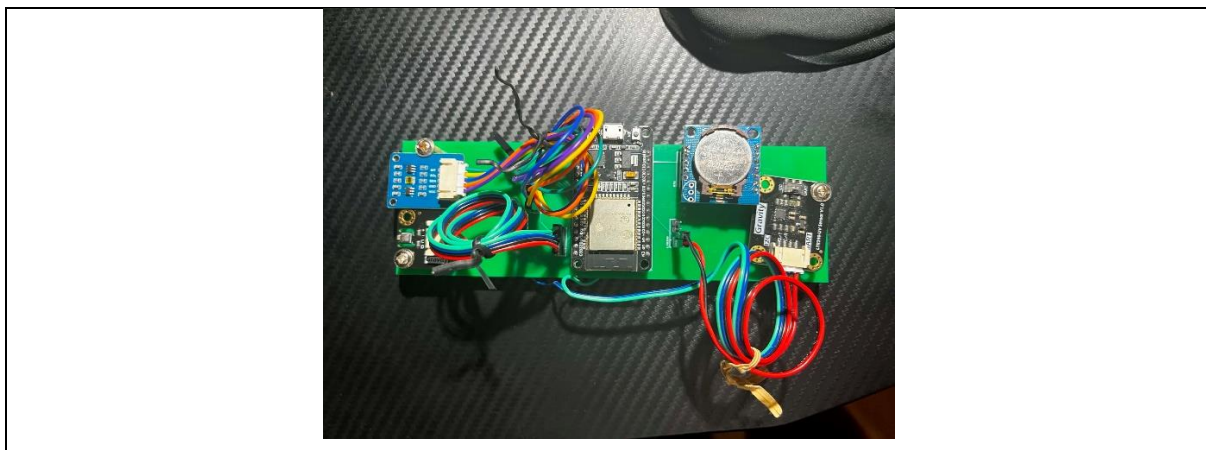


ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΧΡΗΣ ΑΛΥΣΙΔΑΣ
ΓΙΑ ΣΥΣΚΕΥΑΣΜΕΝΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ»



Του φοιτητή
Μουσίδη Κωνσταντίνου
Αρ. Μητρώου: 2021107

Επιβλέπων
Ονοματεπώνυμο: Δρ. Τσιακμάκης
Κυριάκος
Βαθμίδα: Επίκουρος Καθηγητής

Ημερομηνία 5/9/2026

Τίτλος Δ.Ε. Ανάπτυξη συστήματος ψυχρής αλυσίδας για συσκευασμένα προϊόντα

Κωδικός Δ.Ε. 30839

Ονοματεπώνυμο φοιτητή: Μωυσίδης Κωνσταντίνος

Ονοματεπώνυμο εισηγητή: Τσιακμάκης Κυριάκος

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 26-3-2026

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 5-9-2026

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

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

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

«Η εργασία είναι αφιερωμένη στην οικογένειά μου»

Πρόλογος

Η επιλογή της παρούσας διπλωματικής εργασίας προέκυψε από το ενδιαφέρον μου για τις εφαρμογές του Internet of Things. Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων αποτελεί συνδυασμό πολλών μαθημάτων του προγράμματος σπουδών του Πολυτεχνικού Τμήματος ΜΠΗΣ και αυτή η εργασία αποτέλεσε αφορμή για πιο ουσιαστική εκπαίδευση και εξειδίκευση. Μετά από συζήτηση με τον διδάσκοντα, καταλήξαμε σε ένα σύστημα που απαιτεί γνώσεις σχεδίασης κυκλωμάτων, προγραμματισμού μικροελεγκτών, πρωτοκόλλων ασυρμάτων επικοινωνιών, ανάπτυξης εφαρμογής σε κινητή συσκευή και τεχνολογιών απεικόνισης σε διαδικτυακές ιστοσελίδες.

Κατά την διάρκεια υλοποίησης της εργασίας, αποκόμισα πολλές γνώσεις, αλλά και εμπειρία. Πραγματοποιήθηκε εφαρμογή γνώσεων από μαθήματα σχετικά με Ηλεκτρονικά Κυκλώματα, Ενσωματωμένα Συστήματα, Ανάπτυξη Λογισμικού για Κινητά και Ανάπτυξη Ιστοσελίδας. Ωστόσο, στη πράξη αντιμετωπίστηκαν πολλές προκλήσεις, κυρίως στην ανάπτυξη της εφαρμογής Android και στην απεικόνιση των δεδομένων. Το αποτέλεσμα είναι η αποκόμιση δεξιοτήτων στον τομέα, ολοκληρωμένη σκέψη και επιχειρηματολογία για τις επιλογές τεχνολογιών που αξιοποιήθηκαν και ένα πλήρες σύστημα παρακολούθησης περιβαλλοντικών παραγόντων με σκοπό την βέλτιστη μεταφορά και αποθήκευση συσκευασμένων προϊόντων.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη, σχεδίαση και κατασκευή ενός ολοκληρωμένου συστήματος χαμηλού κόστους με στόχο την επιτυχή παρακολούθηση περιβαλλοντικών συνθηκών κατά τη μεταφορά και αποθήκευση εμφιαλωμένου νερού. Μετά από μελέτη παρόμοιων συστημάτων και των παραγόντων που επηρεάζουν την ακεραιότητα των φιαλών PET, επιλέχθηκαν η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, η υπεριώδης ακτινοβολία και η ένταση του φωτός ως παράμετροι μέτρησης. Αυτοί οι παράγοντες καταγράφονται από τρεις ψηφιακούς αισθητήρες συνδεδεμένους στον μικροελεγκτή ESP32, σχηματίζοντας τον πυρήνα του σταθμού μέτρησης.

Στο φυσικό επίπεδο, ο σταθμός λαμβάνει τις μετρήσεις, τις εξομαλύνει με τον αλγόριθμο μέσης τιμής, τις συνοδεύει με τη χρονική σήμανση του ρολογιού πραγματικού χρόνου και τις αποθηκεύει τοπικά. Στο ενδιάμεσο επίπεδο, η εφαρμογή Android επιτρέπει τη σάρωση κωδικού QR, την ασύρματη σύνδεση μέσω Bluetooth Low Energy, την προβολή μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο και την προώθησή τους στη πλατφόρμα Firebase. Τέλος, η απεικόνιση δεδομένων πραγματοποιείται σε μια στατικά φιλοξενούμενη ιστοσελίδα με δυναμική ενημέρωση περιεχομένου, όπου ο χρήστης μπορεί να προβάλει τις μετρήσεις σε διαφορετικές επιλογές χρονικού διαστήματος και να τις εξάγει σε μορφή CSV για περαιτέρω ανάλυση. Ως αποτέλεσμα, πραγματοποιήθηκε αξιόπιστη, πολυπαραμετρική παρακολούθηση της ψυχρής αλυσίδας χωρίς εξάρτηση από σύνδεση δικτύου.

«Development of a Cold Chain system for packaged products»

«Konstantinos Moysidis»

Abstract

The subject of the current thesis is the study, design and construction of an integrated, low-cost system for the successful monitoring of environmental conditions during the transport and storage of PET water bottles. Following a study of similar systems and the factors that affect the integrity of such bottles, temperature, relative humidity, ultraviolet radiation and light intensity were selected as the measured parameters. They were recorded by three digital sensors connected to the ESP32 microcontroller, which forms the core of the measurement station.

At the physical layer, the station acquires the measurements, smooths them with an averaging algorithm, tags them with a timestamp from a real-time clock and stores them locally. At the intermediate layer, an Android application enables QR code scanning, wireless connection via Bluetooth Low Energy, real-time display of the measurements and their publication to the Firebase platform. Finally, data visualization is carried out on a dynamic web page, where the user can view the measurements over different time-range options and export them in CSV format for further analysis. As a result, a reliable, multi-parameter cold-chain monitoring system was achieved, without dependence on a network connection.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	v
Περίληψη.....	vi
Abstract	vii
Ευχαριστίες	viii
Περιεχόμενα	ix
Κατάλογος Εικόνων	xii
Κατάλογος Πινάκων.....	xii
Συντομογραφίες.....	xiii
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή – Προβλήματα στη Ψυχρή Αλυσίδα	1
1.1 Τι είναι η ψυχρή αλυσίδα	1
1.2 Ορισμός προβλήματος.....	1
1.2.1 Δημόσια Υγεία και Ποιότητα Προϊόντων	2
1.2.2 Οικονομικές Απώλειες	2
1.2.3 Περιορισμοί Υφιστάμενων Λύσεων.....	2
1.2.4 Η Περίπτωση των Φιαλών Νερού	3
1.3 Κίνητρο και στόχοι.....	3
1.4 Οργάνωση Εργασίας	4
Κεφάλαιο 2ο: Παρόμοιες Εφαρμογές και Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	6
2.1 Εισαγωγή.....	6
2.2 Η Σημασία της Ψυχρής Αλυσίδας.....	6
2.3 Περιβαλλοντικές Παράμετροι για την Ακεραιότητα των Φιαλών	7
2.3.1 Θερμοκρασία και Υγρασία.....	7
2.3.2 Υπεριώδης Ακτινοβολία.....	8
2.3.3 Ένταση Φωτός.....	8
2.4 Υφιστάμενες Λύσεις Παρακολούθησης Ψυχρής Αλυσίδας.....	9
2.4.1 Testo	9
2.4.2 Sensitech.....	10
2.4.3 Ακαδημαϊκές Λύσεις	10
2.5 Συμπεράσματα και Ερευνητική Κατεύθυνση.....	12
Κεφάλαιο 3ο: Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	13
3.1 Εισαγωγή.....	13
3.2 Ο Μικροελεγκτής ESP32 στο Ενσωματωμένο Σύστημα	13

3.2.1	Αρχιτεκτονική και Επεξεργαστική Ισχύς	14
3.2.2	Ενσωματωμένη Ασύρματη Επικοινωνία	14
3.2.3	Ακροδέκτες και Περιφερειακά	14
3.2.4	Ενεργειακή Διαχείριση	14
3.2.5	Σύγκριση.....	15
3.3	Αισθητήρες Μέτρησης Περιβαλλοντικών Παραμέτρων	15
3.3.1	ΑΗΤ20: Αισθητήρας Θερμοκρασίας και Υγρασίας	15
3.3.2	TSL25911: Αισθητήρας Φωτεινότητας.....	16
3.3.3	LTR390: Αισθητήρας Υπεριώδους Ακτινοβολίας	18
3.4	Πρωτόκολλο Επικοινωνίας και RTC	19
3.4.1	Πρωτόκολλο Σειριακής Επικοινωνίας I ² C.....	19
3.4.2	DS1307: Ρολόι Πραγματικού Χρόνου	20
3.5	Ασύρματη Επικοινωνία	23
3.6	Πλατφόρμα Ανάπτυξης Εφαρμογών: React Native/Expo.....	25
3.7	Υπολογιστικό Νέφος και η Πλατφόρμα Firebase	26
3.7.1	Υπολογιστικό Νέφος	27
3.7.2	Πλατφόρμα Firebase.....	27
Κεφάλαιο 4ο:	Σχεδίαση και Αρχιτεκτονική του Συστήματος.....	29
4.1	Εισαγωγή.....	29
4.2	Τα Τρία Επίπεδα.....	29
4.3	Αρχιτεκτονική Υλικού	30
4.4	Ροή Δεδομένων	31
4.5	Μεθοδολογία Μέτρησης και Αλγόριθμος Μέσης Τιμής.....	32
4.6	Σχεδίαση Αποθήκευσης Δεδομένων	33
4.6.1	Τοπική Αποθήκευση.....	33
4.6.2	Αποθήκευση στο Νέφος	34
Κεφάλαιο 5ο:	Υλοποίηση Κυκλώματος και Λογισμικού	35
5.1	Εισαγωγή.....	35
5.2	Συνδεσμολογία Εξαρτημάτων.....	35
5.3	Σχεδίαση PCB	36
5.4	Αρχειοποίηση και Ανάγνωση Αισθητήρων	37
5.5	Αλγόριθμος Εξομάλυνσης.....	39
5.6	Αποθήκευση στη μνήμη Flash (LittleFS).....	39
5.7	BLE Server και Αυθεντικοποίηση	40
5.8	Λειτουργία Reset.....	42

5.9	Επίλογος.....	44
Κεφάλαιο 6ο:	Υλοποίηση Εφαρμογής Android.....	45
6.1	Εισαγωγή.....	45
6.2	Δομή και Περιβάλλον Ανάπτυξης.....	46
6.3	Κωδικός QR και Σύνδεση BLE.....	47
6.4	Προβολή Δεδομένων.....	49
6.5	Τοπική Αποθήκευση με SQLite	51
6.6	Firebase, Ιστοσελίδα Απεικόνισης και Εξαγωγή CSV.....	52
6.7	Επίλογος.....	56
Κεφάλαιο 7ο:	Πειραματική Διαδικασία.....	57
7.1	Πορεία Υλοποίησης	57
7.2	Πειραματική εφαρμογή	59
Κεφάλαιο 8ο:	Συμπεράσματα και Μελλοντικές Κατευθύνσεις.....	62
8.1	Συμπεράσματα από τη δοκιμή λειτουργίας.....	62
8.2	Περιορισμοί.....	62
8.3	Μελλοντικές Επεκτάσεις.....	63
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		64
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α :	ΚΩΔΙΚΑΣ ARDUINO IDE ΚΑΙ VSCODE	66

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 3.1: Αισθητήρας Θερμοκρασίας και Υγρασίας (AHT20).....	16
Εικόνα 3.2: Αισθητήρας Φωτεινότητας (TSL25911).....	17
Εικόνα 3.3: Αισθητήρας Υπεριώδους Ακτινοβολίας (LTR390).....	18
Εικόνα 3.4: Ρολόι Πραγματικού Χρόνου (DS1307).....	20
Εικόνα 3.5: Σχηματικό του RTC.....	22
Εικόνα 3.6: Λειτουργίες Μεταφοράς Δεδομένων GATT.....	24
Εικόνα 4.1: Διάταξη των τριών επιπέδων [19].....	30
Εικόνα 4.2: Ροή Δεδομένων του Συστήματος.....	32
Εικόνα 5.1: Συνδεσμολογία κυκλώματος.....	35
Εικόνα 5.2: Οι δύο όψεις της πλακέτας σε σχήμα 3D.....	36
Εικόνα 5.3: Διάγραμμα Ροής του firmware.....	37
Εικόνα 5.4: Διάγραμμα αυθεντικοποίησης BLE.....	41
Εικόνα 5.5: Επαναφορά Δεδομένων.....	43
Εικόνα 5.6: Το subtree της Πλατφόρμας Firebase.....	44
Εικόνα 6.1: Διάγραμμα Ροής Εφαρμογής Android.....	45
Εικόνα 6.2: Διάγραμμα Ροής Δεδομένων.....	47
Εικόνα 6.3α: Αρχική Οθόνη Καλωσορίσματος.....	48
Εικόνα 6.3β: Οθόνη για Σάρωση Κωδικού QR.....	48
Εικόνα 6.4: Όρια για Χρώματα Καρτελών.....	50
Εικόνα 6.5: Οθόνη Τηλεμετρίας.....	51
Εικόνα 6.6: Οθόνη στην Ιστοσελίδα.....	53
Εικόνα 6.7: Απεικόνιση Δεδομένων στην Ιστοσελίδα.....	53
Εικόνα 6.8: Πλήρης Πίνακας Καταγραφών.....	54
Εικόνα 6.9: Καρτέλα Export Data.....	55
Εικόνα 6.10: Αποτυχία Εύρεσης Μετρήσεων.....	55
Εικόνα 6.11: Παράδειγμα Αρχείου CSV.....	56
Εικόνα 7.1: Αρχικό Κύκλωμα σε ράστερ.....	57
Εικόνα 7.2: Τελικό Κύκλωμα στη πλακέτα PCB.....	58
Εικόνα 7.3: Σχεδιαγράμματα Πειράματος - Θερμοκρασία και Υγρασία.....	59
Εικόνα 7.4: Σχεδιαγράμματα Πειράματος – UVI και Ένταση φωτός.....	60
Εικόνα 7.5: Μετρήσεις Πειράματος σε αρχείο CSV.....	60

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Διευθύνσεις αισθητήρων για I ² C.....	11
Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά αισθητήρων.....	22

Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΙΠΙΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
ADC	Analog to Digital Converter
BLE	Bluetooth Low Energy
CFR	Code of Federal Regulations
CSS	Cascading Style Sheets
CSV	Comma Separated Values
EAS	Expo Application Services
FAO	Food and Agriculture Organization
FDA	Food and Drug Administration
GATT	Generic Attribute Profile
GPIO	General Purpose Input/Output
GPS	Global Positioning System
GxP	Good x Practice
HACCP	Hazard Analysis and Critical Control Points
HMAC	Hash-based Message Authentication Code
HTML	Hyper Text Markup Language
I ² C	Inter-Integrated Circuit
IDE	Integrated Development Environment
IoT	Internet of Things
JSON	JavaScript Object Notation
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting Diode
LTE	Long Term Evolution
MES	Manufacturing Execution System
MTU	Maximum Transmission Unit
NFC	Near Field Communication
PCB	Printed Circuit Board
PDF	Portable Document Format
PET	Polyethylene Terephthalate

PLM	Product Lifecycle Management
QR	Quick Response
RAM	Random Access Memory
RH	Relative Humidity
RTC	Real Time Clock
SCL	Serial Clock
SCM	Supply Chain Management
SDA	Serial Data
SDK	Software Development Kit
SHA	Secure Hash Algorithm
SPI	Serial Peripheral Interface
SPP	Serial Port Profile
SRAM	Static Random Access Memory
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
USB	Universal Serial Bus
UVI	Ultraviolet Index

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή – Προβλήματα στη Ψυχρή Αλυσίδα

1.1 Τι είναι η ψυχρή αλυσίδα

Η ψυχρή αλυσίδα αποτελεί έναν από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους καταγραφής και επεξεργασίας θερμοκρασίας για τρόφιμα και φάρμακα. Η σύγχρονη βιομηχανία τροφίμων και ποτών αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις σχετικά με την εξασφάλιση ποιότητας των προϊόντων κατά τη μεταφορά τους από το εργοστάσιο στον τελικό καταναλωτή. Η έννοια της ψυχρής αλυσίδας δεν περιορίζεται μόνο στα ευπαθή τρόφιμα, αλλά επεκτείνεται σε κάθε προϊόν που μπορεί να επηρεαστεί η σύστασή του από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Πρόκειται για ένα σύστημα αποθήκευσης και μεταφοράς υπό ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας, το οποίο διασφαλίζει την ακεραιότητα και τα ποιοτικά του χαρακτηριστικά από τη στιγμή παραγωγής μέχρι την τελική κατανάλωση. Το μεγάλο πλεονέκτημα με αυτό τον τρόπο αυτοματοποίησης, είναι η κατάργηση χρονοβόρων διαδικασιών ανάκτησης θερμοκρασιών από τα καταγραφικά (loggers) [1]. Η ψυχρή αλυσίδα βρίσκει εφαρμογή σε πολλές περιπτώσεις. Η χημική σύσταση των χημικών και καλλυντικών αλλοιώνεται από τη ζέστη, χάνοντας την αποτελεσματικότητά τους. Πολλά φάρμακα και εμβόλια είναι ευαίσθητα σε μεταβολές θερμοκρασίας, όπου μία μικρή απόκλιση λίγων βαθμών Κελσίου μπορεί να καταστήσει ένα εμβόλιο ανενεργό ή και επικίνδυνο [2]. Κάθε κρίκος της αλυσίδας, από την αποθήκη παραγωγού μέχρι το κέντρο διανομής, αποτελεί δυνητικό κίνδυνο. Αν ένας κρίκος σπάσει, όλη η αλυσίδα καταρρέει. Μία μαζική ανάκληση προϊόντων λόγω αλλοίωσης ποιότητας δεν προκαλεί μόνο οικονομική ζημία, αλλά καταστρέφει και την εμπιστοσύνη του καταναλωτή στην αντίστοιχη μάρκα, κάτι σχεδόν μη αναστρέψιμο [1]. Επομένως, ο κίνδυνος τροφικών δηλητηριάσεων ή χορήγησης μη αποτελεσματικών φαρμάκων αποτελεί ηθικό και νομικό ζήτημα ύψιστης σημασίας για τις εταιρείες.

1.2 Ορισμός προβλήματος

Η διατήρηση της ακεραιότητας της ψυχρής αλυσίδας είναι ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα στην σύγχρονη εφοδιαστική αλυσίδα. Η εφοδιαστική αλυσίδα αποτελείται από το δίκτυο που συνδέει τους προμηθευτές, κατασκευαστές, μεταφορείς και πωλητές με στόχο την μετατροπή πρώτων υλών σε τελικά προϊόντα που προορίζονται για κατανάλωση. Ο κλάδος αυτός καλύπτει μεγάλο πλήθος επαγγελματιών, όλοι από τους οποίους αγωνίζονται με κύριο στόχο την μείωση του κόστους και την αύξηση της αποδοτικότητας. Η Διαχείριση της Εφοδιαστικής Αλυσίδας (Supply Chain Management - SCM) παρέχει εκατομμύρια θέσεις εργασίας παγκοσμίως που ασχολούνται με την σωστή διανομή καταναλωτικών αγαθών ή σημαντικών πόρων για τους ανθρώπους. Τα στάδια που συμπεριλαμβάνονται είναι πολλά και σχετίζονται με πολλές επιστήμες, όπως ο προγραμματισμός εφοδιαστικής αλυσίδας, η διαχείριση κύκλου ζωής προϊόντων (Product Lifecycle Management - PLM), η διαχείριση εκτέλεσης παραγωγής (Manufacturing Execution System – MES) και άλλα. Το στάδιο που παρουσιάζει ενδιαφέρον για τη παρούσα εργασία είναι η διαχείριση εφοδιαστικής (logistics). Αφορά τη μεταφορά και αποθήκευση των αγαθών από το πρωταρχικό στάδιο των ακατέργαστων υλών, τον έλεγχο αποθεμάτων και την παράδοση των τελικών αγαθών στον καταναλωτή. Τα προβλήματα που μπορούν να προκύψουν σε αυτό το χώρο είναι πολλά και πιθανότατα να αποτελέσουν κίνδυνο για την αξιοπιστία των εταιριών, καθώς και την υγεία των πολιτών. Παρόλο που υπάρχει αισθητή τεχνολογική πρόοδος, σημαντικό ποσοστό των ευπαθών προϊόντων φτάνει αλλοιωμένο στον τελικό καταναλωτή, το οποίο μπορεί να βασιστεί στην έλλειψη συνεχούς παρακολούθησης κατά τη μεταφορά και αποθήκευσής των αγαθών[3][4]. Ο κίνδυνος βρίσκεται σε τρεις κύριους άξονες: στην δημόσια υγεία, τις οικονομικές απώλειες και τους περιορισμούς των σύγχρονων λύσεων [1].

1.2.1 Δημόσια Υγεία και Ποιότητα Προϊόντων

Η θερμοκρασία είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας για την ασφάλεια των φαρμάκων και των τροφίμων. Στη περίπτωση που προκύψει μικρή απόκλιση από το προκαθορισμένο εύρος τιμών, μπορεί να προκληθεί ανάπτυξη μικροβίων, όπως η *Listeria* και η *Salmonella*, καθιστώντας τα επικίνδυνα για κατανάλωση [5]. Όσον αφορά τα φαρμακευτικά σκευάσματα, η έκθεσή τους σε ακατάλληλες συνθήκες μπορεί να εξουδετερώσει τη θεραπευτική τους ικανότητα ή τη γενική τους δράση.

Η θερμοκρασία αποτελεί παράγοντα ζωτικής σημασίας, αλλά η έκθεση στο φως, η υγρασία και η υπερϊώδης ακτινοβολία έχουν εξίσου σημαντικό ρόλο. Για παράδειγμα, υψηλά επίπεδα υγρασίας μπορούν να προκαλέσουν οξείδωση στις συσκευασίες ή ανάπτυξη μυκήτων στο εσωτερικό τους. Η έκθεση σε μεγάλα ποσά ακτινοβολιών UV επιφέρει παρόμοιες αλλαγές. Πολλά προϊόντα που δέχονται υπερϊώδεις ακτίνες για μεγάλο χρονικό διάστημα, αλλοιώνονται χημικά. Η φωτο-οξείδωση καταστρέφει βιταμίνες και αλλάζει τη γεύση σε τρόφιμα όπως το ελαιόλαδο και μπορεί να αλλάξει τη σύσταση σε ροφήματα όπως ορισμένα κρασιά. Με τον ίδιο τρόπο, τα φάρμακα μπορούν να θεωρηθούν ευπαθή, καθώς σε αυτές τις συνθήκες υπάρχει πιθανότητα διάσπασης της μοριακής δομής τους.

1.2.2 Οικονομικές Απώλειες

Πέρα από τις επιπτώσεις στη δημόσια υγεία, η αποτυχία της ψυχρής αλυσίδας προκαλεί σημαντικές οικονομικές συνέπειες σε όλα τα επίπεδα της εφοδιαστικής αλυσίδας. Σύμφωνα με τα στοιχεία του Παγκόσμιου Οργανισμού Τροφίμων και Γεωργίας (Food and Agriculture Organization - FAO), η σπατάλη των παραγόμενων τροφίμων παγκοσμίως φτάνει το 33% κάθε χρόνο. Αυτό το ποσοστό μεταφράζεται σε απώλεια ή σπατάλη περισσότερου από ένα δισεκατομμύριο τόνους φαγητού και σε οικονομική καταστροφή ύψους εκατοντάδων δισεκατομμυρίων δολαρίων ετησίως [3]. Σημαντικό μέρος αυτής της απώλειας οφείλεται σε ανεπαρκείς συνθήκες αποθήκευσης και μεταφοράς αυτών των προϊόντων.

Σε επίπεδο επιχείρησης, οι επιπτώσεις είναι εξίσου σοβαρές. Μία μαζική ανάκληση προϊόντων λόγω αλλοίωσης από ακατάλληλες συνθήκες μεταφοράς, μπορεί να κοστίσει εκατομμύρια ευρώ στην εταιρεία, συνυπολογίζοντας τα κόστη απόσυρσης, τις αποζημιώσεις, νομικές δαπάνες, χωρίς να αναφερθεί η μακροχρόνια ζημιά στη φήμη της εταιρείας. Οι επιχειρήσεις που δεν μπορούν να τεκμηριώσουν την τήρηση της ψυχρής αλυσίδας, είναι υπόχρεες να πληρώσουν μεγάλα χρηματικά ποσά από τις ασφαλιστικές εταιρείες, αυξάνοντας το λειτουργικό κόστος. Ακόμη, η απώλεια της ψυχρής αλυσίδας σε ένα τομέα όπως τη φαρμακευτική βιομηχανία, έχει ως αποτέλεσμα την καταστροφή εμβολίων ή φαρμάκων ευαίσθητα σε υψηλές θερμοκρασίες. Η παραγωγή, μεταφορά και τελική απόρριψη των προϊόντων συμβάλλουν αρνητικά στα έξοδα, αλλά και στην άσκοπη κατανάλωση ενέργειας και εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα. Επομένως, καμία εταιρεία δεν μπορεί να παραβλέψει αυτό το ζήτημα και όλες επενδύουν στην συνεχή επίγνωση της τοποθεσίας και κυρίως συνθηκών των αγαθών.

1.2.3 Περιορισμοί Υφιστάμενων Λύσεων

Παρά την αδιαμφισβήτητη αναγνώριση των παραπάνω κινδύνων, οι διαθέσιμες λύσεις παρακολούθησης της ψυχρής αλυσίδας παρουσιάζουν σημαντικούς περιορισμούς που αποτρέπουν την συνολική τους εφαρμογή. Οι λύσεις που υπάρχουν σήμερα στο εμπόριο έχουν σχεδιαστεί για βιομηχανικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας και απαιτούν υψηλό κόστος για αγορά και συντήρηση. Εταιρείες όπως η Sensitech και η Testo έχουν σχεδιάσει επαγγελματικά καταγραφικά δεδομένων (data loggers), που είναι απρόσιτα για μικρές επιχειρήσεις ή μεμονωμένες εφαρμογές, λόγω υψηλού κόστους.

Η πλειονότητα αυτών των συστημάτων παρακολουθεί αποκλειστικά τη θερμοκρασία, αγνοώντας άλλες κρίσιμες παραμέτρους, όπως την ένταση του φωτός και την υπεριώδη ακτινοβολία, που όπως προαναφέρθηκε, επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα των αποθηκευμένων αγαθών [1].

Ένας ακόμα περιορισμός αυτών των συσκευών είναι η απαιτούμενη φυσική σύνδεση με υπολογιστή ή εξειδικευμένο εξοπλισμό για πρόσβαση και ανάκτηση των δεδομένων. Κάτι τέτοιο δυσχεραίνει τον άμεσο εντοπισμό προβλημάτων και καθυστερεί την ενημέρωση. Παρόλο που υπάρχουν συστήματα που προσφέρουν ασύρματη μετάδοση δεδομένων, συνήθως απαιτούν μόνιμη σύνδεση στο διαδίκτυο, που δεν μπορεί να εξασφαλιστεί κατά τη μεταφορά των προϊόντων [1].

1.2.4 Η Περίπτωση των Φιαλών Νερού

Ένα προϊόν που κατατάσσεται στη κατηγορία των τροφίμων, αλλά σπάνια αποτελεί αντικείμενο εξειδικευμένης παρακολούθησης, είναι οι φιάλες εμφιαλωμένου νερού. Έρευνες που έχουν διεξαχθεί σχετικά με την ασφάλεια του νερού, δείχνουν πως το νερό της βρύσης απορροφά 4000 σωματίδια πλαστικού κάθε χρόνο. Το παράδοξο είναι πως το εμφιαλωμένο νερό, που θεωρείται μία πιο ασφαλής επιλογή, απορροφά 90000 σωματίδια [6]. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω των φθαλικών ενώσεων των συσκευασιών, που έχουν στόχο την μεγαλύτερη ανθεκτικότητά τους. Οι υψηλές θερμοκρασίες επιταχύνουν την μεταφορά χημικών ουσιών από το πλαστικό στο νερό, καθώς και επιβλαβή μόρια όπως το αντιμόνιο. Το τριοξείδιο του αντιμονίου χρησιμοποιείται ως καταλύτης για την παραγωγή πλαστικού PET (Polyethylene Terephthalate ή τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο). Μεγάλα χρονικά διαστήματα και υψηλές θερμοκρασίες συμβάλλουν στη μόλυνση του περιεχομένου του μπουκαλιού με αντιμόνιο, το οποίο θεωρείται πιθανό καρκινογόνο για τον άνθρωπο, ειδικά για τους πνεύμονες. Η παρατεταμένη έκθεση σε ακτινοβολία UV διασπά τη δομή του πλαστικού, ενώ υπερβολική υγρασία ευνοεί την ανάπτυξη μικροοργανισμών στο εξωτερικό της συσκευασίας και στο πόμα [7]. Παρά τους κινδύνους, οι φιάλες νερού συχνά αποθηκεύονται σε μέρη υπό συνθήκες που δεν ελέγχονται. Οι αποθήκες χωρίς κλιματισμό, οι υπαίθριοι χώροι ή τα οχήματα με υπερβολική έκθεση στον ήλιο αποτελούν καταστάσεις για τις οποίες καμία λύση δεν είναι αρκετά προσιτή και πολυπαραμετρική για να επιτρέψει τον παραγωγό, διανομέα και τελικό καταναλωτή να επαληθεύσει τις συνθήκες του προϊόντος σε όλα αυτά τα στάδια.

1.3 Κίνητρο και στόχοι

Αύτη η διπλωματική εργασία στοχεύει στην ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου, χαμηλού κόστους συστήματος παρακολούθησης περιβαλλοντικών συνθηκών για φιάλες εμφιαλωμένου νερού. Το σύστημα αξιοποιεί σύγχρονες τεχνολογίες ενσωματωμένων συστημάτων, ασύρματης επικοινωνίας και υπολογιστικού νέφους, με σκοπό την κάλυψη του κενού που εντοπίζεται στις βιομηχανικές λύσεις μεγάλης κλίμακας και της ανάγκης για προσιτή, φορητή παρακολούθηση.

Οι βασικότεροι στόχοι του προτεινόμενου συστήματος είναι:

- **Πολυπαραμετρική μέτρηση περιβαλλοντικών συνθηκών σε πραγματικό χρόνο:**

Το σύστημα ενσωματώνει τρεις αισθητήρες με τους οποίους μπορούμε να παρακολουθήσουμε τις τιμές που μας ενδιαφέρουν. Ο AHT20 μετράει την θερμοκρασία και την υγρασία, ο LTR390 την υπεριώδη ακτινοβολία και ο TSL25911 μετράει την ένταση φωτός σε Lux. Οι παραπάνω αισθητήρες συνδέονται με τον μικροελεγκτή ESP32 και καλύπτουν τις κρίσιμες παραμέτρους που επηρεάζουν την ακεραιότητα των φιαλών PET. Το παρόν σύστημα παρέχει περισσότερες παραμέτρους σε σχέση με την πλειοψηφία που περιορίζονται συνήθως στη θερμοκρασία.

- **Αξιόπιστη καταγραφή μέσω αλγορίθμου μέσης τιμής:**

Για τον περιορισμό των σφαλμάτων κατά τη μέτρηση των παραμέτρων και την εξάλειψη τυχαίων τιμών, κάθε καταγραφή προκύπτει από τον μέσο όρο πέντε διαδοχικών μετρήσεων σε κάθε τμήμα χρόνου. Οι τιμές που μπορεί να δει ο χρήστης παράγονται κάθε δεκαπέντε λεπτά και εξαρτώνται από πέντε μετρήσεις που πραγματοποιούνται κάθε τρία λεπτά. Οι εγγραφές συνοδεύονται από ακριβή χρονική σήμανση μέσω ενσωματωμένου ρολογιού πραγματικού χρόνου (Real Time Clock - RTC), που είναι συνδεδεμένο στο κύκλωμα.

- **Ασύρματη μετάδοση δεδομένων μέσω Bluetooth:**

Η σύνδεση μεταξύ του ESP32 και της εφαρμογής Android στη κινητή συσκευή πραγματοποιείται με Bluetooth Low Energy (BLE) και ενεργοποιείται με τη σάρωση του κωδικού QR που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο κιβώτιο. Σε μία πραγματική περίπτωση, κάθε συσκευή που θα μετέφερε φιάλες PET μέσα σε μεταφορικό μέσο, θα είχε τον δικό της κωδικό QR. Με αυτό τον τρόπο, η σύνδεση είναι ασφαλής και γρήγορη, χωρίς να απαιτεί χειροκίνητη αναζήτηση από τον χρήστη.

- **Ανάπτυξη εφαρμογής Android για προβολή δεδομένων:**

Η εφαρμογή, αφού επιβεβαιώσει την ταυτότητα του χρήστη με τον κωδικό QR, του επιτρέπει να δει το ιστορικό των καταγεγραμμένων μετρήσεων, καθώς και τις τιμές των μετρήσεων εκείνη τη στιγμή, που ανανεώνονται κάθε ένα δευτερόλεπτο. Στην εφαρμογή είναι διαθέσιμος ο κατάλογος των προηγούμενων μετρήσεων, με την παλαιότερη στο τέλος της λίστας και την πιο πρόσφατη μέτρηση στην αρχή της λίστας. Όταν ολοκληρωθεί η διαδρομή των συσκευασμένων προϊόντων, υπάρχει διαθέσιμη η επαναφορά δεδομένων (Reset Data), έτσι ώστε το σύστημα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για νέα παρτίδα προϊόντων χωρίς να γίνει κάποια αλλαγή στο υλικό.

- **Αποστολή δεδομένων και απεικόνιση και επεξεργασία δεδομένων με Firebase:**

Ο πραγματικός ρόλος της εφαρμογής είναι ο ενδιάμεσος κόμβος μεταξύ του κυκλώματος με τον μικροελεγκτή και την πλατφόρμα Firebase, όπου αποστέλλονται τα δεδομένα για να αποθηκευτούν και να απεικονιστούν σε μορφή γραφημάτων. Επίσης, παρέχεται η δυνατότητα εξαγωγής των μετρήσεων σε μορφή CSV, για μία πιο αποτελεσματική ανάλυση των δεδομένων με εξωτερικά εργαλεία, όπως το Microsoft Excel.

Το αποτέλεσμα είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα τριών επιπέδων: Το υλικό, η εφαρμογή του κινητού και το υπολογιστικό νέφος, προσφέροντας αξιόπιστη και πολυπαραμετρική παρακολούθηση της ψυχρής αλυσίδας, χωρίς εξάρτηση από σταθερή σύνδεση στο διαδίκτυο κατά την μέτρηση.

1.4 Οργάνωση Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία διαρθρώνεται σε οχτώ κεφάλαια:

- **Κεφάλαιο 2 - Βιβλιογραφική Ανασκόπηση:** Παρουσιάζει το θεωρητικό και ερευνητικό πλαίσιο της εργασίας. Αναλύεται η έννοια της ψυχρής αλυσίδας, οι υπάρχουσες εμπορικές και ακαδημαϊκές λύσεις με συγκεκριμένα παραδείγματα, εντοπίζοντας τα κενά που καλείται να καλύψει το παρόν σύστημα.
- **Κεφάλαιο 3 – Θεωρητικό Υπόβαθρο:** Εισάγει τις τεχνολογίες και τα εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν στο σύστημα. Παρέχει πληροφορίες από τον μικροελεγκτή ESP32 και τους αισθητήρες έως το περιβάλλον ανάπτυξης Android και την πλατφόρμα Firebase.
- **Κεφάλαιο 4 – Αρχιτεκτονική Συστήματος:** Παρουσιάζει τη συνολική σχεδίαση του συστήματος πριν από το στάδιο της υλοποίησης. Αναγράφεται η αρχιτεκτονική του υλικού και του λογισμικού, η ροή δεδομένων από τη φυσική μέτρηση έως την απεικόνιση στο νέφος, καθώς και η μεθοδολογία μέτρησης με τον αλγόριθμο μέσης τιμής.

- **Κεφάλαιο 5 – Υλοποίηση και Firmware:** Αναλυτική περιγραφή της υλοποίησης του κυκλώματος και του λογισμικού του ESP32. Καλύπτει τον λόγο επιλογής των εξαρτημάτων, τη σύνδεσή τους, την ενσωμάτωση του RTC, την υλοποίηση του BLE Server και τη λειτουργία επαναφοράς δεδομένων.
- **Κεφάλαιο 6 – Υλοποίηση Εφαρμογής Android:** Παρουσιάζει την ανάπτυξη της εφαρμογής στο κινητό, την σάρωση του κωδικού QR, τη σύνδεση BLE, τη προβολή ιστορικού των μετρήσεων, την αποστολή δεδομένων στο Firebase και την εξαγωγή τους σε μορφή CSV.
- **Κεφάλαιο 7 – Πειραματική Διαδικασία:** Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από το πείραμα που πραγματοποιήθηκε σε κάθε επίπεδο του συστήματος. Περιλαμβάνει λεπτομέρειες για τις συνθήκες του κυκλώματος σε μία πραγματική διαδρομή και τις συνέπειες που επιφέρει η κίνηση του σταθμού μέτρησης.
- **Κεφάλαιο 8 – Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις:** Συνοψίζει τα ευρήματα της εργασίας, επιβεβαιώνοντας την επίτευξη των στόχων που τέθηκαν και προτείνει κατευθύνσεις για μελλοντική βελτίωση και επέκταση του υπάρχοντος συστήματος.

Κεφάλαιο 2ο: Παρόμοιες Εφαρμογές και Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό και ερευνητικό πλαίσιο της εργασίας. Αρχικά, αναλύεται η έννοια και η σημασία της ψυχρής αλυσίδας, καθώς και οι συνέπειες της αποτυχίας της. Στη συνέχεια, εξετάζονται οι περιβαλλοντικές παράμετροι που επηρεάζουν την ακεραιότητα των φιαλών εμφιαλωμένου νερού και μετρούνται με τη βοήθεια του συστήματος. Ακολουθεί μία σύντομη ανασκόπηση των υφιστάμενων εμπορικών και ακαδημαϊκών λύσεων παρακολούθησης με συγκριτική αξιολόγηση των χαρακτηριστικών τους. Τέλος, εντοπίζεται το ερευνητικό κενό που καλείται να καλύψει το προτεινόμενο σύστημα και τεκμηριώνονται οι σχεδιαστικές επιλογές του.

2.2 Η Σημασία της Ψυχρής Αλυσίδας

Στη πράξη, η αξία της ψυχρής αλυσίδας δεν περιορίζεται σε κάποιο στάδιο, αλλά ακολουθεί το προϊόν και τη διατήρηση ακεραιότητάς του σε όλη τη διαδρομή του. Επομένως, το ζητούμενο δεν είναι απλά η ορθή μεταφορά και αποθήκευσή τους, αλλά και η τεκμηρίωση και επαλήθευση των συνθηκών σε κάθε κρίκο [8]. Παρόλο που ο όρος συνδέεται παραδοσιακά με τη διαχείριση θερμοκρασίας σε ευπαθή τρόφιμα και φαρμακευτικά προϊόντα, η σύγχρονη έννοια της ψυχρής αλυσίδας επεκτείνεται και συμπεριλαμβάνει περισσότερες περιβαλλοντικές παραμέτρους. Τόσο η βιομηχανία τροφίμων και ποτών, όσο και ο φαρμακευτικός κλάδος εξαρτώνται από την αδιάλειπτη παρακολούθηση των περιβαλλοντικών συνθηκών, προκειμένου να εξασφαλίσουν ότι τα προϊόντα φτάνουν στον καταναλωτή στην κατάσταση που προβλέπουν οι προδιαγραφές τους. Συνεπώς, η σημασία της ψυχρής αλυσίδας είναι αδιαμφισβήτητη.

Η αποτυχία της ψυχρής αλυσίδας δεν περιορίζεται μόνο στην αλλοίωση των προϊόντων, αλλά επιφέρει σημαντικές οικονομικές και περιβαλλοντικές συνέπειες σε ολόκληρη την εφοδιαστική αλυσίδα. Η έγκαιρη ανίχνευση αποκλίσεων κατά τη μεταφορά και η αυτόματη παρέμβαση μπορεί να μειώσει δραστηκά τις απώλειες ευπαθών προϊόντων, με οικονομικό και περιβαλλοντικό όφελος [1]. Αυτή η προσέγγιση αναδεικνύει τη μετάβαση από την παθητική καταγραφή δεδομένων σε ενεργά συστήματα υποστήριξης, τα οποία αξιοποιούν σε πραγματικό χρόνο τις πληροφορίες που συλλέγουν οι αισθητήρες και μειώνουν τον αριθμό σφαλμάτων με ειδικούς μηχανισμούς.

Στο πλαίσιο της δημόσιας υγείας, η υπεριώδης ακτινοβολία (Ultraviolet Radiation – UV) αποτελεί μία από τις λιγότερο μελετημένες, αλλά σημαντικές παραμέτρους παρατήρησης. Πρόκειται για μια μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με μήκος κύματος από 100nm έως 400nm και κατατάσσεται σε τρεις κατηγορίες: UV-A (315-400nm), UV-B (280-315nm) και UV-C (100-280nm). Η έκθεση προϊόντων σε υπεριώδη ακτινοβολία, ειδικά σε συσκευασίες όπως οι φιάλες PET, μπορεί να επιφέρει χημική αποσύνθεση του υλικού και μεταβολή της σύστασης του περιεχομένου. Το γεγονός πως ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (ΠΟΥ) εκτιμά εκατομμύρια κρούσματα μη μελανωματικού καρκίνου και εκατοντάδες χιλιάδες περιστατικά μελανώματος υποδηλώνει την σοβαρότητα της κατάστασης [9]. Ο κίνδυνος υπάρχει ακόμα και σε περιπτώσεις που δεν σχετίζονται άμεσα με τον άνθρωπο, όπως η αποθήκευση προϊόντων.

Η τεχνολογική απόκριση στην ανάγκη για συνεχή και αξιόπιστη παρακολούθηση περιβαλλοντικών συνθηκών αξιοποιεί την επιστήμη του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT). Πολλές έρευνες τονίζουν πως η χρήση συστημάτων παρακολούθησης IoT προσφέρει τη δυνατότητα

καταγραφής περιβαλλοντικών δεδομένων συνεχούς χρόνου με τη βοήθεια αισθητήρων και πλατφόρμες νέφους, επιτυγχάνοντας την μεταφορά και ανάλυση δεδομένων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο μικροελεγκτής ESP32 έχει αποδειχθεί ως ιδανική πλατφόρμα για την υλοποίηση παρόμοιων συστημάτων, καθώς συνδυάζει δυνατότητες ασύρματης επικοινωνίας με χαμηλό κόστος και ευελιξία στη σύνδεση αισθητήρων. Ο μικροελεγκτής αυτός αναπτύχθηκε από την Espressif Systems και προσφέρει παγκοσμίως μία ευέλικτη λύση για εφαρμογές IoT.

2.3 Περιβαλλοντικές Παράμετροι για την Ακεραιότητα των Φιαλών

Η ποιότητα και ασφάλεια των αποθηκευμένων αγαθών δεν εξαρτώνται μόνο από μία μοναδική παράμετρο. Όπως επισημαίνουν οι Afreen και Bajwa, οι υφιστάμενες λύσεις παρακολούθησης ψυχρής αλυσίδας περιορίζονται στην θερμοκρασία και την σχετική υγρασία, αγνοώντας άλλες κρίσιμες παραμέτρους, όπως η φωτεινότητα και η συγκέντρωση αερίων στον χώρο [10]. Αυτό το κενό συμβάλλει σημαντικά στο υψηλό ποσοστό αλλοίωσης ευπαθών προϊόντων κατά το στάδιο αποθήκευσης. Στη περίπτωση του εμφιαλωμένου νερού σε φιάλες PET, η ποικιλία των παραμέτρων που πρέπει να παρακολουθούνται είναι εξίσου απαιτητικό, καθώς το υλικό της συσκευασίας και το ίδιο το περιεχόμενο επηρεάζονται από ένα σύνολο φυσικών παραγόντων που αναλύονται παρακάτω. Για τον λόγο αυτό, η παρούσα εργασία αντιμετωπίζει τις παραμέτρους ως ένα σύνολο αλληλένδετων παραγόντων που καθορίζουν την τελική κατάσταση του προϊόντος. Πολλές από αυτές γίνονται επικίνδυνες κυρίως σε συνδυασμό, κάνοντας απαραίτητη την ταυτόχρονη καταγραφή τους, παρά την απομονωμένη παρακολούθησή τους.

2.3.1 Θερμοκρασία και Υγρασία

Η θερμοκρασία αποτελεί την πιο άμεσα μετρήσιμη και ευρέως αναγνωρισμένη παράμετρο στη διαχείριση της ψυχρής αλυσίδας. Υψηλές θερμοκρασίες επιταχύνουν χημικές αντιδράσεις εντός και γύρω από τη συσκευασία, ενώ σε φιάλες PET συγκεκριμένα, η έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες προκαλεί μετανάστευση χημικών ουσιών από το πλαστικό στο νερό, υποβαθμίζοντας τη γεύση και την ασφάλεια του νερού [11]. Το τριοξείδιο αντιμονίου (Sb_2O_3) είναι μία ανόργανη χημική ένωση και αποτελεί τη σημαντικότερη εμπορική ένωση του αντιμονίου, καθώς λειτουργεί ως καταλύτης για τη παραγωγή πολυεστέρα (PET) και πλαστικών. Μελέτες δείχνουν πως η αποδέσμευση αντιμονίου παραμένει χαμηλή σε θερμοκρασία δωματίου, αλλά αυξάνεται ραγδαία όταν οι φιάλες εκτίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες σε ένα σταθμευμένο όχημα ή σε μία αποθήκη χωρίς κλιματισμό το καλοκαίρι. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η μεταφορά αντιμονίου μπορεί να φτάσει τιμές που ξεπερνάνε τα επιτρεπόμενα όρια της Ευρωπαϊκής Ένωσης και των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής. Αντίστοιχα, η σχετική υγρασία αποτελεί κρίσιμο παράγοντα, καθώς η επίδρασή της αυξάνεται από τη σχέση της με τη θερμοκρασία και υψηλά επίπεδά της ευνοούν την ανάπτυξη μυκήτων στην εξωτερική επιφάνεια της φιάλης και στο πόμα. Απότομες μεταβολές μπορούν να μειώσουν την επιφανειακή θερμοκρασία της φιάλης κάτω από το σημείο δρόσου (dew-point temperature), προκαλώντας συμπύκνωση υδρατμών που δημιουργεί τοπικά ευνοϊκές συνθήκες για μικροοργανισμούς, ακόμα και αν η μέση υγρασία του χώρου παραμένει εντός αποδεκτών ορίων. Παράλληλα, η ψυχρή αποθήκευση αναλώσιμων φαγητών επηρεάζεται από αυτό το παράγοντα, καθώς η διάχυση του νερού (η κίνηση των μορίων του νερού σε περιοχή με χαμηλότερη συγκέντρωση) σχετίζεται άμεσα με τη σχετική υγρασία. Οι [10] τεκμηριώνουν ότι η παρακολούθηση θερμοκρασίας και υγρασίας σε πραγματικό χρόνο ταυτόχρονα αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για ένα αξιόπιστο σύστημα ψυχρής αλυσίδας, καθώς η αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τις συνθήκες μεταφοράς συνολικά.

2.3.2 Υπεριώδης Ακτινοβολία

Η υπεριώδης ακτινοβολία αποτελεί μία περίπλοκη αλλά εξίσου σημαντική απειλή για την ακεραιότητα των φιαλών. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, καθορίζεται σε τρεις κατηγορίες και αποτελούν τις κύριες συνιστώσες που φτάνουν στην επιφάνεια της γης. Η έκθεση σε μεγάλα επίπεδα ακτινοβολίας UV μπορεί να προκαλέσει οξείδωση της συσκευασίας, να επηρεάσει αρνητικά την γεύση και τη σύσταση του περιεχομένου. Ειδικά για τη περίπτωση των PET, η υπεριώδης ακτινοβολία διασπά τους δεσμούς του πολυμερούς και σχηματίζει νέες χημικές ομάδες, οδηγώντας σε αποχρωματισμό, αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας και σταδιακή απελευθέρωση προϊόντων αποδόμησης. Πιο συγκεκριμένα, η ραδιενέργεια του μήκους κύματος UV-B (280-315 nm) προκαλεί τη μεγαλύτερη αποδόμηση του υλικού και την αλυσιδωτή αποκοπή των εστέρων στον πυρήνα του PET. Ως αποτέλεσμα, προκαλείται μειωμένο μοριακό βάρος και οξείδωση και δημιουργούνται ομάδες καρβονυλίου και καρβοξυλικές ομάδες [7]. Αυτό το φαινόμενο είναι πολύ πιθανό σε περιπτώσεις φιαλών που αποθηκεύονται κοντά σε παράθυρα ή ημιυπαίθριους χώρους χωρίς κατάλληλη προστασία. Η Global Solar UV Index είναι η διεθνής αριθμητική κλίμακα μέτρησης της έντασης της υπεριώδους ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης, σχεδιασμένη από τον ΠΟΥ. Η κλίμακα ξεκινά από το μηδέν και αυξάνεται ανάλογα με την ένταση, κατηγοριοποιούμενες από «Χαμηλή» (<2) έως «Ακραία» (>=11). Έχουν διεξαχθεί αμέτρητες έρευνες που εστιάζουν στην διττή φύση της υπεριώδους ακτινοβολίας και τις θετικές και αρνητικές συνέπειές της. Τα τελευταία χρόνια έγινε μία συμφωνία για την σωστή ενημέρωση και ευαισθητοποίηση του κόσμου για τους κινδύνους που μπορεί να επιφέρει στην υγεία μας. Η συνεχής παρακολούθηση αυτής της παραμέτρου είναι πρακτικά εφικτή με χαμηλό κόστος και αποτελεί κρίσιμο εργαλείο περιβαλλοντικής παρακολούθησης. Οι αισθητήρες δείκτη UV χαμηλού κόστους, όπως αυτοί που αξιοποιούνται σε φορητά όργανα μέτρησης σε πραγματικό χρόνο, καθιστούν δυνατή την ενσωμάτωση της παραμέτρου σε συστήματα IoT [9].

2.3.3 Ένταση Φωτός

Η ένταση του φωτός στο περιβάλλον, ακόμη και όταν δεν περιλαμβάνει υπεριώδης ακτινοβολία, αποτελεί παράμετρο που επηρεάζει τη διαδικασία μεταφοράς και αποθήκευσης. Η εκτενής έκθεση σε έντονο ορατό φως μπορεί να επιταχύνει φωτοχημικές αντιδράσεις, να ευνοήσει την ανάπτυξη φωτότροφων μικροοργανισμών και να αλλοιώσει χρωστικές ουσίες στις ετικέτες. Πειραματικά δεδομένα σε φιάλες εμφιαλωμένου νερού που εκτέθηκαν σε ηλιακό φως για παρατεταμένο διάστημα δείχνουν μετρήσιμη υποβάθμιση της ποιότητας, με χημικές αλλοιώσεις που αποδίδονται στην οξειδωτική αποδόμηση της συσκευασίας. Πέρα από την άμεση επίδραση στο προϊόν, πρόσφατα συστήματα ψυχρής αποθήκευσης έχουν αρχίσει να αντιμετωπίζουν το φως ως μία ακόμη παράμετρο του μικροκλίματος, παρακολουθώντας το σε πραγματικό χρόνο μαζί με τις υπόλοιπες συνθήκες [12]. Στο πλαίσιο των ψυχρών αποθηκών, η φωτεινότητα συνδέεται έμμεσα με τον αερισμό του χώρου και τη συχνότητα πρόσβασης του προσωπικού. Τα υπάρχοντα συστήματα παρακολούθησης αδυνατούν να καταγράψουν τη φωτεινότητα, δημιουργώντας ένα σημαντικό κενό στην αξιόπιστη διαχείριση ψυχρής αποθήκευσης [10]. Σε αυτά τα συστήματα, η ολοκληρωμένη επίβλεψη του μικροκλίματος συνδέεται με τη διατήρηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των αποθηκευμένων αγαθών. Η ένταση του ορατού φωτός μπορεί να μετρηθεί εύκολα με φωτοαντιστάσεις ή ψηφιακούς αισθητήρες φωτεινότητας, επιτρέποντας την ενσωμάτωση αυτού του παράγοντα χωρίς να αυξηθεί η πολυπλοκότητα του συστήματος. Η αξιοποίηση του αισθητήρα φωτεινότητας στο προτεινόμενο σύστημα της εργασίας αποσκοπεί στη κάλυψη αυτού του κενού και προσφέρει μία ολοκληρωμένη εικόνα των συνθηκών μεταφοράς.

2.4 Υφιστάμενες Λύσεις Παρακολούθησης Ψυχρής Αλυσίδας

Η αγορά και η ερευνητική κοινότητα έχουν προτείνει έναν αριθμό λύσεων για την απομακρυσμένη παρακολούθηση των συνθηκών κατά τη μεταφορά και αποθήκευση ευπαθών προϊόντων. Οι λύσεις αυτές διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τα καταγραφικά δεδομένα (data loggers) που είναι διαθέσιμα στην αγορά και κυριαρχούν στη βιομηχανία και οι ακαδημαϊκές προτάσεις που βασίζονται στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT). Η ανασκόπηση αυτών των δύο κατηγοριών είναι αναγκαία για την κατανόηση του εγχειρήματος του προτεινόμενου συστήματος, αλλά και τις προκλήσεις που καλείται να αντιμετωπίσει. Στο χώρο των εμπορικών προϊόντων, εταιρίες όπως η Sensitech και η Testo θεωρούνται κορυφαίες στην παραγωγή συστημάτων μέτρησης και διατήρησης της ακεραιότητας ψυχρών προϊόντων. Η βασική διαφορά ανάμεσα στις δύο κατηγορίες δεν εντοπίζεται τόσο στους αισθητήρες, όσο στη προσέγγισή τους. Τα εμπορικά καταγραφικά δίνουν έμφαση στην ανιχνευσιμότητα και στη προσαρμογή των προτύπων (Good x Practice - GxP, Hazard Analysis and Critical Control Points - HACCP), ενώ οι ακαδημαϊκές προτάσεις IoT εστιάζουν στη συνδεσιμότητα πραγματικού χρόνου και στο χαμηλό κόστος [8][10].

2.4.1 Testo

Η εταιρία παράγει όργανα μέτρησης τα οποία βοηθούν στην τεχνολογία ψύξης, κλιματισμού, περιβάλλοντος, την ανάλυση καυσαερίων, καθώς και στην μέτρηση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα και τροφίμων. Για παράδειγμα, η σειρά Testo 184, όπου το μοντέλο 184 H1 μετρά θερμοκρασίες από -20 έως 70 βαθμούς Κελσίου, σχετική υγρασία από 0 έως 100% RH, μπορεί να αποθηκεύσει έως 64.000 μετρήσεις και διαθέτει μία οθόνη LCD με ενδείξεις LED για υπέρβαση ορίων. Η ανάκτηση των δεδομένων γίνεται με φυσική σύνδεση της συσκευής σε θύρα USB, όπου παράγεται αυτόματα σε μορφή PDF, χωρίς να χρειαστεί ρύθμιση παραμέτρων από τον χρήστη. Πέρα από την ανάγνωση μέσω USB, το 184 H1 υποστηρίζει και ανάγνωση μέσω NFC με συμβατή κινητή συσκευή, ενώ η συμμόρφωσή του στα πρότυπα GxP, HACCP και FDA 21 CFR υποδεικνύει την ευρεία υιοθέτησή του στη φαρμακευτική και τροφική εφοδιαστική. Αυτό σημαίνει πως συμβαδίζει με γενικά πλαίσια ποιότητας φαρμάκων, κανόνες και συστήματα διαχείρισης ασφάλειας τροφίμων [13].

Η ίδια εταιρία έχει κυκλοφορήσει ένα πιο εξελιγμένο μοντέλο, το 184 G1, όπου ανάμεσα στα προηγούμενα, παρέχει και ένδειξη κραδασμών (shock) με τη βοήθεια αισθητήρα τριών αξόνων. Η προσθήκη αυτή συνοδεύεται από μικρότερη αυτονομία μπαταρίας και περιορισμένη μνήμη κραδασμών (1000 τιμές). Το κόστος του τελευταίου μοντέλου είναι πολύ μεγαλύτερο και το καθιστά ακατάλληλο για μικρής κλίμακας εφαρμογές. Κοινό χαρακτηριστικό όλης της σειράς 184 είναι η αποκλειστική μέτρηση θερμοκρασίας και υγρασίας, και στη περίπτωση του μοντέλου G1, τους κραδασμούς [13].

Η Testo διαθέτει μεγάλη ποικιλία οργάνων μέτρησης, όπως υπέρυθρο θερμόμετρο, θερμικό ανεμόμετρο, όργανο μέτρησης διαφορικής πίεσης και πολλά άλλα, που ονομάζονται Smart Probes. Είναι ιδανικά για μέτρηση θερμοκρασίας, υγρασίας, ροής και πίεσης, καθώς παρακολουθούν τη μεταβολή των μετρήσιμων τιμών ασύρματα, προβάλλουν την εξέλιξη των δεδομένων μέτρησης ως γράφημα σε κινητές τερματικές συσκευές και αποστέλλουν τα δεδομένα μέτρησης σε μορφή PDF ή Excel. Με παρόμοιο τρόπο, η εργασία αυτή στέλνει τα δεδομένα με Bluetooth σε μία κινητή συσκευή, όπου ο χρήστης μπορεί να δει το ιστορικό των περιβαλλοντικών τιμών.

2.4.2 Sensitech

Από την άλλη, η Sensitech καλύπτει ένα εξίσου ευρύ φάσμα αναγκών. Η εταιρία ανήκει στον όμιλο Carrier Global Corporation και τα καθήκοντά της ποικίλουν από καταγραφικά μίας χρήσης έως ολοκληρωμένες πλατφόρμες πραγματικού χρόνου. Τα βασικά της καταγραφικά, όπως η TempTale 4 USB, λειτουργούν με παρόμοια λογική USB και κρυπτογραφημένων αναφορών, ενώ τα πιο προηγμένα μοντέλα προσφέρουν και την ασύρματη μετάδοση δεδομένων. Η TempTale BLE επιτρέπει ασύρματη ανάγνωση δεδομένων χωρίς άνοιγμα συσκευής, μέσω εφαρμογής κινητού. Το συγκεκριμένο καταγραφικό εκπέμπει τις μετρήσεις του μέσω Bluetooth σε ακτίνα λίγων μέτρων, χωρίς να απαιτείται σύζευξη και τα δεδομένα ανεβαίνουν άμεσα στο νέφος μόλις ληφθούν από το κινητό [14].

Παράλληλα, η κορυφαία TempTale GEO X παρέχει παρακολούθηση θέσης σε πραγματικό χρόνο και παγκόσμια συνδεσιμότητα, με εύρος θερμοκρασίας -95°C έως 55 °C, ενσωματωμένη σε μία πλατφόρμα νέφους με προηγμένη ανάλυση δεδομένων. Η συνδεσιμότητα επιτυγχάνεται μέσω κυψελοειδούς δικτύου LTE CAT-M1 (4G/5G) με εφεδρεία 2G, ενώ η ενσωμάτωση στη πλατφόρμα SensiWatch τροφοδοτεί αυτοματοποιημένες αποφάσεις αποδοχής/απόρριψης φορτίων και ανάλυση βασικής αιτίας. Το μοντέλο παρακολουθεί τη θερμοκρασία, την υγρασία, τη φωτεινότητα αλλά και τη θέση, αντιμετωπίζοντας τη φωτεινότητα ως κρίσιμη παράμετρο [14].

Ωστόσο, αυτές οι λύσεις απευθύνονται κυρίως στη φαρμακευτική βιομηχανία και σε εφοδιαστική μεγάλης κλίμακας, με υψηλό κόστος αγοράς, εξειδικευμένο λογισμικό και εξάρτηση από συνδρομητικές πλατφόρμες. Έτσι, παρόλο που προσφέρουν υψηλή αξιοπιστία, το κόστος και η εξάρτηση από υπηρεσίες νέφους της καθιστούν απόμακρες για εξειδικευμένες εφαρμογές.

2.4.3 Ακαδημαϊκές Λύσεις

Παράλληλα με τις εμπορικές λύσεις, η ερευνητική κοινότητα έχει προτείνει έναν μεγάλο αριθμό συστημάτων βασισμένων στο IoT. Οι Sergi et al. παρουσίασαν ένα έξυπνο και ασφαλές σύστημα logistics που συνδυάζει τεχνολογίες Διαδικτύου των Πραγμάτων και υπολογιστικού νέφους για την παρακολούθηση μεταφορών. Το σύστημά τους δίνει έμφαση όχι μόνο στη συλλογή δεδομένων, αλλά και στην ασφαλή διακίνηση και ακεραιότητά τους μέσω της υποδομής cloud, εξασφαλίζοντας αξιόπιστη αντιστοίχιση δεδομένων και φορτίου [8]. Οι Baghel et al. πρότειναν μία ολοκληρωμένη λύση αισθητήρων και καταγραφής δεδομένων ειδικά για εφαρμογές παρακολούθησης ψυχρής αλυσίδας. Η πρότασή τους ενσωματώνει ελεγκτή, αισθητήρια και μνήμη σε μια συμπαγή συσκευή χαμηλής κατανάλωσης και κόστους με ασύρματη μετάδοση Bluetooth, με στόχο τη διατήρηση θερμοκρασίας αυστηρά στο εύρος 2-8°C [15]. Οι Afireen και Bajwa ανέπτυξαν ένα σύστημα έξυπνης παρακολούθησης και ειδοποιήσεων για αποθήκες με ψυχρά προϊόντα, δίνοντας έμφαση στην ανάγκη επέκτασης πέρα από την θερμοκρασία και την υγρασία. Το σύστημά τους παρακολουθεί τη φωτεινότητα και τη συγκέντρωση αερίων σε πραγματικό χρόνο, ειδοποιώντας το προσωπικό όταν οι τιμές ξεπεράσουν τα προκαθορισμένα όρια [10]. Τέλος, ο Mejjaoulli αξιοποίησε δεδομένα IoT για ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων για πιο βιώσιμη εφοδιαστική στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Το σύστημά του συλλέγει δεδομένα κατά τη μεταφορά και σε περίπτωση αστοχίας, επεμβαίνει λαμβάνοντας αποφάσεις όπως η διακοπή ή επαναδρομολόγηση (rerouting) του φορτίου για την ελαχιστοποίηση των απωλειών και εξόδων [16].

Τα συστήματα αυτά αποδεικνύουν τη σκοπιμότητα και τις δυνατότητες των μικροελεγκτών IoT και των τεχνολογιών νέφους ως αξιόπιστη βάση για την παρακολούθηση περιβαλλοντικών συνθηκών. Παρ' όλα αυτά, η πλειονότητα εστιάζεται στη θερμοκρασία και στην υγρασία, ενώ πολλές υλοποιήσεις έχουν

χαρακτήρα πειραματικής απόδειξης (proof of concept), χωρίς να συμπεριλαμβάνουν ολοκληρωμένη διεπαφή του χρήστη ή μηχανισμό ασφαλούς σύνδεσης με το αντίστοιχο φορτίο.

Το προτεινόμενο σύστημα χαμηλού κόστους, σε αντίθεση με τις περισσότερες εμπορικές λύσεις, προσφέρει πολυπαραμετρική μέτρηση, περιλαμβάνοντας την υπεριώδη ακτινοβολία και την ένταση του φωτός. Συνδυάζει την ασύρματη μετάδοση BLE με έναν ασφαλή και γρήγορο μηχανισμό ενεργοποίησης μέσω σάρωσης κωδικού QR, ενσωματωμένη απεικόνιση δεδομένων στη πλατφόρμα Firebase και λειτουργία ανεξάρτητη από μόνιμη σύνδεση στο διαδίκτυο κατά τη μέτρηση.

Πίνακας 2.1: Διευθύνσεις αισθητήρων για I²C

Λύση	Μετρούμενες Παράμετροι	Σύνδεση/Ανάκτηση Δεδομένων	Σύνδεση στο διαδίκτυο	Κλίμακα
Testo 184 H1	Θερμοκρασία, υγρασία	USB/άμεση ανάγνωση NFC	Όχι (τοπική ανάκτηση)	Μεμονωμένη αποστολή
Testo 184 G1	Θερμοκρασία, υγρασία, κραδασμοί	USB/NFC	Όχι	Ακατάλληλο για μικρή κλίμακα
Sensitech TempTale 4 USB	Θερμοκρασία	USB, κρυπτογραφημένες αναφορές	Όχι (τοπική ανάκτηση)	Βιομηχανική/Φαρμακευτική
Sensitech TempTale BLE	Θερμοκρασία	Ανάγνωση BLE μέσω εφαρμογής/Αυτόματα στο νέφος	Μερική (Κινητό/νέφος)	Βιομηχανική
Sensitech TempTale GEO X	Θερμοκρασία, υγρασία, φωτεινότητα, θέση (GPS)	Πραγματικός χρόνος, κυψελωτό/Πλατφόρμα SensiWatch	Ναι (μόνιμη κυψελοειδής σύνδεση)	Μεγάλη/Φαρμακευτική
Sergi et al.	Περιβαλλοντικές (ασφάλεια δεδομένων)	IoT αισθητήρες/Νέφος	Ναι (Νέφος)	Ακαδημαϊκό
Baghel et al.	Θερμοκρασία, υγρασία	BLE (τοπική ανάγνωση)/Ενσωματωμένη μνήμη	Όχι	Ακαδημαϊκό
Afreen & Bajwa et al.	Θερμοκρασία, υγρασία, φωτεινότητα, αέρια	IoT πραγματικού χρόνου/Ειδοποιήσεις (Δίκτυο και Νέφος)	Ναι (Ειδοποιήσεις/Απομακρυσμένη πρόσβαση)	Ακαδημαϊκό
Mejjaouli	Θερμοκρασία, υγρασία, θέση (Υποστήριξη αποφάσεων)	Παρακολούθηση πραγματικού χρόνου/DSS	Ναι (Νέφος/Δίκτυο)	Ακαδημαϊκό

2.5 Συμπεράσματα και Ερευνητική Κατεύθυνση

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση που προηγήθηκε ανέδειξε τρία βασικά συμπεράσματα, τα οποία καθορίζουν τις σχεδιαστικές επιλογές της εργασίας. Αρχικά, η ακεραιότητα των αγαθών κατά τη μεταφορά και αποθήκευση δεν εξαρτάται από μία μόνο παράμετρο. Η θερμοκρασία παραμένει ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες, αλλά οι υπόλοιποι τρεις που επιλέχθηκαν επηρεάζουν εξίσου την ποιότητα του περιεχομένου και την ακεραιότητα των φιαλών PET. Η διαπίστωση αυτή ενθαρρύνει την επιλογή της πολυπαραμετρικής προσέγγισης, με την ενσωμάτωση τριών αισθητήρων. Ακόμη, οι υφιστάμενες εμπορικές λύσεις, παρόλο που είναι αξιόπιστες και πιστοποιημένες, χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος, εξάρτηση από εξειδικευμένο λογισμικό και προσανατολισμό σε βιομηχανικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Για αυτό το λόγο, το προτεινόμενο σύστημα συνδυάζει επεξεργαστική ισχύ, ασύρματη επικοινωνία και ευελιξία σύνδεσης αισθητήρων. Τέλος, οι ακαδημαϊκές προτάσεις αποδεικνύουν τη σκοπιμότητα των τεχνολογιών IoT, αλλά χωρίς ολοκληρωμένη διεπαφή του χρήστη ή ασφαλή μηχανισμό αντιστοίχισης της συσκευής με το φορτίο. Συνεπώς, έγινε μία προσπάθεια για την ανάπτυξη ενός συστήματος με χρήση ασύρματης επικοινωνίας BLE σε συνδυασμό με τη σάρωση κωδικού QR, αλλά και την ανάπτυξη εφαρμογής κινητού με τις αντίστοιχες επιλογές που παρέχει.

Συνολικά, η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας συμβάλλει στην αποτύπωση των αδυναμιών των ήδη υπαρχόντων λύσεων, στη διαμόρφωση της σχεδίασης του παρόντος συστήματος και τις δυνατότητές του.

Κεφάλαιο 3ο: Θεωρητικό Υπόβαθρο

3.1 Εισαγωγή

Η υλοποίηση του ολοκληρωμένου συστήματος που παρουσιάζεται στην εργασία προϋποθέτει τη συνδυαστική γνώση και αξιοποίηση των τεχνολογιών από διαφορετικά πεδία των ηλεκτρονικών μηχανικών. Από τα ενσωματωμένα συστήματα και τη μέτρηση αισθητηρίων έως την ασύρματη επικοινωνία και την ανάπτυξη εφαρμογών σε κινητές συσκευές. Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η παρουσίαση του θεωρητικού υποβάθρου των τεχνολογιών που χρησιμοποιήθηκαν, έτσι ώστε ο αναγνώστης να αποκτήσει την απαραίτητη εξοικείωση με τις έννοιες και τα εξαρτήματα που συνθέτουν το σύστημα.

Η κατανόηση της θεωρίας δεν αποτελεί απλώς προϋπόθεση, αλλά και τη βάση για την τεκμηρίωση των επιλογών σχεδίασης και αρχιτεκτονικής που πραγματοποιήθηκαν. Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η επιτυχία ενός συστήματος παρακολούθησης ψυχρής αλυσίδας εξαρτάται τόσο από την αξιοπιστία των εξαρτημάτων, όσο και από τον τρόπο που συνεργάζονται μεταξύ τους.

Το σύστημα της παρούσας εργασίας διαρθρώνεται σε τρία επίπεδα: Το φυσικό επίπεδο του υλικού (Hardware), το ενδιάμεσο επίπεδο της εφαρμογής στο κινητό και το επίπεδο του υπολογιστικού νέφους. Η δομή του παρόντος κεφαλαίου ξεκινά από τα θεμελιώδη εξαρτήματα του υλικού και καταλήγει στην απεικόνιση των δεδομένων με τη βοήθεια της Firebase Realtime Database.

3.2 Ο Μικροελεγκτής ESP32 στο Ενσωματωμένο Σύστημα

Τα ενσωματωμένα συστήματα είναι εξειδικευμένες υπολογιστικές μονάδες, σχεδιασμένες να εκτελούν μία συγκεκριμένη λειτουργία ή ένα περιορισμένο σύνολο λειτουργιών. Μπορούν να ενσωματωθούν σε ένα ευρύτερο σύνολο συσκευών και είναι υπεύθυνα για τον έλεγχο, την παρακολούθηση ή την επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Χαρακτηρίζονται από μικρό μέγεθος, χαμηλό κόστος και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, τα οποία τα καθιστούν ιδανικά για εφαρμογές IoT, όπου απαιτείται συνεχής και αυτόνομη λειτουργία. Στον πυρήνα κάθε ενσωματωμένου συστήματος υπάρχει ένας μικροελεγκτής, δηλαδή ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα που συνδυάζει τον επεξεργαστή, τη μνήμη και περιφερειακές μονάδες εισόδου/εξόδου σε ένα τσιπ.

Για τις ανάγκες αυτού του έργου επιλέχθηκε ο μικροελεγκτής ESP32 της εταιρίας Espressif Systems, και συγκεκριμένα το ESP32-WROOM-32. Η επιλογή αυτή προέκυψε από τον συνδυασμό χαρακτηριστικών που ανταποκρίνονται πλήρως στις απαιτήσεις ενός ασύρματου, φορητού σταθμού μέτρησης. Ο ESP32 έχει καθιερωθεί ως μία από τις πιο γνωστές πλατφόρμες για την ανάπτυξη εφαρμογών IoT, γεγονός που επιβεβαιώνεται από την ευρεία χρήση του σε αντίστοιχα ερευνητικά συστήματα. Πέρα από τα τεχνικά χαρακτηριστικά, το οικοσύστημα ανάπτυξης του ESP32 αποτελείται από πολλά χρήσιμα εργαλεία. Η πλατφόρμα υποστηρίζεται τόσο από το επίσημο πλαίσιο ESP-IDF, όσο και από το περιβάλλον Arduino IDE, με πλήθος έτοιμων βιβλιοθηκών και μεγάλη κοινότητα, πράγματα που επιταχύνουν και διευκολύνουν την συντήρηση του κώδικα. Επιπλέον, το module WROOM-32 διατίθεται ως έτοιμο, πιστοποιημένο εξάρτημα με ενσωματωμένη κεραία PCB και προστασία RF, απλοποιώντας τη σχεδίαση του κυκλώματος. Τέλος, το εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας του καλύπτει τις ακραίες συνθήκες που μπορούν να αντιμετωπιστούν κατά τη μεταφορά και αποθήκευση ψυχρών προϊόντων (-40°C έως +85°C).

3.2.1 Αρχιτεκτονική και Επεξεργαστική Ισχύς

Ο ESP32 διαθέτει τον διπύρνηνο επεξεργαστή Xtensa LX6 της αρχιτεκτονικής των 32 bit, ο οποίος μπορεί να λειτουργεί σε συχνότητα ρολογιού έως και 240 MHz. Η ύπαρξη δύο πυρήνων επιτρέπει την εκτέλεση διαφορετικών εργασιών ταυτόχρονα. Για παράδειγμα, ο ένας πυρήνας μπορεί να αναλάβει την ασύρματη επικοινωνία, όσο ο δεύτερος διαχειρίζεται την ανάγνωση των αισθητήρων και την επεξεργασία δεδομένων. Η επεξεργαστική ισχύς αυτής της κλίμακας είναι επαρκής για τις ανάγκες αυτού του συστήματος, το οποίο εκτελεί περιοδικές μετρήσεις, υπολογισμούς μέσου όρου και διαχείριση της ασύρματης σύνδεσης.

Ως προς τη μνήμη, ο ESP32 διαθέτει 520 KB εσωτερικής μνήμης SRAM, ενώ η μονάδα WROOM-32 συνοδεύεται από 4 MB εξωτερικής μνήμης flash. Η μνήμη flash αναλαμβάνει καθοριστικό ρόλο στη παρούσα εργασία, καθώς σε αυτήν αποθηκεύονται μόνιμα οι καταγεγραμμένες μετρήσεις με τη βοήθεια του συστήματος αρχείων LittleFS, εξασφαλίζοντας πως τα δεδομένα δεν θα χαθούν σε περίπτωση επανεκκίνησης ή διακοπής της τροφοδοσίας.

3.2.2 Ενσωματωμένη Ασύρματη Επικοινωνία

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του μικροελεγκτή είναι η ενσωματωμένη υποστήριξη ασύρματης επικοινωνίας. Ο μικροελεγκτής διαθέτει στο ίδιο τσιπ τόσο μονάδα Wi-Fi (πρότυπο 802.11b/g/n στη ζώνη των 2.4 GHz) όσο και μονάδα Bluetooth, υποστηρίζοντας το κλασικό Bluetooth, αλλά και το Bluetooth Low Energy. Αυτή η ενσωμάτωση καταργεί την ανάγκη για πρόσθετα εξαρτήματα ή επεκτάσεις (modules), μειώνοντας το κόστος, την πολυπλοκότητα του κυκλώματος και το μέγεθος της κατασκευής. Η μονάδα BLE αξιοποιείται για την ασύρματη μετάδοση των δεδομένων προς την εφαρμογή του κινητού, όπως αναλύεται στις επόμενες ενότητες.

3.2.3 Ακροδέκτες και Περιφερειακά

Ο ESP32 προσφέρει έναν μεγάλο αριθμό προγραμματιζόμενων ακροδεκτών γενικής χρήσης (General Purpose Input/Output – GPIO), οι οποίοι μπορούν να διαμορφωθούν με πολλούς τρόπους. Υποστηρίζει μία ποικιλία πρωτοκόλλων περιφερειακής επικοινωνίας, από το SPI, το UART και τους μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (Analog to Digital Converter – ADC) έως και το I²C, που χρησιμοποιήθηκε στο μεγαλύτερο ποσοστό της μελέτης. Η υποστήριξη του διαύλου επικοινωνίας I²C έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς τα τρία αισθητήρια και το ρολόι πραγματικού χρόνου συνδέονται στον ίδιο δίαυλο δεδομένων, χρησιμοποιώντας μόνο δύο ακροδέκτες του μικροελεγκτή. Το εσωτερικό τσιπ λειτουργεί αυστηρά στα 3.3V με ασφαλές εύρος 2.3V έως 3.6V DC, το οποίο το κάνει συμβατό με τους περισσότερους αισθητήρες που επιλέχθηκαν.

3.2.4 Ενεργειακή Διαχείριση

Δεδομένου ότι το σύστημα προορίζεται για συνεχή λειτουργία με μόνιμη τροφοδοσία κατά τη διάρκεια της μεταφοράς και της αποθήκευσης, ο μικροελεγκτής παραμένει ενεργός για να διατηρεί τη σύνδεση BLE και να εκτελεί περιοδικές μετρήσεις. Παρότι ο ESP32 διαθέτει προηγμένες λειτουργίες διαχείρισης ενέργειας, με σημαντικότερη τη λειτουργία deep sleep, δεν αξιοποιήθηκαν στην παρούσα υλοποίηση, καθώς θα διέκοπταν την ενεργή ασύρματη σύνδεση με την εφαρμογή. Ανεξάρτητα από τις ανάγκες της συγκεκριμένης μελέτης, μία λειτουργία η οποία συμβάλλει στην εξοικονόμηση ενέργειας και μείωση των επιπέδων ρευμάτων σε λίγα μA , παραμένει πλεονέκτημα και μπορεί να αποδειχτεί ιδιαίτερα χρήσιμη σε μελλοντικές εφαρμογές.

3.2.5 Σύγκριση

Η επιλογή του ορισμένου μικροελεγκτή φαίνεται ιδανική όταν συγκριθεί με τα εναλλακτικά μοντέλα. Ο Arduino Uno αποτελεί έναν εξίσου γνωστό μικροελεγκτή και παρά την ευκολία χρήσης, δεν διαθέτει ενσωματωμένη ασύρματη επικοινωνία και υστερεί σημαντικά σε επεξεργαστική ισχύ και μνήμη, καθιστώντας το ακατάλληλο για ένα σύστημα που απαιτεί μετάδοση δεδομένων μέσω BLE. Για ασύρματη επικοινωνία απαιτείται εξωτερικό module, όπως ένα HC-05 για Bluetooth Classic (Serial Port Profile – SPP) ή ένα HC-10. Από την άλλη, ένα μικροϋπολογιστής όπως ο Raspberry Pi προσφέρει πολυπύρνηνο επεξεργαστή, πολύ μεγαλύτερη RAM και τρέχει ένα πλήρες λειτουργικό σύστημα, το Linux. Τα πιο σημαντικά μειονεκτήματά του είναι το μεγαλύτερο κόστος σε σχέση με άλλα μοντέλα, καθώς και η σημαντικά μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος από έναν μικροελεγκτή όπως τον ESP32. Ο Raspberry Pi χαρακτηρίζεται από τις υπερβολικές του δυνατότητες και για αυτό δεν αρμόζει για τις απλές ανάγκες αυτού του συστήματος.

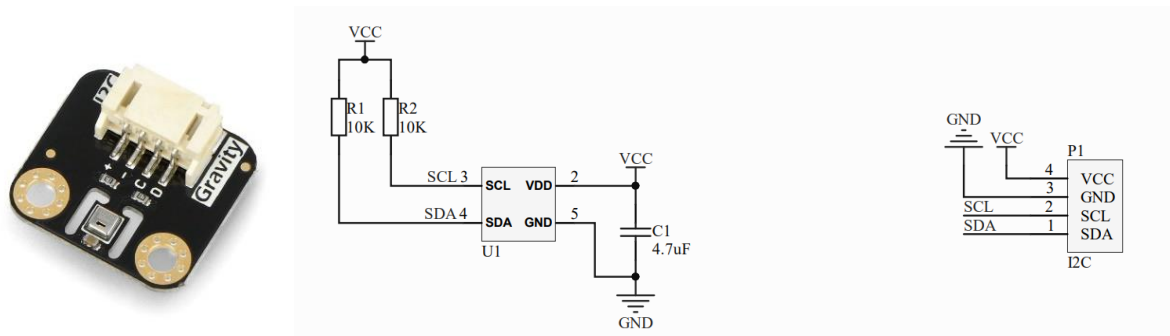
3.3 Αισθητήρες Μέτρησης Περιβαλλοντικών Παραμέτρων

Κεντρικό τμήμα κάθε συστήματος παρακολούθησης είναι το υποσύστημα των αισθητήρων, το οποίο μετατρέπει τα φυσικά, ωμά μεγέθη του περιβάλλοντος σε ψηφιακά και μετρήσιμα δεδομένα που μπορεί να διαβάσει ο μικροελεγκτής. Για την κάλυψη των κρίσιμων παραγόντων, το παρόν σύστημα ενσωματώνει τρεις διαφορετικούς αισθητήρες: τον AHT20 για τη μέτρηση θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, τον TSL25911 για την ένταση του φωτός και τον LTR390 για την μέτρηση της υπεριώδους ακτινοβολίας.

Το μεγάλο πλεονέκτημα και κοινό χαρακτηριστικό των τριών αισθητήρων είναι η επικοινωνία τους μέσω του διαύλου I²C. Σε αντίθεση με τους αναλογικούς αισθητήρες, οι οποίοι παράγουν μια συνεχώς μεταβαλλόμενη τάση που πρέπει να μετατραπεί σε ψηφιακή μορφή μέσω του μετατροπέα ADC του μικροελεγκτή, οι ψηφιακοί αισθητήρες συμπεριλαμβάνουν τον δικό τους μετατροπέα και παραδίδουν απευθείας την έτοιμη ψηφιακή τιμή. Το κάθε αισθητήριο διαθέτει τη δική του μοναδική διεύθυνση I²C, γεγονός που τους επιτρέπει να συνυπάρχουν στον ίδιο δίαυλο χωρίς σύγκρουση. Το αποτέλεσμα είναι μία απλούστερη συνδεσμολογία, όπου και οι τρεις αισθητήρες μοιράζονται τις δύο ίδιες γραμμές δεδομένων.

3.3.1 AHT20: Αισθητήρας Θερμοκρασίας και Υγρασίας

Το AHT20 αποτελεί ένα αισθητήριο υψηλής ακριβείας που παρέχει ψηφιακή έξοδο και μετρά δύο από τις πιο σημαντικές παραμέτρους της ψυχρής αλυσίδας, τη θερμοκρασία και την υγρασία. Ενσωματώνει έναν χωρητικό αισθητήρα υγρασίας και έναν αισθητήρα θερμοκρασίας ημιαγωγικού τύπου στο τσιπ σε ένα ενιαίο ολοκληρωμένο κύκλωμα, το οποίο παραδίδει προσαρμοσμένες ψηφιακές τιμές (που έχουν περάσει από calibration) μέσα από τον δίαυλο I²C. Ένας αισθητήρας χωρητικότητας (capacitive sensor) ανιχνεύει αντικείμενα ή ουσίες, μετρώντας τις αλλαγές στο ηλεκτρικό πεδίο. Στη περίπτωση του αισθητήρα υγρασίας, χρησιμοποιείται ένας μικρός πυκνωτής, φτιαγμένος από υλικό που απορροφά την υγρασία και τοποθετείται ανάμεσα σε δύο ηλεκτρικές πλάκες. Όταν ο αέρας γίνεται νωπός, το υλικό αυτό απορροφά νερό και αλλάζει η ικανότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, η μεταβολή της οποίας μετατρέπεται σε μέτρηση σχετικής υγρασίας.



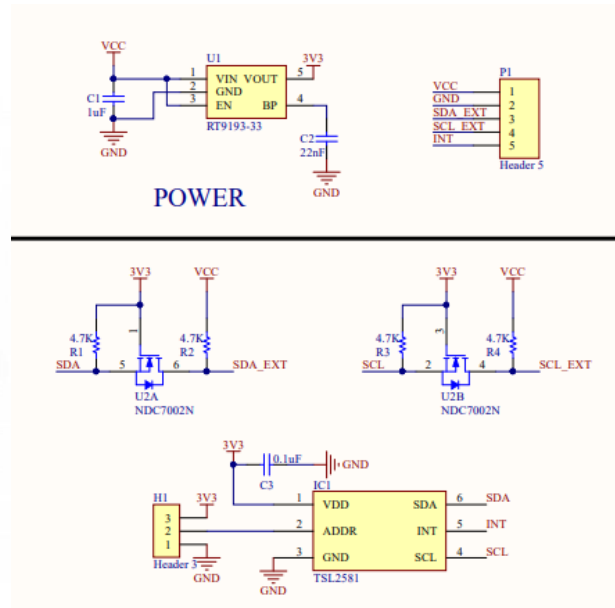
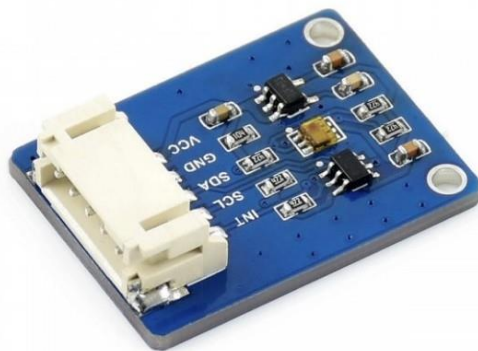
Εικόνα 3.1: Αισθητήρας Θερμοκρασίας και Υγρασίας (AHT20)

Ο αισθητήρας μπορεί να μετρήσει από θερμοκρασίες -40 έως $+85^{\circ}\text{C}$, με τυπική ακρίβεια $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ και σχετική υγρασία σε ολόκληρο το εύρος, από 0 έως $100\% \text{ RH}$, με τυπική ακρίβεια περίπου $\pm 2\% \text{ RH}$. Το εύρος τιμών και το σφάλμα ακρίβειας είναι ικανοποιητικά για τις συνθήκες υπό τις οποίες θα λειτουργήσει το σύστημα ψυχρής αλυσίδας κατά τη μεταφορά και αποθήκευση εμφιαλωμένων νερών. Η βαθμονόμηση εξασφαλίζει την ακρίβεια και τη σωστή απόδοση των μετρήσεων της συσκευής, χωρίς να χρειάζεται επιπρόσθετη ρύθμιση. Το αισθητήριο AHT20 χαρακτηρίζεται από εξαιρετική μακροπρόθεσμη σταθερότητα (λιγότερο από 0.04°C και $0.5\% \text{ RH}$ απόκλιση ανά έτος), γρήγορη ανταπόκριση, προσαρμοστικότητα και μεγάλη προστασία κατά των παρεμβολών. Το εύρος της τάσης λειτουργίας είναι $2 - 5\text{V DC}$ και συνδέεται στον ακροδέκτη των 3.3V του μικροελεγκτή.

Το σχηματικό της Εικόνας 3.1 αποτυπώνει τη διασύνδεση του AHT20 με τον μικροελεγκτή μέσα από τέσσερις αποδέκτες, τη τροφοδοσία, τη γείωση και τις δύο σειριακές γραμμές του διαύλου I²C. Οι δύο αντιστάσεις R1 και R2 των $10\text{k}\Omega$ που συνδέονται από τις γραμμές SCL και SDA προς τη τροφοδοσία, λειτουργούν ως αντιστάσεις ανόδου (pull-up resistors). Είναι απαραίτητες για τη σωστή λειτουργία του διαύλου I²C, καθώς λειτουργεί με λογική ανοιχτής εκροής (open drain), όπου οι συσκευές μπορούν να δημιουργήσουν διαδρομή προς τη γείωση και η τάση της γραμμής να πέσει στο LOW. Χωρίς τις αντιστάσεις pull-up, οι γραμμές δε θα επέστρεφαν στην υψηλή λογική και η επικοινωνία θα ήταν αδύνατη. Ο πυκνωτής C1, που βρίσκεται ανάμεσα στη τροφοδοσία και τη γείωση, είναι πυκνωτής απόζευξης (decoupling), δηλαδή σταθεροποιεί τη τάση τροφοδοσίας και φιλτράρει τον θόρυβο και τις απότομες μεταβολές ρεύματος, βελτιώνοντας την αξιοπιστία των μετρήσεων. Αυτός είναι και ο λόγος που τοποθετείται όσο πιο κοντά γίνεται στον αισθητήρα. Στην αναπτυξιακή πλακέτα που αξιοποιήθηκε, τόσο οι αντιστάσεις pull-up, όσο και ο πυκνωτής είναι ήδη ενσωματωμένα στο module.

3.3.2 TSL25911: Αισθητήρας Φωτεινότητας

Το TSL25911 αποτελεί το αισθητήριο μέτρησης της έντασης ορατού φωτός στο σύστημα και είναι ένας μετατροπέας φωτός σε ψηφιακό σήμα πολύ υψηλής ευαισθησίας. Η σημαντικότερη του ιδιότητα είναι το μεγάλο δυναμικό εύρος των μετρήσεων που μπορεί να λάβει, καθώς έχει την δυνατότητα να μετρήσει ένταση φωτός από $188\mu\text{Lux}$ έως 88000 Lux , καλύπτοντας ένα εύρος της τάξης του $600\text{M}:1$. Με αυτό τον τρόπο, μπορεί να καταγράψει με ακρίβεια το ελάχιστο φως σε ένα σκοτεινό φορτίο, αλλά και την άμεση ηλιακή ακτινοβολία χωρίς κορεσμό. Ενσωματώνει το τσιπ TSL25911FN, το οποίο μετράει το υπέρυθρο και το ορατό φως και παρέχει εσωτερικούς ADC, μετατρέποντας την ένταση του φωτός του περιβάλλοντος σε σήμα ψηφιακής εξόδου.



Εικόνα 3.2: Αισθητήρας Φωτεινότητας (TSL25911)

Εξίσου σημαντικό χαρακτηριστικό του αισθητήρα είναι η ύπαρξη δύο διαφορετικών φωτοдиодών: μίας ευρέος φάσματος (ορατό + υπέρυθρο) και μίας που ανταποκρίνεται μόνο στο υπέρυθρο. Με τη βοήθεια των δύο ενσωματωμένων μετατροπών ADC, ο αισθητήρας μετρά ξεχωριστά τα δύο κανάλια και αφού αφαιρέσει το τμήμα του υπέρυθρου, υπολογίζει την ένταση του φωτός σε Lux με παρόμοιο τρόπο απόκρισης του ανθρώπινου ματιού. Ο τρόπος απεικόνισης της φωτεινότητας του περιβάλλοντος αποδεικνύεται πιο αποτελεσματικός από έναν απλό φωτοαισθητήρα.

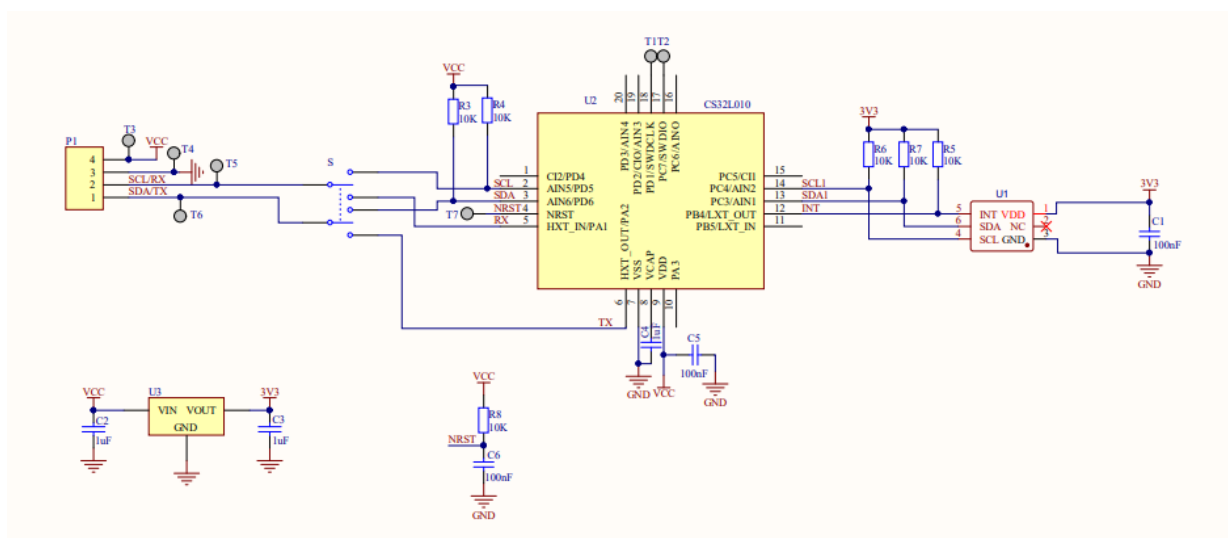
Το σχηματικό της πλακέτας απεικονίζεται στην Εικόνα 3.2, όπου πρόκειται για ένα πιο περίπλοκο κύκλωμα από τον αισθητήρα θερμοκρασίας και υγρασίας. Στο τμήμα τροφοδοσίας, ο σταθεροποιητής χαμηλής πτώσης τάσης RT9193-33 δέχεται την τάση εισόδου (VCC) και την ρυθμίζει στα 3.3V σταθερά για την τροφοδοσία του αισθητήρα, ενώ οι πυκνωτές C1 και C2 στην έξοδο εξασφαλίζουν την σταθερότητά της. Το μεγάλο εύρος της τάσης λειτουργίας του module (3.3-5V) βασίζεται στον σταθεροποιητή. Στη συνέχεια φαίνεται ένας αμφίδρομος Level Shifter του διαύλου I²C, με δύο τρανζίστορ MOSFET (NDC7002N) και τέσσερις αντιστάσεις pull-up των 4.7kΩ. Δύο αντιστάσεις βρίσκονται στη πλευρά των 3.3V του αισθητήρα (R1,R2) και δύο αντιστάσεις στη πλευρά της εξωτερικής τάσης (R3, R4). Αυτό το κύκλωμα μεταφράζει τις σειριακές γραμμές SDA και SCL ανάμεσα στο πεδίο τάσης του αισθητήρα (3.3V) και το πεδίο της εξωτερικής σύνδεσης (SDA_EXT, SCL_EXT). Το τρίτο τμήμα περιλαμβάνει το ολοκληρωμένο του αισθητήρα (IC1) με τους ακροδέκτες τροφοδοσίας (VDD/GND), τις γραμμές I²C (SDA/SCL), τον ακροδέκτη διακοπής (INT) και τον ακροδέκτη επιλογής διεύθυνσης (ADDR). Ο πυκνωτής C3 λειτουργεί ως πυκνωτής απόζευξης, φιλτράροντας τον θόρυβο της τροφοδοσίας. Η σύνδεση με τον μικροελεγκτή γίνεται από τον σύνδεσμο P, όπου ο ESP32 επικοινωνεί με τις γραμμές SDA_EXT/SCL_EXT, οι οποίες μέσω του Level Shifter αντιστοιχίζονται στις εσωτερικές γραμμές του αισθητήρα. Αντιθέτως, ο ακροδέκτης INT, που δεν αξιοποιείται στο προτεινόμενο σύστημα μπορεί προαιρετικά να ειδοποιεί τον μικροελεγκτή όταν η φωτεινότητα ξεπεράσει ένα προκαθορισμένο όριο.

Η επιλογή του TSL25911 αντικατέστησε μία αρχική σχεδίαση που προέβλεπε τη χρήση ενός αναλογικού αισθητήρα φωτός. Η αλλαγή σε ψηφιακό αισθητήρα σημαίνει πως η ψηφιακή έξοδος δε θα

επηρεάζεται από τον θόρυβο, σε σύγκριση με ένα αναλογικό σήμα. Επιπλέον, από τη στιγμή που διαθέτει ενσωματωμένους μετατροπείς, δεν καταλαμβάνει αναλογικό ακροδέκτη του ESP32, αλλά συνδέεται κατευθείαν στον κοινό δίαυλο PC, μαζί με τους υπόλοιπους αισθητήρες, μέσα από την σταθερή διεύθυνση 0x29. Τέλος, η χαμηλή κατανάλωση ρεύματος φτάνει τα 0.4 mA κατά την μέτρηση του φωτός, γεγονός που καθιστά το αισθητήριο ιδανικό για συστήματα καταγραφής δεδομένων. Η τάση λειτουργίας είναι 3.3 ή 5V, για αυτό και συνδέεται στον ίδιο ακροδέκτη με τον αισθητήρα θερμοκρασίας και υγρασίας, το 3.3V.

3.3.3 LTR390: Αισθητήρας Υπεριώδους Ακτινοβολίας

Ο αισθητήρας LTR390 είναι ένας ακόμη ψηφιακός αισθητήρας και ο πιο σημαντικός για την σχεδίαση του συστήματος, καθώς μετράει την υπεριώδη ακτινοβολία του περιβάλλοντος και συμβάλλει στον εντοπισμό αλλοίωσης ακεραιότητας των φιαλών PET. Οι δύο λειτουργίες που διαθέτει είναι η λειτουργία μέτρησης ορατού φωτός (Ambient Light Sensing – ALS) και η λειτουργία μέτρησης υπεριώδους ακτινοβολίας (Ultraviolet Sensing – UVS). Με τον αισθητήρα TSL25911 να διαβάξει την τιμή του φωτός περιβάλλοντος, η πρώτη λειτουργία του LTR390 δεν αξιοποιείται σε κανένα μέρος της εργασίας.



Εικόνα 3.3: Αισθητήρας Υπεριώδους Ακτινοβολίας (LTR390)

Το αισθητήριο έχει φασματική απόκριση UV από 280 έως 430nm, καλύπτοντας την UV-A και UV-B. Η έξοδος του καναλιού UV εμφανίζεται ως μία ψηφιακή τιμή των 16 έως 20 bit, από την οποία προκύπτει ο δείκτης υπεριώδους ακτινοβολίας (Ultraviolet Index - UVI) με τη βοήθεια κατάλληλης μαθηματικής σχέσης. Σε αντίθεση με τους άλλους αισθητήρες, το module LTR390 μπορεί να δουλέψει σε λειτουργία I²C ή UART με τη βοήθεια του διακόπτη που φαίνεται στην Εικόνα 3.3. Για την αποφυγή χρήσης δύο πρωτοκόλλων επικοινωνίας, ο αισθητήρας παρέμεινε σε λειτουργία I²C. Επομένως, διαθέτει μία σταθερή διεύθυνση I²C (0x53), ενσωματωμένο μετατροπέα ADC, καθώς και σταθεροποιητή/μετατροπέα τάσης πάνω στο module (U3 στην Εικόνα 3.3), καθιστώντας τον συμβατό με τάση λειτουργίας από 3.3V έως 5V. Ο μοναδικός του σκοπός είναι η μετατροπή δεδομένων φωτός και ακτινοβολίας σε ένα ψηφιακό σήμα που μπορεί να σταλεί με ένα από τα δύο πρωτόκολλα επικοινωνίας.

Η Εικόνα 3.3 φανερώνει πως το module, πέρα από τον αισθητήρα, συμπεριλαμβάνει και τον δικό της μικροελεγκτή CS32L010. Το ίδιο το ολοκληρωμένο LTR390 υποστηρίζει μόνο I²C, ενώ η δυνατότητα UART προέρχεται από αυτό τον μικροελεγκτή. Στη τροφοδοσία, ο σταθεροποιητής δέχεται τάση εισόδου και παρέχει σταθερά 3.3V σε όλα τα υπόλοιπα εξαρτήματα, με τους πυκνωτές C2 και C3 για σταθεροποίηση. Ο σταθεροποιητής επιτρέπει τη τροφοδοσία της πλακέτας από 3.3V έως 5V, παρόλο που το ολοκληρωμένο λειτουργεί σε χαμηλότερη τάση.

Κεντρικό ρόλο έχει ο μικροελεγκτής του module, ο οποίος επικοινωνεί εσωτερικά με τον αισθητήρα LTR390 μέσω ενός δικού του διαύλου I²C, διαβάζει τις μετρήσεις και τις προωθεί προς τον εξωτερικό σύνδεσμο P1. Έπειτα, τα δεδομένα μπορούν να μεταφερθούν ως ένα από τα δύο πρωτόκολλα επικοινωνίας (SCL/SDA ή RX/TX), με την επιλογή να γίνεται μέσω του διακόπτη S. Οι αντιστάσεις R3 και R4 λειτουργούν ως pull-up του εξωτερικού διαύλου, ενώ το κύκλωμα επαναφοράς NRST (αντίσταση R8 και πυκνωτής C6) και ο κρύσταλλος εξασφαλίζουν την ομαλή εκκίνηση και χρονοισμό του μικροελεγκτή. Τέλος, ο αισθητήρας συνδέεται αποκλειστικά με τον εσωτερικό δίαυλο I²C του μικροελεγκτή, με πυκνωτή απόζευξης C1 στην τροφοδοσία του και τον ακροδέκτη διακοπής INT. Γίνεται κατανοητό πως ο κύριος σκοπός του ενδιάμεσου μικροελεγκτή είναι η μετάφραση των δεδομένων στο επιλεγμένο πρωτόκολλο.

3.4 Πρωτόκολλο Επικοινωνίας και RTC

Στη προηγούμενη ενότητα, έγινε ανάλυση των αισθητήρων και αναφέρθηκε πολλές φορές ο κοινός δίαυλος μέσα από τον οποίο επικοινωνούν με τον μικροελεγκτή. Παρακάτω, γίνεται μία πιο αναλυτική περιγραφή του πρωτοκόλλου επικοινωνίας που αξιοποιήθηκε, καθώς και το ρολόι πραγματικού χρόνου (RTC). Το RTC συνδέεται στον ίδιο δίαυλο και εξασφαλίζει την ακριβή και έγκαιρη χρονική σήμανση μετρήσεων.

3.4.1 Πρωτόκολλο Σειριακής Επικοινωνίας I²C

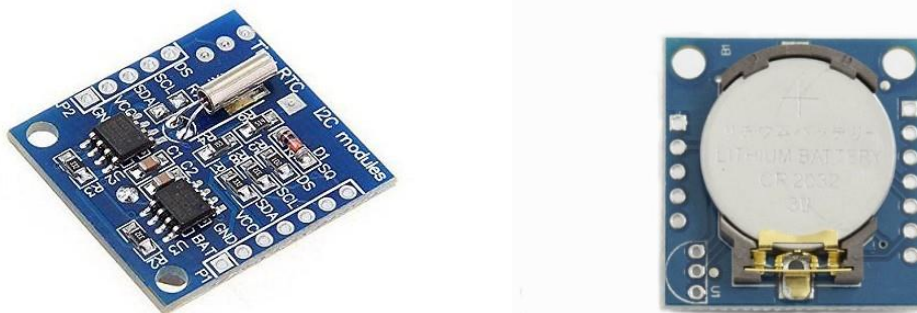
Το I²C αποτελεί ένα σύγχρονο σειριακό πρωτόκολλο επικοινωνίας, το οποίο αναπτύχθηκε για την σύνδεση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων χαμηλής ταχύτητας σε μικρές αποστάσεις, όπως στη περίπτωση ενός μικροελεγκτή και των αισθητηρίων του. Το πρωτόκολλο I²C σήμερα υλοποιείται από περισσότερες από 50 εταιρίες και χρησιμοποιείται σε ποικίλες αρχιτεκτονικές ελέγχου, όπως τα System Management Bus (SMBus), Power Management Bus (PMBus), Display Data Channel (DDC) και Advanced Telecom Computer Architecture (ATCA). Το βασικό πλεονέκτημα είναι ότι χρησιμοποιεί μόνο δύο γραμμές σήματος για την επικοινωνία με οποιονδήποτε αριθμό συσκευών, τη γραμμή σειριακών δεδομένων (Serial Data - SDA) και τη γραμμή σειριακού ρολογιού (Serial Clock - SCL). Κάθε εξάρτημα που

συνδέεται στον δίαυλο I²C, παίρνει μοναδική διεύθυνση και τα εξαρτήματα μεταξύ τους βασίζονται σε μία αρχιτεκτονική αφέντη – υπηρέτη (master – slave). Στη προκειμένη περίπτωση, ο μικροελεγκτής λειτουργεί ως ο αφέντης (master), ελέγχοντας την γραμμή σειριακού ρολογιού και ξεκινώντας κάθε επικοινωνία, ενώ οι αισθητήρες και το ρολόι πραγματικού χρόνου λειτουργούν ως υπηρέτες, απαντώντας μόνο όταν ο αφέντης τους το ζητήσει. Ο δίαυλος διαθέτει αλγόριθμο ανίχνευσης σύγκρουσης και διαιτησίας για την αποφυγή της αλλοίωσης των δεδομένων όταν δύο ή περισσότεροι αφέντες ξεκινήσουν μετάδοση δεδομένων την ίδια χρονική στιγμή. Και οι δύο γραμμές είναι ανοιχτής εκροής (open drain), που σημαίνει πως απαιτούν αντιστάσεις προς τη τροφοδοσία (pull-up resistors) προκειμένου να διατηρούν το Logic High. Στα module των αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκαν, αυτές οι αντιστάσεις είναι ήδη ενσωματωμένες.

Ο τρόπος με τον οποίο πολλές συσκευές μπορούν να συνυπάρχουν στον ίδιο δίαυλο χωρίς σύγκρουση είναι η διευθυνσιοδότηση. Κάθε συσκευή στον δίαυλο I²C διαθέτει μία μοναδική διεύθυνση, από την οποία μπορεί να λάβει δεδομένα συνεχώς και όταν ο αφέντης αποφασίσει να επικοινωνήσει με μία συγκεκριμένη συσκευή, εκπέμπει πρώτα τη διεύθυνσή της στη γραμμή δεδομένων, η αντίστοιχη συσκευή ανταποκρίνεται, ενώ οι υπόλοιπες αγνοούν την επικοινωνία. Με αυτό το τρόπο, μειώνεται ο αριθμός ακροδεκτών που χρησιμοποιεί ο μικροελεγκτής και τέσσερις διαφορετικές συσκευές μοιράζονται τις δύο ίδιες σειριακές γραμμές. Στον ESP32, ο δίαυλος I²C υλοποιείται από τους ακροδέκτες GPIO21 (SDA) και GPIO22 (SCL).

3.4.2 DS1307: Ρολόι Πραγματικού Χρόνου

Η καταγραφή μίας μέτρησης έχει νόημα μόνο όταν συνοδεύεται από την αντίστοιχη χρονική στιγμή κατά την οποία λήφθηκε. Χωρίς κάποιο όργανο παρακολούθησης χρόνου, δεν θα μπορούσε να αναπαρασταθεί η εξέλιξη των τιμών με την πάροδο του χρόνου, ούτε να εντοπιστεί η χρονική στιγμή ή περίοδος που πραγματοποιήθηκε υπέρβαση των ορίων. Σημαντικό χαρακτηριστικό της συσκευής είναι η δυνατότητά της να λειτουργεί χωρίς να είναι συνδεδεμένη στο διαδίκτυο. Για τον σκοπό αυτό, το σύστημα αξιοποιεί το ολοκληρωμένο DS1307 (Εικόνα 3.4).



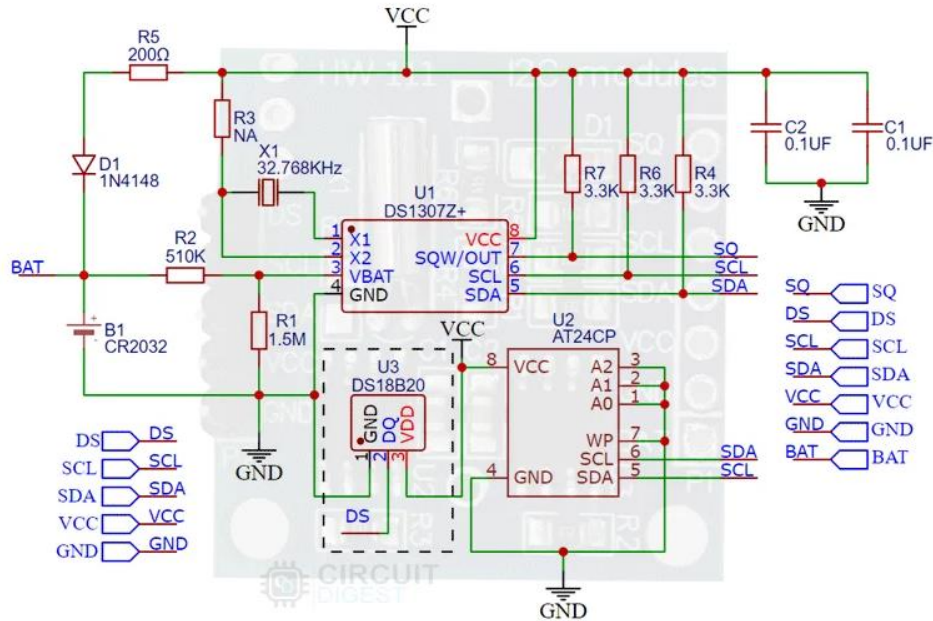
Εικόνα 3.4: Ρολόι Πραγματικού Χρόνου (DS1307)

Ο ESP32, όπως οι περισσότεροι μικροελεγκτές, δεν διαθέτει κάποιο εσωτερικό μηχανισμό διατήρησης της πραγματικής ώρας σε περίπτωση που διακοπεί η τροφοδοσία του. Αν το σύστημα βασιζόταν αποκλειστικά στο εσωτερικό ρολόι του ESP32, στην περίπτωση επανεκκίνησης ή διακοπής ρεύματος κατά τη μεταφορά, το ρολόι θα μηδενιζόταν και θα διέκοπτε τη συνεχή ροή των δεδομένων. Το DS1307 αποτελεί ένα εξειδικευμένο ολοκληρωμένο κύκλωμα που διατηρεί την ημερομηνία και την ώρα με ακρίβεια (δευτερόλεπτα, λεπτά, ώρες, ημέρα, μήνας και έτος), ανεξάρτητα από τον μικροελεγκτή και επικοινωνεί μαζί του μέσω του διαύλου I²C στη διεύθυνση 0x68. Παρόλο που το DS1307 διατηρεί την ώρα σε ημερολογιακή μορφή, από το έτος έως το δευτερόλεπτο, η μορφή αυτή δεν είναι πρακτική για την αποθήκευση και μεταφορά δεδομένων. Συνεπώς, το σύστημα μετατρέπει την ένδειξη σε χρόνο Unix ή epoch time, ο οποίος ορίζεται ως ο συνολικός αριθμός των δευτερολέπτων που έχουν περάσει από την 1^η Ιανουαρίου του 1970, 00:00:00 UTC. Αξιοποιώντας αυτή τη στιγμή ως σημείο αναφοράς, οποιαδήποτε χρονική στιγμή μπορεί να μετατραπεί σε έναν ενιαίο ακέραιο αριθμό, αντί για έξι ξεχωριστά πεδία. Η αναπαράσταση αυτή προκαλεί πιο οικονομική αποθήκευση στη μνήμη flash του σταθμού και διευκολύνει τους υπολογισμούς και συγκρίσεις της εφαρμογής. Η χρονική περίοδος μεταξύ δύο ενδείξεων μπορεί να βρεθεί από την απλή αφαίρεση δύο ακεραίων και η χρονολογική ταξινόμηση των μετρήσεων γίνεται άμεσα. Έτσι, κάθε καταγεγραμμένη μέτρηση συνοδεύεται από έναν ακέραιο χρόνο Unix σε όλη τη διαδρομή του συστήματος και απλοποιεί τον συγχρονισμό των δεδομένων με την εφαρμογή του κινητού και στη συνέχεια, την πλατφόρμα Firebase.

Στον πυρήνα του, ένα RTC βασίζεται σε έναν ταλαντωτή κρυστάλλου. Ο κρύσταλλος χαλαζίας παράγει έναν πολύ σταθερό παλμό συχνότητας 32.768 kHz (ή 2¹⁵), η οποία με τη βοήθεια ενός εσωτερικού κυκλώματος διαίρεσης, υποδιαιρείται σε έναν καθαρό παλμό ενός δευτερολέπτου. Στη συνέχεια, ο DS1307 αποθηκεύει σε μία σειρά εσωτερικών καταχωρητών την ώρα και την ημερομηνία με τη μορφή δυαδικά κωδικοποιημένου δεκαδικού, αναπαριστώντας τους αριθμούς 0 έως 9 με μία σειρά δυαδικού συστήματος των 4-bit. Το ολοκληρωμένο έχει τη δυνατότητα αυτόματης διαχείρισης του ημερολογίου, ακόμα και των δίσεκτων ετών, καθώς επιπλέον συμπεριλαμβάνει και 56 bytes μνήμης RAM διατηρούμενης από την μπαταρία. Πάνω στη πλακέτα υπάρχει και η μνήμη EEPROM 24C32 στη διεύθυνση I²C 0x50, η οποία δεν αξιοποιείται, καθώς η αποθήκευση γίνεται στη μνήμη flash με τη βοήθεια της LittleFS.

Το σχηματικό της Εικόνας 3.5, αποτυπώνει τη δομή ενός τυπικού module RTC. Κεντρικό ρολόι έχει το ολοκληρωμένο DS1307, το οποίο μετρά τον χρόνο με τη βοήθεια εξωτερικού κρυστάλλου χαλαζία (X1) και συνδεδεμένου στους ακροδέκτες X1/X2. Η επικοινωνία με τον μικροελεγκτή γίνεται μέσω του διαύλου I²C, οι οποίες διαθέτουν τις γνωστές αντιστάσεις pull-up των 3.3k Ω (R4, R6, R7), ενώ οι πυκνωτές C1 και C2 αναλαμβάνουν την απόζευξη της τροφοδοσίας. Στον δίαυλο I²C είναι συνδεδεμένη και η μνήμη EEPROM AT24C32 (U2) στη διεύθυνση 0x50, η οποία δεν αξιοποιείται στην παρούσα υλοποίηση. Στο σχηματικό διακρίνεται και μία θέση για αισθητήρα θερμοκρασίας DS18B20 (U3), που επίσης παραμένει αχρησιμοποίητη, καθώς η θερμοκρασία μετριέται από τον AHT20.

Το σημαντικότερο τμήμα για τη λειτουργία εκτός δικτύου είναι το κύκλωμα εφεδρικής τροφοδοσίας. Η μπαταρία CR2032 (B1) συνδέεται στον ακροδέκτη VBAT του DS1307 και αναλαμβάνει τη διατήρηση της ώρας όταν λείπει η κύρια τροφοδοσία. Το DS1307 διαθέτει εσωτερικό κύκλωμα ανίχνευσης πτώσης τάσης, όπου όταν η τάση VCC πέσει κάτω από 1.25 φορές από την τάση της μπαταρίας, το ολοκληρωμένο αλλάζει αυτόματα στην εφεδρική μπαταρία. Αντίστοιχα, όταν επανέλθει το VCC, επιστρέφει στην κανονική τροφοδοσία και το ρεύμα από την μπαταρία γίνεται αμελητέο. Σημειώνεται πως το δίκτυο διόδου D1 (1N4148) με την αντίσταση R5 (200 Ω) και τον διαιρέτη τάσης (R1, R2) αποτελεί κύκλωμα φόρτισης σχεδιασμένο για επαναφορτιζόμενη μπαταρία LIR2031.



Εικόνα 3.5: Σχηματικό του RTC

Η λειτουργία του εξαρτάται από την εξωτερική μπαταρία τύπου coin cell, που συνδέεται στο module. Με αυτό τον τρόπο, το ρολόι συνεχίζει να μετράει το χρόνο, ακόμη και αν το υπόλοιπο σύστημα είναι εκτός λειτουργίας ή αποσυνδεδεμένο από την τροφοδοσία. Όταν το κύκλωμα επανέλθει σε λειτουργία, ο ESP32 διαβάσει απλώς την τρέχουσα χρονική σήμανση από το RTC και συνεχίζει τη καταγραφή. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό για ένα σύστημα βασισμένο στη λειτουργία εκτός δικτύου. Οι συνθήκες κατά τη διάρκεια μεταφοράς συσκευασμένων προϊόντων μπορεί να είναι απρόβλεπτες και τις περισσότερες φορές δεν εγγυάται η σύνδεση στο διαδίκτυο. Επομένως, το ρολόι πραγματικού χρόνου εξασφαλίζει την σωστή χρονική σήμανση για κάθε μέτρηση που πραγματοποιείται, ανεξαρτήτως των συνθηκών.

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά Αισθητήρων

Αισθητήρας	Λειτουργία	Εύρος Μέτρησης	Ακρίβεια / Ανάλυση	Τάση Λειτουργίας	Διεύθυνση I ² C
AHT20	Θερμοκρασία και Σχετική Υγρασία	-40 έως 85°C – 0 έως 100% RH	±0,3 °C - ±2RH	2 – 5.5V (3.3V)	0x38
TSL25911	Ένταση ορατού φωτός	188μLux – 88.000 Lux	0.4 mA στη μέτρηση	3.3 – 5V	0x29
LTR390	Υπεριώδης ακτινοβολία	16-20 bit – 280 έως 430 nm	Ρυθμιζόμενη ανάλυση / κέρδος	3.3 – 5V	0x53
DS1307 (RTC)	Πολόι πραγματικού χρόνου	s/min/h/day/ month/year	Ανάλυση 1s (κρύσταλλος χαλαζία)	2–3.5V (VBAT) 5V (VCC)	0x68

Ο Πίνακας 3.1 συνοψίζει τις μοναδικές διευθύνσεις του κάθε αισθητήρα που συνδέεται στον δίαυλο επικοινωνίας PC, καθώς και τα βασικότερα στοιχεία τους που ήταν σημαντικά για την διεξαγωγή των πειραμάτων σε επόμενο στάδιο.

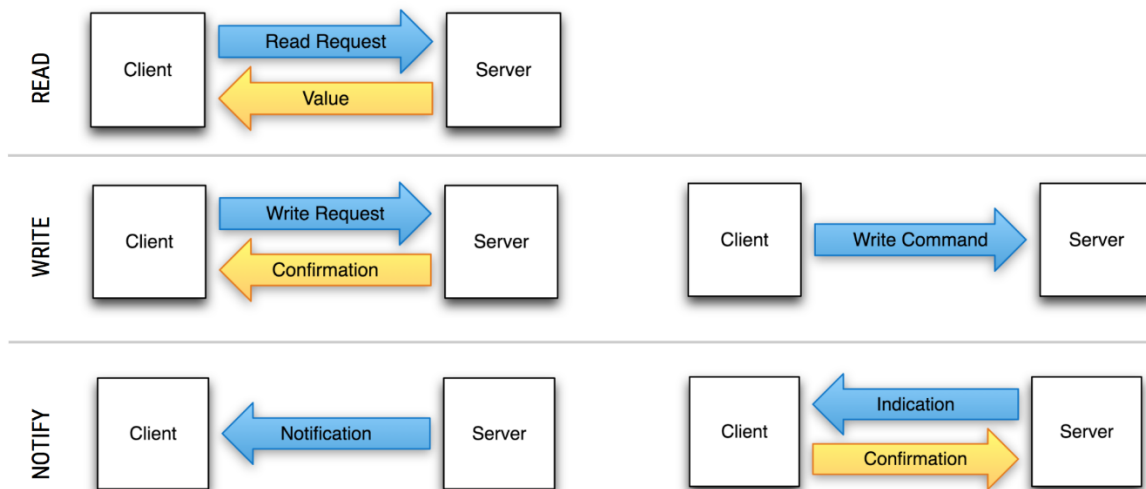
3.5 Ασύρματη Επικοινωνία

Η ασύρματη μεταφορά δεδομένων από τον σταθμό μέτρησης προς μία εξωτερική συσκευή περιορίζεται σε έναν συγκεκριμένο αριθμό πρωτοκόλλων όταν υπάρχει έλλειψη σύνδεσης στο διαδίκτυο. Δημοφιλή πρωτόκολλα ασύρματης επικοινωνίας είναι το Zigbee (IEEE 802.15.4), LoRaWAN, το NFC (Near Field Communication) και άλλα. Οι ποικίλες ανάγκες των εφαρμογών IoT, από κάμερες παρακολούθησης έως αισθητήρες περιβάλλοντος, έχουν δημιουργήσει ένα πλούσιο οικοσύστημα εξειδικευμένων πρωτοκόλλων και για να επιλέξουμε, πρέπει να γνωρίζουμε τις βασικές απαιτήσεις για τον σχεδιασμό της εφαρμογής. Οι βασικότερες παράμετροι που καθορίζουν την επιλογή μίας ασύρματης τεχνολογίας είναι η κατανάλωση ενέργειας, η εμβέλεια, ο ρυθμός μεταφοράς δεδομένων (bandwidth), το επίπεδο ασφάλειας, το κόστος, η διαλειτουργικότητα και η καθυστέρηση. Όταν μία τεχνολογία εμφανίζει υπεροχή σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως την απόσταση που καλύπτει, είναι αναπόφευκτο να υστερεί σε άλλες παραμέτρους, όπως το υψηλό κόστος ή την υψηλή κατανάλωση ρεύματος. Επομένως, η αναγνώριση πλεονεκτημάτων και περιορισμών είναι υποχρεωτική για την υλοποίηση ενός συστήματος IoT.

Το Bluetooth είναι ένα πρότυπο ασύρματης επικοινωνίας μικρής εμβέλειας, με ζώνη συχνοτήτων των 2.4GHz, που ανήκει στην κατηγορία ζώνης ISM (Industrial, Scientific, Medical). Αποτελεί μία από τις ομάδες συχνοτήτων που δεν χρειάζονται άδεια χρήσης από την κυβέρνηση και κατ' επέκταση υπάρχει μεγάλη πιθανότητα παρεμβολών αν οι συσκευές βρίσκονται στον ίδιο χώρο [1]. Ωστόσο, η μη αδειοδοτημένη ζώνη δεν συνεπάγεται έλλειψη ασφάλειας, καθώς το BLE υποστηρίζει λειτουργίες όπως bonding, προστασία από MITM (Man In The Middle) και κρυπτογράφηση AES-128 για την προστασία των δεδομένων. Το πρότυπο Bluetooth σχεδιάστηκε για την αποστολή και λήψη δεδομένων μεταξύ συσκευών σε αποστάσεις της τάξης των λίγων μέτρων και εξελίχθηκε σε δύο διαφορετικές κατηγορίες. Το κλασικό Bluetooth αναπτύχθηκε για τη συνεχή μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων, σαν την ροή ήχου προς ακουστικά, διατηρώντας ανοιχτή σύνδεση μεταξύ των συσκευών και καταναλώνοντας σταθερή ενέργεια. Αντιθέτως, το Bluetooth Low Energy σχεδιάστηκε εξ αρχής με γνώμονα την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας και ακολουθεί μία λογική περιοδικής επικοινωνίας, όπου οι συσκευές παραμένουν σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης και ενεργοποιούνται μόνο για σύντομα χρονικά διαστήματα όταν υπάρχει ανάγκη για μετάδοση δεδομένων [17]. Αυτή η ιδιότητα καθιστά το BLE ιδανικό για περιπτώσεις ανταλλαγής μικρών πακέτων σε τακτά χρονικά διαστήματα, όπως αισθητήρες, συσκευές wearables και συστήματα IoT. Η ανταλλαγή για την ελάχιστη κατανάλωση και την άμεση συνδεσιμότητα με τις περισσότερες κινητές συσκευές είναι η περιορισμένη εμβέλεια και ο χαμηλός ρυθμός μεταφοράς δεδομένων, ο οποίος, ωστόσο, είναι επαρκής για την αποστολή αριθμητικών μετρήσεων.

Η επικοινωνία στο BLE βασίζεται στη συνεργασία των συσκευών, που αναλαμβάνουν τον ρόλο της περιφερειακής (peripheral) ή της κεντρικής (central) συσκευής. Η περιφερειακή συσκευή εκπέμπει περιοδικά μικρά πακέτα δεδομένων, γνωστοποιώντας την ύπαρξη και διαθεσιμότητα στον χώρο, ενώ η κεντρική σαρώνει την περιοχή αναζητώντας τέτοιες εκπομπές. Όταν εντοπιστεί το επιθυμητό περιφερειακό, ξεκινά η διαδικασία σύνδεσης μαζί του και μόλις εδραιωθεί η περιφερειακή συσκευή παύει το advertising και την διαθεσιμότητα στον χώρο, επιτρέποντας την αμφίδρομη μεταφορά δεδομένων.

Data transfer



Εικόνα 3.6: Λειτουργίες Μεταφοράς Δεδομένων GATT

Ο τρόπος οργάνωσης και αποστολής δεδομένων σε μία σύνδεση BLE καθορίζεται από το Generic Attribute Profile (GATT), το οποίο ορίζει μία ιεραρχική δομή δεδομένων που βασίζεται σε δύο θεμελιώδεις έννοιες, τις υπηρεσίες και τα χαρακτηριστικά (Εικόνα 3.6) [18]. Για παράδειγμα, μία συσκευή μπορεί να διαθέτει την υπηρεσία μετρήσεων περιβάλλοντος και κάθε υπηρεσία αποτελείται από ένα ή περισσότερα χαρακτηριστικά. Ένα χαρακτηριστικό μπορεί να είναι το επιμέρους στοιχείο δεδομένων που μεταφέρει την πραγματική πληροφορία, όπως η τιμή της θερμοκρασίας ή μία εντολή προς τη συσκευή. Κάθε υπηρεσία και χαρακτηριστικό αναγνωρίζονται άμεσα από έναν παγκοσμίως μοναδικό αριθμό αναγνώρισης (Universally Unique Identifier – UUID).

Τα χαρακτηριστικά με τη σειρά τους αποτελούνται από ένα σύνολο ιδιοτήτων (properties) που καθορίζουν τον τρόπο αξιοποίησής τους. Οι σημαντικότερες ιδιότητες είναι:

- **Η ιδιότητα ανάγνωσης (read):** Επιτρέπει την κεντρική συσκευή να ζητήσει και να διαβάσει την τρέχουσα τιμή ενός χαρακτηριστικού.
- **Η ιδιότητα εγγραφής (write):** Επιτρέπει την κεντρική συσκευή να στείλει μία τιμή στη περιφερειακή συσκευή, χρήσιμο για την αποστολή εντολών ή παραμέτρων.
- **Η ιδιότητα ειδοποίησης (notify):** Επιτρέπει στο περιφερειακό να ενημερώνει αυτόματα την κεντρική συσκευή κάθε φορά που μεταβάλλεται η τιμή ενός χαρακτηριστικού, χωρίς να χρειάζεται η κεντρική συσκευή να τη ζητά επανειλημμένα. Ο μηχανισμός notify είναι ιδιαίτερα αποδοτικός, καθώς αποφεύγει τη συνεχή αναζήτηση νέων δεδομένων (polling) με τη περιφερειακή συσκευή να αποστέλλει δεδομένα όταν υπάρχει καινούρια πληροφορία.

Στο προτεινόμενο σύστημα, οι τρεις ιδιότητες αξιοποιούνται σε ξεχωριστά τμήματα της επικοινωνίας. Αρχικά, η ιδιότητα notify αξιοποιείται όταν ο μικροελεγκτής αποστέλλει αυτόματα κάθε νέα μέτρηση προς την εφαρμογή, αφού πρώτα παραχθεί, χωρίς να υπάρχει ανάγκη να τη ζητά επανειλημμένα η εφαρμογή. Αυτή η προσέγγιση είναι ιδανική για περιοδικές μετρήσεις και ελάχιστη κατανάλωση. Η ιδιότητα write χρησιμοποιείται με τον αντίστροφο τρόπο και συμπεριλαμβάνει την ασφαλής ενεργοποίηση και αντιστοίχιση της συσκευής μετά από τη σάρωση κωδικού QR, καθώς και εντολές προς τη συσκευή, όπως η εντολή διαγραφής της μνήμης (Reset Data). Τέλος, η ιδιότητα read αξιοποιείται στην αρχή της σύνδεσης για την κρυπτογράφηση και την ανάγνωση του challenge (nonce)

που εκδίδει ο ESP32. Στη συνέχεια, η εφαρμογή το διαβάζει, το υπογράφει με το μυστικό κλειδί και απαντά μέσω του write, ολοκληρώνοντας την ταυτοποίηση.

Η χαμηλή κατανάλωση, η αποδοτική μετάδοση μικρών πακέτων και η δομημένη αρχιτεκτονική GATT ενθαρρύνουν περισσότερο τη χρήση της τεχνολογίας BLE στο προτεινόμενο σύστημα σε σχέση με το κλασικό Bluetooth. Το Bluetooth Classic θα κατανάλωνε περισσότερη ενέργεια χωρίς αντίστοιχο όφελος, ενώ το Wi-Fi θα προϋπέθετε την ύπαρξη υποδομών που δεν είναι διαθέσιμες κατά τη μεταφορά. Αντιθέτως, το BLE συνδυάζει επάρκεια για μετάδοση αριθμητικών μετρήσεων και τις ιδιότητες notify και write που αναλύονται παρακάτω.

3.6 Πλατφόρμα Ανάπτυξης Εφαρμογών: React Native/Expo

Το ενδιαμέσο επίπεδο του συστήματος και η γέφυρα μεταξύ του σταθμού μέτρησης και της πλατφόρμας Firebase υλοποιείται με μία εφαρμογή για κινητές συσκευές. Παρακάτω, εξετάζεται το πλαίσιο ανάπτυξης (framework) που χρησιμοποιήθηκε.

Η ανάπτυξη εφαρμογών για κινητές συσκευές ακολουθεί δύο διακριτές προσεγγίσεις. Η εγγενής (native) ανάπτυξη συνιστάται στη συγγραφή διακριτού κώδικα για κάθε λειτουργικό σύστημα, αξιοποιώντας τις αντίστοιχες γλώσσες και εργαλεία, όπου για το Android είναι οι γλώσσες Java ή Kotlin και για το iOS οι Swift ή Objective-C αντίστοιχα. Αυτή η προσέγγιση προσφέρει τη μέγιστη απόδοση και πλήρη πρόσβαση στις δυνατότητες της συσκευής, με το κόστος διατήρησης δύο ανεξαρτήτων βάσεων κώδικα για την ίδια εφαρμογή.

Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, αναπτύχθηκε η πολυπλατφορμική (cross-platform) προσέγγιση που επιδιώκει τη συγγραφή μίας ενιαίας βάσης κώδικα, εκτελέσιμη σε πολλαπλά λειτουργικά συστήματα. Το React Native εντάσσεται σε αυτό το πλαίσιο, ένα framework ανοιχτού κώδικα που επιτρέπει την ανάπτυξη εφαρμογών με χρήση της JavaScript ή της παραλλαγής της, TypeScript, σε συνδυασμό με τη βιβλιοθήκη React.

Η χαρακτηριστική διαφορά της React Native από τις άλλες τεχνολογίες cross-platform είναι ο τρόπος με τον οποίο αποδίδει το γραφικό περιβάλλον. Αντί να παρουσιάζει το περιεχόμενο μέσα σε έναν ενσωματωμένο περιηγητή ιστού, αντιστοιχίζει τα στοιχεία της διεπαφής σε πραγματικά γραφικά στοιχεία (native components) του αντίστοιχου λειτουργικού συστήματος. Ως αποτέλεσμα, έχουμε μία εφαρμογή, που ως προς την αίσθηση χρήσης και την εμφάνιση, είναι ισοδύναμη με μία native εφαρμογή, διατηρώντας ταυτόχρονα ενιαία βάση κώδικα.

Η αρχιτεκτονική της React Native βασίζεται στη φιλοσοφία της βιβλιοθήκης της, θεμελιώδη βάση της οποίας αποτελεί η έννοια του στοιχείου (component). Στοιχείο είναι μία αυτοτελής, επαναχρησιμοποιήσιμη μονάδα της διεπαφής, που ενθυλακώνει τόσο την εμφάνιση όσο και τη συμπεριφορά κάποιου τμήματος της εφαρμογής. Η σύνθεση πολλαπλών τέτοιων στοιχείων σε μία δομή αποτελούν μία διεπαφή, όπου καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει η κατάσταση (state). Πρόκειται για δεδομένα που περιγράφουν την τρέχουσα κατάσταση ενός στοιχείου και μπορούν να μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης. Η React Native παρακολουθεί τις μεταβολές της κατάστασης και ανανεώνει επιλεκτικά και αυτόματα μόνο τα τμήματα της διεπαφής που επηρεάζονται. Αυτό το μοντέλο είναι γνωστό ως δηλωτικός (declarative) προγραμματισμός, όπου ο προγραμματιστής περιγράφει το επιθυμητό αποτέλεσμα και όχι τα διαδοχικά βήματα για την επίτευξή του.

Παράλληλα με την React Native που αναλαμβάνει την ανάπτυξη, η ρύθμιση του περιβάλλοντος εργασίας και η διαχείριση των εξαρτήσεων σε επίπεδο native διαμορφώνεται από ένα σύνολο εργαλείων και υπηρεσιών που ονομάζεται Expo. Πρόκειται για ένα δομημένο περιβάλλον ανάπτυξης το οποίο

αφαιρεί (abstracts) ένα σημαντικό μέρος της υποκείμενης native διαμόρφωσης, επιτρέποντας τον προγραμματιστή να επικεντρωθεί στη λογική της εφαρμογής.

Ένα σημαντικό ζήτημα στην αρχιτεκτονική της Expo είναι η διάκριση μεταξύ των βιβλιοθηκών που υλοποιούνται αποκλειστικά σε JavaScript και εκείνων που απαιτούν native modules, δηλαδή κώδικα που αλληλοεπιδρά άμεσα με το υλικό ή τις υπηρεσίες της συσκευής. Αναδρομικά, η Expo προσέφερε ένα προκαθορισμένο σύνολο τέτοιων δυνατοτήτων native, το οποίο δε μπορούσε να επεκταθεί χωρίς την εγκατάλειψη του διαχειριζόμενου περιβάλλοντος. Για τις περιπτώσεις που απαιτείται η ενσωμάτωση native βιβλιοθηκών εκτός αυτού του συνόλου, αυτό γίνεται με τη βοήθεια config plugins και prebuild (development builds), χωρίς την ανάγκη μετάβασης σε ξεχωριστό περιβάλλον. Η Expo παρέχει την υπηρεσία EAS (Expo Application Services), η οποία επιτρέπει τη μεταγλώττιση (build) της εφαρμογής στο υπολογιστικό νέφος, ενσωματώνοντας τις native εξαρτήσεις (dependencies). Αυτή η διάκριση έχει καθοριστικό ρόλο για το προτεινόμενο σύστημα ψυχρής αλυσίδας, καθώς τόσο η επικοινωνία BLE, όσο και η τοπική αποθήκευση δεδομένων βασίζονται σε native βιβλιοθήκες, η διαχείριση των οποίων αναλύεται στο Κεφάλαιο 6.

Στη πράξη, η ανάπτυξη με Expo ξεκινά από την εφαρμογή Expo Go, ένα έτοιμο περιβάλλον που εγκαθίσταται στο κινητό και εκτελεί άμεσα τον κώδικα JavaScript κατά την ανάπτυξη. Όμως, το Expo Go περιλαμβάνει ένα συγκεκριμένο σύνολο native βιβλιοθηκών και όταν το έργο απαιτεί native κώδικα εκτός αυτού του συνόλου, η εκτέλεση μεταβαίνει σε ένα development build. Πρόκειται για μια εξατομικευμένη έκδοση της εφαρμογής που ενσωματώνει τις συγκεκριμένες native βιβλιοθήκες της εφαρμογής. Η δημιουργία των native τμημάτων γίνεται αυτόματα από τη διαδικασία prebuild (Continuous Native Generation), όπου με βάση τις ρυθμίσεις και τις εξαρτήσεις της εφαρμογής, παράγονται δυναμικά τα αντίστοιχα native projects για Android και iOS, χωρίς χειροκίνητη συντήρηση από τον προγραμματιστή. Οι τροποποιήσεις στο native επίπεδο αναλαμβάνονται από τα config plugins, μικρές συναρτήσεις που εφαρμόζουν αυτόματα τις αλλαγές αυτές κατά το prebuild. Τέλος, η μεταγλώττιση των builds μαζί με τις native εξαρτήσεις πραγματοποιείται από την υπηρεσία EAS Build.

Στο προτεινόμενο σύστημα ψυχρής αλυσίδας, η ανάγκη για development build προκύπτει από τρεις native βιβλιοθήκες που είναι σημαντικές για την ορθή λειτουργία του. Η react-native-ble-plx είναι υπεύθυνη για την επικοινωνία BLE με τον σταθμό μέτρησης, η expo-sqlite για την τοπική βάση δεδομένων στη κινητή συσκευή και την αποθήκευση των μετρήσεων εκτός σύνδεσης, ενώ η expo-camera για την σάρωση του κωδικού QR και την ασφαλή αντιστοίχιση με τη συσκευή. Όλες αυτές οι βιβλιοθήκες αλληλεπιδρούν άμεσα με το υλικό ή τις υπηρεσίες του κινητού και δεν μπορούν να λειτουργήσουν εντός του Expo Go. Για αυτό το λόγο, το Development Build είναι απαραίτητο για την υλοποίηση της εφαρμογής.

Η συγκέντρωση της ανάπτυξης σε μία ενιαία βάση κώδικα γραμμένη σε TypeScript αιτιολογεί τον συνδυασμό React Native και Expo, περιορίζοντας τον χρόνο και την πολυπλοκότητα της υλοποίησης σε σύγκριση με Native Development. Η τυποποίηση που εισάγει η TypeScript ενισχύει την αξιοπιστία του κώδικα μέσω του εντοπισμού σφαλμάτων κατά το build, ενώ η μεγάλη ποικιλία βιβλιοθηκών της React Native καλύπτει τις λειτουργικές ανάγκες του συστήματος, όπως την ασύρματη επικοινωνία και τη διαχείριση της τοπικής βάσης δεδομένων.

3.7 Υπολογιστικό Νέφος και η Πλατφόρμα Firebase

Το ανώτερο επίπεδο του συστήματος υλοποιείται στο υπολογιστικό νέφος, το οποίο αναλαμβάνει τη μόνιμη αποθήκευση και την απομακρυσμένη απεικόνιση των δεδομένων. Ενώ τα κατώτερα επίπεδα

μπορούν να λειτουργούν τοπικά και χωρίς σύνδεση, το επίπεδο του νέφους είναι εκείνο που καθιστά τα δεδομένα μόνιμα διαθέσιμα και προσβάσιμα εξ αποστάσεως από οποιαδήποτε συσκευή.

3.7.1 Υπολογιστικό Νέφος

Ο όρος υπολογιστικό νέφος (cloud computing) αναφέρεται στην κατά απαίτηση παροχή υπολογιστικών πόρων (αποθηκευτικό χώρο, ισχύ επεξεργασίας και υπηρεσίες εφαρμογών) μέσω του διαδικτύου. Ο χρήστης δεν διατηρεί φυσική υποδομή, αλλά οι πόροι αυτοί φιλοξενούνται σε απομακρυσμένα κέντρα δεδομένων και καθίστανται προσβάσιμοι εξ αποστάσεως. Το βασικό πλεονέκτημα βασίζεται στην απαλλαγή του προγραμματιστή από τη διαχείριση της υποδομής, καθώς και την δυνατότητα κλιμάκωσης των πόρων ανάλογα με τη ζήτηση (elasticity).

Οι υπηρεσίες νέφους ταξινομούνται σε τρία μοντέλα παροχής, ανάλογα με το αφαιρετικό επίπεδο που προσφέρουν.

- 1) **Υποδομή ως Υπηρεσία (Infrastructure as a Service – IaaS):** Παρέχονται θεμελιώδεις πόροι, όπως εικονικές μηχανές και αποθηκευτικός χώρος, ενώ ο προγραμματιστής διαχειρίζεται το λειτουργικό σύστημα και τις εφαρμογές.
- 2) **Πλατφόρμα ως Υπηρεσία (Platform as a Service – PaaS):** Παρέχεται ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης και εκτέλεσης, απαλλάσσοντας τον προγραμματιστή από την διαχείριση του λειτουργικού συστήματος.
- 3) **Λογισμικό ως Υπηρεσία (Software as a Service – SaaS):** Παρέχεται μία πλήρης εφαρμογή, άμεσα προσβάσιμη από τον τελικό χρήστη και συνήθως με μηνιαία ή ετήσια συνδρομή.

Πέρα από τα τρία θεμελιώδη μοντέλα, έχει διαμορφωθεί και το μοντέλο Backend as a Service (BaaS) που μπορεί να θεωρηθεί εξειδίκευση του PaaS και σημασιολογικά τοποθετείται ανάμεσα στο PaaS και το SaaS. Το BaaS παρέχει έτοιμες υπηρεσίες υποστήριξης, όπως βάσεις δεδομένων, αυθεντικοποίηση χρηστών και αποθήκευση αρχείων, τις οποίες μπορεί να αξιοποιήσει άμεσα μία εφαρμογή με τη βοήθεια ενός SDK (Software Development Kit), χωρίς την ανάπτυξη εξυπηρετητή από την αρχή.

3.7.2 Πλατφόρμα Firebase

Η Firebase αποτελεί μία πλατφόρμα ανάπτυξης εφαρμογών της Google, η οποία εντάσσεται στη κατηγορία Backend as a Service. Παρέχει ένα σύνολο ολοκληρωμένων υπηρεσιών νέφους που καλύπτουν συνήθεις ανάγκες των σύγχρονων εφαρμογών, από την αποθήκευση δεδομένων και την αυθεντικοποίηση χρηστών έως την εκτέλεση κώδικα υποστήριξης. Στο συγκεκριμένο σύστημα, αξιοποιήθηκαν δύο υπηρεσίες, η Realtime Database και το Firebase Hosting.

Η Realtime Database είναι μία βάση δεδομένων τύπου NoSQL, φιλοξενούμενη στο νέφος. Σε αντίθεση με τις σχεσιακές βάσεις δεδομένων που οργανώνουν τα δεδομένα σε πίνακες με προκαθορισμένο σχήμα, η Realtime Database αποθηκεύει το σύνολο των δεδομένων σε μία ιεραρχική δομή αντικειμένων JSON, δηλαδή ως ένα δέντρο με ζεύγη κλειδιού-τιμής χωρίς αυστηρά καθορισμένο σχήμα. Το χαρακτηριστικό από το οποίο προκύπτει και η ονομασία της είναι ο συγχρονισμός σε πραγματικό χρόνο. Όταν η πληροφορία μεταβάλλεται, η αλλαγή διαδίδεται αυτόματα και άμεσα σε όλες τις συνδεδεμένες συσκευές (clients) με τη βοήθεια μίας μόνιμης σύνδεσης, χωρίς επαναλαμβανόμενη αναζήτηση νέων δεδομένων από τη πλευρά τους. Επιπρόσθετα, η υπηρεσία διαθέτει ενσωματωμένη υποστήριξη λειτουργίας εκτός σύνδεσης (offline support), αποθηκεύοντας τοπικά τη πληροφορία και συγχρονίζοντάς την αυτόματα με το νέφος μόλις αποκατασταθεί η σύνδεση.

Το Firebase Hosting είναι μία υπηρεσία φιλοξενίας (hosting) στατικού περιεχομένου ιστού, όπως αρχεία HTML, CSS και JavaScript. Στη παρούσα εργασία, φιλοξενεί την ιστοσελίδα απεικόνισης και εξαγωγής δεδομένων, καθιστώντας τη προσβάσιμη μέσω διαδικτύου. Η ιστοσελίδα συλλέγει δεδομένα από την Realtime Database, αξιοποιώντας τον μηχανισμό συγχρονισμού σε πραγματικό χρόνο και την ενημέρωση των γραφημάτων.

Στη πράξη, η σύνδεση των δύο υπηρεσιών με το σύστημα αποτυπώνεται άμεσα στην ιστοσελίδα απεικόνισης. Τα δεδομένα κάθε σταθμού αποθηκεύονται στη Realtime Database ως δέντρο JSON της μορφής `stations/0014/data/<UnixTime>`, όπου κάθε κόμβος περιέχει μία μεμονωμένη μέτρηση (θερμοκρασία, υγρασία, UV, φωτεινότητα και χρονική σήμανση Unix). Η ιστοσελίδα εγγράφεται σε αυτό τον κλάδο με έναν real-time listener και κάθε νέα μέτρηση που φτάνει στη βάση ενημερώνει αυτόματα τα γραφήματα, τα στατιστικά και τον πίνακα, χωρίς να χρειαστεί η επανάληψη αναζήτησης δεδομένων. Τα αρχεία HTML και η βιβλιοθήκη Chart.js για τα γραφήματα φιλοξενούνται στο Firebase Hosting, που καθιστά προσβάσιμη από οποιονδήποτε φυλλομετρητή (browser). Η Realtime Database καλύπτει την αποθήκευση και μετάδοση των δεδομένων και το Firebase Hosting την διεπαφή απεικόνισης και εξαγωγής τους. Έτσι, οι δύο υπηρεσίες μαζί καλύπτουν ολόκληρο το ανώτερο επίπεδο.

Η πλατφόρμα Firebase σαν μοντέλο Backend as a Service καθιστά περιττή την ανάπτυξη και συντήρηση ιδιαίτερου εξυπηρετητή. Ο μηχανισμός συγχρονισμού σε πραγματικό χρόνο της Realtime Database ανταποκρίνεται άμεσα στην ανάγκη ζωντανής απεικόνισης των μετρήσεων, ενώ η συγχώνευση της βάσης δεδομένων και της υπηρεσίας hosting σε μία ενιαία πλατφόρμα απλοποιεί την αρχιτεκτονική του ανώτερου επιπέδου.

Κεφάλαιο 4ο: Σχεδίαση και Αρχιτεκτονική του Συστήματος

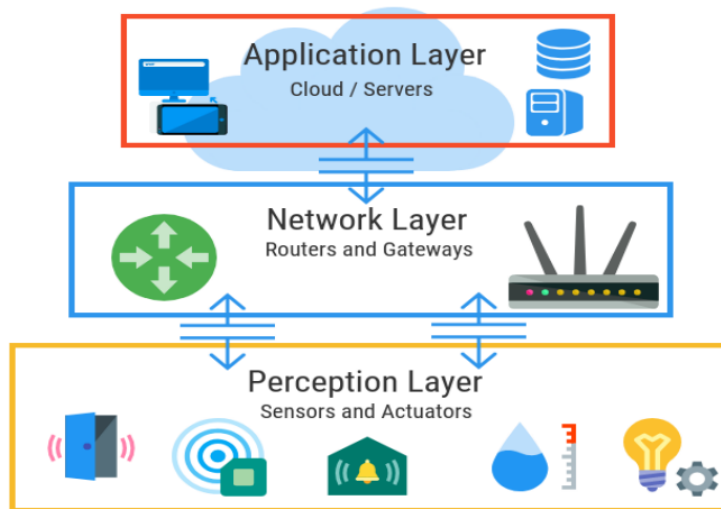
4.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, παρουσιάστηκε το θεωρητικό υπόβαθρο των τεχνολογιών που αξιοποιεί το σύστημα IoT. Σε αυτό το κεφάλαιο, απομακρυνόμαστε από τις μεμονωμένες λειτουργίες και εξετάζουμε τον τρόπο που τα επιμέρους στοιχεία συνθέτουν μία ολοκληρωμένη, λειτουργική αρχιτεκτονική. Στόχος είναι η παρουσίαση της συνολικής σχεδίασης σε λογικό επίπεδο, ένα βήμα πριν τη πρακτική υλοποίηση. Οι αποφάσεις που λαμβάνονται σε αυτό το επίπεδο, ο τρόπος διάρθρωσης των μεμονωμένων μονάδων, η κατανομή των αρμοδιοτήτων μεταξύ τους και ο τρόπος ροής δεδομένων καθορίζουν τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά του τελικού συστήματος.

4.2 Τα Τρία Επίπεδα

Η αρχιτεκτονική διαρθρώνεται σε τρία διακριτά και ιεραρχικά διατεταγμένα επίπεδα, καθένα από τα οποία επιτελεί ένα καθορισμένο ρόλο. Αυτή η διάρθρωση ακολουθεί την αρχή διαχωρισμού των αρμοδιοτήτων (Separation of Concerns), σύμφωνα με την οποία κάθε επίπεδο είναι υπεύθυνο για μια συγκεκριμένη κατηγορία λειτουργιών και επικοινωνεί με τα υπόλοιπα μέσω προκαθορισμένων διεπαφών. Τα τρία επίπεδα που φαίνονται στην Εικόνα 4.1 [19] είναι το φυσικό, το ενδιάμεσο και το επίπεδο του υπολογιστικού νέφους.

- **Φυσικό Επίπεδο ή Επίπεδο Αντίληψης (Perception Layer):** Πρόκειται για το κατώτατο επίπεδο στη δομή επιπέδων δικτύου και συμπεριλαμβάνει όλες τις φυσικές συσκευές (things), δηλαδή τον σταθμό μέτρησης, ο οποίος έχει ως πυρήνα τον μικροελεγκτή ESP32 σε συνεργασία με τους αισθητήρες και το ρολόι πραγματικού χρόνου. Το επίπεδο αυτό είναι υπεύθυνο για την λήψη των μετρήσεων από το περιβάλλον, την επεξεργασία και τη χρονική σήμανση, καθώς και τη τοπική τους αποθήκευση. Αποτελεί το σημείο επαφής του συστήματος με τον φυσικό κόσμο και λειτουργεί αυτόνομα, χωρίς τη προϋπόθεση σύνδεσης με δίκτυο κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.
- **Ενδιάμεσο Επίπεδο ή Επίπεδο Δικτύου (Network Layer):** Υλοποιείται από την εφαρμογή στο κινητό και επιτελεί το ρόλο ενός διαμεσολαβητή (gateway) μεταξύ του φυσικού επιπέδου και του υπολογιστικού νέφους. Το επίπεδο αυτό μπορεί να απαρτιστεί από τεχνολογίες διασύνδεσης, όπως η ενσύρματη (Ethernet) και η ασύρματη (Wi-Fi) σύνδεση. Η προτεινόμενη εφαρμογή συνδέεται ασύρματα με το σταθμό μέσω BLE, λαμβάνει τις μετρήσεις, τις αποθηκεύει τοπικά και δεδομένου ότι υπάρχει σύνδεση στο διαδίκτυο, τις προωθεί στο υπολογιστικό νέφος. Αυτός ο ρόλος του διαμεσολαβητή είναι καθοριστικός για το συνολικό σύστημα IoT, καθώς ο σταθμός μέτρησης δεν διαθέτει ο ίδιος σύνδεση στο διαδίκτυο, αναγκάζοντας την επικοινωνία με το νέφος να πραγματοποιείται αποκλειστικά από τη κινητή συσκευή.
- **Επίπεδο του Υπολογιστικού Νέφους ή Επίπεδο Εφαρμογής (Application Layer):** Αποτελεί το ανώτατο επίπεδο, όπου τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί και αποθηκευτεί από τα δύο προηγούμενα επίπεδα αναλύονται και υποβάλλονται σε επεξεργασία με στόχο την αξιοποίηση τους για παροχή υπηρεσιών (γραφήματα και εξαγωγή δεδομένων). Το επίπεδο εφαρμογής υλοποιείται με τη πλατφόρμα Firebase και είναι υπεύθυνο για τη μόνιμη αποθήκευση των δεδομένων και την απομακρυσμένη απεικόνισή τους. Τα δεδομένα καθίστανται προσβάσιμα από το διαδίκτυο και παρουσιάζονται σε γραφική μορφή στην ιστοσελίδα απεικόνισης, επιτρέποντας την παρακολούθηση των παραμέτρων από απόσταση.



Εικόνα 4.1: Διάταξη των τριών επιπέδων [19]

Ο διαχωρισμός σε τρία επίπεδα προσδίδει στο σύστημα την ικανότητα αυτόνομης λειτουργίας του σταθμού μέτρησης ανεξάρτητα από τη διαθεσιμότητα σύνδεσης στο διαδίκτυο. Δεδομένου ότι η καταγραφή και η τοπική αποθήκευση των μετρήσεων πραγματοποιούνται αποκλειστικά στο φυσικό επίπεδο, ο σταθμός εξακολουθεί να λειτουργεί ομαλά κατά τη διάρκεια μεταφοράς, ακόμα και στην έλλειψη δικτυακής κάλυψης. Η μεταφορά δεδομένων στη πλατφόρμα Firebase πραγματοποιείται αργότερα, μόλις η εφαρμογή στο κινητό αποκτήσει πρόσβαση στο διαδίκτυο. Συνεπώς, αυτή η αρχιτεκτονική αντιμετωπίζει άμεσα μία από τις βασικές προκλήσεις που τέθηκαν στο πρώτο κεφάλαιο, δηλαδή την ανάγκη αξιοπιστίας στη παρακολούθηση των συνθηκών με περιορισμένη ή ανύπαρκτη συνδεσιμότητα.

Στη παραπάνω Εικόνα απεικονίζεται η ροή των δεδομένων σε όλο το σύστημα. Οι αισθητήρες και το RTC τροφοδοτούν τον ESP32 με δεδομένα στο φυσικό επίπεδο, ο σταθμός επικοινωνεί με την εφαρμογή με τη βοήθεια του BLE και η εφαρμογή προωθεί τα δεδομένα μέσω διαδικτύου στο Firebase, όπου αποθηκεύονται και οπτικοποιούνται.

4.3 Αρχιτεκτονική Υλικού

Η αρχιτεκτονική του υλικού αφορά τη διάταξη και τη διασύνδεση των φυσικών εξαρτημάτων που συγκροτούν τον σταθμό μέτρησης. Κεντρικό στοιχείο της διάταξης αποτελεί ο μικροελεγκτής ESP32, ο οποίος λειτουργεί σαν συντονιστής της λειτουργίας των περιφερειακών. Το βασικό χαρακτηριστικό της σχεδίασης είναι η αξιοποίηση του κοινού διαύλου επικοινωνίας. Και οι τέσσερις περιφερειακές συσκευές συνδέονται στον ίδιο δίαυλο I²C που μοιράζονται τη γραμμή σειριακών δεδομένων (SDA) και τη γραμμή σειριακού ρολογιού (SCL) που αντιστοιχούν στους ακροδέκτες GPIO21 και GPIO22 αντίστοιχα. Όπως αναλύθηκε στο τρίτο κεφάλαιο, η δυνατότητα αυτή στηρίζεται στη μοναδική διεύθυνση κάθε συσκευής, γεγονός που επιτρέπει τον μικροελεγκτή να απευθύνεται σε καθεμία, χωρίς σύγκρουση. Με αυτό τον τρόπο, αφενός υπάρχουν μειωμένες απαιτούμενες συνδέσεις και αφετέρου η επέκταση γίνεται πιο απλή, δεδομένου ότι η προσθήκη μίας νέας συσκευής δεν απαιτεί πρόσθετους ακροδέκτες.

Ο ESP32 παρέχει δύο ακροδέκτες τάσης, στα 3.3V και στα 5V, από τις οποίες τροφοδοτούνται οι αντίστοιχες μονάδες ανάλογα με τις απαιτήσεις τους, μαζί με μία κοινή γραμμή γείωσης (GND). Το μόνο που διαφοροποιεί τους ακροδέκτες, με τους οποίους συνδέονται οι αισθητήρες και το RTC, είναι οι τάσεις τροφοδοσίας. Οι αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας και έντασης φωτός (AHT20 και TSL25911) είναι συνδεδεμένοι στα 3.3V, ενώ ο αισθητήρας υπεριώδους ακτινοβολίας και το ρολόι πραγματικού χρόνου (LTR390 και DS1307) λαμβάνουν 5V.

Ιδιαίτερη σημασία στην αρχιτεκτονική του υλικού έχει και η φυσική τοποθέτηση των εξαρτημάτων, όχι μόνο για λόγους ευκολίας αλλά και για την αποδοτικότητα των μετρήσεων. Οι αισθητήρες φωτός και υπεριώδους ακτινοβολίας πρέπει να είναι εκτεθειμένοι στο εξωτερικό περιβάλλον, ενώ ο αισθητήρας θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας δε χρειάζεται να προστατεύεται, καθώς είναι πιο δύσκολο για να αλλοιωθούν οι μετρήσεις του.

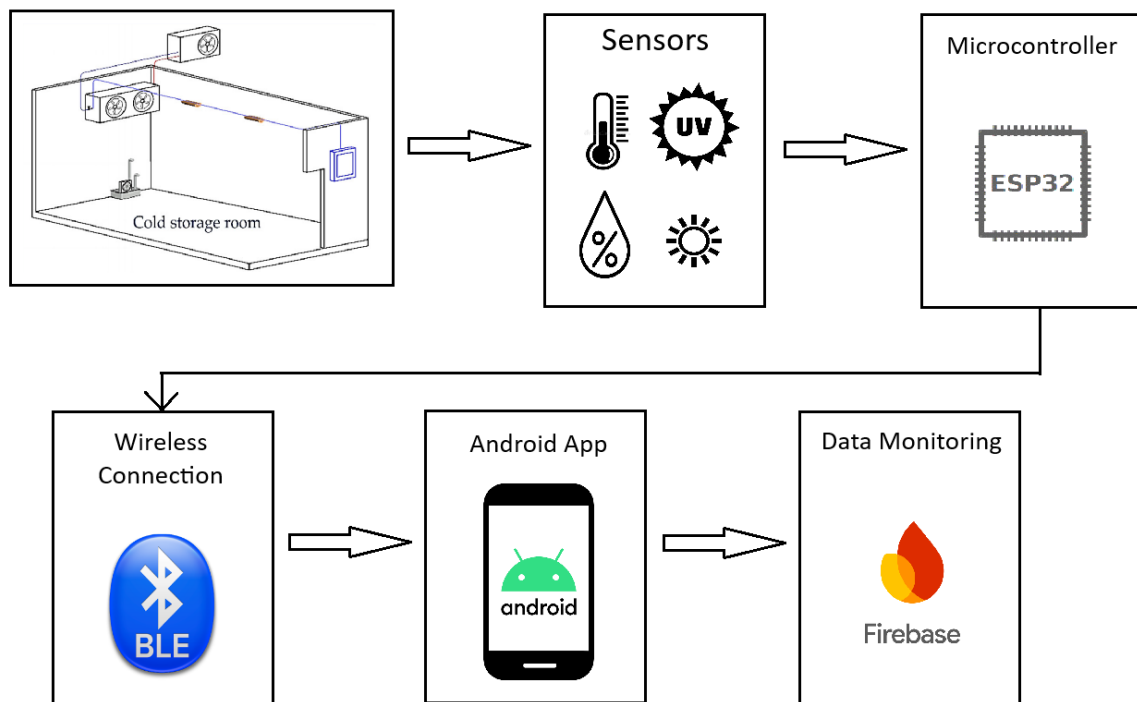
Ως προς τη φυσική υλοποίηση των συνδέσεων, η αρχιτεκτονική προβλέπει τη μετάβαση από τις δοκιμαστικές συνδέσεις σε μία σταθερή πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (Printed Circuit Board – PCB). Η πλακέτα θα φιλοξενεί τις υποδοχές για τον μικροελεγκτή, το ρολόι πραγματικού χρόνου και τα αισθητήρια, εξασφαλίζοντας πιο αξιόπιστες συνδέσεις. Η σχεδίαση και κατασκευή της πλακέτας περιγράφεται αναλυτικά στο επόμενο Κεφάλαιο.

4.4 Ροή Δεδομένων

Η αξία ενός συστήματος παρακολούθησης δε βασίζεται μόνο στα εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται, αλλά και στο τρόπο μετασχηματισμού της πληροφορίας καθώς διασχίζει τα τρία επίπεδα. Η μέτρηση πρέπει να αντιμετωπιστεί σαν μία πληροφορία που αλλάζει μορφή, όγκο και σκοπό σε κάθε στάδιο της διαδρομής της. Χαρακτηριστικό γνώρισμα της ροής αυτής είναι ότι σε κάθε μετάβαση η πληροφορία υφίσταται ένα διακριτό μετασχηματισμό, από φυσικό μέγεθος σε ακατέργαστη αριθμητική τιμή, στη συνέχεια σε εξομαλυσμένη τιμή και από μία μεμονωμένη τιμή μετατρέπεται σε τμήμα μιας ευρύτερης χρονοσειράς (Εικόνα 4.2).

Το πρώτο στάδιο είναι η δημιουργία της μέτρησης στο φυσικό επίπεδο. Η θερμοκρασία, η υγρασία, υπεριώδης ακτινοβολία και η ένταση του φωτός μετατρέπονται από ένα φυσικό μέγεθος σε μια ψηφιακή τιμή που καταφτάνει στο μικροελεγκτή. Σε αυτό το σημείο, η τιμή παραμένει ακατέργαστη και στιγμιαία, καθώς αντιπροσωπεύει μία μοναδική ανάγνωση. Ο πρώτος ουσιαστικός μετασχηματισμός πραγματοποιείται εντός του ESP32, όπου αυτή η ανάγνωση δεν προωθείται αυτόματα, αλλά συμβάλλει στη διαμόρφωση μίας πιο αντιπροσωπευτικής, εξομαλυσμένης τιμής. Με αυτό το τρόπο, ένα πλήθος μεμονωμένων τιμών συμπεκνώνεται σε μία αξιόπιστη εγγραφή, μειώνοντας τον όγκο των δεδομένων που πρόκειται να αποθηκευτούν στον μικροελεγκτή και να μεταφερθούν. Η εγγραφή αυτή, που πλέον συνοδεύεται από την χρονική σφραγίδα (timestamp) του ρολογιού πραγματικού χρόνου, αποθηκεύεται τοπικά στη μνήμη του σταθμού μέτρησης. Το τοπικό αντίγραφο εξασφαλίζει ότι η πληροφορία δεν εξαρτάται άμεσα από την παρουσία του κινητού ή του δικτύου, αλλά διατηρείται με ασφάλεια στο κύκλωμα μέχρι να γίνει δυνατή η μεταφορά της.

Το δεύτερο στάδιο της ροής πραγματοποιείται όταν το κινητό συνδεθεί με τον σταθμό μέτρησης. Εκείνη τη στιγμή, οι αποθηκευμένες εγγραφές μεταφέρονται ασύρματα στην εφαρμογή, όπου μπορούν να φανούν στο αρχείο καταγραφής (log). Παρόλο που η εγγραφή αποτελούσε ένα αρχείο καταγραφής στο μικροελεγκτή, στο κινητό εντάσσεται σε μία δομημένη τοπική βάση δεδομένων (SQLite), όπου μπορεί να ανακτηθεί, να ταξινομηθεί και να αξιοποιηθεί για την άμεση ενημέρωση του χρήστη. Το κινητό δεν λειτουργεί σαν απλός διάυλος διέλευσης, αλλά ως ένας κόμβος που προσδίδει δομή και προσβασιμότητα στα δεδομένα.



Εικόνα 4.2: Ροή Δεδομένων του Συστήματος

Το τρίτο και τελευταίο στάδιο είναι η προώθηση των δεδομένων στο υπολογιστικό νέφος, που πραγματοποιείται μόλις η κινητή συσκευή αποκτήσει πρόσβαση στο διαδίκτυο. Στη πλατφόρμα Firebase, η μεμονωμένη εγγραφή παύει να αντιμετωπίζεται ως αυτοτελές γεγονός και εντάσσεται σε μία συνεχή χρονοσειρά μετρήσεων, οργανωμένη ανά timestamp. Αυτή η τελική μετατροπή καθιστά δυνατή τη γραφική απεικόνιση της εξέλιξης των συνθηκών στο χρόνο και την απομακρυσμένη παρακολούθησή τους στην ιστοσελίδα.

Η φύση της ροής των πληροφοριών χαρακτηρίζεται από την έλλειψη συγχρονισμού, όπου τα τρία στάδια δεν εκτελούνται υποχρεωτικά σε συνεχή ακολουθία και το κάθε ένα μπορεί να πραγματοποιηθεί σε διαφορετική χρονική στιγμή, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των συνδέσεων. Ο σταθμός καταγράφει αυτόνομα και χωρίς την παρουσία του κινητού, ενώ το κινητό συγχρονίζεται με τη πλατφόρμα Firebase ανεξάρτητα από τη στιγμή της μέτρησης, προσδίδοντας ανθεκτικότητα στο σύστημα.

4.5 Μεθοδολογία Μέτρησης και Αλγόριθμος Μέσης Τιμής

Παραπάνω αναγράφεται πως πριν από την αποθήκευση κάθε μέτρησης, πρώτα υφίσταται μια διαδικασία εξομάλυνσης. Σε αυτή την ενότητα, αναλύεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για αυτό τον σκοπό, ο ρυθμός που λαμβάνονται οι μετρήσεις και ο τρόπος που συνδυάζονται.

Η δειγματοληψία του συστήματος διακρίνει δύο διαφορετικές χρονικές κλίμακες, τη συχνότητα της μέτρησης και τη συχνότητα της καταγραφής. Παρόλο που το σύστημα λαμβάνει μία ανάγνωση από τους αισθητήρες ανά σχετικά πυκνά χρονικά διαστήματα (της τάξης των λίγων λεπτών), δεν αποθηκεύει κάθε μέτρηση. Ήταν προτιμότερο να συγκεντρώνει ένα προκαθορισμένο αριθμό διαδοχικών μετρήσεων και να καταγράφει τη μέση τιμή τους, σε αραιότερα χρονικά διαστήματα. Στη συγκεκριμένη υλοποίηση, η μέτρηση πραγματοποιείται κάθε τρία λεπτά, ενώ ο μέσος όρος πέντε διαδοχικών μετρήσεων καταγράφεται κάθε δεκαπέντε λεπτά.

Η διάκριση μεταξύ μετρήσεων και αραιότερων καταγραφών εξυπηρετεί δύο απαιτήσεις. Αρχικά, η συχνή δειγματοληψία επιτρέπει την έγκαιρη ανίχνευση μεταβολών στις συνθήκες της διαδικασίας. Αυτό θα ήταν εξαιρετικά χρήσιμο σε ένα πραγματικό σενάριο για άμεση γνωστοποίηση της κατάστασης και αντιμετώπιση προβλημάτων. Δεύτερον, η αποθήκευση κάθε ανάγνωσης θα οδηγούσε σε γρήγορη εξάντληση του αποθηκευτικού χώρου και σε υπερβολικό όγκο δεδομένων προς μετάδοση, χωρίς αντίστοιχο κέρδος σε πληροφορία. Ο υπολογισμός της μέσης τιμής διατηρεί την λειτουργία της συχνής δειγματοληψίας και ταυτόχρονα περιορίζει δραστικά τον όγκο των τελικών εγγραφών.

Η στατιστική εξομάλυνση είναι ένα εξίσου σημαντικό χαρακτηριστικό του υπολογισμού μέσης τιμής. Μία μεμονωμένη μέτρηση ενδέχεται να επηρεαστεί σε τεράστιο βαθμό από στιγμιαίες, παροδικές διακυμάνσεις ή από τυχαίες και αυθαίρετες αλλαγές στο περιβάλλον, παράγοντας μια τιμή που δεν αντιπροσωπεύει τις πραγματικές συνθήκες. Λαμβάνοντας τον μέσο όρο πολλών διαδοχικών μετρήσεων, οι ακραίες αυτές αποκλίσεις εξομαλύνονται και η τελική καταγραφή αποκτά μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία. Αυτή η προσέγγιση βασίζεται στην έννοια του κινούμενου μέσου όρου (moving average), μίας ευρέως διαδεδομένης τεχνικής για τον περιορισμό ακραίων τιμών σε χρονολογικές σειρές δεδομένων.

Ο μηχανισμός υλοποίησης για τη λογική αυτή είναι ο κυκλικός καταχωρητής (circular buffer). Πρόκειται για μια δομή δεδομένων σταθερού μεγέθους, στην οποία κάθε νέα μέτρηση καταλαμβάνει την επόμενη διαθέσιμη θέση. Όταν συμπληρωθούν και οι πέντε θέσεις και γίνει δυνατός ο υπολογισμός του μέσου όρου, η επόμενη μέτρηση επανεκκινεί τον κύκλο, αντικαθιστώντας την παλαιότερη τιμή. Η `smoothedAverage()` γράφει κάθε νέα τιμή στη θέση `smoothIdx % 5` ενός `buffer` 5 θέσεων, το `smoothIdx` δεν μηδενίζει ποτέ και ο μέσος όρος υπολογίζεται πάντα πάνω στα 5 πρώτα πιο πρόσφατα δείγματα. Το πλεονέκτημα της δομής αυτής είναι η ελάχιστη και σταθερή απαίτηση ποσότητας μνήμης, ανεξάρτητα από τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος, καθιστώντας την ιδανική για τους περιορισμένους πόρους ενός μικροελεγκτή. Η ακριβής υλοποίηση του κυκλικού καταχωρητή σε κώδικα, καθώς και η χρονική λογική που ελέγχει τους δύο ρυθμούς παρουσιάζεται αναλυτικά στο πέμπτο κεφάλαιο.

4.6 Σχεδίαση Αποθήκευσης Δεδομένων

Ένα σύστημα καταγραφής που προορίζεται για μακροχρόνια λειτουργία δημιουργεί το σχεδιαστικό ερώτημα διαχείρισης μιας ροής δεδομένων που, θεωρητικά, είναι απεριόριστη στο χρόνο σε ένα σύστημα με πεπερασμένους πόρους. Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται η αρχιτεκτονική της αποθήκευσης των δεδομένων, η οποία διακρίνεται σε δύο αποθηκευτικούς χώρους με διαφορετικούς περιορισμούς.

4.6.1 Τοπική Αποθήκευση

Ο πρώτος αποθηκευτικός χώρος βρίσκεται στον σταθμό μέτρησης και υφίσταται τον πιο αυστηρό περιορισμό, την πεπερασμένη χωρητικότητα της ενσωματωμένης μνήμης. Η σχεδιαστική απόφαση που επιλέχθηκε για αυτό τον χώρο είναι η υιοθέτηση της κυκλικής αντικατάστασης. Ο τοπικός χώρος παίρνει τις κατάλληλες διαστάσεις έτσι ώστε να καλύπτει έναν συγκεκριμένο χρονικό περιθώριο και όταν αυτός συμπληρωθεί, οι νεότερες εγγραφές αντικαθιστούν σταδιακά τις παλαιότερες. Για το συγκεκριμένο σύστημα, το μέγιστο χρονικό περιθώριο αποφασίστηκε να είναι περίπου δεκαπέντε μέρες, που αντιστοιχούν σε περίπου 1500 εγγραφές. Είναι σημαντικό να γίνει ξεκάθαρο πως η τοπική μνήμη δεν προορίζεται να λειτουργήσει σαν μόνιμο αρχείο, αλλά ως προσωρινός ασφαλής χώρος αποθήκευσης (buffer) που ενώνει το χρονικό διάστημα μεταξύ διαδοχικών συγχρονισμών με τη κινητή συσκευή. Δεδομένου ότι ο συγχρονισμός αναμένεται να πραγματοποιείται σε τακτά χρονικά διαστήματα, το περιθώριο των δεκαπέντε ημερών παρέχει ένα ευρύ παράθυρο ασφαλείας, όπου ακόμα

και αν καθυστερήσει σημαντικά ο συγχρονισμός, δεν χάνεται καμία εγγραφή. Στη περίπτωση που ο αποθηκευτικός χώρος της μνήμης γίνει πλήρης, πραγματοποιείται κυκλική αντικατάσταση αντί της παύσης καταγραφής, εξασφαλίζοντας ότι το σύστημα διατηρεί τα πρόσφατα και κρίσιμα δεδομένα.

4.6.2 Αποθήκευση στο Νέφος

Ο δεύτερος αποθηκευτικός χώρος βρίσκεται στο υπολογιστικό νέφος και υπόκειται ριζικά διαφορετικούς περιορισμούς. Σε αντίθεση με τον περιορισμένο χώρο αποθήκευσης της ενσωματωμένης μνήμης, ο χώρος αυτός είναι σχεδιασμένος για να είναι το μόνιμο αρχείο του συστήματος, χωρίς την ανάγκη διαγραφής παλαιότερων μετρήσεων. Η πρόκληση σε αυτό το πλαίσιο δεν προκύπτει από το μέγεθος του χώρου, αλλά από την οργάνωση των δεδομένων έτσι ώστε να δομηθούν κατάλληλα και να γίνει δυνατή η ανάκτηση και απεικόνισή τους.

Επομένως, η δομή των δεδομένων στο υπολογιστικό νέφος οργανώνεται ιεραρχικά, με πρωταρχικό κριτήριο διαχωρισμού την ταυτότητα κάθε σταθμού μέτρησης. Κάθε σταθμός διαθέτει τον δικό του κλάδο στη δομή, εντός του οποίου συγκεντρώνονται οι μετρήσεις του ως χρονική ακολουθία. Η οργάνωση αυτή συμβάλλει στην εύκολη επεκτασιμότητα του συστήματος, καθώς επιτρέπει τη συνύπαρξη πολλαπλών σταθμών στην ίδια υποδομή, με τα δεδομένα του κάθε σταθμού να παραμένουν λογικά διαχωρισμένα και άμεσα ανακτήσιμα.

Ως προς τα χαρακτηριστικά του χώρου, κάθε μέτρηση αποθηκεύεται ως ξεχωριστός κόμβος με κλειδί το Unix Timestamp και τιμή το σύνολο των παραμέτρων της. Έτσι, εξασφαλίζεται η φυσική χρονολογική διάταξη των εγγραφών και κυρίως αποφυγή διπλών εγγραφών, καθώς μία εγγραφή που θα έφτανε δεύτερη φορά με το ίδιο κλειδί επικαλύπτει την υπάρχουσα. Η αποθήκευση είναι τύπου *append only*, όπου οι νέες εγγραφές απλά προστίθενται και οι παλαιότερες δεν τροποποιούνται ποτέ. Με μία εγγραφή κάθε δεκαπέντε λεπτά, ο σταθμός παράγει περίπου 96 εγγραφές τη μέρα. Σε αντίθεση με τη τοπική μνήμη, δεν υπάρχει ανάγκη διαγραφής ή αντικατάστασης όταν το μέγεθος είναι σχεδόν αμελητέο.

Οι δύο διαφορετικοί χώροι δεν αποτελούν εναλλακτικές λύσεις, αλλά συμπληρωματικά στοιχεία ενός ενιαίου σχεδιασμού. Η τοπική μνήμη προσφέρει ανθεκτικότητα και ανεξαρτησία από το δίκτυο κατά τη διάρκεια της μέτρησης, ενώ η αποθήκευση στο νέφος προσφέρει μονιμότητα, προσβασιμότητα και δυνατότητα ιστορικής ανάλυσης. Τα χαρακτηριστικά που στερείται η μία επιλογή, τα παρέχει η άλλη, όσον αφορά το μέγεθος του χώρου και την ανεξαρτησία. Τα δεδομένα δημιουργούνται και προστατεύονται τοπικά υπό περιοριστικές συνθήκες και στη συνέχεια μεταφέρονται σε ένα περιβάλλον που μπορούν να αξιοποιηθούν χωρίς χρονικό περιθώριο.

Κεφάλαιο 5ο: Υλοποίηση Κυκλώματος και Λογισμικού

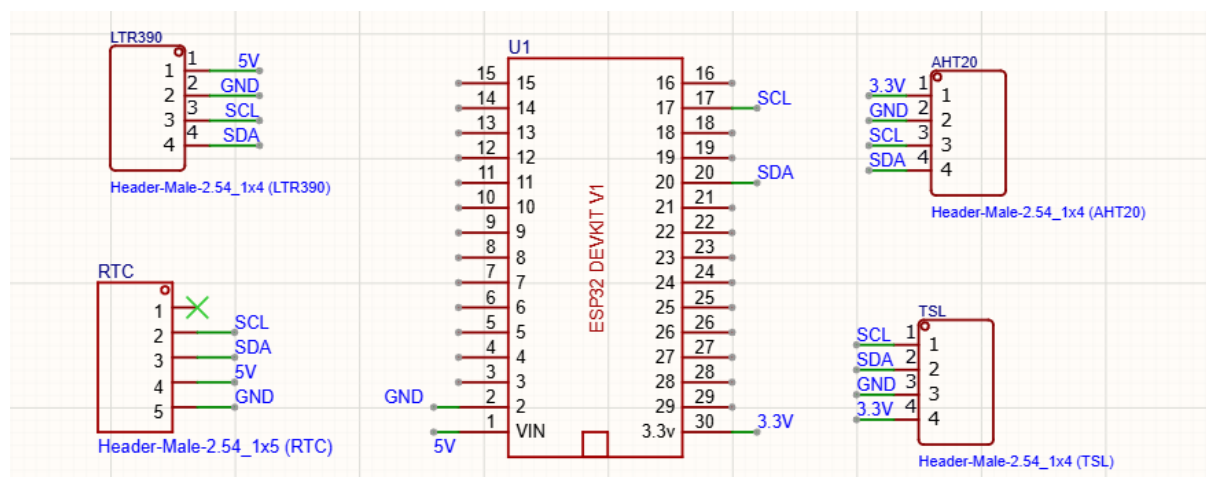
5.1 Εισαγωγή

Στα προηγούμενα κεφάλαια, παρουσιάστηκε το θεωρητικό υπόβαθρο των τεχνολογιών που αξιοποιήθηκαν και η συνολική αρχιτεκτονική του συστήματος σε λογικό επίπεδο. Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η συγκεκριμένη υλοποίηση του σταθμού μέτρησης και αναλύονται τα βήματα για τη συνδεσμολογία των εξαρτημάτων και ο κώδικας που εκτελείται στον μικροελεγκτή (firmware). Θα δοθούν περισσότερες πληροφορίες για τη διασύνδεση των αισθητήρων, τον αλγόριθμο εξομάλυνσης των μετρήσεων, τη μόνιμη τοπική αποθήκευση στη μνήμη flash, τον μηχανισμό σύνδεσης και αυθεντικοποίησης μέσω BLE και τη λειτουργία επαναφοράς του σταθμού.

5.2 Συνδεσμολογία Εξαρτημάτων

Όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4, τα τέσσερα περιφερειακά του σταθμού, δηλαδή το ρολόι πραγματικού χρόνου και οι αισθητήρες, συνδέονται στον ίδιο δίαυλο I²C του ESP32, με τη γραμμή σειριακών δεδομένων (SDA) στον ακροδέκτη GPIO21 και τη γραμμή σειριακού ρολογιού (SCL) στον ακροδέκτη GPIO22. Στο firmware, ο δίαυλος αρχικοποιείται με μία ρύθμιση που είναι ανεκτική στα σφάλματα (χρονικό όριο αναμονής ενός δευτερολέπτου ανά συναλλαγή), έτσι ώστε μία τυχόν αποσύνδεση ή αστοχία ενός μεμονωμένου αισθητήρα να μην «παγώσει» όλο τον μικροελεγκτή.

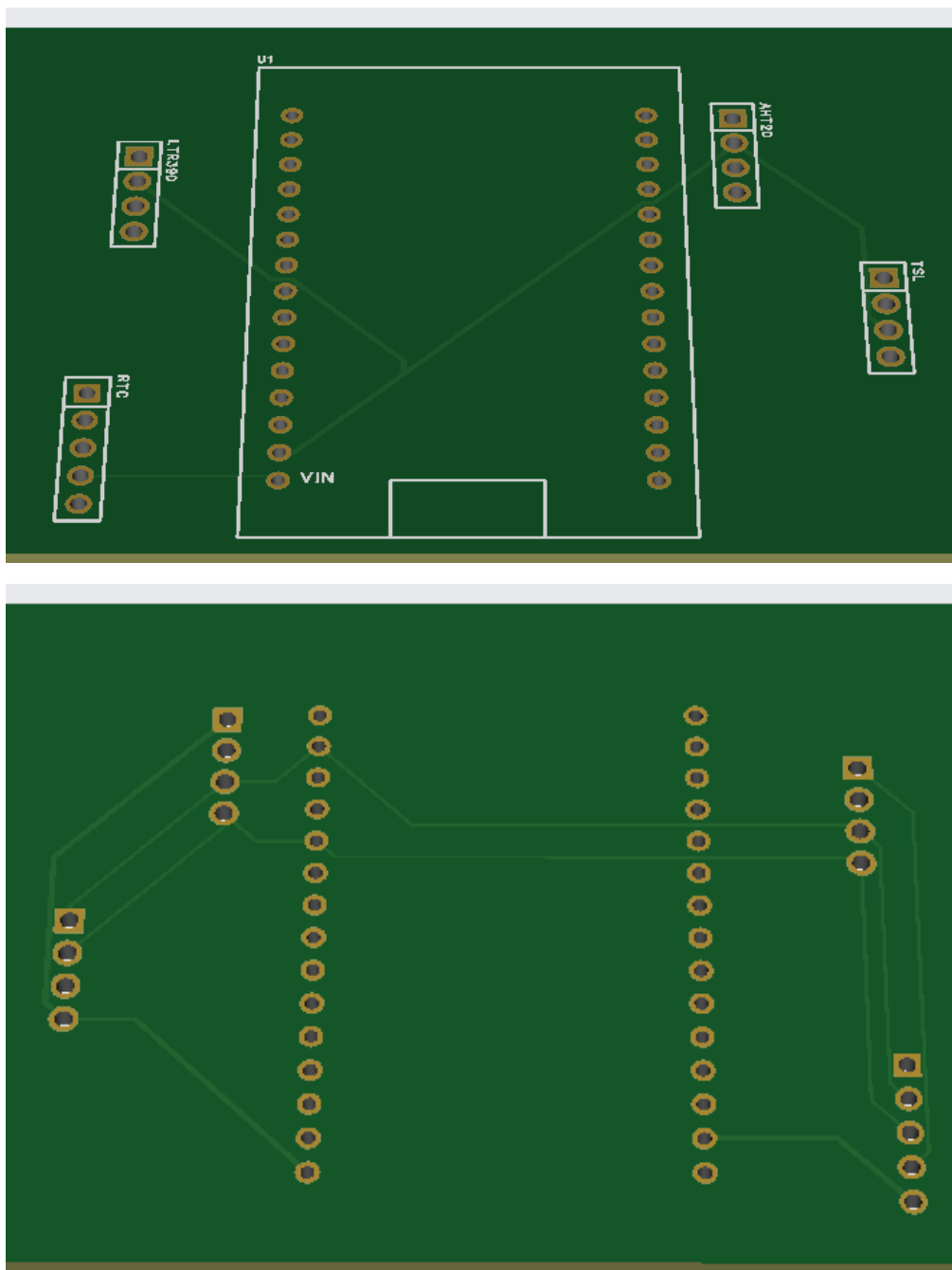
Η τροφοδοσία των μονάδων γίνεται από τους ακροδέκτες 3.3V και 5V του ESP32, ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε μίας, με κοινή γραμμή γείωσης (GND) για όλα τα εξαρτήματα. Η οριστική αντιστοίχιση τάσης ανά μονάδα και η πλήρης συνδεσμολογία, αποτυπώνονται στο σχέδιο της τυπωμένης πλακέτας που παρουσιάζεται στην επόμενη υποενότητα. Στην Εικόνα 5.1 απεικονίζεται το σχηματικό του συνολικού κυκλώματος, καθώς και η συνδεσμολογία η οποία τυπώθηκε στη συνέχεια σε πλακέτα PCB.



Εικόνα 5.1: Συνδεσμολογία κυκλώματος

5.3 Σχεδίαση PCB

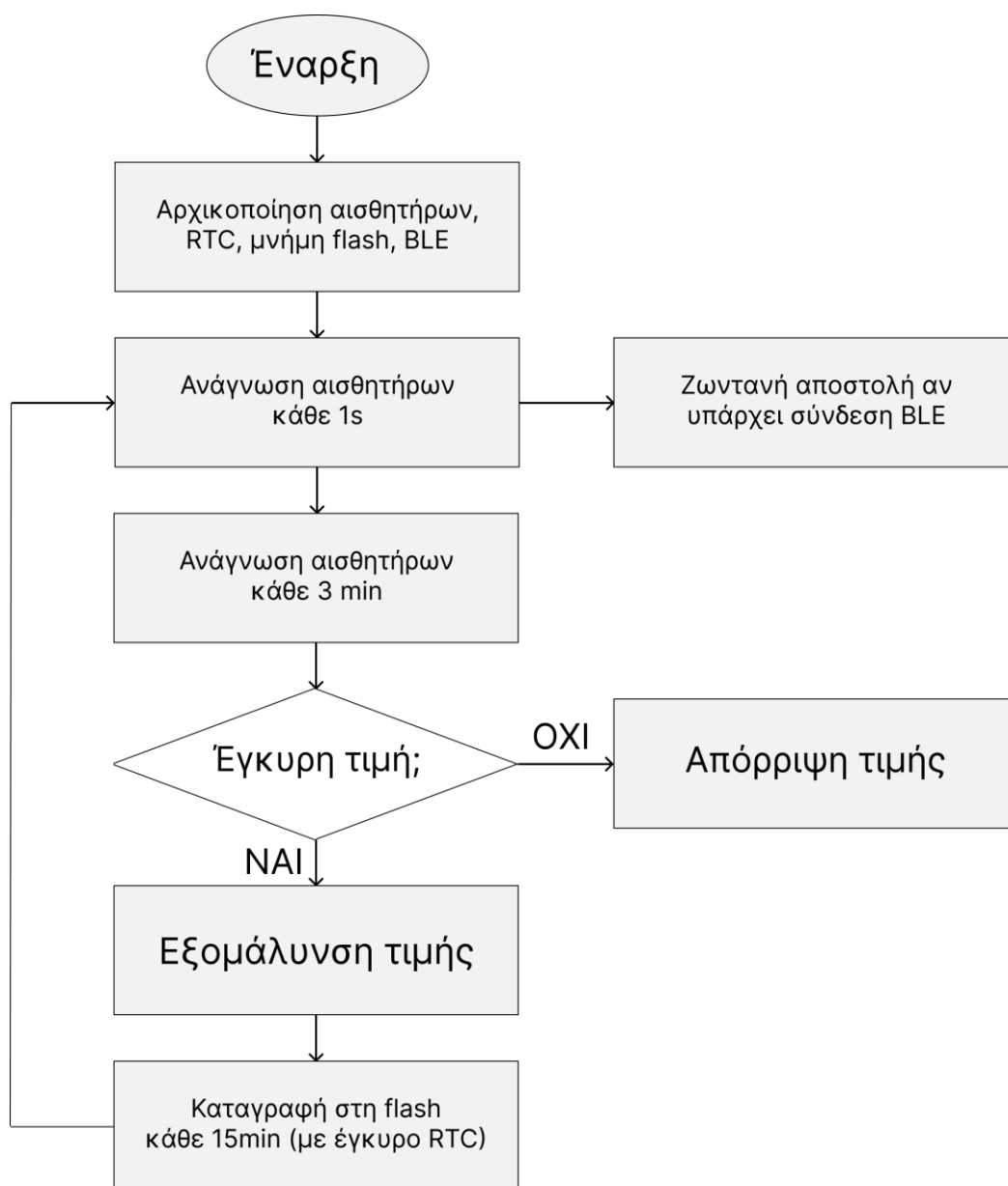
Η μετάβαση από το αρχικό ράστερ (breadboard) σε τυπωμένη πλακέτα PCB αποσκοπεί στην αύξηση της αντοχής και της αξιοπιστίας των συνδέσεων. Αυτό ισχύει ειδικά για μία συσκευή που προορίζεται να συνοδεύει προϊόντα κατά τη μεταφορά τους, καθώς και στη μείωση του συνολικού όγκου του σταθμού μέτρησης. Το σχέδιο της πλακέτας περιλαμβάνει κυρίως τις συνδέσεις μεταξύ του μικροελεγκτή και των εξαρτημάτων, καθώς και επιπρόσθετο χώρο, έτσι ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν πάνω στη πλακέτα μαζί με τα καλώδια. Οι διαστάσεις της πλακέτας είναι 15 εκατοστά σε μήκος και 5 εκατοστά πλάτος. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε συγκόλληση τριών Pin Headers 1x4 Male 2.54mm και ενός 1x5 Female για το RTC στους ακροδέκτες, κοντά στους οποίους τοποθετήθηκαν οι αντίστοιχοι αισθητήρες (Εικόνα 5.2).



Εικόνα 5.2: Οι δύο όψεις της πλακέτας σε σχήμα 3D

5.4 Αρχικοποίηση και Ανάγνωση Αισθητήρων

Σύμφωνα με την Εικόνα 5.3, η λειτουργία του προγράμματος του μικροελεγκτή διαρθρώνεται σε δύο στάδια. Κατά την εκκίνηση, ο ESP32 αρχικοποιεί τα περιφερειακά, φορτώνει το αποθηκευμένο ιστορικό από τη μνήμη flash και ενεργοποιεί τον εξυπηρετητή BLE. Στη συνέχεια, εισέρχεται στον κύριο βρόχο, που αποτελείται από τρεις ανεξάρτητους timers. Κάθε τρία λεπτά λαμβάνεται μία νέα ανάγνωση των αισθητήρων, η οποία αν κριθεί έγκυρη, τροφοδοτεί τον αλγόριθμο εξομάλυνσης και κάθε δεκαπέντε λεπτά καταγράφεται μόνιμα η εξομαλυνμένη τιμή στη μνήμη flash. Παράλληλα, όταν υπάρχει ενεργή και αυθεντικοποιημένη σύνδεση στο κινητό, ο σταθμός αποστέλλει μια στιγμιαία, μη εξομαλυνμένη τιμή κάθε δευτερόλεπτο. Ανεξάρτητα από τη ροή αυτή, η επικοινωνία με το κινητό εξυπηρετείται ασύγχρονα μέσω BLE και αναλαμβάνουν τη διαδικασία ταυτοποίησης, τον συγχρονισμό της ώρας και, όταν ζητηθεί, τη διαγραφή της μνήμης.



Εικόνα 5.3: Διάγραμμα Ροής του firmware

Κατά την εκκίνηση `setup()`, ο ESP32 αρχικοποιεί διαδοχικά τη σειριακή θύρα αποσφαλμάτωσης, τον δίαυλο I²C και τα τέσσερα περιφερειακά. Ο αισθητήρας LTR390 ρυθμίζεται αποκλειστικά σε λειτουργία μέτρησης υπεριώδους ακτινοβολίας (UVS mode) με ενίσχυση 18x και ανάλυση 20-bit, ο συνδυασμός των οποίων καθορίζει και τον συντελεστή βαθμονόμησης της τελικής τιμής. Ο TSL25911 ρυθμίζεται με χαμηλή ενίσχυση (gain) και σύντομο χρόνο ολοκλήρωσης (integration time) των 100ms. Ο χρόνος ολοκλήρωσης είναι ο χρόνος που απορροφά φωτόνια ο αισθητήρας για να διαβάσει το αποτέλεσμα μετά. Όσο μεγαλύτερος είναι αυτός ο χρόνος, τόσο περισσότερη συσσωρευμένη πληροφορία, άρα και μεγαλύτερη ευαισθησία σε χαμηλό φωτισμό. Αυτή η επιλογή αποσκοπεί στην αποφυγή κορεσμού του αισθητήρα σε συνθήκες έντονου, άμεσου ηλιακού φωτισμού, διατηρώντας παράλληλα την πλήρη κλίμακα μέτρησης (0 έως 88000 lux), ενώ κατά τη λειτουργία, η ενίσχυση προσαρμόζεται δυναμικά. Στη συνέχεια, αρχικοποιείται το σύστημα αρχείων LittleFS στη μνήμη flash και φορτώνεται το αποθηκευμένο ιστορικό από προηγούμενες περιόδους λειτουργίας (sessions), εφόσον αυτό το ιστορικό υπάρχει. Τέλος, αρχικοποιείται ο εξυπηρετητής BLE.

Ο βασικός βρόχος του προγράμματος `loop()` διακρίνει τρεις διαφορετικούς ρυθμούς λειτουργίας μέσω τριών ανεξάρτητων χρονομετρητών: την ανάγνωση των αισθητήρων κάθε τρία λεπτά (`SENSOR_POLL_INTERVAL`), την καταγραφή μίας εξομαλυσμένης τιμής κάθε δεκαπέντε λεπτά (`LOG_INTERVAL`) και, δεδομένου πως υπάρχει ενεργή και αυθεντικοποιημένη σύνδεση BLE, μία επιπλέον live ανάγνωση κάθε ένα δευτερόλεπτο. Σε κάθε ανάγνωση, η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία λαμβάνονται από τον αισθητήρα AHT20 μέσω μίας ενιαίας κλήσης (`aht.getEvent`) που συμπληρώνει ταυτόχρονα δύο δομές δεδομένων. Η τιμή υπεριώδους ακτινοβολίας υπολογίζεται διαιρώντας την ακατέργαστη ένδειξη του LTR390 με έναν συντελεστή βαθμονόμησης (2300) που ορίζεται από το φύλλο δεδομένων (datasheet) και αντιστοιχεί στη ρύθμιση ενίσχυσης και ανάλυσης κατά την αρχικοποίηση. Η ένταση του φωτός προκύπτει από τον TSL25911, ο οποίος επιστρέφει σε μία ανάγνωση τα κανάλια πλήρους φάσματος και υπέρυθρου φωτός ενωμένα σε μία τιμή 32 bit. Αυτή η τιμή διαχωρίζεται και μετατρέπεται σε lux μέσω της αντίστοιχης συνάρτησης της βιβλιοθήκης. Σε περίπτωση κορεσμού του αισθητήρα, αντί να καταγραφεί εσφαλμένα ως αρνητική, η τιμή περιορίζεται στο ανώτατο όριο της κλίμακας του (88.000 Lux).

Η ανάγνωση της φωτεινότητας δεν είναι στατική, αλλά υλοποιείται με μηχανισμό αυτόματης προσαρμογής εύρους στη συνάρτηση `readLuxAutoRange()`. Όταν η μετρούμενη ένταση είναι πολύ χαμηλή, η συνάρτηση αυξάνει την ενίσχυση και τον χρόνο ολοκλήρωσης του αισθητήρα, ώστε να αποτυπώσει με ακρίβεια ακόμη και ασθενή φωτισμό. Αντιθέτως, η ενίσχυση παραμένει χαμηλή υπό έντονο φως για να αποφύγει τον κορεσμό. Για τη ζωντανή ανάγνωση χρησιμοποιείται η γρήγορη εκδοχή, ενώ για την τακτική δειγματοληψία κάθε τρία λεπτά επιτρέπεται η υψηλή ενίσχυση, δίνοντας προτεραιότητα στην ακρίβεια της τιμής που θα εξομαλυνθεί και θα καταγραφεί. Η γρήγορη εκδοχή λειτουργεί χωρίς το βήμα αυτόματης αύξησης ευαισθησίας, άρα και χωρίς την επιπλέον καθυστέρηση 350ms που απαιτεί η υψηλή ενίσχυση. Αυτό στον κώδικα γίνεται με την παράμετρο `allowHighGain:false` και `true` αντίστοιχα.

Όταν πληρούνται οι προϋποθέσεις για ζωντανή ενημέρωση, οι ακατέργαστες τιμές μετατρέπονται απευθείας σε αντικείμενο JSON με ένδειξη «live», χωρίς καμία εξομάλυνση και αποστέλλονται στην εφαρμογή του κινητού μέσω του χαρακτηριστικού δεδομένων, όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 6. Αντίθετα, όταν πρόκειται για τακτική ανάγνωση κάθε τρία λεπτά, οι τιμές δεν αποστέλλονται απευθείας, αλλά τροφοδοτούν τον αλγόριθμο εξομάλυνσης που αναλύεται παρακάτω.

5.5 Αλγόριθμος Εξομάλυνσης

Η εξομάλυνση των μετρήσεων υλοποιείται στη συνάρτηση `smoothedAverage()`, με τη βοήθεια τεσσάρων ανεξάρτητων κυκλικών καταχωρητών (`circular buffer`) πέντε θέσεων, έναν για κάθε μετρούμενη παράμετρο (`tempBuffer`, `humBuffer`, `uvBuffer`, `luxBuffer`). Η συνάρτηση εξομάλυνσης δέχεται τον κατάλληλο καταχωρητή και την πιο πρόσφατη ακατέργαστη τιμή, την τοποθετεί στην επόμενη διαθέσιμη θέση του καταχωρητή, αντικαθιστώντας κυκλικά την παλαιότερη τιμή μόλις συμπληρωθούν και οι πέντε θέσεις και επιστρέφει τον αριθμητικό μέσο όρο του συνόλου. Όταν καλείται για πρώτη φορά η συνάρτηση, όλες οι θέσεις του καταχωρητή αρχικοποιούνται με τη πρώτη διαθέσιμη τιμή, έτσι ώστε να αποφευχθεί η απόκλιση του μέσου όρου προς το μηδέν κατά τις πρώτες μετρήσεις μετά την εκκίνηση. Η ίδια λογική εφαρμόζεται ανεξάρτητα και παράλληλα στη θερμοκρασία, την υγρασία, τον δείκτη UV και την ένταση φωτός, παράγοντας τις τέσσερις εξομαλυσμένες τιμές που καταγράφονται κάθε δεκαπέντε λεπτά.

Ο έλεγχος εγκυρότητας των τιμών υλοποιείται στη συνάρτηση `isValidReading()`, η οποία επιβεβαιώνει ότι κάθε μέγεθος βρίσκεται εντός των φυσικών ορίων λειτουργίας των αισθητήρων. Ο έλεγχος αυτός εφαρμόζεται σε δύο σημεία, πρώτα στην ακατέργαστη τιμή πριν αυτή εισαχθεί στον κυκλικό καταχωρητή και στη συνέχεια στην εξομαλυσμένη τιμή, πριν την τελική καταγραφή. Ο πρώτος έλεγχος πραγματοποιείται για να αποφευχθεί η καταστροφή του μέσου όρου λόγω μίας εσφαλμένης ένδειξης. Αν έστω και μία τιμή βρεθεί εκτός ορίων, ολόκληρη η εγγραφή απορρίπτεται. Πέρα από τον έλεγχο ορίων, η καταγραφή προϋποθέτει δύο ακόμη συνθήκες, ότι έχει ήδη συλλεχθεί τουλάχιστον ένα έγκυρο δείγμα και κυρίως, ότι η ώρα του RTC είναι έγκυρη, με την `timeIsValid()`. Έτσι, καμία μέτρηση δεν αποθηκεύεται χωρίς αξιόπιστη χρονική σήμανση.

Πριν από κάθε καταγραφή, οι εξομαλυσμένες τιμές ελέγχονται ως προς την εγκυρότητά τους σε σχέση με τα φυσικά όρια λειτουργίας των αισθητήρων. Πιο συγκεκριμένα, η θερμοκρασία πρέπει να βρίσκεται εντός του εύρους λειτουργίας του AHT20 (-40 έως 85°C), η σχετική υγρασία εντός του 0 έως 100%, ο δείκτης UV εντός του 0 έως 16 και η ένταση φωτός εντός του 0 έως 88000 lux. Στη περίπτωση που έστω και μία τιμή βρεθεί εκτός των παραπάνω ορίων, ολόκληρη η εγγραφή απορρίπτεται και δεν καταγράφεται, καθώς μία τέτοια απόκλιση υποδηλώνει πιθανή στιγμιαία αστοχία κάποιου αισθητήρα και όχι πραγματική περιβαλλοντική συνθήκη.

5.6 Αποθήκευση στη μνήμη Flash (LittleFS)

Το ιστορικό των μετρήσεων διατηρείται στη μνήμη RAM του ESP32 ως ένας πίνακας 1500 εγγραφών (`LogEntry history[1500]`), αλλά προκειμένου να μην χάνεται σε περίπτωση διακοπής τροφοδοσίας ή επανεκκίνησης, αντιγράφεται και στην εσωτερική μνήμη flash του μικροελεγκτή μέσω του συστήματος αρχείων LittleFS. Μετά από κάθε νέα καταγραφή, δηλαδή κάθε δεκαπέντε λεπτά, το σύνολο του πίνακα, μαζί με τον δείκτη της τρέχουσας θέσης εγγραφής, γράφεται ως ένα ενιαίο δυαδικό αρχείο στη μνήμη flash, αντικαθιστώντας το προηγούμενο αντίγραφο.

Η εγγραφή στη μόνιμη μνήμη σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι ανθεκτική σε απότομες και απρόβλεπτες διακοπές τροφοδοσίας, κάτι που δεν μπορεί να αποκλειστεί σαν πιθανότητα σε μία πραγματική περίπτωση. Αντί να εγγράφεται απευθείας το κύριο αρχείο ιστορικού, η συνάρτηση `saveToFlash()` γράφει πρώτα σε ένα προσωρινό αρχείο και, όταν ολοκληρωθεί επιτυχώς η εγγραφή, το μετονομάζει στο τελικό. Συνεπώς, αν η τροφοδοσία διακοπεί στη μέση μιας εγγραφής, το προηγούμενο ακέραιο αρχείο παραμένει άθικτο και δεν χάνεται το ιστορικό. Στην επόμενη εκκίνηση, η αντίστοιχη συνάρτηση φόρτωσης ελέγχει επιπλέον το μέγεθος και την εγκυρότητα του αρχείου πριν το εμπιστευτεί, ξεκινώντας από μηδενική κατάσταση σε περίπτωση αλλοίωσης.

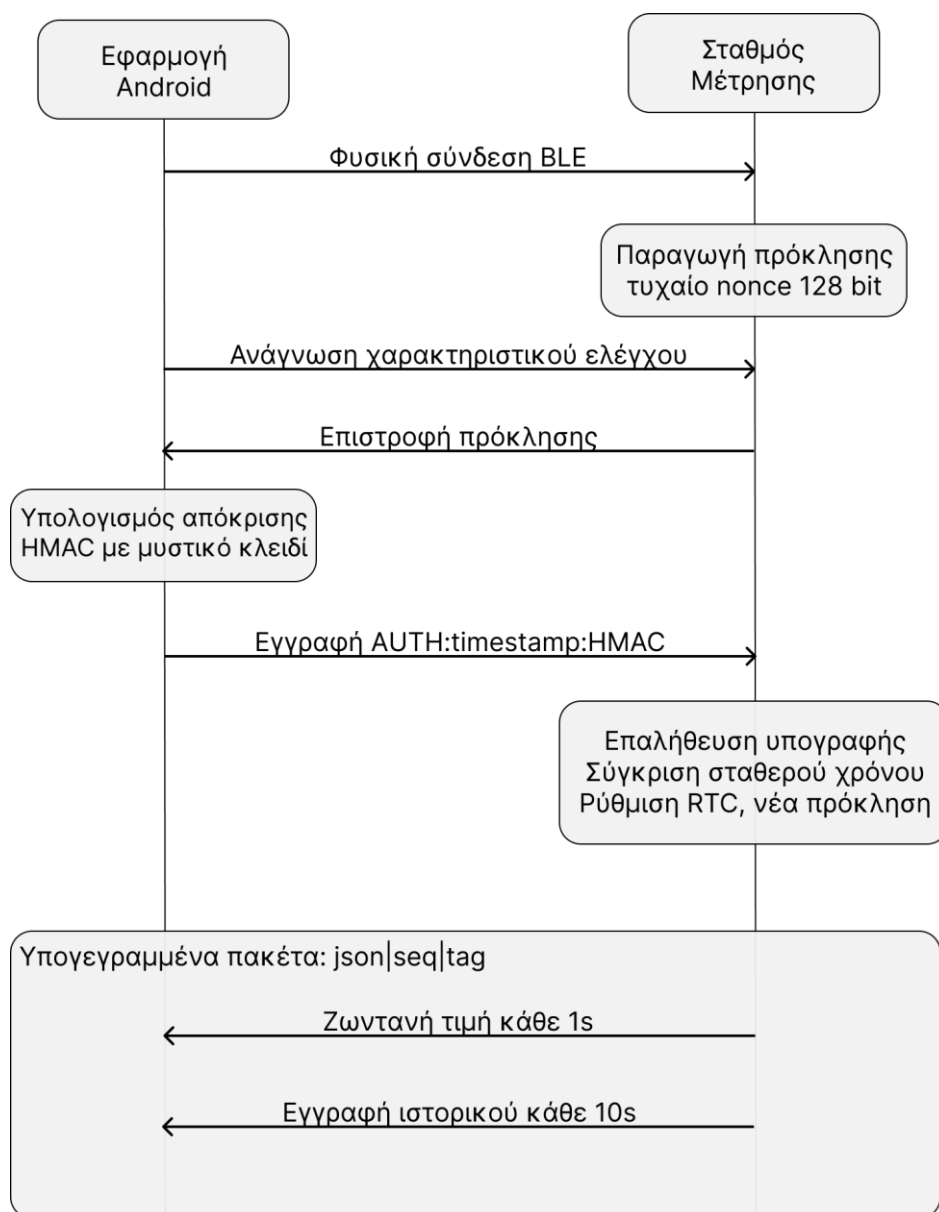
Κατά την εκκίνηση του συστήματος, αν το αρχείο αυτό υπάρχει ήδη, διαβάζεται και ανακτάται πλήρως η κατάσταση αυτού του πίνακα (`loadFromFlash()`), με σκοπό ο σταθμός να συνεχίσει τη καταγραφή ακριβώς από εκεί που είχε σταματήσει πριν από την επανεκκίνηση. Η προσάρτηση (`mount`) είναι μία σημαντική λειτουργία της μνήμης `flash`, η οποία επιτρέπει τον κώδικα να οργανώνει και να προετοιμάζει τη μνήμη κατάλληλα, ώστε να μπορεί να διαβάσει και να γράψει δεδομένα με τη μορφή αρχείων ή φακέλων μέσω ενός συστήματος αρχείων (σε αυτή τη περίπτωση το `LittleFS`). Χωρίς προσάρτηση, η μνήμη `flash` είναι μία απλή σειρά ακατέργαστων αριθμών και διευθύνσεων (`raw bytes`), όπου αν θέλαμε να αποθηκεύσουμε κάτι, θα προϋπόθετε να γνωρίζουμε ακριβώς το `byte` που θέλουμε να γράψουμε. Με τη προσάρτηση, ο μικροελεγκτής ενεργοποιεί ένα σύστημα αρχείων (`file system`), προσδίδοντας οργάνωση στα δεδομένα, ακεραιότητα, αντοχή και προστασία από πτώσεις τάσης. Αν το σύστημα αρχείων δεν μπορεί να προσαρτηθεί (`mounted`), μορφοποιείται αυτόματα εκ νέου με την `LittleFS.begin(true)`.

Αμέσως μετά την ανάκτηση του ιστορικού, ο μικροελεγκτής σημειώνει τη θέση του πίνακα στην οποία βρισκόταν κατά την εκκίνηση (`sessionStartHead = head`). Η τιμή αυτή δεν χρησιμοποιείται για την ίδια την αποθήκευση, αλλά για τον συγχρονισμό μέσω BLE. Όπως θα δούμε παρακάτω, επιτρέπει στον σταθμό να ξεχωρίζει τις εγγραφές που δημιουργήθηκαν στην τρέχουσα περίοδο λειτουργίας από εκείνες προηγούμενων `sessions` για να αποστέλλει στην εφαρμογή μόνο τις νεότερες.

5.7 BLE Server και Αυθεντικοποίηση

Ο μικροελεγκτής είναι ικανός να λειτουργήσει ως εξυπηρετητής BLE, αξιοποιώντας μία υπηρεσία με δύο χαρακτηριστικά. Το πρώτο χαρακτηριστικό δεδομένων (`PROPERTY_NOTIFY`) υποστηρίζει μόνο ειδοποιήσεις προς την εφαρμογή και το άλλο χαρακτηριστικό ελέγχου υποστηρίζει τόσο εγγραφή (`PROPERTY_WRITE`), όσο και ανάγνωση (`PROPERTY_READ`) και χρησιμοποιείται για την αυθεντικοποίηση της σύνδεσης. Με κάθε νέα φυσική σύνδεση συσκευής, ο σταθμός σημειώνεται ως συνδεδεμένος αλλά χωρίς αυθεντικοποίηση, ενώ με κάθε αποσύνδεση επανέρχεται αυτόματα στη κατάσταση προώθησης της ύπαρξής του (`advertising`), προκειμένου να παραμείνει ανιχνεύσιμος για την επόμενη σύνδεση.

Η αυθεντικοποίηση βασίζεται σε ένα σχήμα πρόκλησης-απόκρισης (`challenge-response`) με χρήση `HMAC-SHA256`, αντί για την απευθείας μετάδοση ενός κοινού μυστικού κλειδιού (`SECRET_KEY`), όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 5.4. Με κάθε νέα σύνδεση, ο σταθμός παράγει μέσω της `generateNonce()` μία τυχαία, μοναδική συμβολοσειρά 32 δεκαεξαδικών χαρακτήρων (`nonce`) με τη βοήθεια της γεννήτριας αριθμών `esp_random()` του μικροελεγκτή. Ο σταθμός τη διατηρεί ως την τρέχουσα «πρόκληση» στη μεταβλητή `currentNonce` και την τοποθετεί ως τιμή του χαρακτηριστικού ελέγχου (`pAuthChar`), προκειμένου η εφαρμογή να μπορεί να τη διαβάσει. Για να αυθεντικοποιηθεί, η εφαρμογή οφείλει να υπολογίσει και να στείλει πίσω ένα μήνυμα της μορφής «`AUTH:<timestamp>:<hmac>`», όπου το `hmac` προκύπτει από τον υπολογισμό `HMAC-SHA256` επί του μηνύματος «`<nonce>:AUTH:<timestamp>`» με κλειδί το κοινό μυστικό κλειδί. Ο σταθμός υπολογίζει ανεξάρτητα την ίδια τιμή μέσω της `hmacSha256Hex()` και τη συγκρίνει με αυτή που έλαβε μέσω της συνάρτησης σύγκρισης σταθερού χρόνου `constantTimeEquals()`, η οποία αποτρέπει την πιθανότητα διαρροής πληροφορίας μέσω μέτρησης του χρόνου απόκρισης. Εφόσον οι δύο τιμές ταυτίζονται, ο σταθμός θεωρείται αυθεντικοποιημένος (`isAuthenticated`), ενημερώνει το ρολόι πραγματικού χρόνου του με βάση τη χρονική σφραγίδα που έστειλε το κινητό και ζητά άμεση αποστολή του ιστορικού (`forceSync`), παρακάμπτοντας το χρονικό διάστημα αποστολής.



Εικόνα 5.4: Διάγραμμα αυθεντικοποίησης BLE

Ωστόσο, η χρονική σφραγίδα που συνοδεύει το μήνυμα δεν γίνεται δεκτή χωρίς έλεγχο. Ο σταθμός πρώτα επαληθεύει ότι αντιστοιχεί σε ένα λογικό χρονικό παράθυρο που ορίζουν οι σταθερές `MIN_VALID_EPOCH` και `MAX_VALID_EPOCH`, δηλαδή από την αρχή του 2025 έως περίπου το 2049, και μετά ρυθμίζει το ρολόι με βάση το timestamp μέσω της `rtc.adjust()`. Σε αντίθετη περίπτωση, η σύνδεση παραμένει έγκυρη αλλά το ρολόι διατηρεί την προηγούμενη τιμή του. Αυτός ο έλεγχος προστατεύει το σύστημα από εσφαλμένες τιμές που θα αχρήστευαν το ιστορικό. Τέλος, ο σταθμός αντικαθιστά αμέσως την πρόκληση που μόλις χρησιμοποιήθηκε με μία νέα τυχαία τιμή, καλώντας την `rotateNonce()`. Η τιμή που έχει χρησιμοποιηθεί δεν απορρίπτεται, αλλά διατηρείται χωριστά στη μεταβλητή `authNonce()`, καθώς αποτελεί τη βάση για την υπογραφή όλων των μηνυμάτων της συγκεκριμένης περιόδου λειτουργίας. Με αυτό τον τρόπο, η πρόκληση που έχει ήδη αξιοποιηθεί δεν μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί, ενώ ταυτόχρονα υπάρχει πάντοτε μία νέα πρόκληση για την επόμενη εντολή.

Η προστασία δεν περιορίζεται στην αρχική χειραψία, αλλά επεκτείνεται σε κάθε μήνυμα που αποστέλλει ο σταθμός με τη βοήθεια της `notifySigned()`. Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 5.4, κάθε ειδοποίηση προς την εφαρμογή αποτελείται από τρία πεδία: το αντικείμενο JSON με τις μετρήσεις, έναν αριθμό αναγνώρισης μηνύματος (`msgSeq`) και μία υπογραφή, χωρισμένα μεταξύ τους με τον χαρακτήρα της κατακόρυφης γραμμής `|`. Ο συγκεκριμένος χαρακτήρας επιλέχθηκε ως διαχωριστικό διότι δεν εμφανίζεται ποτέ μέσα σε οργανωμένο JSON. Η υπογραφή προκύπτει από τον υπολογισμό HMAC-SHA256 επί της ένωσης της πρόκλησης της τρέχουσας συνεδρίας (`authNonce`), του αριθμού αναγνώρισης και του σώματος του μηνύματος. Από αυτό το αποτέλεσμα διατηρούνται τα πρώτα 16 δεκαεξадικά ψηφία (ή 94 δυαδικά). Η περικοπή αυτή συγκρατεί το μέγεθος του πακέτου εντός των ορίων μίας ειδοποίησης BLE, διατηρώντας και ένα επίπεδο ασφάλειας. Το `msgSeq` μηδενίζεται σε κάθε επιτυχή αυθεντικοποίηση και αυξάνεται σε κάθε αποστολή, προκειμένου η εφαρμογή να απορρίπτει κάθε πακέτο που δεν φέρει αριθμό αυστηρά μεγαλύτερο από εκείνον του τελευταίου αποδεκτού μηνύματος.

Η μεταφορά του ιστορικού προς την εφαρμογή πραγματοποιείται περιοδικά κάθε δέκα δευτερόλεπτα με βάση τον `timer lastBatchTick`, εφόσον υπάρχει συνδεδεμένη και αυθεντικοποιημένη συσκευή, καθώς και μία φορά μετά την ολοκλήρωση της αυθεντικοποίησης (μέσω της `forceSync`). Σε κάθε κύκλο των 10s, ο σταθμός δεν διατρέχει ολόκληρο τον κυκλικό καταχωρητή, αλλά μόνο τις εγγραφές της τρέχουσας περιόδου λειτουργίας, ξεκινώντας από τη θέση που είχε σημειωθεί κατά την εκκίνηση (`sessionStartHead`) και προχωρώντας για όσες εγγραφές έχουν όντως καταγραφεί από τότε (`sessionLogged`). Από αυτές, αποστέλλονται μόνο όσες συνοδεύονται από timestamp νεότερο της τελευταίας (`lastSentTime`), έτσι ώστε να αποφευχθεί η επανάληψη των δεδομένων που έχει ήδη λάβει η εφαρμογή. Ανάμεσα σε διαδοχικά πακέτα μεσολαβεί μία σύντομη παύση λίγων ms, για να μην υπερφορτώνεται η ουρά αποστολής της ασύρματης διεπαφής και να μην χάνονται μηνύματα κατά τη μεταφορά. Το πλήθος των εγγραφών της συνεδρίας παρακολουθείται με τον ξεχωριστό `timer sessionLogged`. Έτσι, όταν ο κυκλικός καταχωρητής των `MAX_HIST` θέσεων συμπληρώσει ακριβώς μία πλήρη περιστροφή και ο δείκτης `head` επιστρέψει στη θέση `sessionStartHead`, το υπόλοιπο θα ήταν μηδέν και ο σταθμός θα συμπεραίνει εσφαλμένα ότι δεν υπάρχει καμία εγγραφή προς αποστολή.

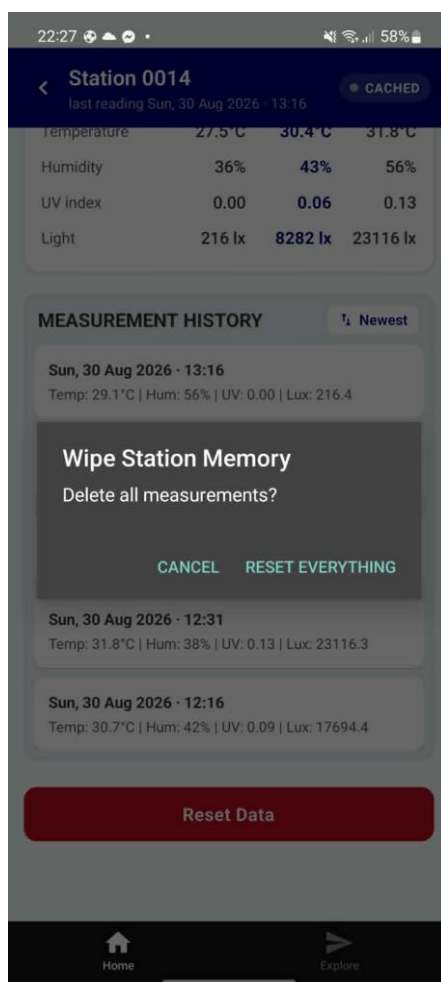
Αυτή η διαδικασία παρουσιάζει δύο ουσιώδη πλεονεκτήματα σε σχέση με την απευθείας μετάδοση του μυστικού κλειδιού. Πρώτα, το ίδιο κλειδί δεν διασχίζει ποτέ τον ασύρματο δίαυλο, παρά μόνο μία υπογραφή που προκύπτει από αυτό, οπότε η υποκλοπή της επικοινωνίας δεν αρκεί για την εξαγωγή του κλειδιού. Επιπλέον, καθώς η πρόκληση είναι τυχαία, μοναδική ανά σύνδεση και αχρηστεύεται μετά την πρώτη επιτυχή χρήση της, μία υπογραφή που υπέστη υποκλοπή δεν μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί σε μελλοντική σύνδεση (επίθεση επανάληψης). Κάθε νέα φυσική σύνδεση απαιτεί εξ αρχής ολόκληρη τη διαδικασία πρόκλησης-απόκρισης, ανεξάρτητα από το αν το ίδιο κινητό είχε αυθεντικοποιηθεί επιτυχώς σε προηγούμενη σύνδεση. Ως αποτέλεσμα, εξασφαλίζεται η επαλήθευση συσκευής, η ακεραιότητα των μετρήσεων και η απόρριψη επαναλήψεων.

5.8 Λειτουργία Reset

Η επαναφορά (`reset`) του σταθμού ακολουθεί την ίδια λογική πρόκλησης-απόκρισης με την αυθεντικοποίηση για να μην μπορεί να προκληθεί κατά λάθος ή κακόβουλα από τυχόν υποκλοπή προηγούμενης επικοινωνίας. Η εφαρμογή οφείλει να στείλει μήνυμα της μορφής «`RESET:<hmac>`», όπου το `hmac` προκύπτει από τον υπολογισμό HMAC-SHA256 επί του μηνύματος «`<nonce>:RESET`» με το ίδιο μυστικό κλειδί. Όταν η τιμή αυτή επαληθευτεί επιτυχώς, ο σταθμός μηδενίζει ολόκληρο τον πίνακα ιστορικού στη μνήμη RAM, επαναφέρει τον δείκτη εγγραφής στην αρχή και διαγράφει το αντίστοιχο αρχείο από την μνήμη flash, έτσι ώστε να μην ανακτηθεί κατά την επόμενη εκκίνηση.

Η εκτέλεση της διαγραφής όμως, δεν πραγματοποιείται στον χειριστή του χαρακτηριστικού ελέγχου. Ο χειριστής περιορίζεται στο να θέσει τη σημαία pendingWipe, ενώ η πραγματική διαγραφή εκτελείται στην αρχή του επόμενου κύκλου της loop(). Ο λόγος είναι ότι οι συναρτήσεις της ασύρματης διεπαφής εκτελούνται σε διαφορετική διεργασία από τον κύριο βρόχο, οπότε η απευθείας τροποποίηση του πίνακα history[] από εκεί θα μπορούσε να συμβεί ταυτόχρονα με μία εγγραφή ή ανάγνωση του ίδιου πίνακα και να οδηγήσει σε αλλοιωμένα δεδομένα ή bug. Με την αναβολή της εκτέλεσης, η εκκαθάριση πραγματοποιείται σε ασφαλές σημείο της ροής του προγράμματος. Πέρα από τον πίνακα history[] και τον δείκτη head, μηδενίζονται ο δείκτης έναρξης της περιόδου λειτουργίας sessionStartHead, ο timer sessionLogged και η τελευταία σταλμένη χρονική σφραγίδα lastSentTime. Παράλληλα, διαγράφονται τόσο το τελικό αρχείο /history.bin, όσο και το προσωρινό /history.tmp, προκειμένου να μην μπορεί να ανακτηθεί κανένα υπόλειμμα κατά την επόμενη εκκίνηση. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί πως η εντολή επαναφοράς δεν ελέγχει τη σημαία isAuthenticated, χωρίς να απαιτεί να έχει προηγηθεί επιτυχής αυθεντικοποίηση. Ο έλεγχος στηρίζεται αποκλειστικά στην ορθότητα της υπογραφής, η οποία προϋποθέτει τη γνώση του μυστικού κλειδιού, κρατώντας αμετάβλητο το επίπεδο ασφάλειας.

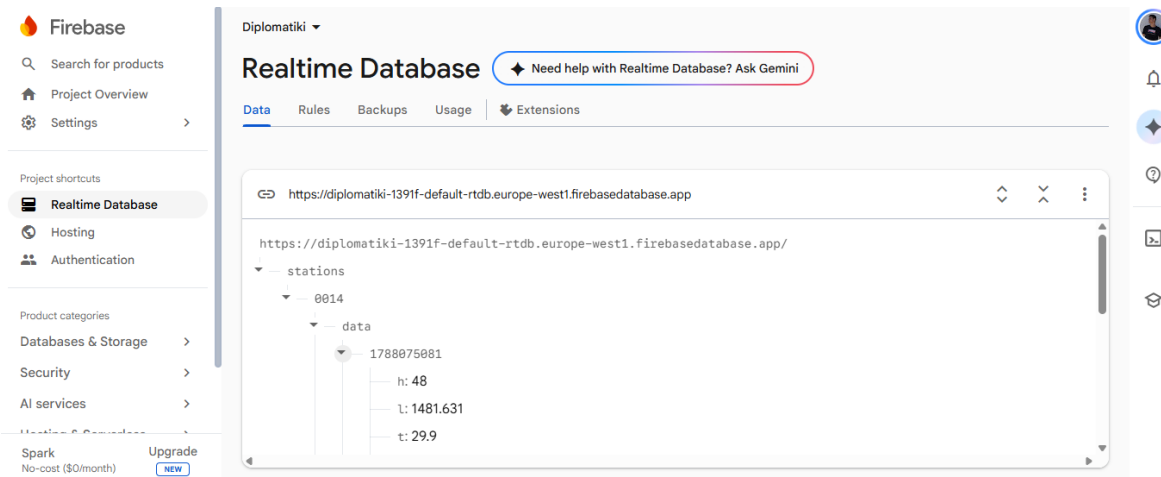
Στην Εικόνα 5.5, παρουσιάζεται το μήνυμα ειδοποίησης της εφαρμογής όταν ο χρήστης επιλέξει την διαγραφή των δεδομένων. Για την αποφυγή μη σκόπιμης διαγραφής των μετρήσεων, εμφανίζεται το μήνυμα για να επιβεβαιώσει την επιλογή του χρήστη.



Εικόνα 5.5: Επαναφορά Δεδομένων

Τα τρία σημεία αποθήκευσης είναι η μνήμη του ίδιου του σταθμού, το τοπικό αντίγραφο στο κινητό (SQLite) και το αντίστοιχο υποδέντρο (subtree) στο Firebase. Η λειτουργία αυτή αντιστοιχεί στο πρώτο από τα τρία σημεία αποθήκευσης του επιπέδου του υλικού, τα οποία διαγράφονται όταν ο χρήστης της εφαρμογής επιλέξει επαναφορά του σταθμού μέτρησης.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.6, το subtree αποτελείται από τον σύνδεσμο της ιστοσελίδας, τον σταθμό, και τα δεδομένα του, χωρισμένα σε χρονικές σφραγίδες. Η πλήρης επανεφαρμογή του σταθμού για μία νέα παρτίδα προϊόντων εξασφαλίζεται από αυτούς τους τρεις παράγοντες, χωρίς κατάλοιπα από προηγούμενες καταγραφές.



Εικόνα 5.6: Το subtree της Πλατφόρμας Firebase

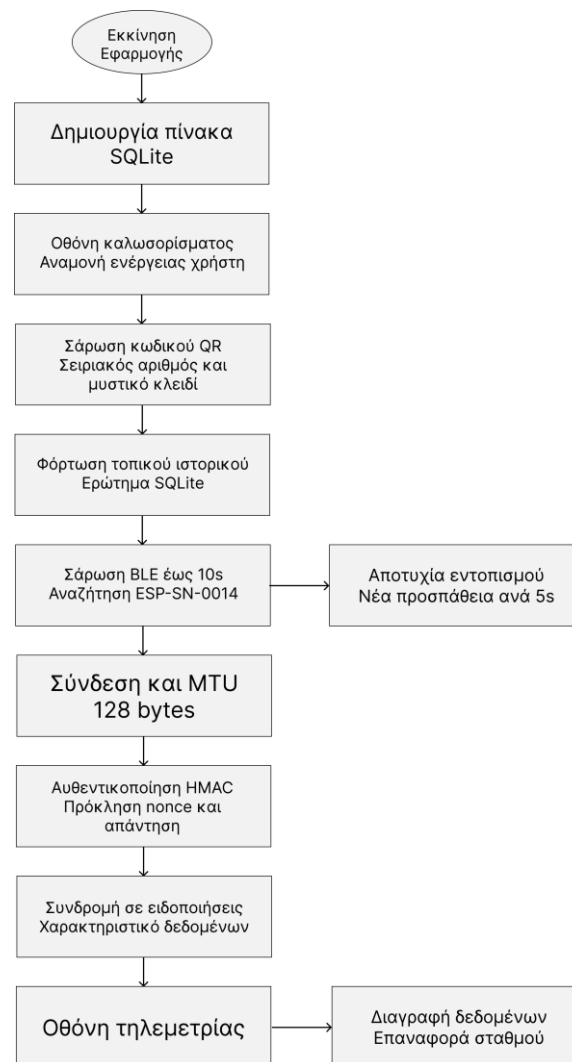
5.9 Επίλογος

Σε αυτό το κεφάλαιο έγινε μία περιγραφή της υλοποίησης του σταθμού μέτρησης σε επίπεδο υλικού και firmware. Έγινε λόγος για τον τρόπο συνδεσμολογίας των αισθητήρων στον κοινό διάυλο I²C, τη μετάβαση σε τυπωμένη πλακέτα, την αρχικοποίηση και την περιοδική ανάγνωση των αισθητήρων, τον αλγόριθμο εξομάλυνσης με κυκλικούς καταχωρητές, την τοπική αποθήκευση στη μνήμη flash και τον μηχανισμό σύνδεσης με αυθεντικοποίηση και επαναφορά με BLE. Με αυτό το τρόπο, ολοκληρώνεται η ανάλυση των κεντρικών σημείων όσον αφορά το τρόπο λειτουργίας του σταθμού μέτρησης του συστήματος. Στη συνέχεια, θα αναλυθεί το ενδιαμέσο και τελευταίο επίπεδο της αρχιτεκτονικής, το οποίο συμπεριλαμβάνει την αποθήκευση δεδομένων με τη βοήθεια της εφαρμογής Android στη κινητή συσκευή και την απεικόνισή τους στην ιστοσελίδα με την Firebase Realtime Database και Hosting.

Κεφάλαιο 6ο: Υλοποίηση Εφαρμογής Android

6.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η υλοποίηση της εφαρμογής για κινητές συσκευές Android, η οποία αποτελεί το ενδιάμεσο επίπεδο του συστήματος, όπως αυτό ορίστηκε στο Κεφάλαιο 4. Η εφαρμογή αναλαμβάνει τον ρόλο του διαμεσολαβητή (gateway) μεταξύ του σταθμού μέτρησης και της πλατφόρμας Firebase, συνδυάζοντας τέσσερις μοναδικές λειτουργίες: την ασφαλή σύνδεση με τον σταθμό μέσω σάρωσης κωδικού QR και Bluetooth Low Energy, την προβολή των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο, την τοπική διατήρηση ιστορικού μέσω μιας ενσωματωμένης βάσης δεδομένων SQLite και την προώθηση των νέων εγγγραφών στο υπολογιστικό νέφος, όπου καθίστανται προσβάσιμες μέσω μιας συνοδευτικής ιστοσελίδας απεικόνισης και εξαγωγής δεδομένων. Πέρα από τις λειτουργίες αυτές, η εφαρμογή αποτελεί και το σημείο εκτέλεσης της επαναφοράς του συστήματος. Αρχικά, περιγράφεται η δομή του έργου και το περιβάλλον ανάπτυξης. Στη συνέχεια, αναλύεται ο μηχανισμός σύνδεσης και αυθεντικοποίησης, ο τρόπος προβολής των δεδομένων στον χρήστη, η αρχιτεκτονική της τοπικής αποθήκευσης και, τέλος, η επικοινωνία με την πλατφόρμα Firebase και η λειτουργία της ιστοσελίδας απεικόνισης.



Εικόνα 6.1: Διάγραμμα Ροής Εφαρμογής Android

Η συνολική ροή εκτέλεσης της εφαρμογής, από την εκκίνηση μέχρι την οθόνη τηλεμετρίας, καθώς και η σειρά που ενεργοποιείται κάθε μηχανισμός, αποτυπώνεται στην Εικόνα 6.1. Το διάγραμμα απεικονίζει τα σημαντικά σημεία του κώδικα, δηλαδή την δημιουργία πίνακα SQLite, τη σάρωση του κωδικού QR, τη φόρτωση του τοπικού ιστορικού, τον εντοπισμό και σύνδεση σε BLE με HMAC και τη συνδρομή στις ειδοποιήσεις του χαρακτηριστικού δεδομένων. Οι διακλαδώσεις στα δεξιά υποδηλώνουν την αποτυχία σάρωσης του κωδικού QR και την δυνατότητα επαναφοράς δεδομένων αντίστοιχα. Κάθε ενδιάμεσο στάδιο αναλύεται λεπτομερώς παρακάτω.

6.2 Δομή και Περιβάλλον Ανάπτυξης

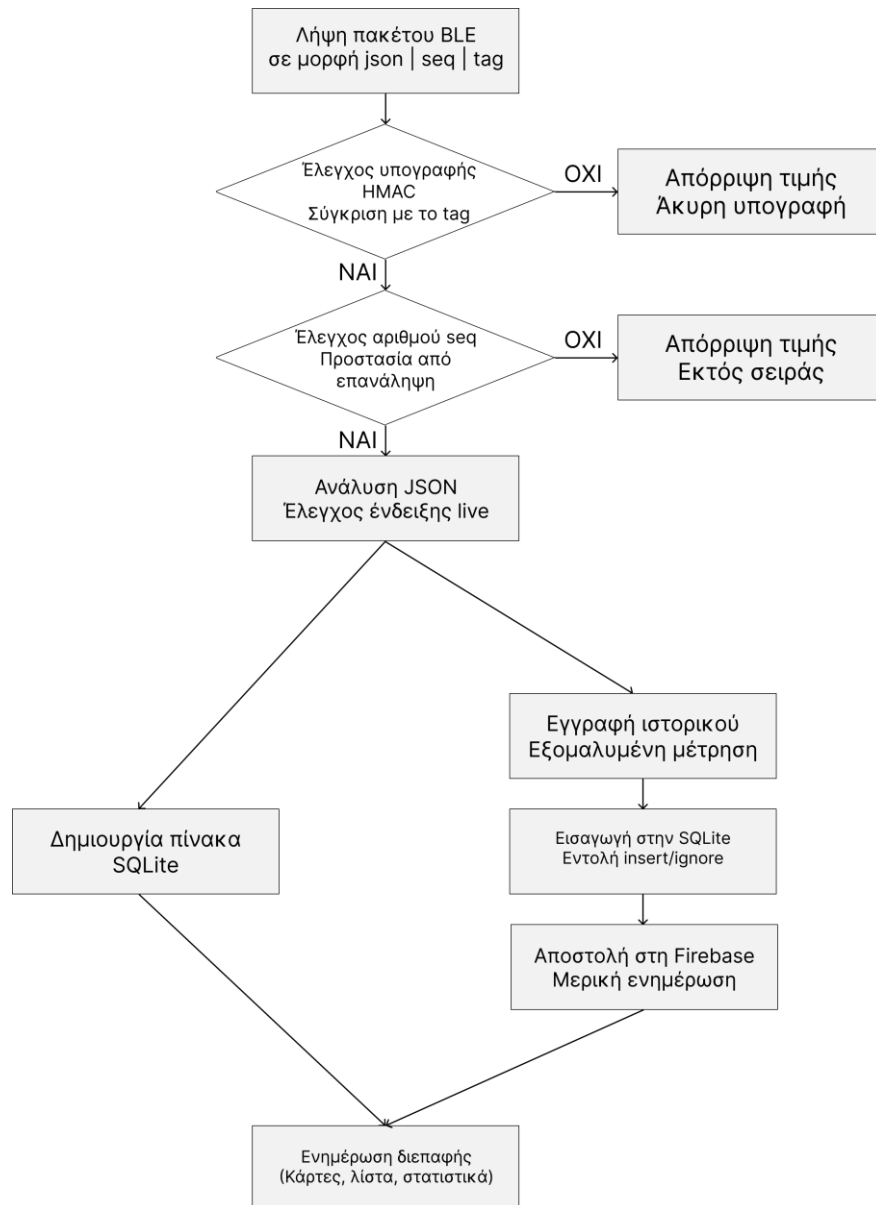
Η εφαρμογή αναπτύχθηκε εντός του πλαισίου του React Native σε συνδυασμό με το Expo (SDK 54) και τη γλώσσα TypeScript, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3. Η δρομολόγηση βασίζεται στο Expo Router, το οποίο αντιστοιχίζει αρχεία σε οθόνες με βάση τη δομή των φακέλων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το σύνολο της λειτουργικότητας συγκεντρώνεται σε ένα ενιαίο αρχείο (index.tsx) που αποτελεί την προεπιλεγμένη διαδρομή της εφαρμογής. Αποφεύχθηκε η επιλογή για πολλαπλές οθόνες συνδεδεμένες μέσω πλοήγησης, καθώς οι τέσσερις καταστάσεις της διεπαφής (καλωσόρισμα, σάρωση QR, σύνδεση και τηλεμετρία) εναλλάσσονται με βάση την εσωτερική κατάσταση (state) του μοναδικού στοιχείου, χωρίς να απαιτείται πλοήγηση μεταξύ διακριτών οθονών. Η επιλογή της κατάστασης καθορίζεται από τρεις μεταβλητές, τις isCameraOpen, connecting και connectedDevice, οι οποίες ελέγχονται κατά την διάρκεια της διεπαφής, με την αρχική οθόνη να αποτελεί την προεπιλογή όταν καμία άλλη δεν είναι ενεργή.

Οι κύριες εξωτερικές βιβλιοθήκες που αξιοποιούνται είναι οι ακόλουθες:

- **Expo-camera:** Παρέχει το στοιχείο της κάμερας και την αναγνώριση κωδικών QR
- **React-native-ble-plx:** Υλοποιεί τον διαχειριστή Bluetooth Low Energy από τη πλευρά του κινητού
- **Expo-sqlite:** Παρέχει την τοπική βάση δεδομένων
- **Firebase:** Η επίσης αυτή βιβλιοθήκη συμβάλλει στη καθιέρωση της επικοινωνίας με τη Realtime Database
- **Base-64:** Χρησιμοποιείται για την κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση των μηνυμάτων BLE, καθώς οι τιμές των χαρακτηριστικών (characteristics) ανταλλάσσονται ως συμβολοσειρές Base64.
- **Crypto-js:** Παρέχει τις κρυπτογραφικές συναρτήσεις που απαιτεί ο μηχανισμός ασφαλείας. Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό απόκρισης HMAC-SHA256 στην πρόκληση του σταθμού κατά την αυθεντικοποίηση, αλλά και για την επαλήθευση της υπογραφής κάθε εισερχόμενου πακέτου μετρήσεων.
- **Expo/vector-icons και react-native-safe-area-context:** Καλύπτουν αντίστοιχα τα εικονίδια της διεπαφής και την προσαρμογή του περιεχομένου στις ασφαλείς περιοχές οθόνης των συσκευών.

Η αξιοποίηση βιβλιοθηκών σαν τη react-native-ble-plx και expo-sqlite προϋποθέτει native module εκτός του προκαθορισμένου συνόλου της Expo. Συνεπώς, πρέπει να εφαρμοστεί μεταγλώττιση προσαρμοσμένου development client μέσω του EAS, αντί της απλής εκτέλεσης εντός της εφαρμογής Expo Go.

Πέρα από τη σειρά εκτέλεσης, η επεξεργασία κάθε πακέτου που φτάνει στην εφαρμογή αποτυπώνεται στην Εικόνα 6.2. Κάθε πακέτο ελέγχεται ως προς την επαλήθευση της υπογραφής HMAC και τον έλεγχο του αριθμού αναγνώρισης seq. Τα πακέτα που γίνονται αποδεκτά αποκωδικοποιούνται και ενημερώνουν απευθείας τη διεπαφή ή αποθηκεύονται στη βάση SQLite και προωθούνται στη Firebase.



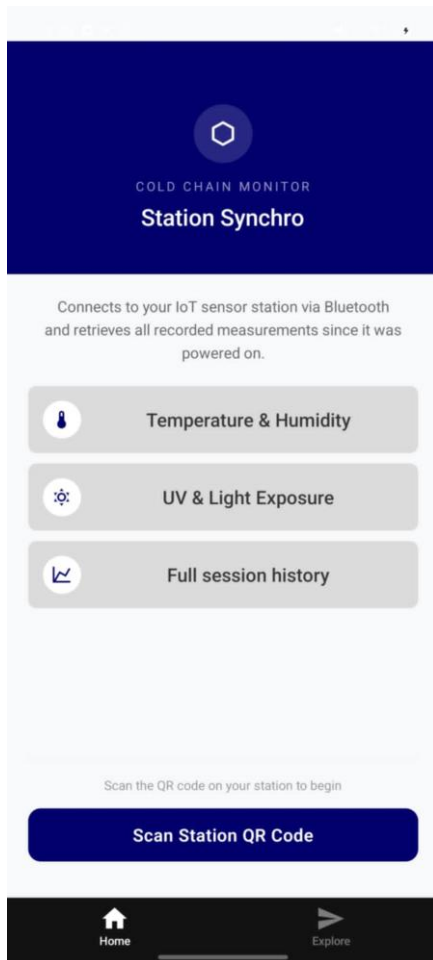
Εικόνα 6.2: Διάγραμμα Ροής Δεδομένων

6.3 Κωδικός QR και Σύνδεση BLE

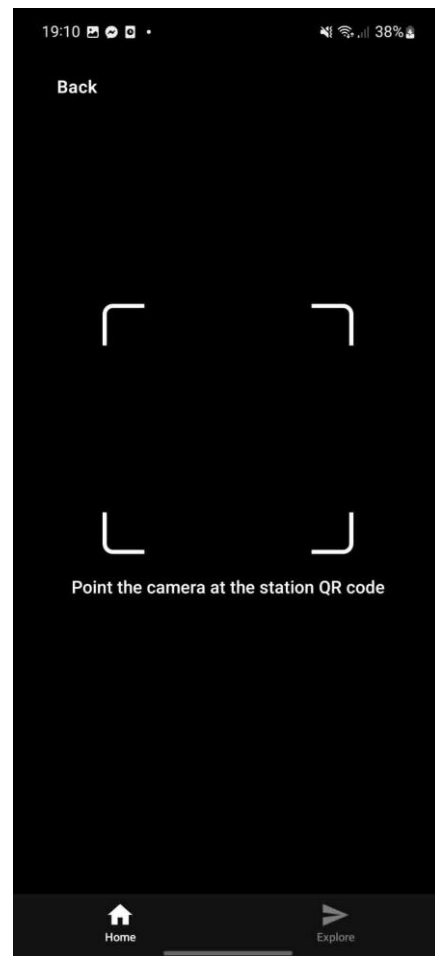
Κατά τη πρώτη εκκίνηση, η εφαρμογή εμφανίζει μία οθόνη καλωσορίσματος με σύντομη περιγραφή της λειτουργίας της και ένα κουμπί σάρωσης του κωδικού QR του σταθμού (Εικόνα 6.3α). Η πρόσβαση στη κάμερα ελέγχεται με τη βοήθεια αδειών του λειτουργικού συστήματος και σε περίπτωση που δεν έχουν δοθεί ακόμη, η εφαρμογή ζητά τη σχετική άδεια από το χρήστη πριν επιτρέψει τη σάρωση.

Η Εικόνα 6.3β απεικονίζει την οθόνη του κινητού, μόλις ο χρήστης επιλέξει να σαρώσει τον κωδικό QR. Ο κωδικός QR κάθε σταθμού κωδικοποιεί δύο τιμές, τον σειριακό αριθμό και το μυστικό κλειδί χωρισμένες με την άνω κάτω τελεία (πχ. 0014:SecretKey). Η εφαρμογή αναλύει το περιεχόμενο του κωδικού, διαχωρίζοντάς το σε αυτά τα δύο πεδία και προχωράει στη σύνδεση μόνο αν προκύψουν ακριβώς δύο τιμές, απορρίπτοντας σιωπηλά κάθε κωδικό διαφορετικής μορφής. Στο λειτουργικό σύστημα Android, η σύνδεση BLE προϋποθέτει ρητή άδεια εντοπισμού θέσης, καθώς και τις άδειες

σάρωσης (BLUETOOTH_SCAN) και σύνδεσης (BLUETOOTH_CONNECT) που εισήγαγαν οι πρόσφατες εκδόσεις του λειτουργικού. Η εφαρμογή ζητά και τις τρεις άδειες πριν από κάθε προσπάθεια σύνδεσης και διακόπτει τη διαδικασία αν δεν παραχωρηθούν.



Εικόνα 6.3α: Αρχική Οθόνη Καλωσορίσματος



Εικόνα 6.3β: Οθόνη για Σάρωση Κωδικού QR

Η αναζήτηση της συσκευής πραγματοποιείται με σάρωση όλων των διαφημιζόμενων συσκευών BLE στη διαθέσιμη εμβέλεια, καθώς η εφαρμογή δεν γνωρίζει εκ των προτέρων τη διεύθυνση (MAC address) του σταθμού. Κάθε συσκευή που εντοπίζεται, ελέγχεται ως προς το διαφημιζόμενο όνομά της, το οποίο πρέπει να ταιριάζει με το πρότυπο «ESP-SN-<SerialNumber>» που ορίζει το firmware του ESP32 (Κεφάλαιο 5). Ο έλεγχος εφαρμόζεται τόσο στο γενικό όνομα της συσκευής, όσο και στο τοπικό όνομα του πλαισίου διαφήμισης, καθώς η διαθεσιμότητά τους εξαρτάται από την έκδοση του λειτουργικού. Η σάρωση διαρκεί έως δέκα δευτερόλεπτα και αν δεν εντοπιστεί ο αντίστοιχος σταθμός εντός αυτού του χρονικού διαστήματος, η προσπάθεια σύνδεσης εγκαταλείπεται. Μόλις εντοπιστεί η κατάλληλη συσκευή, η εφαρμογή σταματά τη σάρωση και εκτελεί διαδοχικά τη σύνδεση, την ανακάλυψη των υπηρεσιών και χαρακτηριστικών BLE που εκθέτει ο σταθμός και την αύξηση του μεγέθους πακέτου (MTU) στα 128 bytes, έτσι ώστε τα μηνύματα JSON που θα μεταφερθούν να χωράνε σε μία ειδοποίηση χωρίς κατάτμηση.

Πρέπει να τονιστεί πως η αυθεντικοποίηση δεν στηρίζεται στη μετάδοση του μυστικού κλειδιού, αλλά σε ανταλλαγή πρόκλησης και απόκρισης. Αμέσως μετά την ανακάλυψη των υπηρεσιών, και μετά από μία σύντομη παύση 200ms για τη σταθεροποίηση της στοίβας GATT, η εφαρμογή διαβάζει από το

χαρακτηριστικό ελέγχου την τρέχουσα πρόκληση nonce του μικροελεγκτή και την αποκωδικοποιεί από Base64. Στη συνέχεια, με την cycript-js υπολογίζει τοπικά τον κώδικα HMAC-SHA256 του μηνύματος «<nonce>:AUTH:<timestamp>» με κλειδί το μυστικό κλειδί που ανακτήθηκε από τον κωδικό QR. Το αποτέλεσμα γράφεται στο μήνυμα «AUTH:<timestamp>:<hmac>», το οποίο κωδικοποιείται σε Base64 και εγγράφεται στο χαρακτηριστικό ελέγχου με επιβεβαίωση παραλαβής.

Ο σταθμός μέτρησης υπολογίζει ανεξάρτητα την ίδια τιμή και θεωρεί τη συσκευή αυθεντικοποιημένη, συγχρονίζει το RTC του και ξεκλειδώνει την αποστολή του αποθηκευμένου ιστορικού. Το ουσιώδες χαρακτηριστικό του σχήματος είναι ότι το μυστικό κλειδί δεν μεταφέρεται ποτέ ασύρματα, αφού και οι δύο πλευρές απλώς αποδεικνύουν ότι το γνωρίζουν. Παράλληλα, η εφαρμογή διατηρεί την πρόκληση της συνεδρίας στην εσωτερική μεταβλητή authNonceRef και μηδενίζει τον μετρητή ακολουθίας lastSeqRef, καθώς και τα δύο απαιτούνται για την επαλήθευση των πακέτων που θα ακολουθήσουν. Σημειώνεται πως το μυστικό κλειδί παραμένει κοινό για όλους τους σταθμούς της παρούσας υλοποίησης.

Στη συνέχεια, η εφαρμογή εγγράφεται για ειδοποιήσεις (notify) στο χαρακτηριστικό δεδομένων. Μέσα από εκεί, ο σταθμός προωθεί τόσο τη ζωντανή ροή των δεδομένων ανά δευτερόλεπτο, όσο και τις αποθηκευμένες εγγραφές ιστορικού κατά τη διάρκεια του συγχρονισμού. Για την αντιμετώπιση τυχαιών διακοπών της σύνδεσης, η εφαρμογή διατηρεί σε μνήμη τον σειριακό αριθμό και το κλειδί του τελευταίου συνδεδεμένου σταθμού. Όσο δεν υπάρχει ενεργή σύνδεση, επιχειρεί αυτόματα καινούρια σύνδεση κάθε πέντε δευτερόλεπτα, χωρίς να απαιτείται εκ νέου σάρωση του κωδικού QR από τον χρήστη. Ο βρόχος επανασύνδεσης ενεργοποιείται μόνο όταν υπάρχουν αποθηκευμένος σειριακός αριθμός και κλειδί και δεν βρίσκεται άλλη προσπάθεια ήδη σε εξέλιξη. Αντίθετα, όταν ο χρήστης αποσυνδεθεί από το αντίστοιχο back button, ο αριθμός και το κλειδί διαγράφονται από τη μνήμη και ο βρόχος σταματά, επιστρέφοντας την εφαρμογή στην οθόνη καλωσορίσματος.

6.4 Προβολή Δεδομένων

Η διεπαφή της εφαρμογής εναλλάσσεται μεταξύ τεσσάρων καταστάσεων: την αρχική οθόνη καλωσορίσματος, την οθόνη σάρωσης του κωδικού QR, μία ενδιάμεση οθόνη αναμονής κατά τη διάρκεια της σύνδεσης και τέλος, την κύρια οθόνη τηλεμετρίας. Η κύρια οθόνη εμφανίζεται μόλις υπάρχει έστω και μία μέτρηση διαθέσιμη, χωρίς να έχει σημασία αν είναι ζωντανή ή αποθηκευμένη από προηγούμενη συνεδρία.

Οι εισερχόμενες μετρήσεις διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με την ένδειξη live που φέρει το ίδιο το μήνυμα JSON. Οι τιμές που αποστέλλονται ζωντανά κάθε δευτερόλεπτο ενημερώνουν άμεσα τη διεπαφή μέσω της liveData και δεν αποθηκεύονται πουθενά, δεδομένου ότι η σύνδεση είναι ενεργή και αυθεντικοποιημένη. Ο σκοπός των τιμών αυτών είναι να αντιπροσωπεύουν στιγμιαία ανάγνωση χωρίς εξομάλυνση. Οι τιμές του ιστορικού που αντιστοιχούν στις εξομαλυνμένες καταγραφές κάθε δεκαπέντε λεπτά και προωθούνται σε παρτίδα κατά τον συγχρονισμό είναι εκείνες που προστίθενται στον πίνακα sensorHistory[], αποθηκεύονται τοπικά και δημοσιοποιούνται στη πλατφόρμα Firebase. Ανεξαρτήτως κατηγορίας, κάθε πακέτο περνάει από τη συνάρτηση κανονικοποίησης normalizePacket(). Αυτή η συνάρτηση μετατρέπει τα αριθμητικά πεδία t, h, u και l από συμβολοσειρές σε αριθμούς κινητής υποδιαστολής, καθώς το firmware τα μετατρέπει σε κείμενο για να ελέγχει το πλήθος των ψηφίων. Χωρίς το βήμα αυτό, δεν θα ήταν δυνατοί οι υπολογισμοί max, min, avg και η αλλαγή χρωμάτων των καρτών.

```
// --- Oria parametron ---
const LIMITS = {
  t: { okMin: 2, okMax: 8, critMin: 8, critMax: 30 }, // °C
  h: { okMin: 30, okMax: 65, critMin: 20, critMax: 75 }, // %RH
  uv: { okMin: 0, okMax: 2.00, critMin: 0, critMax: 5.00 },
};
```

Εικόνα 6.4: Όρια για Χρώματα Καρτελών

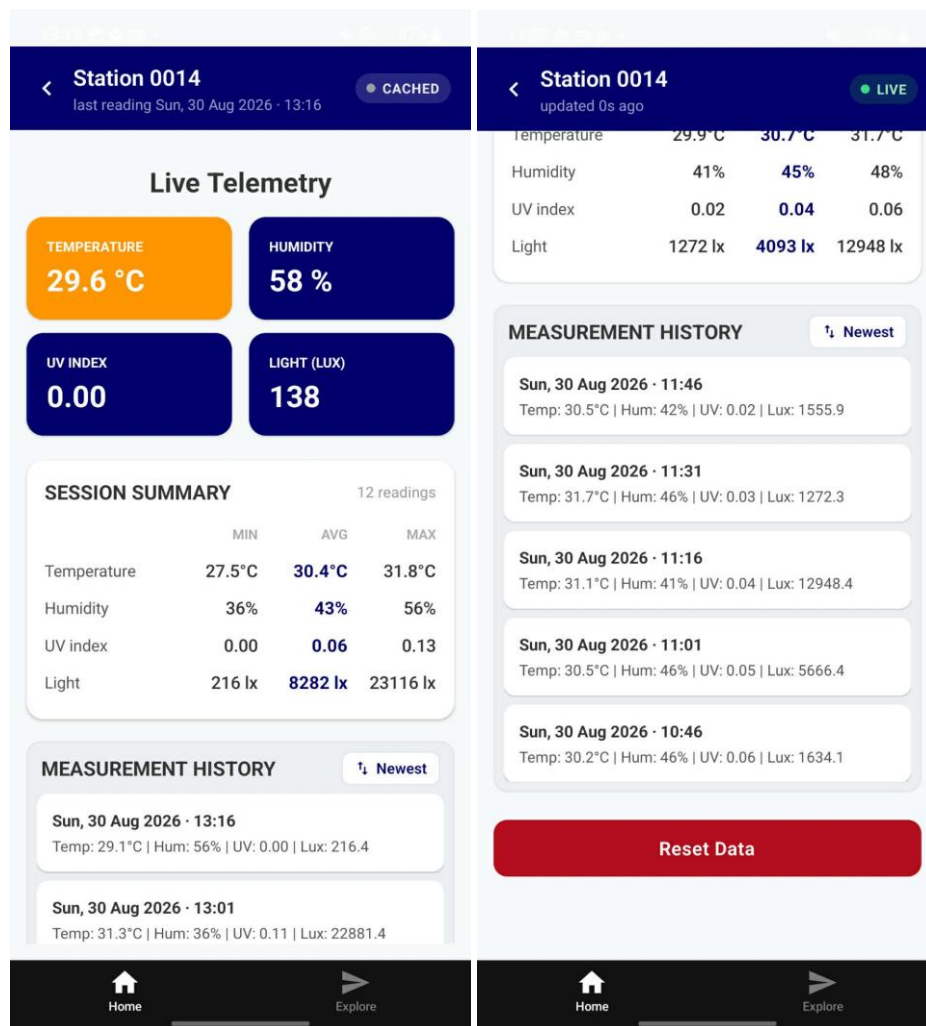
Οι τρέχουσες τιμές θερμοκρασίας, υγρασίας, δείκτη UV και έντασης φωτός εμφανίζονται σε τέσσερις κάρτες. Οι τρεις πρώτες κάρτες χρωματίζονται δυναμικά σε τρία επίπεδα (φυσιολογικό, προειδοποίησης, κρίσιμο) μέσω της συνάρτησης `statusFor()` και του πίνακα αντιστοίχισης `STATUS_COLOR`, με βάση τα προκαθορισμένα όρια ανά παράμετρο. Αυτό έχει σκοπό ο χρήστης να αντιλαμβάνεται γρήγορα και αποτελεσματικά αν η παλέτα βρίσκεται εντός των αποδεκτών συνθηκών ψυχρής αλυσίδας. Τα όρια αυτά ορίζονται στον πίνακα σταθερών `LIMITS` (Εικόνα 6.4). Ο μόνος παράγοντας που έχει το ίδιο χρώμα κάρτας ανεξαρτήτως τιμής είναι η ένταση του φωτός, καθώς η μεταβλητότητά του υπό φυσικές συνθήκες φωτισμού είναι μεγάλη. Επομένως, το πλαίσιο παραμένει σταθερό στο βασικό χρώμα.

Στο πάνω μέρος της οθόνης τηλεμετρίας εμφανίζεται μία σταθερή κεφαλίδα με τρία στοιχεία. Στα αριστερά υπάρχει κουμπί επιστροφής, το οποίο καλεί την `disconnectAndGoHome()`, τερματίζει τη σύνδεση και επαναφέρει την εφαρμογή στην αρχική οθόνη. Στο κέντρο εμφανίζεται ο σειριακός αριθμός του σταθμού όπως έχει διατηρηθεί στη `struct credentials` και ακριβώς από κάτω, μία ένδειξη επικαιρότητας των δεδομένων. Στα δεξιά τοποθετείται μία ετικέτα κατάστασης, η οποία γράφει «LIVE» όταν υπάρχει ενεργή σύνδεση BLE (`isLive`) ή «CACHED» όταν τα δεδομένα προέρχονται αποκλειστικά από την τοπική βάση. Η ένδειξη επικαιρότητας εξαρτάται από τη μεταβλητή `freshness`, δηλαδή από την κατάσταση της σύνδεσης εκείνη τη στιγμή. Όταν η σύνδεση είναι ενεργή, αναφέρεται ο χρόνος που έχει μεσολαβήσει από την τελευταία λήψη δεδομένων μέσω της `relativeTime()`, αλλιώς εμφανίζεται η ακριβής ημερομηνία και ώρα της τελευταίας αποθηκευμένης μέτρησης μέσω της `formatDateTime()` (Εικόνα 6.5). Πρέπει να επισημανθεί πως το τοπικό ιστορικό ενός σταθμού φορτώνεται μόνο όταν σαρωθεί εκ νέου ο κωδικός QR του. Με άλλα λόγια, η εφαρμογή δεν θυμάται αυτόματα ποιος ήταν ο τελευταίος συνδεδεμένος σταθμός κατά την επανεκκίνησή της.

Στην ίδια Εικόνα, φαίνεται πως κάτω από τις τρέχουσες τιμές, μία συνοπτική κάρτα παρουσιάζει τα κυριότερα στατιστικά (ελάχιστη, μέγιστη και μέση τιμή) για κάθε παράμετρο, υπολογισμένα στη δομή `stats`. Οι υπολογισμοί εκτελούνται μόνο όταν μεταβληθεί ο πίνακας `sensorHistory` και όχι σε κάθε ανανέωση της οθόνης, για να μην επιβαρύνει η ζωντανή ροή την διεπαφή. Το περιεχόμενο του αναλυτικού αρχείου καταγραφής (`log`) με όλες τις μεμονωμένες εγγραφές παράγεται από τη μεταβλητή `orderedHistory`. Η προεπιλογή στην ταξινόμηση είναι από την πιο πρόσφατη προς την παλαιότερη. Ωστόσο, ο χρήστης μπορεί να την αντιστρέψει με το κουμπί στην επικεφαλίδα του αρχείου, το οποίο εναλλάσσεται μεταξύ των ενδείξεων «Newest» και «Oldest» και ταυτόχρονα επαναφέρει την θέση στην κορυφή της λίστας.

Το κόκκινο κουμπί «Reset Data» καλεί τη συνάρτηση `resetData()`, η οποία επιτρέπει την επαναφορά δεδομένων του σταθμού, αφού πρώτα επιβεβαιωθεί η επιλογή από τον χρήστη. Η ενέργεια αυτή εκτελείται δεδομένου ότι υπάρχει ενεργή σύνδεση με τον σταθμό εκείνη τη στιγμή (`connectedDevice` και `credentials`), καθώς προαπαιτεί την αποστολή εντολής επαναφοράς στο επίπεδο του υλικού. Η

εντολή αυτή δεν μπορεί να σταλεί χωρίς υπογραφή. Η εφαρμογή διαβάζει πρώτα από το χαρακτηριστικό ελέγχου την τρέχουσα πρόκληση που παρήγαγε ο σταθμός μετά την αυθεντικοποίηση, υπολογίζει με την `CryptoJS.HmacSHA256()` τον κώδικα του μηνύματος «<nonce>:RESET» με το μυστικό κλειδί και στέλνει το αποτέλεσμα στη μορφή «RESET:<hmac>». Εφόσον πληρείται αυτή η προϋπόθεση, σβήνει διαδοχικά τη μνήμη του σταθμού, τις τοπικά αποθηκευμένες εγγραφές του στο κινητό (readings) και το αντίστοιχο subtree στη πλατφόρμα Firebase μέσω της `remove()`, έτσι ώστε ο σταθμός να μπορεί να αξιοποιηθεί για νέα παρτίδα προϊόντων. Τέλος, μηδενίζονται οι `sensorHistory` και `liveData`, επαναφέροντας την οθόνη προβολής για να φανεί η νέα, κενή κατάσταση.



Εικόνα 6.5: Οθόνη Τηλεμετρίας

6.5 Τοπική Αποθήκευση με SQLite

Η εφαρμογή διατηρεί ένα τοπικό αντίγραφο του ιστορικού κάθε σταθμού σε μία βάση δεδομένων SQLite μέσω της βιβλιοθήκης `expo-sqlite`. Η βιβλιοθήκη ανοίγει κατά την εκκίνηση με τη συνάρτηση `openDatabaseSync()` στο αρχείο `sensorlog.db`. Κατά τη πρώτη εκκίνηση και δεδομένου ότι δεν υπάρχει, δημιουργείται ένας πίνακας `readings` με πεδία τη χρονική σήμανση της εγγραφής (`time`, η οποία λειτουργεί ως πρωτεύον κλειδί), τον σειριακό αριθμό του σταθμού (`station`) και τις τέσσερις μετρούμενες τιμές.

Όταν ο χρήστης σαρώσει τον κωδικό QR του σταθμού, πριν ολοκληρωθεί η σύνδεση BLE, η εφαρμογή αναζητά στη τοπική βάση της πρόσφατες εγγραφές που αντιστοιχούν σε αυτόν το σειριακό αριθμό και τις εμφανίζει άμεσα ως ιστορικό. Το ερώτημα επιστρέφει τις εγγραφές ταξινομημένες κατά φθίνουσα χρονική σειρά και περιορίζεται στις 1500 πιο πρόσφατες. Το αποτέλεσμα αποδίδεται στον πίνακα κατάστασης `sensorHistory` και οποιαδήποτε αποτυχία ανάγνωσης δεν διακόπτει τη σύνδεση, αφού η διαδικασία συνεχίζει με κενό ιστορικό. Αυτός ο μηχανισμός επιτρέπει τη κατάσταση «`CACHED`», όπου ο χρήστης μπορεί να δει το ιστορικό ενός σταθμού που έχει συνδεθεί στο παρελθόν, ακόμα και αν ο σταθμός δεν βρίσκεται πλέον σε εμβέλεια ή σε τροφοδοσία.

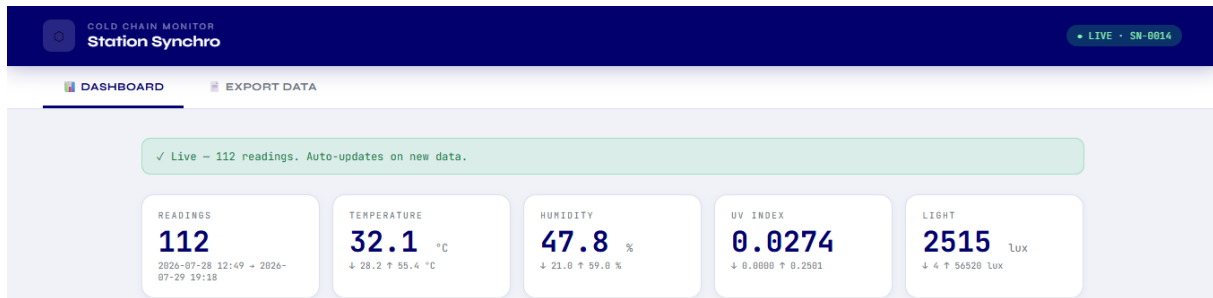
Κάθε φορά που φτάνει μία νέα εγγραφή ιστορικού μέσω του πρωτοκόλλου BLE, εισάγεται στον πίνακα με την εντολή `INSERT OR IGNORE` που αγνοεί σιωπηλά την εισαγωγή αν υπάρχει ήδη εγγραφή με την ίδια χρονική σήμανση. Η επιλογή αυτή καθιστά τον συγχρονισμό ασφαλή ως προς τις επαναλήψεις. Πιο συγκεκριμένα, αν μία σύνδεση διακοπεί και επανέλθει, οι τυχόν επικαλυπτόμενες εγγραφές απορρίπτονται αυτόματα, χωρίς διπλές εγγραφές και χωρίς να απαιτείται πρόσθετος έλεγχος από τη πλευρά της εφαρμογής.

Κατά την επαναφορά ενός σταθμού (`Reset`), διαγράφονται μόνο οι εγγραφές που αντιστοιχούν στον συγκεκριμένο σειριακό αριθμό, χωρίς να επηρεάζεται το τοπικά αποθηκευμένο ιστορικό άλλων σταθμών που ενδεχομένως έχουν συνδεθεί στο ίδιο κινητό. Αντίστοιχα, η αποσύνδεση με το κουμπί επιστροφής καθαρίζει μόνο τον πίνακα κατάστασης `sensorHistory` και όχι τη βάση, οπότε τα δεδομένα επανεμφανίζονται με την επόμενη σάρωση του ίδιου κωδικού QR. Έτσι, η επαναφορά αποτελεί τον μοναδικό μηχανισμό διαγραφής γραμμών δεδομένων. Σε αντίθεση με την εσωτερική κατάσταση της εφαρμογής, η οποία χάνεται με κάθε τερματισμό της, η τοπική βάση δεδομένων του κινητού λειτουργεί σαν ένα ενδιάμεσο, μόνιμο αντίγραφο ασφαλείας, τοποθετημένο ανάμεσα στην πεπερασμένη, κυκλική μνήμη του σταθμού μέτρησης και στο απομακρυσμένο αρχείο της πλατφόρμας `Firebase`.

6.6 `Firebase`, Ιστοσελίδα Απεικόνισης και Εξαγωγή `CSV`

Κάθε νέα εγγραφή στο ιστορικό που λαμβάνει η εφαρμογή προωθείται στην `Realtime Database` της `Firebase`, αμέσως μετά την τοπική αποθήκευσή της. Οι ζωντανές τιμές δεν αποστέλλονται ποτέ στο νέφος, καθώς αποτελούν στιγμιαίες ενδείξεις χωρίς εξομάλυνση και δεν αποθηκεύονται τοπικά. Η αποστολή πραγματοποιείται ως μερική ενημέρωση (`update`) στο `subtree` του συγκεκριμένου σταθμού, προσθέτοντας τη νέα εγγραφή στον κλάδο `data` με κλειδί το `timestamp` και ενημερώνοντας το πεδίο της τελευταίας ενημέρωσης `lastUpdate`. Αυτή η μερική ενημέρωση προτιμήθηκε αντί της πλήρους αντικατάστασης του `subtree` (`set`), με σκοπό η νέα εγγραφή να συγχωνεύεται με το ήδη αποθηκευμένο ιστορικό του σταθμού στο νέφος, χωρίς να αντικαθιστά ή να διαγράφει προηγούμενες μετρήσεις. Κατά την επαναφορά ενός σταθμού, το σύνολο του `subtree` διαγράφεται από τη βάση με τη συνάρτηση `remove()`, ολοκληρώνοντας τη διαγραφή και στα τρία επίπεδα αποθήκευσης.

Η σύνδεση με την υπηρεσία αρχικοποιείται μία φορά κατά τη φόρτωση της εφαρμογής με τις `initializeApp()` και `getDatabase()`, η βάση της οποίας φιλοξενείται σε περιοχή της Ευρώπης. Σημειώνεται πως η αποστολή προς το νέφος γίνεται χωρίς μηχανισμό επανάληψης. Αν το κινητό δεν διαθέτει σύνδεση στο διαδίκτυο τη στιγμή που καταφθάνει μία εγγραφή, η αποτυχία καταγράφεται και η συγκεκριμένη μέτρηση παραμένει σε τοπικό αντίγραφο `SQLite`, αλλά δεν φτάνει ποτέ στη βάση.



Εικόνα 6.6: Οθόνη στην Ιστοσελίδα

Η απεικόνιση και η εξαγωγή των δεδομένων που έχουν συγκεντρωθεί στο Firebase δεν πραγματοποιούνται εντός της εφαρμογής του κινητού, αλλά μέσω της συνοδευτικής ιστοσελίδας `station-synchro.web.app`, φιλοξενούμενης στο Firebase Hosting. Πρόκειται για μία στατική σελίδα HTML, χωρίς εξάρτηση από κάποιο framework, η οποία συνδέεται απευθείας στην ίδια Realtime Database μέσω της Firebase SDK compat edition και αξιοποιεί τη βιβλιοθήκη Chart.js για τη γραφική απεικόνιση των μετρήσεων. Και οι δύο βιβλιοθήκες φορτώνονται από δίκτυα διανομής περιεχομένου, χωρίς τοπική διαδικασία μεταγλώττισης ή διαχείρισης πακέτων.



Εικόνα 6.7: Απεικόνιση Δεδομένων στην Ιστοσελίδα

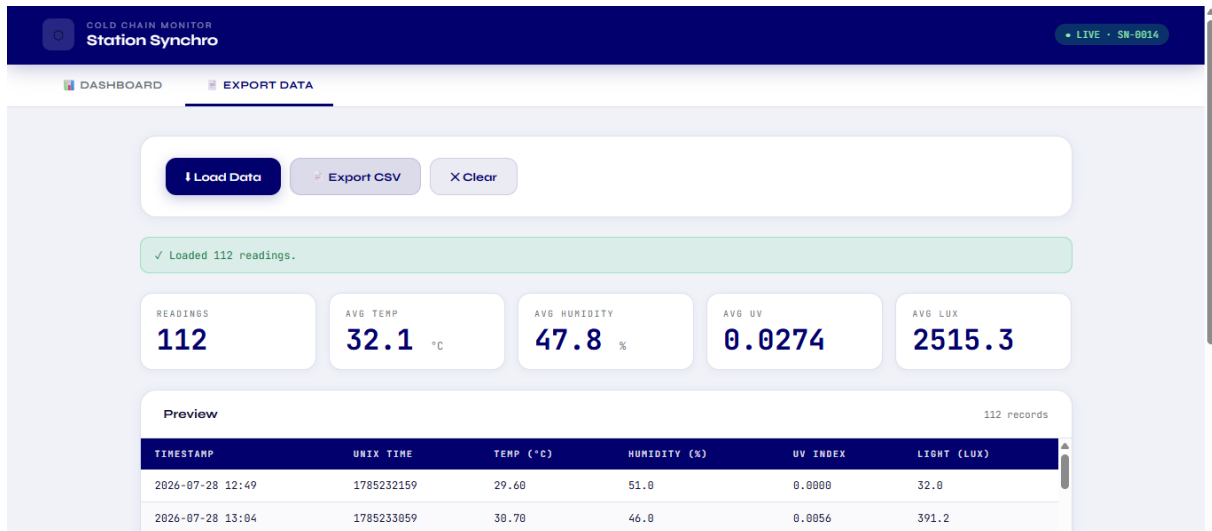
Σύμφωνα με την Εικόνα 6.6, η σελίδα αποτελείται από δύο καρτέλες, η εναλλαγή των οποίων γίνεται με την `switchTab()`. Η καρτέλα DASHBOARD εγγράφεται σε μόνιμη ακρόαση `on('value')` του κλάδου `data` μέσω της `connectStation()` και ενημερώνεται αυτόματα κάθε φορά που καταφθάνει μία νέα μέτρηση, χωρίς να απαιτείται ανανέωση της ιστοσελίδας. Οι εγγραφές αποθηκεύονται στον πίνακα `allData`, ταξινομημένες κατά αύξουσα σειρά και με κάθε ανανέωση καλείται η `renderAll()`, η οποία κατά

επέκταση καλεί διαδοχικά τις `updateStats()`, `updateCharts()` και `updateTable()`. Παρουσιάζονται συνοπτικά στοιχεία (ελάχιστο, μέσο και μέγιστο) της κάθε παραμέτρου (Εικόνα 6.6), τέσσερα γραφήματα για κάθε παράγοντα, που δημιουργούνται από την `makeChart()` (Εικόνα 6.7) και ένας πλήρης πίνακας καταγραφών (Εικόνα 6.8) με τη δυνατότητα φιλτραρίσματος του χρονικού εύρους (24 ώρες, 3 ημέρες, 7 ημέρες ή το σύνολο του ιστορικού). Το χρονικό εύρος φιλτράρεται από τη `filterByRange()` με βάση τη μεταβλητή `activeRange()`. Η ενδεικτική επισήμανση στην κορυφή της σελίδας, που είναι το στοιχείο `liveBadge`, αλλάζει από `DISCONNECTED` στη κατάσταση `LIVE` μόλις ληφθούν δεδομένα δηλώνει και μία γραμμή κατάστασης εμφανίζει μηνύματα φόρτωσης, επιτυχίας ή σφάλματος.

Full Measurement Log					112 records
Timestamp	Temp (°C)	Humidity (%)	UV Index	Light (lux)	
2026-07-28 12:49	29.60	51.0	0.0000	32.0	
2026-07-28 13:04	30.70	46.0	0.0056	391.2	
2026-07-28 13:19	31.30	45.0	0.0058	420.7	
2026-07-28 13:34	31.30	46.0	0.0066	455.3	
2026-07-28 13:49	31.50	47.0	0.0069	494.3	
2026-07-28 14:04	31.50	47.0	0.0073	526.3	
2026-07-28 14:19	31.70	45.0	0.0068	459.0	
2026-07-28 14:33	30.80	50.0	0.0058	354.8	
2026-07-28 14:48	30.60	50.0	0.0065	377.8	
2026-07-28 15:03	31.10	47.0	0.0070	395.2	
2026-07-28 15:18	30.80	48.0	0.0075	407.0	

Εικόνα 6.8: Πλήρης Πίνακας Καταγραφών

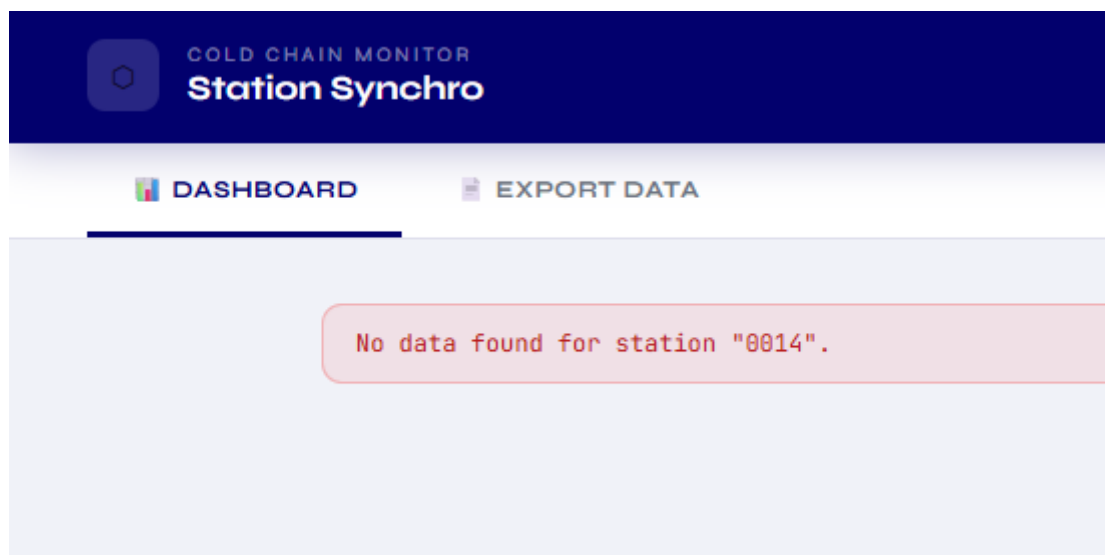
Η καρτέλα `EXPORT DATA` επιτρέπει τη φόρτωση του πλήρους ιστορικού του σταθμού και την προεπισκόπηση του σε μορφή πίνακα, πριν από την εξαγωγή του σε αρχείο `CSV` (Εικόνα 6.9). Σε αντίθεση με την καρτέλα `DASHBOARD`, η `expLoad()` εκτελεί μία φορά ανάγνωση με τη μέθοδο `get()`, καθώς η εξαγωγή δεδομένων δεν χρειάζεται να ανανεώνεται συνεχώς. Το αποτέλεσμα αποθηκεύεται στον πίνακα `expRows`, από τον οποίο η `exportCSV()` σχηματίζει το αρχείο. Αυτό το αρχείο δημιουργείται με διαχωριστικό ερωτηματικού και με ένδειξη κωδικοποίησης `UTF-8`. Με αυτό το τρόπο διασφαλίζεται η ορθή απεικόνιση των δεδομένων σε προγράμματα όπως το `Microsoft Excel`, όπως προβλεπόταν και στην αρχική περιγραφή του συστήματος. Κάθε πεδίο καταλαμβάνει ένα ξεχωριστό κελί, ενώ η χρονική σήμανση εμφανίζεται τόσο σε αναγνώσιμη μορφή μέσω της `fmtDate()`, όσο και σε ακέραιη τιμή `Unix` (Εικόνα 6.11).



Εικόνα 6.9: Καρτέλα Export Data

Στο προτεινόμενο σύστημα, τόσο η ιστοσελίδα, όσο και η εξαγωγή CSV αναφέρονται σε ένα προκαθορισμένο σειριακό αριθμό σταθμού που αντιστοιχίζεται στον μοναδικό σταθμό μέτρησης που υλοποιήθηκε για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας. Η τιμή αυτή δηλώνεται ξεχωριστά μέσα στις `connectStation()`, `expLoad()` και `ExportCSV()`.

Στη περίπτωση που έχει επιλεγεί η επαναφορά σταθμού και ο μικροελεγκτής δεν έχει καταφέρει να συλλέξει δεδομένα, η ιστοσελίδα εμφανίζει κατάλληλο μήνυμα (Εικόνα 6.10).



Εικόνα 6.10: Αποτυχία Εύρεσης Μετρήσεων

	A	B	C	D	E	F	G
1	Timestamp	Unix Time	Temperat	Humidity	UV Index	Light (Lux)	
2	7/28/2026 12:49	1785232159	29.60	51.0	0.0000	32.0	
3	7/28/2026 13:04	1785233059	30.70	46.0	0.0056	391.2	
4	7/28/2026 13:19	1785233959	31.30	45.0	0.0058	420.7	
5	7/28/2026 13:34	1785234859	31.30	46.0	0.0066	455.3	
6	7/28/2026 13:49	1785235759	31.50	47.0	0.0069	494.3	
7	7/28/2026 14:04	1785236659	31.50	47.0	0.0073	526.3	
8	7/28/2026 14:19	1785237540	31.70	45.0	0.0068	459.0	
9	7/28/2026 14:33	1785238439	30.80	50.0	0.0058	354.8	
10	7/28/2026 14:48	1785239339	30.60	50.0	0.0065	377.8	
11	7/28/2026 15:03	1785240239	31.10	47.0	0.0070	395.2	
12	7/28/2026 15:18	1785241139	30.90	47.0	0.0077	403.8	
13	7/28/2026 15:33	1785242039	30.80	47.0	0.0085	408.9	
14	7/28/2026 15:48	1785242939	30.90	46.0	0.0088	424.1	
15	7/28/2026 16:03	1785243839	31.30	45.0	0.0097	480.7	
16	7/28/2026 16:18	1785244739	33.10	42.0	0.0390	6705.0	
17	7/28/2026 16:33	1785245639	40.00	30.0	0.1443	7122.7	
18	7/28/2026 16:48	1785246539	40.80	29.0	0.1139	1940.6	
19	7/28/2026 17:03	1785247439	40.10	30.0	0.1290	1403.9	
20	7/28/2026 17:18	1785248339	41.20	29.0	0.1176	1593.4	
21	7/28/2026 17:33	1785249239	41.20	29.0	0.1117	1641.8	

Εικόνα 6.11: Παράδειγμα Αρχείου CSV

6.7 Επίλογος

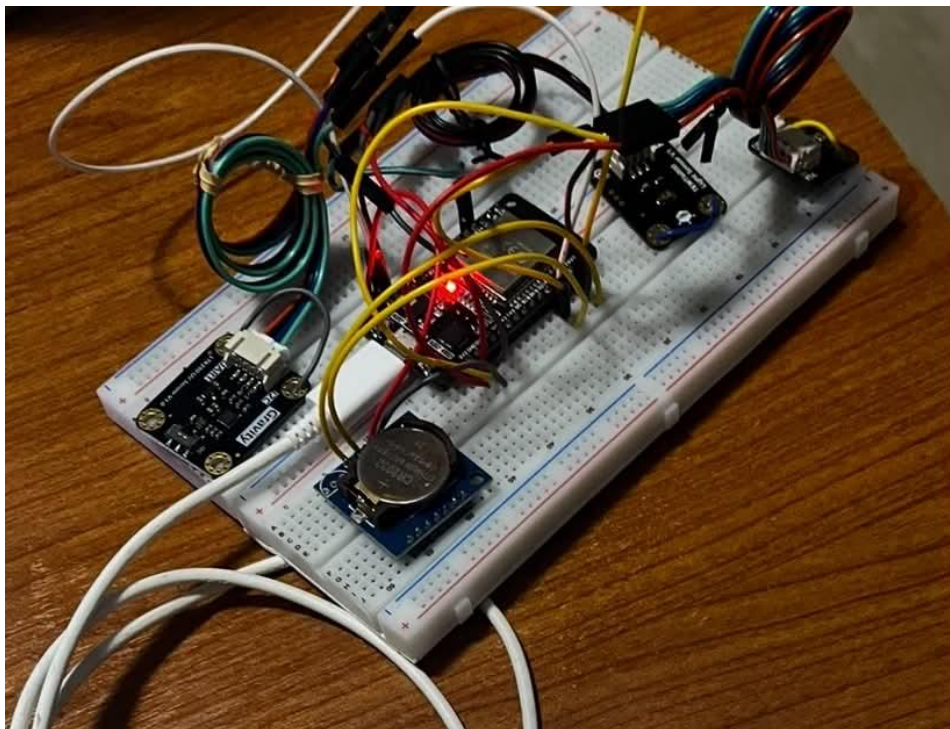
Στο παρόν κεφάλαιο έγινε μία περιγραφή του τρόπου δημιουργίας της εφαρμογής Android για κινητές συσκευές, η οποία υλοποιεί το ενδιαμέσο επίπεδο του συστήματος. Παρουσιάστηκε η δομή και το περιβάλλον ανάπτυξής της, ο μηχανισμός σύνδεσης με τον σταθμό μέτρησης μέσω σάρωσης κωδικού QR και αυθεντικοποιημένης σύνδεσης BLE, ο τρόπος που προβάλλονται οι μετρήσεις στο χρήστη και η προώθηση των δεδομένων στη πλατφόρμα Firebase. Η ιστοσελίδα αναλαμβάνει την απεικόνιση των μετρήσεων και την εξαγωγή τους σε μία μορφή που μπορεί να επεξεργαστεί εύκολα και γρήγορα. Στο επόμενο κεφάλαιο ακολουθούν οι δοκιμές και η συνολική αξιολόγηση του συστήματος.

Κεφάλαιο 7ο: Πειραματική Διαδικασία

7.1 Πορεία Υλοποίησης

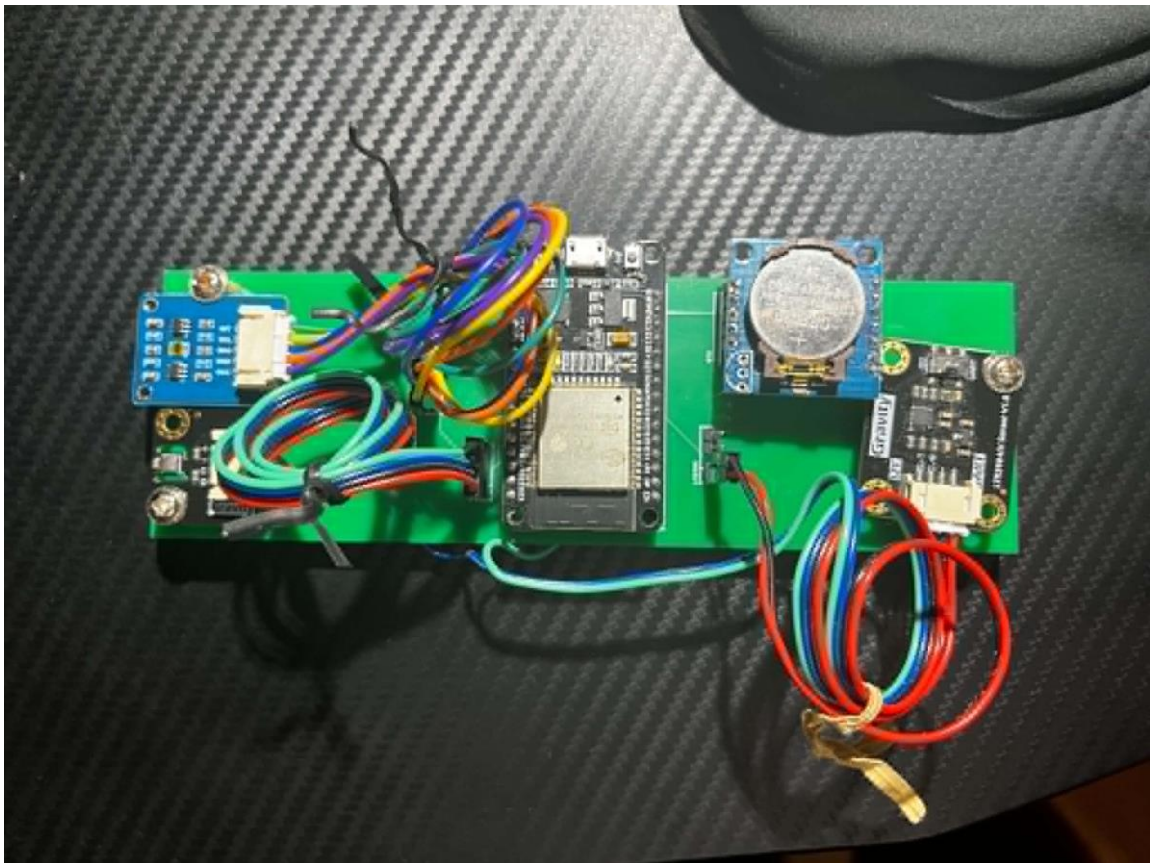
Το σύστημα ψυχρής αλυσίδας που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας είχε ως κύριο στόχο τη συστηματική καταγραφή και παρακολούθηση των συνθηκών κατά την μεταφορά και αποθήκευση των παλετών με εμφιαλωμένο νερό. Το συνολικό σύστημα αποτελείται από τον μικροελεγκτή ESP32, τους αισθητήρες, την εφαρμογή Android στη κινητή συσκευή και την ιστοσελίδα που υποστηρίζεται από την πλατφόρμα Firebase. Αυτή ήταν η βάση και τα εργαλεία που αξιοποιήθηκαν για την υλοποίηση του συστήματος.

Η ανάπτυξη της πειραματικής διάταξης δεν πραγματοποιήθηκε εξ αρχής, αλλά μεσολάβησαν αρκετά στάδια, προκειμένου να επιτευχθεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα. Στην αρχή, πραγματοποιήθηκε έλεγχος για τη λειτουργία κάθε αισθητηρίου στο ράστερ ξεχωριστά. Σκοπός ήταν η επιβεβαίωση σωστής λειτουργίας, αλλά και μελέτη του τρόπου λειτουργίας τους. Για παράδειγμα, συγκεκριμένοι αισθητήρες χρειάστηκαν κάποιες μετατροπές των φυσικών μεγεθών για να απεικονιστούν ορθά οι τιμές αργότερα στο σύστημα. Με αυτό τον τρόπο προσέγγισης, μειώθηκε η πιθανότητα εμφάνισης σύνθετων σφαλμάτων προς την ολοκλήρωση της διάταξης, ενώ διευκόλυνε ταυτόχρονα τον εντοπισμό προβλημάτων που ήταν αναγκαστικά περιορισμένα στο επίπεδο του υλικού. Σε αυτό το στάδιο, είχε γίνει η επιλογή του αισθητήρα φωτός (TEMT6000), ο οποίος είχε περιορισμένο εύρος σε lux (0-1000) και το αντίστοιχο κύκλωμα φαίνεται στην Εικόνα 7.1. Για αυτό το λόγο, επιλέχθηκε ο TSL25911 με μία σαφώς μεγαλύτερη εμβέλεια, καλύπτοντας πιο αποτελεσματικά τις ανάγκες του συστήματος. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε σύνθεση των επιμέρους τμημάτων του κυκλώματος σε ένα κύκλωμα πάνω σε ράστερ και έγινε νέος έλεγχος πως όλοι οι αισθητήρες λειτουργούσαν με σωστό τρόπο ταυτόχρονα. Ήταν η στιγμή για επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας του πρωτοκόλλου επικοινωνίας I²C και η αξιοποίηση των ξεχωριστών διευθύνσεων των αισθητηρίων βάσει αυτού του προτύπου.



Εικόνα 7.1: Αρχικό Κύκλωμα σε ράστερ

Μετά από την επαλήθευση της σωστής λειτουργίας όλων των επιμέρους στοιχείων του κυκλώματος, ακολούθησε το πιο απαιτητικό στάδιο της εργασίας, η ανάπτυξη λογισμικού για κινητές συσκευές. Το σχέδιο για την εφαρμογή στο κινητό Android ήταν να αναλάβει τον ρόλο της γέφυρας μεταξύ του hardware και της ιστοσελίδας. Η κύρια προϋπόθεση ήταν η εμφάνιση των τιμών που μετράει ο μικροελεγκτής και των προηγούμενων τιμών σε μία λίστα, έτσι ώστε ο χρήστης να γνωρίζει τις συνθήκες της παλέτας κατά την επιμελητεία. Ο χρήστης μπορεί να είναι οποιοδήποτε άτομο που αποτελεί μέρος της εφοδιαστικής και έρχεται σε άμεση επαφή με την παλέτα (υπάλληλοι αποθήκης) ή άτομα που χρησιμοποιούν τα δεδομένα για βελτιστοποίηση της διαδικασίας (αναλυτές δεδομένων). Μέρος της αρχικής σχεδίασης ήταν και η πληροφορία αθροιστικής δόσης UV (Cumulative UV dose), το οποίο σε περίπτωση που ξεπερνούσε ένα προκαθορισμένο όριο, θα είχε κατάλληλη ένδειξη και θα έστελνε προειδοποίηση στον χρήστη. Ωστόσο, η έλλειψη βιβλιογραφίας και πειραμάτων για το συγκεκριμένο θέμα οδήγησε στον αποκλεισμό αυτής της λειτουργίας, καθώς θα παρείχε μία ενδεικτική πληροφορία χωρίς κάποια χρησιμότητα για την εφοδιαστική. Όταν αποφασίστηκε ο τρόπος με τον οποίο θα εμφανίζονται τα δεδομένα, το κύκλωμα ενεργοποιήθηκε και μετά από λίγες ώρες, διεξάχθηκαν δοκιμές για την επιβεβαίωση ορθής εμφάνισης πληροφοριών. Δεδομένου πως είχαν γίνει πολλοί έλεγχοι για το hardware, τα σφάλματα και οι διορθώσεις που έπρεπε να γίνουν, πλέον βρίσκονται εξ ολοκλήρου στο Visual Studio Code. Τα περισσότερα σφάλματα που προέκυψαν, σχετιζόταν με τη σωστή εμφάνιση της ώρας δίπλα από τις μετρήσεις και την σωστή μορφή των δεδομένων για να προωθηθούν στον server.



Εικόνα 7.2: Τελικό Κύκλωμα στη πλακέτα PCB

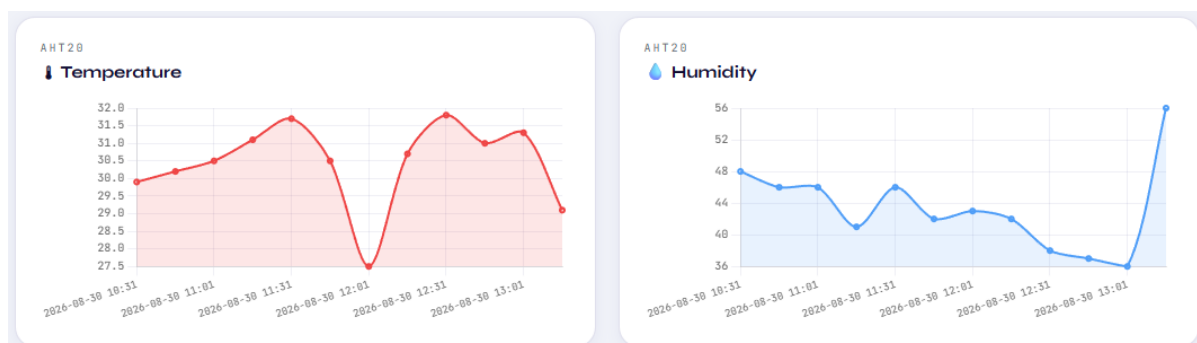
Το τελικό στάδιο ήταν η αξιοποίηση της πλατφόρμας Firebase Hosting και η απεικόνιση των δεδομένων σε σχεδιαγράμματα, καθώς και η δυνατότητα μετατροπής των μετρήσεων σε μία πιο ευανάγνωστη μορφή για τους υπεύθυνους. Αφού τα υπόλοιπα στοιχεία του συστήματος λειτουργούσαν κανονικά, το μόνο που έμενε ήταν η ανάπτυξη μίας ιστοσελίδας στον σύνδεσμο που παρέχει η Firebase Hosting, η οποία ανανεώνεται όταν το κινητό συνδεθεί στο διαδίκτυο. Αφού ο μικροελεγκτής είχε λειτουργήσει για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα και οι πληροφορίες ήταν ορατές στην εφαρμογή, οι μετρήσεις θα φαινόταν και στην ιστοσελίδα. Οι προκλήσεις που προέκυψαν σε αυτό το εγχείρημα ήταν ελάχιστες, κάνοντας το τελευταίο βήμα και την ολοκλήρωση του συστήματος σχετικά απλά.

Εφόσον ολοκληρώθηκαν όλα τα παραπάνω στάδια, πραγματοποιήθηκε η σχεδίαση της πλακέτας PCB, πάνω στην οποία τοποθετήθηκαν τα modules και ο μικροελεγκτής. Κατά τον σχεδιασμό της πλακέτας, έγινε μεγάλη προσπάθεια για την παράλειψη των καλωδίων των αισθητήρων και για την εύρεση pins που θα τοποθετούνταν κατευθείαν πάνω στο PCB. Παρ' όλα αυτά, δεν υπήρχαν εξαρτήματα που να συνδέουν απευθείας τα αισθητήρια με την τυπωμένη πλακέτα, καθώς αποτελούν έτοιμα breakout modules με καλώδιο τύπου JST PH 2.0mm. Το πρόβλημα οφειλόταν στο ότι δεν διέθεταν την γνωστή σειρά ακροδεκτών 2.54mm που έχουν τα περισσότερα modules, κάνοντας αδύνατη την άμεση συγκόλλησή τους πάνω στη πλακέτα. Συνεπώς, σχεδιάστηκαν οι γραμμές χαλκού που συνδέουν τους αισθητήρες με τον μικροελεγκτή και στη συνέχεια, έγιναν οι κολλήσεις (Εικόνα 7.2).

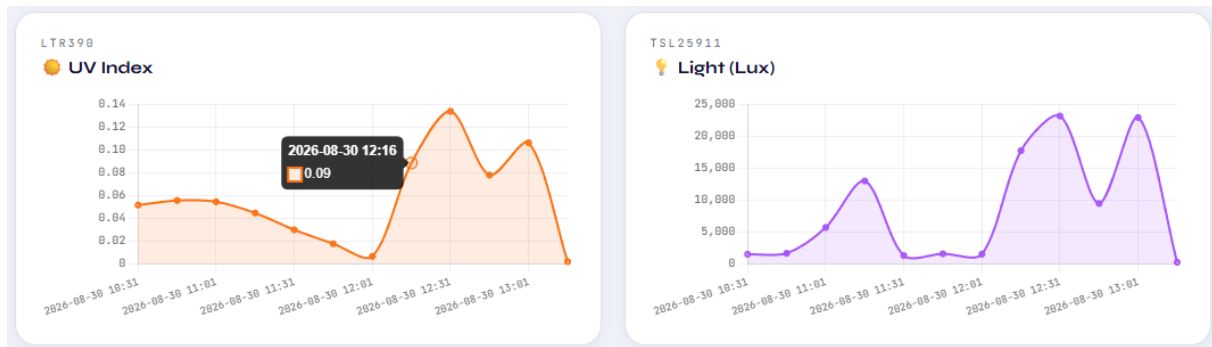
7.2 Πειραματική εφαρμογή

Τα εμφιαλωτήρια βρίσκονται υποχρεωτικά κοντά στην πηγή, που σημαίνει ορεινές ή απομακρυσμένες περιοχές όπως Ιωάννινα, Κρήτη και Εύβοια, άρα υπάρχει μεγάλη γεωγραφική απόσταση από την παραγωγή στην κατανάλωση. Ενδεικτικά, η εταιρία ΒΙΚΟΣ εμφιαλώνει στα Ιωάννινα και διατηρεί τα κέντρα αποθήκευσης και διανομής στην Αττική και στο Καλοχώρι Θεσσαλονίκης.

Από την εμφιάλωση έως την αποθήκη εργοστασίου υπάρχει διαφορά κάποιων ωρών ή λίγων ημερών. Έπειτα, η μεταφορά στο κέντρο διαμονής διαρκεί περίπου μία μέρα, όπου παραμένουν από δύο έως τρεις μέρες. Επομένως, ένα τυπικό εύρος είναι μία έως δύο εβδομάδες από την εμφιάλωση μέχρι το ράφι, το οποίο καλύπτεται από το προτεινόμενο σύστημα. Επειδή το εμφιαλωμένο νερό σε κλειστό μπουκάλι έχει διάρκεια ζωής ένα έως δύο χρόνια, οι παλέτες μένουν εκτεθειμένες για μεγάλα διαστήματα σε αποθήκες χωρίς κλιματισμό, σε προαύλια καταστημάτων και σε λιμάνια. Η μετανάστευση αντιμονίου, η αποδόμηση του πλαστικού PET και η ανάπτυξη μικροβίων είναι αθροιστικά στον χρόνο.



Εικόνα 7.3: Σχεδιαγράμματα Πειράματος - Θερμοκρασία και Υγρασία



Εικόνα 7.4: Σχεδιαγράμματα Πειράματος – UVI και Ένταση φωτός

Για τον έλεγχο και την αξιολόγηση του συστήματος, το κύκλωμα έπρεπε να δεχτεί μεταβολές στις συνθήκες τις οποίες μετράει κατά τη διάρκεια μίας διαδρομής. Αυτό είχε ως στόχο την καλύτερη δυνατή προσέγγιση μίας προσομοίωσης σε μία πραγματική περίπτωση ψυχρής αλυσίδας. Η διαδικασία μεταφοράς και αποθήκευσης μπορεί να διαρκέσει από λίγες μέρες έως δύο εβδομάδες, όμως σκοπός του πειράματος ήταν η επίδειξη των μεγάλων μεταβολών που διαβάζουν οι αισθητήρες, καθώς το κύκλωμα και οι παλέτες νερού μεταφέρονται.

Για την διεξαγωγή του πειράματος, πραγματοποιήθηκε η μεταφορά του κυκλώματος από την Θεσσαλονίκη στο Πολύκαστρο, διανύοντας συνολικά 140 χιλιόμετρα, διήρκεσε δύο ώρες και παράγοντας 12 μετρήσεις. Η μεταφορά άρχισε από τις 10:46 και έληξε στη 13:01. Σύμφωνα με τις Εικόνες 7.3α και 7.3β, οι μεταβολές που παρουσιάστηκαν είναι μεγαλύτερες από τα πειράματα στα οποία το κύκλωμα ήταν στάσιμο. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, το κύκλωμα είχε πολλές φορές άμεση επαφή με το φως του ήλιου, το οποίο φαίνεται από τις τιμές της Εικόνας 7.4.

	A	B	C	D	E	F
1	Timestamp	Unix Time	Temperat	Humidity	UV Index	Light (Lux)
2	8/30/2026 10:31	1788075081	29.90	48.0	0.05	1481.6
3	8/30/2026 10:46	1788075981	30.20	46.0	0.06	1634.1
4	8/30/2026 11:01	1788076881	30.50	46.0	0.05	5666.4
5	8/30/2026 11:16	1788077781	31.10	41.0	0.04	12948.4
6	8/30/2026 11:31	1788078681	31.70	46.0	0.03	1272.3
7	8/30/2026 11:46	1788079581	30.50	42.0	0.02	1555.9
8	8/30/2026 12:01	1788080481	27.50	43.0	0.01	1496.6
9	8/30/2026 12:16	1788081381	30.70	42.0	0.09	17694.4
10	8/30/2026 12:31	1788082281	31.80	38.0	0.13	23116.3
11	8/30/2026 12:46	1788083181	31.00	37.0	0.08	9424.8
12	8/30/2026 13:01	1788084081	31.30	36.0	0.11	22881.4
13	8/30/2026 13:16	1788084981	29.10	56.0	0.00	216.4

Εικόνα 7.5: Μετρήσεις Πειράματος σε αρχείο CSV

Οι μεγάλες μεταβολές οφείλονται σε πολλούς λόγους.

- **Ποικιλία βαθμίδων:** Ένας στάσιμος σταθμός μέτρησης κάνει δειγματοληψία σε ένα μικροκλίμα, ενώ ο κινούμενος σταθμός διασχίζει πολλά, κάνοντας την μεταβολή να οφείλεται περισσότερο στη θέση, παρά τον χρόνο.
- **Θερμικό περιβάλλον οχήματος:** Ο κλειστός χώρος του αυτοκινήτου θερμαίνεται με ραγδαίο ρυθμό από την ηλιακή ακτινοβολία, ενώ η λειτουργία κλιματισμού και το άνοιγμα παραθύρων παράγουν βηματικές μεταβολές. Αντίθετα, ο εσωτερικός χώρος μεταβάλλεται αργά και ομαλά.
- **Η παράμετρος του φωτισμού:** Η ένταση φωτός σε στάσιμη συνθήκη είναι σταθερή, ενώ εν κινήσει αλλάζει ραγδαία μέσα σε δευτερόλεπτα. Ο κύριος παράγοντας που συμβάλλει σε αυτή την απότομη μεταβολή είναι η σκιά από την αλλαγή προσανατολισμού του οχήματος, επηρεάζοντας και τον δείκτη UV.
- **Σχέση θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας:** Ακόμα και με σταθερή απόλυτη υγρασία, κάθε μεταβολή θερμοκρασίας μεταβάλλει τη σχετική υγρασία ανάστροφα. Οι διακυμάνσεις στη θερμοκρασία παράγουν από μόνες τους διακυμάνσεις στην σχετική υγρασία.

Η μεταφορά αποτελεί το πιο ευμετάβλητο και το πιο επικίνδυνο στάδιο, όπου ένα σταθερό όργανο καταγραφής δεν αποτυπώνει τι συμβαίνει πραγματικά στη παλέτα, πράγμα που επιβεβαιώνεται από το πείραμα. Αξίζει να αναφερθεί πως οι μεταβολές αυτές έχουν ήδη εξομαλυνθεί από τον αλγόριθμο του μέσου όρου, όπου η επεξεργασία αυτή καταστέλλει τη διακύμανση.

Κεφάλαιο 8ο: Συμπεράσματα και Μελλοντικές Κατευθύνσεις

8.1 Συμπεράσματα από τη δοκιμή λειτουργίας

Ο στόχος της εργασίας ήταν να υλοποιηθεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα χαμηλού κόστους, ικανό για παρακολούθηση περιβαλλοντικών συνθηκών για τη μεταφορά και αποθήκευση συσκευασμένων προϊόντων. Το κενό των ακριβών βιομηχανικών λύσεων μεγάλης κλίμακας αποτέλεσε πηγή έμπνευσης για την ανάπτυξη μιας προσιτής και φορητής λύσης που καλύπτει ένα σύνολο αναγκών τηλεμετρίας. Για την κάλυψη αυτών των αναγκών σχεδιάστηκε ένα σύστημα τριών επιπέδων που συνδυάζει τον σταθμό μέτρησης στο φυσικό επίπεδο, την εφαρμογή Android στη κινητή συσκευή και τη πλατφόρμα Firebase στο επίπεδο του υπολογιστικού νέφους.

Στο σύνολο της, η εργασία ανταποκρίθηκε στους βασικούς στόχους που τέθηκαν στην αρχή. Το φυσικό επίπεδο, με πυρήνα τον μικροελεγκτή ESP32 και τους τρεις ψηφιακούς αισθητήρες, επιτυγχάνει πολυπαραμετρική μέτρηση των περιβαλλοντικών συνθηκών, παρέχοντας περισσότερη πληροφορία από τις υπάρχουσες λύσεις που περιορίζονται σε λιγότερες παραμέτρους. Η αξιοπιστία των καταγραφών ενισχύεται με τον αλγόριθμο μέσης τιμής με κυκλικούς καταχωρητές και τον έλεγχο αληθοφάνειας που απορρίπτει τις άκυρες τιμές, ενώ κάθε εγγραφή συνοδεύεται από την ακριβή χρονική σήμανση του RTC. Η τοπική αποθήκευση των δεδομένων εξασφαλίζει την αυτόνομη λειτουργία του σταθμού, αντιμετωπίζοντας άμεσα μία από τις κεντρικές προκλήσεις. Παράλληλα, η ασύρματη επικοινωνία μέσω BLE ενεργοποιείται με τη σάρωση του κωδικού QR, προστατεύεται από τον μηχανισμό αυθεντικοποίησης πρόκλησης-απόκρισης και καθιστά τη σύνδεση ταυτόχρονα εύχρηστη και ασφαλή. Η εφαρμογή Android αναλαμβάνει τον ρόλο του διαμεσολαβητή, διατηρώντας τοπικό αντίγραφο του ιστορικού και προωθώντας τα δεδομένα στο νέφος, έτοιμα για πρόσβαση, απεικόνιση και εξαγωγή σε μορφή CSV με τη βοήθεια της ιστοσελίδας. Η δυνατότητα επαναφοράς των τριών επιπέδων από ένα κουμπί στο πλαίσιο της εφαρμογής, επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση του συστήματος χωρίς επέμβαση στο υλικό.

Η χρησιμότητα του παρόντος συστήματος στην πράξη βασίζεται στη σύνθεση διαθέσιμων τεχνολογιών σε ένα ενιαίο σύστημα, προσαρμοσμένο στη συγκεκριμένη ανάγκη της μεταφοράς εμφιαλωμένου νερού. Σε αντίθεση με εμπορικές λύσεις που εστιάζουν αποκλειστικά στη θερμοκρασία, η εργασία παρακολουθεί τέσσερις παραμέτρους, συμπεριλαμβανοντας και τον δείκτη UV, ο οποίος σχετίζεται άμεσα με την αλλοίωση της ακεραιότητας των φιαλών PET. Η αρχιτεκτονική τριών σταδίων, καθώς και έμφαση που δόθηκε στην ασφάλεια της ασύρματης σύνδεσης προσδίδει ανθεκτικότητα σε συνθήκες περιορισμένης ή ανύπαρκτης συνδεσιμότητας. Με την υιοθέτηση του σχήματος πρόκλησης-απόκρισης με HMAC-SHA256, το μυστικό κλειδί δεν διασχίζει ποτέ τον ασύρματο δίαυλο και οι υπογραφές δεν μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν. Με τη χρήση της τεχνητής νοημοσύνης, η υλοποίηση του κώδικα, καθώς και η συγγραφή της παρούσας εργασίας έγιναν ταχύτερα και πιο αποτελεσματικά.

8.2 Περιορισμοί

Παρά τη λειτουργικότητα του συστήματος, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί που πρέπει να αναφερθούν. Για παράδειγμα, κατασκευάστηκε και αξιολογήθηκε ένας μοναδικός σταθμός μέτρησης, γεγονός που δεν επιτρέπει τη στατιστική γενίκευση της απόδοσης σε ένα μεγαλύτερο αριθμό συσκευών. Την ίδια στιγμή, η αρχιτεκτονική του υλικού παραμένει σε επίπεδο πρωτοτύπου, χωρίς ενσωματωμένη μπαταρία και ανθεκτικό περίβλημα, κρίσιμα χαρακτηριστικά για την χρήση σε πραγματικές καταστάσεις. Σε επίπεδο συνδεσιμότητας, ο σταθμός δεν διαθέτει δική του σύνδεση στο διαδίκτυο και

εξαρτάται πλήρως από την κινητή συσκευή που δρα ως διαμεσολαβητής, με αποτέλεσμα η προώθηση των δεδομένων στο νέφος να μην είναι δυνατή όταν απουσιάζει ο χρήστης. Όσον αφορά την ασφάλεια, ο μηχανισμός αυθεντικοποίησης μπορεί να είναι κρυπτογραφικά ορθός, αλλά στηρίζεται σε κοινό μυστικό κλειδί για όλες τις συσκευές, το οποίο είναι γραμμένο ως σταθερά στο firmware. Η διαρροή του κλειδιού θα έδινε πρόσβαση σε οποιονδήποτε σταθμό του συστήματος, οπότε ο περιορισμός αφορά περισσότερο την διαχείριση των κλειδιών. Επιπλέον, η βάση δεδομένων στο νέφος λειτουργεί με κανόνες που δεν απαιτούν πιστοποίηση από τον χρήστη και η ιστοσελίδα απεικόνισης είναι προσβάσιμη από οποιονδήποτε που γνωρίζει τη διεύθυνσή της. Τέλος, η εφαρμογή δεν παρέχει ενεργές ειδοποιήσεις κατά την υπέρβαση των κατωφλίων, παραμένοντας ένα εργαλείο καταγραφής και όχι ένα με προληπτικό χαρακτήρα.

8.3 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Παρά την επίτευξη των στόχων, η υλοποίηση αφήνει περιθώρια για βελτίωση και επέκταση, τα οποία θα μπορούσαν να την μετατρέψουν από μία δοκιμαστική σε μία ολοκληρωμένη κατασκευή. Το πρώτο και πιο άμεσο βήμα σχετίζεται με την ενεργειακή αυτονομία και τη φυσική θωράκιση του σταθμού. Η ενσωμάτωση μπαταρίας με κατάλληλο κύκλωμα διαχείρισης ενέργειας και αξιοποίηση των λειτουργιών χαμηλής κατανάλωσης του ESP32 (deep sleep) θα επέτρεπαν τη λειτουργία σε όλη τη διάρκεια της μεταφοράς. Παράλληλα, μία ανθεκτική θήκη θα προστάτευε το κύκλωμα από τις συνθήκες μεταφοράς και θα ολοκλήρωνε την σχεδίαση και την αρχιτεκτονική του επίπεδου του υλικού.

Ως προς την επεκτασιμότητα, η ιστοσελίδα και η εξαγωγή δεδομένων θα μπορούσαν να υποστηρίξουν πολλαπλούς σταθμούς ταυτόχρονα, αντί για τον προκαθορισμένο σειριακό αριθμό 0014 της τρέχουσας υλοποίησης, αξιοποιώντας την ιεραρχική δομή που έχει ήδη προβλεφθεί στη πλατφόρμα Firebase. Στο επίπεδο ασφάλειας, η χρήση μοναδικού μυστικού κλειδιού ανά συσκευή, αντί του κοινού κλειδιού θα ενίσχυε την προστασία σε ένα περιβάλλον με πολλούς σταθμούς.

Μια χρήσιμη επέκταση θα ήταν η προσθήκη ανεξάρτητης συνδεσιμότητας στον ίδιο σταθμό μέτρησης, μέσω κυψελοειδούς δικτύου ή τεχνολογιών μεγάλης εμβέλειας όπως το πρωτόκολλο LoRa, προκειμένου η μετάδοση των δεδομένων να μην εξαρτάται αποκλειστικά από την παρουσία της κινητής συσκευής. Ταυτόχρονα, η προσθήκη γεωγραφικού εντοπισμού (GPS) θα συνέδεε τις μετρήσεις με τη διαδρομή της μεταφοράς. Ο συνδυασμός χρονικής σήμανσης και τοποθεσίας που θα συνόδευαν κάθε μέτρηση, θα παρείχε μία πιο ολοκληρωμένη απεικόνιση των συνθηκών κατά τη μεταφορά και αποθήκευση των φιαλών.

Τέλος, σε επίπεδο λογισμικού και αξιοποίησης δεδομένων, η υλοποίηση ενεργών ειδοποιήσεων ή push notifications κατά την υπέρβαση των κατωφλίων θα καθιστούσε το σύστημα προληπτικό και δε θα διέθετε μόνο τις πληροφορίες. Οι ειδοποιήσεις σε συνδυασμό με περισσότερες διαδρομές και ελέγχους, θα καθιστούσαν το σύστημα πλήρως εξυπηρετικό. Μακροπρόθεσμα, η συγκέντρωση ιστορικών δεδομένων από πολλαπλές μεταφορές θα μπορούσε να τροφοδοτήσει τεχνικές ανάλυσης για την πρόβλεψη επικίνδυνων συνθηκών πριν αυτές εκδηλωθούν.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Journal Articles

- [1] J. Gillespie *et al.*, "Real-Time Anomaly Detection in Cold Chain Transportation Using IoT Technology," *Sustainability*, vol. 15, no. 3, Art. no. 2255, 2023.
- [3] Yu P, Abdul Hamid R, Hakim Osman L, Liao J, Ni C., "Logistics Practices to Reduce Food Loss in Sustainable Agri-Food Supply Chains: From Literature Review to Research Framework," *Agriculture*, vol. 16, no. 5, Art. no. 587, 2026.
- [4] Hassini E, Ben-Daya M, Bahroun Z, "IoT-Enabled Quality-Triggered Markdown Pricing for Perishable Food: Equity and Waste Implications," *Foods*, vol. 15, no. 4, Art. no. 742, 2026.
- [5] Kaur A, Yemmireddy V. Effect of Different Pre-Growth Temperatures on the Survival Kinetics of *Salmonella enterica* and *Listeria monocytogenes* in Fresh-Cut Salad during Refrigerated Storage. *Foods*. 2023; 12(23):4287.
- [6] Kieran D. Cox, Garth A. Covernton, Hailey L. Davies, John F. Dower, Francis Juanes, Sarah E. Dudas; Human Consumption of Microplastics. *Environ. Sci. Technol.* 18 June 2019; 53 (12): 7068–7074.
- [7] Rostampour S, Cook R, Jhang S-S, Li Y, Fan C, Sung L-P. Changes in the Chemical Composition of Polyethylene Terephthalate under UV Radiation in Various Environmental Conditions. *Polymers*. 2024; 16(16):2249.
- [8] Sergi, I.; Montanaro, T.; Benvenuto, F.L.; Patrono, L. A Smart and Secure Logistics System Based on IoT and Cloud Technologies. *Sensors* **2021**, 21, 2231.
- [9] Agustian, Dwi & Muthahhari, Ilham & Syahreza, Valiant & Widodo, Anton & Nugraha, Muchamad & Trihadi, Edward. (2025). Design and Development of an IoT-Based UV Meter and Dual-Axis Solar Tracker for Real-Time UV Index Monitoring Optimization. *Journal of Computation Physics and Earth Science (JoCPES)*. 5. 10.63581/JoCPES.v5i1.01.
- [10] H. Afreen and I. S. Bajwa, "An IoT-Based Real-Time Intelligent Monitoring and Notification System of Cold Storage," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 38236-38253, 2021.
- [11] Carneado, Sergio, José Fermín López-Sánchez, and Ángeles Sahuquillo. 2023. "Antimony in Polyethylene Terephthalate-Bottled Beverages: The Migration Puzzle" *Molecules* 28, no. 20: 7166.
- [12] Mohammed M, Riad K, Alqahtani N. Design of a Smart IoT-Based Control System for Remotely Managing Cold Storage Facilities. *Sensors*. 2022; 22(13):4680.
- [15] L. K. Baghel, R. Raina, S. Kumar and L. Catarinucci, "IoT-Based Integrated Sensing and Logging Solution for Cold Chain Monitoring Applications," in *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, vol. 8, pp. 837-846, 2024.
- [16] Mejjauoli, S. Internet of Things based Decision Support System for Green Logistics. *Sustainability* **2022**.
- [19] Haring, Olivia & Azumah, Sylvia & Elsayed, Nelly. (2021). A Review of Network Evolution towards a Smart Connected World. *International Journal of Computer Applications*. 183. 1-8. 10.5120/ijca2021921311.

Internet Sites

[2] Centers for Disease Control and Prevention, "Vaccine Storage and Handling: The Vaccine Cold Chain," *CDC*, 2024. [Online]. Available: <https://www.cdc.gov/vaccines/hcp/storage-handling/cold-chain.html>

[13] Testo SE & Co. KGaA, "Temperature and humidity data loggers" [Online]. Available: <https://www.testo.com/en>

[14] Sensitech Inc., "TempTale GEO X – Real-Time Temperature & Location Monitoring for Life Sciences," Sensitech (A Carrier Company). [Online]. Available: <https://www.sensitech.com/en/solutions/life-sciences-real-time/>

[17] GROBOTRONICS TEAM, "Ένας πλήρης οδηγός για Ασύρματη Επικοινωνία!," *Grobotronics Blog*, Nov. 24, 2025. [Online]. Available: <https://blog.grobotronics.com/?p=4992>

[18] Soojin, "Basic concept of sending and receiving data with BLE," *Nordic DevZone – Nordic Q&A*, 2020. [Online]. Available: <https://devzone.nordicsemi.com/f/nordic-q-a/64286/basic-concept-of-sending-and-receiving-data-with-ble>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΚΩΔΙΚΑΣ ARDUINO IDE ΚΑΙ VSCODE

Github Repository: <https://github.com/konmoysidis-sys/MyThesis>

Arduino IDE Code: <https://github.com/konmoysidis-sys/MyThesis/blob/main/FinalFinalFinal.ino>

Visual Studio Code: <https://github.com/konmoysidis-sys/MyThesis/blob/main/index.tsx>