pulses++;
186     Serial.print(".");
187 }

```

Εικόνα 4.58: Υπορουτίνα `rain_depth()`

4.6.7.5 Υπορουτίνα ads_readings()

Στην παρακάτω Εικόνα 4.59 έχουμε την δομή του κώδικα της υπορουτίνας ads_readings(), η οποία αναλαμβάνει την λήψη μέτρησης των αρχικά αναλογικών και στη συνέχεια ψηφιακών τιμών από το ολοκληρωμένο κύκλωμα ADS1015.

```

204 void ads_readings() {
205     soil_temp_volts = ads.computeVolts(ads.readADC_SingleEnded(0)); // Read volts of ADC channel 0
206     soil_moist_volts = ads.computeVolts(ads.readADC_SingleEnded(1)); // Read volts of ADC channel 1
207
208     Serial.print("Soil Temperature Voltage: "); Serial.print(soil_temp_volts,4); Serial.println(" V");
209     Serial.print("Soil Moisture Voltage: "); Serial.print(soil_moist_volts,4); Serial.println(" V");
210
211     soil_temp = -16.83369
212                 + (40.60419 * soil_temp_volts)
213                 + (13.4579 * pow(soil_temp_volts, 2))
214                 - (24.47073 * pow(soil_temp_volts, 3))
215                 + (7.944197 * pow(soil_temp_volts, 4));
216
217     if (soil_moist_volts > 4.0) {
218         Serial.println("Soil Moisture Sensor not properly placed!");
219         soil_moist = -10.0; // -10%, used as a sign for not properly placing the soil_moist sensor.
220     }
221     else if (soil_moist_volts < 3.0) {
222         Serial.println("The soil is too wet to calculate!");
223         soil_moist = 100.0; // 100%, used as a sign for too wet soil to calculate
224     }
225     else {
226         soil_moist = + 10372.697
227                     - (8521.883 * pow(soil_moist_volts, 1))
228                     + (82335.220 * pow(soil_moist_volts, 2))
229                     - (213.286 * pow(soil_moist_volts, 3));
230     }
231
232     Serial.print("Soil Temperature: "); Serial.print(soil_temp); Serial.println(" *C");
233     Serial.print("Soil Moisture: "); Serial.print(soil_moist); Serial.println(" %");
234     dtostrf(soil_temp, 4, 2, soilTempString); // Soil Temperature float to String conversion
235     dtostrf(soil_moist, 4, 2, soilMoistString); // Soil Moisture float to String conversion
236 }
237

```

Εικόνα 4.59: Υπορουτίνα ads_readings()

Ειδικότερα, στις γραμμές 205 και 206 του κώδικα γίνεται η λήψη της αναλογικής τιμής τάσης από τις ακίδες A0 και A1 του ολοκληρωμένου αντίστοιχα. Στις ακίδες αυτές συνδέονται κατ' αντιστοιχία η έξοδος του κυκλώματος ωμικού αισθητήρα θερμοκρασίας εδάφους στην A0 και η έξοδος του χωρητικού αισθητήρα υγρασίας εδάφους στην A1. Για να ορίσουμε ότι πρόκειται για μέτρηση ως προς την γείωση (system ground), χρησιμοποιούμε την μέθοδο readADC_SingleEnded(PIN_No) της βιβλιοθήκης <Adafruit_ADS1X15>.

Στις γραμμές 208 και 209 εμφανίζουμε αυτές τις τιμές αναλογικής τάσης που έχουν αποθηκευτεί στις μεταβλητές soil_temp_volts και soil_moist_volts στο Serial Monitor, έτσι ώστε να διαπιστώσουμε την ορθή λειτουργία του κυκλώματος σε δοκιμαστικό επίπεδο.

Έπειτα, στις γραμμές 211 ~ 216 γίνεται η αντιστοίχιση αυτής της μετρούμενης τιμής αναλογικής τάσης σε πραγματική τιμή θερμοκρασίας, βάσει της σχέσης 4.7 που προέκυψε στην υποενότητα 4.3.1 από την βαθμονόμηση του αισθητήρα σε εργαστηριακό περιβάλλον. Η χρήση της εντολής pow() που πραγματοποιεί ύψωση μεταβλητής σε δύναμη γίνεται χωρίς την εισαγωγή κάποιων επιπλέον βιβλιοθήκης που ενδεχομένως να απαιτείται σε άλλους μικροελεγκτές προγραμματιζόμενους με γλώσσες C / C++.

Το ιδιότυπο που παρατηρούμε στις γραμμές 217 ~ 224 είναι μία απλή δομή επιλογής `if – elseif` η οποία ουσιαστικά χρησιμοποιείται ως δικλείδα ασφαλείας για να εξασφαλίσει ότι η τιμή της αναλογικής τάσης που θα λάβουμε από τον χωρητικό αισθητήρα υγρασίας βρίσκεται εντός των ορίων μέτρησης του αισθητήρα. Όταν η τιμή δεν βρίσκεται εντός των ορίων αυτών, στην μεταβλητή `soil_moist` που αποθηκεύει το υπολογισμένο ποσοστό σχετικής υγρασίας εντός του μετρούμενου εδάφους αποθηκεύεται μία τιμή, η οποία μετά θα ερμηνευτεί στην βάση δεδομένων ως τιμή σφάλματος. Για παράδειγμα στην περίπτωση που η αναλογική τιμή τάσης ξεπερνά τα 4V, σημαίνει ότι ο αισθητήρας δεν έχει τοποθετηθεί σωστά στο έδαφος, καθώς η οριακή τιμή που μετρήσαμε κατά τη βαθμονόμηση του αισθητήρα σε πλήρως ξηρό χώμα ήταν 3.978V. Τότε η τιμή που αποθηκεύεται στην μεταβλητή `soil_moist` είναι -10, τιμή αδύνατη για ένα ποσοστό. Αυτή η τιμή ερμηνεύεται ως σφάλμα κατά την επεξεργασία των δεδομένων στη βάση και εμφανίζεται αντίστοιχο μήνυμα σφάλματος, όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο. Αντίστοιχα, όταν η τιμή αναλογικής τάσης είναι μικρότερη των 3V, τότε το έδαφος είναι πρακτικά λασπώδες, επομένως δεν μπορεί εύκολα να πραγματοποιηθεί μέτρηση σε αυτό. Στην βαθμονόμηση, η κατώτερη τιμή τάσης που καταγράφηκε ήταν 3.081V για 66.9% VWC. Σε αυτή την περίπτωση, η τιμή που αποθηκεύεται στην μεταβλητή `soil_moist` είναι 100% και ερμηνεύεται αντίστοιχα με την προηγούμενη περίπτωση ως σφάλμα.

Στις γραμμές 225 ~ 230 βρίσκεται γραμμένη η τελευταία περίπτωση της δομής επιλογής (`else`), στην οποία πραγματοποιείται η αντιστοίχιση της αναλογικής τιμής τάσης που αποθηκεύτηκε στην μεταβλητή `soil_moist_volts` με την τιμή σχετικής υγρασίας εδάφους, βάσει της σχέσης 4.10 που προέκυψε από την βαθμονόμηση του αισθητήρα στην υποενότητα 4.3.2.5.

Στις γραμμές 232 και 233 γίνεται η εμφάνιση των τιμών των μεταβλητών `soil_temp` και `soil_moist` στο Serial Monitor, χρήσιμη κατά την δοκιμαστική λειτουργία του συστήματος.

Τέλος, στις γραμμές 234 και 235 γίνεται η μετατροπή αυτών των τιμών σε `string`, έτσι ώστε στην συνέχεια να ενσωματωθούν στο `MegaString` που θα αποσταλεί στον `receiver` ως πακέτο LoRa.

4.6.7.6 Υπορουτίνα `bme_readings()`

Στην παρακάτω Εικόνα 4.60 παρατίθεται ο κώδικας που χρησιμοποιείται στην υπορουτίνα `bme_readings()`, η οποία χρησιμοποιείται για την ανάγνωση των τιμών ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας, υγρασίας και πίεσης από τον αισθητήρα περιβάλλοντος BME-280, καθώς και την αποθήκευση αυτών των τιμών σε αντίστοιχα `strings`.

```

189 void bme_readings() {
190     air_temp = bme.readTemperature(); // reads temperature in Celsius;
191     air_humid = bme.readHumidity(); // reads absolute humidity;
192     air_press = (bme.readPressure() / 100.0F); // reads pressure in hPa (hectoPascal = millibar);
193
194     dtostrf(air_temp, 4, 2, airTempString); // Air Temperature float to String conversion
195     dtostrf(air_humid, 4, 2, airHumidString); // Air Humidity float to String conversion
196     dtostrf(air_press, 4, 2, airPressString); // Air Pressure float to String conversion
197
198     Serial.print("Air Temp: "); Serial.print(air_temp); Serial.println(" *C");
199     Serial.print("Humidity: "); Serial.print(air_humid); Serial.println(" %");
200     Serial.print("Pressure: "); Serial.print(air_press); Serial.println(" hPa");
201     Serial.println();
202 }

```

Εικόνα 4.60: Υπορουτίνα `bme_readings()`

Ειδικότερα, στις γραμμές 190 ~ 192 γίνεται η ανάθεση των τιμών του αισθητήρα με τις αντίστοιχες μεθόδους `readTemperature()`, `readHumidity()` και `readPressure()` της βιβλιοθήκης `<Adafruit_BME280.h>`. Η ανάθεση των τιμών αυτών γίνεται στις μεταβλητές `air_temp`, `air_humid` και

air_press αντίστοιχα. Αναφορικά με την τιμή της ατμοσφαιρικής πίεσης, επειδή η μέτρησή της γίνεται σε μονάδα Pascal, απαιτείται να γίνει μία διαίρεση με το 100 για την μετατροπή της σε hPa.

Έπειτα, στις γραμμές 194 ~ 196 με τη χρήση της εντολής dtostrf() γίνεται η μετατροπή των float τιμών των 3 προαναφερθέντων μεταβλητών σε strings, τα οποία έπειτα χρησιμοποιούνται για την σύνθεση του string που θα μεταδοθεί μέσω LoRa.

Τέλος, στις γραμμές 198 ~ 201 γίνεται η εμφάνιση των τιμών των μεταβλητών στο Serial Monitor, χρήσιμο κατά την δοκιμαστική λειτουργία του κυκλώματος.

4.6.7.7 Υπορουτίνα wind_direction()

Στην παρακάτω Εικόνα 4.61 υπάρχει ο κώδικας της υπορουτίνας wind_direction(), σκοπός της οποίας είναι με βάση τα δεδομένα από τους αισθητήρες Hall του ανεμοδείκτη, να υπολογίσει την κατεύθυνση από την οποία πνέει ο άνεμος.

```

145 void wind_direction() {
146     // WIND DIRECTION SENSOR
147
148     if (digitalRead(NORTH) == LOW && digitalRead(EAST) == HIGH && digitalRead(WEST) == HIGH && digitalRead(SOUTH) == HIGH) {
149         strcpy(windDirection, "NORTH");
150     }
151
152     else if (digitalRead(NORTH) == LOW && digitalRead(EAST) == LOW && digitalRead(WEST) == HIGH && digitalRead(SOUTH) == HIGH) {
153         strcpy(windDirection, "NORTHEAST");
154     }
155
156     else if (digitalRead(NORTH) == LOW && digitalRead(EAST) == HIGH && digitalRead(WEST) == LOW && digitalRead(SOUTH) == HIGH) {
157         strcpy(windDirection, "NORTHWEST");
158     }
159
160     else if (digitalRead(EAST) == LOW && digitalRead(NORTH) == HIGH && digitalRead(WEST) == HIGH && digitalRead(SOUTH) == HIGH) {
161         strcpy(windDirection, "EAST");
162     }
163
164     else if (digitalRead(SOUTH) == LOW && digitalRead(EAST) == LOW && digitalRead(WEST) == HIGH && digitalRead(SOUTH) == HIGH) {
165         strcpy(windDirection, "SOUTHEAST");
166     }
167
168     else if (digitalRead(SOUTH) == LOW && digitalRead(EAST) == HIGH && digitalRead(WEST) == HIGH && digitalRead(NORTH) == HIGH) {
169         strcpy(windDirection, "SOUTH");
170     }
171
172     else if (digitalRead(SOUTH) == LOW && digitalRead(EAST) == HIGH && digitalRead(WEST) == LOW && digitalRead(NORTH) == HIGH) {
173         strcpy(windDirection, "SOUTHWEST");
174     }
175
176     else if (digitalRead(WEST) == LOW && digitalRead(NORTH) == HIGH && digitalRead(SOUTH) == HIGH && digitalRead(NORTH) == HIGH) {
177         strcpy(windDirection, "WEST");
178     }
179     else {strcpy(windDirection, "UNKNOWN");} // Fallsafe
180     Serial.print("Wind Direction: "); Serial.println(windDirection);
181 }

```

Εικόνα 4.61: Υπορουτίνα wind_direction()

Η συγκεκριμένη υπορουτίνα είναι ουσιαστικά μία τεράστια δομή επιλογής (if – elseif – else), αποτέλεσμα της οποίας είναι η καταγραφή της κατεύθυνσης από την οποία πνέει ο άνεμος στο string windDirection, με τη χρήση της εντολής strcpy(). Όπως αναφέραμε και στην υποενότητα που εξεγήσαμε την λειτουργία των αισθητήρων Hall που χρησιμοποιούνται στον ανεμοδείκτη, ουσιαστικά καταφέρνουμε να αναγνωρίσουμε τους 8 κυριότερους ανέμους. Λόγω της Active Low λογικής που έχουν οι αισθητήρες, δηλαδή διεγερμένοι εμφανίζουν στην έξοδο λογικό σήμα LOW, για να υπολογίσουμε την κατεύθυνση του ανέμου βάσει των σημάτων που λαμβάνουμε από τις μεταβλητές χρησιμοποιούμε την λογική του παρακάτω Πίνακα 4.18, ο οποίος λειτουργεί σαν πίνακας αληθείας. Η τελευταία περίπτωση της γραμμής κώδικα 179 λειτουργεί ως δικλείδα ασφαλείας σε περίπτωση που ο ανεμοδείκτης ή ο μαγνήτης του παρουσιάσει φθορά. Επιπλέον, έτσι μπορεί εύκολα να γίνει αντιληπτή

η φθορά κάποιου αισθητήρα Hall, καθώς σε περίπτωση ταυτόχρονης εμφάνισης τριών σημάτων LOW, υπάρχει σφάλμα.

Πίνακας 4.18: Κατάσταση Αισθητήρων Hall για την ανίχνευση κάθε ανέμου

	<i>NORTH</i>	<i>EAST</i>	<i>WEST</i>	<i>SOUTH</i>
Βόρειος	LOW	HIGH	HIGH	HIGH
Βορειοανατολικός	LOW	LOW	HIGH	HIGH
Βορειοδυτικός	LOW	HIGH	LOW	HIGH
Ανατολικός	HIGH	LOW	HIGH	HIGH
Νοτιοανατολικός	HIGH	LOW	HIGH	LOW
Νότιος	HIGH	HIGH	HIGH	LOW
Νοτιοδυτικός	HIGH	HIGH	LOW	LOW
Δυτικός	HIGH	HIGH	LOW	HIGH

4.6.7.8 Υπορουτίνα loraMegaString_create()

Στην παρακάτω Εικόνα 4.62 υπάρχει ο κώδικας της υπορουτίνας loraMegaString_create(), η οποία έχει ως στόχο να συνθέσει το λεγόμενο loraMegaString. Το string αυτό περιλαμβάνει όλη την πληροφορία που θα ενσωματωθεί στο πακέτο LoRa προς μετάδοση.

```

239 void loraMegaString_create() {
240     strcpy(loraMegaString, soilTempString); strcat(loraMegaString, ";");
241     strcat(loraMegaString, soilMoistString); strcat(loraMegaString, ";");
242     strcat(loraMegaString, airTempString); strcat(loraMegaString, ";");
243     strcat(loraMegaString, airHumidString); strcat(loraMegaString, ";");
244     strcat(loraMegaString, airPressString); strcat(loraMegaString, ";");
245     strcat(loraMegaString, rainDepthString); strcat(loraMegaString, ";");
246     strcat(loraMegaString, windSpeedString); strcat(loraMegaString, ";");
247     strcat(loraMegaString, windDirection); strcat(loraMegaString, ";");
248     strcat(loraMegaString, n_name); strcat(loraMegaString, ";");
249     strcat(loraMegaString, s_id); strcat(loraMegaString, ";");
250     strcat(loraMegaString, s_name); |

```

Εικόνα 4.62: Υπορουτίνα loraMegaString_create()

Η λογική της συγκεκριμένης υπορουτίνας είναι αρκετά απλή. Αφού έχουμε δημιουργήσει ένα κενό char πίνακα 130 θέσεων με όνομα loraMegaString, χρησιμοποιούμε την εντολή strcpy() για να τοποθετήσουμε το περιεχόμενο ενός string σε ένα άλλο string και την strcat() επίσης για τον ίδιο σκοπό, με την διαφορά ότι η strcat() δεν διαγράφει ότι άλλο υπάρχει μέσα στο string που θα γίνει η αντιγραφή, απλώς συνεχίζει να τοποθετεί το νέο περιεχόμενο στις επόμενες θέσεις. Έτσι, καταλήγουμε ότι το loraMegaString έχει την παρακάτω μορφή:

```
loraMegaString[] = {soilTempString;soilMoistString;airTempString;airHumidString;airPressString;
raindepthString;windSpeedString;windDirection;n_name;s_id;s_name}
```

4.6.7.9 Υπορουτίνα lora_packet_send()

Στην Εικόνα 4.63 της επόμενης σελίδας υπάρχει ο κώδικας της υπορουτίνας που αναλαμβάνει την αποστολή του πακέτου LoRa στο οποίο ενσωματώνεται το loraMegaString που δημιουργήθηκε στην αμέσως προηγούμενη υπορουτίνα.

```

250 void lora_packet_send() {
251     Serial.print("Sending packet... ");
252
253     LoRa.beginPacket(); //Send LoRa packet to receiver
254     LoRa.print(loraMegaString);
255     LoRa.endPacket();
256     memset(loraMegaString, 0, sizeof loraMegaString); // Empty the loraMegaString array
257
258     delay(10000);
259 }

```

Εικόνα 4.63: Υπορουτίνα lora_packet_send()

Στην γραμμή 253 δίνεται η εντολή beginPacket() της βιβλιοθήκης <LoRa.h>, η οποία στέλνει σήμα ετοιμότητας στο LoRa module μέσω SPI σύνδεσης.

Έπειτα, στην γραμμή 254 δίνεται η εντολή print() της ίδιας βιβλιοθήκης, στην οποία ενσωματώνουμε ό,τι περιεχόμενο θέλουμε να βρίσκεται μέσα στο πακέτο, στην προκειμένη περίπτωση το loraMegaString.

Στην γραμμή 255 δίνεται η εντολή endPacket() της ίδιας βιβλιοθήκης, με την χρήση της οποίας στέλνουμε σήμα για την ολοκλήρωση της επικοινωνίας με το LoRa module. Από εκεί και πέρα, η διαμόρφωση και αποστολή του πακέτου είναι στην ευθύνη του LoRa module.

Τέλος, στην γραμμή 256 δίνεται η εντολή memset(string, 0, sizeof string), η οποία έχει ως αποτέλεσμα όλα τα κελιά του string στο οποίο αναφέρεται να μηδενίζονται. Αυτή η εντολή χρησιμοποιείται για να αδειάζουμε strings.

Να ανφέρουμε εδώ ότι η καθυστέρηση που δίνεται στην γραμμή 258 έχει διάρκεια 10 δευτερόλεπτα και αφορά στην ασφαλή λήψη του πακέτου από τον σταθμό βάσης προτού το πρόγραμμα συνεχίσει στην επόμενη υπορουτίνα.

4.6.7.10 Υπορουτίνα empty_strings()

```

261 void empty_strings() {
262     memset(soilTempString, 0, sizeof soilTempString); // Resets the soilTempString
263     memset(soilMoistString, 0, sizeof soilMoistString); // Resets the soilMoistString
264     memset(airTempString, 0, sizeof airTempString); // Resets the airTempString
265     memset(airHumidString, 0, sizeof airHumidString); // Resets the airHumidString
266     memset(airPressString, 0, sizeof airPressString); // Resets the airPressString
267     memset(rainDepthString, 0, sizeof rainDepthString); // Resets the rainDepthString
268     memset(windSpeedString, 0, sizeof windSpeedString); // Resets the windSpeedString
269     memset(windDirection, 0, sizeof windDirection); // Resets the windDirection

```

Εικόνα 4.64: Υπορουτίνα empty_strings()

Στην Εικόνα 4.64 δίνεται ο κώδικας της υπορουτίνας empty_strings(), η οποία έχει ως στόχο τον μηδενισμό των περιεχομένων όλων των κελιών από τα string που περιείχαν μεταβλητές. Η διαδικασία είναι πανομοιότυπη με την γραμμή 256 της προηγούμενης υπορουτίνας, χρησιμοποιώντας την εντολή memset().

4.7 Υλοποίηση Τυπωμένου Κυκλώματος Συστήματος Μέτρησης

Έπειτα από την διαδικασία της δοκιμαστικής λειτουργίας του κυκλώματος και αφού βεβαιωθούμε ότι τα αποτελέσματα μας ικανοποιούν, απαιτούμενη είναι η υλοποίηση του τελικού τυπωμένου κυκλώματος (Printed Circuit Board / PCB) για το σύστημα που περιγράφεται παραπάνω και αφορά στην μετάδοση περιβαλλοντικών δεδομένων από το έδαφος και τον αέρα.

4.7.1 Γενικές Πληροφορίες σχετικά με τα PCB

Με τον όρο τυπωμένο κύκλωμα εννοείται μία λεπτή μονωτική πλάκα που πάνω στην μία ή και στις δύο πλευρές της βρίσκονται οι καλωδιώσεις μεταξύ των στοιχείων ενός κυκλώματος. Αναλόγως σε πόσες από τις πλευρές της πλάκας υπάρχουν οι καλωδιώσεις αυτές, καθορίζει και τον αριθμό των λεγόμενων «όψεων» της πλακέτας. Μία πλακέτα δύναται να απαρτίζεται από αρκετές στρώσεις μονωτικών πλακών που έχουν στην μία ή και στις δύο όψεις τους διασυνδέσεις κυκλωμάτων. Οι πλακέτες αυτές ονομάζονται πολυστρωματικές και χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην εποχή μας, ιδίως ως μητρικές υπολογιστών και εξοπλισμούς τηλεπικοινωνιών. [112]

Στόχος των τυπωμένων κυκλωμάτων είναι να μειώσουν τον όγκο καλωδίωσης που επιφέρουν οι πολύπλοκες διασυνδέσεις σε κυκλώματα με μεγάλο αριθμό υλικών, ενώ ταυτόχρονα με την έξυπνη διαχείριση και τη δυνατότητα χρήσης πολλών όψεων μειώνεται ο απαιτούμενος χώρος ανάπτυξης του κυκλώματος. Επιπροσθέτως, δημιουργεί μία πιο ευπαρουσίαστη εικόνα στον τελικό χρήστη αντί για ένα γενικευμένο χάος αγωγών που συνδέονται μεταξύ τους ή και με διάφορα υλικά.

Η ανατομία κάθε PCB περιλαμβάνει τα εξής επίπεδα που φαίνονται και στην Εικόνα 4.65:

Υπόστρωμα (Substrate): Είναι το μονωτικό υλικό που περιγράφηκε παραπάνω. Στις σύγχρονες συνθέσεις χρησιμοποιείται ένα εποξειδικό έλασμα ενισχυμένο με υαλοβάμβακα που ονομάζεται FR4. [114]

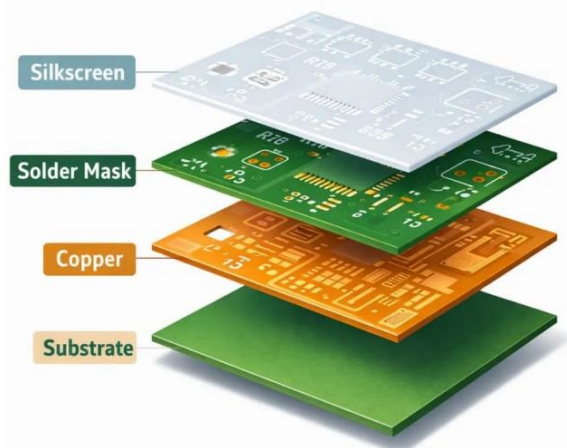
Στρώμα Χαλκού (Copper): Είναι το στρώμα που χαράσσεται ώστε να δημιουργηθούν οι αγωγίμες γραμμές διασύνδεσης των στοιχείων.

Στρώμα Μάσκας Συγκόλλησης (Solder Mask): Είναι το στρώμα που ξεχωρίζει σε κάθε πλακέτα και της δίνει το ιδιαίτερο χρώμα της, είτε αυτό είναι πράσινο, μπλε, κόκκινο κ.ο.κ. Στόχος του είναι η προστασία του χαλκού από τις οξειδώσεις αλλά και να αποτρέψει τις ανεπιθύμητες γέφυρες συγκόλλησης που οδηγούν σε βραχυκυκλώματα.

Στρώμα Μεταξοτυπίας (Silkscreen): Είναι το συνήθως λευκό στρώμα κειμένου και συμβόλων που τυπώνεται πάνω στην πλακέτα ώστε να βοηθήσει στην επισήμανση των σημείων τοποθέτησης του κάθε υλικού, αλλά και την πολικότητα ή την φορά με την οποία πρέπει αυτά να τοποθετηθούν. Είναι ένας «χάρτης» για την συναρμολόγηση του κυκλώματος.

Ένα τυπωμένο κύκλωμα που διαθέτει δύο όψεις, ουσιαστικά περιλαμβάνει δύο στρώματα χαλκού εκατέρωθεν του substrate, και κάθε ένα από αυτά τα στρώματα χαλκού περιλαμβάνει το δικό του στρώμα solder mask και silkscreen. Συνήθως σε μία τέτοια πλακέτα, τα υλικά τοποθετούνται από την μία πλευρά, συνήθως την πάνω, ενώ ενδεχομένως υπάρχουν διασυνδέσεις και στις δύο όψεις, εφόσον μιλάμε για πλακέτες με υλικά τύπου through – hole (THT) και όχι SMD.

Έπειτα, για να τοποθετηθούν τα υλικά απαιτείται η διάνοιξη ορισμένων οπών στο υπόστρωμα και η τοποθέτηση αγωγίμων πεδίων γύρω από αυτές, έτσι ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί κασσίτερος (καλάι) και να στερεοποιηθεί το υλικό στην οπή, καθώς και να υπάρχει αγωγή μεταξύ του καναλιού χαλκού και του υλικού.



Εικόνα 4.65: Ανατομία ενός απλού PCB [113]

Για τα υλικά SMD τα πράγματα αλλάζουν, ωστόσο δεν μας απασχολούν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, εφ' όσον κάνουμε στο κύκλωμα χρησιμοποιούνται μόνο THT υλικά.

Για να πραγματοποιηθεί μία σύνδεση μεταξύ των δύο στρωμάτων χαλκού σε περιπτώσεις που έχουμε πλακέτες δύο όψεων. χρησιμοποιείται μία ειδικού τύπου οπή, η οποία ονομάζεται via, δηλαδή σε ελεύθερη μετάφραση «διαμέσου οπή». Η διαφορά αυτού του τύπου οπής με τις κοινές οπές είναι ότι γύρω της δεν τοποθετείται pad στο οποίο να μπορεί να πραγματοποιηθεί κόλληση με καλάι.

4.7.2 Διαδικασία Σχεδίασης του PCB με χρήση προγράμματος Altium Designer

Σε παλαιότερες εποχές, η σχεδίαση των PCB γινόταν στο χέρι, σε ρυζόχαρτα και μετέπειτα σε ειδικές διαφάνειες, οι οποίες χρησιμοποιούνταν έτσι ώστε να αποτυπωθούν σε φύλλα χαλκού οι αγωγίμες γραμμές του κυκλώματος. Με την κατάλληλη διεργασία και χρήση χημικών αντιδράσεων γίνεται αποχάλκωση στην υπόλοιπη διαφάνεια, αφήνοντας τον χαλκό άθικτο μόνο στα σημεία που βρίσκονται οι επιθυμητές γραμμές.

Πλέον, η διαδικασία δεν απαιτεί τόσο μεγάλη τεχνογνωσία από πλευράς σχεδιασμού. Για απλά κυκλώματα, αρκεί η εξοικείωση του χρήστη με κάποια σουίτα προγραμμάτων ηλεκτρονικής, όπως η KiCad που είναι cross platform (η κυρίως χρησιμοποιούμενη για χρήστες Linux), η Cadence της OrCAD, η EasyEDA που διατίθεται μέσω απλού φυλλομετρητή διαδικτύου, καθώς και η περισσότερο χρησιμοποιούμενη στον επαγγελματικό χώρο Altium Designer.

Εμείς συγκεκριμένα θα κάνουμε χρήση του Altium Designer που προσφέρει ποικίλες δυνατότητες προσομοίωσης κυκλωμάτων καθώς και δημιουργία τυπωμένου κυκλώματος. Η συγκεκριμένη σουίτα δεν αποτελεί ελεύθερο λογισμικό, ωστόσο διατίθεται η δυνατότητα χρήσης ακαδημαϊκής άδειας σε φοιτητές πανεπιστημίων.

Στο περιβάλλον της σουίτας προγραμμάτων, θα χρειαστεί να πραγματοποιήσουμε σχεδίαση ολόκληρου του κυκλώματος που θα τοποθετηθεί στην πλακέτα, κι έπειτα μας δίνεται η δυνατότητα τοποθέτησης των υλικών πάνω σε πλακέτα, ορίζοντας το μέγεθος και το σχήμα που εμείς επιθυμούμε. Περαιτέρω, έχουμε την δυνατότητα χρήσης εργαλείου αυτόματης χάραξης των γραμμών με βάση το σχηματικό ή να προχωρήσουμε σε χειροκίνητη χάραξη.

Το ενδιαφέρον με το συγκεκριμένο πρόγραμμα είναι πως κατά τη διάρκεια τοποθέτησης υλικών στο σχηματικό, μας επιτρέπει να αναζητήσουμε τα υλικά αυτά μέσω του εργαλείου «Manufacturer Part Search» χρησιμοποιώντας έτοιμους κωδικούς που δίνουν οι μεγάλες εταιρείες προμήθειας ηλεκτρονικού υλικού, όπως είναι η Mouser. Με το συγκεκριμένο εργαλείο, όχι μόνο μπορούμε να πραγματοποιήσουμε ακριβέστερες προσομοιώσεις απ' αυτές του PSpice της Cadence, αλλά ενδεχομένως να υπάρχουν έτοιμα και τα 3D μοντέλα των υλικών, έτσι ώστε να μπορούν απευθείας να τοποθετηθούν πάνω στην πλακέτα, χωρίς να απαιτηθεί μεγάλος κόπος και μετρήσεις των διαστάσεών τους από εμάς.

Φυσικά, ακόμη και να μην υπάρχουν περασμένα στις βιβλιοθήκες του προγράμματος τα 3D μοντέλα των υλικών, πολύ συχνά διατίθενται σε ιστοσελίδες βιβλιοθηκών, όπως είναι η Ultra Librarian που παρέχει τα μοντέλα για όλες τις προαναφερθέντες σουίτες προγραμμάτων δωρεάν. Ο χρήστης με μία απλή αναζήτηση μπορεί να κατεβάσει τα αρχεία αυτά και να τα εισάγει με εύκολο τρόπο στην εκάστοτε σουίτα που χρησιμοποιεί, καθώς υπάρχουν διαθέσιμοι Import Wizards σε κάθε μία απ' αυτές.

Έτσι λοιπόν, αφού έχουμε προμηθευθεί τα υλικά του κυκλώματος από το προηγούμενο στάδιο που πραγματοποιήσαμε δοκιμαστικές λειτουργίες του κυκλώματος στο ράστερ, αναζητήσαμε τους

κωδικούς του κάθε υλικού από την Mouser χρησιμοποιώντας το παραπάνω εργαλείο και τοποθετήσαμε όλα τα υλικά δημιουργώντας ξανά ένα νέο σχηματικό, αυτό του παραρτήματος Α της εργασίας.

Τα ονόματα των υλικών στο σχηματικό είναι και τα ονόματα που θα εμφανίζονται ως κείμενο στο silkscreen layer της πλακέτας που θα δημιουργηθεί.

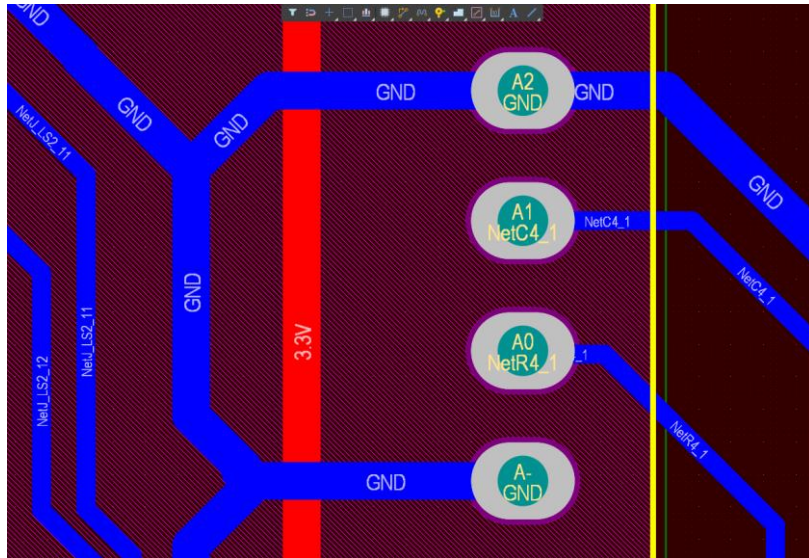
Στη συνέχεια, αφού έχουμε ολοκληρώσει το σχηματικό και τις διασυνδέσεις, μπορούμε αυτόματα να δημιουργήσουμε ένα νέο τύπο αρχείου στο Project μας, το οποίο περιγράφει το PCB που θα δημιουργηθεί. Ανοίγοντας το αρχείο αυτό, παρατηρούμε ότι είναι αρχικά κενό, ωστόσο μέσω της επιλογής «Update PCB Document» τα υλικά που έχουμε επιλέξει τοποθετούνται αυτόματα στο νέο αρχείο.

Βασικό βήμα πριν κάνουμε οτιδήποτε είναι να ορίσουμε ένα αρχικό μέγεθος και σχήμα πλακέτας, δημιουργώντας ένα ειδικό Mechanical Layer τύπου Board Outline, το οποίο θα χρειαστεί αργότερα. Αυτό είναι το στρώμα που περιγράφει τις διαστάσεις και το μέγεθος κοπής της μονωτικής πλάκας. Φροντίζουμε έτσι ώστε το εμβαδόν της πλάκας να καλύπτεται επαρκώς από τα υλικά μας, ώστε να μην υπάρχει μεγάλος κενός χώρος αλλά ταυτόχρονα να υπάρχει δυνατότητα να χαραχτούν οι απαιτούμενες αγωγίμες γραμμές χωρίς κινδύνους βραχυκύκλωσης.

Αφού τοποθετήσουμε τα υλικά πάνω στην πλάκα, μπορούμε με τη χρήση των αριθμητικών πλήκτρων 1, 2 και 3 να εναλλάσσουμε τον τρόπο προβολής στο αρχείο PCB. Το πλήκτρο 1 χρησιμοποιείται για δισδιάστατη προβολή της πλακέτας, το 2 μας δείχνει το multilayer view απ' όπου μπορούμε να δούμε όσα από τα layers της πλακέτας θέλουμε κάθε φορά (silkscreen, soldermask, top copper, bottom copper, mechanical κλπ.). Τέλος, με το πλήκτρο 3 μπορούμε να δούμε την τρισδιάστατη απεικόνιση της πλακέτας κάνοντας χρήση των 3D μοντέλων που υπάρχουν για τα υλικά που φορτώσαμε.

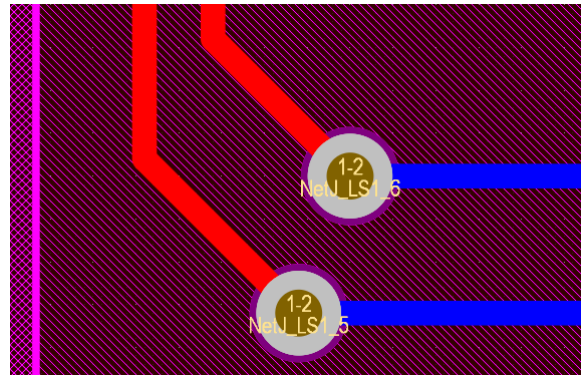
Έπειτα, με τη χρήση του εργαλείου «Design Rule Check» μπορούμε να ορίσουμε ένα συγκεκριμένο πάχος για τις αγωγίμες γραμμές, καθώς και άλλες επιλογές σχετικά με τις αποστάσεις μεταξύ τους, το σχήμα τους, το μέγεθος των pads πάνω στην πλακέτα και τέλος τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται οι γωνίες των αγωγίμων γραμμών. Γενικώς, αποφεύγεται πάντα η χρήση οξέων γωνιών και σε κάποιες περιπτώσεις και ορθών. Επιπλέον, συνίσταται το πάχος των γραμμών να είναι τουλάχιστον 0.1 mm ώστε να μπορούν να αποτυπώνονται σωστά. Σχετικά με τα pads, καλό είναι να έχουν ένα σχήμα σταδίου, ώστε να υπάρχει ικανή επιφάνεια στην οποία να μπορεί να απλωθεί σωστότερα το καλί κατά την κόλληση. Αυτά που αναφέρουμε ως οδηγίες μπορούμε να τα δούμε και στην Εικόνα 4.66 της επόμενης σελίδας, που είναι από την multilayer απεικόνιση της πλακέτας που σχεδιάσαμε στο πρόγραμμα.

Για να χαράξουμε τις γραμμές, το πρόγραμμα μας δείχνει πάνω στην πλακέτα ποιο υλικό πρέπει να συνδεθεί με ποιο, βάσει του σχηματικού που δημιουργήσαμε στην αρχή. Έτσι, με κατάλληλες μεθόδους και τοποθέτηση των υλικών, μπορούμε εύκολα να καταλήξουμε στο τελικό σχέδιο των γραμμών της πλακέτας. Συνίσταται το πάχος των γραμμών να είναι μεγαλύτερο σε γραμμές τύπου Power ή Ground απ' ότι σε γραμμές με σήματα Data. Αυτό διακρίνεται και στην παρακάτω Εικόνα 4.66, καθώς οι γραμμές GND και 3.3V που διακρίνονται έχουν μεγαλύτερο πάχος από τις υπόλοιπες. Για εύκολο υπολογισμό του πάχους των γραμμών, υπάρχουν έτοιμα υπολογιστικά εργαλεία διαθέσιμα στο διαδίκτυο, όπως είναι αυτό της DigiKey [115].

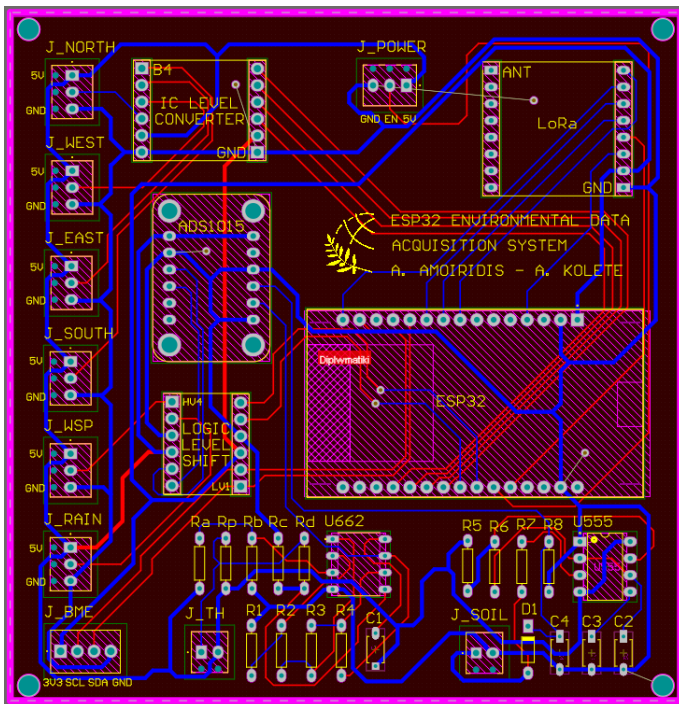


Εικόνα 4.66: Τμήμα της Multilayer απεικόνισης της πλακέτας από το Altium Designer. Διακρίνονται διακλαδώσεις γραμμών με αμβλείες γωνίες και pads σε σχήμα σταδίου.

Σχετικά με τα επίπεδα χάραξης των γραμμών, σε πλακέτες με THT υλικά δεν έχει σημασία σε ποια από τις δύο πλευρές τοποθετούμε τις γραμμές, αν και γενικά προτιμάται να ξεκινήσουμε να τοποθετούμε σε μία μόνο πλευρά και όταν εξαντλήσουμε τον χώρο να αρχίσουμε να τοποθετούμε γραμμές και στην άλλη. Σε περιπτώσεις που πρέπει αναγκαστικά να περάσουμε μία αγωγική γραμμή από την πάνω πλευρά της πλακέτας στην κάτω θα τοποθετήσουμε ένα νία, όπως είπαμε και παραπάνω. Το νία θα έχει τη μορφή της διπλανής Εικόνας 4.67, η οποία είναι από τη multilayer απεικόνιση της πλακέτας μας.



Εικόνα 4.67: Δύο οπές νία της πλακέτας

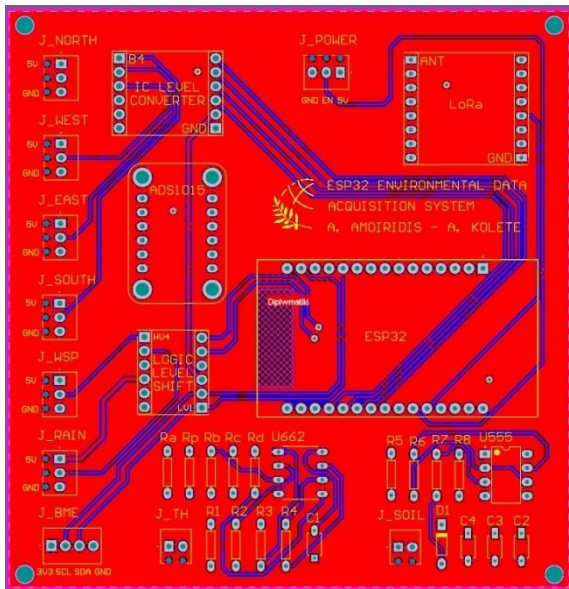


Στην διπλανή Εικόνα 4.68, δίνεται το συνολικό σχέδιο της πλακέτας μετά τη χάραξη όλων των γραμμών. Οι γραμμές που βρίσκονται στο άνω στρώμα χαλκού της πλακέτας είναι αυτές με κόκκινο χρώμα, ενώ οι γραμμές που βρίσκονται στο κάτω στρώμα χαλκού είναι αυτές με το μπλε χρώμα. Με κίτρινο χρώμα παρατηρούμε τα designators των στοιχείων, τα οποία αποτελούν το silkscreen στρώμα στην άνω πλευρά της πλακέτας, ενώ το τετράγωνο σχήμα που περιβάλλει την πλακέτα με έντονο ροζ χρώμα είναι το layer του Board Outline.

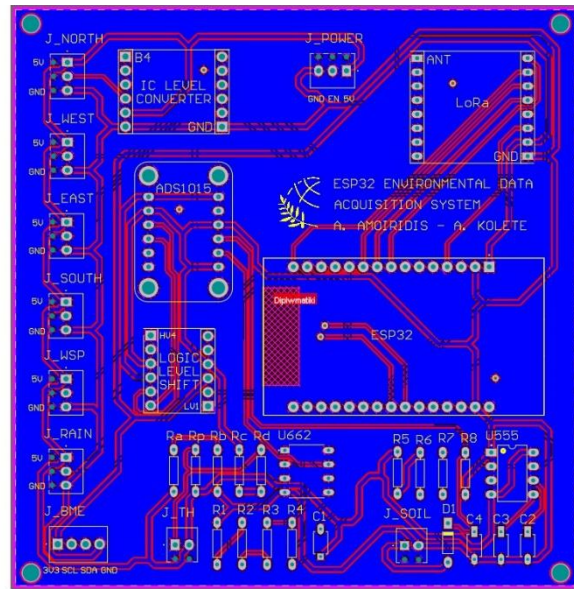
Εικόνα 4.68: Multilayer View του Altium Designer με χάραξη όλων των αγωγικών γραμμών της πλακέτας.

Αφού τελειώσουμε την χάραξη των γραμμών μας ικανοποιεί το αποτέλεσμα, απαιτείται να τοποθετήσουμε το λεγόμενο «ground plane», δηλαδή μία περιοχή με στρώμα χαλκού, μεγάλου σε εμβαδόν και συνδέεται στο σημείο που θεωρούμε ως γείωση. Ο κύριος λόγος που χρησιμοποιείται είναι επειδή σε ορισμένες περιπτώσεις λόγω των φυσικών ιδιοτήτων του χαλκού, υπάρχουν ανομοιότητες στις κατανομές των ρευμάτων στα σημεία αναφοράς. Με την χρήση των ground planes ουσιαστικά δίνουμε «χώρο» στις γραμμές γείωσης ώστε να έχουν πάντα την μικρότερη δυνατή αντίσταση στα ηλεκτρικά σήματα. Αν δεν υπάρχουν τα ground planes, θα έχουμε πιθανά θόρυβο λόγω επιστροφής ρευμάτων μέσω των γραμμών γείωσης, επομένως επιτυγχάνεται σταθεροποίηση.

Τοποθετούμε ground planes και στην πάνω αλλά και στην κάτω αγωγίμη επιφάνεια της πλακέτας, για να είμαστε σίγουροι ότι θα έχουμε την ελάχιστη αντίσταση. Έπειτα τοποθετούμε επαρκή αριθμό από νίαις τα οποία συνδέουν μεταξύ τους αυτά τα 2 ground planes, μία διαδικασία που ονομάζεται «ground stitching». Εμείς τοποθετήσαμε 4 τέτοιες σπές σε σημεία που δεν θα είναι εμφανή μετά την τοποθέτηση των υλικών. Μετά την τοποθέτηση των ground planes, η τελική μορφή της πλακέτας στη multilayer προβολή είναι αυτή της Εικόνας 4.69 παρακάτω, ενώ στις Εικόνες 4.70 και 4.71 των επόμενων σελίδων παρατηρούμε πως είναι η μορφή της πλακέτας σε δισδιάστατη απεικόνιση αλλά και τρισδιάστατη απεικόνιση αντίστοιχα.



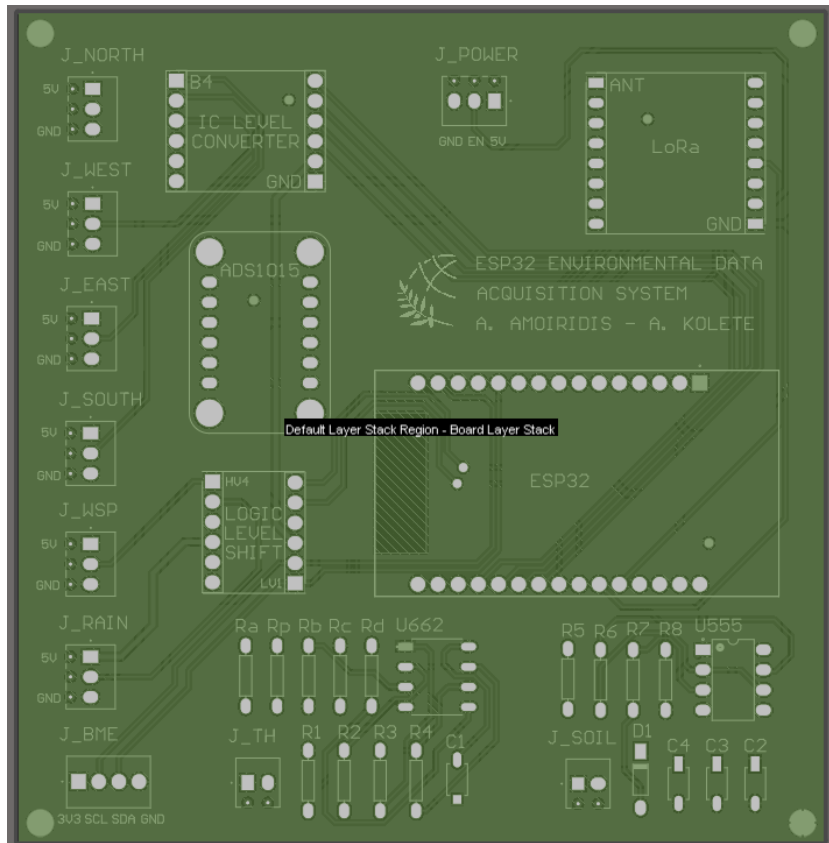
Top Copper Layer



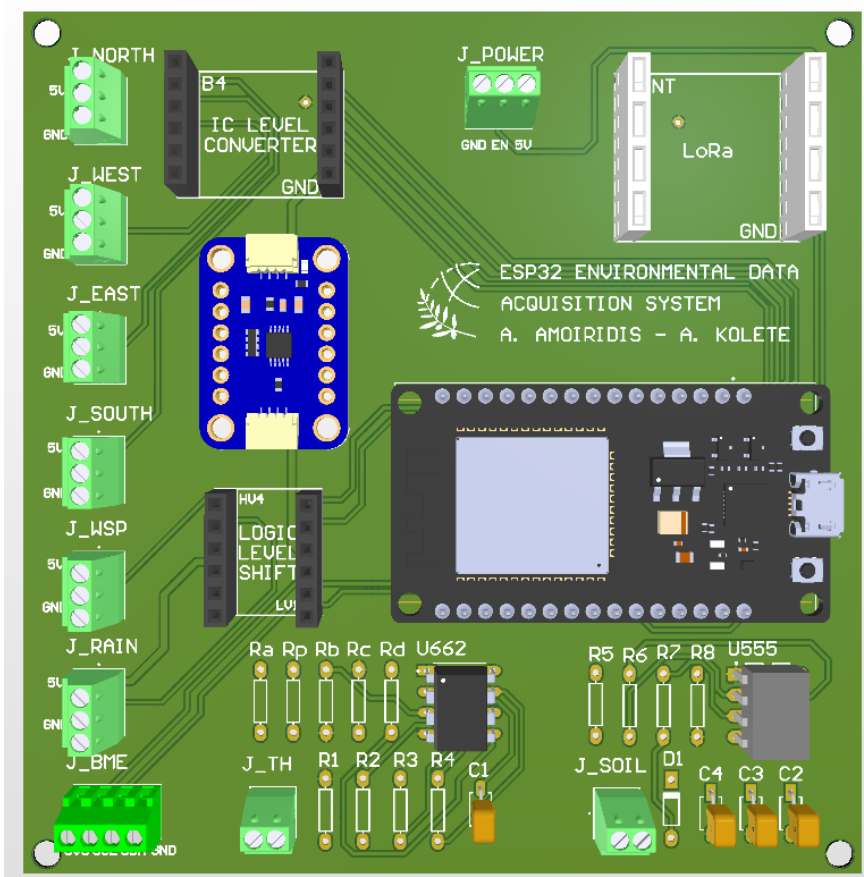
Bottom Copper Layer

Εικόνα 4.69: Multilayer προβολή του τελικού σχεδίου της πλακέτας με προβολή των Top και Bottom Copper Layer αντίστοιχως

Όπως παρατηρούμε στην παρακάτω Εικόνα 4.71, δεν υπήρχαν διαθέσιμα τρισδιάστατα μοντέλα για τις αντιστάσεις, την δίοδο αλλά και τα modules SX1278 που χρησιμοποιείται για το LoRa, αλλά και τα δύο Logic Level Shifters. Η εισαγωγή τους έγινε ως θηλυκές σειρές pin (headers), αφού πρώτα έγινε μέτρηση των αποστάσεων των σειρών με χρήση παχύμετρου. Επιπλέον, να αναφέρουμε ότι οι πράσινες βιδωτές κλέμες που χρησιμοποιούνται περιμετρικά της πλακέτας είναι για να διευκολύνουν την εγκατάσταση των καλωδιώσεων με τους αισθητήρες που βρίσκονται στην κατασκευή του συστήματος μέτρησης.



Εικόνα 4.70: Δισδιάστατη Απεικόνιση της πλακέτας στο Altium Designer



Εικόνα 4.71: Τρισδιάστατη Απεικόνιση της πλακέτας στο Altium Designer

4.7.3 Διαδικασία Παραγγελίας του PCB από εργοστάσιο παραγωγής

Αφού ολοκληρώσαμε την σχεδίαση της πλακέτας, απαιτείται τώρα να δημιουργήσουμε τα αρχεία Fabrication, τα οποία λέγονται Gerber. Αυτά είναι τα αρχεία που θα χρησιμοποιήσει το εργοστάσιο κατασκευής PCB για να δημιουργήσει την πλακέτα μας. Αντίστοιχα, απαιτείται και ένα αρχείο που δείχνει στα αυτοματοποιημένα μηχανήματα CNC τις θέσεις των οπών πάνω στην πλακέτα. Το αρχείο αυτό ονομάζεται NC Drill.

Αναλόγως της εταιρείας που θα επιλέξουμε, υπάρχουν σαφείς οδηγίες για την μορφή και τους τύπους των αρχείων που υποστηρίζονται από τις διαφορετικές σουίτες προγραμμάτων. Εμείς επιλέγουμε ως εταιρεία την JLCPCB από την πόλη Zhuhai της Κίνας. Στην ιστοσελίδα της εταιρείας, ο χρήστης μπορεί εύκολα να εισάγει τα αρχεία Gerber και με τον ενσωματωμένο Gerber Viewer να δει πώς θα μοιάζει η τελική πλακέτα που θα εκτυπωθεί από το εργοστάσιο. Επιπροσθέτως, υπάρχει και εργαλείο DML Check που ελέγχει το σχέδιο και επισημαίνει στον χρήστη τα ενδεχόμενα λάθη ή σημεία που απαιτείται προσοχή, έτσι ώστε να επιβεβαιωθεί ότι στην τελική παραγωγή δεν θα υπάρξουν προβλήματα.

Όταν τοποθετήσουμε τα αρχεία Gerber και NC Drill στην ιστοσελίδα της JLCPCB, υπάρχει ένας ολόκληρος πίνακας με επιλογές. Ορισμένες επιλέγονται ή συμπληρώνονται αυτόματα, όπως είναι το μέγεθος της πλακέτας και η ποσότητα παραγγελίας. Το χρώμα επιλέγεται από τον χρήστη. Οι οδηγίες που είναι απαραίτητο να επιλέξουμε είναι αυτές του Πίνακα 4.19 και έχουν να κάνουν με τη σχεδιαστική μέθοδο κατασκευής.

Να σχολιαστεί ότι ο λόγος που επιλέγουμε την HASL (Hot Air Solder Leveling) with lead επιλογή για το τελείωμα των αγωγίμων επιφανειών είναι επειδή τα υλικά που θα χρησιμοποιήσουμε ανήκουν όλα στην κατηγορία THT. Σε περίπτωση που έχουμε και υλικά SMD επιλέγουμε την επιλογή ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold), καθώς δημιουργεί μία επιφάνεια στην οποία λειτουργούν σωστότερα οι πάστες κόλλησης των υλικών. Με την επιλογή αυτή το κόστος κατασκευής της πλακέτας ανεβαίνει σημαντικά.

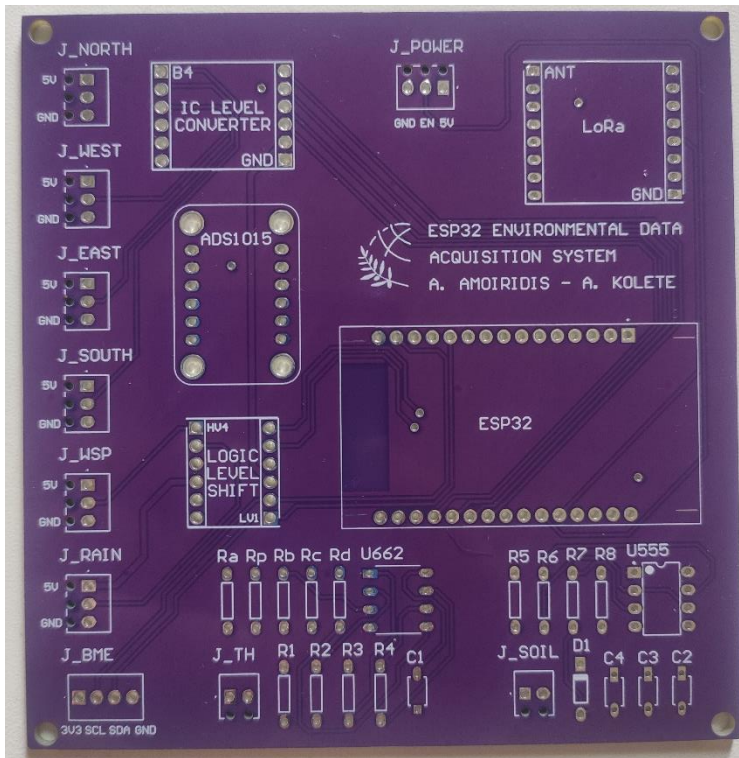
Πίνακας 4.19: Σχεδιαστικές οδηγίες για εκτύπωση της πλακέτας

<i>Πεδίο</i>	<i>Επιλογή</i>
Material	FR-4
Layers	2
PCB Thickness	1.6mm
Surface Finish	HASL (with lead)
Via Covering	Tented
Via Plating Method	Horizontal Electroless Copper Plating
Board Outline Tolerance	±0.2mm

Αφού ολοκληρώσουμε την παραγγελία, εντός εύλογου χρονικού διαστήματος παραλαμβάνουμε την πλακέτα, η οποία έχει τη μορφή της παρακάτω Εικόνας 4.72. Μετά την κόλληση όλων των υλικών οδηγούμαστε στο αποτέλεσμα της Εικόνας 4.73. Να σημειωθεί ότι όπου υπάρχει module ή ολοκληρωμένο κύκλωμα, δεν πραγματοποιείται απευθείας κόλλησή του πάνω στην πλακέτα, διότι οι μεγάλες θερμοκρασίες που δημιουργούνται κατά την κόλληση από το κολλητήριο μπορεί να καταστρέψουν το υλικό. Για τα ολοκληρωμένα κυκλώματα τύπου DIP-8 διατίθενται στο εμπόριο έτοιμες βάσεις τοποθέτησης, οι οποίες μπορούν άφοβα να κολληθούν στην επιφάνεια της πλακέτας,

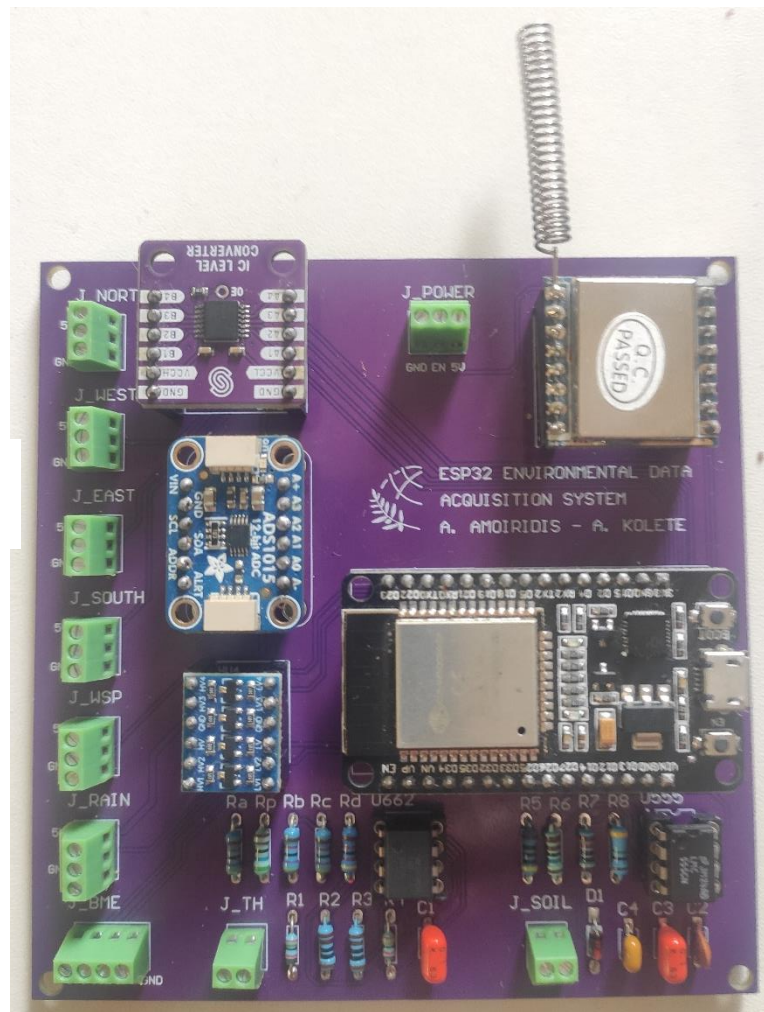
Κεφάλαιο 4

ενώ για τα υπόλοιπα modules χρησιμοποιούνται θηλυκά pin headers με την κλασική απόσταση 2.54 mm μεταξύ των ακροδεκτών.



Εικόνα 4.72: Η πλακέτα που παραλάβαμε από το εργοστάσιο της εταιρείας JLCPCB

Εικόνα 4.73: Η πλακέτα μετά την κόλληση των υλικών



Ολοκληρώνοντας την τοποθέτηση της πλακέτας στην κατασκευή, μιας και οι διαστάσεις της είναι 105 mm x 120 mm, χωρίς να υπολογίζεται η κεραία του LoRa module, χρησιμοποιούμε ένα ανθεκτικό εξωτερικού τύπου ηλεκτρολογικό κυτίο (IP65) διαστάσεων 200 mm x 200 mm, καθότι εκτός από την πλακέτα που σχεδιάσαμε, το συγκεκριμένο κυτίο θα φιλοξενεί στο εσωτερικό του και το Solar Power Manager μαζί με την μπαταρία 18650 που αναφέραμε στην υποενότητα 4.5. Οι λόγοι που μας οδηγούν στην επιλογή ενός μεγαλύτερου κυτίου είναι το μήκος της κεραίας του LoRa module, η οποία αυξάνει την κατακόρυφη διάσταση της πλακέτας στα 140mm περίπου, ενώ αν υπολογίσουμε και στην οριζόντια διάσταση το μέγεθος του LoRa module, καταλήγουμε επίσης στα 150mm. Έτσι, αφήνουμε και ένα μικρό περιθώριο στις άκρες για την ευκολία στην καλωδίωση. Το κυτίο αυτό τοποθετείται επίσης στον μεταλλικό σκελετό της κατασκευής. Για την σταθεροποίηση της πλακέτας και του Solar Power Manager εντός του κυτίου, χρησιμοποιούμε ένα λεπτό φύλλο πολυμερούς PLA κολλημένου στο κυτίο. Αφού τοποθετήσουμε την πλακέτα μέσα στο κυτίο, μπορούμε με ασφάλεια να οδηγήσουμε τα καλώδια μέσα σε αυτό, ώστε να βιδωθούν στη συνέχεια στις αντίστοιχες κλέμες. Η ολοκληρωμένη κατασκευή δίδεται στην παρακάτω Εικόνα 4.74.



Εικόνα 4.74: Η ολοκληρωμένη κατασκευή σε φάση μέτρησης

4.8 Επίλογος

Το κεφάλαιο 4 ολοκληρώνεται με την περιγραφή όλου του υλικού τμήματος της εργασίας, από τα απλά αναλογικά αισθητήρια εδάφους, τα ολοκληρωμένα ψηφιακά αισθητήρια δεδομένων ατμοσφαιρικού αέρα, ανέμου και βροχής, μέχρι και την διασύνδεσή τους με τον μικροελεγκτή, ήτοι όλο το τμήμα του transmitter. Σχετικά με το receiver τμήμα, αποτελεί συσκευή που βρίσκεται στο «edge – side» ανάμεσα στο υλικό επίπεδο (συσκευή) και του υπολογιστικού νέφους, επομένως θα αναφερθούμε σε αυτό στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 5ο: Επίπεδο Δικτύου (Network Layer)

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο 5 θα γίνει αναφορά στο Επίπεδο Δικτύου του συστήματος IoT που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας.

Το Επίπεδο Δικτύου (Network Layer), αποτελεί ένα από τα θεμελιώδη τμήματα της αρχιτεκτονικής επικοινωνιών και είναι υπεύθυνο για τη δρομολόγηση, τη διευθυνσιοδότηση και τη μεταφορά πακέτων δεδομένων από τον αποστολέα προς τον παραλήπτη [64]. Στο πλαίσιο των συστημάτων IoT, το επίπεδο αυτό αποκτά ιδιαίτερη σημασία, καθώς εξασφαλίζει την αποδοτική και αξιόπιστη διασύνδεση μεγάλου αριθμού ετερογενών συσκευών χρησιμοποιώντας κατάλληλες τεχνολογίες μετάδοσης.

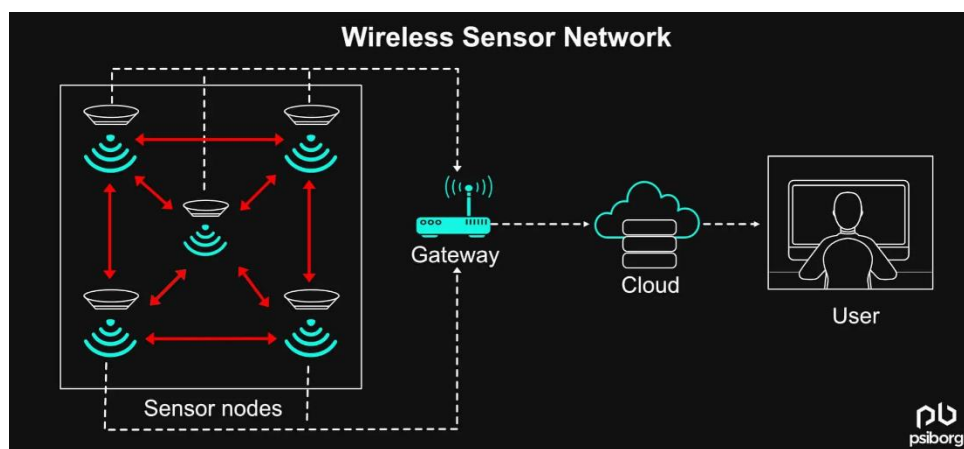
Ειδικότερα, θα αναλύσουμε την επιλογή τεχνολογίας μετάδοσης δεδομένων μεταξύ των τμημάτων transmitter και receiver, θα αναφερθούμε στις βασικές τοπολογίες δικτύων, καθώς και στη σημασία τους σε εφαρμογές IoT, ενώ θα επεξηγήσουμε τη δομή των πακέτων στην τεχνολογία LoRa ως μέσο ασύρματης επικοινωνίας μεγάλης εμβέλειας για χρήση στο IoT. Τέλος, θα κλείσουμε με την δομή του τμήματος receiver, καθώς και τον κώδικα που χρησιμοποιούμε για να τον υλοποιήσουμε.

5.2 Επιλογές Τεχνολογιών Μετάδοσης Δεδομένων μεταξύ Transmitter & Receiver

5.2.1 Γενικές Πληροφορίες για τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Για ένα σύστημα IoT, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ανάμεσα σε πληθώρα πρωτοκόλλων επικοινωνίας, τα οποία είναι κυρίως ασύρματα, ανάλογα με τις ανάγκες του συστήματος.

Συγκεκριμένα, τα δίκτυα που χρησιμοποιούνται σε συστήματα που λαμβάνουν μετρήσεις με χρήση ασύρματων αισθητήρων ονομάζονται Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks / WSN). Στα δίκτυα αυτά, κάθε αισθητήρας που διασυνδέεται διαθέτει δική του διεύθυνση δικτύου και αποτελεί έναν κόμβο (node). Τα μετρούμενα δεδομένα από όλους τους κόμβους συγκεντρώνονται σε έναν σταθμό βάσης (base station), ο οποίος με τη σειρά του αποτελεί την πύλη (gateway) για τη σύνδεση των αισθητήρων με το υπολογιστικό νέφος (cloud), όπως είχαμε αναφέρει και στο κεφάλαιο 3. Η απλή δομή ενός τέτοιου δικτύου είναι αυτή της παρακάτω Εικόνας 5.1.

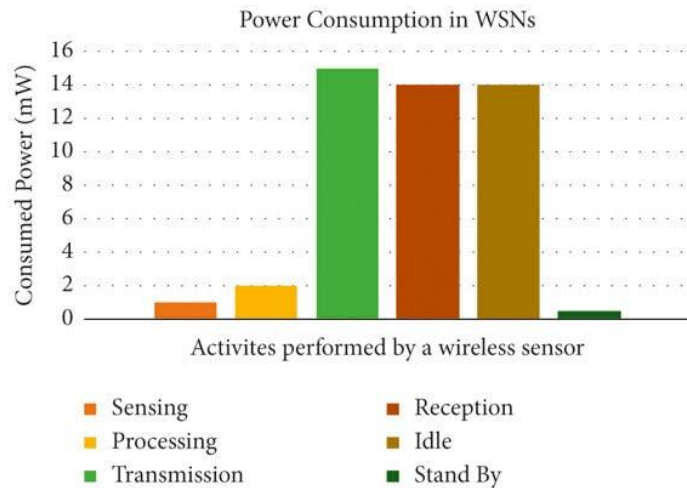


Εικόνα 5.1: Στοιχειώδης δομή ενός Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων (WSN) [116]

Τα πιο δημοφιλή προς χρήση πρωτόκολλα επικοινωνίας για τα WSN είναι το Bluetooth, το Zigbee, το NFC, το LoRaWAN, τα κυψελλωτά (cellular) δίκτυα 4G και 5G, ενώ χρησιμοποιούνται και ορισμένες υλοποιήσεις του Wi-Fi, λ.χ. το Wi-Fi HaLow (IEEE 802.11.ah). [59, 66]

Κοινός παρονομαστής των πρωτοκόλλων αυτών είναι η ασύρματη επικοινωνία, ενώ τα χαρακτηριστικά που τα διαφοροποιούν είναι οι περιορισμοί τους ως προς την απόσταση, την τοπολογία με την οποία δομείται το δίκτυο (βλ. υποενότητα 5.3), οι συχνότητες στις οποίες λειτουργούν. Βασικότερο κριτήριο για την επιλογή τεχνολογίας είναι η ενεργειακή κατανάλωση των συσκευών – κόμβων.

Όπως διακρίνεται και στο γράφημα της διπλανής Εικόνας 5.2, η μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας σε ένα ασύρματο αισθητήριο που συμμετέχει σε ένα WSN γίνεται κατά τη διάρκεια της μετάδοσης (transmission), ενώ αξιοσημείωτο είναι πως σε κατάσταση αδράνειας (idle), καταναλώνει ίδια μέση ενέργεια με όση όταν πραγματοποιεί λήψη οδηγιών (reception). Αντίθετα, την στιγμή της μέτρησης και επεξεργασίας, η κατανάλωση ενέργειας του είναι ελάχιστη.



Εικόνα 5.2: Μέση κατανάλωση ενέργειας στα WSN [117]

Ειδικότερα, στον παρακάτω Πίνακα 5.1 δίδεται μία σύγκριση όλων των προαναφερθέντων χαρακτηριστικών, η οποία γίνεται για τα πρωτόκολλα Zigbee, Wi-Fi HaLow και LoRaWAN. Παραλείπουμε τα κυψελλωτά δίκτυα διότι ξεφεύγουν αρκετά στην ενεργειακή κατανάλωση και η χρήση τους δεν ενδείκνυται για περιπτώσεις αυτόνομων συστημάτων, όπως είναι το υλοποιούμενο.

Πίνακας 5.1: Συγκριτική Παράθεση Χαρακτηριστικών Πρωτοκόλλων Ασύρματης Επικοινωνίας για WSN

Χαρακτηριστικό	Πρωτόκολλα για WSN		
	Zigbee	Wi-Fi HaLow	LoRaWAN
Ονομασία Προτύπου (IEEE)	IEEE 802.4.15	IEEE 802.11ah	-
Συχνότητα Λειτουργίας	868 MHz, 915 MHz, 2.4 GHz	<1 GHz	<1 GHz
Τοπολογία Δικτύου	Αστέρας, Δέντρο, Κατανεμημένη	Αστέρας	Αστέρας
Τύπος Μετάδοσης	Multi-hop	Single-hop	Single-hop
Εύρος ζώνης καναλιού	2 MHz	2 MHz	125, 250, 500 kHz
Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων	20 – 250 kbps	150 kbps – 15 Mbps	0.3 – 50 kbps
Εμβέλεια	1 – 75 m	100 – 1000 m	2 – 15 km
Ενδεικτική Κατανάλωση Ενέργειας Κόμβου σε μετάδοση (TX power)	18 mW	54 mW	15.47 mW

5.2.2 Επιλεγμένη Υλοποίηση

Η δική μας υλοποίηση δεν ακολουθεί ακριβώς τη λογική του ασύρματου δικτύου αισθητήρων, μια και όλα τα αισθητήριά μας συνδέονται ενσύρματα με τον μικροελεγκτή και δεν είναι από μόνα τους «έξυπνα». Ωστόσο, μπορούμε να θεωρήσουμε όλο το σύστημα του transmitter που περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο ως έναν κόμβο του δικτύου. Θα μπορούσαν να υπάρχουν πολλοί τέτοιοι κόμβοι σε μία καλλιεργήσιμη εδαφική έκταση, καθείς εκ των οποίων ενδέχεται να μην διαθέτει όλα τα αισθητήρια παρά μόνο μερικά.

Φυσικά, γνώμονάς μας στην κατασκευή του τμήματος transmitter ήταν η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, καθώς δεν υπάρχει δυνατότητα σταθερής παροχής ισχύος από το ηλεκτρικό δίκτυο, διατηρώντας όμως τη δυνατότητα ασύρματης ζεύξης μεγάλης εμβέλειας. Έτσι, καταλήξαμε στην περίπτωση του πρωτοκόλλου LoRa.

Τοποθετήσαμε δύο LoRa modules SX1278 της Semtech, την συνδεσμολογία των οποίων αναλύσαμε στο κεφάλαιο 4. Το πρώτο εξ αυτών τοποθετήθηκε στην πλακέτα του τμήματος transmitter, όπως είδαμε παραπάνω, ενώ το δεύτερο τοποθετείται στην πλακέτα του receiver. Τα δύο αυτά modules λειτουργούν στην συχνότητα των 433 MHz. Η τυπική εμβέλειά τους φτάνει σε ανοιχτό πεδίο τα 10–15 km, ενώ σε αστικό περιβάλλον με εμπόδια (κτίρια, δέντρα) περιορίζεται περίπου στα 1–2 km [71]. Το περιβάλλον που εμείς εγκαθιστούμε τα συστήματα είναι ανοιχτό πεδίο, καθώς πρόκειται για καλλιεργήσιμες εκτάσεις συνήθως επίπεδες, επομένως καλύπτεται και η προϋπόθεση για LOS (Line – of – Sight).

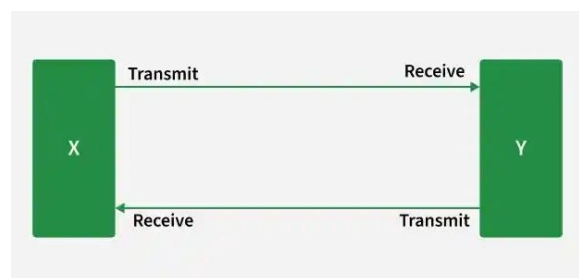
5.3 Τοπολογίες Δικτύων

Η τοπολογία ενός δικτύου περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο οι συσκευές (κόμβοι) οργανώνονται και συνδέονται μεταξύ τους, τόσο σε φυσική διάταξη όσο και στη λογική ροή των δεδομένων. Υπάρχουν ποικίλες τοπολογίες δικτύων με σημαντικότερες αυτές του διαύλου (bus), αστερά (star), δακτύλιου (ring), την κατανεμημένη (mesh), τη δισημειακή (point-to-point), δέντρου (tree) και την υβριδική (hybrid). Για κάθε μία επιλογή ζεύξης υπάρχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τα οποία σχετίζονται με το κόστος υλικών, την επεκτασιμότητα του δικτύου, την απόδοση που μετράται από τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και την ανοχή σε σφάλματα επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων. Ορισμένα από αυτά θα μελετήσουμε στις επόμενες υποενότητες.

Για παράδειγμα, η τοπολογία αστερά είναι εύκολη στη διαχείριση, αλλά εξαρτάται από έναν και μοναδικό κεντρικό κόμβο, ο οποίος αν παρουσιάσει βλάβη, αχρηστεύεται όλο το υπόλοιπο δίκτυο. Αντίθετα, η κατανεμημένη τοπολογία προσφέρει υψηλή ανθεκτικότητα, με μεγαλύτερο όμως κόστος υλικού. Η επιλογή τοπολογίας είναι μία διαδικασία που εξαρτάται από τις απαιτήσεις του συστήματος, όπως το μέγεθος (αριθμός συνδεόμενων κόμβων), η αναμενόμενη κίνηση, η καθυστέρηση που δημιουργείται λόγω των φυσικών μέσων μετάδοσης και οι ανάγκες συντήρησης. [64]

5.3.1 Δισημειακή Τοπολογία (Point – to – point)

Η απλούστερη τοπολογία δικτύωσης μεταξύ δύο σημείων είναι η δισημειακή, κατά κόσμο γνωστή με την αγγλική ορολογία “point-to-point”. Επιτρέπει σε δύο σημεία να επικοινωνούν απευθείας, προσφέροντας έτσι έλεγχο πρόσβασης, συμπίεση δεδομένων και κρυπτογράφηση. Χρησιμοποιείται ευρέως σε τηλεφωνικές συνδέσεις, μέσα οπτικών ινών, ραδιοζεύξεις και κινητές συσκευές.



Εικόνα 5.3: Δισημειακή Τοπολογία Δικτύου [118]

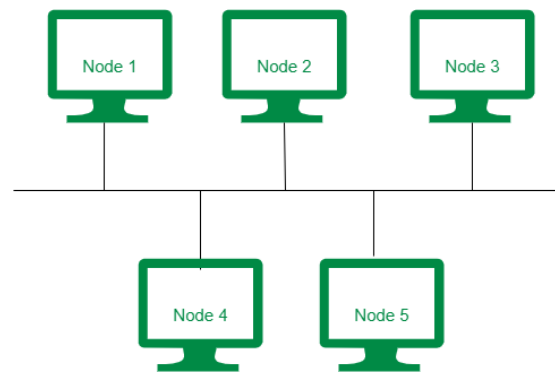
Η τοπολογία εικονίζεται στην Εικόνα 5.3 παραπάνω.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι το χαμηλό της κόστος, καθότι απαιτείται ένας και μόνο φυσικός δίαυλος επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών, η μειωμένη πολυπλοκότητα και φυσικά η ευκολία στη ρύθμιση και την αποσφαλμάτωση, διότι το μόνο ενδεχόμενης βλάβης είναι ο δίαυλος μεταξύ των συσκευών.

Στα μειονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγεται ότι η αποδοτικότητα μειώνεται όσο το δίκτυο μεγαλώνει, διότι κάθε συσκευή του δικτύου πρέπει να συνδέεται σε κάποια άλλη. Έτσι, απαιτούνται πολλαπλά βήματα όταν δυο συσκευές δεν επικοινωνούν απευθείας, αλλά μέσω ενδιάμεσων κόμβων. Επιπλέον, σε περίπτωση βλάβης μιας συσκευής, ενδέχεται να παραλύσει σημαντικό μέρος του δικτύου ή ακόμα και ολόκληρο.

5.3.2 Τοπολογία Διαύλου (Bus)

Η τοπολογία διαύλου έχει μία ομοιότητα με τη δισημειακή τοπολογία, καθότι χρησιμοποιείται μόνο ένας κεντρικός δίαυλος επικοινωνίας σε όλο το δίκτυο, ωστόσο διαφέρει διότι στη διάταξη αυτή όλες οι συσκευές του δικτύου μεταφέρουν δεδομένα μέσω αυτού του διαύλου. Εφ' όσον όλες οι συσκευές συνδέονται στον δίαυλο, όλες παρακολουθούν την κίνηση των δεδομένων μέσα σε αυτόν. Παρά ταύτα, αγνοούν πακέτα δεδομένων που δεν προορίζονται για αυτές. Η διευθυνσιοδότηση στα πακέτα γίνεται από τους αποστολείς. Μία τυπική τοπολογία διαύλου με 5 κόμβους είναι αυτή της διπλανής Εικόνας 5.4.



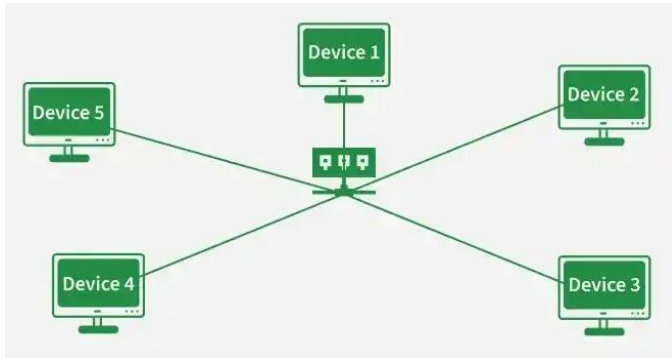
Εικόνα 5.4: Τοπολογία Διαύλου [118]

Τα προτερήματα στην τοπολογία διαύλου είναι η επεκτασιμότητα του δικτύου, αφού κάθε νέα συσκευή μπορεί να συνδεθεί απευθείας στον δίαυλο χωρίς να δημιουργηθεί κάποιο πρόβλημα στις υπόλοιπες, καθώς και το ότι δεν χρειάζεται κάποια «κεντρική» συσκευή με τον ρόλο της μετάδοσης των πακέτων από μία συσκευή σε μία άλλη.

Ωστόσο, τα μειονεκτήματα στη χρήση της συγκεκριμένης τοπολογίας δεν είναι αμελητέα. Πρώτο και κυριότερο, αν ο κεντρικός δίαυλος παρουσιάσει σφάλμα, όλο το δίκτυο αυτομάτως καταρρέει. Επιπλέον, η ευκολία στην επεκτασιμότητα του δικτύου είναι και το μελανό σημείο, όπερ σημαίνει ότι όσο το δίκτυο επεκτείνεται, υπάρχουν καθυστερήσεις σε όλες τις συσκευές, αφού πλέον μεταφέρονται πακέτα δεδομένων από περισσότερες συσκευές. Τέλος, προσφέρει πολύ χαμηλή ασφάλεια των συσκευών από επιθέσεις.

5.3.3 Τοπολογία Αστέρα (Star)

Στην τοπολογία αστέρα, υπάρχει ένας κεντρικός κόμβος στον οποίο συνδέονται όλες οι υπόλοιπες συσκευές του δικτύου, δηλαδή οι άλλοι κόμβοι. Ο κεντρικός κόμβος συνήθως είναι ένας μεταγωγέας (switch) ή απλώς μία πλήμνη (hub). Οποιαδήποτε πληροφορία μεταφέρεται από έναν κόμβο σε έναν άλλον, διέρχεται πρώτα από τον κεντρικό. Μία τυπική τοπολογία αστέρα που περιλαμβάνει πέντε κόμβους και έναν κεντρικό είναι αυτή της Εικόνας 5.5 στην επόμενη σελίδα.



Εικόνα 5.5: Τοπολογία Αστέρα [118]

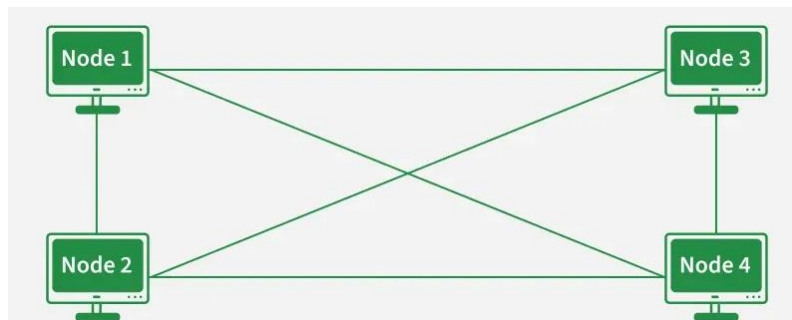
Η αποδοτικότητα του δικτύου εξαρτάται από την φύση του κεντρικού κόμβου. Αν ο κόμβος είναι μεταγωγέας, τότε γνωρίζει τη διεύθυνση της συσκευής στην οποία απευθύνεται ένα πακέτο που μόλις έλαβε. Σε περίπτωση που η συσκευή είναι πλήμνη, τότε απλά τέλνει το πακέτο που έλαβε σε όλες τις συσκευές του δικτύου. Το πακέτο θα αγνοηθεί από τις συσκευές με διεύθυνση που δεν ταυτίζεται με αυτή του παραλήπτη.

Το θετικά στοιχεία στη χρήση μίας τοπολογίας αστέρα σε ένα δίκτυο είναι η απλή του δομή, καθώς και το γεγονός ότι μπορούν εύκολα να προστεθούν ή να αφαιρεθούν συσκευές. Επιπροσθέτως, εν αντιθέσει με την τοπολογία διαύλου, εδώ μπορούν πολλές συσκευές να στέλνουν και να λαμβάνουν πακέτα ταυτόχρονα, μιας και δεν περιορίζονται από έναν κεντρικό δίαυλο στον οποίο ταυτόχρονη μετάδοση πακέτων σημαίνει πιθανώς και συγκρούσεις μεταξύ τους. Τέλος, σε περιπτώσεις βλάβης κάποιας μη κεντρικής συσκευής η αποσφαλμάτωση είναι σχετικά εύκολη, ενώ δεν επηρεάζεται το υπόλοιπο δίκτυο.

Στον αντίποδα, αν παρουσιαστεί βλάβη στον κεντρικό κόμβο του δικτύου, τότε όλο το δίκτυο καταρρέει, ενώ το σημαντικότερο μειονέκτημά του είναι ότι απαιτείται μεγάλη ποσότητα υλικού για τους διαύλους. Σε περιπτώσεις ασύρματων δικτύων φυσικά, όπως με τα δίκτυα αισθητήρων είναι η προτιμότερη τοπολογία.

5.3.4 Κατανεμημένη Τοπολογία (Mesh)

Στην κατανεμημένη τοπολογία δικτύου κάθε συσκευή στο δίκτυο συνδέεται με μία άλλη μέσω μίας «αποκλειστικής» δισημειακής διασύνδεσης. Παραδείγματος χάριν, έστω ότι υπάρχουν 4 κόμβοι στο δίκτυο. Κάθε ένας από αυτούς τους κόμβους διαθέτει 3 διαφορετικές συνδέσεις, κάθε μία με έναν από τους υπόλοιπους 3 κόμβους στο δίκτυο. Δεν υπάρχει κεντρικός κόμβος ή συσκευή «συντονισμού» μετάδοσης πακέτων στο δίκτυο. Το παράδειγμα αυτό εικονίζεται και στην Εικόνα 5.6.



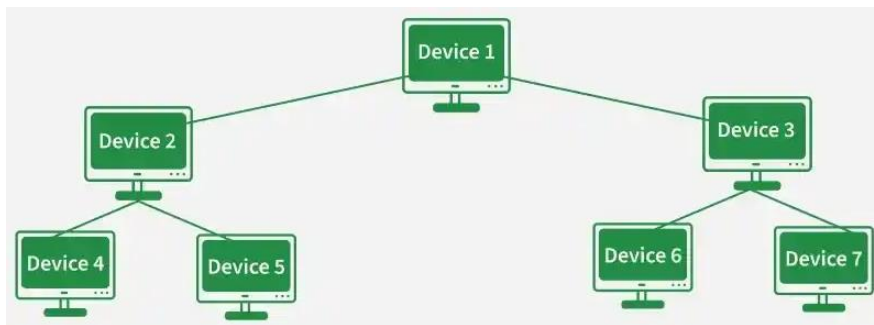
Εικόνα 5.6: Κατανεμημένη Τοπολογία Δικτύου [118]

Στα θετικά σημεία χρήσης της τοπολογίας είναι ότι λόγω των διαφορετικών ζεύξεων μεταξύ των συσκευών, αποκλείεται να υπάρξουν περιπτώσεις συμφόρησης ή σύγκρουσης πακέτων κατά τις μεταδόσεις. Επιπλέον, είναι η ανθεκτικότερη δομή, διότι σε περιπτώσεις βλάβης μίας ζεύξης, επηρεάζονται μόνο οι κόμβοι που ενώνονται μεταξύ τους με αυτή τη ζεύξη, ενώ το υπόλοιπο δίκτυο συνεχίζει να λειτουργεί κανονικά. Ταυτόχρονα, μία βλάβη μπορεί να εντοπιστεί με σχετική ευκολία, καθώς θα επηρεαστεί η επικοινωνία μεταξύ δύο κόμβων. Τέλος, είναι η ασφαλέστερη τοπολογία, αφού δεν υπάρχει περίπτωση κάποια συσκευή με μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση να εισέλθει στο δίκτυο.

Από πλευράς μειονεκτημάτων, σίγουρα η καταναμημένη τοπολογία αποτελεί την πιο ασύμφορη επιλογή από πλευράς κόστους, αφού απαιτεί τεράστιο όγκο καλωδίωσης. Αποτέλεσμα του μεγάλου αριθμού των συνδέσεων που απαιτούνται είναι ότι απαιτείται και μεγάλο πλήθος I/O για να επιτευχθούν όλες αυτές οι συνδέσεις. Τελευταίο αλλά εξίσου σημαντικό αρνητικό της τοπολογίας αυτής είναι ότι είναι δύσκολα επεκτάσιμη, καθότι για να εισέλθει στο δίκτυο νέος κόμβος, απαιτείται ένας νέος αριθμός ζεύξεων ίσος με τον αριθμό των συσκευών που υπάρχουν στο δίκτυο.

5.3.5 Τοπολογία Δέντρου (Tree)

Η τοπολογία δέντρου είναι παραλλαγή της τοπολογίας αστέρα, καθώς υπάρχει ένας κεντρικός κόμβος, όπως και στον αστέρα, αλλά εδώ οι τελικές συσκευές δεν συνδέονται απευθείας σε αυτόν, αλλά μέσω δευτερευόντων κόμβων, σαν κλαδιά ενός δέντρου. Στον κεντρικό κόμβο συνδέονται μόνο οι δευτερεύοντες κόμβοι και κάθε τελικός κόμβος συνδέεται σε έναν και μόνο δευτερεύοντα κόμβο. Ένα παράδειγμα τέτοιας τοπολογίας με συνολικά 7 κόμβους είναι αυτό της Εικόνας 5.7.



Εικόνα 5.7: Τοπολογία Δέντρου ενός δικτύου [118]

Πλεονεκτήματα χρήσης της τοπολογίας είναι ότι επιτρέπει σε αρκετές συσκευές να συνδεθούν σε έναν κεντρικό κόμβο χωρίς να διανύσουν μεγάλη απόσταση τα πακέτα, διασυνδεόμενες στον κοντινότερο δευτερεύοντα κόμβο. Επομένως είναι αρκετά εύκολη η επεκτασιμότητα του δικτύου, αλλά και η απομόνωση ενός τμήματος του δικτύου από κάποιο άλλο, για παράδειγμα ένα εσωτερικό δίκτυο μίας εργαστηριακής αίθουσας θα συνδέεται σε έναν δευτερεύοντα κόμβο και έπειτα στον κεντρικό κόμβο της εκπαιδευτικής μονάδας.

Ωστόσο, με την προσθήκη νέων συσκευών στο δίκτυο, σε περίπτωση που έχει γίνει ισοκατανομή εξυπηρετούμενων πακέτων σε δευτερεύοντες κόμβους, αυτή η ισορροπία μπορεί εύκολα να ανατραπεί. Τέλος, το μεγαλύτερο μειονέκτημα της τοπολογίας αυτής ταυτίζεται με αυτό της τοπολογίας αστέρα, καθότι αν καταρρεύσει ο κεντρικός κόμβος, καταρρέει εξ' ολοκλήρου το δίκτυο.

5.4 Το LoRa για χρήση στο IoT

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, το LoRa είναι μία μέθοδος ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ δύο συσκευών σε συχνότητες κάτω του 1 GHz που βασίζεται στην διαμόρφωση πλάτους ή στην διαμόρφωση συχνότητας, λειτουργώντας παρόμοια με το ραδιόφωνο. Στη δική μας περίπτωση, το χρησιμοποιούμε για μετάδοση δεδομένων από το τμήμα Transmitter στο τμήμα Receiver του συστήματος.

Στις επόμενες υποενότητες θα κάνουμε μία αποσαφήνιση των όρων LoRa και LoRaWAN, θα δούμε την στοίβα πρωτοκόλλων που χρησιμοποιείται στην μέθοδο αυτή, καθώς και τις συχνότητες μετάδοσης στις οποίες χρησιμοποιείται. Αναφορά θα γίνει επίσης στον τρόπο με τον οποίο διασφαλίζεται η εμπιστευτικότητα των δεδομένων που μεταφέρονται, ενώ κλείνουμε επεξηγώντας τη συνοπτική λειτουργία του κώδικα του τμήματος Receiver του συστήματος.

5.4.1 LoRa & LoRaWAN Protocol Stack

Υπάρχει μία εγγενής διαφορά στους όρους «LoRa» και «LoRaWAN» και αν και σχετιζόμενοι μεταξύ τους, αναφέρονται σε διαφορετικά επίπεδα μίας στοίβας πρωτοκόλλων, η οποία είναι αυτή της Εικόνας 5.8 παρακάτω.

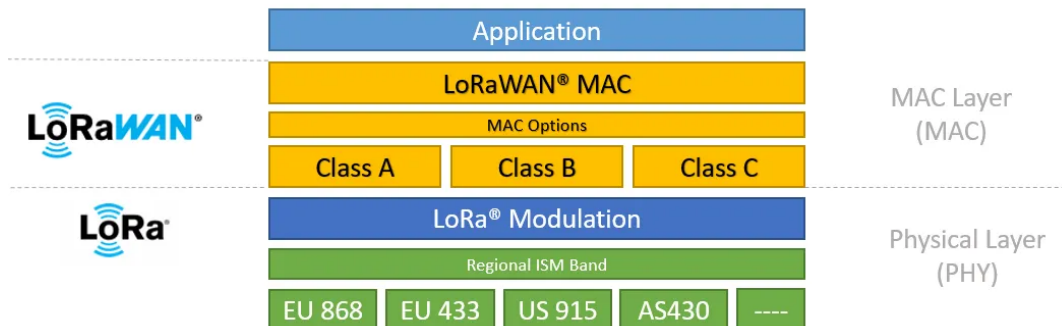
Αναλυτικότερα, το LoRa είναι τεχνική διαμόρφωσης στο φυσικό επίπεδο (PHY) βασισμένη στην τεχνική Διαμόρφωσης Διασποράς Φάσματος (Chirp Spread Spectrum / CSS), δηλαδή χρησιμοποιεί “chirps” των οποίων η συχνότητα σαρώνει μια ζώνη, προσφέροντας πολύ υψηλή ευαισθησία δέκτη και, συνεπώς, μεγάλη εμβέλεια και αντοχή σε θόρυβο/παρεμβολές [71].

Κύριες παράμετροι για τον καθορισμό αυτών των chirps είναι ο Συντελεστής Διασποράς 7^{th} έως και 12^{th} τάξης (Spreading Factor SF7–SF12), που είναι ανάλογος της εμβέλειας της ζεύξης αλλά και ο Εναέριος Χρόνος του πακέτου (Time on Air), το Εύρος Ζώνης (Bandwidth / BW), με συνηθέστερες τιμές αυτές των 125, 250 και 500 kHz. Η σχέση μεταξύ BW και ταχύτητας μετάδοσης είναι επίσης ανάλογη, ωστόσο η ευαισθησία είναι αντιστρόφως ανάλογη. Τελευταίος παράγοντας που μας ενδιαφέρει είναι ο Ρυθμός Κωδικοποίησης Coding Rate (CR) για διόρθωση λαθών. [70, 71]

Ενδεικτικά, η σχέση που δίνει την διάρκεια των chirps είναι η παρακάτω σχέση (5.1).

$$T_S = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (5.1)$$

Όπου SF είναι ο συντελεστής διασποράς και BW είναι το εύρος ζώνης καναλιού.



Εικόνα 5.8: Στοίβα πρωτοκόλλων για το LoRa [119]

Όπως φαίνεται και από την παραπάνω Εικόνα 5.8, το LoRaWAN, είναι πρωτόκολλο MAC, δηλαδή επιπέδου ζεύξης, το οποίο αξιοποιεί την τεχνολογία LoRa. Κατέχει δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων, με χαμηλή κατανάλωση ισχύος και σε μεγάλη εμβέλεια.

Συνήθως, εφαρμόζεται σε τοπολογία εμφωλευμένου αστέρα (κόμβοι → κόμβος πύλης → δικτυακός server). Σε δυναμικά περιβάλλοντα με έντονη βλάστηση, όπως είναι τα δάση, η ζώνη του ελλειψοειδούς Fresnel επηρεάζεται από το περιβάλλον και εν τέλει απορροφά το σήμα, οπότε η συνδεσιμότητα LoRaWAN μπορεί να διαφέρει έντονα με την αλλαγή των εποχών. Π.χ. η αραιή φυλλωσιά το χειμώνα μέχρι τα μέσα της άνοιξης, εν αντιθέσει με την έντονη του καλοκαιριού. [70]

Στην περίπτωση της δικής μας εφαρμογής, το περιβάλλον θεωρείται αμετάβλητο μεταξύ καλοκαιριού και χειμώνα.

5.4.2 Συχνότητες Μετάδοσης

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4, στην υποενότητα για το LoRa module, αλλά και στον πίνακα 5.1 παραπάνω, το LoRa ως πρωτόκολλο δεν έχει αυστηρές προδιαγραφές και αδειοδότηση όπως το Zigbee

ή το Wi-Fi. Εντούτοις, οι εφαρμογές IoT που κάνουν χρήση του, κατά κύριο λόγο λειτουργούν στις συχνότητες 433MHz στην Ασία, 868MHz στην Ευρώπη και 916 MHz στην Αμερική.

Στην Δυτική Ευρώπη χρησιμοποιείται κυρίως η μπάντα συχνοτήτων EU868 (863–870 MHz) με τυπικά κανάλια στα 868.1 / 868.3 / 868.5 MHz. Ισχύουν περιορισμοί κύκλου εργασίας (duty cycle), συνήθως καθορισμένες στο 1% σε πολλές υποζώνες από το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (European Telecommunication Standards Institute / ETSI), γεγονός που περιορίζει πόσο συχνά μπορεί να εκπέμπει μια συσκευή. [120]

Η επιτρεπόμενη ισχύς εκπομπής είναι συνήθως έως 14 dBm/25mW (ανά υποζώνη). Αυτοί οι κανόνες καθορίζουν άμεσα τον ρυθμό αποστολών και την αρχιτεκτονική της εφαρμογής.

Παρ' αυτά, σε πολλές εφαρμογές στην Ανατολική Ευρώπη εφαρμόζεται και η συχνότητα 433 MHz (Εύρος Ζώνης 433.05 – 434.79 MHz). Στην περίπτωση αυτή, η επιτρεπόμενη εκπεμπόμενη ισχύς είναι μέχρι 10dBm/10mW, αρκετά πιο χαμηλή από ότι εκείνη στα 868 MHz, συνεπώς δεν αποτελεί πρόβλημα για εφαρμογές με χαμηλή απαιτούμενη ισχύ εκπομπής, άρα και μικρό όγκο δεδομένων, καθώς και για εφαρμογές όπου η κεραία TX με την κεραία RX δεν έχουν μεγάλη απόσταση μεταξύ τους. [71]

Το δικό μας σύστημα εμπίπτει στην κατηγορία εφαρμογής με χαμηλή απαιτούμενη ισχύ εκπομπής, δεδομένου ότι κάνει χρήση της μπάντας των 433 MHz. Η χρήση της συγκεκριμένης μπάντας για επικοινωνία LoRa δεν απαγορεύεται στη χώρα μας, κρίνοντας απ' την διαθεσιμότητα της αγοράς σε modules που λειτουργούν στη συγκεκριμένη συχνότητα.

5.4.3 LoRa modules

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 4, το module που χρησιμοποιούμε για την επικοινωνία LoRa είναι το SX – 1278, το οποίο διασυνδέεται με τον μικροελεγκτή ESP32 μέσω του πρωτοκόλλου διασύνδεσης συσκευών SPI. Το module αυτό, αποτελείται από πληθώρα καταχωρητών (registers), υπεύθυνους για τη ρύθμιση των εξής παραμέτρων [71]:

- **Συχνότητα λειτουργίας της επικοινωνίας**, στην προκειμένη περίπτωση τα 433 MHz.
- **Ισχύς εκπομπής μέσω της κεραίας**, σημαντική παράμετρο για την εμβέλεια, την αξιοπιστία και την κατανάλωση ενέργειας
- **Sync Word**, μίας ειδικής δυαδικής τιμής που υπάρχει στην αρχή κάθε πακέτου LoRa και χρησιμοποιείται για συγχρονισμό μεταξύ πομπού και δέκτη. Είναι στην ουσία ο μηχανισμός αναγνώρισης δικτύου και διασφαλίζει ότι κάθε δέκτης θα επεξεργαστεί μόνο τα απευθυνόμενα σε αυτόν πακέτα.
- **Τρόπος μετάδοσης των πακέτων**, ορίζοντας την δομή, δηλαδή αν η κεφαλίδα του πακέτου έχει ορισμένο μήκος (explicit μέθοδος) ή αν εφαρμόζονται οι default παράμετροι (implicit μέθοδος)
- **Λειτουργία του πομποδέκτη**, δηλαδή την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το module ανάλογα με την επιθυμητή κατανάλωση ενέργειας. Για παράδειγμα, η λειτουργία του πομποδέκτη σταματάει όταν ο μικροελεγκτής στείλει το σήμα για Deep Sleep, όπως είχαμε αναφέρει στο κεφάλαιο 4.

5.4.4 Η χρήση του Sync Word

Σχετικά με το προαναφερθέν «Sync Word», να τονιστεί πως δεν πρόκειται για κάποιου είδους μηχανισμού ασφαλείας ή κρυπτογράφησης, παρά μόνο για ένα απλό φίλτρο δικτύου. Είναι ένας εύκολος τρόπος διαχωρισμού μεταξύ διαφόρων δικτύων LoRa που ενδεχομένως υπερκαλύπτονται σε

μία περιοχή. Χρησιμοποιώντας το, εξασφαλίζεται ότι δεν δημιουργείται κάποια σύγκυση μεταξύ των συσκευών από διαφορετικές εφαρμογές.

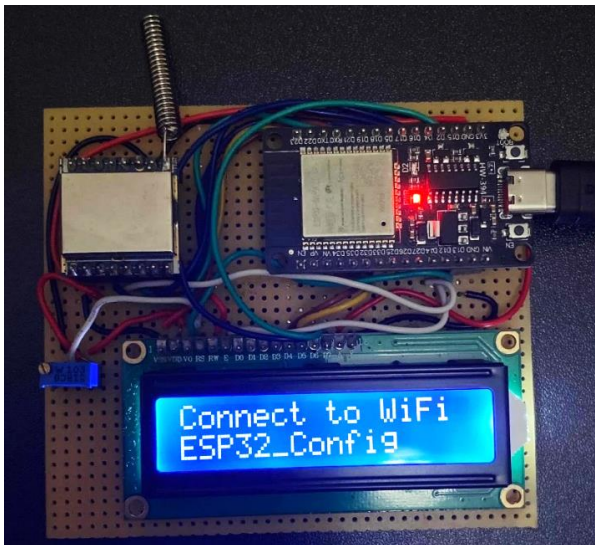
Κατά τη λήψη ενός LoRa πακέτου, ο δέκτης ανιχνεύει το προοίμιο (preamble) του σήματος και ελέγχει την τιμή του Sync Word σε αυτό. Συγκρίνει την τιμή με τη ρυθμισμένη σε αυτόν τοπικά, και τέλος αποδέχεται ή απορρίπτει το πακέτο. Εάν το Sync Word δεν ταιριάζει, το πακέτο αγνοείται πλήρως, ακόμη και αν η συχνότητα και οι υπόλοιπες παράμετροι είναι σωστές. [71]

5.5 Υλοποίηση Υλικού Μέρους LoRa Receiver

Το τμήμα του Receiver της εργασίας αποτελείται δομικά από έναν απλό μικροελεγκτή ESP32, ένα LoRa module πανομοιότυπο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στον Transmitter και μία οθόνη χαρακτήρων LCD τύπου 1602, δηλαδή διαθέτει δύο γραμμές με χωρητικότητα 16 χαρακτήρων στην κάθε μία.

Το υλοποιημένο σχηματικό για το κύκλωμα του Receiver παρατίθεται στο Παράρτημα Α της εργασίας. Λόγω κόστους και χρόνου, παρ' όλο που υλοποιήθηκε το σχηματικό για PCB στο τμήμα του Receiver, προτιμήθηκε η υλοποίησή του σε διάτρητη πλακέτα τύπου proto-board, εφόσον και το κύκλωμα δεν ήταν ιδιαίτερα περίπλοκο, ούτε υπήρχε κάποιο αναλογικό εξάρτημα επιρρεπές σε ηλεκτρονικούς θορύβους.

Για να είναι πιο ευπαρουσίαστο και εύχρηστο, το Receiver τοποθετήθηκε μέσα σε ειδικά σχεδιασμένο και τρισδιάστατα εκτυπωμένο κουτί από πολυμερές PLA. Στην παρακάτω Εικόνα 5.9 φαίνεται η ολοκληρωμένη (μετά καλωδίωσης) πλακέτα του Receiver αρχικά εκτός κουτιού και στην Εικόνα 5.10 εντός κουτιού.



Εικόνα 5.10: Εκτυπωμένο κουτί για την πλακέτα του τμήματος Receiver

Εικόνα 5.9: Υλοποιημένη διάτρητη πλακέτα του τμήματος Receiver



Η οθόνη χαρακτήρων τοποθετείται για να υπάρχει μία διεπαφή του Receiver με τον χρήστη, καθώς τον ενημερώνει για τις εναλλαγές καταστάσεων από τις οποίες διέρχεται η ρουτίνα του μικροελεγκτή. Παραδείγματος χάριν, όταν λαμβάνει πακέτο LoRa εμφανίζει το μήνυμα “Packet Received”, ενώ όπως στην περίπτωση της παραπάνω Εικόνας 5.10, όταν έχει συνδεθεί σε δίκτυο Wi-Fi και αναμένει τη λήψη πακέτων LoRa, εμφανίζει το μήνυμα “Waiting packet”.

5.6 Κώδικας για τον LoRa Receiver

Όπως και με τον Transmitter, για τον Receiver υλοποιήθηκε ένα απλό κομμάτι κώδικα στο αναπτυξιακό περιβάλλον Arduino IDE, στο μείγμα γλώσσας C / C++ που υποστηρίζεται από τους μικροελεγκτές Arduino και από τους ESP32 & ESP8266. Το πρόγραμμα είναι αρκετά εύχρηστο, ενώ υποστηρίζει μεγάλη γκάμα από έτοιμες βιβλιοθήκες που καθιστούν την συγγραφή του κώδικα πανεύκολη.

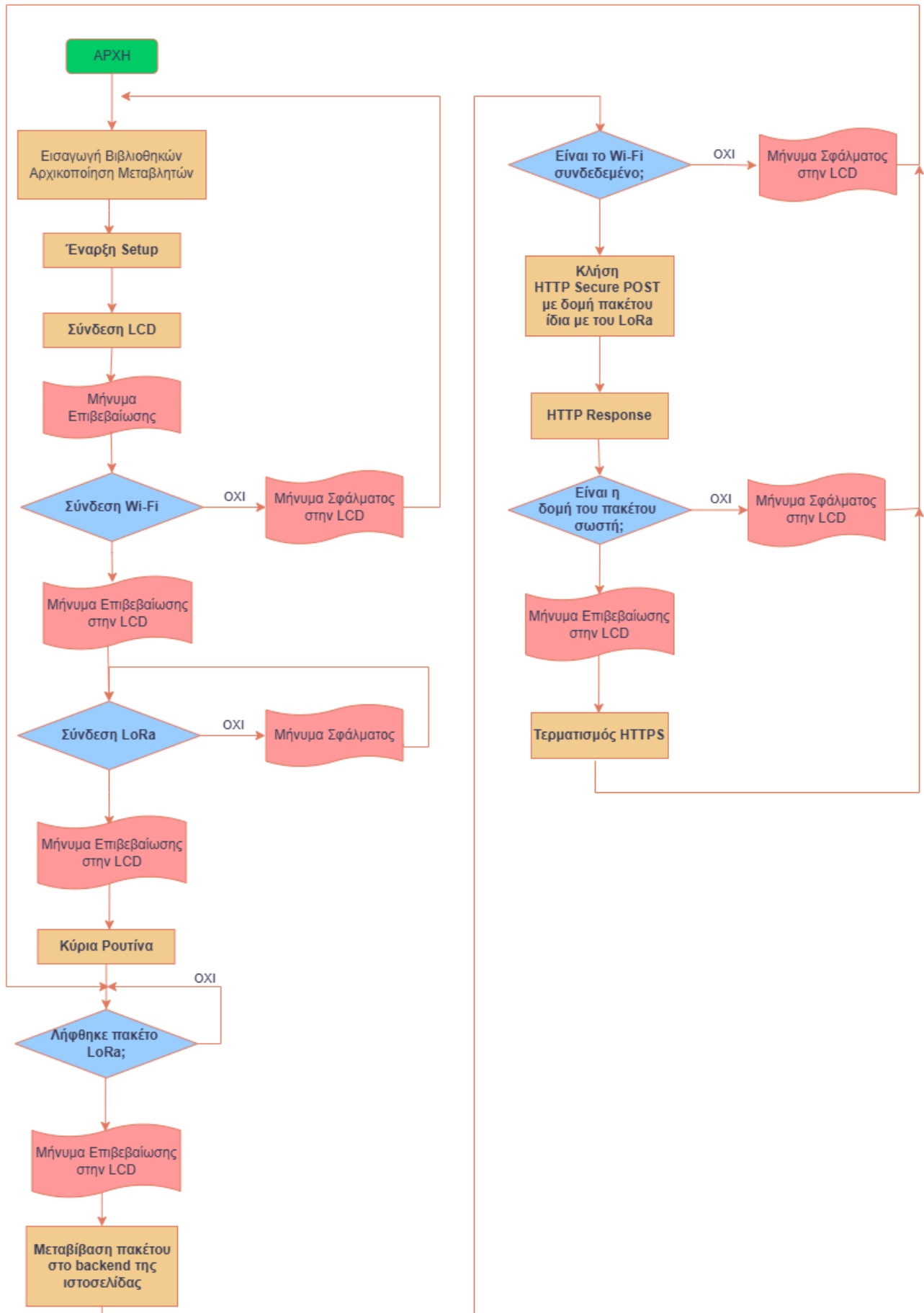
Ο κώδικας του Receiver διαθέτει διαφορετικές ιδιότητες από αυτόν του Transmitter, δεδομένου ότι αρμοδιότητά του είναι η λήψη του LoRa πακέτου από τον Transmitter, το οποίο αποστέλλεται κάθε 2 ώρες. Έπειτα, αφού ληφθούν τα πακέτα, και με την προϋπόθεση ότι ο ESP32 του Receiver είναι συνδεδεμένος σε δίκτυο Wi-Fi, τα δεδομένα εμφωλεύονται σε HTTP πακέτα και αποστέλλονται στην βάση δεδομένων της ιστοσελίδας.

Αναλυτικότερα, η λειτουργία του δέκτη ξεκινά με διαδικασία αρχικοποίησης και έλεγχο επιτυχίας εκκίνησης. Η συχνότητα λήψης του LoRa ρυθμίζεται στα 433 MHz, παράμετρος που υπάρχει στην βιβλιοθήκη <LoRa.h>. Η συγκεκριμένη βιβλιοθήκη έχει σχεδιαστεί ως ένας εύκολος τρόπος υλοποίησης των παραμέτρων επικοινωνίας του πρωτοκόλλου LoRa, χωρίς να απαιτεί την εις βάθος γνώση του προγραμματιστή στα φυσικά χαρακτηριστικά της μορφής τηλεπικοινωνίας, αξιοποιώντας την «plug ‘n’ play» λογική του Arduino. Για τον λογικό διαχωρισμό επικοινωνιών στο ίδιο φάσμα εφαρμόζεται ένα επιλεγμένο Sync Word.

Η λήψη δεδομένων βασίζεται σε επαναληπτικό έλεγχο ύπαρξης πακέτου. Όταν ανιχνευθεί εισερχόμενο πακέτο, ανακτάται το χρήσιμο τμήμα δεδομένων (payload) του πακέτου από την πρόσκαιρη μνήμη (buffer) του πομποδέκτη LoRa (transceiver) και προωθείται για εμφάνιση/καταγραφή μέσω της SPI διεπαφής. Προϋπόθεση για να λειτουργήσει η διεπαφή SPI είναι η συμπερίληψη στον κώδικα της βιβλιοθήκης <SPI.h>, όπως είχαμε αναφέρει και στο κεφάλαιο 4. Παράλληλα καταγράφεται για κάθε πακέτο η ένδειξη RSSI, η οποία χρησιμοποιείται ως μετρική ποιότητας ζεύξης και επιτρέπει αξιολόγηση της ισχύος λήψης σε διαφορετικές αποστάσεις/συνθήκες διάδοσης.

Στη συνέχεια, ο ESP32 πραγματοποιεί την μετάδοση των δεδομένων από τα πακέτα LoRa που έλαβε στην ιστοσελίδα που φιλοξενεί το επίπεδο εφαρμογής του συστήματος. Η μετάδοση των δεδομένων αυτών γίνεται με τη χρήση του HTTP πρωτοκόλλου. Οι βιβλιοθήκες που σχετίζονται με το συγκεκριμένο πρωτόκολλο είναι η <HTTPClient.h>, καθώς και η <WiFi.h>, έτσι ώστε να μπορεί ο ESP32 να χρησιμοποιήσει την ενσωματωμένη Wi-Fi κάρτα δικτύου που διαθέτει.

Αναφορικά με την σύνδεση του ESP32 σε Wi-Fi, δεν πραγματοποιείται απευθείας με σταθερή ανάθεση μέσα στον κώδικα, διότι αυτό θα περιέπλεκε τη λειτουργία του. Επειδή υπάρχει πιθανότητα το δίκτυο στο οποίο συνδέεται να αλλάζει δυναμικά, ανάλογα με το περιβάλλον τοποθέτησης. Έτσι, χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη <WiFiManager.h>, μέσα από την οποία θέτουμε ως δίκτυο σύνδεσης του ESP32 το ESP_Config, το οποίο μας παραπέμπει σε localhost σύνδεση μέσα από τον browser, όπου μπορούμε να θέσουμε SSID και password για το ασύρματο δίκτυο που επιθυμούμε να συνδεθεί ο ESP32. Περισσότερα για το Wi-Fi Manager θα δούμε στην υποενότητα 5.6.1 παρακάτω.



Εικόνα 5.11: Διάγραμμα Ροής Τμήματος Receiver

Τα δεδομένα που αποστέλλονται μέσω HTTP Request αιτήματος είναι σε μορφή string. Το string αυτό περιλαμβάνει 11 πεδία δεδομένων εκ των οποίων τα πρώτα 8 είναι τιμές από τις μετρήσεις (θερμοκρασία εδάφους, υγρασία εδάφους, θερμοκρασία αέρα, υγρασία αέρα, πίεση αέρα, ταχύτητα ανέμου, κατεύθυνση ανέμου) και τα υπόλοιπα 3 είναι τα αναγνωριστικά (όνομα κόμβου μέτρησης, id σταθμού και όνομα σταθμού). Αξίζει να σημειωθεί ότι κάθε πακέτο δεδομένων που αποστέλλεται, περιλαμβάνει τις μετρήσεις ενός μόνο κόμβου.

Στην Εικόνα 5.11 των προηγούμενης σελίδας υπάρχει το διάγραμμα ροής που συνοψίζει την λειτουργία του Receiver. Ολόκληρος ο κώδικας για το τμήμα Receiver βρίσκεται στο Παράρτημα Β της εργασίας.

5.6.1 Χρήση του ESP Wi-Fi Manager

Όπως αναφέραμε στην επεξήγηση του κώδικα, για την αποστολή των δεδομένων από τον ESP32 προς τα backend με HTTP αιτήματα, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η σύνδεση του μικροελεγκτή με κάποιο ασύρματο δίκτυο Wi-Fi.

Η προκαθορισμένη (default) μέθοδος που ακολουθείται για την σύνδεση του μικροελεγκτή με ένα δίκτυο είναι η χειροκίνητη ανάθεση τιμών SSID και Password μέσα στη setup ρουτίνα του κώδικα, όπως φαίνεται και στον παρακάτω Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Χειροκίνητη Ανάθεση Τιμών SSID και Password για σύνδεση ESP32 με Wi-Fi

```
const char* SSID = "Your ssid name";
const char* PASS = "Your password";
```

Ωστόσο, αυτή η πρακτική δεν είναι καθόλου χρήσιμη στην δική μας περίπτωση, διότι θα σήμαινε ότι ο τελικός χρήστης του συστήματος θα είχε δύο επιλογές:

- Να μην αλλάξει ποτέ SSID και Password για το ασύρματο δίκτυο που θα ήταν συνδεδεμένο το Receiver.
- Να καλεί κάποιον διαχειριστή προκειμένου να ξαναγράψει τις γραμμές κώδικα κάθε φορά που θα γινόταν μία αλλαγή στο οικιακό του δίκτυο.

Η πρώτη επιλογή είναι μάλλον αδύνατη, αφού οι ίδιοι πάροχοι διαδικτύου (Internet Service Providers / ISP) συχνά αλλάζουν τους εξοπλισμούς των πελατών και μαζί με τον εξοπλισμό αλλάζουν και τα στοιχεία SSID και password. Φυσικά και η δεύτερη επιλογή δεν είναι ιδανική μιας και θα δημιουργούσε τεράστιο όγκο εργασιών στους διαχειριστές του συστήματος για ένα απλό βήμα.

Οπότε, για να είναι πιο εύκολη η σύνδεση στο Wi-Fi, προσθέσαμε στον κώδικα το εργαλείο Wi-Fi Manager που δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να συνδέεται στο Wi-Fi με έναν εύκολο και δυναμικό τρόπο. Η χρήση του εργαλείου γίνεται με τη χρήση των εντολών του Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3: Χρήση Εργαλείου Wi-Fi Manager

```
#include <WiFiManager.h>

WiFiManager wm;

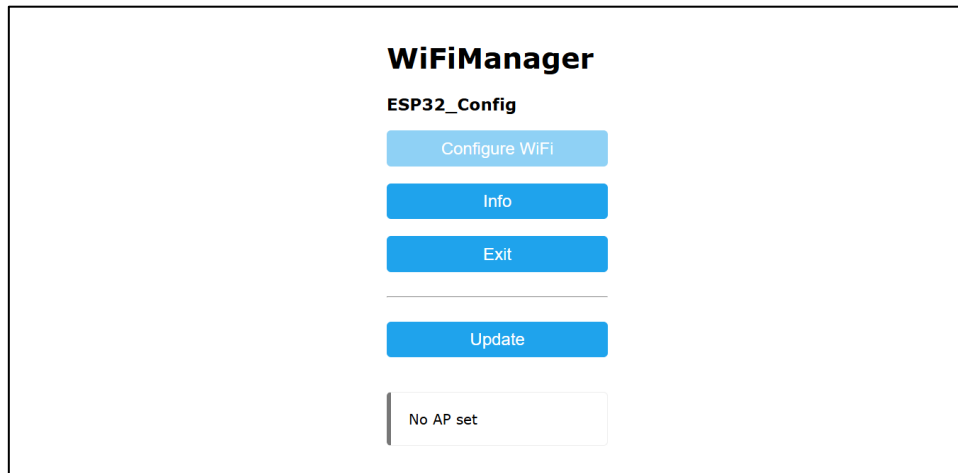
WiFi.mode(WIFI_STA);

bool connected = wm.autoConnect("ESP32_Config");
```

Κατά την διαδικασία εκκίνησης του, ο ESP32 προσπαθεί να συνδεθεί σε ήδη αποθηκευμένο Wi-Fi. Εφόσον δεν υπάρχουν αποθηκευμένα στοιχεία ή η σύνδεση με αποθηκευμένο δίκτυο αποτύχει (π.χ. σε

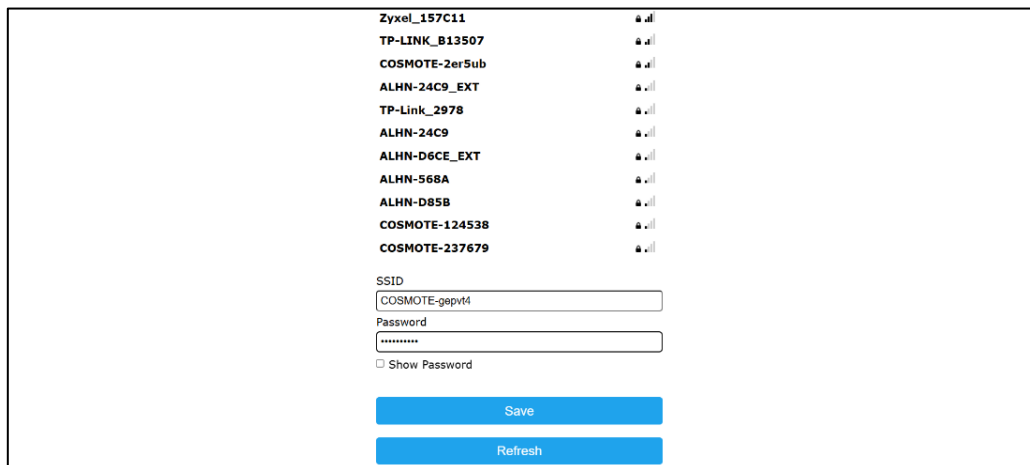
περίπτωση που το password για το ασύρματο δίκτυο έχει αλλάξει), δημιουργεί προσωρινό σημείο πρόσβασης με όνομα ESP32_Config. Μέσω αυτού του σημείου, ο χρήστης μπορεί να συνδεθεί από κινητό ή υπολογιστή σε localhost και να εισάγει τα στοιχεία του Wi-Fi που επιθυμεί να συνδεθεί ο μικροελεγκτής. Αυτή η λειτουργία επιτυγχάνεται με την εντολή `wm.AutoConnect(“ESP32_Config”)`;

Αφού δημιουργηθεί το σημείο ESP32_Config, αρκεί απλά να συνδεθούμε με μία συσκευή σε αυτό και αυτόματα θα ανοίξει η σελίδα της Εικόνας 5.12 σε φυλλομετρητή διαδικτύου.



Εικόνα 5.12: Αρχική Οθόνη Wi-Fi Manager

Από την αρχική οθόνη επιλέγουμε το «Configure Wi-Fi» και μεταβαίνουμε στην οθόνη της Εικόνας 5.13, όπου μπορούμε να δούμε τα αποθηκευμένα στη μνήμη του ESP32 ασύρματα δίκτυα ή να εισάγουμε τα στοιχεία για ένα νέο δίκτυο στα πεδία SSID και Password. Πατώντας το κουμπί «Save» το δίκτυο αποθηκεύεται ως προκαθορισμένο και ο ESP32 επανεκκινεί ώστε να συνδεθεί σε αυτό.



Εικόνα 5.13: Επιλογή δικτύου από το Wi-Fi Manager

5.7 Επίλογος

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε επισκόπηση των πρωτοκόλλων δικτύωσης που χρησιμοποιούνται στην εφαρμογή, καθώς φυσικά και των τοπολογιών με τις οποίες μπορεί να δομηθεί ένα οποιοδήποτε δίκτυο, κάνοντας μία συγκριτική παράθεση των θετικών και αρνητικών στοιχείων της κάθε τοπολογίας. Επιπροσθέτως, παραθέσαμε τους λόγους για τους οποίους επιλέγονται πρωτόκολλα δικτύωσης όπως είναι το LoRa στις εφαρμογές IoT. Τέλος, αναφερθήκαμε στην δομή του κώδικα που χρησιμοποιεί ο μικροελεγκτής ESP32 που λειτουργεί ως δέκτης στην εφαρμογή μας και τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί ως «συνδεδεμένος κρίκος» μεταξύ του επιπέδου αντίληψης και του επιπέδου εφαρμογής που θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 6ο: Επίπεδο Εφαρμογής (Application Layer)

6.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα αναφερθούμε στο επίπεδο εφαρμογής, το ανώτερο επίπεδο IoT εφαρμογών, βάσει της αρχιτεκτονικής που παρουσιάσαμε στο κεφάλαιο 3. Το επίπεδο αυτό είναι υπεύθυνο για την λήψη, επεξεργασία και αποθήκευση των δεδομένων από τις μετρήσεις που πραγματοποιεί το σύστημα.

Ενδεικτικά, αναφερόμαστε στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η μετάδοση των δεδομένων από τον ESP32 Receiver στο backend της εφαρμογής, τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για το frontend και το backend, αλλά και για την αποθήκευση των δεδομένων στη βάση.

6.2 Συνοπτική Επισκόπηση του Επιπέδου Εφαρμογής

Συνοπτικά, στο επίπεδο εφαρμογής πραγματοποιείται η αποστολή των δεδομένων μέτρησης από τον ESP32 Receiver στο Backend του λογισμικού με χρήση HTTP αιτήματος στο κατάλληλο Web API endpoint. Όταν το Backend λαμβάνει τα δεδομένα αυτά, τα επεξεργάζεται και τα αποθηκεύει στη βάση δεδομένων. Τέλος, τα δεδομένα εμφανίζονται στη Web εφαρμογή με τη μορφή γραφημάτων.

Στο κομμάτι της Web εφαρμογής, έχουμε 2 σελίδες, την κύρια που είναι προσβάσιμη σε όλους και το CRUD Panel που είναι προσβάσιμο μόνο στους διαχειριστές. Στην κύρια σελίδα εμφανίζονται οι καταχωρημένοι μετεωρολογικοί σταθμοί, ενώ στο CRUD Panel γίνεται η διαχείριση του περιεχομένου της κύριας σελίδας.

6.3 Επικοινωνία μεταξύ ESP32 Receiver και Backend

Αρχικά, η επικοινωνία μεταξύ του Receiver και του Backend επιτυγχάνεται μέσω πρωτοκόλλου HTTP, όπως συνοπτικά αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 5. Μέσα από τον κώδικα του μικροελεγκτή ενσωματώνονται βιβλιοθήκες για χρήση του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου. Τον ρόλο αυτού του «συνδετικού κρίκου» μεταξύ των δεδομένων που προκύπτουν από τις μετρήσεις των αισθητήρων (επίπεδο αντίληψης) και της γραφικής Διεπαφής Χρήστη (User Interface / UI) του επιπέδου εφαρμογής αναλαμβάνει το Backend. Τα δεδομένα που έχουν ληφθεί μέσω LoRa ελέγχονται για την αναμενόμενη δομή τους και εν τέλει αποστέλλονται στο Backend.

6.3.1 HTTP Request

Το HTTP αίτημα μέσω Wi-Fi χρησιμοποιείται ώστε ο δέκτης (ESP32) να προωθεί τα δεδομένα που λαμβάνει από μέτρηση είτε ενός νέου μετεωρολογικού σταθμού είτε ενός ήδη καταχωρημένου σταθμού στο backend της ιστοσελίδας, όπως αναφέραμε και στην υποενότητα 5.6 με την επισκόπηση του κώδικα για τον δέκτη.

Αφού ο μικροελεγκτής συνδεθεί σε δίκτυο Wi-Fi, λειτουργεί ως IoT gateway, καθώς δημιουργεί ένα αίτημα HTTP/HTTPS POST προς ένα endpoint του web server (συγκεκριμένα το «post_data.php») και στέλνει τα δεδομένα στο σώμα (body) του αιτήματος κάθε φορά που λαμβάνει ένα πακέτο δεδομένων μέσω LoRa. Η δομή ενός τέτοιου πακέτου LoRa εικονίζεται στην παρακάτω Εικόνα 6.1 που προέρχεται από το Serial Monitor του Arduino IDE. Συγκεκριμένα, η δομή του πακέτου φαίνεται στην τελευταία γραμμή.

```
WiFi connected
192.168.2.125
LoRa Receiver
LoRa Initializing OK!
Received packet '23.27;-10.00;22.81;61.19;1018.00;0.00;0.00;NORTH;node_test;007;stat10' with RSSI-47
```

Εικόνα 6.1: Δομή πακέτου LoRa

Τα δεδομένα που λαμβάνει ο Receiver αποθηκεύονται σε μια μεταβλητή τύπου String με όνομα LoRaData. Έπειτα, αφού γίνει έλεγχος ότι τα δεδομένα είναι στη σωστή μορφή που περιγράψαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο (11 πεδία διαχωρισμένα με semicolon) καλείται η συνάρτηση `httpsPostPlainText()`, η οποία αποστέλλει τα δεδομένα στο backend. Η δομή της συνάρτησης είναι αυτή του Πίνακα 6.1 παρακάτω.

Πίνακας 6.1: Η συνάρτηση `httpsPostPlainText()`

```
bool httpsPostPlainText(const String& body, int* outCode = nullptr, String*
outResp = nullptr)
```

Στην παρακάτω γραμμή κώδικα του Πίνακα 6.2 καθορίζεται και το endpoint στο οποίο καταλήγουν τα δεδομένα, ενώ η τελική αποστολή γίνεται με την γραμμή κώδικα του Πίνακα 6.3.

Πίνακας 6.2: Καθορισμός endpoint για τα δεδομένα

```
const char* URL = "https://users.iee.ihu.gr/~iee2019074/php/post_data.php";
```

Πίνακας 6.3: Ρύθμιση των προς αποστολή δεδομένων

```
int code = http.POST((uint8_t*)body.c_str(), body.length());
```

Στην δομή του παρακάτω Πίνακα 6.4, καθορίζονται οι παράμετροι του HTTP POST Request, δηλαδή η δομή των προς αποστολή δεδομένων, όπως και η αναμονή για επιβεβαίωση (response). Ειδικότερα, η εντολή `https.begin(client, URL)` ορίζει το endpoint του backend στο οποίο θα σταλούν τα δεδομένα. Η εντολή `https.addHeader("Content-Type", "text/plain")` δηλώνει ότι τα δεδομένα αποστέλλονται ως απλό κείμενο. Η βασική εντολή αποστολής είναι η `https.POST(LoRaData)`, η οποία πραγματοποιεί το HTTP POST αίτημα προς το backend. Το αποτέλεσμα της αποστολής αποθηκεύεται στη μεταβλητή `httpCode`, ώστε να ελεγχθεί μετά αν η αποστολή ήταν επιτυχής.

Πίνακας 6.4: Ρουτίνα Αποστολής Δεδομένων

```
if (WiFi.status() == WL_CONNECTED){
  WiFiClientSecure client;
  client.setInsecure();

  HTTPClient https;
  https.begin(client, URL);
  https.addHeader("Content-Type", "text/plain");

  int httpCode = https.POST(LoRaData);

  String response = https.getString();
  https.end();
}
```

Τα δεδομένα αποστέλλονται ως text/plain, δηλαδή ως ένα String με πεδία χωρισμένα με τον χαρακτήρα semicolon «;» ώστε ο server να τα διαβάζει από το php://input, να τα ελέγχει (π.χ. ότι υπάρχουν οι 11 τιμές που αναμένει) και στη συνέχεια να τα αποθηκεύει στη βάση δεδομένων. Οι αναμενόμενες τιμές περιλαμβάνουν όλες τις μετρήσεις από τα αισθητήρια, όπως περιγράψαμε στο κεφάλαιο 4, οι οποίες συντίθενται σε ένα μεγάλο String, συν τα αναγνωριστικά η_name, station_id και station_name που έχουν δοθεί σε κάθε κόμβο transmitter ή σταθμό (που μπορεί να περιλαμβάνει αρκετούς κόμβους) που υπάρχει στο σύστημα. Στη δική μας περίπτωση ο κόμβος αυτός είναι ένας, ωστόσο η εφαρμογή υποστηρίζει την ύπαρξη πολλών, καθότι ένας από τους στόχους σχεδιασμού της είναι η επεκτασιμότητα.

Η χρήση HTTPS (HTTP Secure) εξασφαλίζει κρυπτογράφηση της επικοινωνίας, ενώ το HTTP status code (π.χ. 200) και η JSON απάντηση από τον server επιβεβαιώνουν ότι η αποστολή και η εισαγωγή στη βάση ολοκληρώθηκαν επιτυχώς. [67]

Οι παρακάτω Εικόνες 6.2 και 6.3 είναι από το Serial Monitor που προσφέρει το Arduino IDE και αφορούν στην απάντηση (response) HTTP που αποστέλλεται από το backend και περιέχει τον κωδικό (status code) επιβεβαίωσης ή απόρριψης των δεδομένων που έχουν αποσταλεί. Στην πρώτη εικόνα, ο κωδικός είναι 202, επομένως αφορά σε αποστολή δεδομένων από σταθμό που δεν έχει πάρει ακόμη έγκριση για καταχώριση δεδομένων από τη βάση, ενώ στην δεύτερη εμφανίζεται status code 200 και αφορά σε σταθμό που έχει ήδη εγκριθεί. Σε περίπτωση μη έγκρισης του σταθμού, θα εμφανιστεί μήνυμα με status code 422. Περισσότερα σχετικά με την διαδικασία έγκρισης σταθμών θα δούμε σε υποενότητα του κεφαλαίου 7.

```
HTTP code: 202
{"status":"pending","message":"Station added as pending. Waiting for admin approval."}
```

Εικόνα 6.2: HTTP Response με κωδικό 202 (Status: Pending)

```
HTTP code: 200
{"status":"success","message":"Data inserted","table":"station_11526","s_id":"11526","s_name":"st11_5","n_name":"nodeAlpha"}
```

Εικόνα 6.3: HTTP Response με κωδικό 200 (Status: Success)

6.4 Frontend

Το Frontend ενός υλοποιημένου λογισμικού συστήματος λαμβάνει τον ρόλο του «μεσάζοντα» μεταξύ τελικού χρήστη και υποκείμενου λογισμικού. Μέσω αυτού, ο χρήστης αλληλοεπιδρά άμεσα με το σύστημα.

Συχνά συναντάται με την ονομασία «client side» καθώς επικεντρώνεται στον τρόπο παρουσίασης και στη διεπαφή χρήστη (UI). Η κύρια λειτουργία του Frontend είναι να παρουσιάζει τη λειτουργία της εφαρμογής με τον βέλτιστο και πιο κατανοητό τρόπο προς τον χρήστη, έχοντας ως γνώμονα σχεδίασης του ένα γενικό επίπεδο εξοικείωσης των χρηστών με τη χρήση λογισμικών. Παραδείγματος χάριν, στην περίπτωση του συστήματος που υλοποιούμε, το UI θα πρέπει να είναι κατανοητό από ανθρώπους που ασχολούνται με τις αγροτικές καλλιέργειες, επομένως δεν απαιτούμε από αυτούς να έχουν τεράστιες γνώσεις λειτουργίας υπολογιστών. Σε αυτή τη γραμμή γενικώς φαίνεται να κινούνται όλα τα περιβάλλοντα που αναπτύσσονται για χρήση IoT εφαρμογών.

Τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη του Frontend είναι πολλές. Οι βασικότερες από αυτές είναι: η HTML (HyperText Markup Language), η CSS (Cascading Style Sheets) και η JavaScript, με τη χρήση των οποίων περιγράφεται η δομή και η μορφοποίηση δυναμικών ιστοσελίδων. Πέραν των προαναφερθέντων, υπάρχουν και άλλα εξελιγμένα frameworks, όπως είναι η react. Περισσότερες

λεπτομέρειες σχετικά με τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούμε στην δική μας περίπτωση θα αναφέρουμε στην υποενότητα 6.4.2 παρακάτω.

Η επικοινωνία μεταξύ του Frontend και του Backend γίνεται με το λεγόμενο Web API, χρησιμοποιώντας αιτήματα και αποκρίσεις πρωτοκόλλου HTTP. Για παράδειγμα, όταν ένας χρήστης υποβάλλει μια φόρμα ή ζητά δεδομένα, το Frontend στέλνει αίτημα στο Backend, το οποίο επεξεργάζεται τη λογική και επιστρέφει αποτελέσματα σε μορφή JSON. Στη συνέχεια, αυτά αποδίδονται στη διεπαφή χρήστη. Μία αναλυτικότερη επεξήγηση σχετικά με τη διασύνδεση των Frontend και Backend μέσω του API θα δοθεί στην υποενότητα 6.5.

6.4.1 User Interface / User Experience (UI / UX)

Η Διεπαφή Χρήστη (User Interface) απαρτίζεται από όλα τα στοιχεία που βλέπει και αλληλεπιδρά ο χρήστης σε μια σελίδα. Αναφορικά, περιλαμβάνει τα μενού, τα κουμπιά, τα χρώματα, την τυπογραφία, τα εικονίδια, τη δομή (layout) και τις φόρμες. Ανάλογα με τις ανάγκες μιας εφαρμογής, είναι σημαντικό το UI να είναι προσαρμοσμένο σε αυτές, για να αποκτήσει ο χρήστης μια όσο τον δυνατόν πιο προσεγμένη εμπειρία, την οποία ονομάζουμε Εμπειρία Χρήστη (User Experience / UX). [121]

Το UX αναφέρεται στη συνολική εμπειρία που αποκτά ένας χρήστης όταν αλληλεπιδρά με μία εφαρμογή. Εκτός από την εμφάνιση της δεδομένης εφαρμογής (εν προκειμένω της ιστοσελίδας), το UX σχετίζεται με το πόσο εύκολη, γρήγορη, ευχάριστη και πάνω από όλα κατανοητή είναι η χρήση της. Συνδέεται με 2 πολύ σημαντικές έννοιες, την χρησιμότητα (usability) και τη προσβασιμότητα (accessibility). Η μεν χρησιμότητα σχετίζεται με την ευκολία του χρήστη να πραγματοποιεί τις απαραίτητες ενέργειες και να εντοπίζει τις απαραίτητες πληροφορίες, ενώ η προσβασιμότητα είναι σχετική με το κατά πόσο διαφορετικές κατηγορίες χρηστών μπορούν να χρησιμοποιήσουν μια σελίδα. Ενδεικτικές κατηγορίες είναι τα άτομα με δυσκολίες στην όραση ή δυσκολίες στην κατανόηση του προσφερόμενου περιεχομένου. [122]

Γενικά, το UI και το UX αν και έννοιες διαφορετικές, πλέον θεωρούνται άρρηκτα συνδεδεμένες μεταξύ τους. Μια πολύ καλή σχεδιασμένη διεπαφή (UI) διαμορφώνει γενικώς ένα καλό User Experience (UX), γι' αυτό και όταν πρόκειται να σχεδιαστεί η διεπαφή μιας εφαρμογής, καλό είναι να συσχετίζεται με το περιεχόμενο που πρόκειται να προβληθεί.

6.4.2 Χρησιμοποιούμενες Τεχνολογίες στο Frontend

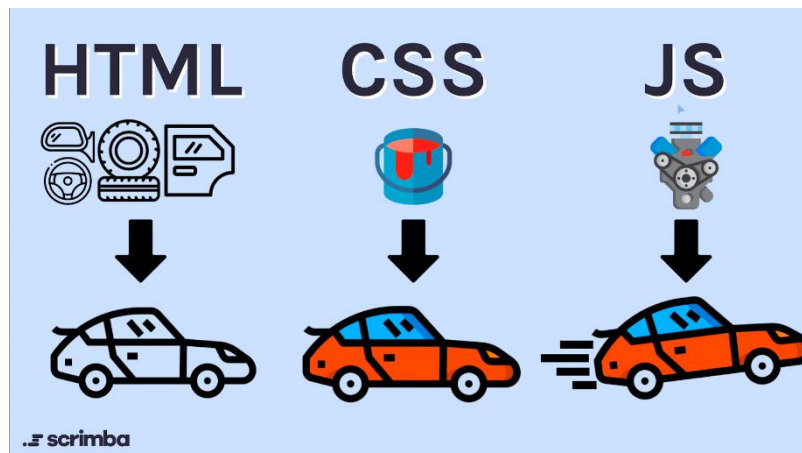
Για την ανάπτυξη του Frontend, χρησιμοποιήσαμε τις βασικές τεχνολογίες/γλώσσες με τις οποίες δομείται μία σύγχρονη δυναμική ιστοσελίδα, ήτοι HTML, CSS και JavaScript.

Η HTML (HyperText Markup Language) είναι η γλώσσα που χρησιμοποιείται για τη δομή και το περιεχόμενο μιας ιστοσελίδας. Μέσω αυτής ορίζονται τα κείμενα, οι τίτλοι, οι εικόνες, οι πίνακες και γενικά όλα τα στοιχεία που εμφανίζονται στη σελίδα. Δομεί την σελίδα σε τμήματα και ενσωματώνει στοιχεία των άλλων δύο τεχνολογιών.

Η CSS (Cascading Style Sheets) είναι η γλώσσα που χρησιμοποιείται για τη μορφοποίηση και την εμφάνιση της ιστοσελίδας. Με την CSS, καθορίζονται τα χρώματα, οι γραμματοσειρές, τα περιθώρια, η διάταξη και η συνολική αισθητική παρουσίαση του περιεχομένου που έχει προσδιορίσει η HTML.

Η JavaScript είναι γλώσσα προγραμματισμού, υπεύθυνη για την προσθήκη διαδραστικότητας και δυναμικής λειτουργικότητας στις ιστοσελίδες. Προσφέρει τη χρήση συναρτήσεων για υλοποίηση διαφόρων ενεργειών, όπως η απόκριση αντικειμένων της σελίδας σε κλικ, η αλλαγή περιεχομένου χωρίς

ανανέωση σελίδας, οι φόρμες με έλεγχο σφαλμάτων, καθώς και πιο σύνθετες λειτουργίες τύπου animations ή η επικοινωνία της σελίδας με servers.



Εικόνα 6.4: Απλουστευμένο Παράδειγμα λειτουργίας των τεχνολογιών HTML, CSS, JavaScript [123]

Για να κατανοήσουμε τη χρήση των ανωτέρω τεχνολογιών, φέρουμε το απλουστευμένο παράδειγμα της παραπάνω Εικόνας 6.4. Αν μία σύγχρονη δυναμική ιστοσελίδα είναι όλο το αυτοκίνητο της εικόνας, τότε η HTML είναι αυτή που περιγράφει τα μέρη από τα οποία κατασκευάζεται το αυτοκίνητο, η CSS περιγράφει την εξωτερική εμφάνιση του αυτοκινήτου αυτού, ενώ με την JavaScript κάποια μέρη του αυτοκινήτου αποκτούν λειτουργίες τέτοιες που το καθιστούν όχημα και όχι μεταλλικό σασί με χρώματα.

6.4.3 Οπτικοποίηση Δεδομένων (Data Visualization)

Για την ευκολία του χρήστη στην κατανόηση και τη σύγκριση των δεδομένων που είναι αποθηκευμένες στη βάση από τις μετρήσεις των αισθητήρων, επιλέγουμε η οπτικοποίηση (visualization) να γίνει μέσω γραφημάτων 2 διαστάσεων. Στον οριζόντιο άξονα τοποθετούνται οι χρονικές στιγμές που λαμβάνονται τα δεδομένα, ενώ στον κάθετο η μετρούμενη για κάθε μέγεθος τιμή, όπως θα δούμε και στο κεφάλαιο 7 παρακάτω.

Τα γραφήματα αυτά δημιουργούνται με τη χρήση του αρχείου graph.js. Μέσω JavaScript, το αρχείο επικοινωνεί με τα κατάλληλα Web API endpoints, λαμβάνει τα δεδομένα σε μορφή JSON και τα εμφανίζει στον χρήστη ως γραφήματα. Παράλληλα, βοηθά στη δυναμική ενημέρωση της σελίδας, καθώς τα δεδομένα μπορούν να φορτώνονται από τη βάση μέσω του backend χωρίς να χρειάζεται να γραφούν στατικά μέσα στο HTML αρχείο.

Στον παρακάτω Πίνακα 6.5 της επόμενης σελίδας, δίνεται η δομή της συνάρτησης postSmart() που χρησιμοποιείται για την αποστολή αιτημάτων από το Frontend προς το Backend του συστήματος. Με τη χρήση της εντολής fetch() στη δεύτερη γραμμή, το Frontend στέλνει αίτημα προς το Web API endpoint με τη μέθοδο HTTP POST και ως απάντηση λαμβάνει τα δεδομένα από τη βάση σε μορφή JSON. Με αυτόν τον τρόπο, το graph.js μπορεί να ζητά ιστορικές μετρήσεις από τη βάση δεδομένων μέσω του backend.

Αντίστοιχα, στον Πίνακα 6.6 τα δεδομένα που έχουν ληφθεί από το backend μετατρέπονται σε μορφή κατάλληλη για απεικόνιση στο γράφημα. Ο πίνακας labels περιέχει τις χρονικές στιγμές των μετρήσεων (οριζόντιος άξονας), ενώ ο πίνακας values περιέχει τις τιμές της επιλεγμένης μέτρησης (κάθετος άξονας). Έπειτα, με τη χρήση της βιβλιοθήκης Chart.js δημιουργείται γραμμικό διάγραμμα, ώστε οι αυξομειώσεις των μετρήσεων να παρουσιάζονται ομοιογενείς στον χρήστη.

Πίνακας 6.5: Συνάρτηση postSmart() του αρχείου graph.js

```

async function postSmart(url, payload) {
  const r = await fetch(url, {
    method: 'POST',
    headers: { 'Content-Type': 'application/json' },
    body: JSON.stringify(payload)
  });

  const text = await r.text();
  const data = JSON.parse(text);

  if (!r.ok) throw new Error(data?.message || `HTTP ${r.status}`);

  return data;
}

```

Πίνακας 6.6: Δημιουργία του γραφήματος με το αρχείο graph.js

```

const labels = rows.map(r => r.created_at);

const values = rows.map(r => {
  const v = parseFloat(r[field]);
  return Number.isFinite(v) ? v : null;
});

const chart = new Chart(ctx, {
  type: 'line',
  data: {
    labels,
    datasets: [{
      label: labelWithUnit,
      data: values,
      borderWidth: 2,
      fill: true
    }]
  },
  options: {
    responsive: true,
    maintainAspectRatio: false
  }
});

```

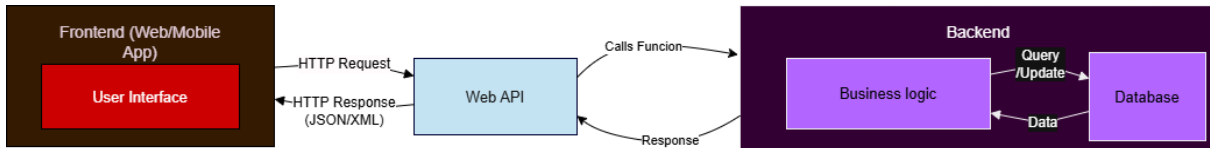
6.5 Web API

Γενικά API (Application Programming Interface) σημαίνει Διεπαφή Προγραμματισμού Εφαρμογών. Περιγράφει ένα σύνολο από κανόνες, πρωτόκολλα και εργαλεία που ως στόχο έχουν την επιτυχή αλληλεπίδραση μεταξύ διαφορετικών λογισμικών. Είναι δηλαδή ο διερμηνέας μεταξύ των λογισμικών.

Το μόνο απαιτούμενο από πλευράς προγραμματιστή είναι η χρήση εντολών και μεθόδων που υποστηρίζονται ή παρέχονται στο εκάστοτε API.

Τα Web API (Web Application Programming Interface) είναι διεπαφές που παρέχουν πρόσβαση σε υπηρεσίες λογισμικού μέσω του διαδικτύου. Βασίζονται σε ευρέως διαδεδομένα πρωτόκολλα του διαδικτύου όπως είναι τα HTTP και το HTTPS.

Στην παρακάτω Εικόνα 6.5 διακρίνεται ο ρόλος που έχουν τα Web API σε σχέση με τα Frontend και Backend.



Εικόνα 6.5: Ρόλος του Web API στην επικοινωνία Frontend με Backend

Όπως παρατηρούμε από το παραπάνω σχήμα, τα Web API αποτελούν τη διεπαφή επικοινωνίας μεταξύ των τμημάτων Frontend και Backend σε μια εφαρμογή. Το Frontend (π.χ. μια web ή mobile εφαρμογή) είναι υπεύθυνο για την αλληλεπίδραση του λογισμικού με τον χρήστη και βάσει των επιλογών που δίνει ο τελευταίος στην εφαρμογή, στέλνει τα απαραίτητα αιτήματα (HTTP Requests) στο Web API. Το Web API από πλευράς του αναλαμβάνει την προώθηση αυτών των αιτημάτων στο Backend, το οποίο περιλαμβάνει τη λογική της εφαρμογής (Business Logic) και τη Βάση Δεδομένων. Μετά από επεξεργασία του αιτήματος, το Backend επιστρέφει τα αποτελέσματα στο Web API και από εκεί μεταβιβάζονται πίσω στο Frontend σε μορφή JSON ή XML. [67]

6.6 Backend

Το Backend ενός λογισμικού συστήματος αναφέρεται στο τμήμα της εφαρμογής που εκτελείται στον διακομιστή (server) και είναι υπεύθυνο για τη λογική της εφαρμογής, την επεξεργασία δεδομένων και την επικοινωνία με τις βάσεις. Σε αντίθεση με το Frontend που εστιάζει στην αλληλεπίδραση του χρήστη με τη διεπαφή, το Backend λειτουργεί στο παρασκήνιο και προσπαθεί να εξασφαλίσει ότι το σύστημα λειτουργεί σωστά και αποδοτικά.

Τεχνολογίες που αξιοποιούνται για την ανάπτυξη Backend λογισμικών είναι γλώσσες προγραμματισμού για τον διακομιστή, όπως η Java, η Python, η PHP, η Node.js και η C#. Με τη χρήση τέτοιων γλωσσών υλοποιείται η λογική επεξεργασίας αιτημάτων, εκτέλεσης υπολογισμών, εφαρμογής επιχειρηματικών κανόνων και αλληλεπίδρασης με Βάσεις Δεδομένων. Οι τεχνολογίες που αξιοποιούμε στην περίπτωση του δικού μας Backend παρουσιάζονται στην υποενότητα 6.6.1.

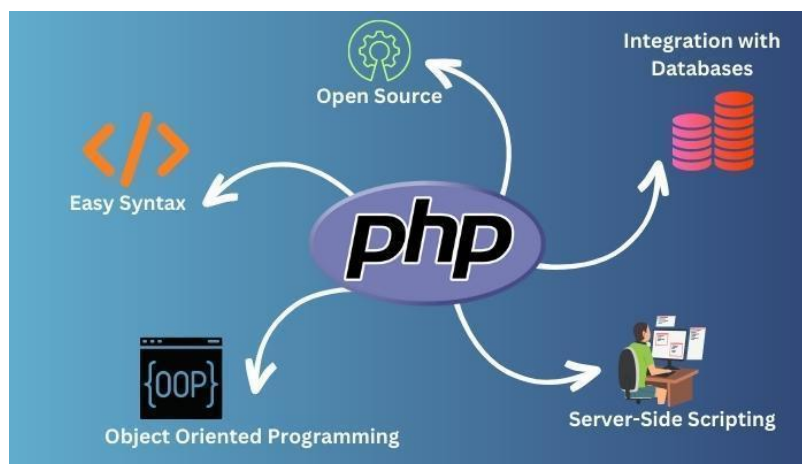
Οι Βάσεις Δεδομένων, είτε σχεσιακές (π.χ. MySQL, PostgreSQL) είτε μη-σχεσιακές (π.χ. MongoDB), αποτελούν σημαντικό τμήμα του Backend διότι αποθηκεύουν τεράστιους όγκους δεδομένων ώστε να μπορούν έπειτα να ανακληθούν για επεξεργασία από τον χρήστη. Πληροφορίες σχετικά με την υλοποιημένη βάση δεδομένων για το σύστημα της εργασίας θα δούμε στην υποενότητα 6.7.1.

Σημαντικό είναι να τονίσουμε ότι το Backend έχει καθοριστικό ρόλο στην ασφάλεια, την ταυτοποίηση και την εξουσιοδότηση εξασφαλίζοντας ότι οι χρήστες έχουν πρόσβαση μόνο στα δεδομένα και τις λειτουργίες που επιτρέπεται βάσει της ιδιότητάς τους. Ένα παράδειγμα που μπορούμε να δώσουμε εδώ είναι το εργαλείο Aboard (<https://aboard.iee.ihu.gr/>) του τμήματος. Το Backend στο Aboard εξασφαλίζει ότι χρήστες που είναι φοιτητές δεν έχουν την δυνατότητα να δημοσιεύσουν ανακοινώσεις, ενώ αντίθετως αυτό είναι δυνατό από τους χρήστες που είναι διδάσκοντες.

6.6.1 Χρησιμοποιούμενες Τεχνολογίες στο Backend

Για την ανάπτυξη του Backend αξιοποιείται η γλώσσα PHP (Hypertext Preprocessor). Η γλώσσα αυτή ανήκει στις γλώσσες προγραμματισμού και εκτελείται στην πλευρά του διακομιστή (server-side). Κύρια χρήση της είναι η ανάπτυξη δυναμικών ιστοσελίδων και web εφαρμογών.

Μέσω της PHP, ο διακομιστής μπορεί να επεξεργαστεί αιτήματα από τον χρήστη, να αλληλεπιδράσει με βάσεις δεδομένων, να δημιουργήσει ή να τροποποιήσει περιεχόμενο και να επιστρέψει στον browser το αποτέλεσμα του αιτήματος που δέχτηκε σε μορφή HTML. Με αυτόν τον τρόπο, η PHP δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας ιστοσελίδων που προσαρμόζονται στις ανάγκες του χρήστη και παρέχουν πολύπλοκες λειτουργίες, όπως φόρμες, συστήματα εισόδου (login), ηλεκτρονικά καταστήματα και πλατφόρμες διαχείρισης περιεχομένου. Να τονιστεί επίσης ότι η σύνταξή της θεωρείται γενικώς εύκολη, δεδομένων των άπειρων δυνατοτήτων που προσφέρει ως γλώσσα. Στην παρακάτω Εικόνα 6.6 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά που καθιστούν την χρήση της PHP διαδεδομένη.



Εικόνα 6.6: Χαρακτηριστικά της PHP [124]

Στην περίπτωση του συστήματός μας, διαμορφώσαμε μια δυναμική ιστοσελίδα, στην οποία απεικονίζονται οι 8 μετρήσεις που λαμβάνονται από τους αισθητήρες και αφορούν σε περιβαλλοντικά δεδομένα. Εφόσον το Backend διαχειρίζεται τη βάση, όλη η διαδικασία προσθήκης δεδομένων γίνεται πιο εύκολη. Μόλις ληφθούν τα δεδομένα, το Backend καθορίζει τη ροή τους προς τη βάση, όπερ σημαίνει ότι καταχωρεί τα πρωτογενή ακατέργαστα δεδομένα (raw data) με σκοπό την επεξεργασία τους σε επόμενο χρόνο.

6.6.2 Επεξεργασία Αιτήματος στο Backend

Όπως έχουμε τονίσει στην υποενότητα 5.6 του προηγούμενου κεφαλαίου αλλά και στην υποενότητα 6.3.1 παραπάνω, η μεταβίβαση των δεδομένων από τις μετρήσεις των αισθητήρων στη βάση γίνεται μέσω HTTP αιτημάτων.

Συγκεκριμένα, το backend λαμβάνει τα δεδομένα που αποστέλλονται από τον ESP32 μέσω HTTP POST Request με τη χρήση της συνάρτησης `trim(file_get_contents(«php://input»))`, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 6.7 της επόμενης σελίδας. Ο πίνακας περιλαμβάνει απόσπασμα από το αρχείο `post_data.php`. Όπως είχαμε τονίσει, το αρχείο αυτό αποτελεί το endpoint όπου αποστέλλονται τα δεδομένα από τις μετρήσεις.

Όταν το backend δεχτεί το Request από τον ESP32 Receiver, αρχικά ελέγχει την εγκυρότητα των δεδομένων. Έπειτα, το CRUD Panel επιβεβαιώνει την καταχώρηση νέου σταθμού. Αυτό γίνεται στο τμήμα κώδικα που υπάρχει στον παρακάτω Πίνακα 6.8 και αποτελεί το αρχείο `stations_approve.php`.

Πίνακας 6.7: Συνάρτηση trim(file_get_contents("php://input"));

```

$input = trim(file_get_contents("php://input"));

if ($input === "") {
    http_response_code(400);
    echo json_encode([
        "status" => "error",
        «message» => «Missing data»
    ]);
    Exit;
}

```

Πίνακας 6.8: Καταχώρηση νέου σταθμού (stations_approve.php)

```

$stmt = $conn->prepare("
    UPDATE stations
    SET status = 'approved'
    WHERE s_id = ?
");

$stmt->bind_param("s", $s_id);
$stmt->execute();
mysqli_stmt_close($stmt);

```

Αν ο σταθμός που αποστέλλει δεδομένα δεν εγκριθεί από τον διαχειριστή μέσω του CRUD panel, το πεδίο status ενημερώνεται σε «rejected» και τα δεδομένα του σταθμού δεν εμφανίζονται στο Frontend. Αυτό πραγματοποιείται μέσα από το αρχείο stations_reject.php, απόσπασμα του οποίου φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα 6.9.

Πίνακας 6.9: Απόρριψη σταθμού (stations_reject.php)

```

$stmt = mysqli_prepare($cnx, "
    UPDATE stations
    SET status = 'rejected'
    WHERE s_id = ?
");

mysqli_stmt_bind_param($stmt, 's', $s_id);
mysqli_stmt_execute($stmt);
mysqli_stmt_close($stmt);

```

Στον Πίνακα 6.10 παρακάτω, που είναι από το αρχείο post_data.php βλέπουμε ότι το backend κάνει συντακτική ανάλυση (parsing) των ληφθέντων δεδομένων. Το πακέτο δεδομένων που λήφθηκε περιέχει ένα string το οποίο διασπάται σε μικρότερα μέρη έτσι ώστε να είναι εφικτή η αποθήκευση και η επεξεργασία τους. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται προκειμένου κάθε νέο δεδομένο μέτρησης να τοποθετηθεί στο σωστό πεδίο του πίνακα της βάσης δεδομένων, όπως θα δούμε παρακάτω.

Η εντολή `explode(";", $input)` διαχωρίζει το string που ελήφθη από τον ESP32 σε ξεχωριστές τιμές. Έπειτα γίνεται έλεγχος ώστε να διαπιστωθεί αν το πακέτο δεδομένων περιέχει τον σωστό αριθμό πεδίων.

Πίνακας 6.10: Parsing Δεδομένων πακέτου (`post_data.php`)

```
$values = explode (";", $input);
if (count($values) !== 11) {
    http_response_code(422);
    echo json_encode([
        "status" => "error",
        "message" => "Expected 11 values"
    ]);
    exit;
}
```

Αν το τμήμα δεδομένων του πακέτου είναι κενό, τότε ακολουθείται η συνάρτηση του Πίνακα 6.7 της προηγούμενης σελίδας και το Backend επιστρέφει κωδικό επιβεβαίωσης 400, ήτοι status error με αντίστοιχο μήνυμα επιβεβαίωσης «missing data».

6.6.3 Αποθήκευση Δεδομένων

Κάθε φορά που προστίθεται ένας νέος σταθμός στη Βάση Δεδομένων απαιτείται και η δημιουργία ενός νέου πίνακα για τα δεδομένα. Η δημιουργία του πίνακα αυτού πραγματοποιείται από το αρχείο `post_data.php` με τον τρόπο που φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα 6.11. Απαραίτητη προϋπόθεση για την δημιουργία του πίνακα στη βάση είναι να εγκριθεί η αποστολή δεδομένων του σταθμού από τον διαχειριστή.

Πίνακας 6.11: Δημιουργία πίνακα στη βάση για νέο σταθμό (`post_data.php`)

```
if ($is_new_station_table) {
    mysqli_query($dbcnx, "
        CREATE TABLE `{$table}` (
            n_name          VARCHAR(50) NOT NULL,
            soilTemp        FLOAT DEFAULT NULL,
            soilMoist        FLOAT DEFAULT NULL,
            airTemp          FLOAT DEFAULT NULL,
            airHumid         FLOAT DEFAULT NULL,
            airPress         FLOAT DEFAULT NULL,
            rainDepth        FLOAT DEFAULT NULL,
            windSpeed        FLOAT DEFAULT NULL,
            windDirection    VARCHAR(10) DEFAULT NULL,
            created_at       TIMESTAMP NOT NULL DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP,
            PRIMARY KEY (n_name, created_at)
        ) ENGINE=InnoDB DEFAULT CHARSET=utf8mb4
    ");
}
```

Ο πίνακας που δημιουργείται περιλαμβάνει 11 πεδία, όπως θα δούμε και παρακάτω. Τα πεδία αυτά είναι οι 11 τιμές που αποστέλλονται ως string από τον LoRa Receiver. Ο χαρακτηρισμός «DEFAULT

NULL» υπάρχει έτσι ώστε να είμαστε σίγουροι ότι δεν θα υπάρξει κάποια υπερκάλυψη δεδομένων σε ήδη γεμάτα κελιά όταν φτάσει η στιγμή της αποθήκευσης.

Στον Πίνακα 6.12 παρατηρούμε τη συνέχεια του παραπάνω κώδικα, όπου δημιουργείται ο νέος σταθμός στη βάση δεδομένων.

Πίνακας 6.12: Εισαγωγή σταθμού στη βάση (post_data.php)

```
if (!$station_exists) {
    $insert_station = mysqli_prepare($dbcnx, "
        INSERT INTO stations (s_id, s_name)
        VALUES (?, ?)
    ");
    mysqli_stmt_bind_param($insert_station, 'ss', $s_id, $s_name_clean);
    mysqli_stmt_execute($insert_station);
    mysqli_stmt_close($insert_station);
}
```

Αν στη βάση υπάρχει ήδη πίνακας για τον συγκεκριμένο σταθμό, δηλαδή είναι ένας σταθμός που έχει ήδη στείλει δεδομένα στο παρελθόν, ο πίνακας απλά ενημερώνεται με τα νέα δεδομένα από το πακέτο, όπως φαίνεται στον παρακάτω κώδικα του Πίνακα 6.13.

Πίνακας 6.13: Ενημέρωση Δεδομένων πίνακα (post_data.php)

```
$update_station = mysqli_prepare($dbcnx, "
    UPDATE stations
    SET s_name = ?
    WHERE s_id = ?
");
mysqli_stmt_bind_param($update_station, 'ss', $s_name_clean, $s_id);
mysqli_stmt_execute($update_station);
mysqli_stmt_close($update_station);
```

6.6.4 Αντιστοίχιση Τιμών σε Μεταβλητές

Μετά την ολοκλήρωση επιβεβαίωσης των δεδομένων ακολουθεί και η αντιστοιχία τους. Κάθε τιμή αντιστοιχίζεται σε συγκεκριμένη μεταβλητή, όπως φαίνεται και στο απόσπασμα κώδικα του Πίνακα 6.14, ώστε να αποθηκεύεται στο σωστό πεδίο της βάσης δεδομένων. Η αποθήκευση γίνεται δυναμικά στον πίνακα values[].

Πίνακας 6.14: Αντιστοίχιση Δεδομένων σε Μεταβλητές (post_data.php)

```
$soil_temperature = floatval($values[0]);
$soil_moisture = floatval($values[1]);
$air_temperature = floatval($values[2]);
$air_humidity = floatval($values[3]);
$air_pressure = floatval($values[4]);
$rain_depth = floatval($values[5]);
$wind_speed = floatval($values[6]);
$wind_direction = trim($values[7]);
$n_name = trim($values[8]);
$s_id = trim($values[9]);
$s_name = trim($values[10]);
```

6.7 Βάση Δεδομένων (Database)

Μια βάση δεδομένων (Database) είναι ένα οργανωμένο σύνολο πληροφοριών που αποθηκεύονται με κατάλληλο τρόπο ώστε να είναι εύκολη η πρόσβαση, διαχείριση και επεξεργασία τους.

Οι βάσεις δεδομένων επιτρέπουν την αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων σε δομημένη μορφή (π.χ. πίνακες), υποστηρίζουν τη δημιουργία σχέσεων μεταξύ αυτών των δεδομένων και παρέχουν μηχανισμούς για αναζήτηση, εισαγωγή, τροποποίηση και διαγραφή τους. Χρησιμοποιούνται σε πλήθος εφαρμογών, από απλά πληροφοριακά συστήματα έως πολύπλοκες web εφαρμογές και επιχειρησιακές πλατφόρμες.

6.7.1 Χρησιμοποιούμενη Τεχνολογία για τη Βάση Δεδομένων

Για τη διαμόρφωση της βάσης χρησιμοποιήθηκε η τεχνολογία MySQL, ένα σύστημα διαχείρισης σχεσιακών βάσεων δεδομένων (Relational Database Management System – RDBMS) που βασίζεται στη γλώσσα SQL (Structured Query Language) για την οργάνωση, αποθήκευση και ανάκτηση δεδομένων. Αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα συστήματα βάσεων δεδομένων ανοιχτού κώδικα λόγω της μεγάλης ευχρηστίας του. Η χρήση του σε web εφαρμογές είναι ευρεία και συνδυάζεται με γλώσσες προγραμματισμού όπως η PHP που χρησιμοποιούμε.

Μέσω της MySQL είναι δυνατή η δημιουργία πινάκων, η διαχείριση σχέσεων μεταξύ δεδομένων, καθώς και η εκτέλεση ερωτημάτων (queries) για αναζήτηση, εισαγωγή, ενημέρωση και διαγραφή πληροφοριών.

6.7.2 Αποθήκευση στη βάση δεδομένων

Κάθε ξεχωριστός μετεωρολογικός σταθμός (αναγνωριζόμενος από τα πεδία `s_name` και `s_id`) διαθέτει δικό του πίνακα, ο οποίος περιλαμβάνει τις μετρήσεις αισθητήρων, το όνομα των κόμβων (node(s)) που περιέχονται σε αυτόν, καθώς και το πεδίο `timestamp` (`created_at`) στο οποίο καταγράφεται ο χρόνος που το πακέτο με τα δεδομένα αποθηκεύεται στη βάση. Όλα αυτά, περιλαμβάνονται σε κάθε νέα εγγραφή. Τα πεδία του πίνακα, ο τύπος δεδομένων του κάθε πεδίου και όλα τα συναφή χαρακτηριστικά του συνοψίζονται στην παρακάτω Εικόνα 6.7.

Field	Type	Null	Key	Default	Extra
<code>n_name</code>	<code>varchar(50)</code>	NO	PRI	NULL	
<code>soilTemp</code>	<code>float</code>	YES		NULL	
<code>soilMoist</code>	<code>float</code>	YES		NULL	
<code>airTemp</code>	<code>float</code>	YES		NULL	
<code>airHumid</code>	<code>float</code>	YES		NULL	
<code>airPress</code>	<code>float</code>	YES		NULL	
<code>rainDepth</code>	<code>float</code>	YES		NULL	
<code>windSpeed</code>	<code>float</code>	YES		NULL	
<code>windDirection</code>	<code>varchar(10)</code>	YES		NULL	
<code>created_at</code>	<code>timestamp</code>	NO	PRI	<code>CURRENT_TIMESTAMP</code>	

Εικόνα 6.7: Τα πεδία του πίνακα της βάσης δεδομένων

Κατά την προσθήκη νέων δεδομένων, το μέγεθος του πίνακα αλλάζει δυναμικά. Ένας πίνακας με δεδομένα που υπάρχει στη βάση είναι αυτός της Εικόνας 6.8 στην επόμενη σελίδα, ενώ ο MySQL κώδικας που περιγράφει τα πεδία του πίνακα είναι αυτός του Πίνακα 6.15.

Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τις σχέσεις των πεδίων δεδομένων στους πίνακες της βάσης δίνονται στην υποενότητα 6.7.3 παρακάτω, όπου σχολιάζεται και το Διάγραμμα Σχέσεων – Οντοτήτων για τη βάση.

```
MySQL [iee2019074]> SELECT * FROM station_007;
```

n_name	soilTemp	soilMoist	airTemp	airHumid	airPress	rainDepth	windSpeed	windDirection	created_at
nodeBeta	22.5	55	28.3	60.1	1012.8	0	5.5	NW	2026-02-25 00:49:24
nodeBeta	22.5	55	28.3	60.1	1012.8	0	5.5	NW	2026-02-25 01:20:14
nodeBeta	22.5	55	28.3	60.1	1012.8	0	5.5	NW	2026-02-25 02:09:49
nodeBeta	12.5	25	8.3	40.1	980.8	0	1.5	SE	2026-02-25 02:11:11
nodeBeta	22.5	55	28.3	60.1	1012.8	0	5.5	NW	2026-02-25 03:02:52
node_test	24.52	760930	22.28	50.09	1014.75	0	1.26	SOUTH	2026-05-06 16:11:21
node_test	24.86	759451	22.61	51.77	1014.7	83.04	1.26	SOUTHWEST	2026-05-06 16:53:23
node_test	24.65	-10	22.58	52.2	1014.65	0	0	NORTH	2026-05-06 17:10:59
node_test	23.27	-10	22.81	61.19	1018	0	0	NORTH	2026-05-07 15:53:26
node_test	22.99	-10	22.23	54.25	1017.66	0	0	NORTH	2026-05-07 17:36:47
node_test	22.77	-10	22.27	54.87	1017.54	0	0	UNKNOWN	2026-05-07 17:44:06

Εικόνα 6.8: Δείγμα δεδομένων από πίνακα της βάσης

Πίνακας 6.15: Ορισμός πεδίων πίνακα βάσης δεδομένων (MySQL)

```
CREATE TABLE `stations` (
  `s_id` varchar(50) NOT NULL,
  `s_name` varchar(250) DEFAULT NULL,
  `status` enum('pending','approved','rejected') NOT NULL DEFAULT 'pending',
  `created_at` timestamp NOT NULL DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP,
  PRIMARY KEY (`s_id`),
  UNIQUE KEY `uq_stations_s_name` (`s_name`)
) ENGINE=InnoDB DEFAULT CHARSET=utf8
```

6.7.3 Διάγραμμα Σχέσεων Οντοτήτων (Entity – Relationship Diagram / ER)

Το Διάγραμμα Σχέσεων – Οντοτήτων (Entity – Relationship Diagram / ER) αποτελεί ένα μοντέλο εννοιολογικού σχεδιασμού στις βάσεις δεδομένων και προσφέρει εύκολη αναπαράσταση των βασικών οντοτήτων σε ένα πληροφοριακό σύστημα. Κάθε οντότητα αντιστοιχεί σε έναν πίνακα και περιλαμβάνει γνωρίσματα/πεδία που περιγράφουν τα αποθηκευμένα στον πίνακα δεδομένα.

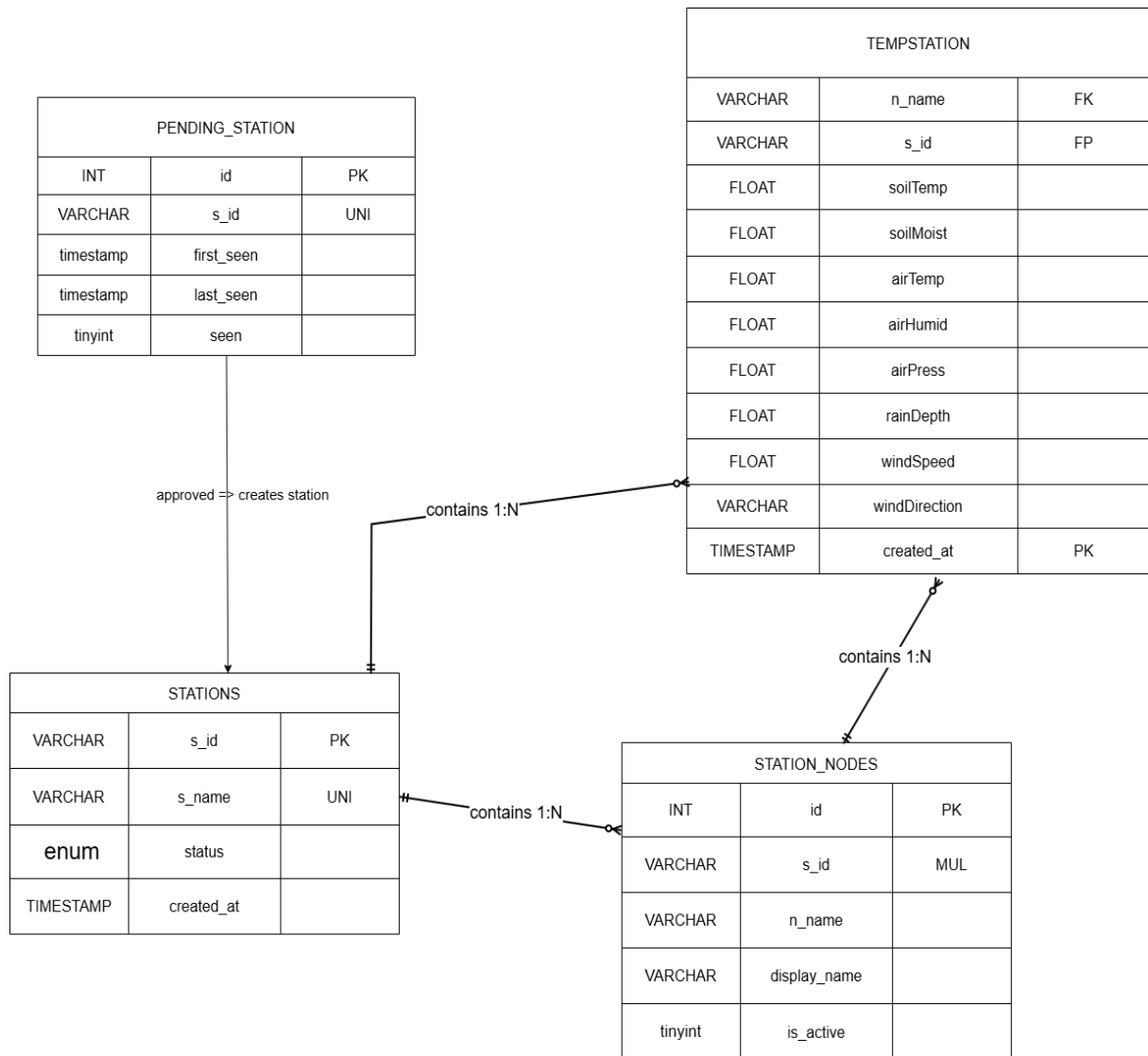
Με τη χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου, ο χρήστης αντιλαμβάνεται εύκολα τη λογική μοντελοποίησης των δεδομένων, καθώς προσφέρεται οπτική απεικόνιση της αλληλουχίας μεταξύ των οντοτήτων στη βάση.

Για το σύστημα της παρούσας εργασίας, το διάγραμμα ER παρουσιάζει με σαφήνεια τη λογική αλληλουχία μεταξύ των οντοτήτων που απαρτίζουν τη βάση δεδομένων. Οι οντότητες αυτές είναι 4:

- **TEMPSTATION**
- **STATION_NODES**
- **PENDING_STATION**
- **STATIONS**

Οι οντότητες αυτές αντιστοιχούν στους βασικούς πίνακες της βάσης και επιδεικνύουν τον τρόπο με τον οποίο οργανώνονται οι σταθμοί, οι κόμβοι και οι μετρήσεις του συστήματος. Οι σχέσεις μεταξύ των οντοτήτων υποδεικνύουν τη σύνδεση ενός σταθμού με τους κόμβους και τη σύνδεση κάθε κόμβου με τις μετρήσεις που παράγει. Η δομή του διαγράμματος ER είναι αυτή της Εικόνας 6.9 στην επόμενη σελίδα.

Όπως εύκολα διακρίνεται στην Εικόνα, η οντότητα STATIONS συνδέεται με την οντότητα PENDING_STATION ως εξής: Όταν το status ενός PENDING_STATION γίνει approved δημιουργείται μία οντότητα STATIONS για τον σταθμό. Τα STATIONS συνδέονται με τα STATION_NODES μέσω του πεδίου **s_id**, ενώ η οντότητα STATION_NODES συνδέεται με την οντότητα TEMPSTATION μέσω του πεδίου **n_name**.



Εικόνα 6.9: Διάγραμμα Σχέσεων - Οντοτήτων για τη βάση δεδομένων του συστήματος

Οι σχέσεις του διαγράμματος είναι ένα προς πολλά (1:N). Αυτό σημαίνει ότι κάθε οντότητα τύπου STATIONS μπορεί να περιλαμβάνει παραπάνω του ενός STATION_NODES και αντίστοιχα η οντότητα STATION_NODES μπορεί να περιλαμβάνει παραπάνω του ενός TEMPSTATION. Επιπροσθέτως, κάθε οντότητα STATIONS μπορεί να περιλαμβάνει παραπάνω του ενός TEMPSTATIONS.

Η σύνδεση μεταξύ των οντοτήτων STATIONS - STATION_NODES πραγματοποιείται μέσω του κοινού τους πεδίου **s_id**, το οποίο χρησιμοποιείται για ταυτοποίηση του σταθμού. Έτσι, κάθε κόμβος στον πίνακα STATION_NODES αντιστοιχίζεται σε ένα και μόνο ένα συγκεκριμένο σταθμό.

Αντίστοιχα, η σχέση STATION_NODES - TEMPSTATION δηλώνει ότι κάθε κόμβος μπορεί να αποστέλλει πολλές εγγραφές μετρήσεων με την πάροδο του χρόνου. Η σύνδεση πραγματοποιείται μέσω του πεδίου **n_name**, το οποίο δηλώνει από ποιον κόμβο προήλθε κάθε μέτρηση. Συνεπώς, κάθε εγγραφή στον πίνακα TEMPSTATION μπορεί να συσχετιστεί με τον αντίστοιχο κόμβο που την παρήγαγε.

Τέλος, όπως τονίζεται και παραπάνω, η συσχέτιση μεταξύ των οντοτήτων PENDING_STATION και STATIONS γίνεται μεταξύ των πεδίων **s_id**. Το πεδίο **s_id** της οντότητας PENDING_STATION που σχετίζεται με τη δημιουργία κάθε οντότητας STATIONS αντιγράφεται από την πρώτη στη δεύτερη. Η σχέση αυτή δεν είναι η τυπική 1:N που περιγράφεται παραπάνω. Εδώ, η οντότητα PENDING_STATION λειτουργεί ως «προσωρινό αποθετήριο» στοιχείων ενός σταθμού πριν από την εισαγωγή του στο σύστημα. Αυτού του τύπου η σχέση μεταξύ οντοτήτων ονομάζεται σχέση ροής δεδομένων (workflow).

Συνεπώς, κάθε φορά που ένας νέος σταθμός αποστέλλει δεδομένα προς τη βάση, δημιουργείται μία νέα PENDING_STATION οντότητα για αυτόν. Η οντότητα STATIONS για τον σταθμό θα δημιουργηθεί μόνο μετά την έγκριση του διαχειριστή για αποδοχή του σταθμού και εισαγωγή των στοιχείων του στη βάση. Αυτό περιγράφεται με το πεδίο **status** της οντότητας STATIONS, το οποίο θα πρέπει να είναι **approved**.

6.7.3.1 Πεδία της οντότητας PENDING_STATION

Η οντότητα PENDING_STATION περιγράφει το περιεχόμενο του πίνακα με τους σταθμούς που είναι σε αναμονή και περιλαμβάνει:

- πεδίο **id**: Είναι το Κύριο Κλειδί (Primary Key / PK) και χρησιμοποιείται για να αναγνωρίζει κάθε μοναδική εγγραφή
- πεδίο **s_id**: Αποτελεί αναγνωριστικό νούμερο ολόκληρου του σταθμού
- πεδίο **first_seen**: Καταγράφει τη χρονική στιγμή κατά την οποία πρωτοεμφανίστηκε ο σταθμός. Πρέπει να έχει την ιδιότητα του μοναδικού (UNIQUE), δηλαδή να μην εμφανίζεται παραπάνω από μία φορές.
- πεδίο **last_seen**: Καταγράφει την πιο πρόσφατη χρονική στιγμή εντοπισμού του σταθμού
- πεδίο **seen**: Δηλώνει εάν ο διαχειριστής έλεγξε την εγγραφή του σταθμού

6.7.3.2 Πεδία της οντότητας STATIONS

Η οντότητα STATIONS περιγράφει τους εγκεκριμένους από το σύστημα μετεωρολογικούς σταθμούς, δηλαδή εκείνους που έχουν περάσει από τη διαδικασία ελέγχου και μπορούν να εμφανίζονται κανονικά στη διεπαφή χρήστη. Περιλαμβάνει τα εξής πεδία:

- πεδίο **s_id**: Αποτελεί το μοναδικό αναγνωριστικό του σταθμού. Χρησιμοποιείται για τη σύνδεση του σταθμού με τους αντίστοιχους κόμβους και τα δεδομένα μετρήσεων. Έχει την ιδιότητα του μοναδικού (UNIQUE), επειδή κάθε σταθμός πρέπει να έχει μοναδικό **s_id**. Έτσι, εξασφαλίζεται ότι κανένας νέος σταθμός δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα ήδη χρησιμοποιούμενο **id**.
- πεδίο **s_name**: Αποθηκεύει το όνομα του σταθμού. Είναι χρήσιμο ως αναγνωριστικό στη διεπαφή χρήστη. Καθορίζεται από τον διαχειριστή του συστήματος μέσω του CRUD panel που θα δούμε παρακάτω.
- πεδίο **status**: Είναι τύπου ENUM και αποθηκεύει την κατάσταση ενός σταθμού ή μιας εγγραφής. Το πεδίο μπορεί να λάβει μόνο συγκεκριμένες προκαθορισμένες τιμές,

όπως pending, approved ή rejected, αποτρέποντας την εισαγωγή μη έγκυρων καταστάσεων στη βάση δεδομένων.

- πεδίο **created_at**: Αποθηκεύει την ημερομηνία και ώρα δημιουργίας της εγγραφής. Δηλώνει πότε καταχωρήθηκε ο σταθμός στον πίνακα STATIONS, δηλαδή πότε προστέθηκε ως εγκεκριμένος σταθμός στο σύστημα.

6.7.3.3 Πεδία της οντότητας STATION_NODES

Η οντότητα STATION_NODES περιγράφει το περιεχόμενο των κόμβων του σταθμού και περιλαμβάνει τα εξής πεδία:

- πεδίο **id**: Αποτελεί το Κύριο Κλειδί (PK) του πίνακα και χρησιμοποιείται για κάθε μοναδική αναγνώριση νέας εγγραφής, αντίστοιχα με το PENDING_STATION
- πεδίο **s_id**: Χρησιμοποιείται για συσχέτιση του κόμβου με τον αντίστοιχο σταθμό. Εμφανίζεται ως MUL (multiple) επειδή μπορεί να εμφανίζεται περισσότερες από μία φορές, εν αντιθέσει με την οντότητα PENDING_STATIONS όπου δεν επιτρέπεται η επανεμφάνιση ενός συγκεκριμένου s_id.
- πεδίο **n_name**: Αποτελεί το όνομα του κόμβου που είναι αποθηκευμένο στη βάση και αναγνωρίζεται από αυτή.
- πεδίο **display_name**: αποθηκεύει το όνομα του κόμβου που εμφανίζεται στη διεπαφή χρήστη
- πεδίο **is_active**: Δηλώνει αν ο κόμβος είναι ενεργός στο σύστημα

6.7.3.4 Πεδία της οντότητας TEMPSTATION

Η οντότητα TEMPSTATION αποθηκεύει τα περιβαλλοντικά δεδομένα που προέρχονται από τους κόμβους του μετεωρολογικού σταθμού και διαθέτει τα παρακάτω πεδία:

- πεδίο **n_name**: περιλαμβάνει το όνομα του κόμβου που είναι καταχωρημένο στη βάση δεδομένων και λειτουργεί ως Κύριο Κλειδί (PK)
- πεδίο **soilTemp**: αποθηκεύει τη θερμοκρασία του εδάφους
- πεδίο **soilMoist**: αποθηκεύει την υγρασία του εδάφους
- πεδίο **airTemp** : αποθηκεύει τη θερμοκρασία αέρα
- πεδίο **airHumid** : αποθηκεύει την υγρασία αέρα
- πεδίο **airPress** : αποθηκεύει τη βαρομετρική πίεση αέρα
- πεδίο **rainDepth** : αποθηκεύει το ύψος της βροχής
- πεδίο **windSpeed** : αποθηκεύει την ταχύτητα αέρα
- πεδίο **windDirection** : αποθηκεύει την κατεύθυνση αέρα
- πεδίο **created_at**: δηλώνει την ημερομηνία και ώρα που ελήφθη το πακέτο δεδομένων με τις περιβαλλοντικές μετρήσεις και εμφανίζεται επίσης ως Κύριο Κλειδί (PK).

6.7.4 Διαχειριστικός Πίνακας (CRUD Admin Panel)

Ένας διαχειριστικός πίνακας τύπου CRUD χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που ενσωματώνουν βάσεις δεδομένων έτσι ώστε η διαχείριση των δεδομένων της βάσης να μπορεί να γίνει απομακρυσμένα από τους διαχειριστές του συστήματος.

Στην περίπτωση του συστήματος της εργασίας χρησιμοποιεί ώστε για κάθε εισαγωγή νέου σταθμού στη βάση να απαιτείται έγκριση αποθήκευσης των δεδομένων. Αν ο σταθμός εγκριθεί για αποθήκευση,

εμφανίζεται στην κεντρική σελίδα της εφαρμογής. Επιπλέον, μέσω του panel, οι διαχειριστές έχουν δυνατότητες επεξεργασίας των ονομάτων των σταθμών καθώς και διαγραφή τους από το σύστημα.

Για να εξασφαλιστεί η αποκλειστικότητα πρόσβασης στο CRUD panel μόνο από τους διαχειριστές (admin) γίνεται ενσωμάτωση του .htaccess αρχείου ρυθμίσεων και κανόνων για τον Apache Web Server που φιλοξενεί την εφαρμογή. Το αρχείο χρησιμοποιείται για τον έλεγχο πρόσβασης σε συγκεκριμένα αρχεία ή φακέλους στη δομή της ιστοσελίδας.

Όπως φαίνεται στο απόσπασμα κώδικα του Πίνακα 6.16 παρακάτω, το πεδίο AuthType Basic ορίζει ότι η σελίδα θα προστατεύεται με Basic Authentication, δηλαδή κατά το άνοιγμά της ο browser εμφανίζει ένα prompt για εισαγωγή username και password. Αντίστοιχα, το πεδίο Require valid-user δηλώνει ότι η πρόσβαση επιτρέπεται μόνο στους χρήστες που υπάρχουν στο .htaccess και δίνουν το σωστό password.

Το πεδίο AuthUserFile /home/student/iee/2019/iee2019074/public_html/php/admin/.htpasswd δείχνει το σημείο που βρίσκεται το αρχείο .htpasswd. Το αρχείο αυτό περιέχει τους χρήστες που έχουν δικαίωμα πρόσβασης, μαζί με τους κωδικούς τους σε κρυπτογραφημένη μορφή. Εκεί ουσιαστικά αποθηκεύονται τα στοιχεία σύνδεσης των διαχειριστών του συστήματος.

Πίνακας 6.16: Ρυθμίσεις στο αρχείο .htaccess

```
AuthType Basic
AuthName "Admin Area"
AuthUserFile
/home/student/iee/2019/iee2019074/public_html/php/admin/.htpasswd
Require valid-user
```

Αξίζει να σημειωθεί ότι το αρχείο .htaccess είναι τοποθετημένο στον ίδιο φάκελο (directory) με τα API endpoints για το CRUD panel. Με την τοποθέτηση του αρχείου στο σημείο αυτό, ο Web Server απαιτεί σύνδεση με τα σωστά στοιχεία και μετά προχωρά σε άνοιγμα της σελίδας μόνο στην περίπτωση που ο χρήστης είναι εξουσιοδοτημένος για πρόσβαση στο περιεχόμενό της.

6.7.5 Εξαγωγή Δεδομένων από τη βάση

Συστήματα που συγκεντρώνουν δεδομένα σε κάποια βάση, όπως είναι αυτό που πραγματευόμαστε, συνήθως προσφέρουν στον χρήστη τη δυνατότητα εξαγωγής των δεδομένων σε κάποιο είδος αρχείου που θα περιλαμβάνει απλά τις τιμές από τα δεδομένα που επιλέγει ο χρήστης, έτσι ώστε να μπορέσει στη συνέχεια να τα εισάγει σε άλλα προγράμματα ώστε να εξάγει συμπεράσματα (λ.χ. Excel, MATLAB). Συνηθέστερος τύπος τέτοιων αρχείων είναι τα αρχεία .CSV (δηλαδή Comma Separated Values), γεγονός που υποδηλώνει ότι οι τιμές από τα κελιά του πίνακα που αποθηκεύονται στο αρχείο διαχωρίζονται με κόμμα.

Και στο δικό μας σύστημα δίνεται στο χρήστη η δυνατότητα εξαγωγής των δεδομένων από τις μετρήσεις που βρίσκονται στη βάση σε αρχείο CSV. Η λειτουργία ενεργοποιείται από το κουμπί «Export Data» που βρίσκεται στην αρχική σελίδα του κάθε σταθμού. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την εξαγωγή δεδομένων είτε από κάποιο συγκεκριμένο κόμβο του σταθμού, είτε να αποθηκεύσει από τον πλασματικό κόμβο «average_nodes» που δημιουργείται και κάθε σταθμό και περιλαμβάνει τις μέσες τιμές των μετρήσεων από όλους τους κόμβους του σταθμού.

6.7.5.1 Υλοποίηση Εξαγωγής Δεδομένων

Η υλοποίηση της εξαγωγής των δεδομένων γίνεται μέσω του αρχείου `export_data.php`. Το συγκεκριμένο αρχείο λαμβάνει αρχικά από το Frontend την παράμετρο `n_name` που αφορά στον κόμβο που επιλέγει ο χρήστης ώστε να εξάγει τα δεδομένα. Αυτό γίνεται αντιληπτό αν κοιτάξουμε και το απόσπασμα του JavaScript κώδικα (Πίνακας 6.17) που περιγράφει τη λειτουργία του κουμπιού «Export Data» που πατά ο χρήστης στην ιστοσελίδα.

Πίνακας 6.17: Συνάρτηση `exportCsvBtn()` του αρχείου `graph.js`

```

if (exportCsvBtn) {
  exportCsvBtn.addEventListener('click', () => {
    const currentSId = sId || sessionStorage.getItem('selected_s_id');

    if (!currentSId) {
      alert('Station id is missing.');
```

```

      return;
    }

    if (!nodeSelect || !nodeSelect.value) {
      alert('Please select a node first.');
```

```

      return;
    }

    const selectedNode = nodeSelect.value;
```

```

    console.log('Selected node for export:', selectedNode);
```

```

    const url =
      `https://users.iee.ihu.gr/~iee2019074/php/export_data.php` +
      `?s_id=${encodeURIComponent(currentSId)}` +
      `&n_name=${encodeURIComponent(selectedNode)}`;
```

```

    window.location.href = url;
  });
}

```

Από πλευράς Backend, γίνεται αντιστοίχια του `n_name` με βάση το παρακάτω απόσπασμα κώδικα php του Πίνακα 6.18.

Πίνακας 6.18: Αντιστοίχηση του `n_name` που επιλέγεται με καταχωρημένο σε βάση (`export_data.php`)

```

$s_id = $_GET['s_id'] ?? '';
$n_name = $_GET['n_name'] ?? '';

if ($n_name === '') {
  http_response_code(400);
  exit('Missing node name');
}

```

Μέσα από το αρχείο `php`, δημιουργείται κατάλληλο SQL query στον πίνακα `TempStation` έτσι ώστε να ανακτηθούν οι μετρήσεις του κόμβου που επιλέγει ο χρήστης. Τα δεδομένα γράφονται σε μορφή CSV με στήλες όπως ημερομηνία, σταθμός, κόμβος, θερμοκρασία χώματος, υγρασία χώματος, θερμοκρασία αέρα, υγρασία αέρα, πίεση αέρα, ύψος βροχής, ταχύτητα ανέμου και κατεύθυνση ανέμου. Στον παρακάτω Πίνακα 6.19 παρατίθεται το απόσπασμα κώδικα για την αρχικοποίηση του αρχείου CSV.

Πίνακας 6.19: Αρχικοποίηση αρχείου CSV (`export_data.php`)

```
fprintf($output, chr(0xEF).chr(0xBB).chr(0xBF));
fputcsv($output, [
    'Ημερομηνία',
    'Σταθμός',
    'Κόμβος',
    'Θερμοκρασία χώματος',
    'Υγρασία χώματος',
    'Θερμοκρασία αέρα',
    'Υγρασία αέρα',
    'Πίεση αέρα',
    'Υψος βροχής',
    'Ταχύτητα ανέμου',
    'Κατεύθυνση ανέμου'
]);
```

Στον παρακάτω Πίνακα 6.20 παρατίθεται το τμήμα κώδικα `php` που εκτελεί τον έλεγχο ονόματος του κόμβου που επιλέγει ο χρήστης για εξαγωγή δεδομένων.

Πίνακας 6.20: Δομή Ελέγχου Ονόματος Κόμβου (`export_data.php`)

```
if ($n_name === 'average_nodes') {
    $sql = "
        SELECT
            created_at,
            'average_nodes' AS n_name,
            AVG(soilTemp) AS soilTemp,
            AVG(soilMoist) AS soilMoist,
            AVG(airTemp) AS airTemp,
            AVG(airHumid) AS airHumid,
            AVG(airPress) AS airPress,
            AVG(rainDepth) AS rainDepth,
            AVG(windSpeed) AS windSpeed,
            '-' AS windDirection
        FROM TempStation
        GROUP BY created_at
        ORDER BY created_at DESC
    ";

    $stmt = $conn->prepare($sql);
}
else if ($n_name === 'all') {
    $sql = "
```

```

SELECT
    created_at,
    n_name,
    soilTemp,
    soilMoist,
    airTemp,
    airHumid,
    airPress,
    rainDepth,
    windSpeed,
    windDirection
FROM TempStation
ORDER BY created_at DESC
";

$stmt = $conn->prepare($sql);
}

```

Η δομή επιλογής if-else χρησιμοποιείται διότι στην βάση αποθηκεύονται μόνο τα δεδομένα από κάθε πραγματικό κόμβο που υπάρχει στο σύστημα, αλλά όχι των πλασματικών «average_nodes». Έτσι, εάν το όνομα του κόμβου που επιλέγει ο χρήστης αντιστοιχεί στο average_nodes, το SQL query που δημιουργείται αφορά στους μέσους όρους από τα δεδομένα των πραγματικών κόμβων του σταθμού που έχει επιλέξει ο χρήστης. Σε κάθε άλλη περίπτωση, το query αφορά στα δεδομένα μόνο του εκάστοτε κόμβου που επιλέχθηκε. Αφού ταυτοποιηθεί το όνομα του n_node και εντοπιστούν τα αντίστοιχα δεδομένα του, πραγματοποιείται η εγγραφή τους στο CSV αρχείο.

Πίνακας 6.21: Ενσωμάτωση εγγραφών βάσης στο αρχείο CSV (export_data.php)

```

while ($row = $result->fetch_assoc()) {
    fputcsv($output, [
        $row['created_at'],
        $s_id,
        $row['n_name'],
        $row['soilTemp'],
        $row['soilMoist'],
        $row['airTemp'],
        $row['airHumid'],
        $row['airPress'],
        $row['rainDepth'],
        $row['windSpeed'],
        $row['windDirection']
    ]);
}

```

Το τμήμα κώδικα στον παραπάνω Πίνακα 6.21 διατρέχει τις εγγραφές που επιστρέφονται από το SQL ερώτημα και τις αποθηκεύει στο αρχείο CSV. Για κάθε γραμμή δεδομένων της βάσης, η συνάρτηση fputcsv() γράφει τις αντίστοιχες τιμές στο αρχείο, οι οποίες είναι: η ημερομηνία μέτρησης, το όνομα του σταθμού και του κόμβου και οι τιμές από τις μετρήσεις. Έτσι δημιουργείται σταδιακά το τελικό αρχείο εξαγωγής δεδομένων, το οποίο είναι έτοιμο για εξαγωγή, αποθήκευση και επεξεργασία.

6.8 Επίλογος

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο έγινε μία εκτενής αναφορά στα συστατικά στοιχεία του επιπέδου εφαρμογής για το IoT σύστημα της εργασίας. Συγκεκριμένα αναφερθήκαμε στους ορισμούς των Frontend, Backend και Web API, καθώς και για τις τεχνολογίες που αξιοποιούνται στον κάθε «κρίκο» της αλυσίδας που ονομάζουμε επίπεδο εφαρμογής. Τέλος, αναφερθήκαμε και στις έννοιες της διεπαφής χρήστη και εμπειρίας χρήστη, έννοιες σημαντικές για την οπτικοποίηση των δεδομένων που μετρούν οι αισθητήρες του επιπέδου αντίληψης. Στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει ανάλυση της διεπαφής χρήστη που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας καθώς και τις επιλογές οπτικοποίησης των δεδομένων.

Κεφάλαιο 7ο: Λειτουργία Γραφικής Διεπαφής Συστήματος

7.1 Εισαγωγή

Η γραφική διεπαφή του συστήματος, δηλαδή ο τρόπος αλληλεπίδρασης του τελικού χρήστη με το υλοποιημένο σύστημα, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, γίνεται μέσω διαδικτυακής ιστοσελίδας, η οποία έχει δομηθεί με βάση τις σύγχρονες τεχνικές σύνθεσης γραφικών διεπαφών χρήστη, ώστε να αποτελεί έναν εύκολο τρόπο κατανόησης των δεδομένων από τον χρήστη. Το όλο αυτό εγχείρημα πραγματοποιείται έχοντας ως γνώμονα την εμπειρία του εκάστοτε χρήστη από το σύστημα.

Στα πλαίσια του κεφαλαίου αυτού, θα γίνει μία αναλυτική επεξήγηση του τρόπου με τον οποίο ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει την γραφική διεπαφή του συστήματος, τονίζοντας τα χαρακτηριστικά που συμβάλλουν στην βέλτιστη κατά το δοκούν εμπειρία του.

7.2 Γενικές Πληροφορίες για τη δομή της Διεπαφής

Όπως θα δούμε παρακάτω, οι μετρήσεις του συστήματος περιβαλλοντικών δεδομένων απεικονίζονται υπό τη μορφή γραφημάτων, δίνοντας στον χρήστη (λ.χ. τον γεωργό ή τον γεωπόνο) τη δυνατότητα να κρίνει πιο εύστοχα τις συνθήκες που επικρατούν στην καλλιεργήσιμη έκταση που τον απασχολεί. Με αυτόν τον τρόπο, σε πρώτη φάση, μπορεί να κρίνει εάν το χωράφι αυτό είναι ιδανικό για την υποστήριξη της εκάστοτε καλλιέργειας που έχει σκοπό να φυτέψει. Επιπλέον, μπορεί να κρίνει καλύτερα ποιες είναι οι απαραίτητες ενέργειες που θα πρέπει να πραγματοποιηθούν από πλευράς του για τη φροντίδα του χωραφιού αυτού. Παραδείγματος χάριν, βλέποντας την ένδειξη για την υγρασία του χώματος, σε συνάρτηση με τις μεταβολές της βαρομετρικής πίεσης και των λοιπών ενδείξεων βροχόπτωσης, προγραμματίζει τα ποτίσματα που πρέπει να γίνουν.

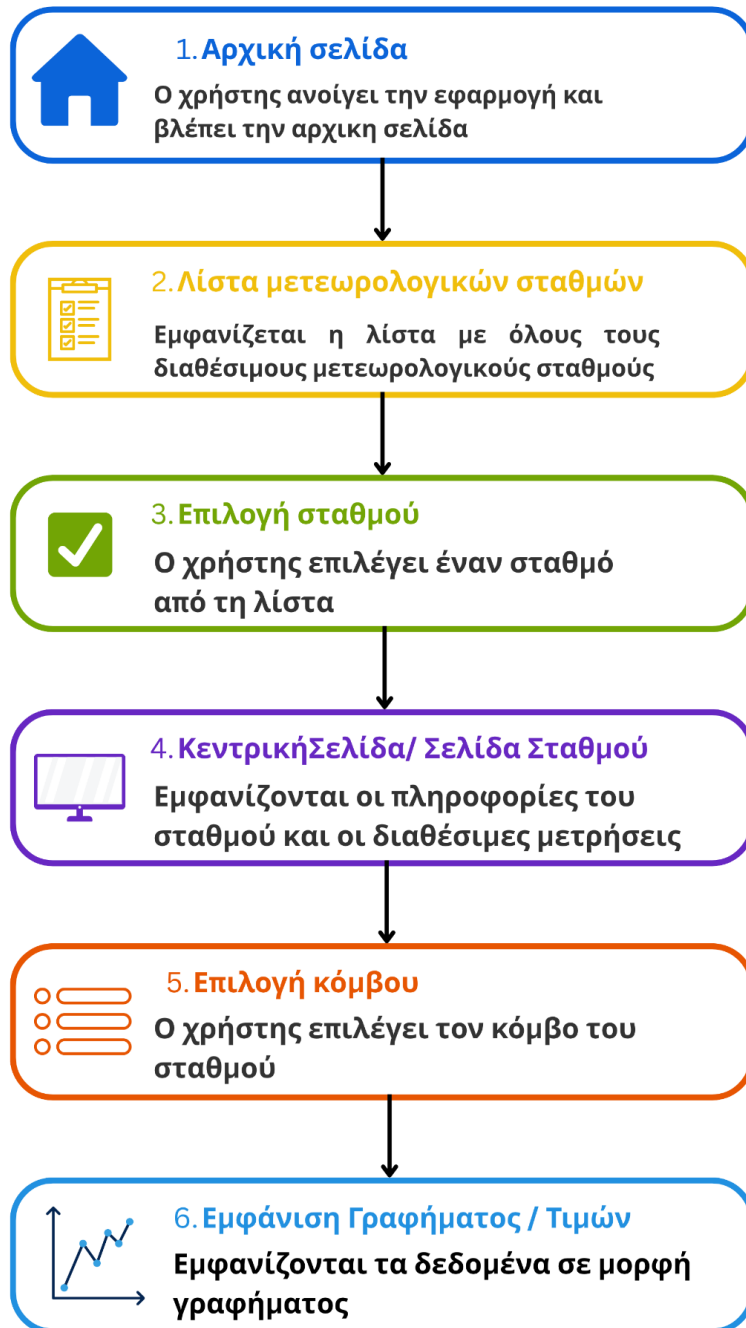
7.3 User Interface / User Experience (UI / UX)

Η διεπαφή αποτελείται από 2 κύρια μέρη, τη βασική ιστοσελίδα και τον Πίνακα Διαχείρισης (στο εξής αποκαλούμενος με την αγγλική ορολογία Admin Panel). Η βασική σελίδα είναι προσβάσιμη για όλους, μιας και τα δεδομένα είναι δημόσια μόνο για προβολή (Read – Only), ενώ το Admin CRUD (Create – Read – Update – Delete) Panel είναι προσβάσιμο μόνο από όσους διαθέτουν δικαιώματα διαχειριστή (administrator). Στο Admin Panel, οι διαχειριστές, έχουν τη δυνατότητες προσθαφαίρεσης και τροποποίησης κάθε μετεωρολογικού σταθμού (station) που συμμετέχει στο σύστημα.

Σε πρώτη φάση θα γίνει αναφορά στο κύριο μέρος της εφαρμογής (δηλαδή τη βασική σελίδα) και έπειτα θα εξηγήσουμε τις περαιτέρω λειτουργίες που υπάρχουν στο Admin Panel.

Στην παρακάτω Εικόνα 7.1 υπάρχει η οπτική απεικόνιση ενός «Διαγράμματος Ροής» σχετικά με την πλοήγηση του χρήστη στο γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής. Τα βήματα που ακολουθούνται είναι συνολικά 6, ξεκινώντας με την αρχική σελίδα που θα σχολιαστεί στην επόμενη υποενότητα 7.3.1, συνεχίζοντας στη σελίδα επιλογής κόμβων που περιγράφεται στην υποενότητα 7.3.2 και καταλήγοντας στην κεντρική οθόνη κάθε κόμβου όπου γίνεται η γραφική απεικόνιση των δεδομένων από τις μετρήσεις του κόμβου. Η δομή της τελευταίας οθόνης μελετάται στην υποενότητα 7.3.3.

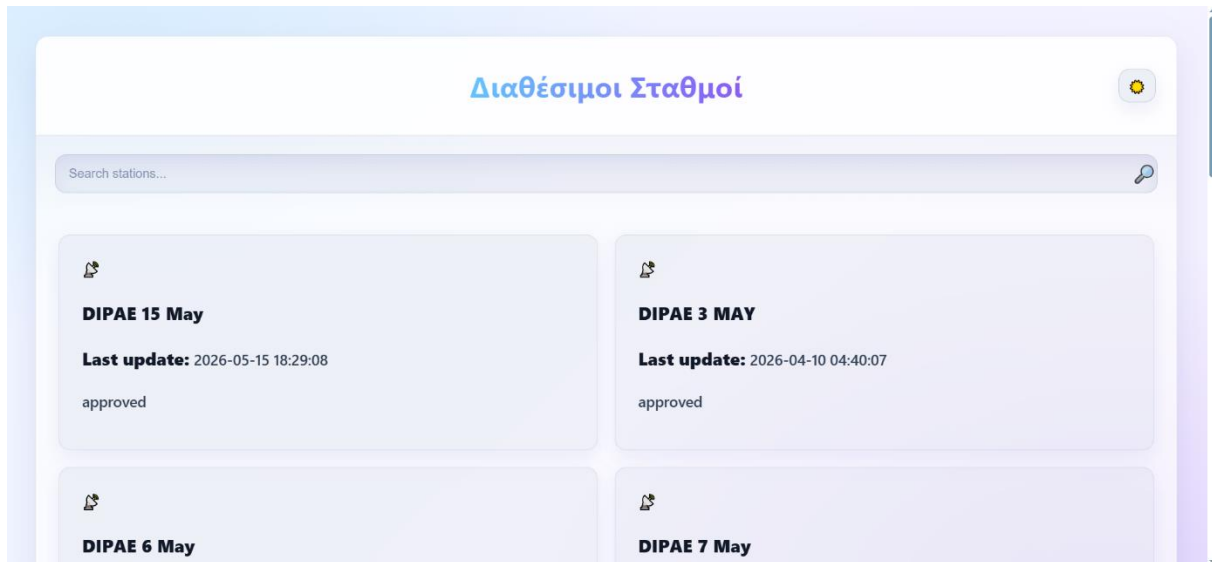
USER FLOW DIAGRAM



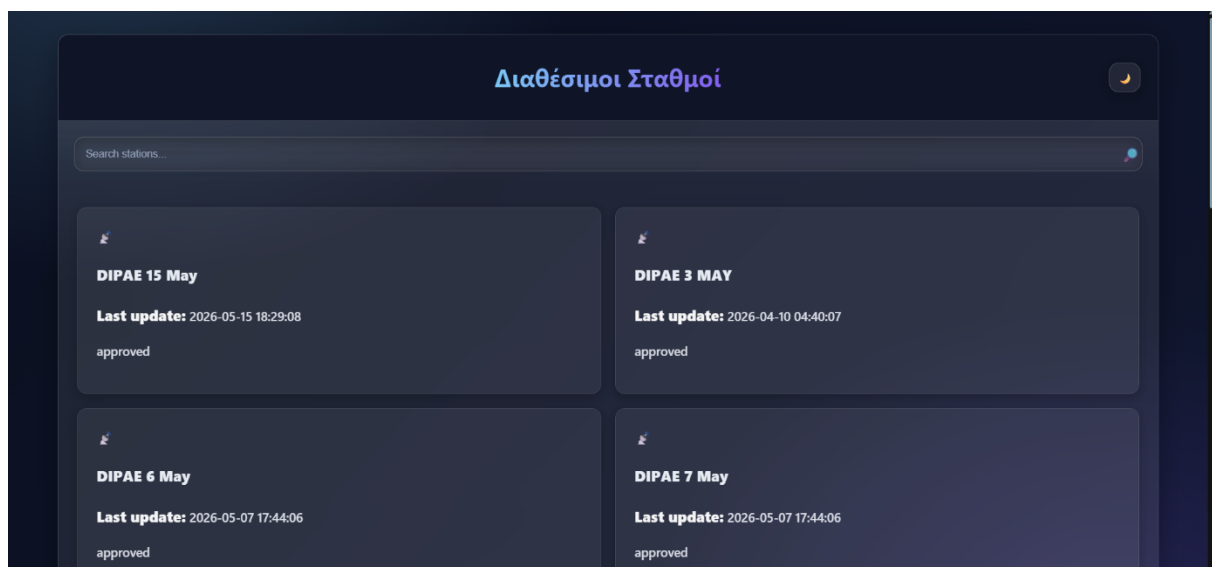
Εικόνα 7.1: Διάγραμμα Ροής Πλοήγησης Χρήστη στην ιστοσελίδα

7.3.1 Κεντρική Σελίδα (Homepage)

Η κεντρική σελίδα (στο εξής καλούμενη homepage) που συναντά ο επισκέπτης είναι η οθόνη προβολής διαθέσιμων σταθμών και παρουσιάζεται στις Εικόνες 7.2 και 7.3 της επόμενης σελίδας. Στο κέντρο της σελίδας αναγράφεται ο τίτλος της: «Διαθέσιμοι Σταθμοί» και παρακάτω εμφανίζει όλους τους σταθμούς που έχουν καταχωρηθεί στο σύστημα. Να υπενθυμίσουμε ότι κάθε σταθμός μπορεί να περιλαμβάνει έναν ή περισσότερους κόμβους. Μαζί με το όνομα του σταθμού εμφανίζονται πληροφορίες χρόνου από την τελευταία καταχώρηση μέτρησης στη βάση, καθώς και το status του σταθμού.



Εικόνα 7.2: Κεντρική Σελίδα σε Ανοιχτόχρωμη (Light) προβολή



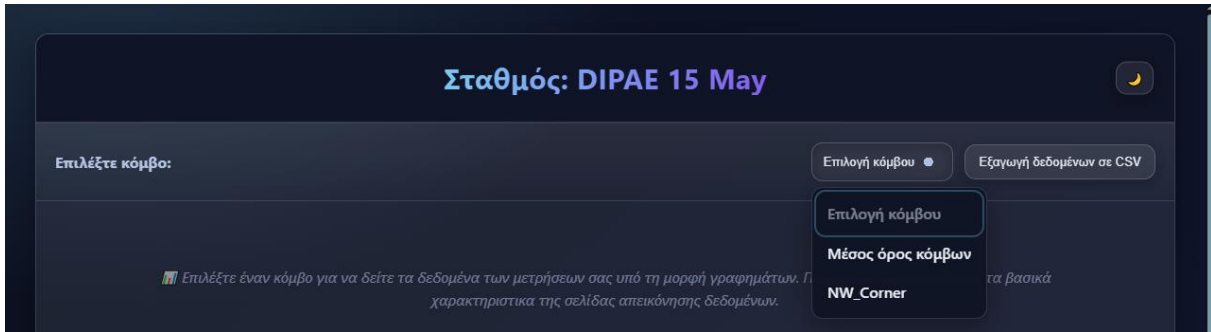
Εικόνα 7.3: Κεντρική Σελίδα σε Σκουρόχρωμη (Dark) προβολή

Σε περίπτωση που υπάρχει μεγάλο πλήθος σταθμών, το homepage διαθέτει Γραμμή Αναζήτησης (Search Bar), διαθέτοντας στον χρήστη τη δυνατότητα γρήγορης εύρεσης ενός σταθμού σε περίπτωση που ο χρήστης γνωρίζει το όνομά του.

Να τονιστεί ότι υπάρχει η δυνατότητα εναλλαγής Ανοιχτής ή Σκουρόχρωμης Λειτουργίας (Light / Dark Mode), η οποία γίνεται με ένα κουμπί στην πάνω δεξιά γωνία της σελίδας, όπως εύκολα διακρίνεται από τις παραπάνω Εικόνες 7.2 και 7.3.

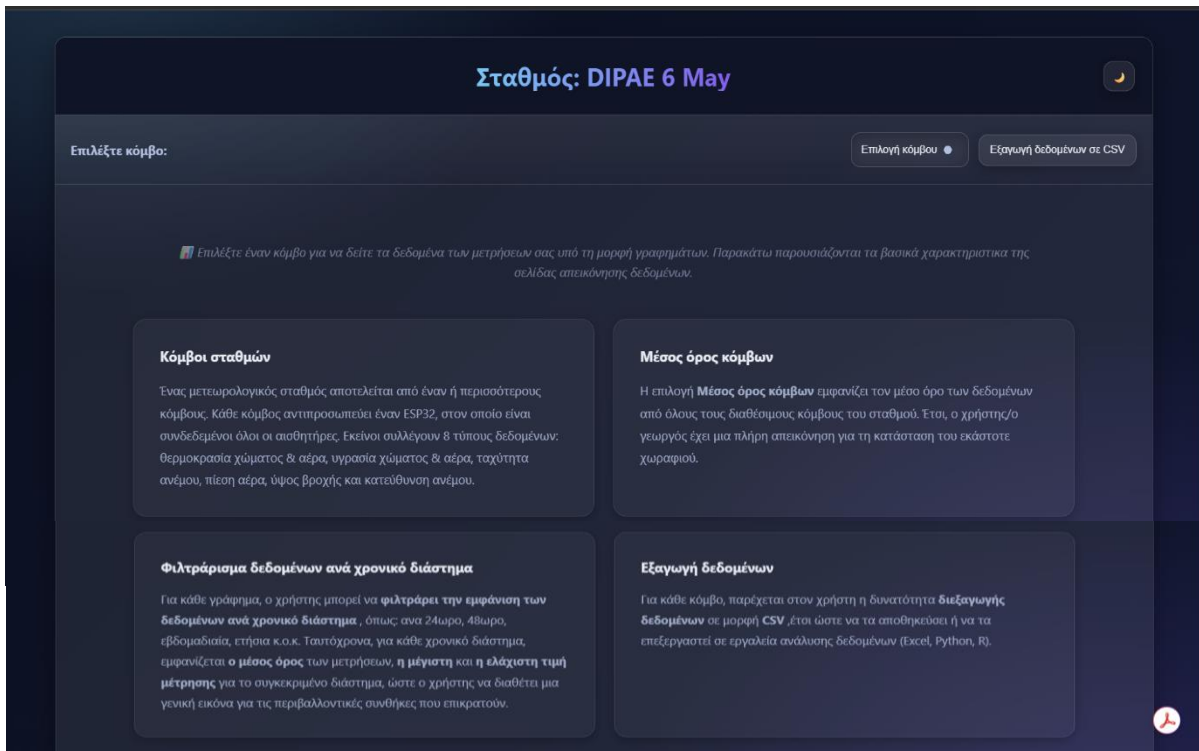
7.3.2 Οθόνη Επιλογής Κόμβου (Node Selection)

Όπως είπαμε παραπάνω, ο κάθε σταθμός (station) δύναται να περιλαμβάνει παραπάνω του ενός κόμβους μέτρησης. Έτσι, επιλέγοντας έναν σταθμό στο homepage, ο χρήστης έχει έπειτα τη δυνατότητα επιλογής κόμβου από τον επιλεγμένο σταθμό για προβολή δεδομένων. Η επιλογή κόμβου από τον χρήστη γίνεται με τη χρήση ενός drop – down menu με τίτλο «Select Node», όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7.4 στην επόμενη σελίδα.



Εικόνα 7.4: Μενού Επιλογής Κόμβων σταθμού

Προτού ο χρήστης επιλέξει τον κόμβο που επιθυμεί, στη σελίδα εμφανίζονται ορισμένες κάρτες πληροφοριών, οι οποίες παρουσιάζουν συνοπτικά τις βασικές λειτουργίες του συνολικού συστήματος. Συγκεκριμένα, ο χρήστης ενημερώνεται για τη λειτουργία του κάθε κόμβου, την επιλογή του μέσου όρου κόμβων, καθώς και για το φιλτράρισμα και εξαγωγή δεδομένων. Οι κάρτες έχουν τη μορφή που φαίνεται στην Εικόνα 7.5 παρακάτω.



Εικόνα 7.5: Κάρτες Πληροφορίας Χρήστη για λειτουργίες του συστήματος

Να τονιστεί εδώ πως για σταθμούς με πλήθος κόμβων, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα προβολής των δεδομένων για καθέναν απ' αυτούς τους κόμβους ξεχωριστά ή μπορεί να επιλέξει τον «Μέσο Όρο Κόμβων», ενός δηλαδή πλασματικού κόμβου που δημιουργείται για κάθε σταθμό και βγάζει μία μέση τιμή των δεδομένων συνδυάζοντας τις τιμές όλων των κόμβων ενός σταθμού. Ο κόμβος αυτός φαίνεται στο drop - down menu της Εικόνας 7.4, ενώ η λειτουργία του επεξηγείται στις κάρτες της Εικόνας 7.5

Η χρησιμότητα αυτής της λειτουργίας έγκειται πως όταν ο χρήστης ενδιαφέρεται για μία μεγάλη καλλιεργήσιμη έκταση και έχει τοποθετήσει έναν μεγάλο αριθμό από κόμβους σε διάφορα σημεία της έκτασης αυτής, μία μέση τιμή όλων των δεδομένων που υπάρχουν φαίνεται να είναι αρκετά χρήσιμη για τις ανάγκες του.

7.3.3 Κύρια Οθόνη Κόμβου

Αφού επιλεγεί κάποιος κόμβος από τις επιλογές του drop – down menu της Εικόνας 7.4, ο χρήστης εισέρχεται στην κύρια οθόνη του κόμβου που επέλεξε. Στην οθόνη αυτή παρουσιάζονται τα γραφήματα δεδομένων από τις μετρήσεις του κόμβου. Με μία πρώτη ματιά, ο χρήστης βλέπει την οθόνη της Εικόνας 7.6.



Εικόνα 7.6: Κύρια Οθόνη Κόμβου

Στην σελίδα εμφανίζονται 8 τύποι δεδομένων:

- Θερμοκρασία Εδάφους (Soil Temperature)
- Υγρασία Εδάφους (Soil Moisture)
- Θερμοκρασία Αέρα (Air Temperature)
- Υγρασία Αέρα (Air Relative Humidity)
- Πίεση Αέρα (Air Pressure)
- Ύψος Βροχής (Rain Depth)
- Ταχύτητα Ανέμου (Wind Speed)
- Κατεύθυνση Ανέμου (Wind Direction)

Οι 7 πρώτοι τύποι δεδομένων είναι τύπου float, άρα τα γραφήματα τους είναι της ίδιας μορφής, ενώ η κατεύθυνση ανέμου είναι τύπου varchar, οπότε και το γράφημά της είναι διαφορετικής μορφής.

7.3.3.1 Επεξήγηση Δομής Γραφημάτων

Ο οριζόντιος άξονας των γραφημάτων είναι άξονας χρόνου, επομένως αναγράφονται οι ημερομηνίες και ώρες που λήφθηκαν τα δεδομένα, ενώ ο κάθετος άξονας αφορά στην μετρούμενη τιμή του μεγέθους που απεικονίζεται. Για κάθε γράφημα, το εύρος τιμών στον κάθετο άξονα είναι επίσης διαφορετικό. Συγκεκριμένα, για τη θερμοκρασία του εδάφους το εύρος τιμών είναι [-10 ~ +30] σε °C, για την υγρασία χώματος και αέρα το εύρος τιμών είναι [30 ~ 70] σε ποσοστό επί τοις 100 (%), για τη θερμοκρασία αέρα αντίστοιχα είναι [10 ~ 25] σε °C, για την πίεση αέρα είναι [1000 ~ 1400] σε hPa, για το ύψος βροχής είναι [0 ~ 4] σε mm, και τέλος για τη ταχύτητα ανέμου το εύρος είναι [2 ~ 14] σε km/h.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των γραφημάτων είναι ότι υπολογίζεται και απεικονίζεται σε συσχετισμό με την γραφική παράσταση της μεταβολής του μετρούμενου μεγέθους, η μέση τιμή των μετρήσεων που λήφθηκαν μέχρι και την τωρινή χρονική στιγμή. Απεικονίζεται σε πορτοκαλί χρώμα για να διαχωρίζεται

από την αρχική γραφική παράσταση. Ανάλογα δε με το βάθος χρόνου που επιλέγει ο χρήστης να απεικονισθεί στο γράφημα, αλλάζει και αυτή η μέση τιμή.

Να τονιστεί ότι κάτω από την γραμμή τίτλου του κάθε γραφήματος, υπάρχει μία γραμμή που αλλάζει τιμές δυναμικά και αναφέρει τη μέση τιμή, καθώς και τις τιμές ελάχιστη (min) και μέγιστη (max) από τα δεδομένα που περιλαμβάνονται στο γράφημα.

Αναφορικά με το βάθος χρόνου, αυτό καθορίζεται από ένα άλλο drop – down menu που υπάρχει στην οθόνη αυτή και διακρίνεται στην παρακάτω Εικόνα 7.7. Η δομή των αντικειμένων στο γράφημα είναι κοινή και για τα 8 διαφορετικά γραφήματα της ιστοσελίδας. Ως default επιλογή χρονικού ορίου είναι το «all time», για να μην υπάρχουν κενά σε περίπτωση που δεν υπάρχουν πρόσφατα δεδομένα από τον επιλεγμένο κόμβο.



Εικόνα 7.7: Μενού Επιλογής Χρονικού Βάθους Γραφήματος

Όπως φαίνεται στην παραπάνω Εικόνα, οι επιλογές χρονικού βάθους που διαθέτει ο χρήστης αφορούν στις τελευταίες 24 ώρες, τις τελευταίες 48 ώρες, την τελευταία εβδομάδα, τον τελευταίο μήνα, τον τελευταίο χρόνο, και τέλος τα τελευταία 5 χρόνια. Επιλέξαμε να είναι ορατά τα δεδομένα με ανώτατο χρονικό βάθος τα 5 έτη, έτσι ώστε ο χρήστης να μπορεί να συγκρίνει δεδομένα από διάφορες αγροτικές περιόδους και να διαπιστώνει είτε μικρές είτε μεγάλες αποκλίσεις ανά έτος.

Η διαφοροποίηση στη μορφή του γραφήματος της κατεύθυνσης ανέμου (wind direction) έγκειται στο γεγονός διαφορετικού τύπου δεδομένων που το ορίζουν. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω Εικόνα 7.8 της επόμενης σελίδας, το γράφημα για το συγκεκριμένο μέγεθος αναπαρίσταται με μορφή κουκίδων και όχι με συνεχή γραφική παράσταση όπως στα προηγούμενα γραφήματα.

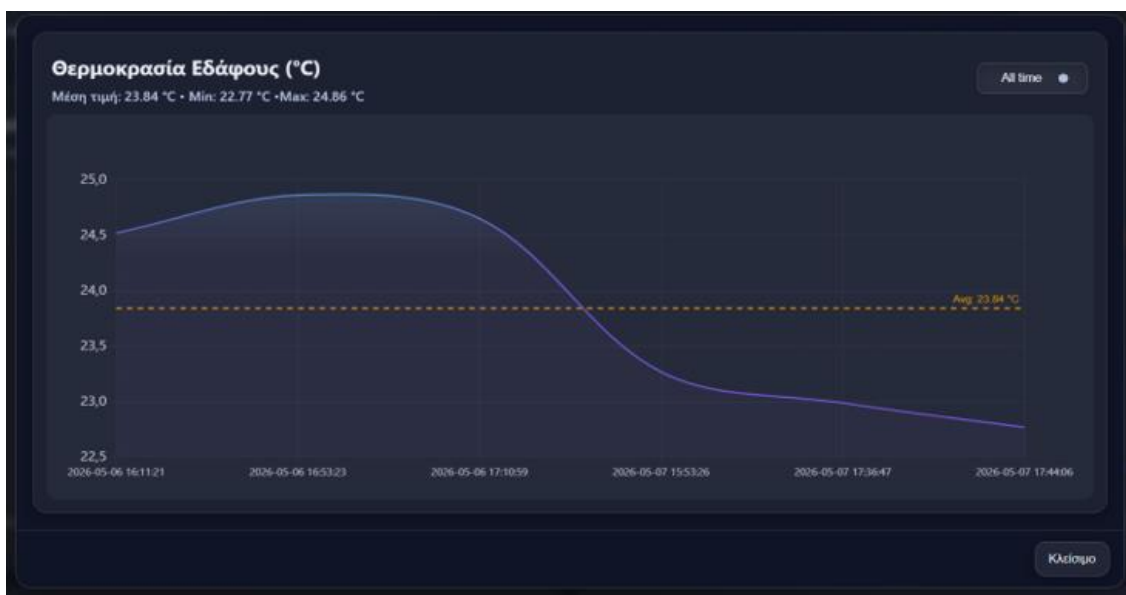
Ο λόγος που πραγματοποιείται αυτό, είναι διότι η μεταβλητή για την κατεύθυνση του ανέμου είναι varChar(10) (variable character με μέγιστο εύρος 10 χαρακτήρες). Στον οριζόντιο άξονα, όπως και στα προηγούμενα γραφήματα έχουμε τις χρονικές στιγμές συλλογής των δεδομένων, ενώ στον κάθετο άξονα έχουμε τις 8 καίριες κατευθύνσεις του ανέμου (4 βασικές + 4 δευτερεύουσες). Όπως και στα

προαναφερθέντα γραφήματα προβάλλεται η μέση τιμή, έτσι και στο συγκεκριμένο επισημαίνεται ο πιο συχνά εμφανιζόμενος τύπος δεδομένων με πορτοκαλί χρώμα πάνω στην κουκίδα. Έτσι, γίνεται μία εκτίμηση της «Επικρατέστερης Κατεύθυνσης» ανέμου στο σημείο που βρίσκεται ο επιλεγμένος κόμβος.



Εικόνα 7.8: Γράφημα Δεδομένων Κατεύθυνσης Ανέμου

Και τα 8 γραφήματα έχουν ίδια δομή ως προς τα πεδία. Πάνω δεξιά, έχουν το μενού τύπου droplist για την επιλογή του χρονικού βάθους. Επιπλέον, για βελτιστοποίηση της εμπειρίας χρήστη, δίπλα από το προαναφερθέν menu, ενσωματώσαμε ένα κουμπί, με το οποίο δίνουμε την επιλογή στον χρήστη να επεκτείνει το κάθε διάγραμμα. Το κουμπί αυτό εικονίζει ένα διαγώνιο διπλό βέλος, εικονίδιο που ταυτίζεται με την συγκεκριμένη λειτουργία. Πατώντας το, έχουμε το αποτέλεσμα της Εικόνας 7.9.



Εικόνα 7.9: Επεκταμένη Προβολή Γραφήματος

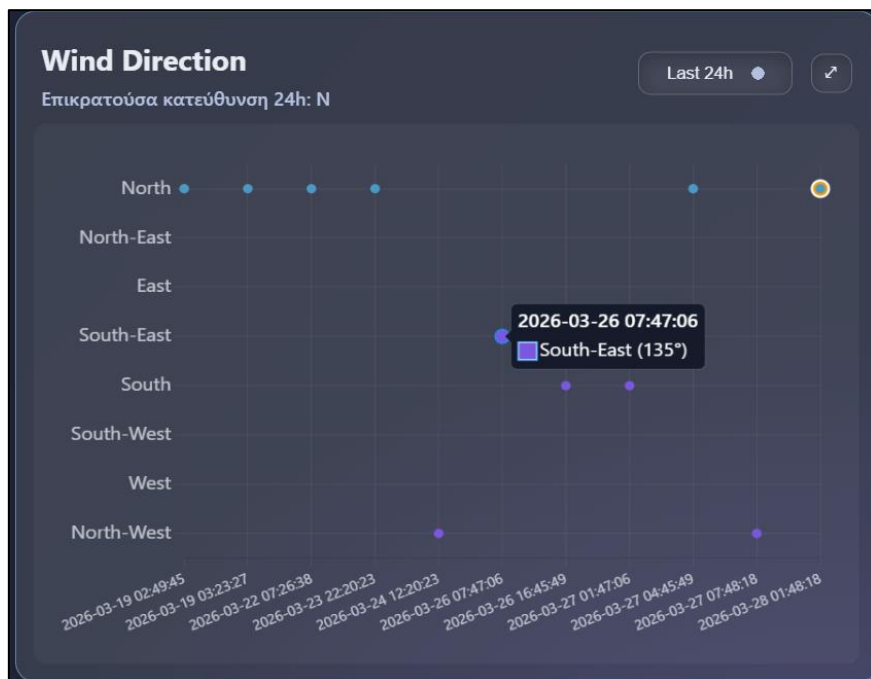
7.3.3.2 Εργαλείο Προβολής Τιμών Δεδομένων

Για τη βελτίωση της κατανόησης των δεδομένων, στην οπτικοποίηση ενσωματώνεται ένας διαδραστικός μηχανισμός τύπου tooltip. Με τη χρήση του δίνεται στον χρήστη η δυνατότητα ακριβούς εξέτασης των μετρήσεων από τους αισθητήρες του κάθε κόμβου, αφού διαθέτει ακρίβεια 1 δεκαδικού ψηφίου στην τιμή, καθώς και την ακριβή χρονική στιγμή που λήφθηκε η τιμή κατά την επισήμανση σημείων στο γράφημα, όπως φαίνεται και στην παρακάτω Εικόνα 7.10.



Εικόνα 7.10: Διαδραστικός Μηχανισμός Προβολής Δεδομένων σε γράφημα συνεχών τιμών

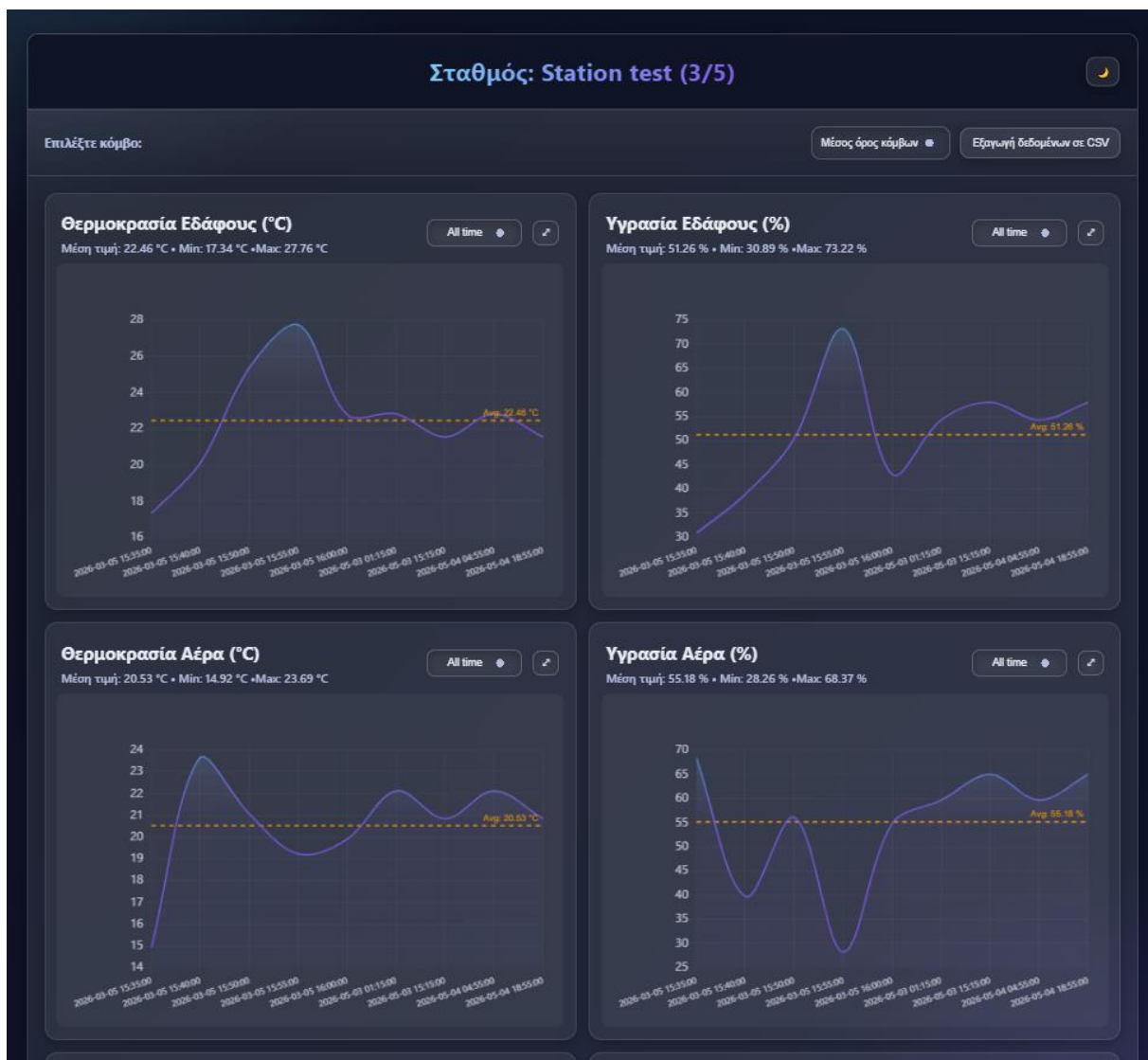
Αντίστοιχα για τα γραφήματα κατεύθυνσης ανέμου, τα οποία έχουν διακριτές τιμές στον κάθετο άξονα, εμφανίζεται η ημερομηνία και ώρα λήψης της τιμής, καθώς και η κατεύθυνση ανέμου σε μοίρες, όπως και το εκάστοτε αλφαριθμητικό (var char) της τιμής. Η λειτουργία του εργαλείου σε γράφημα κατεύθυνσης ανέμου εικονίζεται στην Εικόνα 7.11.



Εικόνα 7.11: Διαδραστικός Μηχανισμός Προβολής Δεδομένων σε γράφημα διακριτών τιμών

7.3.3.3 Η λειτουργία του Μέσου Όρου Κόμβων

Αν επιλεγεί από τον χρήστη ο κόμβος «Μέσος Όρος Κόμβων», που όπως είπαμε είναι πλασματικός, τα δεδομένα που απεικονίζονται στα γραφήματα αποτελούν τις μέσες τιμές των κόμβων που συμμετέχουν σε κάθε σταθμό. Έστω λοιπόν ότι τις τελευταίες 48 ώρες, ο κάθε κόμβος έλαβε και έστειλε τις μετρήσεις στη βάση δεδομένων μόλις 2 φορές. Με την επιλογή αυτή, για κάθε τύπο δεδομένων και για κάθε χρονική στιγμή, όλες οι μετρήσεις συνυπολογίζονται και προκύπτει ο μέσος όρος τους. Παράλληλα, όπως και στις περιπτώσεις με τους πραγματικούς κόμβους, εμφανίζεται σε συσχετισμό μία ακόμη γραφική παράσταση, η οποία απεικονίζει τη μέση τιμή των εκάστοτε μετρήσεων ανά χρονικά διαστήματα. Είναι ένας μέσος όρος των μέσων δειγμάτων, αν θέλουμε να το χαρακτηρίσουμε έτσι. Μία τέτοια αναπαράσταση είναι αυτή της Εικόνας 7.12.

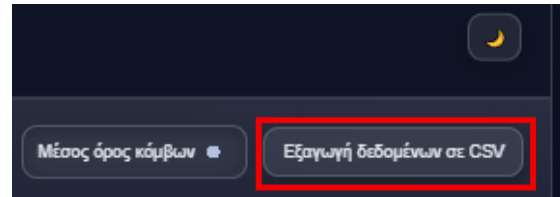


Εικόνα 7.12: Προβολή γραφημάτων πλασματικού κόμβου «Μέσου Όρου Κόμβων»

7.3.3.4 Εξαγωγή Δεδομένων σε αρχείο CSV

Τελευταία λειτουργία που ενσωματώνεται στο περιβάλλον του χρήστη είναι η εξαγωγή των δεδομένων από τη βάση σε αρχείο CSV, όπως περιγράφεται στην υποενότητα 6.7.5. Το αρχείο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί έπειτα από το Excel ή το MATLAB για εξαγωγή συμπερασμάτων.

Η εξαγωγή των δεδομένων γίνεται εύκολα με το κουμπί «Εξαγωγή δεδομένων σε CSV» που υπάρχει στη σελίδα επιλογής κόμβων του σταθμού, δίπλα από το drop – down menu επιλογής κόμβου. Το κουμπί είναι αυτό που σημαίνεται και στην παρακάτω Εικόνα 7.13. Αφού πατηθεί το κουμπί, στον υπολογιστή μας κατεβαίνει ένα αρχείο τύπου CSV που περιλαμβάνει τα δεδομένα από τις μετρήσεις του εκάστοτε κόμβου.



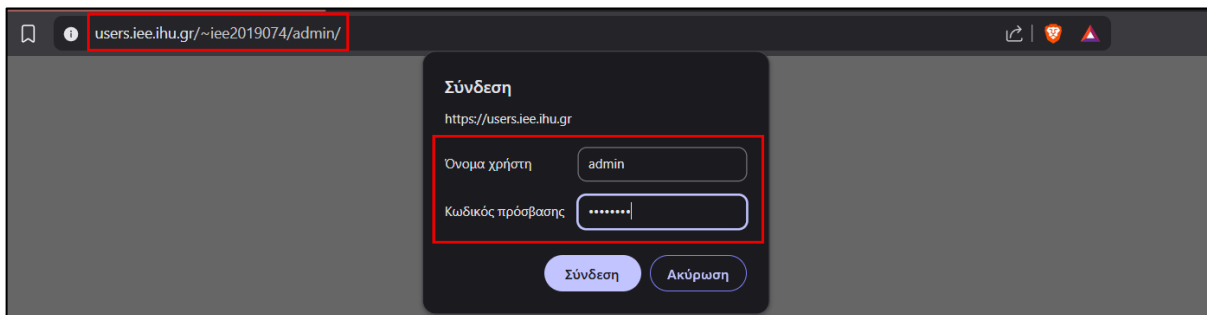
Εικόνα 7.13: Κουμπί εξαγωγής δεδομένων

7.3.4 Admin CRUD Panel

Το Admin Panel είναι μία σελίδα που περιλαμβάνεται στην διεπαφή του συστήματος και είναι προσβάσιμη αποκλειστικά από τους διαχειριστές του συστήματος. Είναι ουσιαστικά ο «πίνακας ελέγχου» της κεντρικής σελίδας, αφού μέσα απ' αυτό ο διαχειριστής μπορεί να τροποποιήσει την εμφάνιση της και τα δημοσίως προσβάσιμα δεδομένα.

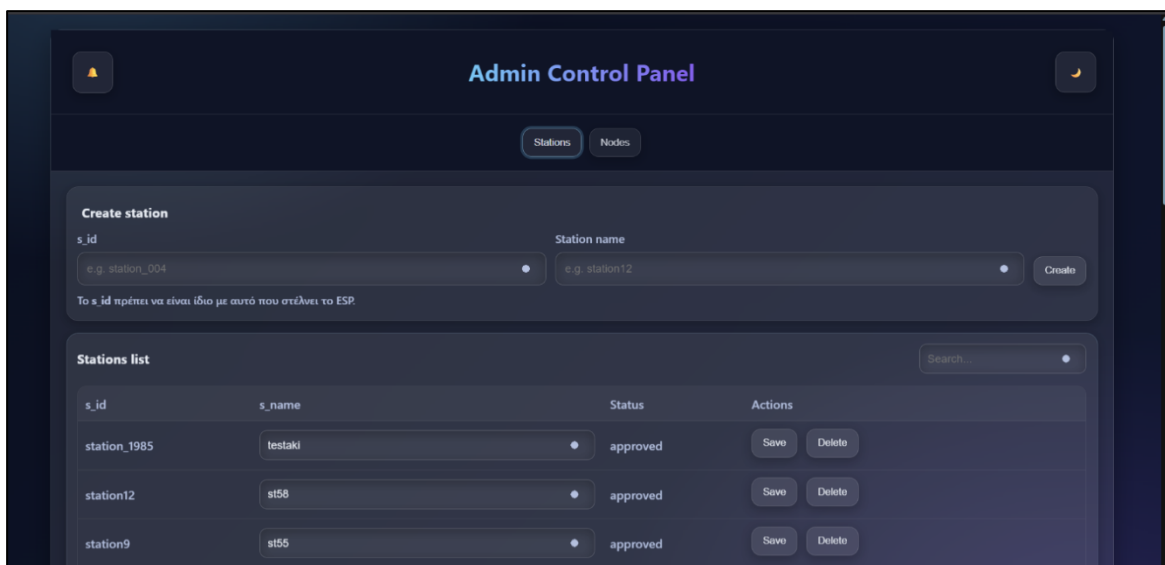
Όπως διακρίνεται και στην παρακάτω Εικόνα 7.14, για την σύνδεση του χρήστη στο admin panel που είναι διαθέσιμο στο URL <https://users.iee.ihu.gr/~iee2019074/admin/> απαιτείται αυθεντικοποίηση χρήστη, η οποία γίνεται μέσω prompt από τον φυλλομετρητή διαδικτύου (browser).

Στα πεδία του prompt, ο χρήστης πληκτρολογεί τα διαπιστευτήριά του, έτσι ώστε να μπορέσει να εισέλθει στο διαχειριστικό περιβάλλον, όπως επισημαίνεται και στην Εικόνα 7.14.



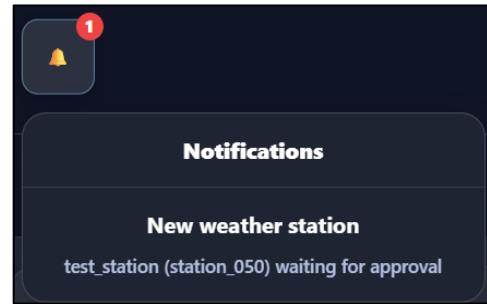
Εικόνα 7.14: Browser Prompt για αυθεντικοποίηση του admin

Με την εισαγωγή διαπιστευτηρίων, ο διαχειριστής εισέρχεται στο περιβάλλον της Εικόνας 7.15.

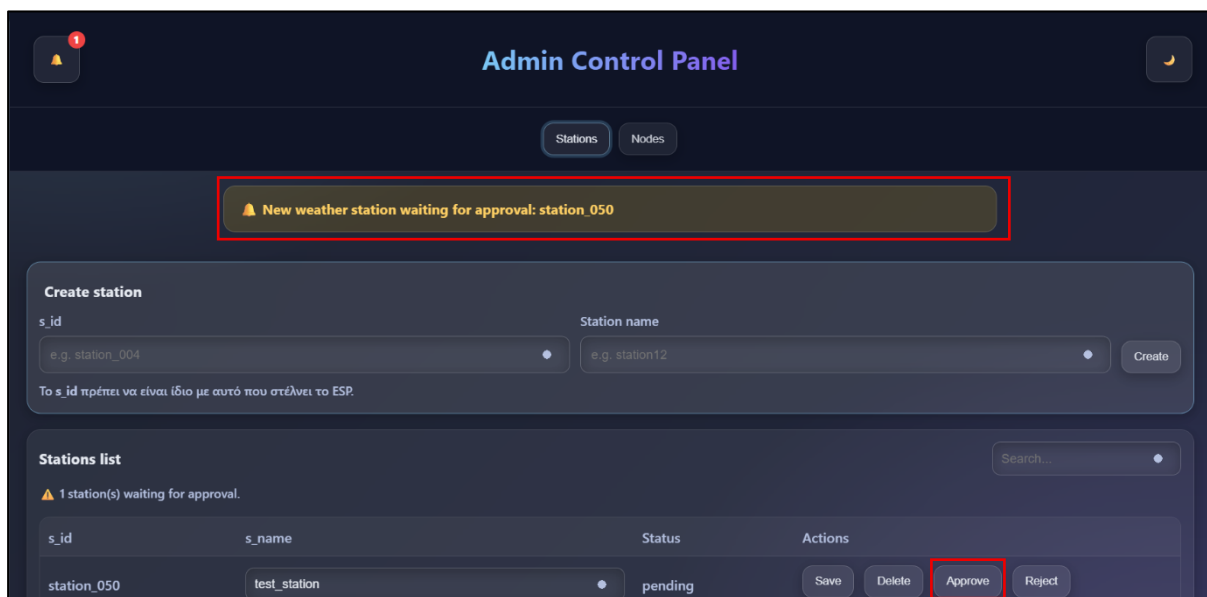


Εικόνα 7.15: Το Admin Panel της σελίδας

Στην πάνω αριστερά γωνία της σελίδας υπάρχει ένα κουμπί με εικονίδιο ένα καμπανάκι, το οποίο λειτουργεί ως ένδειξη ειδοποιήσεων για τον διαχειριστή. Όταν υπάρχει νέα ειδοποίηση εμφανίζεται με κόκκινο χρώμα στο καμπανάκι (ώστε να είναι εύκολα ανιχνεύσιμο) ένας αριθμός, όπως φαίνεται και στην διπλανή Εικόνα 7.16. Ειδοποιήσεις εμφανίζονται στο περιβάλλον μόλις ανιχνευθεί ένας νέος σταθμός που επιθυμεί την αποστολή δεδομένων στη βάση. Παράλληλα, μόλις έρχεται νέα ειδοποίηση, εμφανίζεται και ένα σύντομο μήνυμα που ενημερώνει τον διαχειριστή για την φύση της ειδοποίησης, όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 7.17.



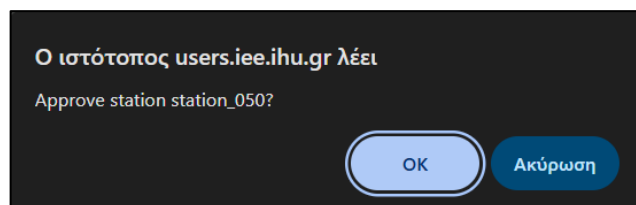
Εικόνα 7.16: Εικονίδιο ειδοποίησης στο Admin Panel



Εικόνα 7.17: Μήνυμα ειδοποίησης στο Admin Panel

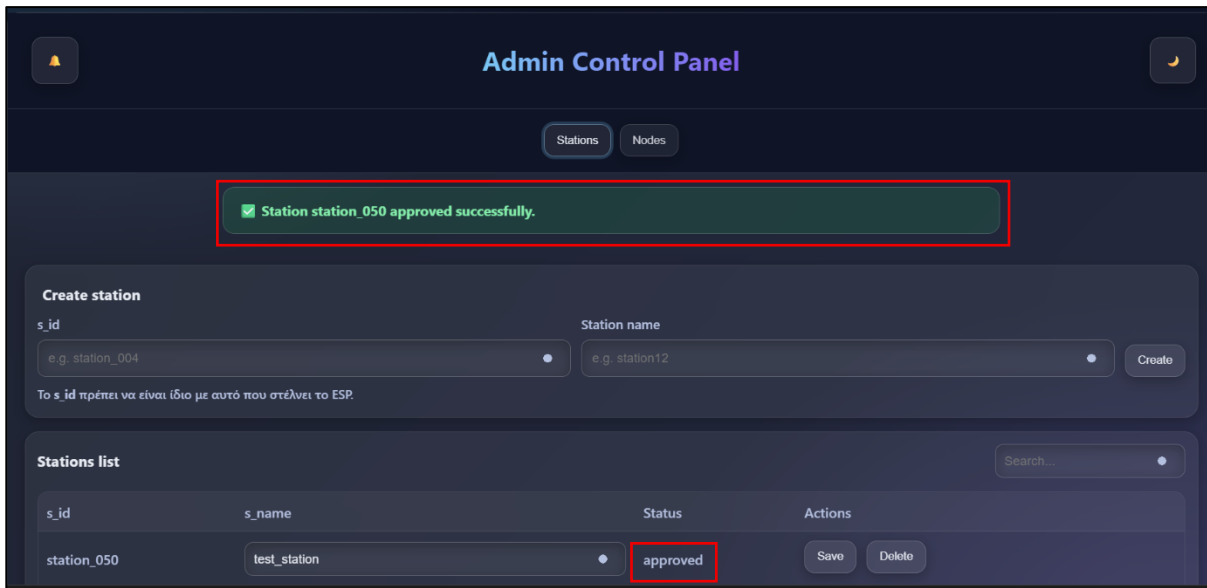
Ειδικότερα, μόλις γίνει η αποστολή δεδομένων από τον σταθμό, αυτός εμφανίζεται στην λίστα σταθμών (station list) του admin panel (φαίνεται στο κάτω μέρος της Εικόνας 7.17) με την ένδειξη status pending. Για να καταχωρηθούν τα δεδομένα και να προστεθεί ο σταθμός στο σύστημα, ο admin πρέπει να πατήσει το κουμπί «approve» που επισημαίνεται στην παραπάνω Εικόνα.

Για να αποφευχθούν τυχόν λανθασμένες εξουσιοδοτήσεις σταθμών στο σύστημα, μόλις πατηθεί το κουμπί «approve» εμφανίζεται prompt του browser με ερώτηση προς τον διαχειριστή για επιβεβαίωση της ενέργειάς του, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.18 δίπλα.



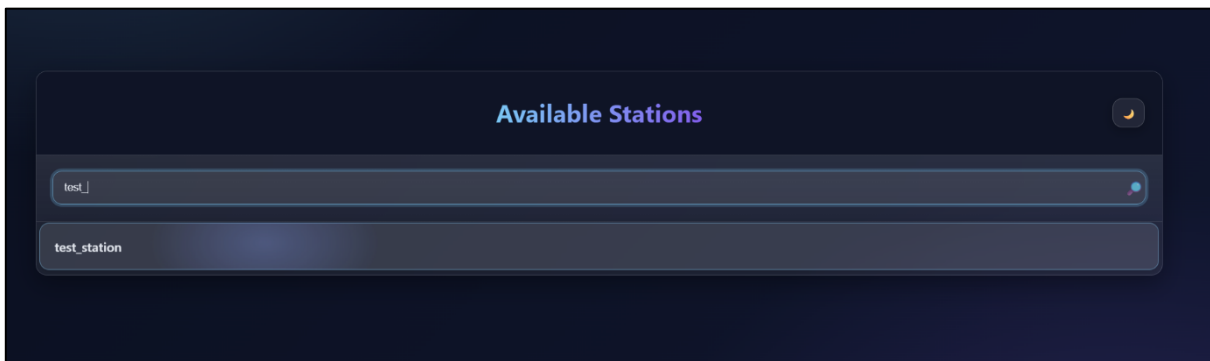
Εικόνα 7.18: Browser prompt για εξουσιοδότηση σταθμού

Αφού εγκριθεί η καταχώρηση του σταθμού στο σύστημα και τα δεδομένα του αποθηκευτούν στη βάση εμφανίζεται μήνυμα επιβεβαίωσης και αλλάζει το status του συγκεκριμένου σταθμού σε «approved», όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7.19 της επόμενης σελίδας.



Εικόνα 7.19: Μήνυμα επιβεβαίωσης προσθήκης σταθμού στο σύστημα

Στην επόμενη Εικόνα 7.20 ο σταθμός έχει ήδη εισαχθεί στη βάση και πλέον μπορεί να γίνει αναζήτησή του με χρήση της γραμμής αναζήτησης, καθώς και να προβληθούν κανονικά τα δεδομένα από τους κόμβους του με τη μορφή γραφημάτων, όπως εξηγήσαμε παραπάνω.



Εικόνα 7.20: Αναζήτηση σταθμών με χρήση γραμμής αναζήτησης

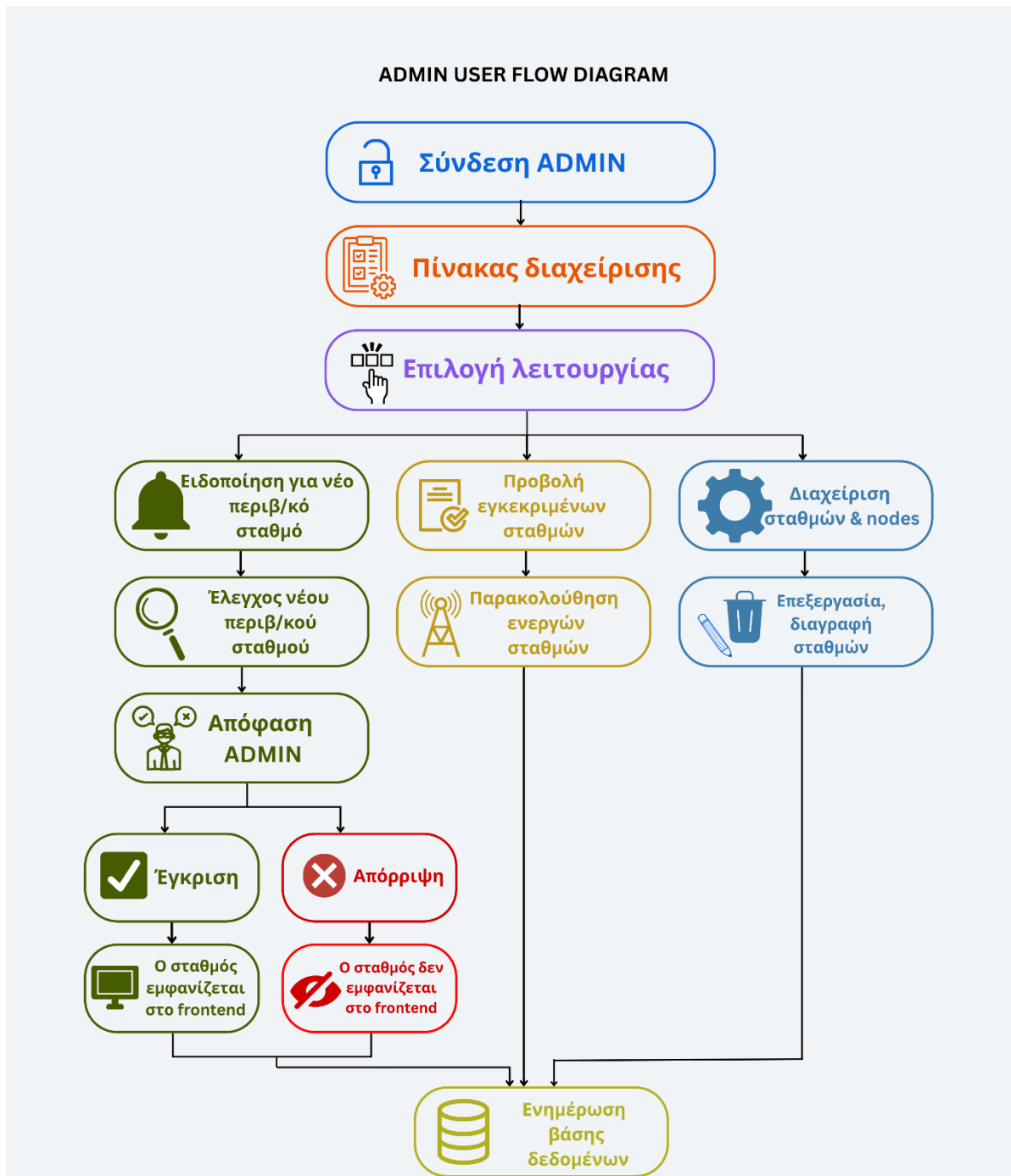
7.3.5 Σύννοψη Λειτουργιών Admin Panel

Το διάγραμμα πλοήγησης της Εικόνας 7.21 παρακάτω συνοψίζει τις λειτουργίες που διατίθενται για τους διαχειριστές του συστήματος στο Admin CRUD panel. Όπως είπαμε, η πρόσβαση είναι ελεγχόμενη και γίνεται μόνο με την χρήση εξουσιοδοτημένου κλειδιού πρόσβασης. Περισσότερα στοιχεία σχετικά με την ενσωμάτωση της συγκεκριμένης λειτουργίας αναφέρονται στην υποενότητα 6.7.4 του προηγούμενου κεφαλαίου.

Μέσω του panel οι διαχειριστές ειδοποιούνται για τυχόν νέους σταθμούς που εισάγονται στο σύστημα και έπειτα μπορούν να εγκρίνουν ή να απορρίψουν την αποθήκευση των δεδομένων από αυτούς τους σταθμούς. Σε περίπτωση έγκρισης των σταθμών, τα δεδομένα τους εμφανίζονται κανονικά στην αρχική σελίδα του συστήματος, ενώ αντίθετα αν απορριφθούν, τα δεδομένα τους δεν αποθηκεύονται καν στη βάση.

Άλλη λειτουργία που προσφέρει το panel είναι η παρακολούθηση των ενεργών σταθμών που υπάρχουν στο σύστημα και συνεπώς έχουν εγκριθεί για αποθήκευση δεδομένων στη βάση.

Τέλος προσφέρεται και η δυνατότητα διαχείρισης των σταθμών, δηλαδή η επεξεργασία ή διαγραφή τους από το σύστημα.



Εικόνα 7.21: Διάγραμμα Σύνοψης Λειτουργιών Διαχειριστικού Πίνακα Εφαρμογής

7.4 Επίλογος

Ολοκληρώνοντας την παρουσίαση της γραφικής διεπαφής του συστήματος, ολοκληρώνεται ουσιαστικά η επεξήγηση της μεθόδου κατασκευής του, από το επίπεδο υλικού, δικτύου, οργάνωσης αλλά και απεικόνισης των δεδομένων. Το παρόν κεφάλαιο αποτέλεσε ουσιαστικά έναν «οδηγό χρήσης» της γραφικής διεπαφής του συστήματος, η οποία σχεδιάστηκε με γνώμονα την ευκολία του χρήστη και την καλύτερη εμπειρία του, χρησιμοποιώντας σύγχρονες τεχνικές σχεδιασμού. Συμπεράσματα από τη χρήση συνοψίζονται στο τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας.

Κεφάλαιο 8ο: Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης

8.1 Εισαγωγή

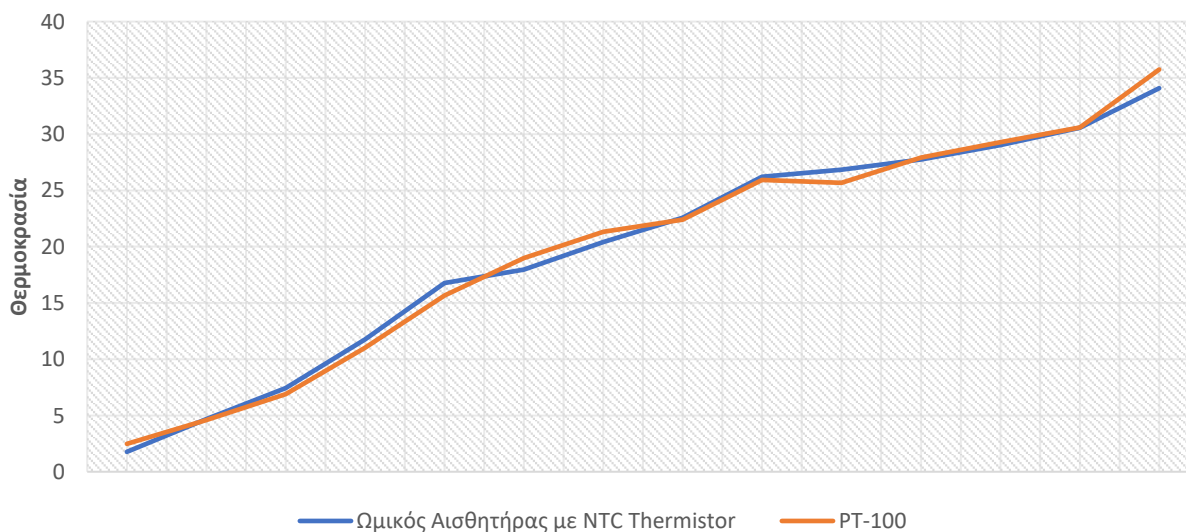
Το συγκεκριμένο κεφάλαιο έρχεται ως κατακλείδα στην διπλωματική εργασία. Αφού έχουμε αναλύσει στα προηγούμενα όλη την λειτουργία των υλοποιημένων υποσυστημάτων, εδώ θα κάνουμε μία εκτίμηση της επιτυχίας του εγχειρήματος, παραθέτοντας και ορισμένες προτάσεις βελτίωσης της υλοποίησης ή επεκτάσεις του θέματος.

8.2 Συμπεράσματα από την δοκιμή λειτουργίας

Ο στόχος της εργασίας ήταν να υλοποιηθεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα ικανό για συλλογή, μετάδοση, επεξεργασία και απεικόνιση περιβαλλοντικών δεδομένων από τον ατμοσφαιρικό αέρα, αλλά και από καλλιεργήσιμα εδάφη.

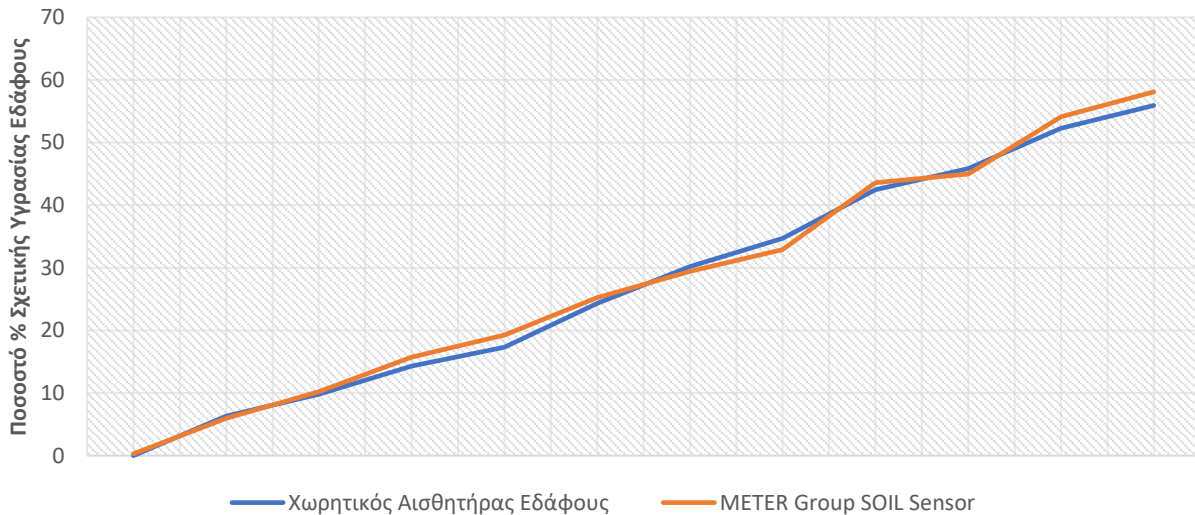
Η συλλογή των δεδομένων έγινε με διάφορους αισθητήρες ηλεκτρομηχανικού τύπου, σχεδιασμένους με κατάλληλο τρόπο. Αναφορικά με τις μετρήσεις που έγιναν στο έδαφος, τα αισθητήρια σχεδιάστηκαν εξ' ολοκλήρου από εμάς, εφαρμόζοντας γνώσεις που αποκομίσαμε από τα μαθήματα αναλογικών ηλεκτρονικών και αισθητηρίων που περιλαμβάνονται στο πρόγραμμα σπουδών της σχολής. Σχετικά με τις μετρήσεις στον ατμοσφαιρικό αέρα, πέραν του ολοκληρωμένου αισθητηρίου BME – 280, όλα τα υπόλοιπα σχεδιάστηκαν από εμάς, εφαρμόζοντας αρχές σχεδίασης που υπάρχουν σε αντίστοιχα κείμενα της βιβλιογραφίας και αφορούν σε ηλεκτρονικούς αισθητήρες καιρικών φαινομένων. Τα αισθητήρια αυτά λειτούργησαν με τον τρόπο που έπρεπε, βαθμονομήθηκαν σε εργαστηριακό περιβάλλον και έπειτα μέσω εφαρμογής κατάλληλων μαθηματικών πράξεων, οδηγηθήκαμε σε μετρήσεις που εμπίπτουν σε εγκυρότητα της τάξης του 90%. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει από τις εξής παρακάτω θέσεις:

Το αναλογικό αισθητήριο θερμοκρασίας εδάφους παρουσιάζει αποκλίσεις από την πραγματική θερμοκρασία της τάξης του $\pm 1^{\circ}\text{C}$ και δεδομένου ότι οι μετρήσεις θερμοκρασίας εντός εδάφους απαιτούν ακρίβεια της τάξης του $\pm 2^{\circ}\text{C}$, αγγίζει την τελειότητα. Τα δεδομένα από τις δοκιμαστικές μετρήσεις του αισθητήρα συνοψίζονται στο παρακάτω γράφημα (Εικόνα 8.1). Ως μέτρηση ελέγχου χρησιμοποιήθηκε το ίδιο RTD τύπου PT-100 με μεταλλικό στέλεχος που χρησιμοποιήθηκε και για τη βαθμονόμηση του αισθητηρίου.



Εικόνα 8.1: Γράφημα Σύγκρισης Μετρήσεων Θερμοκρασίας

Το αναλογικό αισθητήριο υγρασίας χώματος ικανοποιεί τις απαιτήσεις κατασκευής του, εφόσον τα δεδομένα υγρασίας εντός εδάφους δεν απαιτούν ακρίβεια 2 δεκαδικών ψηφίων, ούτε εγκυρότητα της τάξης του $\pm 2\%$ που επιτυγχάνει. Τα αποτελέσματα των δοκιμαστικών μετρήσεων συνοψίζονται στο παρακάτω γράφημα της Εικόνας 8.2. Για έλεγχο της εγκυρότητας χρησιμοποιήθηκε αισθητήρας εδάφους της METER Group, ικανός να ανιχνεύει θερμοκρασία και σχετική υγρασία με την μέθοδο GWC.



Εικόνα 8.2: Γράφημα Δοκιμαστικών Μετρήσεων Αισθητήρα Υγρασίας Εδάφους

Αναφορικά με το ολοκληρωμένο αισθητήριο περιβάλλοντος BME-280, είναι ήδη βαθμονομημένο, επομένως λειτουργεί στο 100%. Η ακρίβειά του που ορίζεται ως 0.1°C επιβεβαιώνεται από το PT-100, αν υποθέσουμε ότι και το PT-100 είναι αρκετά ακριβές.

Το όργανο ανίχνευσης κατεύθυνσης ανέμου λόγω κατασκευαστικού σφάλματος, εν τέλει δεν είναι ικανό να πολώσει ταυτόχρονα 2 αισθητήρες Hall, ωστόσο αυτό μπορεί εύκολα να διορθωθεί με τη χρήση ενός μαγνήτη μεγαλύτερης διαμέτρου.

Το όργανο ανίχνευσης ταχύτητας ανέμου λειτουργεί ικανοποιητικά, αν και σε ορισμένες δοκιμές που προσομοιώθηκε δυνατός άνεμος, οι πολλές περιστροφές εντός ενός λεπτού οδήγησαν τον ESP32 σε μη διαχειρίσιμο σφάλμα και τον ανάγκασαν να πραγματοποιήσει επανεκκίνηση. Το πρόβλημα αυτό θα μπορούσε εύκολα να διορθωθεί με παραπάνω έρευνα και αποσφαλμάτωση, καθότι αποτελεί αστοχία υλικού.

Το όργανο μέτρησης ύψους βροχής μετρά για 1 λεπτό και ανάγει τα δεδομένα αυτά σε ωριαία μέτρηση θεωρώντας σταθερό τον ρυθμό με τον οποίο πέφτει η βροχή. Αυτό εν τέλει είναι άτοπο, διότι η βροχή αποτελεί δυναμικό φαινόμενο. Το πρόβλημα αυτό επίσης μπορεί εύκολα να διορθωθεί αν λαμβάνονται μετρήσεις σε συχνότερα διαστήματα. Επιπλέον, σχετικά με το συγκεκριμένο όργανο πρέπει να ληφθεί υπόψη και το σφάλμα κβάντισης, δηλαδή όταν γίνεται η μέτρηση των αριθμών που πολώθηκε ο αισθητήρας Hall του οργάνου και η βροχή έχει μόλις σταματήσει, ενδέχεται το ένα δοχείο να είναι μισογεμάτο, επομένως δεν θα πραγματοποιηθεί ανατροπή του. Αυτό το σφάλμα είναι εντονότερο όταν μιλάμε ασθενείς βροχοπτώσεις με χαμηλά ύψη βροχής, ενώ σε δυνατές καταιγίδες δεν παίζει τόσο μεγάλο ρόλο, αφού η ανατροπή των δοχείων γίνεται με γρήγορο ρυθμό.

Σχετικά με το κύκλωμα παροχής ισχύος του τμήματος transmitter της εργασίας, το οποίο ήταν απαραίτητο καθ' ότι το υποσύστημα βρίσκεται σε σημείο που δεν υπάρχει σταθερή παροχή ενέργειας

μέσω του ηλεκτρικού δικτύου, η τοποθέτηση του PV panel και ο τύπος της μπαταρίας επιλέχθηκαν δοκιμαστικά, δεδομένου ότι οποιαδήποτε άλλη περίπτωση υλικών θα ήταν αρκετά κοστοβόρα. Παρ' όλα αυτά, εν τέλει η παρεχόμενη ισχύς ήταν αρκετή και η μπαταρία ιόντων λιθίου δεν δημιούργησε προβλήματα, εφόσον δώσαμε βάση στην προστασία της από τα καιρικά φαινόμενα.

Αναφορικά με την επικοινωνία του τμήματος transmitter με το τμήμα receiver, επιλέχθηκε ως τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας η LoRa, μία τεχνολογία που χρησιμοποιείται κατά κόρον σε εφαρμογές IoT, λόγω της χαμηλής ενεργειακής της κατανάλωσης, αλλά και της μεγάλης της εμβέλειας. Σε δοκιμές που πραγματοποιήσαμε, και κάνοντας χρήση του module που διαθέτει μία απλή κεραία σε μορφή ελατηρίου (spring type) καταφέραμε σε ανοιχτό, επίπεδο πεδίο χωρίς φυσικά ή τεχνητά εμπόδια (LOS) να έχουμε επικοινωνία μέχρι την απόσταση των 200 περίπου μέτρων, δείγμα που θεωρήθηκε επαρκές για τα πλαίσια της εργασίας.

Το τμήμα receiver συνδέθηκε με ευκολία και με το τμήμα transmitter, αλλά και με την απομακρυσμένη βάση δεδομένων που φιλοξενείται στην υλοποιημένη ιστοσελίδα, με ασφαλή κρυπτογραφημένη διασύνδεση HTTPS. Λαμβάνοντας υπόψιν ως γνώμονα και την ασφάλεια του συστήματος που φιλοξενείται η ιστοσελίδα, εφαρμόσαμε τεχνικές έτσι ώστε να πραγματοποιείται έλεγχος των νέων πακέτων που φτάνουν στην βάση, προκειμένου να διασφαλίσουμε την περίπτωση μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης από κακόβουλους χρήστες με την χρήση τεχνικών ασφαλείας από κυβερνοεπιθέσεις.

Το περιβάλλον απεικόνισης της διαδικτυακής εφαρμογής σχεδιάστηκε με γνώμονα τις σύγχρονες τεχνικές σχεδιασμού δυναμικών ιστοσελίδων, οι οποίες προσφέρουν ένα περιβάλλον εύχρηστο και κατανοητό για τον οποιονδήποτε χρήστη, ειδικά στην προκειμένη περίπτωση που η εφαρμογή απευθύνεται σε χρήστες με άγνωστα μαθησιακά επίπεδα. Τα συγκεντρωμένα δεδομένα φροντίσαμε να αναπαρίστανται με γραφικό τρόπο, κάνοντας εύκολη την εξαγωγή οποιουδήποτε συμπεράσματος από τους χρήστες και δίνοντας τους την δυνατότητα προβολής γραφημάτων για διαφορετικά βάθη χρόνου, υπολογίζοντας τη μέση τιμή των δεδομένων για τον εκάστοτε δείκτη του γραφήματος.

Επιπροσθέτως, τα συμπεράσματα από την εμπειρία χρήσης της ιστοσελίδας ήταν ενδιαφέροντα. Στην δοκιμαστική λειτουργία συμμετείχαν άνθρωποι διαφόρων ηλικιών και έδειξε ανάμεικτα αποτελέσματα. Γενικώς, τα άτομα μεγαλύτερης ηλικίας χρειάστηκαν παραπάνω χρόνο και επεξήγηση της ροής πλοήγησης για να διαπιστώσουν τον τρόπο με τον οποίο παρουσιάζονται τα δεδομένα, ενώ διαβάζοντας τις οδηγίες που τους παρείχαμε κατάφεραν να πλοηγηθούν στο περιβάλλον ευκολότερα. Σχετικά με το γραφικό περιβάλλον, θεώρησαν σημαντική την προσθήκη επιλογής ανοιχτού ή σκούρου θέματος ενώ αρκετά χρήσιμος ήταν και ο μηχανισμός απεικόνισης της ακριβούς τιμής των δεδομένων που προσφέρεται μέσα στη διεπαφή.

Συνολικά, μπορούμε να πούμε ότι το σύστημα που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας λειτούργησε κατά τον επιθυμητό τρόπο.

8.3 Προτάσεις Βελτίωσης

Παρ' όλο που ο στόχος της εργασίας επετεύχθη, υπάρχουν ορισμένα σημεία τα οποία χρήζουν βελτίωσης και βρίσκονται και στα 3 επίπεδα διάρθρωσης του συστήματος.

8.3.1 Βελτιώσεις στο επίπεδο αντίληψης

Αρχικά, στο επίπεδο αντίληψης υπάρχουν αρκετά σημεία που θα μπορούσαν μελλοντικά να βελτιωθούν. Πρώτο και κυριότερο, το οποίο σχετίζεται με την φύση των αναλογικών κυκλωμάτων μέτρησης, είναι η χρήση διαφορετικού τύπου τελεστικών ενισχυτών αντί των LMC662. Οι νέοι

τελεστικοί θα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να λειτουργήσουν σε χαμηλότερες τάσεις, έτσι ώστε να μην υπάρχει η ανάγκη για χρήση τροφοδοσίας 5V, αλλά να περιοριστεί στα 3.3V. Με την εξάλειψη της διπλής τροφοδοσίας στο κύκλωμα θα εξαλειφθεί και η ανάγκη για τη χρήση Logic Level Shifters, οι οποίοι παρουσιάζουν προβλήματα όταν ο ESP32 μπαίνει σε κατάσταση Deep Sleep.

Επιπροσθέτως, μένοντας στο θέμα της τροφοδοσίας, αναγκαία κρίνεται η βελτίωση του τμήματος παροχής ισχύος, έτσι ώστε να εξαλειφθεί το module DFR-0559 και να αντικατασταθεί από ένα σχεδιασμένο εξ' αρχής κύκλωμα που θα επιτελεί την παροχή σταθεροποιημένης τροφοδοσίας τάσης 3.3V, υπό την προϋπόθεση ότι έχει εξαλειφθεί η ανάγκη για 5V τάση. Το module ουδέποτε λειτούργησε σωστά με τον ESP32, καθώς με την ύπαρξη των Logic Level Shifters υπάρχουν και επιστροφές ρευμάτων στο module μέσω του κοινού σημείου αναφοράς για τις 2 τροφοδοσίες. Για να λειτουργούσε σωστά, θα έπρεπε να υπάρχουν δύο διαφορετικά σημεία αναφοράς, ένα για την 5V τάση και ένα για την 3.3V τάση. Επομένως, στην παρούσα φάση αποτελεί πολύ κοστοβόρα επιλογή και καλύτερα θα ήταν να αντικατασταθεί.

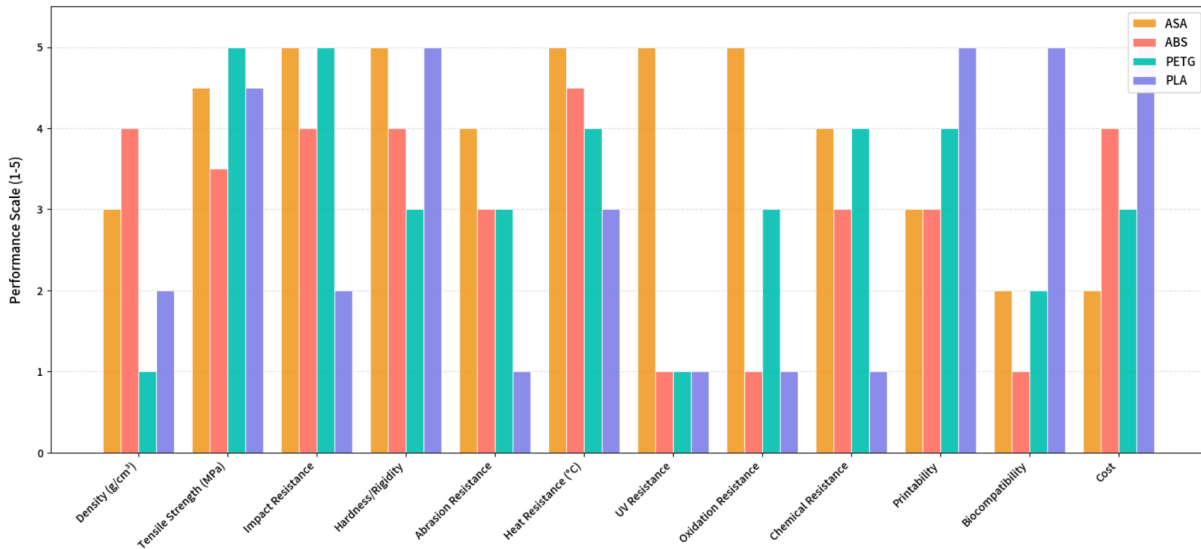
Περαιτέρω, μία ακόμη πρόταση που θα μπορούσε να βελτιώσει τον σταθμό μέτρησης περιβαλλοντικών δεδομένων, θα ήταν να προστεθούν παραπάνω αισθητήρες είτε για εδαφικές μετρήσεις, είτε για την ατμόσφαιρα. Σχετικά με το έδαφος, ένα ενδιαφέρον αισθητήριο θα μπορούσε να σχεδιαστεί για την μέτρηση της εδαφικής αλατότητας (salinity), ενώ στις μετρήσεις από τον αέρα θα ήταν ένα αισθητήριο για την ποσότητα σκόνης που υπάρχει στον αέρα ή για την UV ακτινοβολία, όπως ένα πυρανόμετρο.

Έπειτα, εξαιρετικά ακριβή επιλογή ήταν και ο ADS1015 που χρησιμοποιήσαμε, καθ' ότι είναι ADC με ακρίβεια 12bit, ενώ για την χρήση που μας ενδιέφερε, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί κάποιος φθηνότερος, με μικρότερη ακρίβεια, π.χ. ένας 8bit ή ακόμη και 4bit, μιας και οι διακυμάνσεις τάσης στην έξοδο των αναλογικών κυκλωμάτων είναι αρκετά μικρές (της τάξης των 1 με 2 V). Οι λόγοι που μας οδήγησαν στην χρήση του συγκεκριμένου ADC ήταν οι έτοιμες βιβλιοθήκες που υπήρχαν για τη χρήση του με μικροελεγκτές Arduino και ESP32, καθώς και η διαθεσιμότητά του στην αγορά. Ενδεικτικά, προτείνεται η χρήση του MCP3004 της Microchip, ο οποίος βρίσκεται στην αγορά σε μισή τιμή απ' αυτή του ADS1015, διαθέτει ακρίβεια 10bit αλλά υποστηρίζει μόνο την επικοινωνία με SPI και όχι I²C. Για την σειρά MCP3xxx υπάρχει επίσης υλοποιημένη βιβλιοθήκη για μικροελεγκτές Arduino.

Ακόμη, σχετικά με την επιλογή των υλικών για την σχεδίαση της πλακέτας, η χρήση THT υλικών ανεβάζει σημαντικά το κόστος κατασκευής του PCB αλλά και των ίδιων των υλικών, επομένως θα μπορούσε να γίνει επανασχεδίαση με χρήση υλικών SMD, γεγονός που θα επέτρεπε την περαιτέρω σμίκρυνσή της. Με αυτή τη μέθοδο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και μικρότερη υλοποίηση ενός ESP32 μικροελεγκτή, με την προϋπόθεση ότι θα επαρκούσε από άποψης GPIO για να υποστηρίξει όλα τα αισθητήρια.

Απαραίτητη κρίνεται η αλλαγή του τύπου της κεραίας για το LoRa module, και ο λόγος είναι ότι η κεραία spring type που χρησιμοποιήσαμε δεν αποτελεί σε καμία περίπτωση αξιόλογη επιλογή για μία επικοινωνία με την εμβέλεια του LoRa που εμείς επιθυμούμε. Ωστόσο, το αντίστοιχο module με την περίπτωση μίας κεραίας με διασύνδεση ipex ήταν ασύμφορη από άποψης κόστους για τα δεδομένα της συγκεκριμένης εργασίας, λαμβάνοντας υπόψιν και το κόστος των υπολοίπων υλικών.

Τέλος, η σημαντικότερη βελτίωση στο τμήμα αντίληψης, αφορά στα μοντέλα τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση των αισθητήρων ανέμου και βροχής. Τα συγκεκριμένα μοντέλα περιλαμβάνουν αρκετά σχεδιαστικά σφάλματα που θα μπορούσαν εύκολα να αποφευχθούν αν υπήρχε ο χρόνος για τροποποιήσεις. Επιπλέον, το ιδανικότερο θα ήταν να γίνει αλλαγή και στο υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή τους, διότι το πολυμερές PLA έχει αρκετά μικρή ανοχή στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Στο συγκριτικό γράφημα της Εικόνας 8.3, γίνεται σύγκριση των ιδιοτήτων μεταξύ των πολυμερών ASA, ABS, PETG και PLA.



Εικόνα 8.3: Συγκριτικό Γράφημα Πολυμερών ASA, ABS, PETG, PLA [125]

Από το γράφημα συμπεραίνουμε ότι η ιδανικότερη επιλογή για την εκτύπωση των οργάνων που χρησιμοποιούνται σε εξωτερικούς χώρους είναι το πολυμερές ASA (Acrylonitrile Styrene Acrylate / Ακρυλονιτρίλιο Στυρένιο Ακρυλικό) καθότι έχει τη μεγαλύτερη ανοχή σε υπεριώδη (UV) ηλιακή ακτινοβολία, η οποία μάλιστα είναι σημαντικά καλύτερη από όλα τα άλλα πολυμερή. Επιπλέον, έχει την μεγαλύτερη ανοχή σε θερμοκρασία, συγκεκριμένα λίγο καλύτερη από το πολυμερές ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene / Ακρυλονιτρίλιο Βουταδιένιο Στυρένιο). Αναφορικά με την ανοχή στην οξείδωση, πρώτο στην κατηγορία έρχεται πάλι το ASA, ενώ δεύτερο καλύτερο είναι το PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol – modified / Τερεφθαλικό Πολυαιθυλένιο Γλυκόλης). Τέλος, ως καλύτερο υλικό από άποψη πυκνότητας είναι το ABS, με το ASA να καταλαμβάνει τη δεύτερη κατά σειρά θέση. Παράγοντες που καθιστούν ως καλύτερη επιλογή το πολυλακτίδιο (PLA) είναι το χαμηλό κόστος του συγκεκριμένου υλικού, καθώς και η ευκολότερη εκτύπωση λεπτομερειών στα όργανα, ενώ η ευρεία χρήση του σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης έναντι άλλων πολυμερών όπως το ABS οφείλεται στο γεγονός πως το PLA είναι σε μεγάλο βαθμό βιοδιασπώμενο.

8.3.2 Βελτιώσεις στο επίπεδο δικτύου

Στο επίπεδο δικτύου, με την προϋπόθεση ότι διατηρούνται τα ίδια πρωτόκολλα ασύρματης επικοινωνίας, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί κάποιος μικροελεγκτής που διαθέτει προεγκατεστημένο κάποιο module για επικοινωνία μέσω LoRa, αν αυτό δεν επιβαρύνει περαιτέρω το κοστολόγιο της συγκεκριμένης υλοποίησης. Αυτό θα εξάλειφε την ανάγκη για χρήση όλων των GPIO της διεπαφής SPI, καθώς φυσικά και την πολυπλοκότητα της καλωδίωσης.

Πέραν αυτού, ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η χρήση κάποιου διαφορετικού πρωτοκόλλου ασύρματης επικοινωνίας για την μετάδοση των δεδομένων από τους αισθητήρες στο gateway, όπως είναι το Zigbee,

το οποίο είναι επίσης πρωτόκολλο με χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, αλλά και με μικρότερη εμβέλεια.

8.3.3 Βελτιώσεις στο επίπεδο εφαρμογής

Στο επίπεδο εφαρμογής υπάρχουν επίσης σημεία που χρήζουν βελτίωσης. Για αρχή, μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι κάθε κόμβος ονοματίζεται με “hard” τρόπο μέσα από τον κώδικα του μικροελεγκτή και πρέπει απαραίτητα να δηλωθεί εκ των προτέρων το όνομά του και ο σταθμός στον οποίο ανήκει. Μία λύση σε αυτό το πρόβλημα θα ήταν η χρήση ενός μοναδικού αναγνωριστικού διαφορετικού τύπου, όπως είναι ο σειριακός αριθμός (serial number) των συσκευών. Με τη χρήση αυτού του μηχανισμού θα μπορούσε δυναμικά να αποθηκεύεται στη βάση μία αντιστοίχιση σειριακών αριθμών κόμβων με τον σταθμό στον οποίο συμμετέχουν, αφού ονοματιστεί ο σταθμός από τον διαχειριστή του συστήματος κατά την έγκριση αποστολής δεδομένων στη βάση.

Ακόμη μία σημαντική στο σύστημα προσθήκη θα ήταν η αξιοποίηση των μετρούμενων μετεωρολογικών δεδομένων έτσι ώστε με τη χρήση ειδικά εκπαιδευμένης Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) να υπάρχει μία μετεωρολογική πρόγνωση των επόμενων εικοσιτετράωρων στο σύστημα. Η εκπαίδευση της AI θα μπορούσε να γίνει βάσει μοντέλων μετεωρολογικών προβλέψεων και Μηχανικής Μάθησης (ML).

Επιπλέον, θα μπορούσαν να προστεθούν στο σύστημα περαιτέρω ικανότητες στατιστικής ανάλυσης, ήτοι υπολογισμοί μεγίστων και ελαχίστων τιμών καθώς και στατιστικές συγκρίσεις μεταξύ διαφορετικών περιόδων και περισσότερες απεικονίσεις γραφημάτων, όπως bargraphs, πίτες και αντίστοιχο τύπου χρήσιμα για εξαγωγή συμπερασμάτων γραφήματα.

Στο θέμα των γραφημάτων, βελτίωση θα μπορούσε να γίνει στη μορφή τους, ώστε να γίνουν περισσότερο βελτιστοποιημένα (optimized), με εμφάνιση των δεδομένων αυστηρά κατά μία ώρα. Με τον τρόπο αυτό, τα αποτελέσματα θα είναι πιο ευδιάκριτα, αυξάνοντας τη χρηστικότητα του συστήματος.

Επιπροσθέτως, για περαιτέρω χρηστικότητα θα μπορούσε να εισαχθεί στο σύστημα μία μέθοδος προσαρμοσμένων από το χρήστη ειδοποιήσεων. Για παράδειγμα, ο χρήστης να ειδοποιείται όταν κάποια τιμή μέτρησης που τον ενδιαφέρει ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο κατώφλι στις μετρήσεις. Τότε θα ειδοποιείται από το σύστημα μέσω email ή μέσω pop up alert στον υπολογιστή ή το κινητό του.

Μολονότι το σύστημα υλοποιείται ώστε να υποστηρίζει την επεκτασιμότητα, υπάρχει ένα όριο στην εισαγωγή νέων σταθμών ή κόμβων στη βάση δεδομένων, γεγονός που σχετίζεται με τον περιορισμό των υπολογιστικών πόρων του διακομιστή στον οποίο φιλοξενείται η σελίδα. Το όριο αυτό ήταν επαρκές για την επίτευξη των ακαδημαϊκών στόχων του συστήματος, ωστόσο αν επιθυμούμε την πλήρη λειτουργικότητά του, προτείνεται η χρήση διαφορετικού διακομιστή για να μην υπάρχουν πτώσεις στην απόδοση.

Τέλος, βελτιώσεις μπορούν να γίνουν και στο θέμα της ασφάλειας. Η τεχνική ελέγχου πρόσβασης με username και password για το admin panel είναι σχετικά ξεπερασμένη, αφού όλα τα συστήματα διαχείρισης ευαίσθητων δεδομένων στην εποχή μας διαθέτουν μηχανισμούς ασφάλειας με αυθεντικοποίηση 2 παραγόντων (2 factor authentication). Αυτό που επιθυμούμε κυρίως να προστατεύσουμε είναι τα API endpoints από μη εξουσιοδοτημένη χρήση.

8.4 Επίλογος

Εν κατακλείδι, μετά από σύνοψη των συμπερασμάτων λειτουργίας του συστήματος που υλοποιήθηκε και αφού καταλήξαμε σε ορισμένες προτάσεις για την βελτίωσή του σε όλα τα επίπεδα, μπορούμε πλέον να πούμε πως το μεγαλύτερο ενδιαφέρον στην υπόθεση υλοποίησης ενός ολοκληρωμένου συστήματος έρχεται μετά την περάτωση του έργου και σχετίζεται με τους τρόπους που θα μπορούσε αυτό στο μέλλον να βελτιωθεί. Βασικός στόχος ενός μηχανικού είναι να αναγνωρίζει τα σφάλματα στο έργο του και να προσπαθεί να βρει τον βέλτιστο τρόπο επίλυσής τους. Έτσι θα είναι πάντα έτοιμος να αντιμετωπίσει την οποιαδήποτε πρόκληση του επιφυλάσσει το μέλλον.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Βίγκλας Π., *Εισαγωγή στη Μετεωρολογία: Μία Εκπαιδευτική Προσέγγιση. Μέρος Α': Βασικές Έννοιες*. Μακρινίτσα Πηλίου: Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων – Κέντρο Περιβαλλοντικής Εκπαίδευσης Μακρινίτσας, 2007.
- [2] “EMY - Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία - Σχετικά με την EMY,” *Emy.gr*, 2025. <https://emy.gr/about-emy?tab=general> (accessed Aug. 01, 2025).
- [3] EMY, “ΔΟΥΥΦΟΡΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΤΗΣ EMY,” *Oldportal.emy.gr*, 2025. http://oldportal.emy.gr/emy/el/about_emy/sxetika-me-thn-emy-sat-station (accessed Aug. 02, 2025).
- [4] N. Bowditch, *The American Practical Navigator*. 1995.
- [5] “Μονάδες μέτρησης στην ΕΕ | EUR-Lex,” *Europa.eu*, 2019. <https://eur-lex.europa.eu/EL/legal-content/summary/units-of-measurement-in-the-eu.html?fromSummary=24> (accessed Aug. 02, 2025).
- [6] EMY, “Δείκτης WBGT, EMY, Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία,” *Oldportal.emy.gr*, 2025. http://oldportal.emy.gr/emy/el/forecast/deikths_wbgt (accessed Aug. 02, 2025).
- [7] K. Costa, “Τι είναι ο δείκτης θερμότητας (Heat Index) και πώς μας επηρεάζει — CYPRUS WEATHER,” *Kitasweather.com*, Sep. 03, 2024. <https://www.kitasweather.com/news/meteorologikoi-oroi/ti-einai-o-deiktis-thermotitas-kai-pos-mas-epireazei/> (accessed Aug. 02, 2025).
- [8] H. D. Young, A. Lewis Ford, and R. A. Freedman, *University Physics with Modern Physics Technology Update*. Addison-Wesley, 2013.
- [9] Britannica, “atmospheric pressure | Definition & Variation,” *Encyclopædia Britannica*. 2019. Available: <https://www.britannica.com/science/atmospheric-pressure>
- [10] “Surface Analysis Chart - Met Éireann - The Irish Meteorological Service,” *Met Éireann*. <https://www.met.ie/latest-reports/surface-analysis> (accessed Aug. 02, 2025).
- [11] I. N. Κιοσκερίδης, *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και εφαρμογές των Ηλεκτρονικών Ισχύος*, 2nd ed. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2019.
- [12] M. Redmon, “What Is The Best Sailing Wind Speed? When Is It Too Strong?,” *WeatherFlow-Tempest, Inc.*, Nov. 18, 2024. <https://tempest.earth/resources/best-sailing-wind-speed/>
- [13] E. Caterino, “Soil Data: Best Soil Datasets & Databases,” *Datarade*. <https://datarade.ai/data-categories/soil-data> (accessed Aug. 03, 2025).
- [14] W. Shangguan, Y. Dai, Q. Duan, B. Liu, and H. Yuan, “A global soil data set for earth system modeling,” *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 249–263, Mar. 2014, doi: <https://doi.org/10.1002/2013ms000293>.
- [15] “European Soil Database & soil properties - ESDAC - European Commission,” *Europa.eu*, 2018. <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/resource-type/european-soil-database-soil-properties>
- [16] D. Hillel, “Soil Physics,” *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, pp. 77–97, 2003, doi: <https://doi.org/10.1016/b0-12-227410-5/00936-4>.
- [17] P. Davidovits, *Physics in biology and medicine*. Amsterdam ; Boston: Elsevier/Academic Press, Cop, 2008.

- [18] R. R. Weil and N. C. Brady, *The Nature and Properties of Soils*, 15th ed. Harlow, England: Pearson, 2017.
- [19] J. R. Holton, J. A. Curry, and J. A. Pyle, *Encyclopedia of atmospheric sciences*. Amsterdam ; Boston: Academic Press, 2003.
- [20] S. Gould, “The Ultimate Guide to Soil Moisture,” *ConnectedCrops*, Jun. 23, 2018. <https://connectedcrops.ca/the-ultimate-guide-to-soil-moisture/>
- [21] “Soil Taxonomy A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service,” 1999. Available: <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-06/Soil%20Taxonomy.pdf>
- [22] Γ. Βούτσινος, Γ. Καλκάνης, Κ. Κοσμάς, and Κ. Σούτσας, *Γεωλογία & Διαχείριση Φυσικών Πόρων*, 2nd ed. Αθήνα: Ινστιτούτο Τεχνολογίας Υπολογιστών & Εκδόσεων “Διόφαντος,” 2013. Available: https://ebooks.edu.gr/ebooks/v/pdf/8547/2516/22-0113-02_Geologia-kai-Diacheirisi-Fysikon-Poron_A-Lykeiou-Epilogis_Vivlio-Mathiti/
- [23] M. Gavrilesco, “Water, Soil, and Plants Interactions in a Threatened Environment,” *Water*, vol. 13, no. 19, p. 2746, Jan. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/w13192746>.
- [24] JFE, “Automatic Weather Stations for surface observation,” *Sterela-meteo.com*, 2020. <http://www.sterela-meteo.com/> (accessed Aug. 03, 2025).
- [25] Anders Brahme, *Comprehensive Biomedical Physics*. Amsterdam Etc.: Elsevier, Amsterdam [Etc, 2014.
- [26] A. Ostadfar, “Chapter 8 - Real Time Measurement Techniques of Biofluids,” *ScienceDirect*, Jan. 01, 2016. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128024089000089>
- [27] M. Physics, “Minimum Thermometer,” *Mini Physics*, Jul. 26, 2011. <https://www.miniphysics.com/minimum-thermometer.html>
- [28] T. Roomi, *Maximum and Minimum Thermometers*. 2021. Accessed: Aug. 03, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Maximum-and-Minimum-Thermometers_fig18_354282525
- [29] PAGASA, “Weather Instruments,” *PAGASA*. <https://www.pagasa.dost.gov.ph/learning-tools/weather-instruments> (accessed Aug. 04, 2025).
- [30] H. Schoenefeldt, *Sample of pages for the self-recording hygrometer and thermometers showing temperature and humidity readings for July 12-16, 1937*. 2019. Available: https://www.researchgate.net/figure/Sample-of-pages-for-the-self-recording-hygrometer-and-thermometers-showing-temperature_fig4_329595635
- [31] “12 Types of Weather Instruments and Uses - Renke,” *Environment Monitoring Sensors Manufacturer*, Jun. 17, 2024. <https://www.renkeer.com/weather-instruments-types-and-uses/> (accessed Aug. 04, 2025).
- [32] *Climate Data Hygrometer Datagram*. 2024. Accessed: Aug. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.climate.gov/media/16106>
- [33] A. Volle, “Wet-bulb temperature | Description, Uses, Climate Change, & Facts | Britannica,” *www.britannica.com*, Oct. 25, 2023. <https://www.britannica.com/science/wet-bulb-temperature>

- [34] L. Chiesa, *Thermo-hygrograph*. 2008. Accessed: Aug. 04, 2025. [Online]. Available: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c8/Termoigrografo_01.jpg
- [35] C. Soares, *Gas Turbines*. Butterworth-Heinemann, 2008.
- [36] Department of Atmospheric and Climate Science, University of Washington, *Aneroid Barometer*. 2013. Accessed: Aug. 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.atmos.uw.edu/academics/classes/2013Q2/101/LINKS-html/AneroidBarometer.html>
- [37] C. Johnson, “Weather Briefing, L.C.,” *Weather Briefing, L.C.*, Dec. 18, 2018. <https://www.weatherbriefing.com/weather-blog/2018/12/18/barograph> (accessed Aug. 04, 2025).
- [38] “What is a 3-Cup Anemometer?,” *Niubol*, 2023. <https://www.niubol.com/Product-knowledge/What-is-a-3-Cup-Anemometer.html>
- [39] *Rotational Anemometer*. 2012. Available: <https://fromindintoconcept.wordpress.com/2012/03/>
- [40] *Wind Direction Vane*. Accessed: Aug. 08, 2025. [Online]. Available: https://www.trustrack.com/wind_direction_vane.php
- [41] T. Foken and J. Bange, “Wind Sensors,” *Springer Handbooks*, pp. 243–272, Jan. 2021, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-52171-4_9.
- [42] C. Taylor, “What are the Different Types of Rain Gauges? | Maximum Learning Center,” *Maximum Weather Instruments*, Jun. 15, 2020. <https://www.maximum-inc.com/learning-center/what-are-the-different-type-of-rain-gauges/> (accessed Aug. 10, 2025).
- [43] [Famartin, *American variant of Stevenson Screen (Cotton Region shelter)*. 2013. Accessed: Aug. 10, 2025. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Stevenson_screen#/media/File:2013-10-20_14_18_17_Cotton_Region_Shelter_containing_Maximum_and_Minimum_Thermometers_viewed_from_the_southeast.JPG
- [44] “Ask the Bureau: How is temperature measured? - Social Media Blog - Bureau of Meteorology,” *Australian Government - Bureau of Meteorology*, 2016. <https://media.bom.gov.au/social/blog/916/ask-the-bureau-how-is-temperature-measured/> (accessed Aug. 10, 2025).
- [45] “Weather for Schools,” *Weather For Schools*, 2025. <https://www.weatherforschools.me.uk/html/setup.html> (accessed Aug. 10, 2025).
- [46] Templar52, *The interior and the equipment of a meteorological box in Greece*. 2007. Accessed: Aug. 10, 2025. [Online]. Available: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Meteo-box2.JPG>
- [47] Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, “ΔΙΚΤΥΟ ΑΥΤΟΜΑΤΩΝ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΘΝΙΚΟΥ ΑΣΤΕΡΟΣΚΟΠΕΙΟΥ ΑΘΗΝΩΝ,” 2022. Accessed: Aug. 11, 2025. [Online]. Available: https://meteosearch.meteo.gr/Raw%20Materials/perigrafi_diktyou_2022.pdf
- [48] R. G. Berard and G. W. Thurtell, “Soil temperature measurements,” *Remote Sensing Reviews*, vol. 5, no. 1, pp. 293–299, Jan. 1990, doi: <https://doi.org/10.1080/02757259009532136>.
- [49] K. Καλοβρέκτης and N. Κατέβας, *Αισθητήρες Μέτρησης και Ελέγχου*, 3rd ed. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2024.
- [50] GeeksforGeeks, “Resistance Temperature Detector or RTD,” *GeeksforGeeks*, Feb. 18, 2024. <https://www.geeksforgeeks.org/electrical-engineering/rtd/> (accessed Aug. 11, 2025).

- [51] K. Καλαϊτζάκης and E. Κουτρούλης, *Ηλεκτρικές Μετρήσεις και Αισθητήρες*. Αθήνα: Εκδόσεις Κλειδάριθμος ΕΠΕ, 2010.
- [52] “THERMISTOR BASICS,” *Wavelength Electronics*, Jan. 02, 2018. <https://www.teamwavelength.com/thermistor-basics/?srsltid=AfmBOorpi7gJyJXJRHjXQD1eZUR3PAaJ9D7XaXin-5Ru64lYG8ISqp5U> (accessed Aug. 11, 2025).
- [53] KOA Speer Electronics, “Fundamentals of Thermal Sensors,” *Koaspeer.com*, 2025. <https://www.koaspeer.com/fundamentals-of-thermal-sensors/> (accessed Aug. 11, 2025).
- [54] M. W. Rasheed *et al.*, “Soil Moisture Measuring Techniques and Factors Affecting the Moisture Dynamics: A Comprehensive Review,” *Sustainability*, vol. 14, no. 18, p. 11538, Sep. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/su141811538>.
- [55] Y. Lu, W. Peng, T. Ren, and R. Horton, “Applications of Thermo-TDR Sensors for Soil Physical Measurements,” *IntechOpen eBooks*, Oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.100285>.
- [56] Shawn, “Soil Moisture Sensor - Getting Started with Arduino - Latest News from Seeed Studio,” *Seeed Studio*, Jan. 10, 2020. https://www.seeedstudio.com/blog/2020/01/10/what-is-soil-moisture-sensor-and-simple-arduino-tutorial-to-get-started/?srsltid=AfmBOoqOuNk6OhgF5bpQC0k4rvCybjMthhoddfUO_VZydcZeVHpwr4Bm (accessed Aug. 11, 2025).
- [57] S. N. Swamy and S. R. Kota, "An Empirical Study on System Level Aspects of Internet of Things (IoT)," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 188082-188134, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3029847.
- [58] S. A. Al-Qaseemi, H. A. Almulhim, M. F. Almulhim and S. R. Chaudhry, "IoT architecture challenges and issues: Lack of standardization," *2016 Future Technologies Conference (FTC)*, San Francisco, CA, USA, 2016, pp. 731-738, doi: 10.1109/FTC.2016.7821686.
- [59] C. Sharma and N. K. Gondhi, "Communication Protocol Stack for Constrained IoT Systems," *2018 3rd International Conference On Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU)*, Bhimtal, India, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/IoT-SIU.2018.8519904.
- [60] S. Heath " *Embedded Systems Design* ", 2nd ed. New York, NY, USA: Elsevier, 2002. ISBN: 978-0-08-047756-5
- [61] M. Jiménez, R. Palomera, and I. Couvertier, *Introduction to Embedded Systems: Using Microcontrollers and the MSP430*. New York, NY, USA: Springer, 2014. doi: 10.1007/978-1-4614-3143-5.
- [62] C. Toumazou, G. S. Moschytz, and B. Gilbert, *Trade-offs in Analog Circuit Design: The Designer's Companion*. Boston, MA, USA: Springer, 2002.
- [63] F. Schwab, *The Fourth Industrial Revolution*. Geneva, Switzerland: World Economic Forum, 2016.
- [64] W. Stallings, *Wireless Communications & Networks*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2005.
- [65] D. A. Mindell, *Between Human and Machine: Feedback, Control, and Computing Before Cybernetics*. Baltimore, MD, USA: Johns Hopkins Univ. Press, 2002.
- [66] R. Buyya, A. V. Dastjerdi, *Internet of Things: Principles and Paradigms*. Burlington, MA, USA: Morgan Kaufmann, 2016.

- [67] S. M. Sohan, C. Anslow and F. Maurer, "A Case Study of Web API Evolution," *2015 IEEE World Congress on Services*, New York, NY, USA, 2015, pp. 245-252, doi: 10.1109/SERVICES.2015.43.
- [68] D. K. Halim, T. C. Ming, N. M. Song and D. Hartono, "Arduino-based IDE for Embedded Multi-processor System-on-Chip," *2019 5th International Conference on New Media Studies (CONMEDIA)*, Bali, Indonesia, 2019, pp. 135-138, doi: 10.1109/CONMEDIA46929.2019.8981862.
- [69] Zhihong Yang, Yingzhao Yue, Yu Yang, Yufeng Peng, Xiaobo Wang and Wenji Liu, "Study and application on the architecture and key technologies for IOT," *2011 International Conference on Multimedia Technology*, Hangzhou, 2011, pp. 747-751, doi: 10.1109/ICMT.2011.6002149.
- [70] H. Kim, H. Kim, S. Baek, R. Melenchuk, J. Soroka and A. Smith, "Hybrid LoRa Network Architecture: Automatic Switching between LoRaWAN and LoRa Mesh Network in Environments with Dynamic Obstacle Variations," *2024 33rd International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, Kailua-Kona, HI, USA, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCCN61486.2024.10637558.
- [71] S. Devalal and A. Karthikeyan, "LoRa Technology - An Overview," *2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, Coimbatore, India, 2018, pp. 284-290, doi: 10.1109/ICECA.2018.8474715.
- [72] A. Grizhnevich, *IoT Architecture Diagram*. 2018. Accessed: May 01, 2026. [Online]. Available: <https://www.scnsoft.com/blog-pictures/internet-of-things/iot-architecture.png>
- [73] S. Worlali Azumah, *A Review of Network Evolution towards a Smart Connected World*. 2021. Accessed: May 01, 2026. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/The-three-layer-model-of-IoT-architecture_fig4_351962438
- [74] S. Rajest, *Embedded System*. 2025. Accessed: May 01, 2026. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Embedded-Computer-Sub-Assembly-for-Electronic-Voting-Machine-A-wide-variety-of_fig1_392499209
- [75] IoTDunia, *Detailed Components of an Embedded System*. 2025.
- [76] P. Rautakorpi, *Die shot of Texas Instruments TMS1000C 4-bit microcontroller with mask ROM*. 2015. Accessed: May 01, 2026. [Online]. Available: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7c/TI_TMS1000C_die.jpg
- [77] Shi, Sasa. (2013). Testing and Deployment of Intelligent Object Framework. *International Journal of Software Engineering & Applications*. 4. 1-12. 10.5121/ijsea.2013.4601.
- [78] W. G. Jung, *Op Amp Applications Handbook*. Amsterdam U.A.: Newnes, 2009.
- [79] Μ. Ν. Σπάσος, *Αναλογική Επεξεργασία Σημάτων Αισθητηρίων*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Αιβάζη, 2018.
- [80] MyCurveFit, "Online curve-fitting at mycurvefit.com," *MyCurveFit*, 2019. <https://mycurvefit.com/>
- [81] edmallon, "Hacking a Capacitive Soil Moisture Sensor (v1.2) for Frequency Output," *Underwater Arduino Data Loggers*, Oct. 27, 2020. <https://thecavepearlproject.org/2020/10/27/hacking-a-capacitive-soil-moisture-sensor-for-frequency-output/>
- [82] "TLC555CALC Calculation tool," *Texas Instruments*, 2025. <https://www.ti.com/tool/TLC555CALC> (accessed Aug. 17, 2025).

- [83] BOSCH, “BME280 Datasheet,” *Mouser Electronics*, 2025. https://gr.mouser.com/datasheet/2/783/bst_bme280_ds002-2238172.pdf (accessed Aug. 19, 2025).
- [84] lady ada, “Adafruit BME280 Humidity + Barometric Pressure + Temperature Sensor Breakout,” *Adafruit Learning System*, Jul. 24, 2015. <https://learn.adafruit.com/adafruit-bme280-humidity-barometric-pressure-temperature-sensor-breakout/overview> (accessed Aug. 20, 2025).
- [85] “What is Hall Effect? - Hall Angle, Applications of Hall Effect,” *Electronics Coach*, Aug. 28, 2017. <https://electronicscoach.com/hall-effect.html> (accessed Aug. 20, 2025).
- [86] “Hall-Effect IC Applications Guide,” 2023. Accessed: Aug. 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.allegromicro.com/-/media/files/application-notes/an27701-hall-effect-ic-application-guide.pdf>
- [87] Allegro, “SENSITIVE HALL-EFFECT SWITCHES FOR HIGH-TEMPERATURE OPERATION”, A3144 Datasheet, 2025.
- [88] “A3144 Hall effect Sensor,” *Components101*. <https://components101.com/sensors/a3144-hall-effect-sensor>
- [89] EcoFlow, “What Are the Basics Behind Photovoltaic Solar Panels?,” *EcoFlow*, 2025. <https://www.ecoflow.com/za/blog/photovoltaic-solar-panel-basics> (accessed Aug. 22, 2025).
- [90] Dickinson College, Arcadia University, and University of Tennessee, “Types of Solar Panels: Pros and Cons,” *Treehugger*, Oct. 12, 2021. <https://www.treehugger.com/types-of-solar-panels-pros-and-cons-5181546>
- [91] K. Hasan, N. Tom, and M. R. Yuce, “Navigating Battery Choices in IoT: An Extensive Survey of Technologies and Their Applications,” *Batteries*, vol. 9, no. 12, p. 580, Dec. 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/batteries9120580>.
- [92] “Different Types of Batteries and Their Applications,” *Components101*, Aug. 21, 2019. <https://components101.com/articles/different-types-of-batteries-and-their-uses>
- [93] “Solar Power Manager 5V SKU DFR0559,” *DFROBOT*, 2025. https://wiki.dfrobot.com/Solar_Power_Manager_5V_SKU_DFR0559# (accessed Aug. 23, 2025).
- [94] E. Alhamer, A. Grigsby, and R. Mulford, “The Influence of Seasonal Cloud Cover, Ambient Temperature and Seasonal Variations in Daylight Hours on the Optimal PV Panel Tilt Angle in the United States,” *Energies*, vol. 15, no. 20, p. 7516, Oct. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/en15207516>.
- [95] B. Yoo, *ESP32 functional block diagram*. 2020. Accessed: Aug. 26, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/ESP32-functional-block-diagram_fig5_341446512
- [96] Last Minute ENGINEERS, “ESP32 Pinout Reference,” *Last Minute Engineers*, Feb. 05, 2022. <https://lastminuteengineers.com/esp32-pinout-reference/>
- [97] H. Kareem and D. Dunaev, "The Working Principles of ESP32 and Analytical Comparison of using Low-Cost Microcontroller Modules in Embedded Systems Design," *2021 4th International Conference on Circuits, Systems and Simulation (ICCSS)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2021, pp. 130-135, doi: 10.1109/ICCSS51193.2021.9464217.
- [98] Espressif, “ESP32 Series Datasheet Including,” 2024. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf

- [99] Espressif, “Analog to Digital Converter - ESP32 - — ESP-IDF Programming Guide v4.2.3 documentation,” *Espressif.com*, 2018. <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v4.2.3/esp32/api-reference/peripherals/adc.html>
- [100] K. Magdy, “ESP32 ADC Tutorial - Read Analog Voltage in Arduino,” *DeepBlue Embedded*, Apr. 27, 2021. <https://deepbluembedded.com/esp32-adc-tutorial-read-analog-voltage-arduino/> (accessed Aug. 27, 2025).
- [101] Texas Instruments, “Ultra-Small, Low-Power, I2C-Compatible, 3.3kSPS, 12-Bit ADCs With Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator” ADS1015 Datasheet, 2025.
- [102] L. Clark, “Adafruit 4-Channel ADC Breakouts,” *Adafruit Learning System*, Nov. 29, 2012. <https://learn.adafruit.com/adafruit-4-channel-adc-breakouts/overview>
- [103] “Level Shifter Circuits: Theory, Design & Working principle,” *Analog Circuit Design*, Apr. 02, 2022. <https://analogcircuitdesign.com/level-shifter-circuit/> (accessed Aug. 29, 2025).
- [104] Texas Instruments, “4-Bit Bidirectional Voltage-Level Translator With Automatic Direction Sensing and ± 15 kV ESD Protection,” TXB0104 datasheet, 2025.
- [105] “Logic level converter generic TXB0104 breakout,” *Soldered Electronics*. <https://soldered.com/product/logic-level-converter-generic-txb0104-breakout/> (accessed Aug. 28, 2025).
- [106] “Logic level converter board ,” *Soldered Electronics*. <https://soldered.com/product/logic-level-converter-board/> (accessed Aug. 28, 2025).
- [107] S. Santos, “ESP32 with LoRa using Arduino IDE,” *Random Nerd Tutorials*, Jun. 23, 2018. <https://randomnerdtutorials.com/esp32-lora-rfm95-transceiver-arduino-ide/> (accessed Aug. 29, 2025).
- [108] The Things Network, “What are LoRa and LoRaWAN?,” *The Things Network*, 2020. <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/what-is-lorawan/>
- [109] Semtech, “SX1278 Datasheet,” *Alldatasheet.com*, 2016. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/501039/SEMTECH/SX1278.html> (accessed Aug. 29, 2025).
- [110] “Introduction to I2C and SMBus,” *The Linux Kernel Documentation*, 2024. <https://docs.kernel.org/i2c/summary.html> (accessed Aug. 29, 2025).
- [111] mixos, “Introduction to I²C and SPI protocols - Electronics-Lab,” *Electronics-Lab*, Sep. 16, 2016. <https://www.electronics-lab.com/introduction-i%C2%B2c-spi-protocols/> (accessed Aug. 29, 2025).
- [112] Σ. Κυρτόπουλος, *Τεχνολογία Ηλεκτρονικών Εξαρτημάτων & Σχεδίαση Τυπωμένων Κυκλωμάτων*, Βελτιωμένη Έκδοση. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2018.
- [113] *Common Gerber Layers Explained*. Accessed: Mar. 11, 2026. [Online]. Available: <https://www.wonderfulpcb.com/blog/common-gerber-layers-explained/>
- [114] Emily Carter, “Βασικά στοιχεία για τα PCB | Γνώσεις PCB για αρχάριους,” *Pcbasic.com*, 2025. https://www.pcbasic.com/el/blog/about_pcb_basics.html (accessed Mar. 11, 2026).
- [115] “Conversion Calculator PCB Trace Width,” *DigiKey*, 2026. <https://www.digkey.gr/en/resources/conversion-calculators/conversion-calculator-pcb-trace-width> (accessed Mar. 13, 2026).

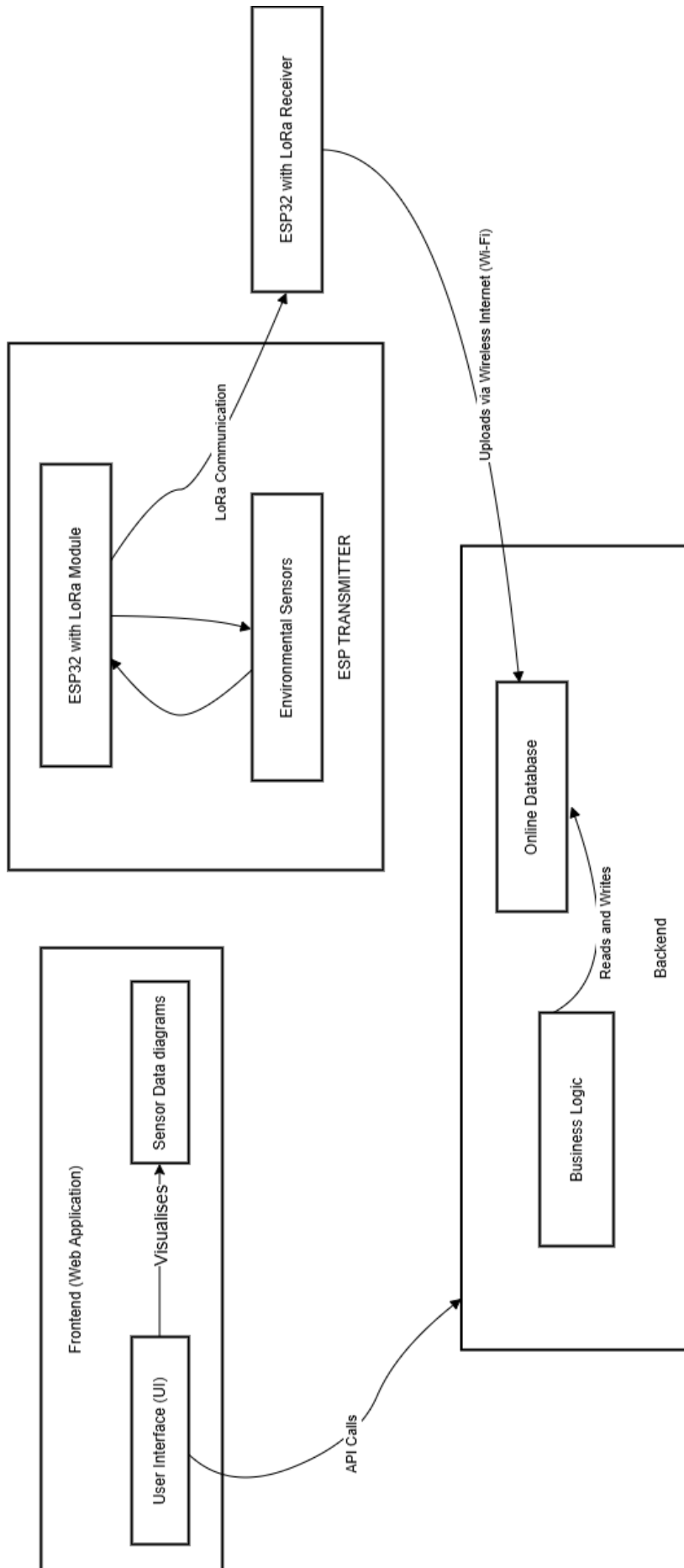
- [116] V. Gupta, “Wireless Sensor Networks vs. Ad Hoc Networks,” *PsiBorg Technologies Pvt. Ltd.*, Sep. 06, 2023. <https://psiborg.in/wireless-sensor-networks-vs-ad-hoc-networks/> (accessed May 02, 2026).
- [117] Ankah Amengu, Angelina & Abdulai, Jamal-Deen & Katsriku, Ferdinand & Adu-Manu, Kofi. (2022). SMAC-Based WSN Protocol-Current State of the Art, Challenges, and Future Directions. *Journal of Computer Networks and Communications*. 2022. 1-29. 10.1155/2022/6707413.
- [118] GeeksforGeeks, “Types of Network Topology,” *GeeksforGeeks*, Mar. 07, 2017. <https://www.geeksforgeeks.org/computer-networks/types-of-network-topology/> (accessed May 02, 2026).
- [119] Choovio, *What is the Difference Between LoRa and LoRaWAN?* 2021. Accessed: May 02, 2026. [Online]. Available: <https://www.choovio.com/difference-between-lora-and-lorawan/?srsltid=AfmBOoobJCjur1tp5rrEA0ugtSloB63VsekO5pvZ-F6jL1B57rHvEyTv>
- [120] “System Reference document (SRdoc); Technical characteristics for Low Power Wide Area Networks Chirp Spread Spectrum (LPWAN-CSS) operating in the UHF spectrum below 1 GHz,” ETSI, France, Apr. 2018. Accessed: May 02, 2026. [Online]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103500_103599/103526/01.01.01_60/tr_103526v010101p.pdf
- [121] GIM Agency, “Τι είναι το User Interface (UI) και πώς επηρεάζει το website σου”;, *GIM Agency*, May 08, 2025. <https://www.gimagency.gr/blog/proothisi-istoselidon/%CF%84%CE%B9-%CE%B5%CE%AF%CE%BD%CE%B1%CE%B9-%CF%84%CE%BF-user-interface-ui-%CE%BA%CE%B1%CE%B9-%CF%80%CF%8E%CF%82-%CE%B5%CF%80%CE%B7%CF%81%CE%B5%CE%AC%CE%B6%CE%B5%CE%B9-to-website-%CF%83%CE%BF%CF%85/> (accessed May 12, 2026).
- [122] IBM, “User experience (UX),” *Ibm.com*, Jan. 10, 2025. <https://www.ibm.com/think/topics/user-experience> (accessed May 12, 2026).
- [123] H. Jaye, “How HTML, CSS, and JavaScript work,” *The Scrimba Blog*, Oct. 26, 2022. <https://scrimba.com/articles/html-css-javascript/> (accessed May 12, 2026).
- [124] S. Kumari, *Features of php*. 2024. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.naukri.com/code360/library/what-is-php>
- [125] A. Yang, “ASA vs ABS vs PETG vs PLA [+ Property Comparison],” *Unionfab.com*, 2025. <https://www.unionfab.com/blog/2025/05/asa-vs-abs-vs-petg-vs-pla>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Σχηματικά Κυκλωμάτων

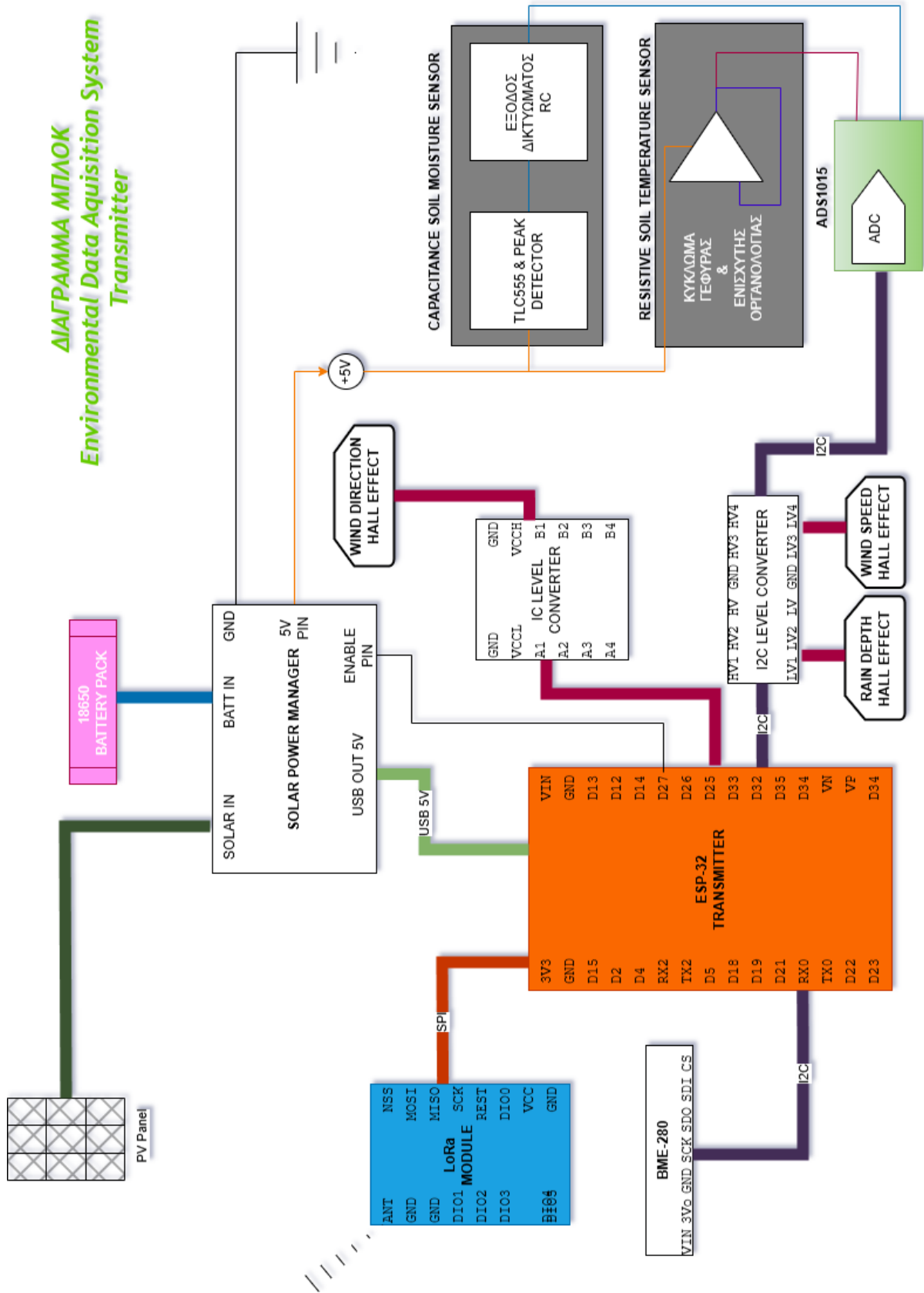
Στο παράρτημα παρατίθενται τα σχηματικά των κυκλωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του PCB για το transmitter του συστήματος μέτρησης, το σχηματικό του receiver που υλοποιήθηκε σε διάτρητη πλακέτα, αλλά και το πλήρες block διάγραμμα των components της εργασίας.

Συγκεκριμένα στις επόμενες σελίδες παρατίθενται:

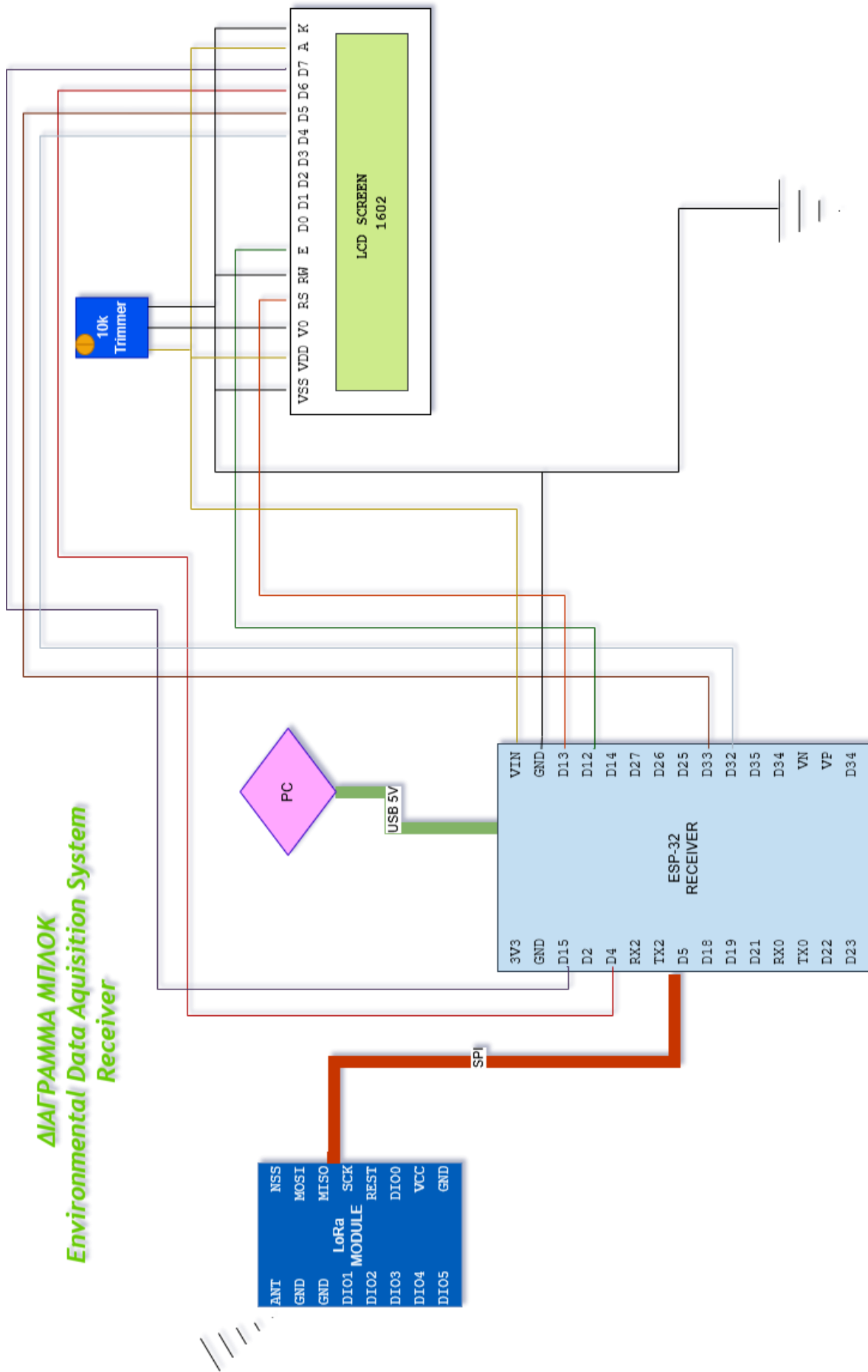
- Το συστατικό διάγραμμα του συστήματος, με τις συσχετίσεις των τμημάτων μεταξύ τους
- Το μπλοκ διάγραμμα για το τμήμα Transmitter και Receiver του Συστήματος Μέτρησης της εργασίας
- Το σχηματικό του κυκλώματος του Transmitter που χρησιμοποιήθηκε για την σχεδίαση του PCB στο πρόγραμμα Altium Designer
- Το σχηματικό του κυκλώματος του Receiver το οποίο εν τέλει δεν υλοποιήθηκε ως PCB, ωστόσο σχεδιάστηκε με τη χρήση του Altium Designer



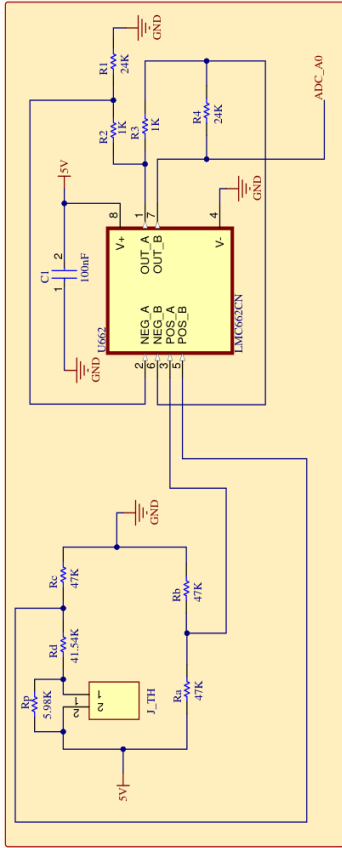
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΠΛΟΚ
Environmental Data Acquisition System
Transmitter



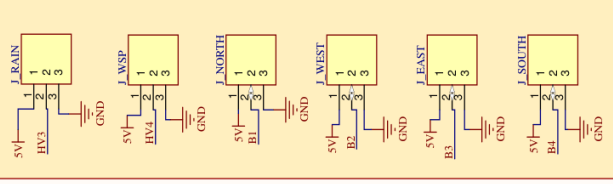
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΠΛΟΚ
Environmental Data Acquisition System
Receiver



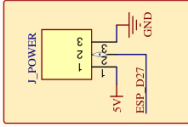
Ωμικός Αισθητήρας Θερμοκρασίας με NTC Thermistor



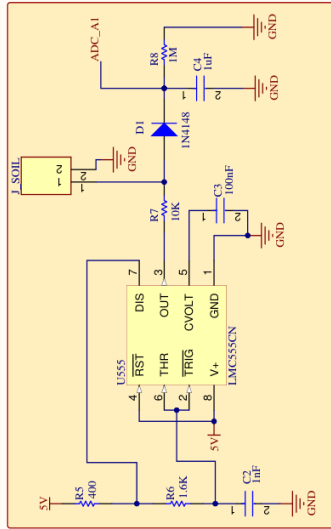
Ψηφιακά Αισθητήρες Hall



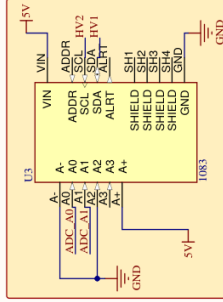
Μονοπολική Τροφοδοσία 5V



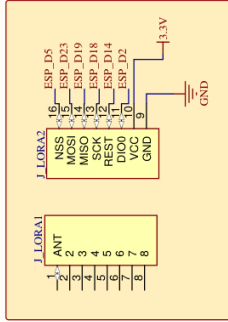
Χωρητικός Αισθητήρας Υγρασίας Εδάφους



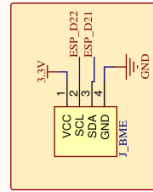
Analog-to-Digital Converter



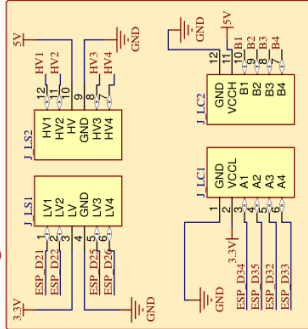
LoRa Module



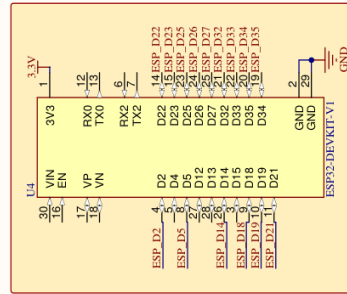
Ψηφιακός Αισθητήρας Περιβάλλοντος



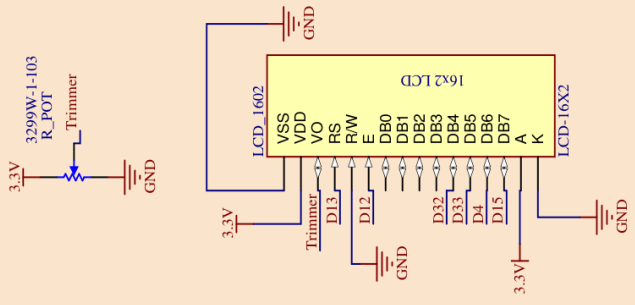
Logic Level Shifters



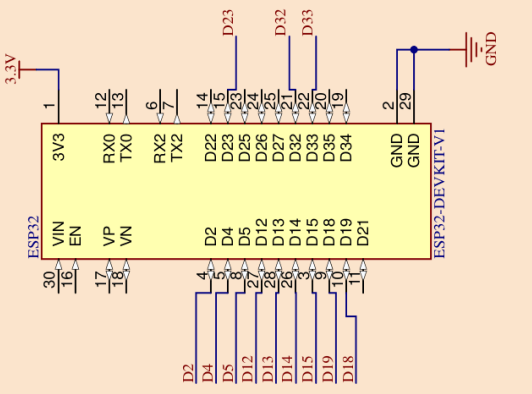
ESP32 Transmitter



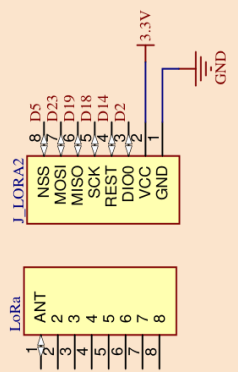
LCD Screen 1602



ESP32 Receiver



LoRa Receiver module



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Παράθεση Υλοποιημένου Κώδικα

Σε αυτό το παράρτημα, παρατίθενται οι λίστες κώδικα που συγγράφηκε για τους μικροελεγκτές του συστήματος της εργασίας. Η παράθεση των λιστών για την βάση δεδομένων και την ιστοσελίδα θα ήταν ασύμφορη, επομένως δεν παρατίθενται.

- Ο κώδικας του μικροελεγκτή ESP32 που αφορά στο υποσύστημα Transmitter της εργασίας (υλοποιημένος σε Arduino IDE)
- Ο κώδικας του μικροελεγκτή ESP32 που αφορά στο υποσύστημα Receiver της εργασίας (υλοποιημένος σε Arduino IDE)

ΚΩΔΙΚΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ESP32 ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ TRANSMITTER

```
#include <Adafruit_ADS1X15.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_BME280.h>
#include <Wire.h>
#include <LoRa.h>
#include <SPI.h>
#include <esp_sleep.h>

#define ENABLE 27 // D27 PIN AS ENABLE
#define NORTH 34 // D34 PIN AS NORTH WIND SENSOR
#define EAST 35 // D35 PIN AS EAST WIND SENSOR
#define WEST 32 // D32 PIN AS WEST WIND SENSOR
#define SOUTH 33 // D33 PIN AS SOUTH WIND SENSOR
#define RAIN 25 // D25 PIN AS RAIN SENSOR
#define WIND_SP 26 // D26 PIN AS WIND SPEED SENSOR
#define ss 5 // D5 PIN AS LORA SS PIN
#define rst 14 // D14 PIN AS LORA RST PIN
#define dio0 2 // D2 PIN AS LORA DI0 PIN

#define uS_TO_S_FACTOR 1000000 // Conversion factor for ms to seconds
#define TIME_TO_SLEEP 7200 // Time for ESP to go to sleep (in seconds)

Adafruit_ADS1015 ads; // I2C for ADC (0x48)
Adafruit_BME280 bme; // I2C for BME280 (0x77)

float soil_temp_volts, soil_moist_volts; // Volts counted on ADC pins
float soil_temp = 0; // Final Soil Temp variable
float soil_moist = 0; // Final Soil Moisture variable
float air_temp = 0; // Air Temperature Reading variable
float air_humid = 0; // Air Humidity Reading variable
float air_press = 0; // Air Pressure Reading variable
float revolutions = 0; // Wind Speed revolutions variable
float windSpeed = 0; // Wind Speed Reading variable
const float mmPerPulse = 0.173; // Value of rain in mm per bucket
float mmTotal = 0; // Rain Depth Reading variable
```

```

float pulses = 0; // Number of rain sensor movement variable

int packet_num = 0; // Packet counter for LoRa transmission

char soilTempString[10]; // Soil Temperature float to String variable
char soilMoistString[10]; // Soil Moisture float to String variable
char airTempString[10]; // Air Temperature float to String variable
char airHumidString[10]; // Air Humidity float to String variable
char airPressString[10]; // Air Pressure float to String variable
char rainDepthString[10]; // Rain Depth float to String variable
char windSpeedString[10]; // Wind speed float to String variable
char windDirection[10]; // Wind direction String variable
char n_name[10] = "node_test"; // Node name String variable
char s_id[10] = "007"; // Station id String variable
char s_name[10] = "stat1";
char loraMegaString[130]; // The combined string sent via LoRa

void setup() {
  pinMode(ENABLE, OUTPUT); // 5V Enable Pin
  pinMode(NORTH, INPUT); // North Wind Sensor Input
  pinMode(EAST, INPUT); // East Wind Sensor Input
  pinMode(WEST, INPUT); // West Wind Sensor Input
  pinMode(SOUTH, INPUT); // South Wind Sensor Input
  pinMode(RAIN, INPUT); // Rain Sensor Input
  pinMode(WIND_SP, INPUT); // Wind Speed Sensor Input
  Serial.begin(115200);

  /*If BME280 fails to initialize*/
  if (!bme.begin()) {
    Serial.println("Could not find a valid BME280 sensor, check wiring!");
    while (1);
  }
  else Serial.println("BME280 connected succesfully!");

  /*If ADS1015 fails to initialize */
  if (!ads.begin()) {
    Serial.println("Failed to initialize ADS.");
    while (1);
  }
  else Serial.println("ADS connected succesfully!");

  /* LoRa Settings */
  LoRa.setPins(ss, rst, dio0); //setup LoRa transceiver module

  while (!LoRa.begin(433E6)) // 433 MHz
  {
    Serial.println("LoRa not initialized!");
    delay(500);
  }
}

```

```

LoRa.setSyncWord(0xA5); // To synchronize transmitter and receiver modules
Serial.println("LoRa Initializing OK!");

/* MAIN ROUTINE */
digitalWrite(ENABLE, HIGH); // 5V Enable
ads_readings(); // calls the ads_readings function
delay(1000);
bme_readings(); // calls the bme_readings function
delay(1000);

//RAIN DEPTH CALCULATION
Serial.println("Calculating Rain Depth...");
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(RAIN), rain_depth, CHANGE); // Begin
Interrupt to find rain mm per minute
delay(60000);
detachInterrupt(RAIN); // End Interrupt
mmTotal = (pulses * mmPerPulse) * 60;
dtostrf(mmTotal, 4, 2, rainDepthString); // Float to String conversion

Serial.print("Estimated Rain Depth: "); Serial.print(mmTotal);
Serial.println("mm/hr"); // Return estimated rain depth for next hour
pulses = 0;

wind_direction(); // calls the windDirection function
delay(1000);

// WIND SPEED CALCULATION
Serial.println("Calculating Wind Speed...");
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(WIND_SP), wind_speed_function,
RISING); // Begin Interrupt to find RPM of wind
delay(60000); // Stop everything for 60s
detachInterrupt(WIND_SP); // End Interrupt

windSpeed = revolutions * 0.18; // calculate RPM
dtostrf(windSpeed, 4, 2, windSpeedString); // Float to String conversion

Serial.print("Wind Speed: "); Serial.print(windSpeed);
Serial.println(" km/h"); // Return windspeed
revolutions = 0;

//LORA PACKET
loraMegaString_create(); // calls the loraMegaString_create function
lora_packet_send(); // calls the lora_packet_send function
Serial.println("LoRa packet sent!");
empty_strings(); // calls the empty_strings function
Serial.println("Strings are now empty.");
digitalWrite(ENABLE, LOW); // 5V Disable

```

```

// DEEP SLEEP
Serial.println("Going to deep sleep...");
esp_sleep_enable_timer_wakeup(TIME_TO_SLEEP * uS_TO_S_FACTOR);
Serial.flush();
esp_deep_sleep_start();
}

void loop() {}

void wind_speed_function() {
    revolutions++;
    Serial.print(".");
}

void wind_direction() {
    // WIND DIRECTION SENSOR

    if (digitalRead(NORTH) == LOW && digitalRead(EAST) == HIGH &&
digitalRead(WEST)== HIGH && digitalRead(SOUTH) == HIGH) {
        strcpy(windDirection,"NORTH");
    }

    else if (digitalRead(NORTH) == LOW && digitalRead(EAST) == LOW &&
digitalRead(WEST) == HIGH && digitalRead(SOUTH) == HIGH) {
        strcpy(windDirection,"NORTHEAST");
    }

    else if (digitalRead(NORTH) == LOW && digitalRead(EAST) == HIGH &&
digitalRead(WEST) == LOW && digitalRead(SOUTH) == HIGH) {
        strcpy(windDirection,"NORTHWEST");
    }

    else if (digitalRead(EAST) == LOW && digitalRead(NORTH) == HIGH &&
digitalRead(WEST) == HIGH && digitalRead(SOUTH) == HIGH) {
        strcpy(windDirection,"EAST");
    }

    else if (digitalRead(SOUTH) == LOW && digitalRead(EAST) == LOW &&
digitalRead(WEST) == HIGH && digitalRead(SOUTH) == HIGH) {
        strcpy(windDirection,"SOUTHEAST");
    }

    else if (digitalRead(SOUTH) == LOW && digitalRead(EAST) == HIGH &&
digitalRead(WEST) == HIGH && digitalRead(NORTH) == HIGH) {
        strcpy(windDirection,"SOUTH");
    }

    else if (digitalRead(SOUTH) == LOW && digitalRead(EAST) == HIGH &&
digitalRead(WEST) == LOW && digitalRead(NORTH) == HIGH) {

```

```

    strcpy(windDirection,"SOUTHWEST");
}

else if (digitalRead(WEST) == LOW && digitalRead(NORTH) == HIGH &&
digitalRead(SOUTH) == HIGH && digitalRead(NORTH) == HIGH) {
    strcpy(windDirection,"WEST");
}
else {strcpy(windDirection,"UNKNOWN");} // Failsafe
Serial.print("Wind Direction: "); Serial.println(windDirection);
}

void rain_depth() {
    // RAIN DEPTH SENSOR
    pulses++;
    Serial.print(".");
}

void bme_readings() {
    air_temp = bme.readTemperature(); // reads temperature in Celsius;
    air_humid = bme.readHumidity(); // reads absolute humidity;
    air_press = (bme.readPressure() / 100.0F); // reads pressure in hPa
    (hectoPascal = millibar);

    dtostrf(air_temp, 4, 2, airTempString); // float to String conversion
    dtostrf(air_humid, 4, 2, airHumidString); float to String conversion
    dtostrf(air_press, 4, 2, airPressString); // float to String conversion

    Serial.print("Air Temp: "); Serial.print(air_temp); Serial.println(" *C");
    Serial.print("Humidity: "); Serial.print(air_humid); Serial.println(" %");
    Serial.print("Pressure: "); Serial.print(air_press); Serial.println(" hPa");
    Serial.println();
}

void ads_readings() {
    soil_temp_volts = ads.computeVolts(ads.readADC_SingleEnded(0)); // Read
volts of ADC channel 0
    soil_moist_volts = ads.computeVolts(ads.readADC_SingleEnded(1)); // Read
volts of ADC channel 1

    Serial.print("Soil Temperature Voltage: "); Serial.print(soil_temp_volts,4);
Serial.println(" V");
    Serial.print("Soil Moisture Voltage: "); Serial.print(soil_moist_volts,4);
Serial.println(" V");

    soil_temp = -16.83369
                + (40.60419 * soil_temp_volts)
                + (13.4579 * pow(soil_temp_volts, 2))
                - (24.47073 * pow(soil_temp_volts, 3))
                + (7.944197 * pow(soil_temp_volts, 4));
}

```

```

if (soil_moist_volts > 4.0) {
    Serial.println("Soil Moisture Sensor not properly placed!");
    soil_moist = -10.0; // -10%, not properly placed soil_moist sensor sign.
}
else if (soil_moist_volts < 3.0) {
    Serial.println("The soil is too wet to calculate!");
    soil_moist = 100.0; // 100%, used as a sign for too wet soil to calculate
}
else {
    soil_moist = + 10372.697
        - (8521.883 * pow(soil_moist_volts, 1))
        + (82335.220 * pow(soil_moist_volts, 2))
        - (213.286 * pow(soil_moist_volts, 3));
}

Serial.print("Soil Temperature: "); Serial.print(soil_temp);
Serial.println(" *C");
Serial.print("Soil Moisture: "); Serial.print(soil_moist); Serial.println("%");
dtostrf(soil_temp, 4, 2, soilTempString); // float to String conversion
dtostrf(soil_moist, 4, 2, soilMoistString); // float to String conversion
}

void loraMegaString_create() {
    strcpy(loraMegaString, soilTempString); strcat(loraMegaString, ";");
    strcat(loraMegaString, soilMoistString); strcat(loraMegaString, ";");
    strcat(loraMegaString, airTempString); strcat(loraMegaString, ";");
    strcat(loraMegaString, airHumidString); strcat(loraMegaString,
    strcat(loraMegaString, airPressString); strcat(loraMegaString, ";");
    strcat(loraMegaString, rainDepthString); strcat(loraMegaString, ";");
    strcat(loraMegaString, windSpeedString); strcat(loraMegaString, ";");
    strcat(loraMegaString, windDirection); strcat(loraMegaString, ";");
    strcat(loraMegaString, n_name); strcat(loraMegaString, ";");
    strcat(loraMegaString, s_id); strcat(loraMegaString, ";");
    strcat(loraMegaString, s_name);
}

void lora_packet_send() {
    Serial.print("Sending packet: ");
    Serial.println(packet_num);

    LoRa.beginPacket(); //Send LoRa packet to receiver
    LoRa.print(loraMegaString);
    LoRa.print(packet_num);
    LoRa.endPacket();
    memset(loraMegaString, 0, sizeof loraMegaString); // Empty the array

    packet_num++;
}

```

```
    delay(10000);
}
void empty_strings() {
    memset(soilTempString, 0, sizeof soilTempString); // Resets the String
    memset(soilMoistString, 0, sizeof soilMoistString);
    memset(airTempString, 0, sizeof airTempString);
    memset(airHumidString, 0, sizeof airHumidString);
    memset(airPressString, 0, sizeof airPressString);
    memset(rainDepthString, 0, sizeof rainDepthString);
    memset(windSpeedString, 0, sizeof windSpeedString);
    memset(windDirection, 0, sizeof windDirection);
}
```

ΚΩΔΙΚΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ESP32 ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ RECEIVER

```
#include <LoRa.h>
#include <SPI.h>
#include <WiFi.h>
#include <HTTPClient.h>
#include <WiFiClientSecure.h>
#include <WiFiManager.h>
#include <LiquidCrystal.h>

//lora pins
#define ss 5
#define rst 14
#define dio0 2

//lcd pins
LiquidCrystal lcd(13, 12, 32, 33, 4, 15);

//wifi define
WiFiManager wm;

//sendind data to the backend
const char* URL = "https://users.iee.ihu.gr/~iee2019074/php/post_data.php";

void setup(){
  wm.resetSettings();
  Serial.begin(115200);

  //lcd starting
  lcd.begin(16, 2);
  lcd.clear();
  lcd.print("Starting..");

  //wifi start
  WiFi.mode(WIFI_STA);

  Serial.println("Starting WiFiManager...");
  showMessageTwoRows("Connect to WiFi", "ESP32_Config");

  bool connected = wm.autoConnect("ESP32_Config");

  // Restart in case WiFi initialization fails
  if (!connected) {
    Serial.println("WiFi connection failed");
    showMessageTwoRows("WiFi failed", "Restarting...");
    delay(2000);
    ESP.restart();
  }
}
```

```

Serial.println("WiFi connected");
Serial.println(WiFi.localIP());

showMessageTwoRows("WiFi Connected", WiFi.localIP().toString());
delay(2000);

Serial.println();
Serial.println("WiFi connected");
Serial.println(WiFi.localIP());

lcd.clear();
lcd.print("WiFi Connected");
delay(1500);

//LoRa start
Serial.println("LoRa Receiver");

lcd.clear();
lcd.print("Starting LoRa");

LoRa.setPins(ss, rst, dio0);

while (!LoRa.begin(433E6)){
  Serial.println(".");
  delay(500);
}

LoRa.setSyncWord(0xA5);

Serial.println("LoRa Initializing OK!");

lcd.clear();
lcd.print("LoRa Ready");
delay(1500);

lcd.clear();
lcd.print("Waiting packet");
}

void loop() {
  int packetSize = LoRa.parsePacket();

  if (packetSize) {
    String LoRaData = "";

    Serial.print("Received packet ");

    while (LoRa.available()) {
      LoRaData += (char)LoRa.read();
    }
  }
}

```

```

}

Serial.print(LoRaData);
Serial.print(" with RSSI");
Serial.println(LoRa.packetRssi());

//LCD verification message
lcd.clear();
showMessageTwoRows("Packet received", "from station");
delay(2000);
lcd.clear();
//lcd.setCursor(0 ,1);
showMessageTwoRows("Sending data", "to site");
delay(2000);

//sending data to backend via wifi
if (WiFi.status() == WL_CONNECTED){
  WiFiClientSecure client;
  client.setInsecure();

  HTTPClient https;
  https.begin(client, URL);
  https.addHeader("Content-Type", "text/plain");

  int httpCode = https.POST(LoRaData);

  Serial.print("HTTP Code: ");
  Serial.println(httpCode);

  String response = https.getString();
  Serial.println(response);

  lcd.clear();

  if(httpCode >= 200 && httpCode < 300) {
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Upload OK");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Data sent");
  }else {
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Upload failed");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Code: ");
    lcd.print(httpCode);
  }
}

https.end();
} else {

```

```

    Serial.println("WiFi disconnected");

    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("WiFi error");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Not sent");
}

delay(2500);

lcd.clear();
lcd.print("Waiting packet");
}
}

// showMessageTwoRows sub-routine
void showMessageTwoRows(String line1, String line2) {
    lcd.clear();

    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print(line1.substring(0, 16));

    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(line2.substring(0, 16));
}

```