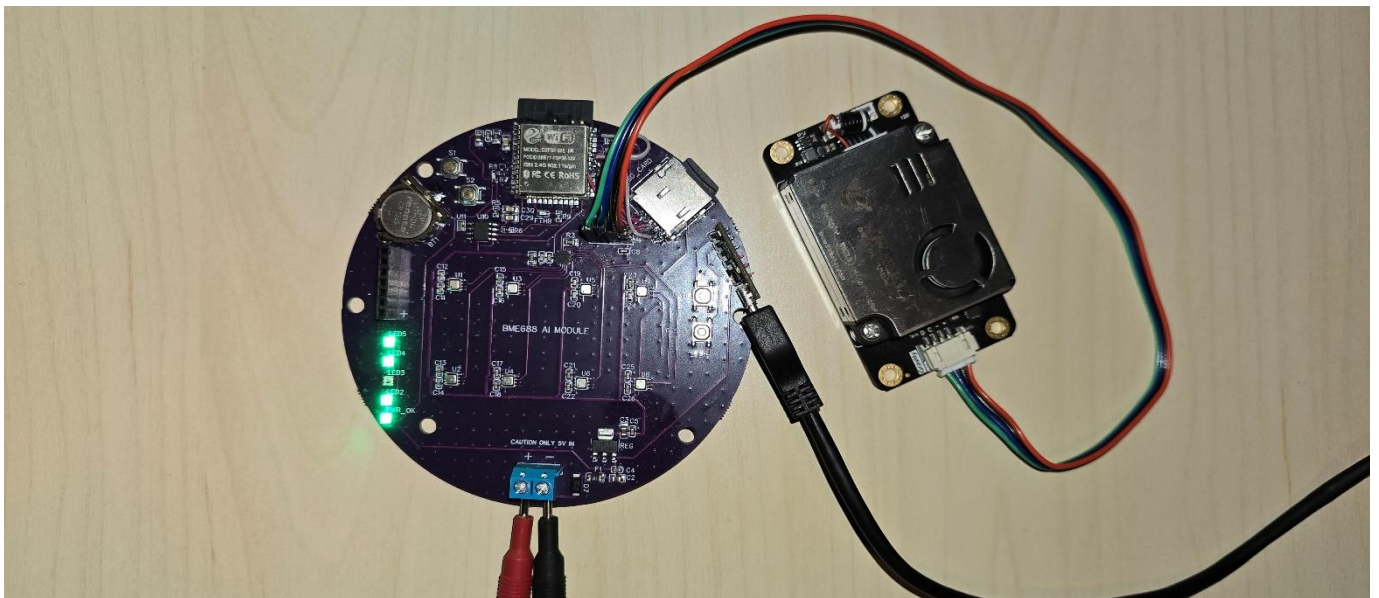


ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΠΜΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

«Ανάπτυξη συσκευής μέτρησης της ποιότητας του αέρα
σε νοσοκομεία, με εφαρμογή ανάλυσης δεδομένων»



Της φοιτήτριας
Μαρίας Πουλιανίδη
Αρ. Μητρώου: 52315

Επιβλέπων
Ονοματεπώνυμο
Ιορδάνης Κιοσκερίδης
Βαθμίδα: Καθηγητής

Ημερομηνία 29/09/2025

Τίτλος Δ.Ε.: Ανάπτυξη συσκευής μέτρησης της ποιότητας του αέρα σε νοσοκομεία, με εφαρμογή
ανάλυσης δεδομένων

Κωδικός Δ.Ε.: 24231

Όνοματεπώνυμο φοιτήτριας: Μαρία Πουλιανίδη

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Ιορδάνης Κιοσκερίδης

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε.: 21/09/2024

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε.: 29/09/2025

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 της φοιτήτριας Μαρίας Πουλιανίδη 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 απαραίτητα και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Πρόλογος

Στη παρούσα διπλωματική η επιλογή του θέματος βασίστηκε ενδιαφέρον μου για τις τεχνολογίες που σχετίζονται με την παρακολούθηση της ποιότητας της ατμόσφαιρας και τη συμβολή τους στη βελτίωση της ανθρώπινης υγείας. Η ρύπανση του αέρα και κυρίως η ποιότητα του εσωτερικού αέρα συνιστούν θέματα που επηρεάζουν σημαντικά την καθημερινότητα και την ασφάλεια σε χώρους με υψηλές απαιτήσεις, όπως τα νοσοκομεία και οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις.

Μέσα από αυτή την εργασία δημιουργήθηκε η ευκαιρία για συνδυασμό της θεωρίας με την πρακτική εφαρμογή, σχεδιάζοντας και υλοποιώντας μια ολοκληρωμένη συσκευή παρακολούθησης.

Η εργασία με αισθητήρες, μικροελεγκτές και τεχνολογίες IoT έχει ενισχύσει τις ικανότητες μου στον τομέα των εφαρμοσμένων ηλεκτρονικών συστημάτων. Παράλληλα, η ανάπτυξη web εφαρμογής και βάσης δεδομένων αποτέλεσε μια σημαντική εμπειρία που βοήθησε στην κατανόηση ολοκληρωμένων συστημάτων πληροφορικής. Συνολικά, η εργασία αυτή υπήρξε παραγωγικό σημείο γνώσης και δημιουργίας, που πιστεύω ότι θα αποτελέσει εφόδιο για την επαγγελματική μου πορεία.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η σχεδίαση και υλοποίηση μιας ολοκληρωμένης συσκευής παρακολούθησης της ποιότητας της ατμόσφαιρας σε εσωτερικούς χώρους, εστιάζοντας σε νοσοκομεία και βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Βασικός πυρήνας της συσκευής είναι ο μικροελεγκτής ESP32 και περιλαμβάνει δύο βασικούς αισθητήρες: τον SEN0460 για τη μέτρηση αιωρούμενων σωματιδίων (PM1.0, PM2.5, PM10) και τον BME688 της Bosch για την καταγραφή αερίων ρύπων, θερμοκρασίας, υγρασίας και πίεσης.

Τα δεδομένα συλλέγονται πάντα σε πραγματικό χρόνο, έπειτα αποθηκεύονται σε μια βάση δεδομένων MySQL και εμφανίζονται μέσω ιστοσελίδας αναπτυγμένης σε Python Flask, η οποία υποστηρίζει την αυθεντικοποίηση χρηστών, εμφανίζει ιστορικές μετρήσεις και γραφήματα, καθώς και ενσωματώνει δεδομένα καιρού από το OpenWeatherMap.

Επιπλέον, σχεδιάστηκε μια προσαρμοσμένη πλακέτα PCB για να ενσωματώσει τους αισθητήρες, αυξάνοντας την αξιοπιστία και τη λειτουργικότητα του συστήματος.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η συσκευή μπορεί να παρέχει αξιόπιστες μετρήσεις προσφέροντας ευελιξία, χαμηλό κόστος και δυνατότητα προσαρμογής σε διαφορετικά περιβάλλοντα.

Συνολικά, η εργασία προτείνει μια πρακτική λύση για την παρακολούθηση και βελτίωση της ποιότητας του αέρα, με άμεση εφαρμογή σε χώρους υψηλών απαιτήσεων.

«Development of an air quality monitoring device for hospitals, with a data analysis application»

«Maria Poulianidi»

Abstract

This thesis presents the design and implementation of an integrated device for indoor air quality monitoring, with a focus on applications in hospitals and industrial facilities. Air pollution and, in particular, the quality of indoor air have a direct impact on human health and safety, especially in critical environments such as intensive care units and operating rooms. The developed system aims to provide a reliable, low-cost, and adaptable solution for real-time monitoring and data analysis.

The device is based on the ESP32 microcontroller and employs two main sensors: the SEN0460 for particulate matter detection (PM1.0, PM2.5, PM10, and particle sizes above 0.3 μm), and the Bosch BME688 for measuring temperature, humidity, pressure, and gas concentrations. Sensor data are collected and transmitted to a MySQL database, while a Flask-based web application provides user authentication, visualization of historical data, graphical representations, and integration with weather information from OpenWeatherMap. A custom-designed PCB was also developed to integrate the sensors and microcontroller into a compact and reliable hardware solution.

Experimental results demonstrate that the device successfully delivers accurate and consistent measurements under various conditions, while offering flexibility and scalability for different use cases. Compared to existing commercial systems, the proposed solution combines lower cost with higher adaptability, making it suitable for both research and practical deployment.

Future work may include the integration of additional sensors for detecting more pollutant gases, the application of machine learning algorithms for prediction and pattern recognition, and the deployment of cloud services for large-scale remote monitoring. Overall, this project provides a practical approach to improving indoor air quality monitoring in environments with high safety requirements, contributing to both environmental awareness and public health.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	iv
Περίληψη.....	v
Abstract	vi
Περιεχόμενα	vii
Κατάλογος Εικόνων	xi
Κατάλογος Πινάκων.....	xiii
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή	1
1.1 Σκοπός και στόχοι της εργασίας.....	1
1.2 Σημασία της ποιότητας του αέρα σε νοσοκομεία και βιομηχανικές εγκαταστάσεις.....	1
1.2.1 Σημασία στα νοσοκομεία	1
1.2.2 Σημασία στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις	2
1.3 Αντικείμενο και συνεισφορά της εργασίας	2
1.4 Δομή της εργασίας	2
Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	4
2.1 Η έννοια της ποιότητας του αέρα.....	4
2.1.1 Σωματίδια PM (PM1.0, PM2.5, PM10).....	4
2.1.2 Αέρια ρύποι (VOC, CO ₂ eq, NO _x , βενζόλιο, αμμωνία).....	5
2.1.3 Δείκτες IAQ και AQI.....	6
2.2 Νομοθεσία και πρότυπα για την ποιότητα του αέρα σε εσωτερικούς χώρους.....	6
2.3 Αισθητήρες ποιότητας αέρα – αρχές λειτουργίας και τεχνολογίες	7
2.4 Συστήματα παρακολούθησης ποιότητας αέρα (State of the Art).....	8
2.5 Επίλογος	8
Κεφάλαιο 3ο: Χρησιμοποιούμενες Τεχνολογίες και Εργαλεία	9
3.1 Μικροελεγκτής ESP32	9
3.1.1 Χαρακτηριστικά και δυνατότητες	9
3.1.2 Πλεονεκτήματα για εφαρμογές IoT.....	9
3.2 Αισθητήρας σωματιδίων SEN0460 (DFRobot)	10
3.2.1 Περιγραφή, αρχή λειτουργίας και χαρακτηριστικά.....	10
3.2.2 Τεχνικές προδιαγραφές και όρια ποιότητας αέρα	12
3.2.3 Εφαρμογές, διασύνδεση και πρωτόκολλο επικοινωνίας	14
3.2.4 Βαθμονόμηση, συντήρηση και περιορισμοί.....	15
Κεφάλαιο 4ο: Ο Αισθητήρας BME688 και το Οικοσύστημα της Bosch	17

4.1	Εισαγωγή.....	17
4.1.1	Μετρούμενα μεγέθη	18
4.1.2	Πλεονεκτήματα.....	18
4.2	Οικοσύστημα λογισμικού Bosch (BSEC, AI-Studio, Νευρωνικά Δίκτυα).....	19
4.2.1	BSEC (Bosch Software Environmental Cluster).....	19
4.2.2	BME AI-Studio.....	19
4.2.3	Νευρωνικά Δίκτυα και Διαδικασία Εκπαίδευσης	20
4.2.4	Η Συνεργασία BSEC και AI-Studio	21
4.2.5	Σημασία για την Ανάπτυξη Εφαρμογών	21
4.3	Με την Πρώτη Ματιά.....	21
4.3.1	Αρχικές Χρήσιμες Πληροφορίες	21
4.3.2	Βήματα Πειράματος	22
4.4	Διαμόρφωση Πλακέτας (Configure Board)	25
4.4.1	Τύποι Διαμόρφωσης.....	25
4.4.2	Heater Profiles	26
4.4.3	Duty Cycles	26
4.4.4	Διάταξη Πίνακα.....	28
4.4.5	Πίνακας Λειτουργίας (Operating Mode Table).....	28
4.5	Καταγραφή Δεδομένων.....	29
4.5.1	Έναρξη εγγραφής	29
4.5.2	Διαδικασία Καταγραφής.....	31
4.5.3	Τερματισμός Καταγραφής.....	32
4.6	Εισαγωγή Δεδομένων.....	32
4.6.1	Πρόσβαση στα αρχεία της κάρτας SD.....	33
4.6.2	Εισαγωγή δεδομένων στο AI-Studio	33
4.6.3	Επισκόπηση Δεδομένων	34
4.6.4	Δεδομένα Δείγματος και Γραφική Απεικόνιση	34
4.6.5	Ορισμός και Επεξεργασία Δειγμάτων	35
4.7	Συλλογή Δειγμάτων.....	35
4.7.1	Διαχείριση Δειγμάτων	36
4.7.2	Λειτουργίες Δειγμάτων	37
4.7.3	Χαρακτηριστικά Δειγμάτων	37
4.7.4	Τεχνικές Πληροφορίες Δειγμάτων	38
4.8	Εκπαίδευση Αλγορίθμων	39
4.8.1	Διαχείριση Αλγορίθμων	39

4.8.2	Τύποι Αλγορίθμων.....	39
4.8.3	Δεδομένα Εκπαίδευσης	40
4.8.4	Ρυθμίσεις Εκπαίδευσης	41
4.8.5	Παρακολούθηση Εκπαίδευσης.....	41
4.9	Αξιολόγηση Αλγορίθμων	42
4.9.1	Δείκτες Απόδοσης	42
4.9.2	Εργαλεία Αξιολόγησης.....	44
4.9.3	Πρόσθετες Δοκιμές & Βελτιώσεις	45
4.10	Mobile εφαρμογή (BME AI-Studio Mobile).....	46
4.10.1	Σύνδεση με πλακέτα (Connecting to a Board).....	46
4.10.2	Δύο λειτουργίες (Two modes of Operation)	47
4.10.3	Καταγραφή και Επισήμανση Δεδομένων (Record & Label Data).....	47
4.10.4	Ζωντανή Δοκιμή Αλγορίθμου (Live-Test Algorithm)	51
4.11	Περιφερικά στοιχεία της πλακέτας (RTC, SD card, MUX, LEDs).....	54
4.11.1	RTC (Real Time Clock).....	54
4.11.2	Κάρτα SD.....	55
4.11.3	Πολυπλέκτης (MUX)	55
4.11.4	LEDs	55
Κεφάλαιο 5ο:	Σχεδίαση και υλοποίηση της μετρητικής διάταξης.....	56
5.1.1	Τροφοδοσία	57
5.1.2	Κεντρικός μικροελεγκτής & βασικές συνδέσεις	58
5.1.3	Υποσύστημα LEDs.....	60
5.1.4	Αισθητήρας SEN0460	60
5.1.5	Αισθητήρες BME688	61
5.1.6	Μονάδα επέκτασης MUX για CS.....	63
5.1.7	Κουμπιά S1/S2	64
5.1.8	MicroSD	65
5.1.9	Κύκλωμα RTC.....	65
5.1.10	Header Προγραμματισμού (PROGRAM).....	66
5.1.11	PCB Layout	67
5.1.12	Αρχική Πλακέτα.....	69
Κεφάλαιο 6ο:	Ανάπτυξη του λογισμικού.....	72
6.1	Αρχιτεκτονική συστήματος (Client – Server)	72
6.1.1	Client	72
6.1.2	Python Server	76

6.2	Συλλογή δεδομένων από τους αισθητήρες.....	80
6.2.1	Ανάγνωση δεδομένων από τον SEN0460	80
6.2.2	Ανάγνωση δεδομένων από τον BME688	81
6.3	Επικοινωνία ESP32 με server (HTTP/REST API).....	81
6.4	Ανάπτυξη Web Εφαρμογής.....	82
6.4.1	Login / Register	82
6.4.2	Dashboard.....	84
6.4.3	BME (BME688 overview)	85
6.4.4	SEN (SEN0460 – PM).....	88
6.4.5	History (πίνακες ιστορικού)	88
6.4.6	Graphs (χρονικές σειρές).....	90
6.4.7	Weather.....	92
6.4.8	Σύνδεση client–server–UI	94
6.4.9	Αυθεντικοποίηση χρηστών.....	94
6.4.10	Εμφάνιση μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο.....	94
6.5	Βάση δεδομένων	94
6.5.1	Διάγραμμα και δομή MySQL πινάκων	95
6.5.2	Αποθήκευση και ανάκτηση δεδομένων.....	96
Κεφάλαιο 7ο:	Αποτελέσματα Μετρήσεων και Συμπεράσματα	98
7.1	Αποτελέσματα Μετρήσεων.....	98
7.2	Κατασκευή	98
7.3	Συμπεράσματα.....	103
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		104

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1: Κατηγορίες Αιωρούμενων Σωματιδίων (PM1.0, PM2.5, PM10)

Εικόνα 2.2: Κλίμακα Δείκτη AQI με Χρωματική Κωδικοποίηση

Εικόνα 3.1: Αρχή λειτουργίας PM αισθητήρα με laser scattering (Atmotube schematic)

Εικόνα 3.2: Διάγραμμα λειτουργίας αισθητήρα σωματιδίων — laser, inlet/outlet αέρα, photodiode

Εικόνα 3.3: Σχηματικό διάγραμμα αισθητήρα DFRobot PM2.5

Εικόνα 3.4: Απλούστερο σχήμα λειτουργίας με ventilator / φούσκα αέρα και αισθητήρα φωτός

Εικόνα 4.1: Εξαγωγή αλγορίθμων ως αρχείο BSEC

Εικόνα 4.2: Προφίλ Θερμαντήρα

Εικόνα 4.3: Κύκλος Λειτουργίας

Εικόνα 4.4: Τοποθέτηση κάρτας SD στη πλακέτα

Εικόνα 4.5: Ένδειξη LED για καταγραφή (κάθε 2 sec)

Εικόνα 4.6: Κουμπιά S1 και S2 για εναλλαγή label

Εικόνα 4.7: Εναλλαγή label μέσω της εφαρμογής BME AI-Studio Mobile

Εικόνα 4.8: Τερματισμός καταγραφής με αποσύνδεση τροφοδοσίας

Εικόνα 4.9: Εισαγωγή δεδομένων μέσω SD στο BME AI-Studio

Εικόνα 4.10: Συλλογή δειγμάτων (Specimen Collection)

Εικόνα 4.11: Διαδικασία ταξινόμησης

Εικόνα 4.12: Διαδικασία παλινδρόμησης

Εικόνα 4.13: Παρακολούθηση εκπαίδευσης

Εικόνα 4.14: Τύποι για υπολογισμό ταξινόμησης

Εικόνα 4.15: Πίνακας σύγκρισης

Εικόνα 4.16: Διάγραμμα ιστορικού πρόβλεψης

Εικόνα 4.17: Live Testing από το AI-Studio Mobile

Εικόνα 4.18: Καταγραφή και επισήμανση δεδομένων

Εικόνα 4.19: Γράφημα της κατάστασης του αισθητήρα

Εικόνα 4.20: Κίνηση δεδομένων και βαθμός σταθερότητας

Εικόνα 4.21: Γράφημα του προφίλ θέρμανσης

Εικόνα 4.22: Γράφημα της αντίστασης αερίων

Εικόνα 4.23: Γράφημα των περιβαλλοντικών δεδομένων

Εικόνα 4.24: Λειτουργία live test από mobile

Εικόνα 4.25: Γράφημα πρόβλεψης πιθανότητας

Εικόνα 4.26: Γράφημα ιστορικού πρόβλεψης

Εικόνα 5.1: Ολοκληρωτικό σχέδιο πλακέτας

Εικόνα 5.2: Κύκλωμα τροφοδοσίας

Εικόνα 5.3: Συνδέσεις με το ESP32

Εικόνα 5.4: Κύκλωμα LED

Εικόνα 5.5: Κύκλωμα SEN0460 (I²C)

Εικόνα 5.6: Κύκλωμα BME688 (SPI)

Εικόνα 5.7: Κύκλωμα MUX

Εικόνα 5.8: Button S1/S2

Εικόνα 5.9: Συνδεσμολογία με SD card

Εικόνα 5.10: Κύκλωμα RTC

Εικόνα 5.11: Header Προγραμματισμού

Εικόνα 5.12: PCB Layout

Εικόνα 5.13: 3D View

Εικόνα 5.14: Σχέδιο αρχικής πλακέτας

Εικόνα 5.15: PCB Layout αρχικής πλακέτας

Εικόνα 5.16: 3D View αρχικής πλακέτας

Εικόνα 6.1: Login

Εικόνα 6.2: Εισαγωγή στοιχείων

Εικόνα 6.3: Δημιουργία χρήστη

Εικόνα 6.4: Αρχική Dashboard

Εικόνα 6.5: Εμφάνιση επιλεγμένων στοιχείων

Εικόνα 6.6: Εμφάνιση μετρήσεων BME688 με CLASS = Air

Εικόνα 6.7: Εμφάνιση μετρήσεων BME688 και IAQ

Εικόνα 6.8: Εμφάνιση μετρήσεων BME688 με CLASS = Ajax

Εικόνα 6.9: Εμφάνιση μετρήσεων BME688 και αύξηση IAQ

Εικόνα 6.10: Εμφάνιση μετρήσεων SEN0460

Εικόνα 6.11: Ιστορικό μετρήσεων BME688

Εικόνα 6.12: Ιστορικό μετρήσεων SEN0460

Εικόνα 6.13: Γράφημα θερμοκρασίας

Εικόνα 6.14: Γράφημα υγρασίας και πίεσης

Εικόνα 6.15: Γράφημα IAQ και ισοδύναμο CO₂

Εικόνα 6.16: Γράφημα PM_{2,5}

Εικόνα 6.17: Εμφάνιση καιρού στη τοπική περιοχή

Εικόνα 6.18: Επαλήθευση από το OpenWeatherMap

Εικόνα 6.19: Πίνακες της βάσης δεδομένων

Εικόνα 6.20: Πίνακας του sen0460_data

Εικόνα 6.21: Πίνακας του sensor_data

Εικόνα 6.22: Πίνακας του users

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Συγκριτικός Πίνακας Ορίων PM2.5 και PM10 (WHO, ΕΕ, ΗΠΑ)

Πίνακας 3.1: Διεθνή όρια ποιότητας αέρα για PM2.5 (WHO, ΕΕ, ΗΠΑ κ.ά.)

Πίνακας 3.2: Συσχέτιση δείκτη ποιότητας αέρα (AQI) με συγκεντρώσεις PM1.0 και PM2.5

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Σκοπός και στόχοι της εργασίας

Η ποιότητα του αέρα είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν άμεσα την ανθρώπινη υγεία, την ευεξία αλλά και την απόδοση σε χώρους εργασίας ή νοσηλείας. Το να διασφαλίσουμε την ποιότητα του αέρα καθαρή αποτελεί κρίσιμο γεγονός σε περιβάλλοντα όπως τα νοσοκομεία και οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις, όπου οι ατμοσφαιρικές συνθήκες τείνουν έχουν σημαντικές επιπτώσεις τόσο στην αποτελεσματικότητα των εργασιακών διαδικασιών αλλά κυρίως στην υγεία των ανθρώπων.

Στην παρακάτω διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η σχεδίαση και η υλοποίηση μιας ολοκληρωμένης συσκευής παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, με κύρια βάση της τον μικροελεγκτή ESP32. Στη συσκευή αξιοποιούνται δύο εξειδικευμένους αισθητήρες. Ο πρώτος είναι ο SEN0460, ο οποίος ανιχνεύει τα αιωρούμενα σωματιδίων, όπως PM1.0, PM2.5 και PM10. Ο δεύτερος είναι επηρεασμένος από το ολοκληρωμένο kit της Bosch και είναι ο BME688, επιτρέπει την ανίχνευση αερίων, μέτρηση θερμοκρασίας, υγρασίας και πίεσης. Τα δεδομένα συλλέγονται και αποστέλλονται σε τοπικό server υλοποιημένο σε Python Flask, ενώ η αποθήκευση γίνεται σε βάση δεδομένων MySQL μέσω XAMPP, εξασφαλίζοντας την ασφαλή διαχείριση και την εύκολη πρόσβαση στις μετρήσεις.

Ένας από τους βασικότερους στόχους της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός αξιόπιστου και ταυτόχρονα χαμηλού κόστους συστήματος παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πραγματικές συνθήκες αλλά και σε διαφορετικές περιπτώσεις. Παράλληλα, έχει γίνει ενσωμάτωση των αισθητήρων σε προσαρμοσμένη πλακέτα PCB, καθώς και η δημιουργία μίας web εφαρμογής που θα επιτρέπει μια ασφαλή πρόσβαση στα δεδομένα μέσω αυθεντικοποίησης χρηστών και η δυνατότητα real-time παρακολούθησης. Τέλος, αναφέρουμε πως έγινε ενσωμάτωση πρόσθετων πληροφοριών, όπως τα τοπικά δεδομένα καιρού που αντλούνται από το OpenWeatherMap, ώστε να υπάρχει πλήρης εικόνα για τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Με την υλοποίηση αυτής της συσκευής επιδιώκεται να δοθεί μια πρακτική και αποδοτική λύση για τη βελτίωση της ασφάλειας και της υγείας σε χώρους όπου η ποιότητα του αέρα έχει καθοριστική σημασία.

1.2 Σημασία της ποιότητας του αέρα σε νοσοκομεία και βιομηχανικές εγκαταστάσεις

Η ανθρώπινη υγεία επηρεάζεται συχνά σε μεγαλύτερο βαθμό από την ποιότητα του αέρα σε εσωτερικούς χώρους, σε σύγκριση με την ατμοσφαιρική ρύπανση που υπάρχει σε εξωτερικούς χώρους. Ένας από τους βασικότερους λόγους είναι τα κλειστά περιβάλλοντα όπου παίρνουν το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας τους οι άνθρωποι, με αποτέλεσμα να έρχονται σε επαφή με υψηλά επίπεδα από συγκεντρώσεις σωματιδίων και αερίων. Το γεγονός αυτό προκαλεί ο ανεπαρκής αερισμός, η χρήση χημικών προϊόντων σε βιομηχανίες και άλλες διεργασίες με επακόλουθο να απελευθερώνονται ριπή στην ατμόσφαιρα του εσωτερικού χώρου.

1.2.1 Σημασία στα νοσοκομεία

Η ποιότητα του αέρα στα νοσοκομεία παίζει σημαντικό ρόλο για την ασφάλεια τόσο των ασθενών όσο και του ιατρικού προσωπικού. Τα μικροσωματίδια που παρουσιάζονται στην ατμόσφαιρα αλλά και τα τοξικά αέρια, μπορούν να επιδεινώσουν την υγεία των ασθενών με αναπνευστικά προβλήματα ενώ ταυτόχρονα δημιουργούνται κίνδυνοι μόλυνσης ή επιπλοκών από τα αυξημένα επίπεδα πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) ή αμμωνίας που παρατηρούνται [7]. Ιδιαίτερη έμφαση δίνουν στη διατήρηση αυστηρών προδιαγραφών καθαρότητας σε χώρους όπως οι Μονάδες Εντατικής Θεραπείας

(ΜΕΘ) και τα χειρουργεία [11]. Η συνεχής παρακολούθηση του αέρα σε κρίσιμους χώρους έχει ως αποτέλεσμα τον έγκαιρο εντοπισμό πιθανών ρύπων, την μείωση του κινδύνου επιμόλυνσης και την διασφάλιση υψηλής ποιότητας συνθηκών νοσηλείας [14].

1.2.2 Σημασία στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις

Στις βιομηχανίες, η παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα είναι εξίσου κρίσιμη, καθώς οι εργαζόμενοι βρίσκονται εκτεθειμένοι σε σωματίδια σκόνης, καπνούς ή επικίνδυνα αέρια. Σε τομείς που είναι συσχετισμένοι με την παραγωγή χημικών, τροφίμων ή φαρμάκων, η συνεχής καταγραφή και έλεγχος των συγκεντρώσεων ρύπων εξασφαλίζει όχι μόνο την υγεία και την ασφάλεια των εργαζομένων αλλά και την ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος [15].

Παράλληλα, η υπάρχει ένα σύστημα όπου μπορεί να ειδοποιήσει έγκαιρα για πιθανή υπέρβαση των επιτρεπτών ορίων μπορεί να αποτρέψει σοβαρά εργατικά ατυχήματα. Επιπλέον, βοηθάει τις επιχειρήσεις να συμμορφώνονται με τα διεθνή πρότυπα ασφάλειας, μειώνοντας τον κίνδυνο παραβάσεων και ενισχύοντας τη συνολική αξιοπιστία τους [19].

1.3 Αντικείμενο και συνεισφορά της εργασίας

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση και υλοποίηση μιας ολοκληρωμένης συσκευής παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα. Η συσκευή αυτή βασίζεται στον μικροελεγκτή ESP32 και αξιοποιεί δύο αισθητήρες: τον SEN0460, για τη μέτρηση αιωρούμενων σωματιδίων, και τον BME688, για την παρακολούθηση αερίων, θερμοκρασίας, υγρασίας και πίεσης. Όλα τα υποσυστήματα ενσωματώνονται σε προσαρμοσμένη πλακέτα PCB, ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη αξιοπιστία και λειτουργική αυτονομία.

Η συνεισφορά της εργασίας εντοπίζεται σε πολλαπλά επίπεδα:

- Ανάπτυξη πρωτότυπης πλακέτας με ενσωματωμένους αισθητήρες.
- Ενσωμάτωση τεχνολογιών IoT για τη συλλογή, επεξεργασία και μετάδοση δεδομένων.
- Δημιουργία ασφαλούς web εφαρμογής για την παρακολούθηση των μετρήσεων, με δυνατότητα αυθεντικοποίησης χρηστών.
- Παροχή ενός συστήματος χαμηλού κόστους σε σύγκριση με υπάρχοντα εμπορικά προϊόντα, το οποίο μπορεί να προσαρμοστεί σε διαφορετικά περιβάλλοντα, όπως νοσοκομειακά ή βιομηχανικά.

Συνολικά, η εργασία δεν περιορίζεται μόνο στη θεωρητική μελέτη της ποιότητας αέρα αλλά προτείνει και μια ολοκληρωμένη τεχνολογική λύση, ικανή να εφαρμοστεί σε πραγματικά σενάρια χρήσης.

1.4 Δομή της εργασίας

Για την καλύτερη κατανόηση και παρουσίαση του περιεχομένου, η εργασία χωρίζεται σε έξι κεφάλαια, το καθένα με διακριτό αντικείμενο και σκοπό:

- **Κεφάλαιο 1 (Εισαγωγή):** Παρουσιάζονται το αντικείμενο, οι στόχοι και η σημασία της ποιότητας του αέρα σε εσωτερικούς χώρους.
- **Κεφάλαιο 2 (Θεωρητικό Υπόβαθρο):** Αναλύονται βασικές έννοιες σχετικές με την ποιότητα του αέρα, τα είδη ρύπων και τα ισχύοντα πρότυπα.

- **Κεφάλαιο 3 (Χρησιμοποιούμενες Τεχνολογίες και Εργαλεία):** Παρουσιάζονται οι μικροελεγκτές, οι αισθητήρες, τα εργαλεία ανάπτυξης και οι τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν.
- **Κεφάλαιο 4 (Σχεδίαση και Υλοποίηση Συστήματος):** Περιγράφεται η αρχιτεκτονική του συστήματος, η συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων, καθώς και η ανάπτυξη της web εφαρμογής.
- **Κεφάλαιο 5 (Δοκιμές και Αποτελέσματα):** Παρουσιάζονται οι μετρήσεις από τα πειράματα και γίνεται αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος.
- **Κεφάλαιο 6 (Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία):** Συνοψίζονται τα αποτελέσματα, γίνεται σύγκριση με παρόμοια προϊόντα και προτείνονται πιθανές επεκτάσεις της εργασίας.

Με αυτόν τον τρόπο ο αναγνώστης αποκτά μια σαφή εικόνα της δομής και της πορείας που ακολουθεί η εργασία, από τη θεωρητική ανάλυση έως την υλοποίηση και τα τελικά συμπεράσματα.

Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Η έννοια της ποιότητας του αέρα

Η ανθρώπινη υγεία και ασφάλεια μπορεί να επηρεαστεί από έναν πολυπαραγοντικό δείκτη, ο οποίος είναι η ποιότητα του αέρα. Με λίγα λόγια περιγράφει τον βαθμό καθαριότητας της ατμόσφαιρας σε ένα δεδομένο χώρο και τις επιπτώσεις που μπορεί να έχεις τον άνθρωπο. Η εξωτερική ατμοσφαιρική ρύπανση αντίθετα, Επηρεάζεται κυρίως από την κυκλοφορία, τις βιομηχανικές δραστηριότητες και φυσικές διεργασίες όπου αυτοί οι διαφορετικοί παράγοντες καθορίζουν την ποιότητα του εσωτερικού αέρα. Ανάμεσά τους περιλαμβάνονται η ανθρώπινη παρουσία, οι βιομηχανικές διεργασίες, τα οικοδομικά υλικά, η χρήση απολυμαντικών, καθώς και η ανεπαρκής ανανέωση του αέρα.

Μέσα από συγκεκριμένους παράγοντες πραγματοποιείται η αξιολόγηση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα, πιο συγκεκριμένα:

- η συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων,
- τα επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα (CO₂),
- οι συγκεντρώσεις πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs),
- η θερμοκρασία,
- η υγρασία,
- καθώς και η παρουσία άλλων επικίνδυνων αερίων, όπως τα οξείδια του αζώτου (NO_x), το βενζόλιο ή η αμμωνία.

Είναι πολύ σημαντική η παρακολούθηση αυτών των παραμέτρων, διότι είναι γεγονός πως έως και το 90% του χρόνου τους οι άνθρωποι το περνούν σε εσωτερικούς χώρους. Ο πονοκέφαλος η κόπωση και ο ερεθισμός των ματιών είναι μερικά παραδείγματα βραχυπρόθεσμων επιπτώσεων που μπορεί να οδηγήσει η κακή ποιότητα του αέρα. Μέσα σε αυτά και σοβαρότερες μακροπρόθεσμες ασθένειες όπως οι χρόνιες αναπνευστικές παθήσεις, τα καρδιαγγειακά προβλήματα και ακόμη και οι καρκινογενέσεις.

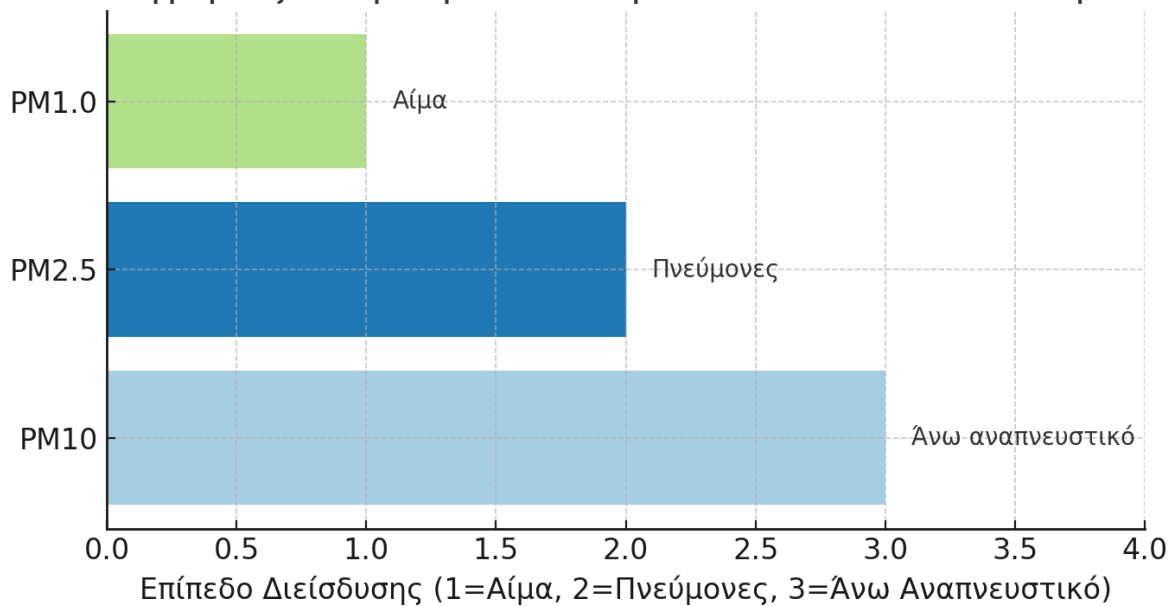
2.1.1 Σωματίδια PM (PM1.0, PM2.5, PM10)

Ένας από τους σημαντικότερους δείκτες της ποιότητας του αέρα είναι τα αιωρούμενα σωματίδια (Particulate Matter – PM) [5]. Διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τη διάμετρό τους, καθώς το μέγεθος καθορίζει και το βάθος διείσδυσης στον ανθρώπινο οργανισμό [6]:

- **PM10:** σωματίδια με διάμετρο έως 10 μm, τα οποία μπορούν να εισχωρήσουν στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα.
- **PM2.5:** σωματίδια με διάμετρο έως 2,5 μm, που φτάνουν βαθύτερα στους πνεύμονες.
- **PM1.0:** σωματίδια με διάμετρο έως 1 μm, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να περάσουν ακόμη και στην κυκλοφορία του αίματος.

Πολλά σοβαρά προβλήματα υγείας συσχετίζονται με την συνεχή έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων, όπως άσθμα, βρογχίτιδα, καρδιοπάθειες και σε ορισμένες περιπτώσεις με καρκινογενέσεις [8]. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO) [7], για τον λόγο αυτό έχει θεσπίσει αυστηρά όρια για τις συγκεντρώσεις PM2.5 και PM10, υπογραμμίζοντας τον κρίσιμο ρόλο τους στην προστασία της ανθρώπινης υγείας [15].

Κατηγορίες Αιωρούμενων Σωματιδίων και Διείσδυσή τους



Εικόνα 2.1: Κατηγορίες Αιωρούμενων Σωματιδίων (PM1.0, PM2.5, PM10)

2.1.2 Αέρια ρύποι (VOC, CO₂eq, NO_x, βενζόλιο, αμμωνία)

Σημαντικό ρόλο στην ποιότητα του αέρα εκτός από τα αιωρούμενα σωματίδια παίζουν και οι αέριοι ρύποι. Ιδιαίτερα σε χώρους νοσηλείας ή βιομηχανικής παραγωγής η παρουσία τους επηρεάζει άμεσα την υγεία των ανθρώπων και δημιουργεί συνθήκες υψηλού κινδύνου, ειδικότερα σε εσωτερικούς χώρους [16]. Οι κυριότεροι αέριοι ρύποι είναι οι εξής:

- **Πτητικές Οργανικές Ενώσεις (VOCs):** Χημικές ενώσεις που εξατμίζονται εύκολα σε θερμοκρασία δωματίου. Προέρχονται από καθαριστικά, χρώματα, βιομηχανικές διεργασίες και άλλα υλικά [17].
- **Διοξείδιο του άνθρακα (CO₂):** Αν και δεν είναι τοξικό σε χαμηλές συγκεντρώσεις, σε επίπεδα άνω των 1000 ppm προκαλεί κόπωση, μειωμένη συγκέντρωση και πονοκέφαλο.
- **Οξείδια του αζώτου (NO_x):** Παράγονται κυρίως από καύση καυσίμων και είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα όταν συσσωρεύονται σε κλειστούς χώρους.
- **Βενζόλιο:** Ισχυρά καρκινογόνος ρύπος, που εντοπίζεται σε εκπομπές βιομηχανιών αλλά και στον καπνό του τσιγάρου.
- **Αμμωνία (NH₃):** Παράγεται σε βιομηχανικές διεργασίες και σε χώρους όπως τα νοσοκομεία, όπου χρησιμοποιούνται απολυμαντικά. Σε υψηλές συγκεντρώσεις μπορεί να προκαλέσει ερεθισμούς ή ακόμη και δηλητηρίαση.

Είναι απαραίτητη η ανίχνευση και η συνεχόμενη παρακολούθηση αυτών των αερίων και για την διασφάλιση μιας ασφαλούς συνθήκης σε νοσοκομεία και βιομηχανικές εγκαταστάσεις, με αποτέλεσμα να συμβάλλει στην προστασία της υγείας και στην αποφυγή σοβαρών κινδύνων [18].

2.1.3 Δείκτες IAQ και AQI

Για να μετρήσουμε ποσοτικά και να έχουμε μία αντικειμενική αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα χρησιμοποιούμε τους διεθνώς καθιερωμένους δείκτες, αυτοί μας επιτρέπουν να κατανοήσουμε πιο εύκολα την κατάσταση του αέρα και να την συγκρίνουμε με τα πρότυπα υγείας [6]. Οι πιο σημαντικοί δείκτες είναι οι εξής:

- **IAQ (Indoor Air Quality):** Δείκτης που αφορά αποκλειστικά την ποιότητα του εσωτερικού αέρα. Υπολογίζεται με βάση τη συγκέντρωση ρύπων, αλλά και παραμέτρων όπως η θερμοκρασία και η υγρασία, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη εικόνα των συνθηκών σε κλειστούς χώρους [12].
- **AQI (Air Quality Index):** Δείκτης που παρέχει μια συνολική εκτίμηση της ποιότητας του αέρα, ταξινομώντας τον σε κατηγορίες όπως «καλός», «μέτριος» ή «ανθυγιεινός». Είναι ευρέως χρησιμοποιούμενος τόσο για εσωτερικούς όσο και για εξωτερικούς χώρους [6].

Η χρήση των δεικτών IAQ και AQI διευκολύνει την ερμηνεία των μετρήσεων από εξειδικευμένα όργανα, καθώς μεταφράζει τα αριθμητικά δεδομένα σε πρακτικές κατηγορίες. Με αυτόν τον τρόπο, οι υπεύθυνοι φορείς ή οι χρήστες μπορούν να λάβουν άμεσα τα απαραίτητα μέτρα για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα [20].



Εικόνα 2.2: Κλίμακα Δείκτη AQI με Χρωματική Κωδικοποίηση

2.2 Νομοθεσία και πρότυπα για την ποιότητα του αέρα σε εσωτερικούς χώρους

Από την Διεθνή και Ευρωπαϊκή νομοθεσία καθορίζονται κάποια συγκεκριμένα όρια για τις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων και των αερίων ρύπων, όπου έχουν ως στόχο να προστατευτεί η δημόσια υγεία [8]. Έχουν εκδοθεί κάποιες βασικές οδηγίες από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO) όπου αφορούν τις μέγιστες επιτρεπτές συγκεντρώσεις για ρύπους όπως τα PM_{2.5}, PM₁₀, το βενζόλιο και το διοξείδιο του αζώτου (NO₂), με αποτέλεσμα να αναγνωρίζεται ο κρίσιμος ρόλος τους στην εκδήλωση αναπνευστικών και καρδιαγγειακών παθήσεων [19].

Σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης, η οδηγία 2008/50/EK θέτει όρια για τα αιωρούμενα σωματίδια και για βασικά αέρια, θεσπίζοντας ένα κοινό πλαίσιο συμμόρφωσης για όλα τα κράτη-μέλη [7]. Παράλληλα, έχει αναπτυχθεί σύστημα αξιολόγησης από τις χώρες όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τον δείκτη AQI (Air Quality Index) που εφαρμόζεται από την EPA (Environmental Protection Agency) [14].

Σε εσωτερικούς χώρους, και ειδικότερα σε περιβάλλοντα όπως τα νοσοκομεία ή οι βιομηχανίες υψηλής τεχνολογίας, ισχύουν ακόμη αυστηρότερες απαιτήσεις. Ενδεικτικά παραδείγματα είναι τα εξής:

- Στα χειρουργεία απαιτείται αέρας με ελάχιστη παρουσία μικροσωματιδίων, καθώς και αυστηρός έλεγχος της θερμοκρασίας και της υγρασίας.
- Στη βιομηχανία τροφίμων και φαρμάκων, η συμμόρφωση με πρότυπα όπως το ISO 14644 για τους «καθαρούς χώρους» είναι απαραίτητη, προκειμένου να διασφαλίζεται η ποιότητα και η ασφάλεια των προϊόντων.

Βασική προϋπόθεση τόσο για την ασφάλεια των εργαζομένων και των ασθενών και για την συμμόρφωση των οργανισμών με τα διεθνή κριτήρια ποιότητας και ασφάλειας αποτελεί η τήρηση των προτύπων αυτών [15].

Οργανισμός	PM2.5 Ετήσιο ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2.5 24ωρο ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10 Ετήσιο ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10 24ωρο ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
WHO	10	25	20	50
Ευρωπαϊκή Ένωση	25	- (δεν ορίζεται)	40	50
ΗΠΑ (EPA)	15	35	- (δεν ορίζεται)	150

Πίνακας 2.1: Συγκριτικός Πίνακας Ορίων PM2.5 και PM10 (WHO, ΕΕ, ΗΠΑ)

2.3 Αισθητήρες ποιότητας αέρα – αρχές λειτουργίας και τεχνολογίες

Υπάρχουν διαφορετικές αρχές λειτουργίας που αναπτύχθηκαν οι αισθητήρες ποιότητας αέρα. Η ακρίβεια και το κόστος μέτρησης καθορίζεται από την τεχνολογία που χρησιμοποιείται, ενώ παράλληλα η επιλογή της εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής [1]. Οι κυριότερες κατηγορίες αισθητήρων είναι οι εξής:

- **Οπτικοί αισθητήρες σωματιδίων (laser scattering):** Βασίζονται στη διάχυση φωτός που προκαλούν τα σωματίδια όταν διαπερνώνται από δέσμη laser. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο SEN0460, ο οποίος μετρά τη συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων σε πραγματικό χρόνο [5].
- **Ημιαγωγάιμοι αισθητήρες αερίων:** Χρησιμοποιούν μια μικρο-θερμαινόμενη επιφάνεια ευαίσθητη σε αέρια, η οποία μεταβάλλει την ηλεκτρική της αντίσταση όταν έρχεται σε επαφή με ρύπους. Ένας χαρακτηριστικός αισθητήρας αυτής της κατηγορίας είναι ο BME688 της Bosch.
- **Αισθητήρες υπέρυθρης απορρόφησης (NDIR):** Βασίζονται στη μέτρηση της απορρόφησης υπέρυθρης ακτινοβολίας από το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και θεωρούνται ιδιαίτερα αξιόπιστοι για τον συγκεκριμένο ρύπο.
- **Ηλεκτροχημικοί αισθητήρες:** Σχεδιάζονται για την ανίχνευση συγκεκριμένων αερίων σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις, αξιοποιώντας χημικές αντιδράσεις που παράγουν ηλεκτρικό σήμα.

Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας αποτελεί κρίσιμο στάδιο στον σχεδιασμό ενός συστήματος παρακολούθησης ποιότητας αέρα, καθώς επηρεάζει την αξιοπιστία, το ενεργειακό αποτύπωμα και το συνολικό κόστος της λύσης .

2.4 Συστήματα παρακολούθησης ποιότητας αέρα (State of the Art)

Μία πληθώρα συσκευών έχει εμπλουτίσει τα τελευταία χρόνια την αγορά με αποτέλεσμα να προορίζονται για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα. Μερικά από αυτά τα προϊόντα απευθύνονται συνήθως σε οικιακούς χρήστες, ενώ στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις και τα νοσοκομεία εφαρμόζονται πιο εξειδικευμένα συστήματα όπου απαιτούνται αυστηρότερες προδιαγραφές.

Οι συσκευές όπως το Awaair, το AirVisual και το Kaiterra αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα, οι οποίες μας δίνουν βασικές μετρήσεις για αιωρούμενα σωματίδια (PM) και πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs). Παράλληλα, παρέχουν δυνατότητες σύνδεσης σε cloud εφαρμογές, όπου καθιστά εφικτή την απομακρυσμένη παρακολούθηση. Ωστόσο, υπάρχουν και σημαντικά μειονεκτήματα που παρουσιάζονται από τα περισσότερα εμπορικά προϊόντα: μερικά από αυτά είναι ιδιαίτερα ακριβά, ενώ συχνά είναι δύσκολη η παραμετροποίηση ή εκπαίδευση των αισθητήρων σε συγκεκριμένα αέρια [13].

Αυτό το γεγονός προσπαθεί να διαφοροποιήσει η παρούσα εργασία. Δεν βασιζόμαστε σε έτοιμες εμπορικές λύσεις, αντίθετα δίνουμε έμφαση στη δημιουργία custom πλακέτας PCB, στην προσαρμογή του αισθητήρα BME688 με δυνατότητες machine learning μέσω του AI-Studio και στην ενσωμάτωση πολλαπλών αισθητήρων σε ένα ολοκληρωμένο IoT σύστημα. Με τον τρόπο αυτό θέλουμε να πετύχουμε μεγαλύτερη ευελιξία, χαμηλότερο κόστος και δυνατότητα εφαρμογής σε περιβάλλοντα με υψηλές απαιτήσεις, όπως τα νοσοκομεία και οι βιομηχανίες.

2.5 Επίλογος

Το παραπάνω κεφάλαιο έδωσε έμφαση στο θεωρητικό υπόβαθρο που στηρίζει την ανάπτυξη της συσκευής παρακολούθησης ποιότητας του αέρα. Αρχικά αναλύσαμε την έννοια της ποιότητας του αέρα και η σημασία της σε εσωτερικούς χώρους, με στόχο την προσοχή στους δείκτες PM και στους βασικούς αέριους ρύπους, όπως τα VOCs, το CO₂, τα NO_x, το βενζόλιο και η αμμωνία. Στη συνέχεια εξετάσαμε τα διεθνή πρότυπα και τους κανονισμούς που καθορίζουν τα επιτρεπτά όρια για τις συγκεντρώσεις αυτών των ρύπων, τονίζοντας τη σημασία της συμμόρφωσης σε ευαίσθητα περιβάλλοντα, όπως τα νοσοκομεία και οι βιομηχανίες.

Επιπλέον, κάναμε αναφορά στις βασικές τεχνολογίες ανίχνευσης και στους τύπους αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση σωματιδίων και αερίων, ενώ παρουσιάσαμε και ορισμένα σύγχρονα εμπορικά συστήματα παρακολούθησης. Η ανάλυση αυτή ανέδειξε τόσο τις δυνατότητες όσο και τους περιορισμούς των υπαρχουσών λύσεων, καταδεικνύοντας την ανάγκη για πιο ευέλικτες και οικονομικές προσεγγίσεις.

Η θεωρητική βάση που αναπτύσαμε στο κεφάλαιο αυτό θέτει τα θεμέλια για την κατανόηση των τεχνολογιών και των εργαλείων που αξιοποιήσαμε στην παρακάτω εργασία. Τα ζητήματα αυτά θα παρουσιαστούν αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 3ο: Χρησιμοποιούμενες Τεχνολογίες και Εργαλεία

3.1 Μικροελεγκτής ESP32

Ο βασικότερος μικροελεγκτής της παρούσας υλοποίησης αποτελείται από τον ESP32 και είναι υπεύθυνος για τον συντονισμό και τη διαχείριση όλων των επιμέρους υποσυστημάτων. Πρόκειται για μια ισχυρή πλατφόρμα που συνδυάζει χαμηλό κόστος, υψηλή επεξεργαστική ισχύ και ενσωματωμένες δυνατότητες ασύρματης επικοινωνίας. Μπορεί να υποστηρίξει πλήθος αισθητήρων και πρωτοκόλλων επικοινωνίας, χάρη στη μεγάλη ευελιξία του ενώ παράλληλα επιτρέπει την απευθείας σύνδεση με δίκτυα Wi-Fi για αποστολή δεδομένων είτε σε απομακρυσμένους servers είτε σε τοπικές βάσεις δεδομένων.

Η επιλογή του ESP32 για την παρούσα εργασία δεν ήταν τυχαία. Με βάση τις δυνατότητες του είναι βασισμένη στην αξιοπιστία του σε απαιτητικές εφαρμογές IoT, στη συμβατότητά του με το Arduino IDE, που διευκολύνει την ταχεία ανάπτυξη λογισμικού, καθώς και στη μεγάλη διεθνή κοινότητα υποστήριξης που διαθέτει.

Συνολικά, μπορούμε να πούμε πως λειτουργεί ως ο «εγκέφαλος» της συσκευής παρακολούθησης ποιότητας της ατμόσφαιρας, ενοποιώντας την επικοινωνία μεταξύ αισθητήρων, συστήματος αποθήκευσης και διαδικτυακής εφαρμογής, προσφέροντας μια σταθερή και αξιόπιστη βάση για την ολοκληρωμένη λειτουργία της πλατφόρμας.

3.1.1 Χαρακτηριστικά και δυνατότητες

Ένας από τους πιο δημοφιλείς μικροελεγκτές για εφαρμογές Internet of Things (IoT), συγκαταλέγεται ο ESP32. Χάρη στον συνδυασμό υψηλών επιδόσεων και ενσωματωμένων δυνατοτήτων συνδεσιμότητας, κατακτά τις πρώτες θέσεις στο τομέα αυτό. Ενσωματώνει έναν διπύρηνιο επεξεργαστή Xtensa LX6, ο οποίος μπορεί να λειτουργεί σε συχνότητες έως και 240 MHz, ενώ διαθέτει 520 KB μνήμη RAM με δυνατότητα επέκτασης μέσω εξωτερικής μνήμης Flash.

Ένα από τα κυριότερα πλεονεκτήματά του είναι η ενσωματωμένη υποστήριξη Wi-Fi (802.11 b/g/n) και Bluetooth (τόσο κλασικό όσο και BLE), που επιτρέπει την άμεση διασύνδεση με δίκτυα και άλλες συσκευές χωρίς την ανάγκη πρόσθετων modules.

Παράλληλα, ο ESP32 υποστηρίζει πλήθος πρωτοκόλλων επικοινωνίας, όπως UART, SPI, I²C, CAN, PWM και ADC, γεγονός που τον καθιστά ιδανικό για τη σύνδεση με διαφορετικούς αισθητήρες και περιφερειακά. Επιπλέον, διαθέτει ενσωματωμένους αναλογικό-ψηφιακούς μετατροπείς (ADC), καθώς και ψηφιακό-αναλογικούς μετατροπείς (DAC), ενισχύοντας σημαντικά την ευελιξία του σε εφαρμογές μέτρησης και ελέγχου.

Βάση με αυτά τα χαρακτηριστικά, ο ESP32 παρέχει μια ολοκληρωμένη και οικονομικά αποδοτική λύση για πλήθος εφαρμογών IoT, από απλές οικιακές συσκευές μέχρι σύνθετα βιομηχανικά συστήματα παρακολούθησης [1].

3.1.2 Πλεονεκτήματα για εφαρμογές IoT

Σε πολλές εφαρμογές **Internet of Things (IoT)** αξιοποιείται ο ESP32 με αποτέλεσμα να προσφέρει πλήθος πλεονεκτημάτων, γεγονός που τον κάνει έναν από τους πιο διαδεδομένους μικροελεγκτές στον συγκεκριμένο τομέα. Τα βασικότερα από αυτά είναι τα εξής:

- Χαμηλό κόστος σε σχέση με τις δυνατότητες που παρέχει.

- Ενσωματωμένη συνδεσιμότητα Wi-Fi και Bluetooth, χωρίς την ανάγκη πρόσθετων modules.
- Υποστήριξη διαφορετικών περιβαλλόντων προγραμματισμού, όπως το Arduino IDE, η πλατφόρμα ESP-IDF και η MicroPython.
- Μεγάλη κοινότητα χρηστών και εκτενής τεκμηρίωση, που διευκολύνουν την ανάπτυξη και την τεχνική υποστήριξη.
- Δυνατότητες χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας μέσω sleep modes, γεγονός που τον καθιστά ιδανικό και για φορητές συσκευές.

Πέρα από τα παραπάνω, ο μια ακόμη λειτουργία που μπορεί να έχει είναι ως IoT gateway, δηλαδή να συλλέγει δεδομένα από πολλαπλούς αισθητήρες ως κεντρικός κόμβος και να τα προωθεί σε cloud πλατφόρμες ή τοπικούς servers. Με την δυνατότητα αυτή επιτρέπεται η εύκολη κλιμάκωση ενός συστήματος σε δίκτυο πολλών συσκευών, κάτι που είναι ιδιαίτερα κρίσιμο για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, όπως βιομηχανικές εγκαταστάσεις ή νοσοκομεία.

Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας, ο ESP32 χρησιμοποιείται ως ο κεντρικός επεξεργαστής του συστήματος. Δηλαδή, μπορεί να συλλέγει δεδομένα από τους αισθητήρες SEN0460 και BME688, να τα επεξεργάζεται και να τα στέλνει στον server μέσω Wi-Fi. Παράλληλα, υποστηρίζει λειτουργίες όπως καταγραφή σε κάρτα SD, συγχρονισμό πραγματικού χρόνου (RTC) και επικοινωνία με τη βάση δεδομένων, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη πλατφόρμα διαχείρισης δεδομένων ποιότητας αέρα.

3.2 Αισθητήρας σωματιδίων SEN0460 (DFRobot)

Ο αισθητήρας SEN0460 της DFRobot είναι ένας σύγχρονος ψηφιακός αισθητήρας σωματιδίων, έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να μετράει τις συγκεντρώσεις PM1.0, PM2.5 και PM10 στον αέρα. Οι μετρήσεις αυτών των σωματιδίων αποτελούν βασικό δείκτη για την αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα, καθώς έχουν αποδεδειγμένα συσχετιστεί με σοβαρά προβλήματα υγείας, όπως αναπνευστικές και καρδιαγγειακές παθήσεις.

Ο τρόπος λειτουργία του αισθητήρα είναι βασισμένος στη μέθοδο σκέδασης laser (laser scattering), η οποία δίνει την δυνατότητα να ανιχνευθεί η ποσότητα και το μέγεθος των σωματιδίων μέσω της διάχυσης φωτός. Η τεχνολογία αυτή εξασφαλίζει υψηλή ακρίβεια, γρήγορη απόκριση και σταθερή απόδοση ακόμη και σε απαιτητικά περιβάλλοντα.

Είναι αρκετά αξιόπιστος αισθητήρας και το μικρό του μέγεθος βοηθά να ενσωματωθεί τόσο σε φορητές συσκευές (όπως στο συγκεκριμένο project) όσο και σε σταθερές εγκαταστάσεις. Μπορεί να βρει εφαρμογές σε περιβάλλοντα όπως νοσοκομεία, βιομηχανικές μονάδες και οικιακοί χώροι, όπου η συνεχόμενη παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα είναι αρκετά καθοριστικής σημασίας [5].

3.2.1 Περιγραφή, αρχή λειτουργίας και χαρακτηριστικά

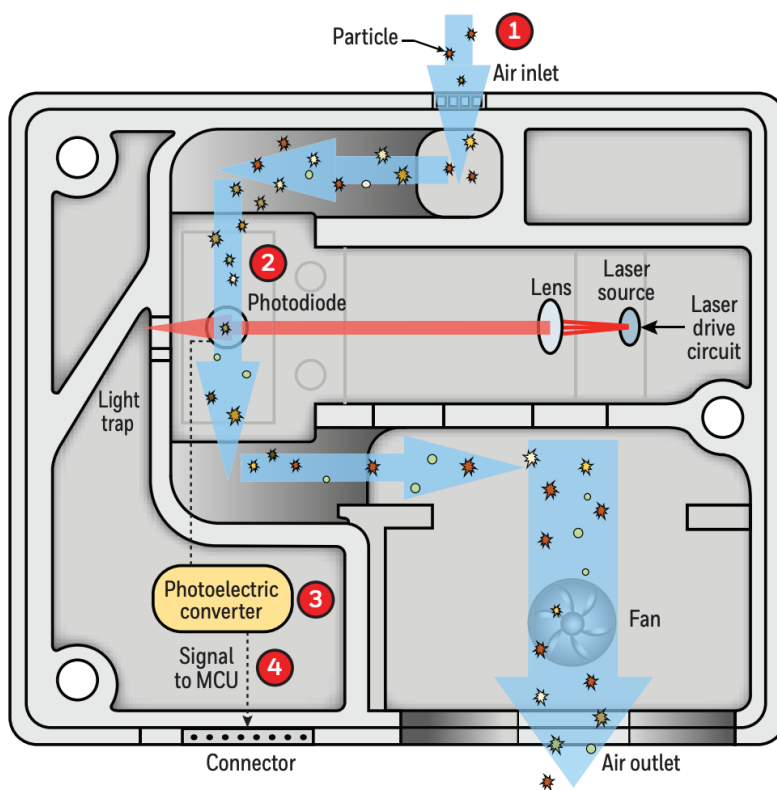
Ο αισθητήρας SEN0460 ανιχνεύει σωματίδια αξιοποιώντας μια δέσμη laser που διέρχεται από τον αέρα. Όταν το φως συναντήσει αιωρούμενα σωματίδια, σκεδάζεται σε διάφορες κατευθύνσεις και καταγράφεται από έναν φωτοανιχνευτή. Στη συνέχεια, ο ενσωματωμένος μικροεπεξεργαστής εφαρμόζει τον αλγόριθμο Mie theory, για να υπολογίσει το μέγεθος και τη συγκέντρωση των σωματιδίων.

Η μέθοδος αυτή δίνει τη δυνατότητα ανίχνευσης ακόμη και πολύ μικρών σωματιδίων, με ελάχιστο ανιχνεύσιμο μέγεθος τα 0.3 μm. Τα σωματίδια αυτού του μεγέθους θεωρούνται τα πλέον επικίνδυνα, καθώς μπορούν να εισχωρήσουν βαθύτερα στο αναπνευστικό σύστημα και να επηρεάσουν την υγεία του ανθρώπου [5].

Τα κύρια χαρακτηριστικά του αισθητήρα συνοψίζονται ως εξής:

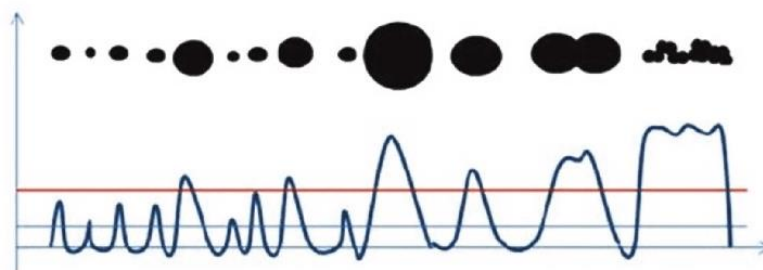
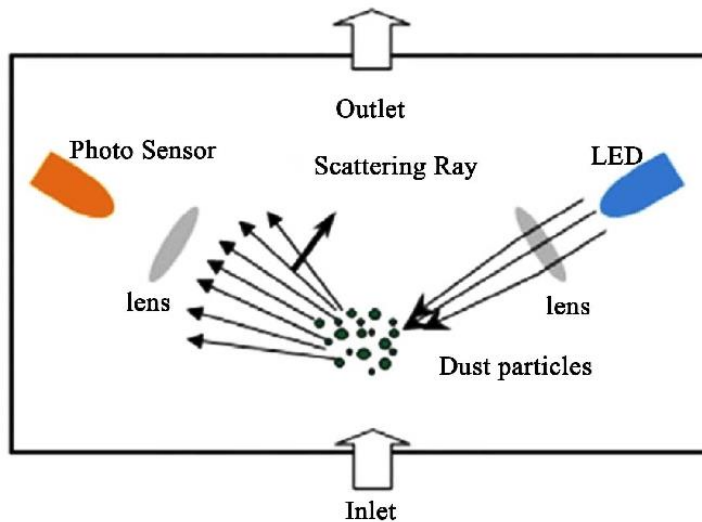
- Υψηλή ακρίβεια με μηδενικό ποσοστό ψευδών συναγερμών.
- Απόκριση σε πραγματικό χρόνο (μικρότερη από 1 δευτερόλεπτο).
- Ανθεκτικότητα σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, χάρη στην εξαπλή θωράκιση.
- Συμπαγής σχεδίαση, με πάχος μόλις 12 mm, κατάλληλη για φορητές εφαρμογές.

Στην Εικόνα 3.1 παρουσιάζεται η βασική αρχή λειτουργίας του αισθητήρα με σκέδαση laser. Η δέσμη laser διέρχεται μέσα από τον θάλαμο μέτρησης, όπου βρίσκονται τα αιωρούμενα σωματίδια. Καθώς αυτά παρεμβάλλονται στη δέσμη, το φως σκεδάζεται προς διάφορες κατευθύνσεις και καταγράφεται από έναν φωτοανιχνευτή, ο οποίος μετατρέπει την ένταση του φωτός σε ηλεκτρικό σήμα για περαιτέρω ανάλυση από τον μικροεπεξεργαστή.



Εικόνα 3.1: Αρχή λειτουργίας PM αισθητήρα με laser scattering (Atmotube schematic)

Η Εικόνα 3.2 αποτυπώνει πιο αναλυτικά το εσωτερικό διάγραμμα λειτουργίας του αισθητήρα. Διακρίνονται η είσοδος και η έξοδος του αέρα, ο θάλαμος μέτρησης όπου διέρχεται η δέσμη laser, καθώς και η φωτοδίοδος που συλλέγει το σκεδαζόμενο φως. Η κατεύθυνση της ροής του αέρα εξασφαλίζει τη συνεχή ανανέωση του δείγματος, γεγονός που επιτρέπει στον αισθητήρα να παρέχει μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 3.2: Διάγραμμα λειτουργίας αισθητήρα σωματιδίων — laser, inlet/outlet αέρα, photodiode

3.2.2 Τεχνικές προδιαγραφές και όρια ποιότητας αέρα

Ο αισθητήρας SEN0460 αποτελείται από ένα σύνολο τεχνικών προδιαγραφών που καθορίζουν τις δυνατότητες και τους περιορισμούς του [6]. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

- **Τάση λειτουργίας:** 3.3–5.0 V
- **Μέγιστη κατανάλωση ρεύματος:** 100 mA
- **Κατανάλωση σε αναμονή:** ≤ 2 mA
- **Διεπαφή επικοινωνίας:** I²C (λογική στάθμη 3.3 V)
- **Εύρος μετρήσεων:**
 - PM1.0: 0–500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
 - PM2.5: 0–500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
 - PM10: 0–1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- **Ακρίβεια:** $\pm 10\%$ (για 100–500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- **Χρόνος απόκρισης:** < 1 s
- **Θερμοκρασία λειτουργίας:** -10 °C έως $+60$ °C
- **Υγρασία λειτουργίας:** 0–95% (χωρίς συμπύκνωση)

- **Διάρκεια ζωής:** ≥ 5 χρόνια

Η δυνατότητα του SEN0460 να μετράει έως και $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ επιτρέπει την παρακολούθηση τόσο κανονικών συνθηκών όσο και εξαιρετικά μολυσμένων περιοχών, όπως βιομηχανικές ζώνες.

Σε διεθνές επίπεδο, έχουν θεσπιστεί συγκεκριμένα όρια για τη συγκέντρωση PM_{2.5}, καθώς θεωρούνται από τα πιο επικίνδυνα αιωρούμενα σωματίδια. Ενδεικτικά:

- **Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO):** $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ετήσιο), $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (24ωρο) [7].
- **Ηνωμένες Πολιτείες (EPA):** $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ετήσιο), $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (24ωρο) [8].
- **Ευρωπαϊκή Ένωση (EE):** $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ετήσιο).

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται συγκριτικά τα διεθνή όρια συγκέντρωσης PM_{2.5}, όπως έχουν καθοριστεί από τους αρμόδιους οργανισμούς [15].

Χώρα/Οργανισμός	Ετήσια μέση συγκέντρωση ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24ωρη μέση συγκέντρωση ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
WHO - Οδηγία	10	25
WHO - Μεταβατικός στόχος 1	35	75
WHO - Μεταβατικός στόχος 2	25	50
WHO - Μεταβατικός στόχος 3	15	37.8
Αυστραλία	8	25
Ηνωμένες Πολιτείες	15	35
Ιαπωνία	15	35
Ευρωπαϊκή Ένωση	25	None
Κίνα	35	75

Πίνακας 3.1: Διεθνή όρια ποιότητας αέρα για PM_{2.5} (WHO, EE, ΗΠΑ κ.ά.)

Επιπλέον, στον Πίνακα 3.2 δίνεται η αντιστοίχιση του Δείκτη Ποιότητας Αέρα (AQI) με τις συγκεντρώσεις PM_{1.0} και PM_{2.5}, ώστε να είναι δυνατή η κατηγοριοποίηση του αέρα σε επίπεδα όπως «εξαιρετική», «καλή», «μέτρια» ή «επικίνδυνη». Με τον τρόπο αυτό, τα μετρούμενα δεδομένα αποκτούν άμεση και πρακτική ερμηνεία για τον χρήστη.

Δείκτης AQI	Επίπεδο ποιότητας αέρα	Μέση συγκέντρωση PM _{1.0} σε 24 ώρες ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Μέση συγκέντρωση PM _{2.5} σε 24 ώρες ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
0~50	Εξαιρετική	0~50	0~35

Δείκτης AQI	Επίπεδο ποιότητας αέρα	Μέση συγκέντρωση PM1.0 σε 24 ώρες ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Μέση συγκέντρωση PM2.5 σε 24 ώρες ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
51~100	Καλή	50~150	36~75
101~150	Ελαφρά ρύπανση	151~250	76~115
151~200	Μέτρια ρύπανση	251~350	116~150
201~300	Σοβαρή ρύπανση	351~420	151~250
>300	Πολύ σοβαρή ρύπανση	421~500	251~250

Πίνακας 3.2: Συσχέτιση δείκτη ποιότητας αέρα (AQI) με συγκεντρώσεις PM1.0 και PM2.5

3.2.3 Εφαρμογές, διασύνδεση και πρωτόκολλο επικοινωνίας

Ο αισθητήρας SEN0460 επικοινωνεί με τον μικροελεγκτή μέσω του πρωτοκόλλου I²C, γεγονός που απλοποιεί σημαντικά τη διασύνδεση με συστήματα. Είναι εύκολο στη χρήση του καθώς και η αξιοπιστία που έχει, συμβάλει στην ευρεία αξιοποίησή του σε διαφορετικά πεδία εφαρμογών [5], όπως:

- Νοσοκομεία: Παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής καθαρότητας σε Μονάδες Εντατικής Θεραπείας (ΜΕΘ) και χειρουργεία.
- Βιομηχανίες: Μέτρηση σωματιδίων που προέρχονται από καύσεις, σκόνη και καπνό σε βιομηχανικές διεργασίες.
- Κατοικίες και γραφεία: Βελτίωση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα μέσω ολοκλήρωσης με συστήματα κλιματισμού και εξαερισμού (HVAC).

Στην Εικόνα 3.3 δίνεται το σχηματικό διάγραμμα του SEN0460, όπως παρέχεται από τη DFRobot. Σε αυτό φαίνονται οι ακροδέκτες του αισθητήρα, η θύρα επικοινωνίας I²C, καθώς και οι τυπικές ηλεκτρικές συνδέσεις που απαιτούνται για την ενσωματωθεί σε μια εφαρμογή με μικροελεγκτή, όπως ο ESP32. Το απλό αυτό layout διευκολύνει τον σχεδιασμό και την ενσωμάτωση του αισθητήρα σε συστήματα μέτρησης ποιότητας αέρα.

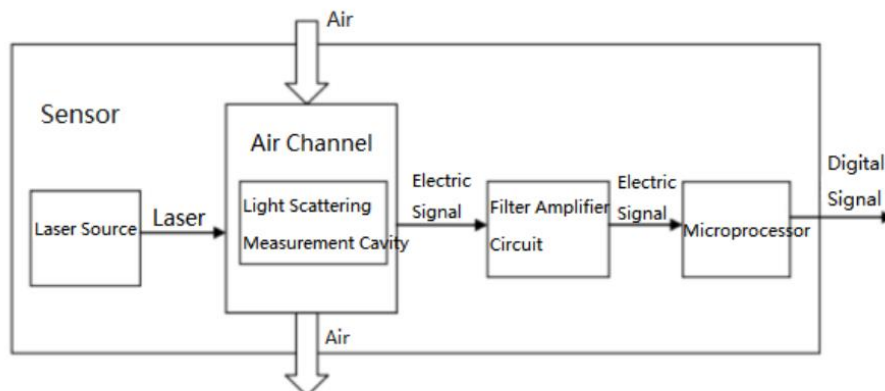
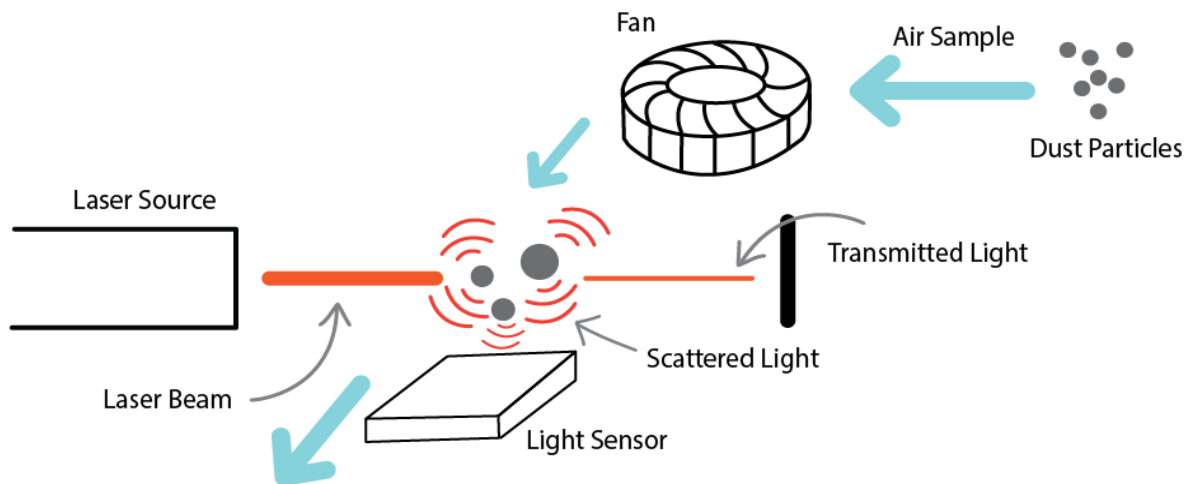


Figure 1 Sensor Functional Block Diagram

Εικόνα 3.3: Σχηματικό διάγραμμα αισθητήρα DFRobot PM2.5

Η Εικόνα 3.4 δείχνει ένα απλοποιημένο σχήμα λειτουργίας, στο οποίο μέσω ενός μικρού ανεμιστήρα (ventilator) οδηγείται ο αέρας στον θάλαμο μέτρησης. Εκεί γίνεται αλληλεπίδραση της δέσμης φωτός με τα σωματίδια και καταγράφεται η σκέδαση από τον φωτοανιχνευτή του αισθητήρα. Αν και πιο αφαιρετικό, το διάγραμμα αυτό διευκολύνει να κατανοήσουμε την βασική αρχή λειτουργία, χωρίς να εστιάζουμε στις λεπτομέρειες του πλήρους σχεδιασμού.



Εικόνα 3.4: Απλούστερο σχήμα λειτουργίας με ventilator / φούσκα αέρα και αισθητήρα φωτός

3.2.4 Βαθμονόμηση, συντήρηση και περιορισμοί

Ο αισθητήρας SEN0460 απαιτεί περιοδική βαθμονόμηση σε σύγκριση με πιστοποιημένα όργανα μέτρησης, για την εξασφάλιση ακριβών μετρήσεων. Ενώ έχει σχεδιαστεί για μακροχρόνια χρήση, η συσσώρευση σκόνης στον θάλαμο μέτρησης μπορεί να επηρεάσει την απόδοσή του, γεγονός που καθιστά απαραίτητο τον τακτικό καθαρισμό του θαλάμου. Με αυτήν την διαδικασία συμβάλλουμε στη διατήρηση της αξιοπιστίας και της σταθερότητας των αποτελεσμάτων σε βάθος χρόνου.

Παράλληλα, στον αισθητήρα παρουσιάζονται ορισμένοι περιορισμοί που πρέπει να τα λάβουμε υπόψη κατά την ενσωμάτωσή του σε συστήματα παρακολούθησης:

- Μετρά αποκλειστικά σωματίδια και όχι αέρια ρύπους, όπως VOCs, CO₂ ή NO_x.
- Επηρεάζεται από ακραία επίπεδα υγρασίας ή από απότομες μεταβολές θερμοκρασίας.
- Χρειάζεται προστασία από κραδασμούς και δονήσεις, οι οποίες ενδέχεται να επηρεάσουν την ακρίβεια των μετρήσεων.

Παρά τους παραπάνω περιορισμούς, ο αισθητήρας παραμένει μια αξιόπιστη και οικονομικά αποδοτική λύση για την παρακολούθηση της ποιότητας της ατμόσφαιρας. Η αποτελεσματικότητά του ενισχύεται ιδιαίτερα όταν συνδυάζεται με αισθητήρες αερίων, προσφέροντας έτσι μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της ατμοσφαιρικής ποιότητας σε εσωτερικούς χώρους [5].

Κεφάλαιο 4ο: Ο Αισθητήρας BME688 και το Οικοσύστημα της Bosch

4.1 Εισαγωγή

Ένας από τους πιο προηγμένους αισθητήρες αερίων παγκόσμιος θεωρείται ο αισθητήρας BME688, καθώς διαθέτει μοναδικά χαρακτηριστικά. Μερικά από αυτά είναι η υψηλή ευαισθησία αλλά και η επιλεκτικότητα απέναντι σε διάφορα αέρια, Ταυτόχρονα υπάρχουν κάποιοι παράμετροι που μπορούν να ρυθμίζονται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Ως επιπλέον δυνατότητες μέτρησης θερμοκρασίας, υγρασίας και βαρομετρικής πίεσης θεωρούνται η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας αλλά και το μικρό φυσικό του μέγεθος.

Από τα βασικότερα χαρακτηριστικά του αισθητήρα, θεωρείται ότι λειτουργεί σαν μια «ψηφιακή μύτη» με κύρια πλεονεκτήματα έναντι της ανθρώπινης: δεν κουράζεται, δίνει αντικειμενικές μετρήσεις, είναι ικανό να ανιχνεύει αέρια που δεν είναι αντιληπτά από τον άνθρωπο και λειτουργεί συνεχώς με ακρίβεια.

Ο συνδυασμός του BME AI-Studio με την πλακέτα BME Board μας δίνει τη δυνατότητα να αξιοποιήσουμε τις προηγμένες δυνατότητες του αισθητήρα BME688 και του λογισμικού BSEC. Μέσα από αυτό το οικοσύστημα γίνεται όλη η διαδικασία και η επικύρωση πιθανών εφαρμογών (use cases) του αισθητήρα αερίων, με αποτέλεσμα να δείξει κατά πόσο μπορούν να αξιοποιηθούν σε κάποιο προϊόν ή εφαρμογή.

Για να γίνει πιο κατανοητή η διεργασία και με λίγα λόγια ο αισθητήρας «εκπαιδεύεται» να ξεχωρίζει διαφορετικές συνθέσεις αερίων μέσα από δεδομένα που έχουν καταγραφεί και επισημανθεί κατάλληλα (ετικέτες).

Η όλη διαδικασία περιλαμβάνει κάποια συγκεκριμένα στάδια:

1. Πρώτα γίνεται η καταγραφή δεδομένων με το BME Board.
2. Στη συνέχεια, τα δεδομένα αυτά εισάγονται στο AI-Studio και επισημαίνονται (labeling).
3. Έπειτα, εκπαιδεύεται ένας αλγόριθμος ώστε να αναγνωρίζει τα διαφορετικά δείγματα (specimens), και ακολουθεί η αξιολόγηση της απόδοσής του.
4. Τέλος, ο αλγόριθμος μπορεί να εξαχθεί σε αρχείο BSEC configuration file, το οποίο είναι έτοιμο για χρήση σε ενσωματωμένες εφαρμογές, και συγκεκριμένα σε ESP32.

Μια ολοκληρωμένη λύση για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα αποτελεί ο αισθητήρας BME688 της Bosch Sensortec, καθώς ενσωματώνει σε μία μόνο συσκευή πολλαπλές μετρητικές μονάδες:

- **Αισθητήρα θερμοκρασίας**
- **Αισθητήρα υγρασίας**
- **Αισθητήρα ατμοσφαιρικής πίεσης**
- **Αισθητήρα αερίων με μικροθερμαντήρα (gas sensor)**

Για να γίνει η διαφοροποίηση των αερίων απαιτείται εκπαίδευση μέσω τεχνητής νοημοσύνης (AI). Επιτυγχάνεται η διαδικασία αυτή μέσω του λογισμικού BME AI-Studio, κατά το οποίο γίνεται η συλλογή των δεδομένων, η ταξινόμηση τους, αλλά και η εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων. Το εκπαιδευμένο μοντέλο ενσωματώνεται στη συσκευή μέσω του λογισμικού BSEC (Bosch Software Environmental Cluster), παρέχοντας στον αισθητήρα τη δυνατότητα να αναγνωρίζει συγκεκριμένες ενώσεις ή οσμές, όπως αμμωνία, καπνό ή ακόμη και καφέ [1], [9].

Συμπερασματικά, κατά αυτόν τον τρόπο, ο BME688 δεν περιορίζεται στις βασικές μετρήσεις, αλλά αποτελεί ένα ευέλικτο εργαλείο για εξειδικευμένες εφαρμογές σε νοσοκομεία, βιομηχανικές εγκαταστάσεις και ερευνητικά έργα.

4.1.1 Μετρούμενα μεγέθη

Με τον αισθητήρα **BME688** μπορούμε να υπολογίσουμε και να εξάγουμε μια σειρά από κρίσιμους δείκτες που σχετίζονται άμεσα με την ποιότητα του αέρα. Οι σημαντικότεροι είναι οι εξής:

- **IAQ (Indoor Air Quality Index):** Δείκτης αυτός εκφράζει τη συνολική ποιότητα του εσωτερικού αέρα. Η διαδικασία γίνεται με βάση τη συγκέντρωση πτητικών οργανικών ενώσεων (VOC) και άλλων περιβαλλοντικών παραμέτρων.
- **CO₂eq (ισοδύναμο διοξειδίου του άνθρακα):** Παρουσιάζεται η εκτίμηση της συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα, υπολογισμένη από τις μετρήσεις VOC. Το χρησιμοποιούμε κυρίως για την αξιολόγηση του επιπέδου εξαερισμού ενός κλειστού χώρου.
- **bVOCeq (ισοδύναμο βασικών πτητικών οργανικών ενώσεων):** Στο κομμάτι αυτό υπολογίζεται η συγκέντρωση βασικών VOC, όπως αλκοόλες, ακετόνη και αμμωνία. Ο δείκτης αυτός σχετίζεται με την παρουσία ρύπων που προέρχονται από χημικά προϊόντα, καπνό, καθαριστικά ή βιομηχανικές διεργασίες.
- **Θερμοκρασία, υγρασία και ατμοσφαιρική πίεση:** Παίρνουμε μετρήσεις υψηλής ακρίβειας, οι οποίες αξιοποιούνται είτε ανεξάρτητα είτε για τη βελτίωση της ακρίβειας των υπολογισμών του δείκτη IAQ.

Η δυνατότητα που έχει ο BME688 να παρέχει ταυτόχρονα φυσικές μετρήσεις (θερμοκρασία, υγρασία, πίεση) και σύνθετους δείκτες (IAQ, CO₂eq, bVOCeq) τον καθιστά ισχυρό εργαλείο για εφαρμογές παρακολούθησης ποιότητας αέρα, τόσο σε ερευνητικά έργα όσο και σε πρακτικές εφαρμογές όπως σε νοσοκομεία ή βιομηχανίες [1].

4.1.2 Πλεονεκτήματα

Ο αισθητήρας BME688 παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα που τον καθιστούν την κατάλληλη επιλογή για εφαρμογές παρακολούθησης ποιότητας αέρα σε σύγκριση με άλλους αισθητήρες. Τα βασικότερα είναι τα εξής:

- **Πολυλειτουργικός:** Ενσωματώνει σε ένα πακέτο τέσσερις διαφορετικούς αισθητήρες (αερίων, θερμοκρασίας, υγρασίας και πίεσης).
- **Υψηλή ευαισθησία:** Ανιχνεύει ένα ευρύ φάσμα αερίων, ακόμη και σε χαμηλές συγκεντρώσεις.
- **Μικρό μέγεθος:** Ιδανικός για ενσωμάτωση σε φορητές και συμπαγείς συσκευές.
- **Δυνατότητα εκπαίδευσης:** Προσαρμόζεται σε συγκεκριμένες εφαρμογές με την χρήση του Bosch AI Studio, όπως αναγνώριση αμμωνίας, καπνού ή Ajax.
- **Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας:** Υπάρχει η δυνατότητα ενσωμάτωσης και σε φορητές εφαρμογές με περιορισμένες ενεργειακές απαιτήσεις, με υψηλή απόδοση, χάρη στους βελτιστοποιημένους κύκλους μέτρησης (Heater Profiles & Duty Cycles).

Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν τον BME688 ιδανικό για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, το οποίο επεκτείνεται από φορητές συσκευές παρακολούθησης μέχρι ολοκληρωμένα IoT συστήματα, ενισχύοντας την αξιοπιστία της παρούσας εργασίας [1], [2].

4.2 Οικοσύστημα λογισμικού Bosch (BSEC, AI-Studio, Νευρωνικά Δίκτυα)

Ο αισθητήρας BME688 συνοδεύεται από το οικοσύστημα λογισμικού που αναπτύχθηκε από τη Bosch Sensortec με στόχο να μας δώσει μια απλοποιημένη και ενισχυμένη διαδικασία χρήσης του αισθητήρα σε πραγματικές εφαρμογές. Η Bosch παρέχει δύο βασικά εργαλεία: το BSEC (Bosch Software Environmental Cluster) και το BME AI-Studio. Λίγα λόγια για το καθένα:

1. Το BSEC, είναι μια βιβλιοθήκη λογισμικού που επιτρέπει την ενσωμάτωση έτοιμων αλγορίθμων σε μικροελεγκτές όπως ο ESP32 στη συγκεκριμένη περίπτωση, προσφέροντας άμεσα υπολογισμένες μετρήσεις όπως IAQ (Δείκτης Ποιότητας Αέρα), CO₂eq και bVOCeq.
2. Το AI-Studio, παρέχει ένα περιβάλλον ανάπτυξης και εκπαίδευσης που επιτρέπει στον χρήστη να δημιουργήσει εξειδικευμένα νευρωνικά δίκτυα για την ανίχνευση συγκεκριμένων αερίων ή οσμών, τα οποία στη συνέχεια μπορούν να εξαχθούν σε μορφή αρχείων διαμόρφωσης (BSEC configuration) και να χρησιμοποιηθούν απευθείας με το BSEC.

Με αυτόν τον τρόπο, το οικοσύστημα Bosch δημιουργεί μια πλήρη «γέφυρα» ανάμεσα στην εργαστηριακή έρευνα και την ενσωμάτωση σε προϊόντα [2].

4.2.1 BSEC (Bosch Software Environmental Cluster)

Ο πυρήνας της ενσωμάτωσης του αισθητήρα BME688 σε πραγματικές εφαρμογές αποτελείται από την βιβλιοθήκη BSEC. Είναι σχεδιασμένος έτσι να μεταφράζει τις ακατέργαστες μετρήσεις του αισθητήρα (Raw Data) σε κατανοητές και άμεσα αξιοποιήσιμες πληροφορίες.

Το BSEC παράγει δείκτες όπως ο IAQ (Δείκτης Ποιότητας Αέρα), το CO₂eq (ισοδύναμο διοξειδίου του άνθρακα) και το bVOCeq (ισοδύναμο βασικών πτητικών οργανικών ενώσεων) μέσα από προηγμένους αλγορίθμους φιλτραρίσματος και ανάλυσης σήματος. Παράλληλα, προσφέρει και τις βασικές μετρήσεις θερμοκρασίας, υγρασίας, πίεσης και αντίστασης αερίου [9].

Η βιβλιοθήκη λειτουργεί σε μικροελεγκτές χαμηλής ισχύος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πραγματικό χρόνο. Απαραίτητο στοιχείο για τη λειτουργία της είναι το αρχείο διαμόρφωσης BSEC, το οποίο περιέχει τις παραμέτρους ενός εκπαιδευμένου νευρωνικού δικτύου. Αυτό το αρχείο το δημιουργούμε στο περιβάλλον του AI-Studio και καθορίζουμε τον τρόπο με τον οποίο το BSEC θα ερμηνεύσει τα δεδομένα.

Με αυτόν τον τρόπο, το BSEC λειτουργεί ως «μεσολαβητής» ανάμεσα στον αισθητήρα και την εφαρμογή, επιτρέποντας την ομαλή ενσωμάτωση της τεχνολογίας σε προϊόντα [10].

4.2.2 BME AI-Studio

Η δημιουργία εξειδικευμένων αλγορίθμων για τον αισθητήρα BME688 γίνεται εφικτή από το εργαλείο BME AI-Studio. Στο περιβάλλον αυτό, οι χρήστες εισάγουν τα δεδομένα που έχουν καταγραφεί με την πλακέτα ανάπτυξης, τα επισημάνουν με κατάλληλες ετικέτες και τα χρησιμοποιούν για την εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων.

Η εκπαίδευση γίνεται για κάθε συνδυασμό Heater Profile (HP) και Run Duty Cycle (RDC), ώστε να αξιολογηθεί η επίδοση του αισθητήρα σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Το AI-Studio χωρίζει αυτόματα τα δεδομένα σε μοντέλα εκπαίδευσης και επικύρωσης, δίνοντας στον χρήστη τη δυνατότητα να ελέγξει την ακρίβεια και την αξιοπιστία του μοντέλου.

Στο τέλος, το εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο εξάγεται ως αρχείο διαμόρφωσης BSEC και χρησιμοποιείται απευθείας στον ESP32. Το AI-Studio δεν περιορίζεται σε μια απλή οπτικοποίηση των

δεδομένων, αλλά μπορεί να μετατραπεί σε εργαλείο δημιουργίας «ψηφιακών μυτών», ικανών να ανιχνεύουν καταστάσεις με βάση τις ανάγκες του εκάστοτε έργου [2].

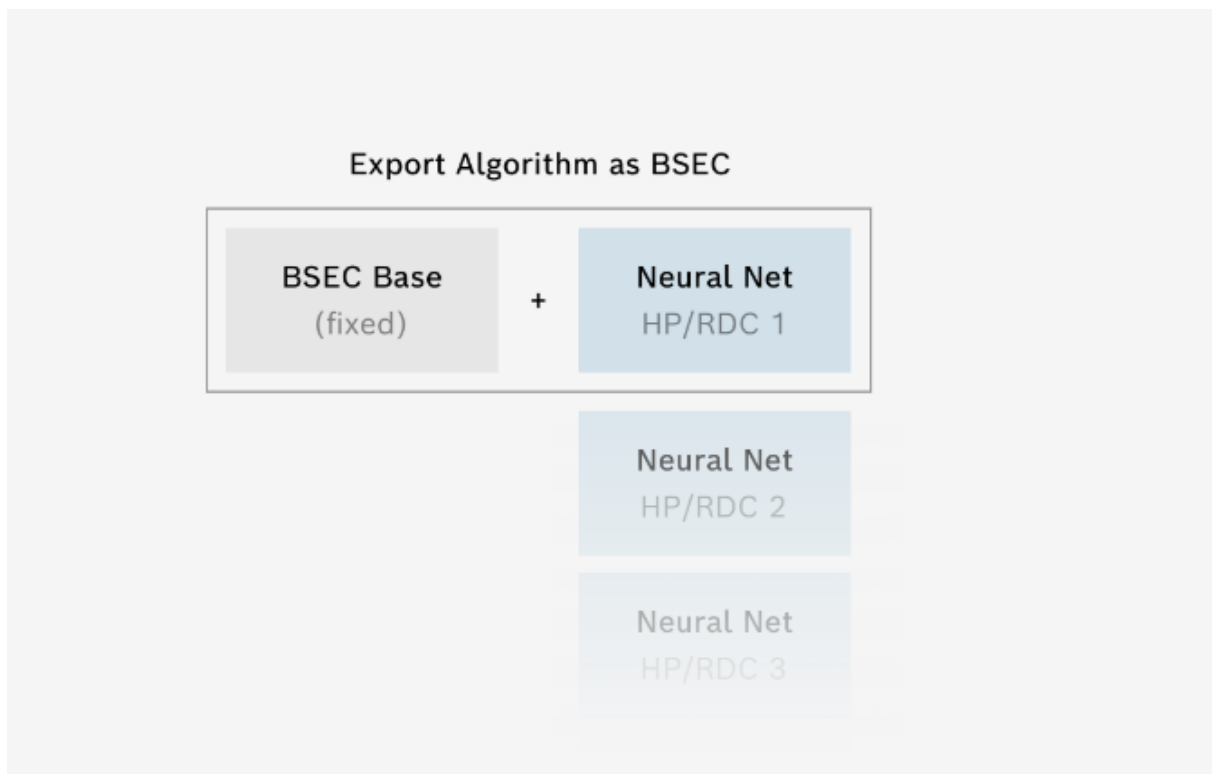
4.2.3 Νευρωνικά Δίκτυα και Διαδικασία Εκπαίδευσης

Το οικοσύστημα Bosch αποτελείται από νευρωνικά δίκτυα, τα οποία αποτελούν τον βασικό «πυρήνα» του. Ένα νευρωνικό δίκτυο δημιουργείται στην πραγματικότητα κάθε φορά που ένας χρήστης εκπαιδεύει ένα μοντέλο στο AI-Studio [2].

Κάθε αλγόριθμος αποτελείται από:

- Ρυθμίσεις αλγορίθμου
- Δείγματα και δεδομένα
- Εκπαιδευμένα νευρωνικά δίκτυα (ένα ανά HP/RDC)
- Μετρήσεις απόδοσης

Τα νευρωνικά δίκτυα μπορούν να εξαχθούν ως BSEC configuration files.



Εικόνα 4.1: Εξαγωγή αλγορίθμων ως αρχείο BSEC

Ιδιαίτερης σημασίας αποτελεί το γεγονός ότι εκτελείται εκπαίδευση ενός ξεχωριστού νευρωνικού δικτύου για κάθε κοινό συνδυασμό Heater Profile (HP) και Duty Cycle (RDC). Με αυτό τον τρόπο, προκύπτουν διαφορετικά δίκτυα από διαφορετικές διαμορφώσεις αισθητήρα, τα οποία αξιολογούνται ανεξάρτητα [12].

Η διαδικασία εκπαίδευσης βασίζεται στη διάσπαση των δεδομένων σε:

- **Δεδομένα Εκπαίδευσης (Training Data)**, τα οποία χρησιμοποιούνται για να μάθει το δίκτυο τα χαρακτηριστικά κάθε περίπτωσης, και

- **Δεδομένα Επικύρωσης (Validation Data)**, τα οποία ελέγχουν την απόδοση του δικτύου σε νέα, μη ορατά δεδομένα.

Έτσι διασφαλίζεται ότι το μοντέλο δεν "απομνημονεύει" τα δεδομένα, αλλά έχει τη δυνατότητα να γενικεύει και να αναγνωρίζει με ακρίβεια νέες καταστάσεις αερίων.

4.2.4 Η Συνεργασία BSEC και AI-Studio

Το AI-Studio και το BSEC αποτελούν δύο συμπληρωματικές πλευρές του ίδιου οικοσυστήματος, το καθένα με διαφορετικούς ρόλους. Το πρώτο έχει τον ρόλο της εκπαίδευσης, παρέχοντας τη δυνατότητα δημιουργίας αλγορίθμων που μπορούν να ανιχνεύουν συγκεκριμένα μοτίβα αερίων. Το δεύτερο έχει τον ρόλο της υλοποίησης, ενσωματώνοντας τα εκπαιδευμένα μοντέλα σε πραγματικό χρόνο πάνω σε μικροελεγκτές [2]. Ο συνδυασμός αυτών των δύο εργαλείων, απλοποιεί τον κύκλο ανάπτυξης προϊόντων σημαντικά. Τα δεδομένα καταγράφονται και επεξεργάζονται από τον μηχανικό, ο οποίος, στη συνέχεια, εκπαιδεύει ένα μοντέλο στο AI-Studio, και το μεταφέρει στο BSEC για λειτουργία σε πραγματικές συνθήκες. Έτσι, μειώνεται δραστικά ο χρόνος ανάπτυξης και αυξάνεται η αξιοπιστία του τελικού συστήματος [9].

4.2.5 Σημασία για την Ανάπτυξη Εφαρμογών

Πλέον, δίνεται στον χρήστη η δυνατότητα να εστιάσει περισσότερο στη δημιουργία καινοτόμων εφαρμογών και λιγότερο στην επίπονη ανάπτυξη αλγορίθμων από το μηδέν λόγω της ύπαρξης ενός ολοκληρωμένου οικοσυστήματος λογισμικού, όπως αυτό της Bosch.

Στην πράξη, το BSEC παρέχει άμεσα δείκτες ποιότητας αέρα, ενώ το AI-Studio επιτρέπει την εξειδίκευση σε ιδιαίτερες περιπτώσεις χρήσης. Για παράδειγμα, σε ένα νοσοκομειακό περιβάλλον, μπορεί να δημιουργηθεί αλγόριθμος για την ανίχνευση απολυμαντικών ουσιών, ενώ σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις μπορεί να στοχεύει στον εντοπισμό επικίνδυνων ρύπων.

Έτσι, η ευελιξία που προσφέρουν τα εργαλεία της Bosch καθιστά τον BME688 όχι απλώς έναν αισθητήρα, αλλά μια πλατφόρμα ανάπτυξης έξυπνων εφαρμογών ανίχνευσης αερίων.

4.3 Με την Πρώτη Ματιά

4.3.1 Αρχικές Χρήσιμες Πληροφορίες

Πριν παρουσιαστούν οι μετρήσεις των πειραμάτων, σημαντικό είναι να ληφθούν υπόψη κάποια πράγματα:

- Πριν από την λήψη οποιονδήποτε μετρήσεων, θα πρέπει να προηγηθεί σταθεροποίηση των αισθητήρων στην πλακέτα, εάν η πλακέτα BME είναι ολοκαίνουρια. Για να γίνει αυτό, θα πρέπει να γίνει σύνδεση της πλακέτας στην τροφοδοσία με ένα καλώδιο Micro USB και να λειτουργήσει για τουλάχιστον 24 ώρες. Αυτή η διαδικασία, αφού πραγματοποιηθεί μόνο μία φορά, είναι έτοιμη για αξιόπιστες μετρήσεις.
- Η πλακέτα BME θα πρέπει να έχει ρυθμιστεί σωστά. Συνιστάται να γίνει χρήση της προεπιλεγμένης διαμόρφωσης για τον πρώτο γύρο καταγραφής δεδομένων.
- Τοποθέτηση μιας κάρτας SD στην πλακέτα.

Τοποθέτηση μιας μπαταρίας σε σχήμα νομίσματος στην ειδική υποδοχή της πλακέτας του kit ανάπτυξης. Αυτό είναι απαραίτητο για το ρολόι πραγματικού χρόνου (RTC). Εάν η ώρα RTC δεν

είναι συγχρονισμένη, πρέπει να γίνει σύνδεση της πλακέτας στην εφαρμογή BME AI-Studio για κινητά για αυτόματο επανασυγχρονισμό στη σωστή ώρα [1], [3], [4].

4.3.2 Βήματα Πειράματος

Βήμα 1: Καταγραφή κανονικού αέρα

Παράδειγμα ανίχνευσης Ajax.

- Καταγραφή κανονικού αέρα (Normal Air) ως το πρώτο δείγμα.
- Καταγραφή της σύνθεσης αερίου του δωματίου.
- Προσθήκη επιπλέον οσμών για να γίνει η ανίχνευση πιο αξιόπιστη. Αλλά για να είναι πιο απλό αυτό το παράδειγμα, προς το παρόν μένουμε στον κανονικό αέρα.
- Σύνδεση της πλακέτας BME στην τροφοδοσία ρεύματος και τοποθέτηση της πλακέτας στο τραπέζι.

ΠΡΟΣΟΧΗ πάντα να μην έρθουν σε επαφή τα δάχτυλα κατά την διάρκεια χειρισμού της πλακέτας. Εάν όλα είναι εντάξει και η πλακέτα καταγράφει δεδομένα, η κόκκινη λυχνία LED θα αρχίσει να αναβοσβήνει. Αφήνουμε την πλακέτα να καταγράψει για περίπου 30 λεπτά.

Βήμα 2: Εγγραφή υγρού Ajax

Τώρα, προχωράμε στο Ajax. Για αυτό το παράδειγμα και για λόγους ευκολίας χρησιμοποιούμε τα αέρια που θα ελευθερώσει στην ατμόσφαιρα το υγρό Ajax (καθαριστικό χώρου).

Τοποθετούμε το υγρό Ajax σε ένα σχετικά αεροστεγές δοχείο. Στη συνέχεια πατάμε το «Κουμπί 1» (με την ένδειξη «S1») στον πίνακα για να σημειώσουμε αυτήν τη στιγμή στα δεδομένα. Τοποθετούμε τον πίνακα στο δοχείο μαζί με το υγρό Ajax και καταγράφουμε τη σύνθεση του αερίου για 30 λεπτά.

Βήμα 3: Καταγραφή ξανά του κανονικού αέρα

Μετά από αυτό, μετράμε ξανά τον κανονικό αέρα. Βγάζουμε την πλακέτα από το δοχείο. Αυτή τη φορά, πατάμε το "Κουμπί 2" (με την ένδειξη "S2") στην πλακέτα για να ορίσουμε έναν άλλο δείκτη στα δεδομένα.

Τοποθετούμε ξανά τον πίνακα στο τραπέζι και καταγράφουμε τη σύνθεση του αερίου για άλλα 30 λεπτά.

Σημείωση: Τοποθετούμε το δοχείο με το υγρό Ajax μακριά, ώστε να μην επηρεάζει την ηχογράφηση.

Βήμα 4: Εγγραφή υγρού Ajax

Τέλος, καταγράφουμε το τελευταίο δείγμα: Υγρό Ajax. Η ίδια διαδικασία όπως και πριν: Τοποθετούμε το υγρό Ajax στο δοχείο, πατάμε το "Κουμπί 1" στον πίνακα και τοποθετούμε ξανά το ολοκληρωμένο στο δοχείο μαζί με υγρό Ajax. Καταγράφουμε ξανά τη σύνθεση του αερίου για 30 λεπτά.

Μόλις ολοκληρώσετε τη συνεδρία μέτρησης, απλώς να απενεργοποιούμε την πλακέτα αποσυνδέοντας το καλώδιο USB.

Βήμα 5: Εισαγωγή και επισημάνση των δεδομένων

Αυτό το στάδιο περιλαμβάνει:

- Την δημιουργία ενός νέου έργου στο BME AI – Studio και την επιλογή μιας τοποθεσίας για την αποθήκευσή του στον σκληρό δίσκο. Το έργο αυτό θα το ονομάσουμε "Παράδειγμα Ajax".
- Την επιλογή Import data.
- Αφαίρεση της κάρτας SD από την πλακέτα BME, σύνδεσή της στον υπολογιστή και επιλογή του αρχείου στην κάρτα με την κατάληξη .bmerawdata.

Η εφαρμογή παρέχει πλέον μια επισκόπηση των καταγεγραμμένων δεδομένων. Υπάρχει ένα γράφημα, το οποίο απεικονίζει τα δεδομένα σε μια χρονογραμμή. Αυτή η συνεδρία μέτρησης θα ονομαστεί «Συνεδρία Ajax». Κάτω από το γράφημα, υπάρχουν ήδη τέσσερα καθορισμένα Δείγματα – ένα που ξεκίνησε με την ενεργοποίηση της πλακέτας και τρία που ξεκίνησαν όταν πατήσαμε τα κουμπιά κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Στα αριστερά, υπάρχουν πεδία εισαγωγής για την επισήμανση κάθε Δείγματος. Μετρήθηκε πρώτα ο κανονικός αέρας, μετά το Ajax και ξανά ο κανονικός αέρας.

Εάν δεν πατήθηκε κάποιο κουμπί κατά τη διάρκεια της μέτρησης, τα δείγματα μπορούν να οριστούν χειροκίνητα εδώ.

Τέλος, για να ολοκληρωθεί η διαδικασία επιλέγουμε Import Data. Τα δεδομένα αντιγράφονται τώρα στον φάκελο έργου στον σκληρό δίσκο του υπολογιστή. Μόλις ολοκληρωθεί η εισαγωγή, τα τέσσερα δείγματα εμφανίζονται στο αρχείο Specimen Collection. Η συλλογή δειγμάτων αποτελεί το μέρος όπου μπορεί να γίνει συλλογή και διαχείριση όλων των καταγεγραμμένων δεδομένων για ένα συγκεκριμένο έργο. Εάν επιλεχτεί ένα από τα δείγματα, τότε εμφανίζονται όλες οι διαθέσιμες λεπτομέρειες σχετικά με αυτό το δείγμα στη δεξιά πλευρά.

Βήμα 6: Δημιουργία νέου αλγορίθμου και κλάσεων

Αφού έχει ολοκληρωθεί η καταγραφή και η συλλογή δεδομένων στη Συλλογή Δείγματος, αυτό που ακολουθεί είναι η δημιουργία και η «εκπαίδευση» ενός αλγόριθμου.

Συγκεκριμένα, τα βήματα που ακολουθούμε είναι τα εξής:

- Μετάβαση στο My Algorithms και επιλογή New algorithm. Αυτός ο αλγόριθμος θα ονομαστεί «Ajax ή όχι».
- «Εκπαίδευση» του αλγόριθμου να προσδιορίζει την διαφορά μεταξύ δύο λεγόμενων «κλάσεων»: του Ajax και άλλων οσμών.
- Επιλογή του Add class για την δημιουργία αυτών των δύο κλάσεων και μετονομασία αυτής της κλάσης με το όνομα «Ajax».
- Επιλογή δειγμάτων από τη συλλογή δειγμάτων που αποτελούν μέρος αυτής της κλάσης.

Δημιουργία της δεύτερης κλάσης με όνομα «Κανονικός Αέρας» και επιλογή του δείγματος «Κανονικού Αέρα» που θα συσχετιστούν με αυτή την κλάση.

Βήμα 7: Εκπαίδευση και αξιολόγηση του αλγορίθμου

Αφού έχουν οριστεί οι δύο κλάσεις με τα αντίστοιχα δείγματά τους, μπορούμε να εκπαιδύσουμε τον αλγόριθμό μας. Υπάρχουν πρόσθετες ρυθμίσεις για τον αλγόριθμο και την εκπαίδευση, αλλά προς το παρόν μπορούμε να αφήσουμε αυτές τις ρυθμίσεις στις προεπιλεγμένες τιμές τους.

Για να ξεκινήσει το BME AI – studio την «εκπαίδευση» του αλγόριθμου, επιλέγουμε το Train Neural Net. Μόλις ολοκληρωθεί η «εκπαίδευση», εμφανίζονται τα αποτελέσματα. Η πιο σημαντική τιμή που πρέπει να ελεγχθεί είναι η Accuracy. Όσο υψηλότερη είναι η ακρίβεια, τόσο καλύτερη είναι η απόδοση του αλγορίθμου.

Προσοχή χρειάζεται στην περίπτωση όπου τα αποτελέσματα της «εκπαίδευσης» του αλγορίθμου είναι υπερβολικά τέλεια. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν τα δεδομένα που έχουν καταγραφεί είναι πολύ λίγα. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι επειδή ο αλγόριθμος προσαρμόζεται υπερβολικά σε αυτά τα συγκεκριμένα δεδομένα και δίνει τέλεια αποτελέσματα. Ωστόσο, δεν θα είναι σε θέση να προβλέψει άλλα δεδομένα που είναι ελαφρώς διαφορετικά. Με λίγα λόγια: φροντίζουμε πάντα να καταγράψουμε αρκετά δεδομένα με λίγη απόκλιση.

Επίσης, σημαντικό είναι να πραγματοποιηθεί έλεγχος στο λεγόμενο Confusion Matrix, το οποίο θα βρίσκεται στην ενότητα Details. Αυτό, δείχνει την απόδοση του αλγορίθμου για τη διάκριση των δύο κατηγοριών μας, «Ajax» και «Κανονικός Αέρας».

Ένα μέρος των δεδομένων του δείγματος έχει κρατηθεί μόνο για αυτήν τη δοκιμή απόδοσης. Οι γραμμές δείχνουν ποιες ήταν οι πραγματικές κλάσεις αυτών των στοιχείων δοκιμής, ενώ οι στήλες δείχνουν ποιες κλάσεις προβλέφθηκαν από τον αλγόριθμο. Αυτό σημαίνει ότι, για ένα καλό αποτέλεσμα, το άνω αριστερό τεταρτημόριο και το κάτω δεξί τεταρτημόριο θα πρέπει να είναι σκούρο μπλε και να έχουν υψηλό αριθμό - υποδεικνύοντας πόσο συχνά ο αλγόριθμος έκανε τη σωστή πρόβλεψη και για τις δύο κλάσεις. Ταυτόχρονα, το άνω δεξί και το κάτω αριστερό τεταρτημόριο θα πρέπει να είναι ανοιχτό μπλε και να έχουν χαμηλό αριθμό, καθώς αυτοί οι αριθμοί υποδεικνύουν πόσο συχνά ο αλγόριθμος έκανε τη λανθασμένη πρόβλεψη. Το άνω δεξί τεταρτημόριο σας λέει πόσο συχνά ο αλγόριθμος προέβλεψε ψευδώς τον «Κανονικό Αέρα», ενώ στην πραγματικότητα ήταν «Ajax». Και το κάτω αριστερό τεταρτημόριο σας λέει πόσο συχνά ο αλγόριθμος προέβλεψε το «Ajax», ενώ στην πραγματικότητα ήταν «Κανονικός Αέρας».

Στο παράδειγμά μας, τα αποτελέσματα φαίνονται αρκετά καλά. Ακρίβεια άνω του 90% και πολύ λίγες ψευδείς προβλέψεις στον Πίνακα Σύγχυσης. Αυτό είναι ένα καλό αποτέλεσμα για μια πρώτη εκπαίδευση.

Βήμα 8: Εξαγωγή του αλγορίθμου

Ως τελευταίο βήμα, μπορούμε να εξάγουμε τον αλγόριθμο ως αρχείο BSEC Configuration File για το Λογισμικό BSEC. Αυτό το αρχείο ρυθμίσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί μαζί με το Λογισμικό BSEC στο project μας.

Συμπέρασμα

Το παράδειγμα της διάκρισης υγρού Ajax από κανονικό αέρα καταδεικνύει με σαφήνεια την πρακτική χρησιμότητα του αισθητήρα BME688 σε συνδυασμό με το BME AI-Studio. Μέσω της διαδικασίας καταγραφής δεδομένων, επισήμανσης, εκπαίδευσης και αξιολόγησης, κατέστη δυνατή η ανάπτυξη αλγορίθμων μηχανικής μάθησης που αναγνωρίζουν και διαφοροποιούν χημικές ενώσεις στον αέρα.

Η μεθοδολογία αυτή αποδεικνύει ότι ο αισθητήρας μπορεί να λειτουργήσει ως ένα ευέλικτο και προσαρμόσιμο εργαλείο, ικανό να ενσωματωθεί σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών ανίχνευσης αερίων. Από ερευνητικά πειράματα έως βιομηχανικές και ιατρικές εφαρμογές, ο BME688 προσφέρει

δυνατότητες που υπερβαίνουν τις παραδοσιακές μεθόδους μέτρησης, ανοίγοντας τον δρόμο για πιο στοχευμένη και έξυπνη παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα [2].

4.4 Διαμόρφωση Πλακέτας (Configure Board)

Η αρχική και κυριότερη διαδικασία πριν από την καταγραφή δεδομένων με την πλακέτα BME Board και το λογισμικό BME AI-Studio είναι η ρύθμιση των παραμέτρων της πλακέτας. Μέσω από αυτή τη διαδικασία ο χρήστης δημιουργεί ένα αρχείο ρυθμίσεων (configuration file), το οποίο αποθηκεύεται στην κάρτα SD της πλακέτας και ορίζει τον τρόπο λειτουργίας της κατά την καταγραφή. Η διαμόρφωση γίνεται μέσω της εφαρμογής, όπου αρχικά δημιουργείται ή ανοίγεται ένα έργο (project) και κατόπιν επιλέγεται η ενότητα Configure Board. Εκεί καθορίζονται οι παράμετροι λειτουργίας που θα ισχύσουν για τον αισθητήρα BME688 [3], [4].

4.4.1 Τύποι Διαμόρφωσης

Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες όπου χωρίζεται η λειτουργία της, γίνεται ανάλογα με το στάδιο της διαδικασίας και τον στόχο του χρήστη.

Η πρώτη κατηγορία είναι η **προεπιλεγμένη διαμόρφωση (Default configuration)**. Σε αυτήν την κατηγορία χρησιμοποιείται το Heater Profile HP-354 σε συνδυασμό με το Duty Cycle RDC-5-10. Η ρύθμιση αυτή συνιστάται ως αφετηρία (προεπιλεγμένη διαμόρφωση) και θα ταιριάζει στις περισσότερες περιπτώσεις χρήσης, ειδικά όταν ο χρήστης έρχεται για πρώτη φορά σε επαφή με το σύστημα. Παράλληλα, χρησιμοποιούμε τη λειτουργία πλακέτας Sensorboard Default HP/RDC. Η ίδια διαμόρφωση χρησιμοποιείται και για την αρχική σταθεροποίηση της πλακέτας. Η σταθεροποίηση αυτή είναι απαραίτητη, καθώς οι νέες πλακέτες πρέπει να λειτουργήσουν συνεχόμενα για τουλάχιστον 24 ώρες πριν αρχίσει η ουσιαστική καταγραφή αξιόπιστων δεδομένων.

Η δεύτερη κατηγορία είναι η **ανάλυση των Προφίλ Θερμαντήρων (Heater Profile Analysis)**. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του αισθητήρα BME688 είναι η ικανότητα προσαρμογής της λειτουργίας του μέσα από διαφορετικά θερμικά προφίλ. Κάθε Heater Profile προσδιορίζει τη σειρά θερμοκρασιών του στοιχείου ανίχνευσης και επηρεάζει έτσι την ευαισθησία και την επιλεκτικότητα του αισθητήρα. Η επιλογή του κατάλληλου προφίλ είναι καθοριστική για την επιτυχία ενός συγκεκριμένου σεναρίου χρήσης, καθώς διαφορετικά αέρια αποτυπώνουν διαφορετικά «ηλεκτρικά αποτυπώματα» σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Στο μέρος αυτό μπορεί γίνει η διαδικασία της δοκιμής και της σύγκρισης πολλαπλών Heater Profiles από τον χρήστη, έτσι ώστε να εντοπίσει ποιο αποδίδει καλύτερα για το ζητούμενο αποτέλεσμα.

Η τρίτη κατηγορία είναι η **βελτιστοποίηση του Duty Cycle (Duty Cycle Exploration)**. Το BME688 μας επιτρέπει να υιοθετήσουμε τον τρόπο λειτουργίας του για να γίνει εξοικονόμηση ενέργειας του συστήματος. Κατά τη διάρκεια ενός Κύκλου Ύπνου, ο αισθητήρας βρίσκεται σε λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και θα ενεργοποιηθεί αυτόματα μετά από ένα ορισμένο χρονικό διάστημα για να εισέλθει σε έναν Κύκλο Σάρωσης. Η αναλογία μεταξύ του χρόνου που ο αισθητήρας βρίσκεται σε ύπνο και της σάρωσης ορίζεται από τον Κύκλο Λειτουργίας. Για να γίνει εξερεύνηση μιας ποικιλίας Κύκλων Λειτουργίας και να βρεθεί ο καλύτερος για την περίπτωσή μας, χρησιμοποιούμε τη λειτουργία πλακέτας Duty Cycle Exploration.

Συνοψίζοντας, είναι σημαντικό να δοθεί προσοχή στους μεμονωμένους συνδυασμούς Προφίλ Θερμαντήρων (HP) και Κύκλων Λειτουργίας (RDC), τους λεγόμενους συνδυασμούς HP/RDC. Κάθε αισθητήρας μπορεί να λειτουργήσει σε έναν συγκεκριμένο συνδυασμό HP/RDC που αυτό το καθιστά να καθορίζει τη συμπεριφορά καταγραφής των δεδομένων. Γεγονός που το κάνει σημαντικό τόσο για

τη διαμόρφωση των πλακετών και την καταγραφή των δεδομένων, όσο και για τη δημιουργία και την εκπαίδευση αλγορίθμων. Ένας αλγόριθμος μπορεί να χρησιμοποιήσει μόνο πανομοιότυπους συνδυασμούς HP/RDC για εκπαίδευση.

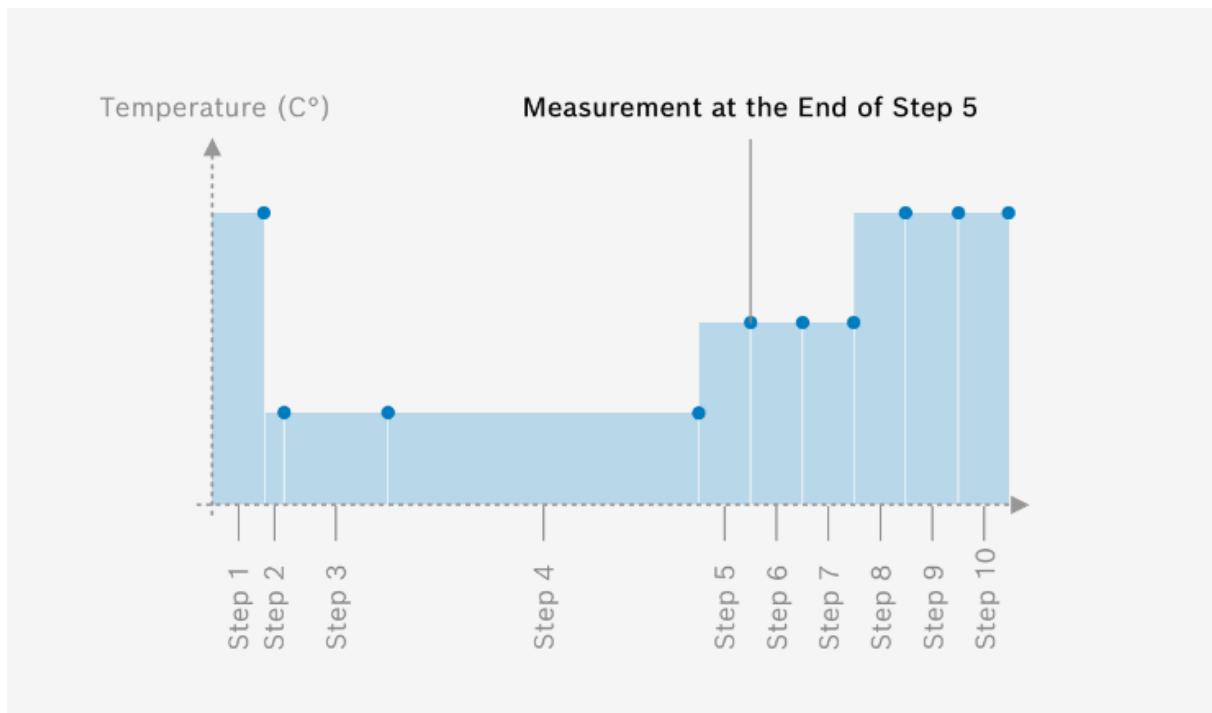
4.4.2 Heater Profiles

Στο κομμάτι αυτό ο χρήστης πρέπει να επιλέξει ποιο θερμικό προφίλ θέλει να χρησιμοποιηθεί κατά τη λειτουργία της πλακέτας. Η επιλογή γίνεται μέσα από την εφαρμογή Mobile AI, όπου εκεί εμφανίζεται η λίστα με τα διαθέσιμα προφίλ. Στη λειτουργία Heater Profile Exploration υπάρχει η δυνατότητα να επιλέξουμε μέχρι τέσσερα διαφορετικά Heater Profiles (στην περίπτωση του BME688 Development Kit), ενώ στη λειτουργία Duty Cycle Exploration μπορούμε να επιλέξουμε μόνο ένα. Κάθε προφίλ είναι συνοδευόμενο από γραφική απεικόνιση της ακολουθίας θερμοκρασιών, καθώς και από την περιγραφή της χρήσης του. Αν ο χρήστης επιλέξει το Sensorboard Default HP/RDC, τότε το προφίλ HP-354 εφαρμόζεται αυτόματα χωρίς δυνατότητα αλλαγής [3].

Προφίλ θερμοκρασίας με 10 βήματα, το οποίο ελέγχεται από τον αισθητήρα κατά τη διάρκεια ενός Κύκλου Σάρωσης. Κάθε ένα από τα 10 βήματα αποτελείται από:

- Μια θερμοκρασία
- Μια διάρκεια (η βάση χρόνου είναι 140 ms)

Στο τέλος κάθε βήματος, καταγράφεται μια μέτρηση και αποθηκεύεται στα δεδομένα.



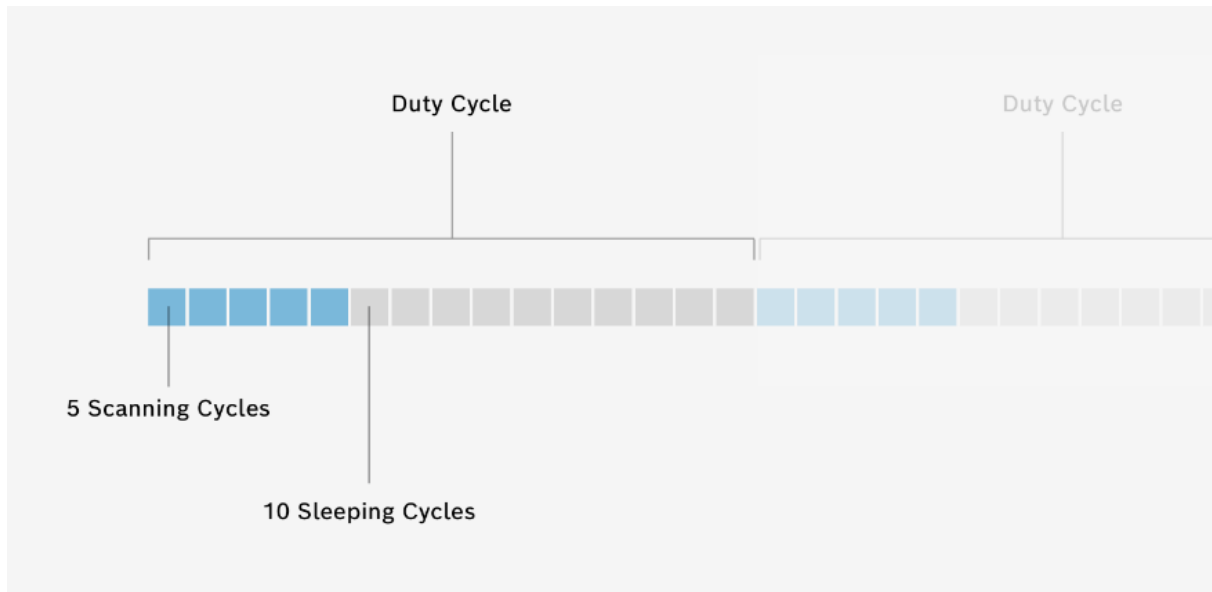
Εικόνα 4.2: Προφίλ Θερμαντήρα

Σημείωση: Η διάρκεια ενός βήματος ενός Προφίλ Θερμαντήρα υπολογίζεται με χρονική βάση 140 ms. Αυτό σημαίνει ότι π.χ. μια διάρκεια 2θα έχει ως αποτέλεσμα μια διάρκεια $2 * 140 \text{ ms} = 280 \text{ ms}$.

4.4.3 Duty Cycles

Ο κύκλος λειτουργίας (Duty Cycle) εκφράζει τον τρόπο με τον οποίο ο αισθητήρας εναλλάσσεται ανάμεσα σε περιόδους ενεργής μέτρησης (κύκλοι σάρωσης) και περιόδους αδράνειας (κύκλοι ύπνου).

Με αυτόν τον τρόπο γνωρίζουμε τόσο για την κατανάλωση ενέργειας του συστήματος, όσο και για τον χρόνο απόκρισης του αισθητήρα σε αλλαγές των μετρούμενων μεγεθών [3].



Εικόνα 4.3: Κύκλος Λειτουργίας

Ένας κύκλος λειτουργίας αποτελείται από:

- **Κύκλος Σάρωσης (Scan Cycles):** Ο αισθητήρας εκτελεί μετρήσεις ακολουθώντας ένα *προφίλ θερμαντήρα* (heater profile).
- **Κύκλος Ύπνου (Sleep Cycles):** Ο αισθητήρας βρίσκεται σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης και δεν πραγματοποιεί μετρήσεις.

Κάθε κύκλος σάρωσης ισοδυναμεί με την εκτέλεση ενός heater profile. Η διάρκεια κάθε κύκλου ύπνου είναι ίση με τη διάρκεια ενός κύκλου σάρωσης.

Υπάρχουν όμως κάποιοι παράμετροι, όπως ότι στη λειτουργία Duty Cycle Exploration, το κιτ ανάπτυξης BME688 μπορεί να υποστηρίξει έως 4 διαφορετικούς κύκλους λειτουργίας αλλά και στη λειτουργία Heater Profile Exploration, επιτρέπει μόνο έναν κύκλο λειτουργίας.

Παράδειγμα

Ένας κύκλος RDC-5-10 σημαίνει:

- 5 κύκλοι σάρωσης
- 10 κύκλοι ύπνου

Αν η διάρκεια κάθε κύκλου σάρωσης είναι 1 δευτερόλεπτο:

- Συνολικός χρόνος σάρωσης = 5 δευτ.
- Συνολικός χρόνος ύπνου = 10 δευτ.
- Συνολική διάρκεια κύκλου λειτουργίας = 15 δευτ.

Αρα, ο αισθητήρας είναι ενεργός το 33% του χρόνου και ανενεργός το υπόλοιπο 67%. Το ποσοστό αυτό είναι το Duty Cycle %. Το ποσοστό Duty Cycle εκφράζει τη σχέση ενεργού/συνολικού χρόνου:

$$\text{DutyCycle}\% = \frac{\text{Χρόνος Σάρωσης}}{\text{Συνολικός Χρόνος}} \times 100$$

- **Υψηλό Duty Cycle (π.χ. 75%):** Γρήγορη απόκριση, υψηλότερη κατανάλωση.
- **Χαμηλό Duty Cycle (π.χ. 25%):** Εξοικονόμηση ενέργειας, πιο αργή αντίδραση.

Ο κύκλος λειτουργίας έχει μεγάλη σημασία για την εφαρμογή, κυρίως στην κατανάλωση της ενέργειας και ειδικά σε εφαρμογές με μπαταρία. Στο χρόνο απόκρισης όπου απαιτείται ταχύτερη ανίχνευση αλλαγών → μεγαλύτερο duty cycle (π.χ. νοσοκομεία, βιομηχανία). Και τέλος στην εκπαίδευση AI, καθώς προτιμάται αυξημένος αριθμός κύκλων σάρωσης ώστε να συλλέγονται περισσότερα δεδομένα για ακριβέστερη μοντελοποίηση.

4.4.4 Διάταξη Πίνακα

Τελευταίο βήμα στη διαδικασία διαμόρφωσης είναι να καθορίσουμε την διάταξη της πλακέτας. Στο σημείο αυτό ορίζει ο χρήστης με ποιον τρόπο θα κατανεμηθούν οι συνδυασμοί Heater Profile και Duty Cycle στους διαθέσιμους αισθητήρες της πλακέτας. Υπάρχουν τρεις διαφορετικές επιλογές.

- Η ομαδοποιημένη διάταξη (Grouped), όπου οι συνδυασμοί τοποθετούνται με τη σειρά, δημιουργώντας σαφείς ομάδες αισθητήρων. Είναι η πιο εύκολη και κατανοητή μέθοδος κατανομής.
- Η εναλλασσόμενη διάταξη (Shuffled). Σε αυτήν οι συνδυασμοί κατανέμονται εναλλάξ, με αποτέλεσμα να προκύπτει μια ισορροπημένη και αναπαραγωγίμη κατανομή. Η επιλογή αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν η πλακέτα εκτίθεται σε εστιασμένη ροή αερίου, καθώς αποφεύγεται η πιθανότητα να εμφανιστεί συστηματικό σφάλμα λόγω συγκέντρωσης αερίου σε συγκεκριμένη περιοχή.
- Η τυχαία διάταξη (Random). Οι συνδυασμοί τοποθετούνται με τυχαίο τρόπο στους αισθητήρες, δημιουργώντας διαφορετική διάταξη κάθε φορά. Ο χρήστης μπορεί να εφαρμόσει την επιλογή αυτή επανειλημμένα, ώστε να προκύψουν ανεξάρτητες και διαφορετικές τυχαίες κατανομές.

Αξίζει να σημειωθεί ότι αν ο αριθμός των αισθητήρων δεν είναι πολλαπλάσιο του αριθμού των συνδυασμών, τότε οι υπόλοιποι αισθητήρες κατανέμονται με ανισομέρεια. Στην εφαρμογή εμφανίζεται σχεδιάγραμμα που απεικονίζει την τελική διάταξη, βοηθώντας τον χρήστη να κατανοήσει καλύτερα την τοποθέτηση [3].

Συνοπτικά, η διαμόρφωση της πλακέτας αποτελεί καθοριστικό στάδιο στη χρήση του BME AI-Studio. Μέσα από τις επιλογές για τον τύπο διαμόρφωσης, τα Heater Profiles, τα Duty Cycles και τη διάταξη της πλακέτας, ο χρήστης μπορεί να προσαρμόσει τον αισθητήρα BME688 στις ανάγκες της εφαρμογής του. Η σωστή προετοιμασία εξασφαλίζει την αξιοπιστία των δεδομένων και διευκολύνει την εκπαίδευση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, θέτοντας τη βάση για την ανάπτυξη αξιόπιστων και αποδοτικών λύσεων στον τομέα της ανίχνευσης αερίων.

4.4.5 Πίνακας Λειτουργίας (Operating Mode Table)

Ο πίνακας λειτουργίας καθορίζει ποιοι υποαισθητήρες του BME688 θα είναι ενεργοί κατά την καταγραφή. Ο αισθητήρας διαθέτει τέσσερις βασικές μονάδες μέτρησης: θερμοκρασία, σχετική υγρασία, ατμοσφαιρική πίεση και αντίσταση αερίου. Η επιλογή δεν είναι απαραίτητο να περιλαμβάνει και τις τέσσερις: εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή. Σε ένα σενάριο όπου το ενδιαφέρον επικεντρώνεται αποκλειστικά στην ανίχνευση αερίων, μπορεί να ενεργοποιηθεί μόνο το στοιχείο αερίου με τον θερμαντήρα. Αντίθετα, σε εφαρμογές γενικής παρακολούθησης της ποιότητας αέρα, είναι

προτιμότερο να ενεργοποιούνται όλοι οι υποαισθητήρες ώστε να αποκτάται μια ολοκληρωμένη εικόνα του περιβάλλοντος. Η σωστή ρύθμιση του πίνακα λειτουργίας είναι καθοριστική, καθώς προσδιορίζει τα δεδομένα που θα συλλεχθούν και τελικά θα χρησιμοποιηθούν στην εκπαίδευση των αλγορίθμων στο AI-Studio.

4.5 Καταγραφή Δεδομένων

Αφού ολοκληρώσουμε τη διαμόρφωση της πλακέτας BME Board, το επόμενο βασικό στάδιο είναι να ξεκινήσει η καταγραφή των δεδομένων. Σε αυτό το σημείο, η πλακέτα μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα, χωρίς την ανάγκη του λογισμικού AI-Studio. Ουσιαστικά, η πλακέτα συλλέγει τις μετρήσεις και τις αποθηκεύει στην κάρτα SD, δημιουργώντας το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί αργότερα για την εκπαίδευση των αλγορίθμων [2].

Η σημασία της ρεαλιστικής καταγραφής

Η αξία ενός αλγορίθμου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των δεδομένων που θα τον εκπαιδεύσουν. Τα δεδομένα πρέπει να συλλεχθούν σε ρεαλιστικές συνθήκες, ώστε το τελικό μοντέλο να είναι έγκυρο και όχι αδύναμο ή να μας οδηγήσει σε λάθος συμπεράσματα. Για τον λόγο αυτό, θα κάνουμε καταγραφή σε συνθήκες που προσομοιάζουν όσο το δυνατόν καλύτερα το τελικό use case.

Ανάλογα με τη διάρκεια των Προφίλ Θερμαντήρα και των Κύκλων Λειτουργίας που θα χρησιμοποιήσουμε, ο αισθητήρας χρειάζεται από 15 δευτερόλεπτα έως αρκετά λεπτά για το σημείο δεδομένων (κύκλο). Πρέπει να συλλέξουμε τουλάχιστον 50 σημεία δεδομένων (που αντιστοιχούν σε διάρκεια καταγραφής 50 φορές τη διάρκεια του Κύκλου Λειτουργίας) ανά περίπτωση.

Αυτό σημαίνει: εάν χρησιμοποιήσουμε Κύκλο Λειτουργίας με διάρκεια 30 δευτερολέπτων, προσπαθήσουμε να καταγράψουμε κάθε περίπτωση για τουλάχιστον 25 λεπτά.

Ποικιλία καταστάσεων

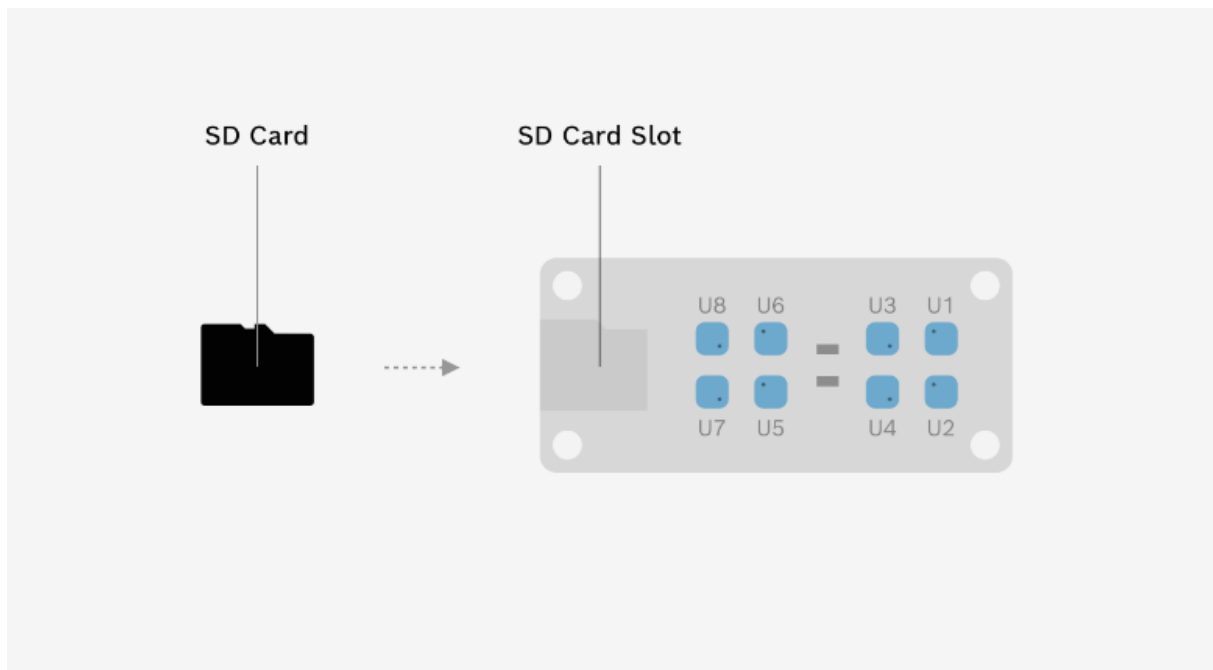
Όσες περισσότερες καταστάσεις καταγραφής θα έχουμε, τόσο πιο ισχυρός θα είναι ο αλγόριθμος. Η θερμοκρασία και η υγρασία έχουν σημαντική επίδραση στην ευαισθησία και την επιλεκτικότητα του αισθητήρα. Το να μετράμε σε διαφορετικές καταστάσεις και με διαφορετικά αέρια υποβάθρου θα αυξήσει την ποικιλία των μετρήσεων που λαμβάνονται υπόψη στην εκπαίδευση του αλγορίθμου, γεγονός που θα μας δώσει καλύτερη ανατροφοδότηση σχετικά με το πόσο ισχυρός είναι ο αλγόριθμος σε διαφορετικές καταστάσεις.

Αυτό σημαίνει: Καταγραφή των δεδομένων σε διάφορες καταστάσεις και σε πολλαπλές ημέρες.

Σημείωση: Μην αγγίζετε τους αισθητήρες με τα δάχτυλά σας. Το λίπος στο δέρμα σας θα κολλήσει στην επιφάνεια του περιβλήματος του αισθητήρα και θα αποβάλει αέριο για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτό θα αλλοιώσει τις καταγραφές αερίων σας και θα οδηγήσει στην εκπαίδευση μη ρεαλιστικών αλγορίθμων.

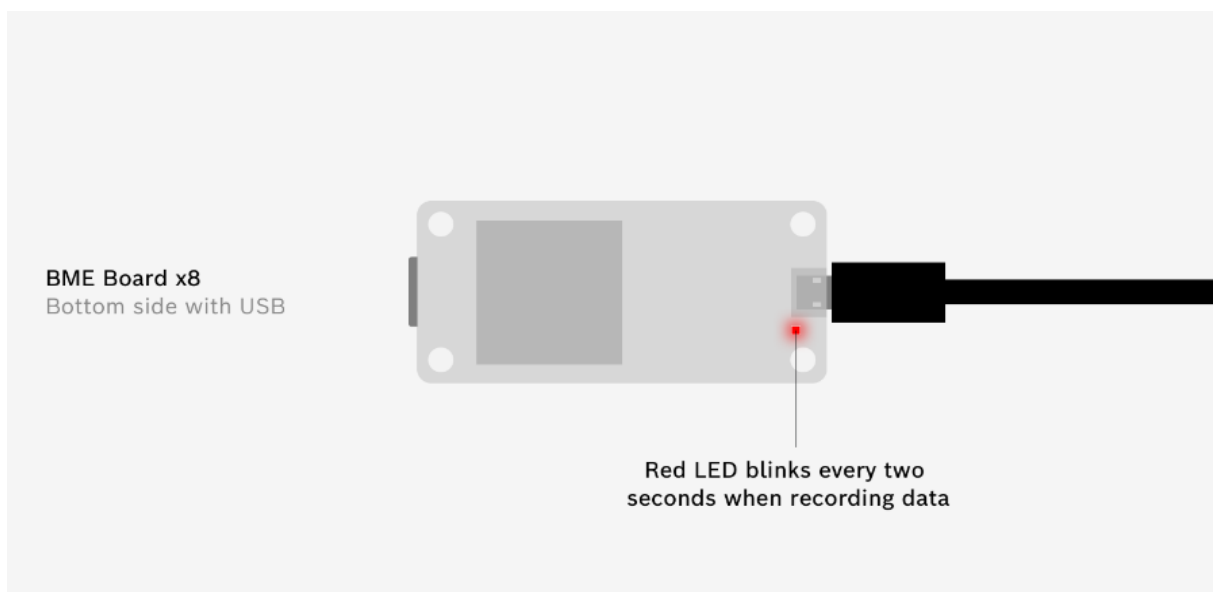
4.5.1 Έναρξη εγγραφής

Αρχικά, τοποθετούμε την κάρτα SD στην πλακέτα BME. Η υποδοχή κάρτας SD βρίσκεται στην επάνω πλευρά της πλακέτας BME. Βάζουμε την κάρτα με τις επαφές της στραμμένες προς την επάνω πλακέτα κυκλώματος.



Εικόνα 4.4: Τοποθέτηση κάρτας SD στη πλακέτα

Σημείωση: Πρέπει να βεβαιωθούμε ότι έχουμε τοποθετήσει ένα αρχείο διαμόρφωσης πλακέτας (.bmeconfig) στην κάρτα SD. Δημιουργούμε αυτά τα αρχεία επιλέγοντας *Configure BME Board* και, στη συνέχεια *Save to file*.



Εικόνα 4.5: Ένδειξη LED για καταγραφή (κάθε 2 sec)

Στη συνέχεια συνδέουμε την πλακέτα BME στην τροφοδοσία με ένα καλώδιο Micro USB. Μόλις η πλακέτα συνδεθεί στην τροφοδοσία, θα ενεργοποιηθεί αυτόματα και θα ξεκινήσει την εγγραφή. Η κόκκινη λυχνία LED δίπλα στην υποδοχή USB θα πρέπει να αναβοσβήνει κάθε δύο δευτερόλεπτα. Εάν αναβοσβήνει γρήγορα, η πλακέτα δεν κάνει εγγραφή και είναι σε ουδέτερη κατάσταση.

Το ολοκληρωμένο διαθέτει εσωτερική μπαταρία για την παρακολούθηση του χρόνου, αλλά είναι καλή πρακτική να σημειωθεί με ακρίβεια η ημερομηνία και ώρα έναρξης της εγγραφής, ώστε να μπορούμε να επαληθεύσουμε τα δεδομένα [2].

Χρήση πλακέτας BME με μπαταρία

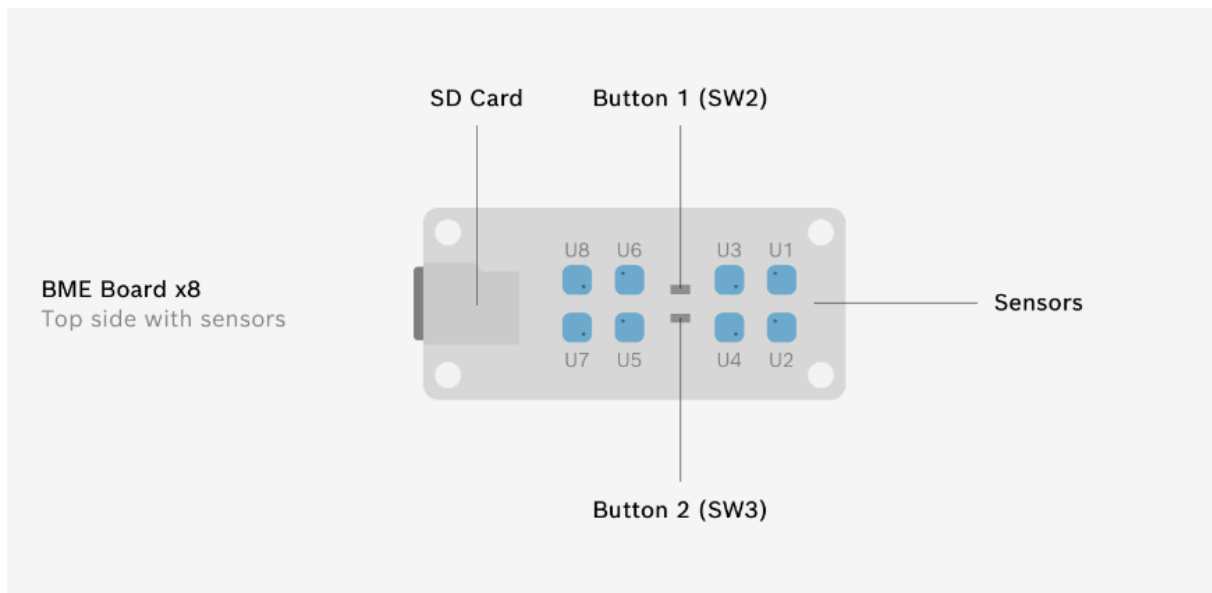
Για να γίνει εγγραφή σε κλειστό περιβάλλον, επιτρέπεται να χρησιμοποιήσουμε μια μπαταρία για την τροφοδοσία της πλακέτας αισθητήρων. Μια μπαταρία 10.000 mAh θα πρέπει να τροφοδοτεί την πλακέτα σας για τουλάχιστον 24 ώρες, ανάλογα με τον κύκλο λειτουργίας που χρησιμοποιείται και τις θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

4.5.2 Διαδικασία Καταγραφής

Η διαδικασία της καταγραφής ξεκινά με την τοποθέτηση της κάρτας SD στην πλακέτα, στην οποία πρέπει να υπάρχει ήδη το αρχείο διαμόρφωσης (.bmeconfig). Έπειτα, η πλακέτα συνδέεται με τροφοδοσία μέσω καλωδίου Micro USB και αρχίζει αυτόματα την καταγραφή. Η κόκκινη λυχνία δίπλα στη θύρα USB αναβοσβήνει κάθε δύο δευτερόλεπτα για να υποδείξει ότι η διαδικασία εξελίσσεται κανονικά, όπως αναφέρθηκε παραπάνω [2].

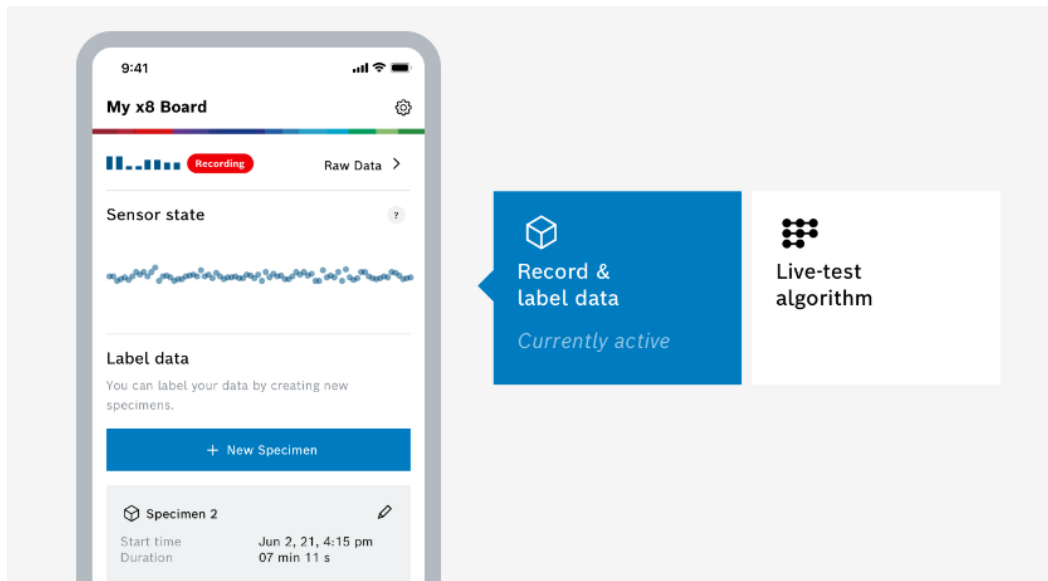
Κατά τη διάρκεια μιας συνεδρίας, μπορούν να καταγραφούν πολλαπλά δείγματα (specimens). Αυτό γίνεται με τρεις τρόπους:

1. Πατώντας τα πλήκτρα **S1** ή **S2** της πλακέτας, ώστε να δώσει σήμα για την έναρξη νέου δείγματος.



Εικόνα 4.6: Κουμπιά S1 και S2 για εναλλαγή label

2. Μέσω της εφαρμογής **BME AI-Studio Mobile**, που μας δίνει την επιλογή για να επισημάνουμε τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο.



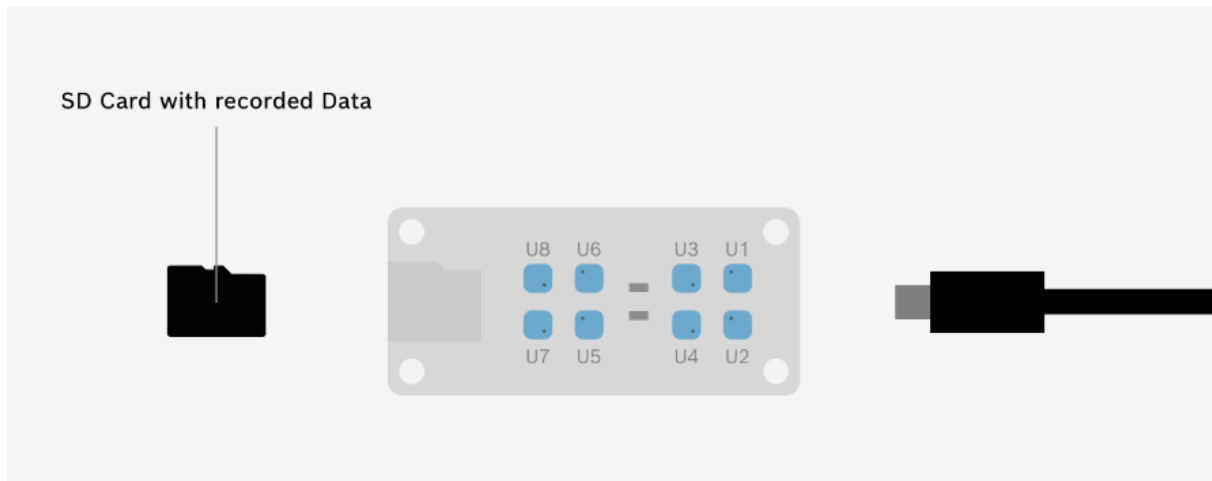
Εικόνα 4.7: Εναλλαγή label μέσω της εφαρμογής BME AI-Studio Mobile

3. Με χειροκίνητη προσθήκη δειγμάτων κατά το στάδιο της εισαγωγής δεδομένων στο AI-Studio.

Σε κάθε περίπτωση, η καταγραφή είναι πιο αξιόπιστη όταν ο χρήστης κρατά σημειώσεις για το είδος του δείγματος και την ώρα λήψης.

4.5.3 Τερματισμός Καταγραφής

Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία της μέτρησης, το πρόγραμμα τερματίζεται απλά εάν γίνει αποσύνδεση της τροφοδοσίας. Η πλακέτα θα απενεργοποιηθεί και η καταγραφή σταματά αυτόματα. Τα δεδομένα πλέον έχουν αποθηκευτεί στην κάρτα SD και είναι έτοιμα για το επόμενο στάδιο, δηλαδή την εισαγωγή και επεξεργασία στο AI-Studio [2].



Εικόνα 4.8: Τερματισμός καταγραφής με αποσύνδεση τροφοδοσίας

4.6 Εισαγωγή Δεδομένων

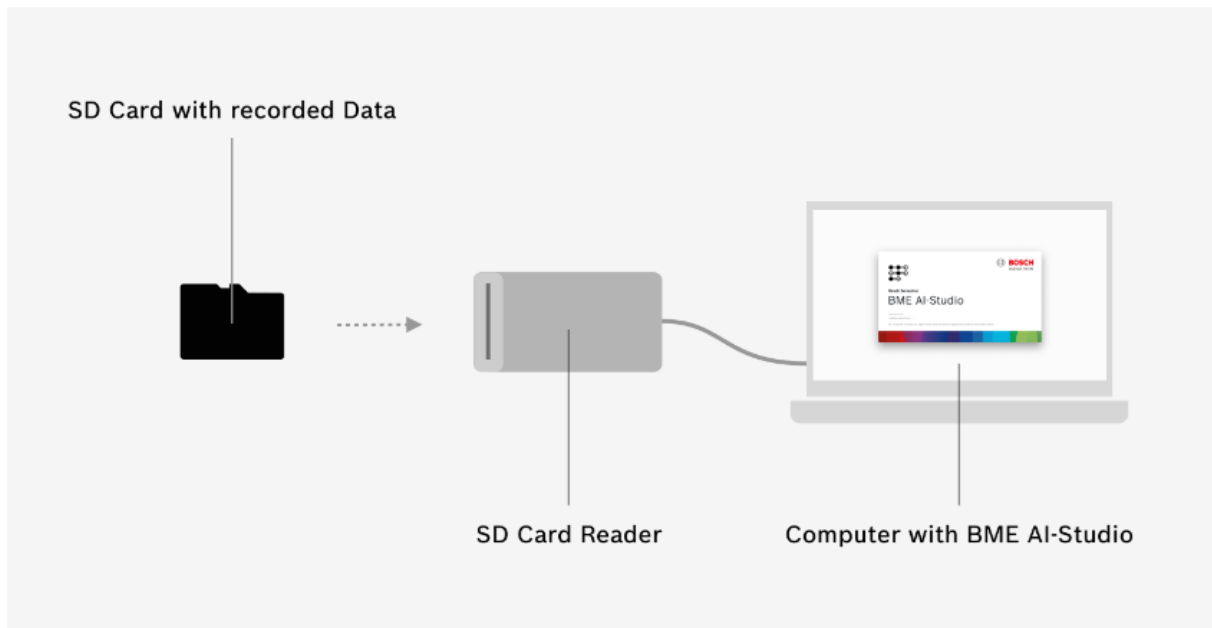
Μόλις ολοκληρωθεί η καταγραφή δεδομένων με την πλακέτα BME Board, το επόμενο βήμα που πρέπει να κάνουμε είναι η μεταφορά τους στο λογισμικό BME AI-Studio. Ο χρήστης σε αυτό το στάδιο μπορεί να αξιολογήσει την ποιότητα των μετρήσεων, να επιβεβαιώσει ότι όλα λειτουργούν σωστά και να καθορίσει τα specimens, δηλαδή τα διάφορα δείγματα που αντιπροσωπεύουν διαφορετικές συνθήκες ή

περιβάλλοντα. Όλα τα δεδομένα οργανώνονται στη συλλογή Specimens (Specimen Collection), η οποία θα αποτελέσει τη βάση για την εκπαίδευση των αλγορίθμων.

Η προσθήκη μπορεί να γίνει είτε σε νέο project είτε σε ήδη υπάρχον. Αυτό προσφέρει ευελιξία, εφόσον ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει ξεχωριστά projects για διαφορετικές μελέτες ή να συγκεντρώσει δεδομένα σε ένα μόνο project όταν συνδέονται με το ίδιο use case.

4.6.1 Πρόσβαση στα αρχεία της κάρτας SD

Η διαδικασία αρχίζει με την αφαίρεση της κάρτας SD από την πλακέτα και τη σύνδεσή της στον υπολογιστή μέσω αναγνώστη καρτών (card reader). Εκεί αποθηκεύονται όλα τα αρχεία καταγραφής. Εάν δε εντοπιστούν δεδομένα στην κάρτα, αυτό υποδηλώνει ότι η πλακέτα δεν είχε ρυθμιστεί σωστά και είναι απαραίτητη η παραγωγή ενός νέου αρχείου διαμόρφωσης (.bmeconfig).



Εικόνα 4.9: Εισαγωγή δεδομένων μέσω SD στο BME AI-Studio

4.6.2 Εισαγωγή δεδομένων στο AI-Studio

Η διαδικασία εισαγωγής δεδομένων στο BME AI-Studio είναι καθοριστική για την επόμενη ανάλυση και εκμετάλλευση των μετρήσεων. Υπάρχουν τρεις κύριοι τρόποι με τους οποίους η εισαγωγή μπορεί να γίνει:

- **Εισαγωγή Raw Data:** Ο χρήστης δημιουργεί ένα νέο έργο ή ανοίγει ένα προϋπάρχον και μέσω της επιλογής *Import Data* επιλέγει το αρχείο τύπου *.bmerawdata*. Το αρχείο μπορεί να επιλεγεί είτε κατευθείαν από την κάρτα SD είτε από ένα αντίγραφο που έχει αποθηκευτεί στον σκληρό δίσκο. Τα δεδομένα αποθηκεύονται στον φάκελο του έργου και συνοδεύονται από μία αρχική ανασκόπηση, όπου μπορεί να γίνει ο ορισμός των *specimens*.
- **Εισαγωγή Specimen Data από άλλο project:** Υπάρχει η δυνατότητα μεταφοράς δειγμάτων που έχουν εξαγάγει από διαφορετικό project. Τα δείγματα εισάγονται μαζί με τις αντίστοιχες συνεδρίες μέτρησης τους. Αν υπάρχουν διπλότυπα, αυτά παρουσιάζονται ως αντίγραφα, γεγονός χρήσιμο όταν θέλουμε η ενισχύσουμε τη σημασία ορισμένων δεδομένων κατά την εκπαίδευση του αλγορίθμου.

- **Εισαγωγή ολόκληρου project:** Με αυτή την επιλογή μεταφέρονται συνολικά όλες οι μετρήσεις και τα δείγματα ενός project, διατηρώντας δομή τους.

Με αυτόν τον τρόπο, το AI-Studio προσφέρει προσαρμοστικότητα στη διαχείριση και συγχώνευση δεδομένων, δίνοντας τη δυνατότητα στον χρήστη να επιλέγει την κατάλληλη μέθοδο σύμφωνα με τις απαιτήσεις της ανάλυσης και της εκπαίδευσης αλγορίθμων

4.6.3 Επισκόπηση Δεδομένων

Κατά τη διαδικασία εισαγωγής των ακατέργαστων δεδομένων στο BME AI-Studio, η εφαρμογή προσφέρει μία πλήρη ανασκόπηση της συνεδρίας μέτρησης, με αυτοματοποιημένη οργάνωση και έλεγχο της πληρότητας των εγγραφών.

Αυτόματος Διαχωρισμός Αρχείων

Εάν η συνεδρία μέτρησης διακοπεί ή ξεπεράσει το όριο μεγέθους αρχείου (297 MB), τα δεδομένα θα αποθηκευτούν σε περισσότερα τμήματα. Το AI-Studio έχει τη δυνατότητα να αναγνωρίσει αυτόματα τα γειτονικά αρχεία και να τα εισάγει ως ενιαία συνεδρία, εξασφαλίζοντας τη συνέχεια και την πληρότητα των δεδομένων.

Πληροφορίες Συνεδρίας

Μόλις γίνει η εισαγωγή, θα εμφανιστούν μερικά βασικά στοιχεία που περιγράφουν τη μέτρηση:

- Αριθμός αισθητήρων που κατέγραψαν δεδομένα (π.χ. στο Dev Kit, οκτώ αισθητήρες),
- Αριθμός συνδυασμών προφίλ θερμοαντήρα/κύκλου λειτουργίας (HP/RDC) που ανιχνεύθηκαν,
- Αναγνωριστικό πλακέτας (unique ID) και τύπος πλακέτας,
- Λειτουργία πλακέτας κατά την καταγραφή,
- Όνομα συνεδρίας, ημερομηνία και ώρα μέτρησης, καθώς και ώρα έναρξης και λήξης.

Χρονικές Πληροφορίες

Η ημερομηνία και ώρα καταγράφονται σε *UTC* και εμφανίζονται στην αντίστοιχη τοπική ζώνη ώρας του χρήστη. Σε περίπτωση που η μπαταρία του RTC έχει αφαιρεθεί ή αποφορτιστεί, η ώρα καταγράφεται από προεπιλογή ως 1/1/1970, οπότε είναι απαραίτητη η χειροκίνητη διόρθωση.

Η ανασκόπηση αυτή δίνει στον χρήστη μία καθαρή εικόνα σχετικά με την εγκυρότητα και την πληρότητα της συνεδρίας, πριν προχωρήσει στη λεπτομερή ανάλυση ή στη διαμόρφωση δειγμάτων

4.6.4 Δεδομένα Δείγματος και Γραφική Απεικόνιση

Αφού ο χρήστης εισαγάγει τα ακατέργαστα δεδομένα στο BME AI-Studio, μπορεί να τα αναλύσει και να τα οργανώσει σε επίπεδο δειγμάτων (specimens). Τα δείγματα αναπαριστούν συγκεκριμένες συνθήκες ή μίξεις αερίων στις οποίες οι αισθητήρες εκτέθηκαν κατά τη διάρκεια της μέτρησης, όπως μία οσμή, ένα αέριο ή μία συγκεκριμένη περιβαλλοντική κατάσταση.

Κανάλια Δεδομένων

Τα δεδομένα αποθηκεύονται και προβάλλονται μέσω τεσσάρων καναλιών:

- Gas Data Channel: περιλαμβάνει 10 σημεία ανά βήμα θερμοαντήρα, αντιπροσωπεύοντας την εξέλιξη της αντίστασης του αισθητήρα αερίων.
- Humidity Data Channel: παρέχει τις μετρήσεις σχετικής υγρασίας.
- Temperature Data Channel: καταγράφει τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- Pressure Data Channel: αποτυπώνει την ατμοσφαιρική πίεση.

Επισημαίνεται ότι στο κανάλι αερίου μπορεί να παρατηρηθεί αποκοπή τιμών στο επίπεδο των 102.400.000, μια συμπεριφορά που είναι φυσιολογική και δεν επηρεάζει την ποιότητα των δεδομένων.

Γραφική Απεικόνιση

Η εφαρμογή προσφέρει διαδραστικά διαγράμματα που επιτρέπουν στον χρήστη να:

- Επιλέγει διαφορετικούς αισθητήρες και κανάλια δεδομένων,
- Πραγματοποιεί ζουμ και εστίαση σε συγκεκριμένα τμήματα,
- Προηγείται εύκολα σε μεγάλες καταγραφές μέσω γραμμής πλοήγησης.

Με αυτόν τον τρόπο, η ανάλυση των δεδομένων καθίσταται πιο άμεση και κατανοητή.

Η απεικόνιση και η ικανότητα διάκρισης των δεδομένων σε δείγματα συμβάλλουν σημαντικά στη βελτίωση της ποιότητας της εκπαίδευσης, διότι προσφέρουν καθαρή εικόνα των περιβαλλοντικών συνθηκών που καταγράφηκαν κατά τη μέτρηση.

4.6.5 Ορισμός και Επεξεργασία Δειγμάτων

Κατά τη διαδικασία ανάλυσης στο BME AI-Studio, ο χρήστης μπορεί να ορίσει και να επεξεργαστεί δείγματα (*specimens*), τα οποία προβάλλουν συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες ή συνθέσεις αερίων που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Το να μπορούμε να διαχειριστούμε τα δείγματα είναι πολύ κρίσιμο, καθώς έτσι καθορίζετε η ποιότητα της εκπαίδευσης και η ακρίβεια των αλγορίθμων που θα προκύψουν.

Ορισμός Δειγμάτων

Ο καθορισμός των *specimens* μπορεί να γίνει με τρεις τρόπους:

- Κατά τη μέτρηση, χρησιμοποιώντας τα κουμπιά S1 και S2 της πλακέτας ή την εφαρμογή AI-Studio Mobile.
- Κατά την εισαγωγή των δεδομένων, μέσω της επιλογής Add Specimen, όπου καθορίζονται χειροκίνητα ο χρόνος έναρξης και λήξης.
- Με ετικέτες, ώστε κάθε δείγμα να συσχετίζεται με συγκεκριμένο αέριο, κατάσταση ή πείραμα.

Επεξεργασία Δειγμάτων

Μετά τον ορισμό τους, τα *specimens* μπορούν να τροποποιηθούν με διάφορους τρόπους:

- Αλλαγή ή προσθήκη ετικετών,
- Προσαρμογή χρόνου έναρξης και λήξης (είτε χειροκίνητα είτε μέσω του διαγράμματος με drag & drop),
- Δυνατότητα ορισμού επικαλυπτόμενων *specimens*,
- Διαγραφή ή μεγέθυνση συγκεκριμένου δείγματος για πιο λεπτομερή ανάλυση.

Η δυνατότητα καθορισμού και επεξεργασίας δειγμάτων παρέχει στον χρήστη τον έλεγχο της διαδικασίας καταγραφής και ανάλυσης, επιτρέποντας μια πιο ακριβή αναπαράσταση των συνθηκών μέτρησης και οδηγώντας σε πιο αξιόπιστη εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων.

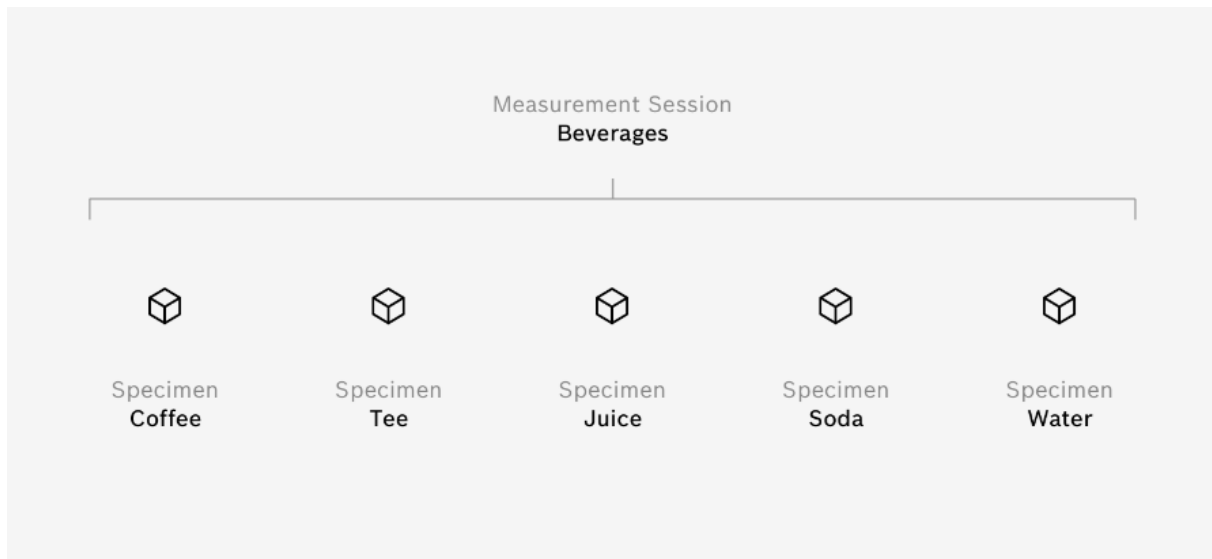
4.7 Συλλογή Δειγμάτων

Αφού γίνει η εισαγωγή των ακατέργαστων δεδομένων, τα δείγματα (*specimens*) αμέσως αποθηκεύονται στη λίστα Specimen Collection. Εκεί παρουσιάζονται σε ομάδες ανά συνεδρία μέτρησης και ταξινομούνται κατά ημερομηνία εισαγωγής, διευκολύνοντας μας την πρόσβαση και την οργάνωση. Το σημείο αυτό λειτουργεί ως το κεντρικό μέρος διαχείρισης των δεδομένων, πριν αυτά αξιοποιηθούν για την εκπαίδευση αλγορίθμων.

Βασικά χαρακτηριστικά:

- Η **συλλογή δειγμάτων** έχει ως στόχο τη συγκέντρωση μετρήσεων που σχετίζονται με μία συγκεκριμένη περίπτωση χρήσης.
- Μας δίνει τη δυνατότητα συλλέξουμε πολλά διαφορετικά δείγματα με την πάροδο του χρόνου.
- Ο χρήστης μπορεί να συνδυάσει διαφορετικά δείγματα για να δοκιμάσει την εκπαίδευση και την αξιολόγηση αλγορίθμων.

Είναι αξιόλογο να σημειώσουμε ότι για κάθε διαφορετική περίπτωση χρήσης προτείνεται η δημιουργία ενός νέου project, με ξεχωριστή συλλογή δειγμάτων. Με τον τρόπο αυτό θα εξασφαλίσουμε ότι τα δεδομένα οργανώνονται με σαφήνεια και μπορούν εύκολα να μεταφερθούν ή να εισαχθούν σε άλλα project, εάν αυτό κριθεί απαραίτητο.



Εικόνα 4.10: Συλλογή δειγμάτων (Specimen Collection)

4.7.1 Διαχείριση Δειγμάτων

Είναι πολύ καθοριστική η σωστή διαχείριση των δειγμάτων στη συλλογή (*Specimen Collection*) για να γίνει η αξιοποίηση των δεδομένων που έχουν εισαχθεί. Το λογισμικό BME AI-Studio παρέχει εργαλεία για ταξινόμηση, αναζήτηση, προβολή και επεξεργασία, ώστε ο χρήστης να μπορεί να οργανώσει τα δείγματα σύμφωνα με τις ανάγκες του εκάστοτε project.

Ταξινόμηση και Αναζήτηση

- Τα δείγματα μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τις στήλες της λίστας (αύξουσα ή φθίνουσα σειρά).
- Η αναζήτηση γίνεται μέσω ειδικού πεδίου, επιτρέποντας το γρήγορο φιλτράρισμα και την εύρεση συγκεκριμένων δειγμάτων.

Ρυθμίσεις Συνεδρίας

- Για κάθε συνεδρία μέτρησης, υπάρχει η δυνατότητα πρόσβασης σε ρυθμίσεις μέσω του κουμπιού *Settings*.
- Εκεί ο χρήστης μπορεί να δει το όνομα και την ημερομηνία της συνεδρίας, να επεξεργαστεί ή να προσθέσει νέους ορισμούς δειγμάτων, αλλά και να αφαιρέσει υπάρχοντες.

Προβολή και Επιλογή Δειγμάτων

- Η επιλογή ενός δείγματος εμφανίζει στη δεξιά πλευρά του παραθύρου τις λεπτομερείς πληροφορίες του, όπως ετικέτες, σχόλια και χρονικά στοιχεία.
- Υπάρχει η δυνατότητα επιλογής πολλών δειγμάτων ταυτόχρονα, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται οι κοινές και οι διαφορετικές τιμές τους.

- Η επιλογή μπορεί να γίνει είτε σε επίπεδο μεμονωμένων δειγμάτων είτε σε επίπεδο ολόκληρης συνεδρίας, επιτρέποντας πιο ευέλικτη διαχείριση.

Με τον τρόπο αυτό, το AI-Studio διασφαλίζει ότι ο χρήστης έχει απόλυτο έλεγχο στα δεδομένα, ενώ παράλληλα διατηρεί την ικανότητα να οργανώνει τις πληροφορίες σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εκπαίδευσης αλγορίθμων.

4.7.2 Λειτουργίες Δειγμάτων

Το BME AI-Studio δίνει μια ποικιλία από λειτουργίες που επιτρέπουν στον χρήστη να εξάγει, να αφαιρεί ή να επεξεργάζεται δείγματα, ώστε να τα χρησιμοποιήσει πιο αποτελεσματικά στην εκπαίδευση και την ανάλυση. Παρακάτω παρουσιάζεται η διαδικασία:

Εξαγωγή Δεδομένων Δείγματος

Η εξαγωγή δίνει τη δυνατότητα να δημιουργηθούν ξεχωριστά αρχεία που περιλαμβάνουν όλα τα στοιχεία του δείγματος (ετικέτες, σχόλια, μεταδεδομένα).

- Χρήσιμη για τη χρήση των δειγμάτων σε άλλα έργα.
- Επιτρέπει την κοινή χρήση των δεδομένων με τρίτους.
- Λειτουργεί ως μέθοδος δημιουργίας αντιγράφων ασφαλείας.

Διαγραφή Δειγμάτων

Η αφαίρεση δείγματος αφορά αποκλειστικά τον ορισμό του (χρόνος έναρξης και λήξης, ετικέτες, σχόλια) και όχι τα ίδια τα ακατέργαστα δεδομένα μέτρησης (Raw Data), τα οποία παραμένουν διαθέσιμα αν υπάρχουν άλλα δείγματα στην ίδια συνεδρία.

- Αν διαγραφούν όλα τα δείγματα μιας συνεδρίας, διαγράφονται και τα ακατέργαστα δεδομένα που συνδέονται με αυτή.
- Το AI-Studio ζητά πάντα επιβεβαίωση πριν τη διαγραφή.
- Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή αν το δείγμα έχει συσχετιστεί με αλγόριθμο, καθώς η διαγραφή του μπορεί να επηρεάσει την εκπαίδευση.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, οι λειτουργίες εξαγωγής και διαγραφής να παρέχουν την απαραίτητη και μόνο ευελιξία στη διαχείριση των δεδομένων, διασφαλίζοντας παράλληλα ότι η διαδικασία παραμένει ελεγχόμενη και αναστρέψιμη όπου αυτό είναι εφικτό.

4.7.3 Χαρακτηριστικά Δειγμάτων

Κάθε δείγμα (speciment) συνοδεύεται από ουσιώδη χαρακτηριστικά που επιτρέπουν στον χρήστη να το εκφράσει με σαφήνεια και να το κατηγοριοποιήσει σύμφωνα με τις εκπαιδευτικές απαιτήσεις. Αυτά τα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν ετικέτες, σχόλια και μεταδεδομένα, που βελτιώνουν την κατανόηση και την αξιοπιστία των δεδομένων.

Ετικέτες (Labels)

- Οι ετικέτες καθορίζουν τι ακριβώς έχει μετρηθεί (π.χ. αντικείμενο, κατάσταση, οσμή ή αέριο).
- Συνιστάται η χρήση σαφών και λεπτομερών περιγραφών.

- Οι ετικέτες δεν πρέπει να συγχέονται με τις κλάσεις· πολλά διαφορετικά labels μπορούν να ενταχθούν αργότερα στην ίδια κατηγορία εκπαίδευσης.

Σχόλια (Comments)

- Τα σχόλια παρέχουν πρόσθετες πληροφορίες ή παρατηρήσεις για το δείγμα.
- Βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση και διάκριση δειγμάτων με παρόμοιες μετρήσεις.

Μεταδεδομένα (Meta Data)

- Επιτρέπουν την αποθήκευση δομημένων πληροφοριών (αριθμητικών, κατηγορικών ή λογικών) για τα δείγματα.
- Ο χρήστης μπορεί να ορίσει έως 16 κλειδιά μεταδεδομένων (π.χ. *Ηλικία από συγκομιδή [ημέρες]*).
- Τα μεταδεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως στόχοι σε αλγορίθμους παλινδρόμησης, υπό την προϋπόθεση ότι οι τιμές είναι αριθμητικές.
- Τυχόν αλλαγές ή διαγραφές κλειδιών επηρεάζουν καθολικά όλα τα δείγματα και ενδέχεται να έχουν μη αναστρέψιμες συνέπειες, ειδικά όταν συνδέονται με ήδη εκπαιδευμένους αλγορίθμους.

Η χρήση ετικετών, σχολίων και μεταδεδομένων επιτρέπει την πιο ακριβή περιγραφή και διαφοροποίηση των δειγμάτων, διευκολύνοντας τη μελλοντική εκπαίδευση και αξιολόγηση των αλγορίθμων.

4.7.4 Τεχνικές Πληροφορίες Δειγμάτων

Κάθε δείγμα συνοδεύεται από τεχνικά στοιχεία σχετικά με τη διαδικασία καταγραφής του, την παρελθούσα διάρκεια και τη διαρρύθμιση της πλακέτας που εφαρμόστηκε. Οι πληροφορίες αυτές είναι καθοριστικές για την κατανόηση της αξίας και της αξιοπιστίας των δεδομένων.

Στοιχεία Συνεδρίας

- **Συνεδρίαση:** Η περίοδος μέτρησης στην οποία ανήκει το δείγμα.
- **Ώρα έναρξης και λήξης:** Καθορίζουν πότε καταγράφηκε το δείγμα, με τις χρονικές πληροφορίες να εμφανίζονται αυτόματα στην τοπική ζώνη ώρας (από τα δεδομένα UTC).
- **Διάρκεια:** Ο συνολικός χρόνος μέτρησης.
- **Σύνολο κύκλων:** Ο αριθμός των κύκλων σάρωσης που καταγράφηκαν.
- **Κύκλοι που μειώθηκαν:** Οι ημιτελείς ή ελλιπείς κύκλοι που απορρίφθηκαν κατά την εισαγωγή.
- **Υπόλοιποι κύκλοι:** Ο αριθμός των έγκυρων κύκλων που διατηρήθηκαν.

Διαμόρφωση Πλακέτας

- **Αναγνωριστικό πίνακα:** Μοναδικό ID της πλακέτας BME που χρησιμοποιήθηκε.
- **Τύπος πλακέτας:** Ορίζει το συγκεκριμένο μοντέλο BME που κατέγραψε τα δεδομένα.
- **Πίνακας λειτουργίας:** Η λειτουργία της πλακέτας κατά την καταγραφή.

- **Προφίλ θερμαντήρων:** Οι ρυθμίσεις των θερμαντήρων που χρησιμοποιήθηκαν (διαθέσιμες λεπτομέρειες με την επιλογή *Show Heater Profiles*).
- **Κύκλος λειτουργίας (Duty Cycles):** Ορίζει τον τρόπο με τον οποίο οι θερμαντήρες εναλλάσσονται (διαθέσιμες λεπτομέρειες με την επιλογή *Show Duty Cycles*).
- **Διάταξη πίνακα:** Περιγράφει πώς καταναμήθηκαν οι συνδυασμοί HP/RDC στους αισθητήρες της πλακέτας.

Οι τεχνικές πληροφορίες δίνουν στον χρήστη μια ολοκληρωμένη εικόνα για το πώς πραγματοποιήθηκε η μέτρηση, διασφαλίζοντας την αξιοπιστία των δειγμάτων και επιτρέποντας την αναπαραγωγή των πειραμάτων.

4.8 Εκπαίδευση Αλγορίθμων

Η παρούσα ενότητα σχετίζεται με την αξιοποίηση των στοιχείων από τη Συλλογή Δειγμάτων για την ανάπτυξη και εκπαίδευση αλγορίθμων. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να συνθέσει πολλούς αλγόριθμους με ποικιλία ρυθμίσεων, να αξιολογήσει την απόδοσή τους και να επιλέξει τον πιο κατάλληλο για κάθε συγκεκριμένη περίπτωση. Οι εκπαιδευμένοι αλγόριθμοι μπορούν να αποθηκευτούν σε μορφή αρχείου ρύθμισης για χρήση με το λογισμικό BSEC [2], [12].

4.8.1 Διαχείριση Αλγορίθμων

Το παρακάτω κομμάτι καλύπτει τον κύκλο ζωής των αλγορίθμων στο My Algorithms: από τη δημιουργία, τη ρύθμιση και την εκπαίδευση, έως την αντιγραφή για πειραματισμό και τη διαγραφή όταν δεν χρειάζονται. Στόχος είναι να οργανώνεις καθαρά τις εκδοχές σου και να δοκιμάζεις γρήγορα διαφορετικές ρυθμίσεις.

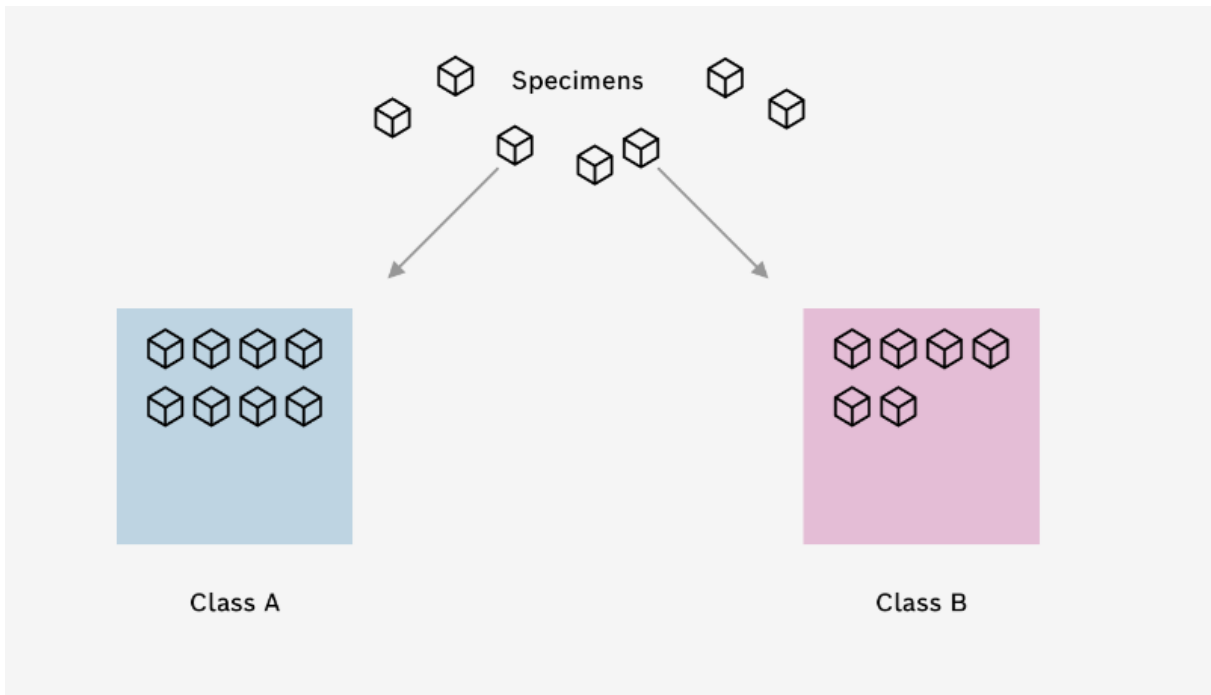
- **Δημιουργία:** *New Algorithm* και ορισμός βασικών στοιχείων (όνομα, τύπος—classification/regression).
- **Ρυθμίσεις:** στο *Algorithm Settings* επιλέγεις δείγματα/κλάσεις ή στόχους, κανάλια δεδομένων και παραμέτρους εκπαίδευσης.
- **Εκπαίδευση:** *Train Algorithm*· η διάρκεια εξαρτάται από τον όγκο/κανάλια δεδομένων.
- **Αντιγραφή:** *Duplicate Algorithm* για δοκιμή εναλλακτικών ρυθμίσεων χωρίς να χάσεις το αρχικό μοντέλο.
- **Διαγραφή:** *Delete Algorithm* όταν μια εκδοχή δεν είναι πλέον χρήσιμη.

Έτσι ο χρήστης διατηρεί οργανωμένο «χαρτοφυλάκιο» μοντέλων και συγκρίνει αποδοτικά τις εκδόσεις πριν περάσει σε αξιολόγηση κι εξαγωγή για BSEC.

4.8.2 Τύποι Αλγορίθμων

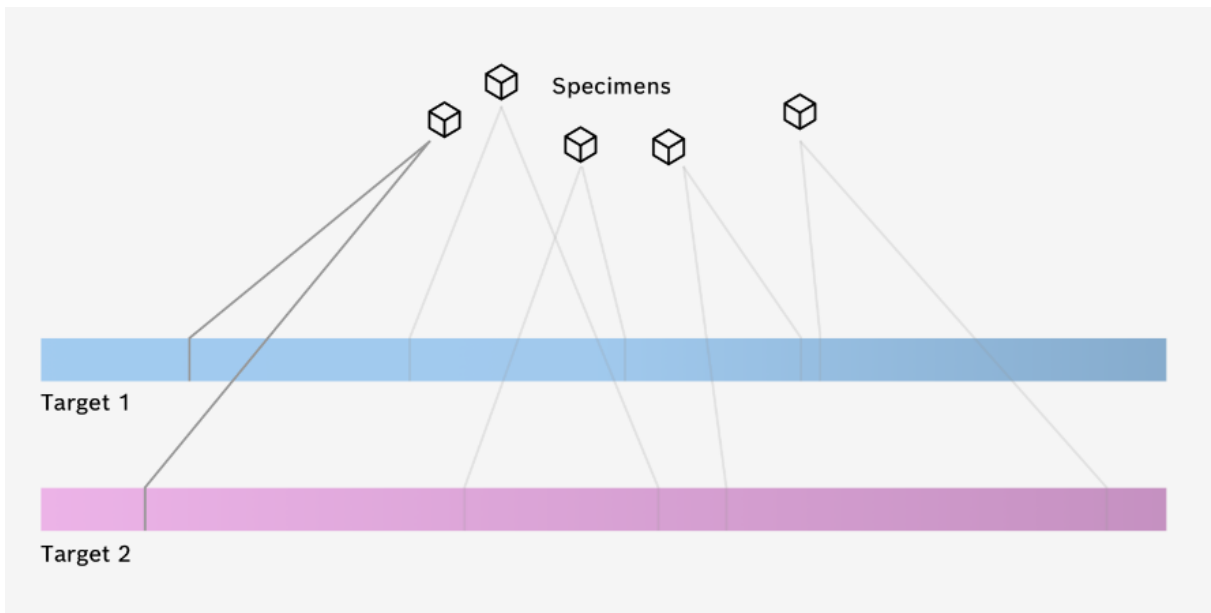
Όπως αναφέρθηκε υπάρχουν δύο τύποι αλγορίθμων. Πιο συγκεκριμένα:

Classification (Ταξινόμηση): Χρησιμοποιείται για κατηγορηματικές εξόδους (π.χ. Espresso vs Φίλτρον, ενώ είναι και τα δύο στην κατηγορία του καφέ). Βασίζεται σε κλάσεις (classes) που δημιουργούνται από δείγματα και επιτρέπει στο σύστημα να ξεχωρίζει διαφορετικές κατηγορίες δεδομένων.



Εικόνα 4.11: Διαδικασία ταξινόμησης

Regression (Παλινδρόμηση): Χρησιμοποιείται για αριθμητικές/συνεχείς εξόδους (π.χ. συγκέντρωση αερίου). Αντί για κατηγορίες, ορίζονται στόχοι (targets) μέσω μεταδεδομένων, ώστε ο αλγόριθμος να προβλέπει συνεχείς τιμές.



Εικόνα 4.12: Διαδικασία παλινδρόμησης

4.8.3 Δεδομένα Εκπαίδευσης

Τα δεδομένα εκπαίδευσης ποικίλουν ανάλογα με τα παρακάτω:

Κλάσεις (Classes): Αντιπροσωπεύουν διαφορετικές συνθέσεις αερίων (π.χ. Μήλα, Πορτοκάλια). Ορίζουν το πλαίσιο ταξινόμησης, ώστε ο αλγόριθμος να μαθαίνει να ξεχωρίζει τις ομάδες.

Στόχοι (Targets): Αριθμητικές ποσότητες για παλινδρόμηση (π.χ. % καφεΐνης). Δίνουν τη δυνατότητα πρόβλεψης συγκεκριμένων μεγεθών.

Κοινά δεδομένα (HP/RDC): Ο αλγόριθμος εκπαιδεύεται μόνο σε συνδυασμούς που υπάρχουν σε όλα τα δείγματα. Αυτό εξασφαλίζει συνέπεια και αποτρέπει σφάλματα εκπαίδευσης.

Ισορροπία δεδομένων: Τα δείγματα πρέπει να είναι κατανομημένα ομοιόμορφα για να αποφευχθούν παραμορφώσεις. Έτσι δεν εκπαιδεύεται παραπάνω σε μία μόνο κατηγορία.

4.8.4 Ρυθμίσεις Εκπαίδευσης

Είναι πολύ βασικό να λειτουργεί το πρόγραμμα με συνοχή, δηλαδή αρχή, μέση και τέλος. Γεγονός που το καθιστά σε σωστή λειτουργία είναι να γίνουν οι απαραίτητες ρυθμίσεις για την εκπαίδευση [9]. Μερικές από τις ρυθμίσεις που κάνουμε είναι:

Τα Κανάλια Δεδομένων: Το βασικό είναι το Gas Data Channel (10 σημεία), ενώ μπορούν να προστεθούν υγρασία, θερμοκρασία ή πίεση. Η χρήση τους όμως θέλει προσοχή, γιατί μπορεί να οδηγήσει σε παραμορφωμένα αποτελέσματα.

Το Φιλτράρισμα (Clipping prevention): Αγνοούνται χαμηλές θερμοκρασίες θερμοαντήρα (<125°C) για καθαρότερα δεδομένα και πιο αξιόπιστη εκπαίδευση.

Η Αύξηση Δεδομένων (Data Augmentation): Προσθήκη συνθηκών «γήρανσης» αισθητήρα (18, 60 ή 120 μήνες) για να προσομοιωθεί η πραγματική χρήση και να δημιουργηθούν πιο ανθεκτικοί αλγόριθμοι.

Το Μέθοδος Εκπαίδευσης: Χρησιμοποιείται ο ADAM optimizer με batch size (4, 16, 32, 64), που καθορίζει πόσα δεδομένα επεξεργάζονται ανά βήμα.

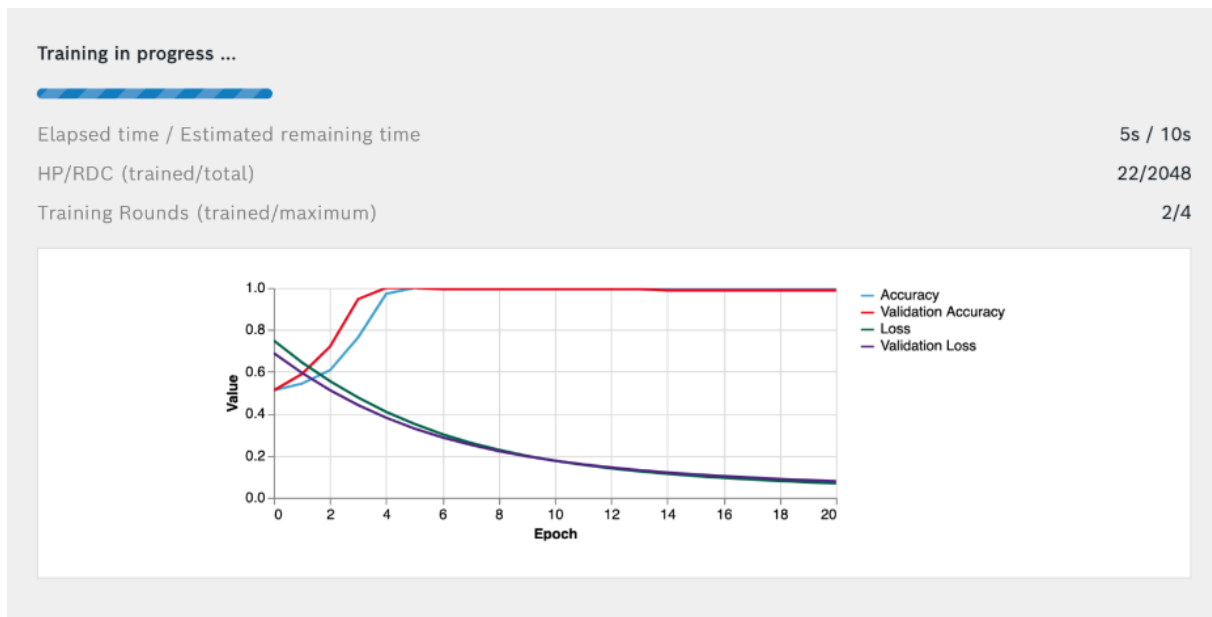
Οι Μέγιστοι Γύροι (epochs): Περισσότεροι γύροι οδηγούν σε καλύτερη ακρίβεια, αλλά απαιτούν περισσότερο χρόνο υπολογισμού.

Ο Διαχωρισμός Δεδομένων: Τα δεδομένα χωρίζονται σε εκπαίδευση και επικύρωση, ώστε να ελεγχθεί η αξιοπιστία του μοντέλου.

Οι Συναρτήσεις Απώλειας: Για Classification χρησιμοποιείται Cross-Entropy Loss, ενώ για Regression χρησιμοποιούνται L1 (ανθεκτική σε ακραίες τιμές) ή L2 (σταθερότερη).

4.8.5 Παρακολούθηση Εκπαίδευσης

Κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης παρουσιάζονται βασικά στοιχεία για την πορεία, όπως: ο χρόνος που έχει περάσει, ο υπολειπόμενος χρόνος, οι συνδυασμοί HP/RDC που έχουν ήδη εκπαιδευτεί και ο αριθμός των γύρων (epochs) που ολοκληρώθηκαν. Έτσι ο χρήστης μπορεί να έχει μια ξεκάθαρη εικόνα για το πού βρίσκεται η διαδικασία.



Εικόνα 4.13: Παρακολούθηση εκπαίδευσης

4.9 Αξιολόγηση Αλγορίθμων

Η αξιολόγηση αποτελεί το πιο σημαντικό στάδιο καθώς δείχνει πόσο καλά λειτουργεί ο αλγόριθμος στην πράξη. Ο χρήστης ελέγχει την ακρίβεια των προβλέψεων και την ανθεκτικότητα του μοντέλου σε διαφορετικές συνθήκες [20]. Η ποιότητα εξαρτάται κυρίως από:

- **Διακύμανση δεδομένων εισόδου** (όσο μεγαλύτερη τόσο καλύτερη εκπαίδευση),
- **Απόδοση νευρωνικού δικτύου** (όσο υψηλότερη τόσο καλύτερα αποτελέσματα).

4.9.1 Δείκτες Απόδοσης

Οι δείκτες χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- **Ταξινόμηση (Classification):**
 - **Ακρίβεια (Accuracy):** ποσοστό σωστών προβλέψεων.
 - **Βαθμολογία F1:** συνδυάζει ακρίβεια & ανάκληση, χρήσιμη σε άνισες κλάσεις.
 - **False/Positive Rate:** δείχνει πόσοι ψευδείς συναγερμοί εμφανίζονται.

Recall per class	$R = \frac{TP}{TP + FN}$
Precision per class	$P = \frac{TP}{TP + FP}$
Macro-averaged recall	$MR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i$
Macro-averaged precision	$MP = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$
Macro-averaged F1 Score	$F1 = \frac{2 \cdot MR \cdot MP}{MR + MP}$

Εικόνα 4.14: Τύποι για υπολογισμό ταξινόμησης

- **Παλινδρόμηση (Regression):**

$$\frac{MSE}{RMSE} : \text{μέτρα σφάλματος, με χαμηλές τιμές} = \text{καλύτερη πρόβλεψη} \quad (4.1)$$

Το MSE αποτελεί μια συνήθη αξιολόγηση για αλγόριθμους παλινδρόμησης. Μας δείχνει πόσο κοντά είναι οι εκτιμήσεις του μοντέλου στις πραγματικές τιμές, με τις μικρότερες τιμές να υποδεικνύουν καλύτερη απόδοση. Με λίγα λόγια, υπολογίζει τη μέση τετραγωνική απόκλιση μεταξύ των αναμενόμενων και των πραγματικών τιμών, γεγονός που σημαίνει ότι τα μεγαλύτερα σφάλματα τιμωρούνται έντονα. Αυτό συμβαίνει με τη λήψη κάθε σφάλματος (διαφορά μεταξύ προβλέψεων και πραγματικού), τετραγωνίζοντας το (για να εξαλειφθούν τυχόν αρνητικές τιμές), προσθέτοντας αυτά τα τετράγωνα και στη συνέχεια υπολογίζοντας τον μέσο όρο αυτού του αθροίσματος για όλα τα n σημεία στο σύνολο δεδομένων επικύρωσης.

$$MSE = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot \sum (y_{\text{actual}} - y_{\text{pred}})^2 \quad (4.2)$$

Το RMSE είναι συχνή επιλογή και μια ευρέως διαδεδομένη μέτρηση για την αξιολόγηση της απόδοσης των μοντέλων παλινδρόμησης, καθώς βρίσκεται στις ίδιες μονάδες με τη μεταβλητή-στόχο, καθιστώντας την ερμηνεία και την κατανόηση αυτού πιο εύκολη.

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (4.3)$$

- MAE: μέσο απόλυτο σφάλμα, πιο ανθεκτικό σε ακραίες τιμές.

Το MAE υπολογίζει τον μέσο όρο των απόλυτων διαφορών ανάμεσα στις προβλεπόμενες και στις πραγματικές τιμές. Ενημερώνει τον χρήστη για την απόσταση των προβλέψεων από τις πραγματικές τιμές κατά μέσο όρο, με τις μικρότερες τιμές να δείχνουν μεγαλύτερη ακρίβεια. Σε αντίθεση με το MSE, δε χρησιμοποιεί το τετράγωνο για τα σφάλματα, επομένως δεν ενισχύει τα μεγαλύτερα σφάλματα και μπορεί έτσι να είναι πιο ανθεκτικό σε ακραίες τιμές.

$$MAE = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot \sum |y_{\text{actual}} - y_{\text{pred}} \quad (4.4)$$

- Όλα μπορούν να εκφραστούν και σε ποσοστά (%).

Το MSE% είναι πολύ παανομοιότυπο με το MSE, αλλά κανονικοποιημένο σε σχέση με τη μέγιστη χρησιμοποιούμενη τιμή στην εκπαίδευση για τον αντίστοιχο στόχο και εκφράζεται ως ποσοστό.

$$MSE\% = \frac{MSE}{\text{value_max}} \quad (4.5)$$

Το RMSE% είναι πολύ παρόμοιο με το RMSE, αλλά έχει κανονικοποιηθεί σε σχέση με τη μέγιστη τιμή που χρησιμοποιήθηκε στην εκπαίδευση για τον αντίστοιχο στόχο (κλειδί Meta Data) και εκφράζεται σε ποσοστά.

$$RMSE\% = \frac{RMSE}{\text{value_max}} \quad (4.6)$$

Το MAE% μοιάζει αρκετά με το RMSE, αλλά κανονικοποιημένο σε σχέση με τη μεγαλύτερη χρησιμοποιούμενη τιμή στην εκπαίδευση για τον αντίστοιχο στόχο (κλειδί Meta Data) και αναφέρεται ως ποσοστό.

$$MAE\% = \frac{MAE}{\text{value_max}} \quad (4.7)$$

4.9.2 Εργαλεία Αξιολόγησης

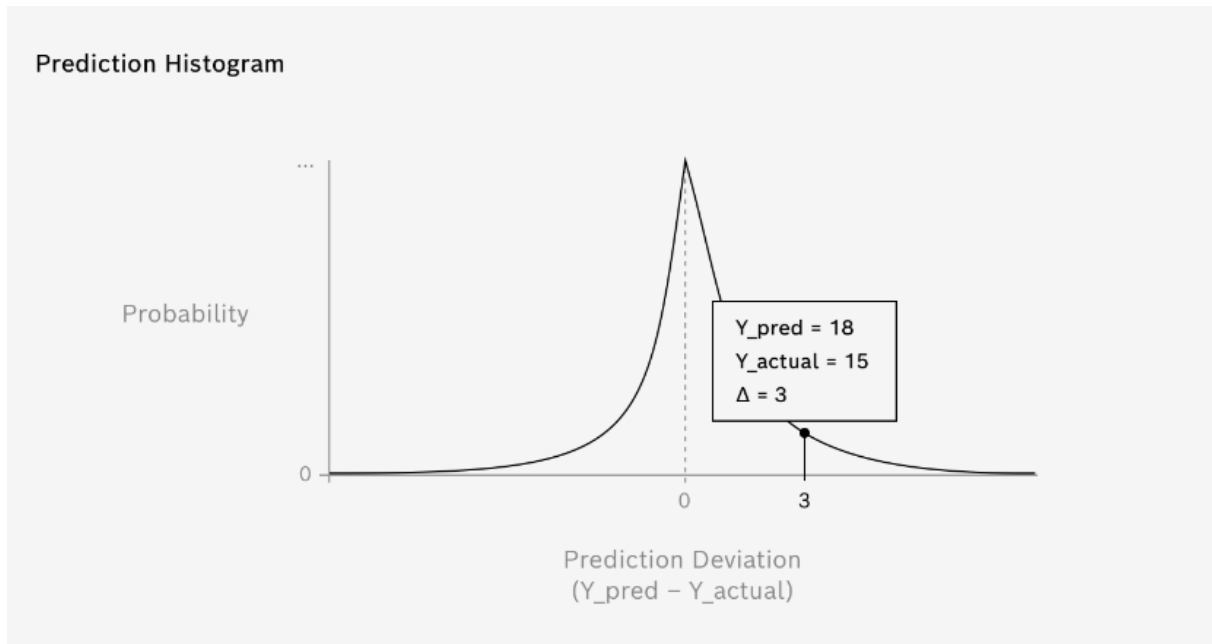
- **Πίνακας Σύγκρισης:** για ταξινόμηση, δείχνει σωστές/λάθος προβλέψεις ανά κλάση.

Confusion matrix		Predicted class	
		Coffee	Neutral air
Actual class	Coffee	TP True positive	FN False negative
	Neutral air	FP False positive	TN True negative

Εικόνα 4.15: Πίνακας σύγκρισης

Ο Πίνακας Σύγκρισης βοηθά τον χρήστη να αξιολογήσει πόσο σοβαρά είναι τα σφάλματα για τη συγκεκριμένη περίπτωση χρήσης. Οι συναγερμοί που είναι ψευδείς προς τη μία ή την άλλη κατεύθυνση μπορεί να έχουν πολύ διαφορετικό/αντίθετο αντίκτυπο στην περίπτωση χρήσης μας. Για παράδειγμα, εάν θέλουμε να ανιχνεύσουμε Ajax για να προειδοποιήσουμε τον χρήστη, ο οποίος μπορεί να έχει αλλεργία σε κάποια ουσία του Ajax, η περίπτωση όπου ο αλγόριθμος δεν κατάφερε να ανιχνεύσει το Ajax (η λεγόμενη «ψευδώς αρνητική περίπτωση») είναι πολύ πιο σοβαρή από την αντίθετη περίπτωση, όπου έχουμε συναγερμό, αν και δεν εμπλέκεται Ajax (η λεγόμενη «ψευδώς/θετική περίπτωση»).

- **Ιστόγραμμα Πρόβλεψης:** για παλινδρόμηση, δείχνει την κατανομή των σφαλμάτων γύρω από το μηδέν.



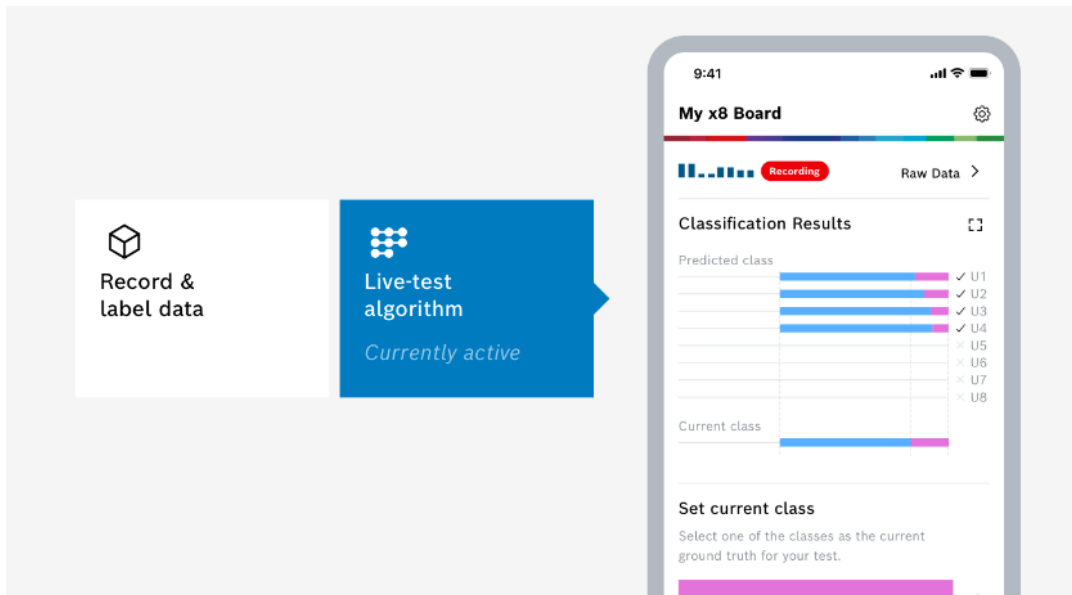
Εικόνα 4.16: Διάγραμμα ιστορικού πρόβλεψης

Το Ιστόγραμμα Πρόβλεψης μπορεί να μας βοηθήσει να κατανοήσουμε το αποτέλεσμα των προβλημάτων-σφαλμάτων για τη συγκεκριμένη περίπτωση χρήσης μας. Για παράδειγμα, σε ένα μοντέλο πρόβλεψης θερμοκρασίας, η υποεκτίμηση της θερμοκρασίας (αρνητικό σφάλμα πρόβλεψης) μπορεί να έχει διαφορετικές συνέπειες από την υπερεκτίμησή της (θετικό σφάλμα σφάλματος). Αυτή η κατανόηση που θα βοηθήσει τον χρήστη να πραγματοποιήσει τις απαραίτητες προσαρμογές στο μοντέλο ή να προετοιμάσει κατάλληλες στρατηγικές μετρήσεις για τα σφάλματα.

4.9.3 Πρόσθετες Δοκιμές & Βελτιώσεις

Ο αλγόριθμος μετά την εκπαίδευση μπορεί να δοκιμαστεί με νέα δεδομένα που δεν είχαν χρησιμοποιηθεί. Αυτό δείχνει πόσο ανθεκτικός είναι σε άγνωστες συνθήκες. Υπάρχει δυνατότητα:

- Test Algorithm για νέα δείγματα,
- Αποθήκευση αποτελεσμάτων σε CSV,
- Live Testing με την εφαρμογή AI-Studio Mobile.



Εικόνα 4.17: Live Testing από το AI-Studio Mobile

Παράλληλα, πρέπει να προσέχεται η ποιότητα των δεδομένων:

- Πολύ μικρή διακύμανση → υπερεκπαίδευση (κορεσμός), δεν γενικεύει.
- Υπερβολική διακύμανση → υποεκπαίδευση (έλλειψη), χαμηλή απόδοση.

Η λύση είναι ισορροπημένα δεδομένα που καλύπτουν ρεαλιστικά σενάρια.

4.10 Mobile εφαρμογή (BME AI-Studio Mobile)

Η εφαρμογή BME AI-Studio Mobile επιτρέπει τη σύνδεση με το ολοκληρωμένο με τους BME688, την καταγραφή δεδομένων με ετικέτες (labels) σε πραγματικό χρόνο και τη ζωντανή δοκιμή των αλγορίθμων στο πεδίο [2].

4.10.1 Σύνδεση με πλακέτα (Connecting to a Board)

Η εφαρμογή BME AI-Studio Mobile συνδέεται με το ολοκληρωμένο μέσω Bluetooth. Η αρχική οθόνη της εφαρμογής είναι η My Boards, όπου εμφανίζεται μια λίστα με όλες τις διαθέσιμες πλακέτες.

Για την προσθήκη νέας πλακέτας στη λίστα:

1. Η πλακέτα τροφοδοτείται με ρεύμα.
2. Επιλέγεται η εντολή Add new Board.
3. Η εφαρμογή αναζητά διαθέσιμες συσκευές στην περιοχή.
4. Ο χρήστης επιλέγει την πλακέτα του, της δίνει ένα όνομα και πατάει Add Board.

Από εκείνη τη στιγμή, η πλακέτα αποθηκεύεται μόνιμα στη λίστα. Η σύνδεση πραγματοποιείται όποτε θέλουμε μέσω της επιλογής Connect, ενώ υπάρχει δυνατότητα προσθήκης και επιπλέον πλακετών. Σε περίπτωση που η εφαρμογή δεν εντοπίσει την πλακέτα, πρέπει να ελεγχθεί ότι:

- Η πλακέτα είναι συνδεδεμένη σε τροφοδοσία και λειτουργεί.
- Το Bluetooth είναι ενεργοποιημένο στη συσκευή.

- Η εφαρμογή διαθέτει δικαιώματα χρήσης Bluetooth. Αν τα δικαιώματα έχουν απορριφθεί κατά λάθος, χρειάζεται ενεργοποίησή τους από τις ρυθμίσεις συστήματος ή επανεγκατάσταση της εφαρμογής.

Σημείωση: 1) Με τη σύνδεση της συσκευής σε τροφοδοσία, ξεκινά αυτόματα η καταγραφή δεδομένων αερίων, ακόμα και χωρίς την εγκατάσταση της εφαρμογής. 2) Αν γίνει σύνδεση της πλακέτας μέσω της εφαρμογής, η τρέχουσα καταγραφή σταματά προσωρινά και συνεχίζεται μόλις ολοκληρωθεί η σύνδεση.

4.10.2 Δύο λειτουργίες (Two modes of Operation)

Αφού πραγματοποιηθεί η σύνδεση με την πλακέτα, η εφαρμογή παρέχει δύο κύριες λειτουργίες:

1. Καταγραφή & Επισήμανση Δεδομένων (Record & Label Data)

Σε αυτή τη λειτουργία καταγράφονται τα ακατέργαστα δεδομένα αερίων από την συσκευή με τους BME688, ενώ παράλληλα υπάρχει η δυνατότητα επισήμανσης (labeling) διαφορετικών δειγμάτων σε πραγματικό χρόνο.

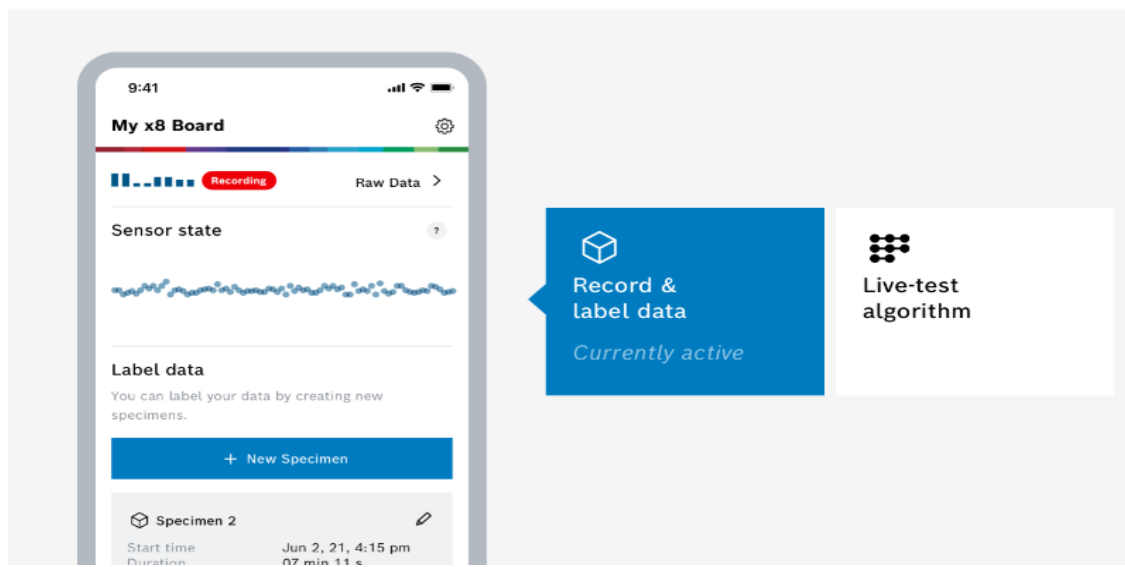
- Για την ενεργοποίηση της λειτουργίας απαιτείται η ύπαρξη ενός αρχείου ρυθμίσεων πλακέτας (.bmeconfig) στην κάρτα SD.

2. Αλγόριθμος Ζωντανής Δοκιμής (Live-Test Algorithm)

Σε αυτή τη λειτουργία πραγματοποιείται ζωντανή δοκιμή αλγορίθμων που έχουν εξαχθεί από το BME AI-Studio, με χρήση πραγματικών δειγμάτων.

- Για την εκτέλεση απαιτούνται δύο αρχεία στην κάρτα SD: το αρχείο διαμόρφωσης BSEC (.config) και το αρχείο ρυθμίσεων αλγορίθμου (.aicnfig).

4.10.3 Καταγραφή και Επισήμανση Δεδομένων (Record & Label Data)



Εικόνα 4.18: Καταγραφή και επισήμανση δεδομένων

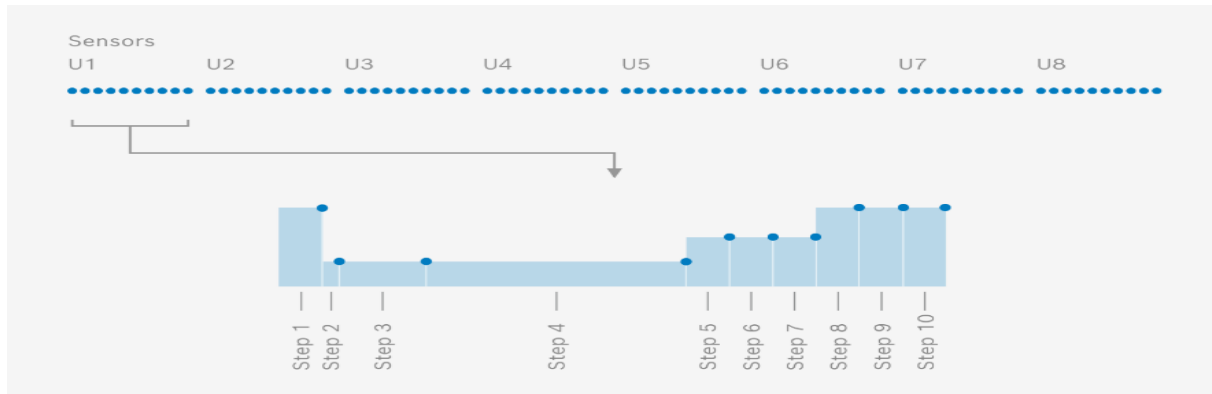
Η λειτουργία **Record & Label Data** χρησιμοποιείται όταν ζητείται η καταγραφή ακατέργαστων δεδομένων αερίων από το ολοκληρωμένο, με δυνατότητα ταυτόχρονης επισήμανσης (labeling) διαφορετικών δειγμάτων σε πραγματικό χρόνο.

Σε αυτή τη λειτουργία παρέχονται οι εξής δυνατότητες:

- Προβολή της τρέχουσας κατάστασης του αισθητήρα (sensor state).
- Δημιουργία και επισήμανση νέων δειγμάτων κατά τη διάρκεια της καταγραφής.
- Προβολή των καταγεγραμμένων ακατέργαστων δεδομένων (raw data).

Σημείωση: Για τη λειτουργία αυτή απαιτείται η ύπαρξη αρχείου διαμόρφωσης πλακέτας (.bmeconfig) στην κάρτα SD. Τα αρχεία αυτά δημιουργούνται μέσω της επιτραπέζιας εφαρμογής BME AI-Studio, επιλέγοντας Configure BME Board και κατόπιν Save to file (βλ. ενότητα Configure Board)

A) Κατάσταση Αισθητήρα (Sensor State)

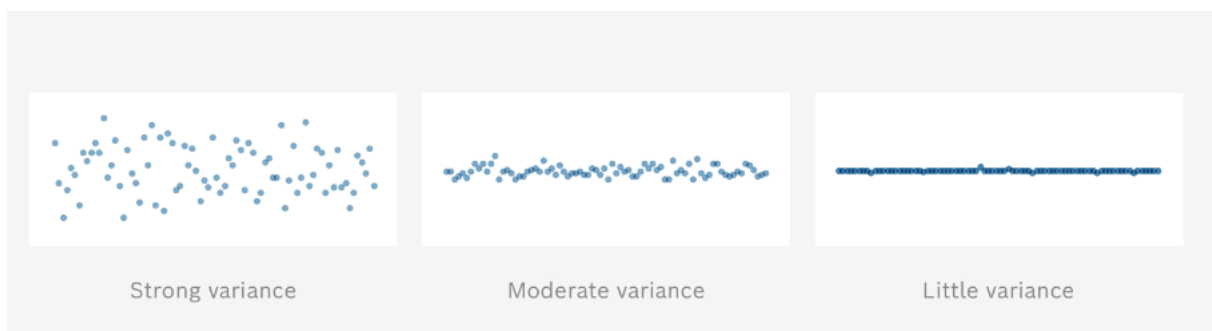


Εικόνα 4.19: Γράφημα της κατάστασης του αισθητήρα

Το γράφημα **Sensor State** απεικονίζει τη σταθερότητα (ή διακύμανση) των ακατέργαστων δεδομένων που καταγράφηκαν. Απαρτίζεται από πλέγμα 8×10 σημείων, όπου κάθε σημείο αντιπροσωπεύει ένα από τα δέκα βήματα σε ένα από τα οκτώ προφίλ θέρμανσης που χρησιμοποιούνται για τους οκτώ αισθητήρες της πλακέτας.

Η **κατακόρυφη κίνηση** των σημείων δείχνει τον βαθμό σταθερότητας του σήματος του αντίστοιχου αισθητήρα:

- **Μεγάλη κίνηση** → τα δεδομένα παρουσιάζουν υψηλή διακύμανση και δεν είναι ακόμη σταθερά. Συνιστάται αναμονή και συνέχιση της καταγραφής.
- **Μέτρια κίνηση** → τα δεδομένα έχουν μέτρια διακύμανση και δεν έχουν σταθεροποιηθεί πλήρως. Απαιτείται λίγη επιπλέον αναμονή.
- **Ελάχιστη κίνηση** → τα δεδομένα είναι σταθερά. Πρόκειται για την επιθυμητή κατάσταση· η καταγραφή πρέπει να συνεχιστεί.



Κατά την καταγραφή δειγμάτων, προτείνεται να συλλέγονται δεδομένα με όσο το δυνατόν μικρότερη διακύμανση.

Σημείωση: Αν χρησιμοποιηθεί αρχείο ρυθμίσεων με Duty Cycle που περιλαμβάνει κύκλους ύπνου (Sleeping Cycles), οι αισθητήρες ενδέχεται να μην προλαβαίνουν να φτάσουν σε σταθερή κατάσταση πριν ξεκινήσει ο επόμενος κύκλος ύπνου.

B) Επισημάνση δειγμάτων σε πραγματικό χρόνο (Label specimens on the fly)

Κατά τη διάρκεια της καταγραφής δεδομένων, η εφαρμογή δίνει τη δυνατότητα να επισημάνει ο χρήστης τα δείγματα σε πραγματικό χρόνο. Δηλαδή, μπορεί να επιλέξει *New Specimen* για κάθε νέο δείγμα και να εισάγει το αντίστοιχο όνομα (label) και σχόλιο.

Οι ετικέτες (labels) και τα σχόλια θα αποθηκευτούν σε ξεχωριστό αρχείο (*.bmelabelinfo*) στην κάρτα SD. Κατά την εισαγωγή των ακατέργαστων δεδομένων στη *Συλλογή Δειγμάτων (Specimen Collection)* του έργου στο BME AI-Studio, το λογισμικό αναζητά αυτόματα το αρχείο *.bmelabelinfo* και συσχετίζει τα δεδομένα με τις αντίστοιχες ετικέτες και σχόλια. Τέλος, κάτω από το κουμπί *New Specimen* θα εμφανιστεί η λίστα με όλα τα καταγεγραμμένα δείγματα, όπου αναγράφονται πλήρης πληροφορίες όπως, η ώρα έναρξης, η διάρκεια και ο αριθμός κύκλων καταγραφής. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα επεξεργασίας των στοιχείων ενός δείγματος (ετικέτας και σχολίου) μέσω του κουμπιού *Pen*.

Γ) Ακατέργαστα Δεδομένα (Raw Data)

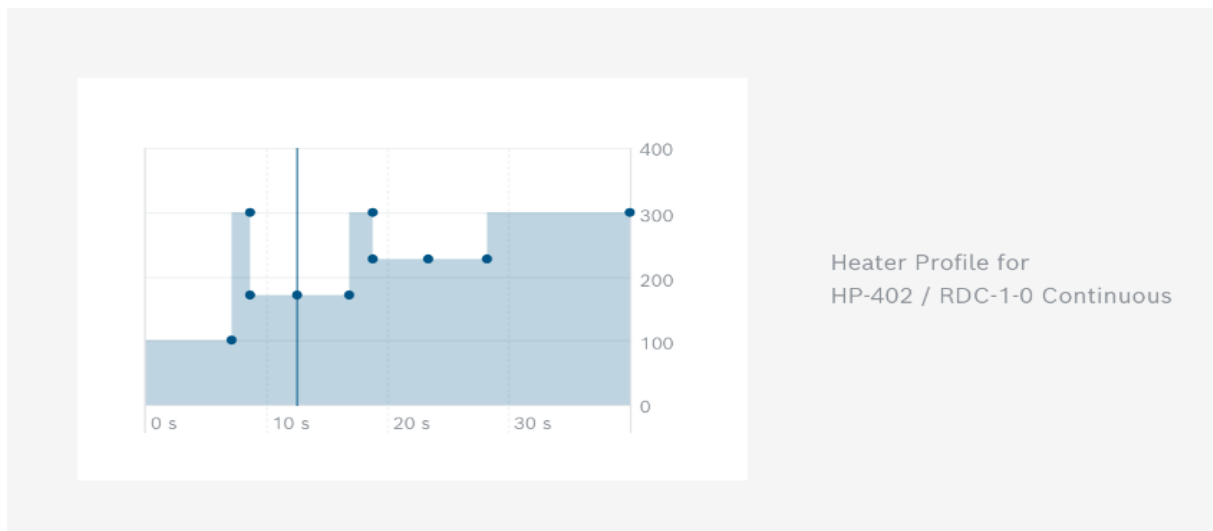
Με την επιλογή **Raw Data** στην επάνω δεξιά γωνία της εφαρμογής, εμφανίζονται τα καταγεγραμμένα ακατέργαστα δεδομένα από κάθε αισθητήρα αερίων.

Για κάθε αισθητήρα παρουσιάζονται:

- Ο συνδυασμός HP/RDC (Heater Profile και Duty Cycle), μαζί με την ένδειξη του τρέχοντος βήματος.
- Τα καταγεγραμμένα ακατέργαστα δεδομένα αντίστασης αερίων (gas resistance data).
- Τα καταγεγραμμένα περιβαλλοντικά δεδομένα: θερμοκρασία, υγρασία και πίεση.

Η εναλλαγή μεταξύ διαφορετικών αισθητήρων γίνεται μέσω αναδυόμενης λίστας (dropdown menu) στο επάνω μέρος της οθόνης.

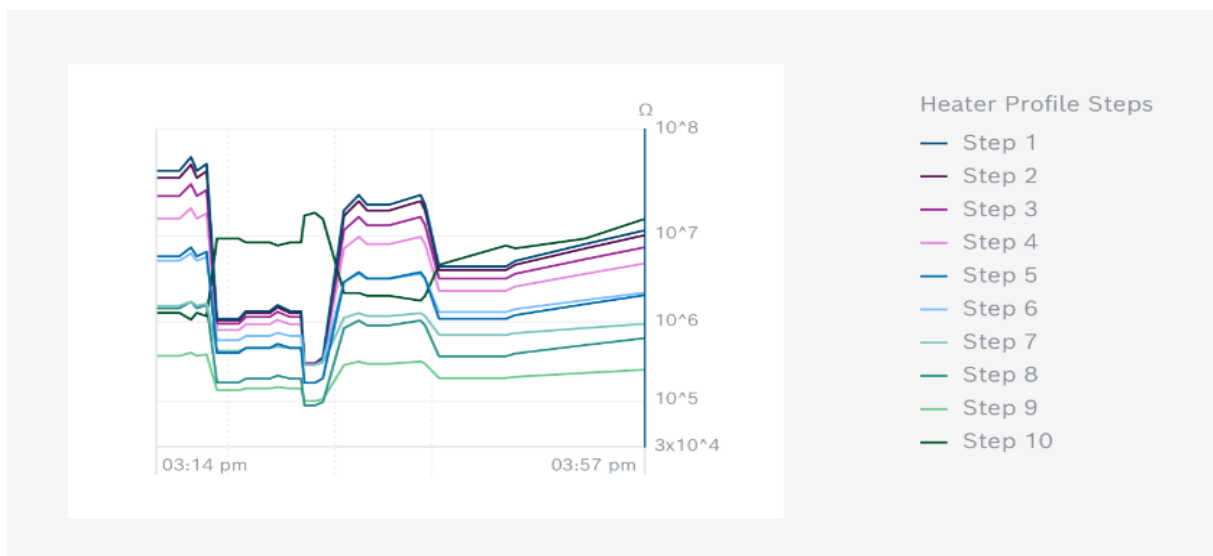
Το γράφημα **Προφίλ Θέρμανσης (Heater Profile Graph)** παρουσιάζει τα βήματα του χρησιμοποιούμενου προφίλ θέρμανσης και υποδεικνύει το τρέχον στάδιο. Αν ο αισθητήρας βρίσκεται σε κατάσταση ύπνου, το γράφημα εμφανίζεται απενεργοποιημένο.



Εικόνα 4.21: Γράφημα του προφίλ θέρμανσης

Το γράφημα **Αντίστασης Αερίων (Gas Resistance Data)** παρουσιάζει τα ακατέργαστα δεδομένα αντίστασης αερίων που μετρά ο αισθητήρας για κάθε βήμα του προφίλ θέρμανσης (*Heater Profile*) σε μορφή χρονοσειράς.

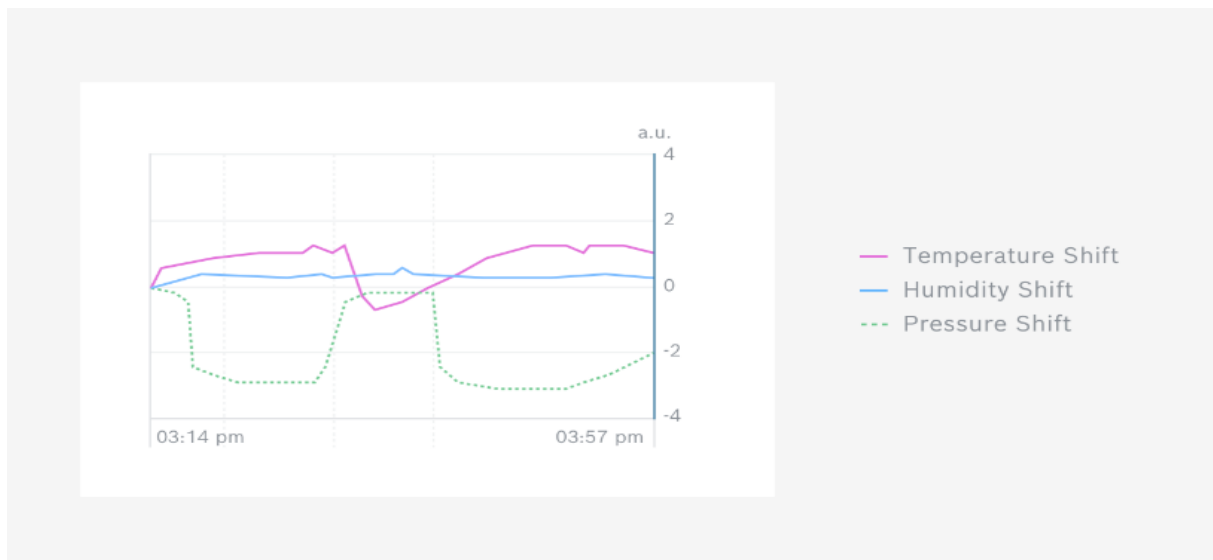
Κάθε καμπύλη μας δείχνει την εξέλιξη της τιμής μέτρησης ενός συγκεκριμένου σημείου του Heater Profile σε βάθος χρόνου, έχοντας ως αποτέλεσμα την παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς του αισθητήρα κατά τη διάρκεια της καταγραφής.



Εικόνα 4.22: Γράφημα της αντίστασης αερίων

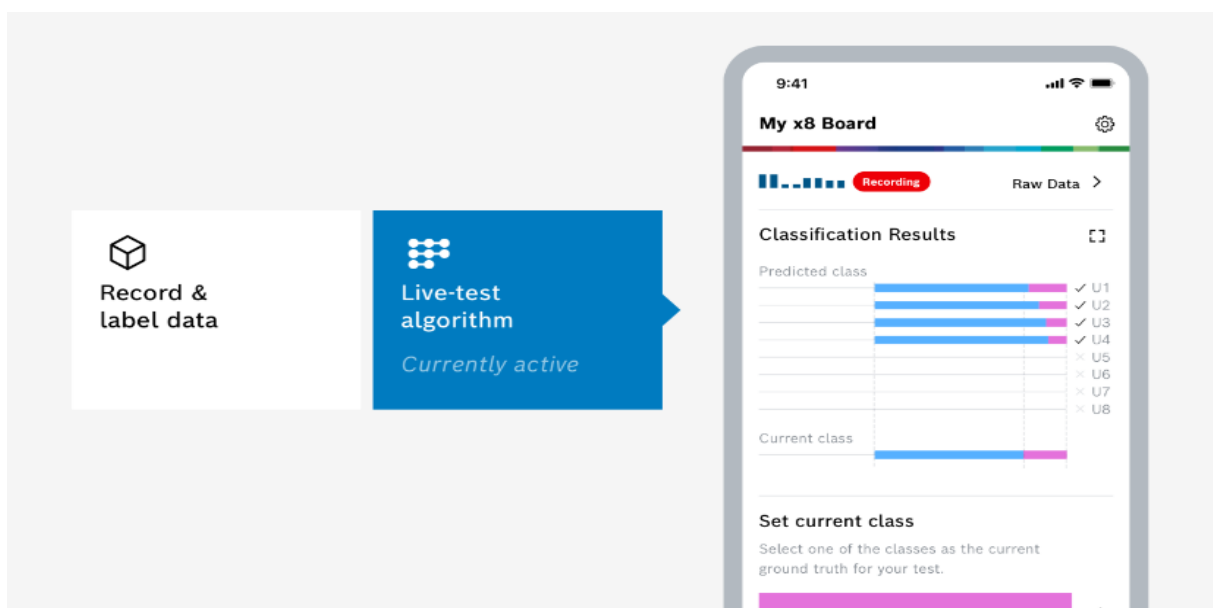
Το γράφημα **Περιβαλλοντικών Δεδομένων (Environmental Data Graph)** απεικονίζει τις *σχετικές μεταβολές* της θερμοκρασίας, της υγρασίας και της πίεσης που μετρά ο αισθητήρας.

Οι καμπύλες δεν παρουσιάζουν τις απόλυτες τιμές των μεγεθών, αλλά το πώς αυτές μεταβλήθηκαν σε σχέση με την αρχή της μέτρησης. Για τον λόγο αυτό, όλες οι καμπύλες ξεκινούν από το μηδέν (0).



Εικόνα 4.23: Γράφημα των περιβαλλοντικών δεδομένων

4.10.4 Ζωντανή Δοκιμή Αλγορίθμου (Live-Test Algorithm)



Εικόνα 4.24: Λειτουργία live test από mobile

Η λειτουργία **Live-Test Algorithm** χρησιμοποιείται όταν υπάρχει ένας αλγόριθμος ταξινόμησης ή παλινδρόμησης που τον έχουμε εξάγει από το BME AI-Studio και πρέπει να τον δοκιμάσουμε ή να τον παρουσιάσουμε ζωντανά με πραγματικά δείγματα.

Σε αυτή τη λειτουργία είναι δυνατά τα εξής:

- Η προβολή της τρέχουσας πρόβλεψης κάθε αισθητήρα (υποστηρίζονται ταυτόχρονα έως τέσσερις αισθητήρες).
- Ο καθορισμός μιας κατηγορίας ως Ground Truth (για αλγορίθμους ταξινόμησης), δηλαδή ως η πραγματική κλάση του δείγματος που χρησιμοποιείται για τη σύγκριση με τις προβλέψεις.

- Η ενεργοποίηση της προβολής πλήρους οθόνης (fullscreen demo view) για παρουσίαση των αποτελεσμάτων με απλούστερη και πιο κατανοητή απεικόνιση.

Σημείωση: Για τη λειτουργία αυτή απαιτείται η ύπαρξη αρχείου διαμόρφωσης BSEC (.config) και αρχείου διαμόρφωσης αλγορίθμου (.aicnfig) στην κάρτα SD. Τα αρχεία αυτά δημιουργούνται μέσω της εφαρμογής BME AI-Studio, επιλέγοντας Export as BSEC Config File στα αποτελέσματα εκπαίδευσης του αλγορίθμου.

A) Προβλέψεις (Predictions)

Όταν στην κάρτα SD υπάρχει αποθηκευτεί ένας αλγόριθμος ταξινόμησης (classification), τότε κάθε αισθητήρας της πλακέτας εκτελεί τον αλγόριθμο και παράγει μια πρόβλεψη κλάσης. Ο χρήστης μπορεί να δοκιμάσει τον αλγόριθμο με διαφορετικά δείγματα:

- Οι αισθητήρες καταγράφουν το δείγμα για κάποιο χρονικό διάστημα (όπως και κατά την κανονική διαδικασία καταγραφής) και στη συνέχεια φαίνεται αν έγινε η σωστή πρόβλεψη.

Το διάγραμμα απεικονίζει σε μορφή χρονοσειράς την κατηγορία που εκτιμά κάθε αισθητήρας. Καθώς προχωρά ο χρόνος, η χρονοσειρά μετακινείται αυτόματα από τα αριστερά προς τα δεξιά. Αν ένας αισθητήρας δεν έχει προβλέψει ακόμη, εμφανίζεται το σύμβολο x, το οποίο είναι συνηθισμένο στα αρχικά στάδια της ζωντανής δοκιμής, όταν τα δεδομένα είναι ακόμα λίγα.

Όταν μια κάρτα SD περιέχει αποθηκευμένο αλγόριθμο παλινδρόμησης, κάθε αισθητήρας εκτελεί τον αλγόριθμο και δημιουργεί μια πρόβλεψη τιμής για κάθε αντικείμενο παλινδρόμησης. Σε αυτή την περίπτωση, οι αισθητήρες καταγράφουν το δείγμα για μία συγκεκριμένη διάρκεια και το γράφημα απεικονίζει τις προγνωσμένες τιμές σε χρονοσειρά για τον επιλεγμένο στόχο.

Κάτω από το διάγραμμα εμφανίζονται οι πραγματικές τιμές που εκτιμά κάθε αισθητήρας για τον συγκεκριμένο στόχο. Αν ο αλγόριθμος έχει εκπαιδευτεί να προβλέπει διάφορους στόχους, υπάρχει ένα αναδυόμενο μενού (dropdown) στο πάνω μέρος της οθόνης για την επιλογή του στόχου που θα προβάλλεται.

Σημείωση: Προς το παρόν, ο αλγόριθμος δεν μπορεί να εκτελεστεί ταυτόχρονα σε όλους τους οκτώ αισθητήρες. Υποστηρίζεται ταυτόχρονη εκτέλεση σε έως τέσσερις αισθητήρες.

B) Ορισμός Τρέχουσας Κλάσης ως Ground Truth (Set Current Class as Ground Truth)

Η κατώτερη γραμμή του γραφήματος για τις προβλέψεις ταξινόμησης δείχνει το Ground Truth, δηλαδή την αληθινή κατηγορία του παραδείγματος. Δηλαδή, είναι η κατηγορία που οι αισθητήρες θα έπρεπε ιδανικά να προβλέπουν.

Για τον ορισμό μιας κλάσης ως τρέχον *Ground Truth* στη δοκιμή, αρκεί η επιλογή της από τη διαθέσιμη λίστα. Το γράφημα ενημερώνεται αυτόματα ώστε να εμφανίζει την επιλεγμένη πραγματική κλάση.

Γ) Προβολή Επίδειξης (Demo View)

Η εφαρμογή διαθέτει μια ειδική λειτουργία **προβολής επίδειξης (Demo View)**, η οποία παρουσιάζει τις προβλέψεις με πιο απλουστευμένο και εντυπωσιακό τρόπο. Η ενεργοποίηση γίνεται με την επιλογή του κουμπιού Fullscreen στην επάνω δεξιά γωνία.

- Για **αλγορίθμους ταξινόμησης**, εμφανίζεται η τρέχουσα προβλεπόμενη κλάση. Η εναλλαγή μεταξύ των προβλέψεων διαφορετικών αισθητήρων γίνεται με κίνηση αριστερά–δεξιά (swipe).
- Για **αλγορίθμους παλινδρόμησης**, προκύπτει η τρέχουσα εκτιμώμενη τιμή στόχου. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να μετακινείται στις προβλέψεις των διάφορων αισθητήρων με κίνηση

αριστερά–δεξιά, ενώ για να αλλάξει μεταξύ διαφορετικών στόχων παλινδρόμησης χρησιμοποιείται κίνηση πάνω–κάτω (swipe).

Η λειτουργία αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για παρουσιάσεις και καταστάσεις επίδειξης, όπου απαιτείται μια καθαρή και κατανοητή απεικόνιση των αποτελεσμάτων.

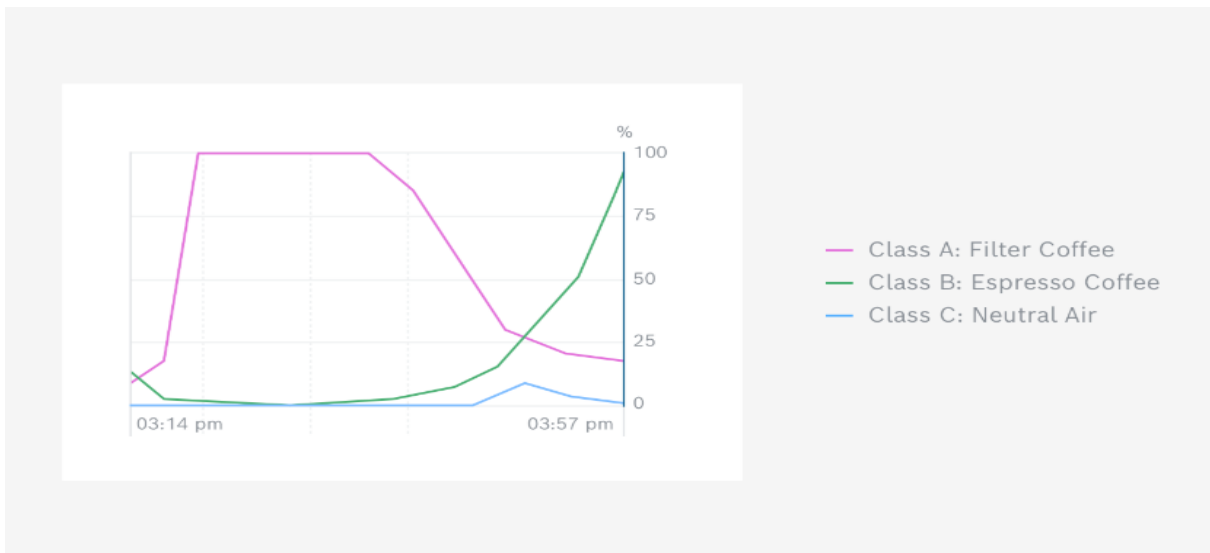
Δ) Ακατέργαστα Δεδομένα (Raw Data) – Αλγόριθμοι Ταξινόμησης

Με την επιλογή Raw Data στην άνω δεξιά γωνία της εφαρμογής, προσφέρεται πρόσβαση στα αποθηκευμένα δεδομένα, με δυνατότητα αλλαγής μεταξύ διαφορετικών αισθητήρων μέσω ενός αναδυόμενου μενού (dropdown).

Για τους αλγορίθμους ταξινόμησης, η εφαρμογή εμφανίζει για κάθε αισθητήρα αερίων του BME688:

- Τον χρησιμοποιούμενο συνδυασμό HP/RDC (Heater Profile και Duty Cycle), μαζί με το τρέχον βήμα.
- Την τρέχουσα προβλεπόμενη κλάση.
- Την πιθανότητα πρόβλεψης (prediction likelihood) για κάθε κλάση σε μορφή χρονοσειράς.
- Τα ακατέργαστα δεδομένα αντίστασης αερίων (gas resistance data).
- Τα περιβαλλοντικά δεδομένα: θερμοκρασία, υγρασία, πίεση.

Το γράφημα **Πρόβλεψης Πιθανότητας** δείχνει την πιθανότητα με την οποία ο αλγόριθμος κατηγοριοποίησης προέβλεψε κάθε κατηγορία σε συνάρτηση με τον χρόνο. Δηλαδή, κάθε καμπύλη υποδηλώνει το επίπεδο σιγουριάς του αλγορίθμου για την αντίστοιχη εκτίμηση.



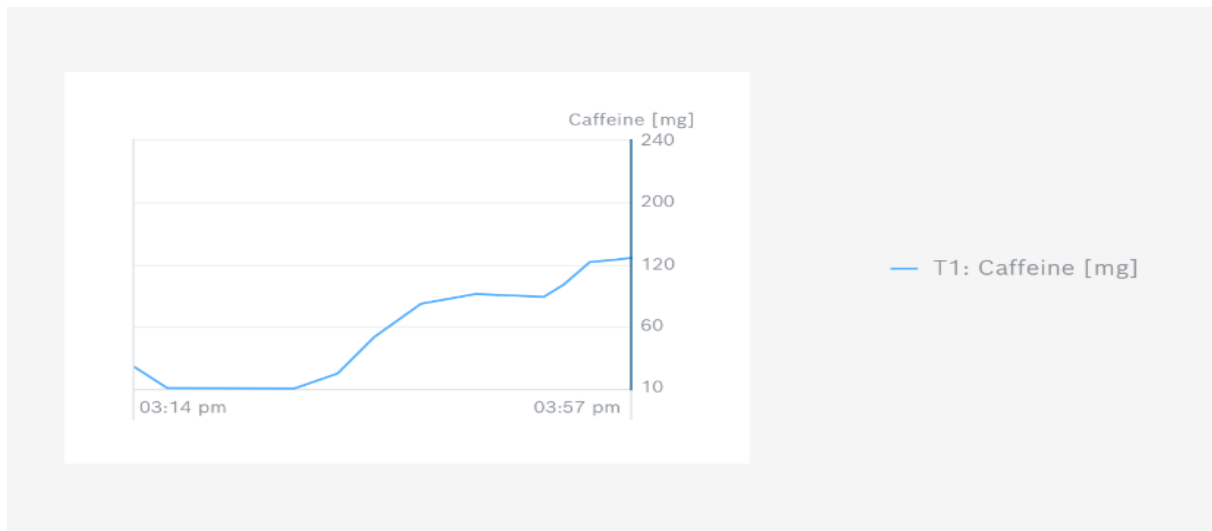
Εικόνα 4.25: Γράφημα πρόβλεψης πιθανότητας

Για τους **αλγορίθμους παλινδρόμησης**, η εφαρμογή εμφανίζει για κάθε αισθητήρα αερίων του BME688:

- Τον χρησιμοποιούμενο συνδυασμό **HP/RDC** (Heater Profile και Duty Cycle), με ένδειξη του τρέχοντος βήματος.
- Την τρέχουσα προβλεπόμενη τιμή στόχου παλινδρόμησης (**regression target value**).

- Το ιστορικό προβλέψεων (**prediction history**) για κάθε στόχο παλινδρόμησης σε μορφή χρονοσειράς.
- Τα ακατέργαστα δεδομένα αντίστασης αερίων (**gas resistance data**).
- Τα περιβαλλοντικά δεδομένα: θερμοκρασία, υγρασία και πίεση.

Το γράφημα Ιστορικό Πρόβλεψης απεικονίζει την αξία που εκτίμησε ο αλγόριθμος παλινδρόμησης για έναν στόχο σε χρονική διάρκεια. Κάθε στόχος διαθέτει ξεχωριστό γράφημα ιστορικού προβλέψεων, προσφέροντας έτσι συνολική εικόνα της αλγοριθμικής συμπεριφοράς.



Εικόνα 4.26: Γράφημα ιστορικού πρόβλεψης

4.11 Περιφερικά στοιχεία της πλακέτας (RTC, SD card, MUX, LEDs)

Το ολοκληρωμένο του BME688 περιλαμβάνεται από επιπλέον υλικά που ενισχύουν τη λειτουργικότητα και την ευελιξία του αισθητήρα. Αυτά τα επιμέρους στοιχεία δεν συμβάλλουν μόνο στη συλλογή δεδομένων, αλλά και στη σωστή αποθήκευση, χρονοσήμανση και οργάνωσή τους. Παρακάτω αναλύονται οι βασικές μονάδες του κιτ: το RTC (Real Time Clock), η κάρτα SD, ο πολυπλέκτης (MUX) και τα LEDs.

4.11.1 RTC (Real Time Clock)

Το RTC (Real Time Clock) είναι ένα μικρό κύκλωμα υπεύθυνο για την ακριβή τήρηση της ώρας και της ημερομηνίας. Στο project μας το RTC τροφοδοτείται από μια μικρή μπαταρία τύπου CR1220, η οποία διασφαλίζει τη συνεχή λειτουργία του ακόμα και όταν η πλακέτα είναι εκτός ρεύματος.

Η ύπαρξη RTC είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς κάθε μέτρηση που καταγράφεται από τον αισθητήρα συνοδεύεται από χρονική σφραγίδα (timestamp). Κατά αυτόν τον τρόπο, τα δεδομένα ταξινομούνται με ακρίβεια στο χρόνο και αξιοποιούνται σωστά στη διαδικασία εκπαίδευσης ή αξιολόγησης ενός αλγορίθμου.

Επιπλέον, όταν στη διαδικασία γίνεται καταγραφή με ακριβή χρόνο επιτρέπετε η συσχέτιση των μετρήσεων με εξωτερικούς παράγοντες, όπως οι περιβαλλοντικές συνθήκες ή η ώρα διεξαγωγής ενός πειράματος. Χωρίς το RTC, οι μετρήσεις είναι αποκομμένες από τον πραγματικό χρόνο, γεγονός που δυσκολεύει την ανάλυση [3].

4.11.2 Κάρτα SD

Η κάρτα SD αποτελεί το κυριότερο μέσο αποθήκευσης των δεδομένων που συλλέγονται από τους αισθητήρες. Όλα τα ακατέργαστα δεδομένα (Raw Data) των αισθητήρων BME688 αποθηκεύονται αυτόματα στην κάρτα, δημιουργώντας αρχεία τα οποία μπορούν αργότερα να εισαχθούν στο BME AI-Studio. Η χρήση κάρτας SD έχει τρία βασικά πλεονεκτήματα:

1. **Αξιοπιστία** – τα δεδομένα παραμένουν αποθηκευμένα ανεξάρτητα από τυχόν διακοπές τροφοδοσίας.
2. **Μεγάλη χωρητικότητα** – επιτρέπεται η συλλογή μεγάλου όγκου μετρήσεων, καθώς τα αρχεία μπορεί να φτάσουν εκατοντάδες MB.
3. **Φορητότητα** – τα δεδομένα μπορούν εύκολα να μεταφερθούν σε υπολογιστή για περαιτέρω ανάλυση.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το ολοκληρωμένο του BME688 χωρίζει αυτόματα τα αρχεία καταγραφής όταν ξεπεράσουν ένα συγκεκριμένο όριο μεγέθους (π.χ. 297 MB), ή όταν η πλακέτα απενεργοποιηθεί και ενεργοποιηθεί ξανά. Αυτό διευκολύνει τη διαχείριση και την ταξινόμηση των δεδομένων.

4.11.3 Πολυπλέκτης (MUX)

Ο πολυπλέκτης (MUX) επιτρέπει τη σύνδεση και τον έλεγχο πολλών αισθητήρων BME688 στην ίδια πλακέτα ανάπτυξης. Χάρη στο MUX, το ολοκληρωμένο μπορεί να διαχειρίζεται έως και οκτώ διαφορετικούς αισθητήρες (BME688) ταυτόχρονα. Η λειτουργία αυτή είναι κρίσιμη για εφαρμογές που απαιτούν παράλληλη συλλογή δεδομένων από διαφορετικές θέσεις ή συνθήκες. Για παράδειγμα, οι οκτώ αισθητήρες μπορούν να εκτελούν το ίδιο πείραμα αλλά με διαφορετικά Heater Profiles, επιτρέποντας την αξιολόγηση πολλών διαμορφώσεων μέσα σε μία μόνο συνεδρία μέτρησης [4].

Με αυτόν τον τρόπο, το MUX προσφέρει μεγάλη ευελιξία και μειώνει τον χρόνο που απαιτείται για τη συλλογή δεδομένων, αφού δεν χρειάζεται να επαναλαμβάνεται το ίδιο πείραμα με διαφορετικούς αισθητήρες ξεχωριστά.

4.11.4 LEDs

Τα LEDs της πλακέτας χρησιμεύουν ως ενδείξεις κατά τη διάρκεια λειτουργίας του ολοκληρωμένου. Συνήθως, ενημερώνουν τον χρήστη για την κατάσταση της πλακέτας, π.χ.:

- Αν είναι ενεργή,
- Αν πραγματοποιείται καταγραφή δεδομένων,
- Ή αν υπάρχει σφάλμα στη λειτουργία.

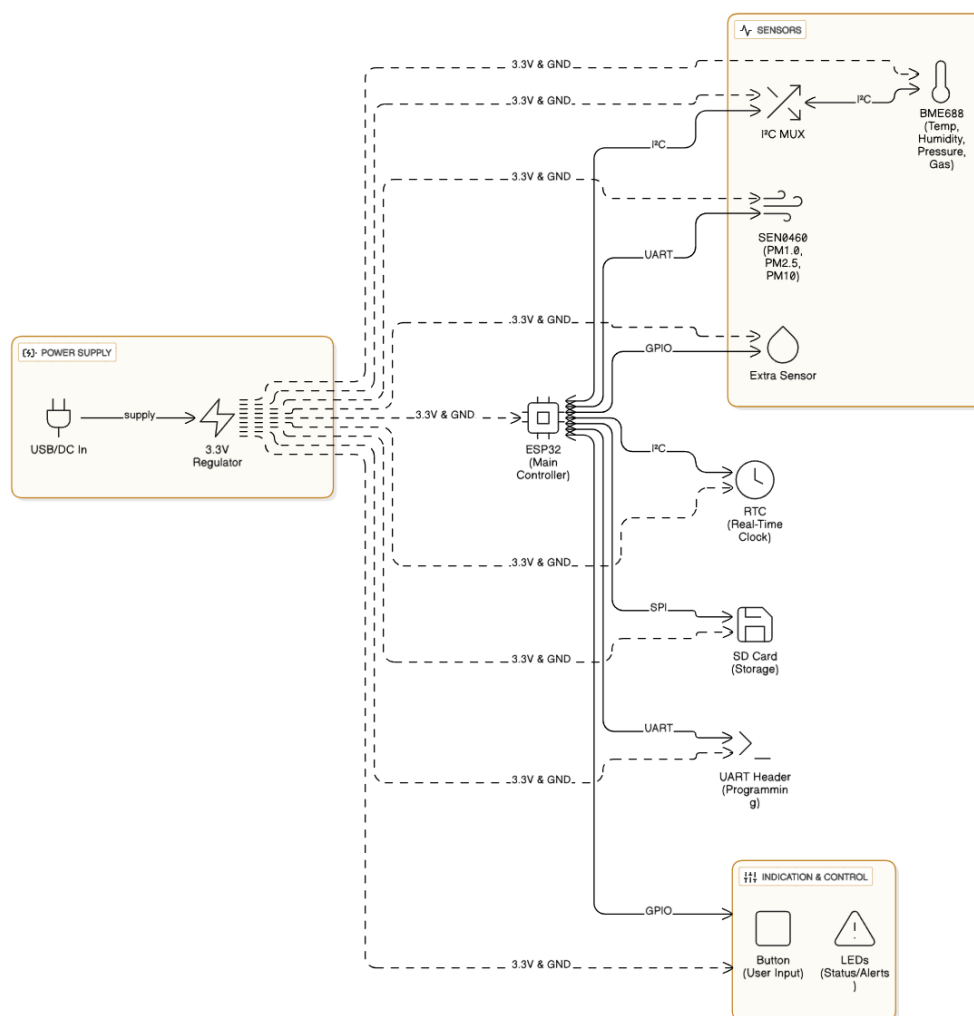
Επιπλέον, υπάρχουν και τα κουμπιά S1 και S2 (όπως αναφερθήκαμε παραπάνω), τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επισήμανση (labeling) δειγμάτων κατά την καταγραφή. Σε συνδυασμό με τα LEDs, ο χρήστης έχει μια απλή και άμεση οπτική ανατροφοδότηση για την πορεία της διαδικασίας. Η ύπαρξη LEDs δεν είναι απλώς βοηθητική, αλλά κρίσιμη για τη διευκόλυνση της χρήσης στο πεδίο, όπου συχνά δεν υπάρχει εύκολη πρόσβαση σε υπολογιστή ή οθόνη για συνεχή παρακολούθηση.

Κεφάλαιο 5ο: Σχεδίαση και υλοποίηση της μετρητικής διάταξης

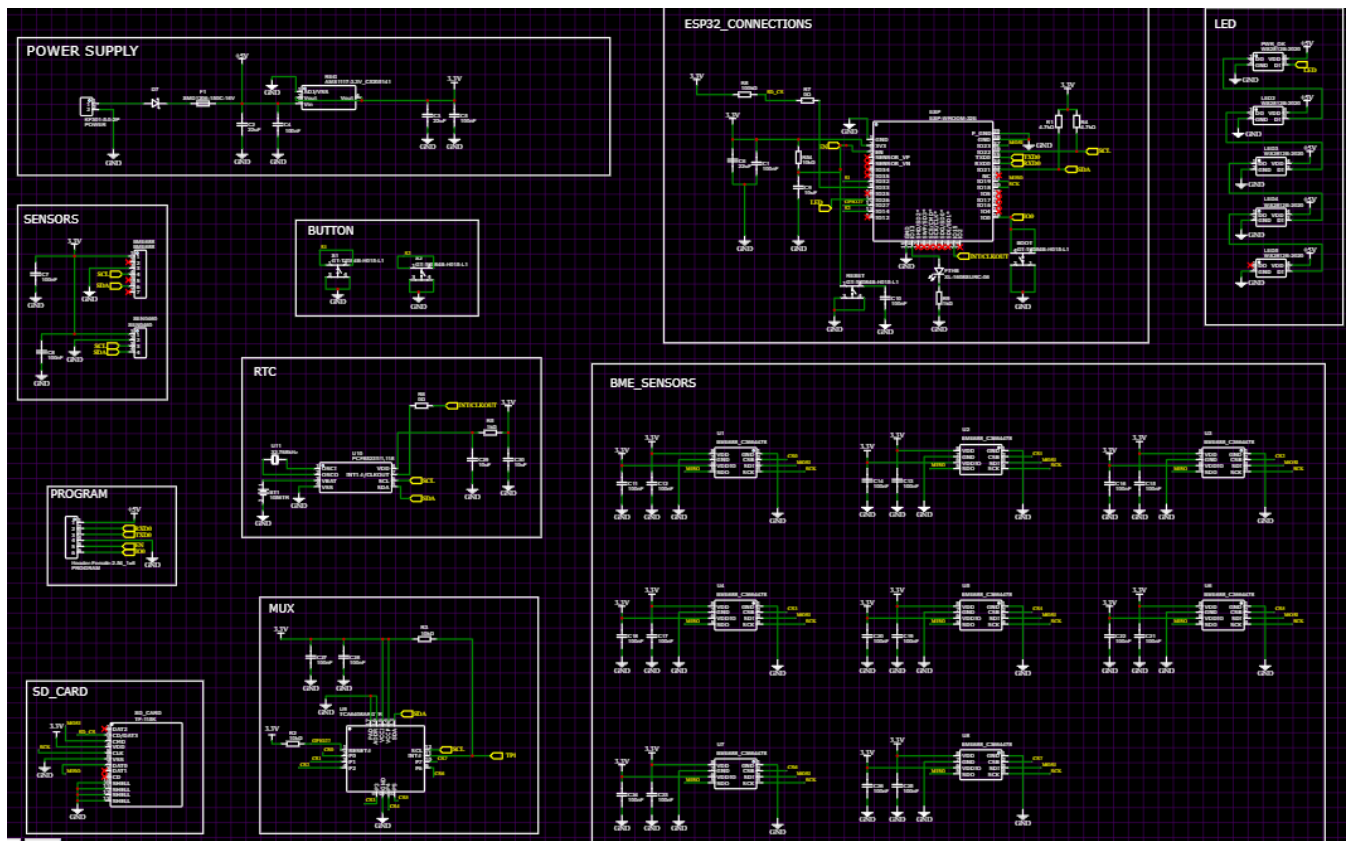
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η σχεδίαση της πλακέτας και οι περιφερειακές μονάδες. Βασικός πυρήνας είναι ο μικροελεγκτής ESP32 όπου είναι συνδεδεμένος με τις υπόλοιπες μονάδες. Παρακάτω θα αναλύσουμε τη λειτουργία του κάθε κυκλώματος που υπάρχει στο σχέδιο. Στη συνέχεια αναφέρουμε τη διαδικασία που χρησιμοποιήσαμε στο PCB Layout ενώ ταυτόχρονα θα εξηγήσουμε το σχέδιο της αρχικής πλακέτας για την εργασία και τα παρελκόμενα της.

Το παρακάτω μπλοκ διάγραμμα παρουσιάζει την αρχιτεκτονική που χρησιμοποιήθηκε για να αναπτυχθεί η συσκευή μέτρησης ποιότητας του αέρα. Κεντρικός μικροελεγκτής είναι ESP32 με τροφοδοσία από USB στα 3.3V, κοινή τάση για όλα τα περιφερειακά.

Βασικό κομμάτι της υλοποίησης αποτελούν οι δύο αισθητήρες. Ο πρώτος αναφέρεται ο BME688 ο οποίος καταγράφει την θερμοκρασία, την υγρασία, την ατμοσφαιρική πίεση και τις πτητικές οργανικές ενώσεις. Από την άλλη έχουμε τον SEN0460 όπου κι αυτός με την σειρά του μας δίνει μετρήσεις για τα αιωρούμενα σωματίδια. Η επικοινωνία πραγματοποιείται μέσω I²C. Χρησιμοποιείται επίσης η μονάδα real time clock για να μας δώσει την χρόνο σήμανση, η κάρτα SD που μας βοηθάει να αποθηκεύσουμε τα δεδομένα με το πρωτόκολλο SPI. Και τέλος αναφέρουμε και τα κουμπιά εισόδου καθώς και τα LED τα οποία τα χρησιμοποιούμε ανάλογα με τις ανάγκες μας.



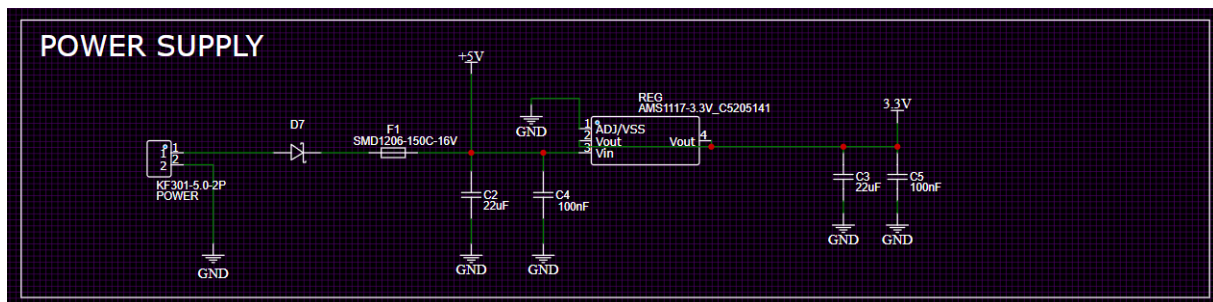
Διάγραμμα 5.1: Μπλοκ διάγραμμα του κυκλώματος



Εικόνα 5.1: Ολοκληρωτικό σχέδιο πλακέτας

5.1.1 Τροφοδοσία

Για να λειτουργήσει ο ESP32 και τα υπόλοιπα περιφερειακά χρειάζεται σταθερή τάση 3,3V. Αυτό επιτυγχάνεται με το κύκλωμα της τροφοδοσίας, το οποίο δέχεται εξωτερική πηγή τάσης τα 5V DC και μαζί με την προστασία, τα φίλτρα εισόδου/εξόδου και τον σταθεροποιητή τάσης μας δίνει στην έξοδο του τα 3,3 V.



Εικόνα 5.2: Κύκλωμα τροφοδοσίας

Πιο συγκεκριμένα το κύκλωμα αποτελείται από:

Την **τροφοδοσία** που δέχεται στην είσοδο μέσω του KF301-5.0-2P POWER. Είναι ένας τύπος κλέμας που συναντάμε συχνά σε πλακέτες Arduino με σκοπό να συνδεθεί εξωτερική πηγή τάσης, δηλαδή τα 5V DC.

Την **προστασία** όπου απαρτίζεται από δύο εξαρτήματα. Πρώτα, από την δίοδο D7 καθώς προστατεύει το κύκλωμα από την αντίθετη πολικότητα. Με λίγα λόγια αν συνδεθεί ανάποδα η τροφοδοσία, η δίοδος θα εμποδίσει το ρεύμα να περάσει στο υπόλοιπο κύκλωμα για να μην καταστραφεί. Δεύτερον, από την

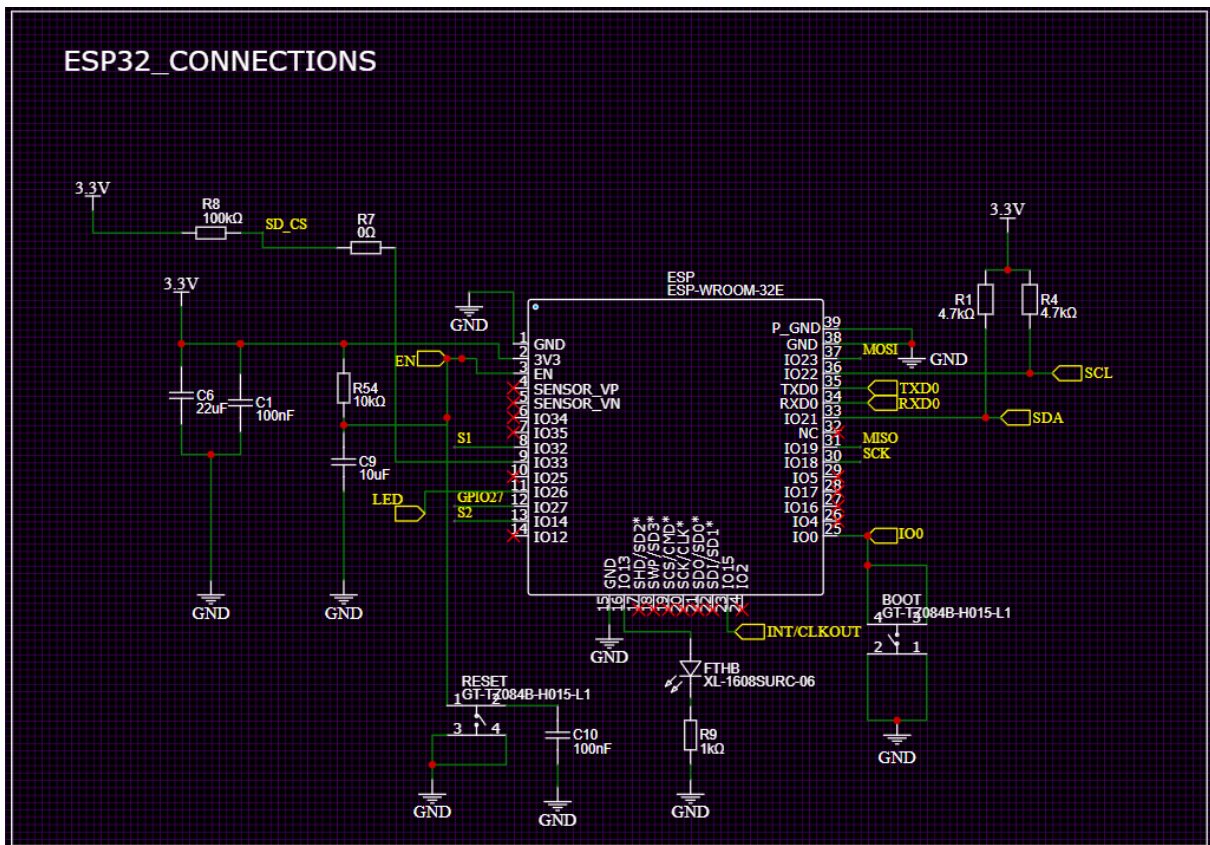
ασφάλεια F1, μια SMD ασφάλεια 150 mA/16V, η οποία ανοίγει το κύκλωμα σε περίπτωση βραχυκυκλώματος.

Τα **φίλτρα εισόδου** τα οποία αποτελούνται από δύο πυκνωτές C2 (22μF) και C4 (100nF) και τα τοποθετούμε παράλληλα στη είσοδο για να φιλτράρουν θόρυβο. Ο C2 φιλτράρει τις μεταβολές χαμηλής συχνότητας, ενώ ο C4 είναι απορρίπτει τα παράσιτα που δημιουργούνται από την υψηλή συχνότητα.

Τον **σταθεροποιητή τάσης** (AMS1117-3.3V) όπου είναι το βασικότερο στοιχείο καθώς μετατρέπει την τάση εισόδου (+5V) σε σταθερή τάση 3.3V λόγω της γραμμικής συμπεριφοράς που έχει. Τον χρησιμοποιούμε επειδή πολλά ολοκληρωμένα κυκλώματα όπως ο ESP32, λειτουργούν στα 3.3V.

Τα **φίλτρα εξόδου** με τους πυκνωτές C3 (22μF) και C5 (100nF) που σταθεροποιούν την έξοδο του ρυθμιστή. Ο C3 φιλτράρει χαμηλές συχνότητες, ενώ ο C5 φιλτράρει υψηλές συχνότητες με αποτέλεσμα να εξασφαλίσουμε μια καθαρή και σταθερή τάση στα 3.3V (παρόμοια με τα φίλτρα εισόδου).

5.1.2 Κεντρικός μικροελεγκτής & βασικές συνδέσεις



Εικόνα 5.3: Συνδέσεις με το ESP32

Στον πυρήνα αυτόν πραγματοποιούνται όλες οι βασικές συνδέσεις του ESP32 με τα υπόλοιπα περιφερειακά. Ο μικροελεγκτής που χρησιμοποιείται στο project είναι ο ESP32-WROOM-32E. Για να λειτουργήσει απαραίτητη προϋπόθεση είναι η σταθερή τροφοδοσία, μετά κυκλώματα Reset και Boot, καθώς και διασυνδέσεις με περιφερειακές συσκευές όπως η SD card και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας I²C, SPI, UART.

Για να τροφοδοτηθεί ο **ESP32** χρειάζεται τάση 3.3V μέσα από πυκνωτές φίλτρου, όπως είναι οι C6 = 22μF, C1 = 100nF, C9 = 10μF. Ο C6 σταθεροποιεί τις χαμηλές συχνότητες, ο C1 είναι υπεύθυνος για

τις υψηλές συχνότητες, δηλαδή τον θόρυβο από το τροφοδοτικό ή το περιβάλλον και τέλος ο C9 που συνδέεται στο pin EN για να εξασφαλίζει σήμα εκκίνησης. Όλα τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα να αποφευχθούν οι αστάθειες.

Τα κουμπιά ελέγχου (Reset & Enable):

Αρχικά, συνδέουμε μέσω pull-up αντίστασης το EN (Enable pin) στα 3.3V. Στο button S1 δίνεται γείωση στο EN, όπου μπορεί να κάνει reset τον μικροελεγκτή. Τέλος ο C9 διασφαλίζει την ομαλή εκκίνηση, όπως αναφερθήκαμε πιο πάνω. Στη συνέχεια, στο button S2 συνδέουμε το GPIO0 δηλαδή το BOOT και το χρησιμοποιούμε για να βάλουμε το ESP32 σε κατάσταση να περιμένει την εκκίνηση του. Είναι απαραίτητο για να προγραμματίσουμε μέσω UART. Τέλος, για να πετύχουμε την ομαλή μετάβαση στο ξεκίνημα του ESP32, χρειάζεται το RESET, ώστε να εμποδίσει τον θόρυβο που μπορεί να προκληθεί.

Στο GPIO27 συνδέουμε τα LED μέσω της αντίστασης R9. Τα χρησιμοποιούμε για να κάνουμε έλεγχο της κατάστασης του προγράμματος, για να δούμε αν η συσκευή είναι σε λειτουργία (εάν παίρνει ρεύμα) και για να ορίσουμε τα alarm.

Στο ESP32 συνδέουμε και την **κάρτα SD** καθώς και η επικοινωνία γίνεται μέσω SPI πρωτοκόλλου. Τα Σήματα είναι:

- MOSI (Master Out Slave In)
- MISO (Master In Slave Out)
- SCK (Clock)
- CS (Chip Select) = SD_CS.

Γενικά στο κύκλωμα χρησιμοποιούμε pull-up αντιστάσεις μια από αυτές είναι η R8, με την βοήθεια της μπορούμε να σταθεροποιήσουμε την κατάσταση στο CS. Η αντίσταση R7 που είναι 0Ω έχει την λειτουργία του jumper. Συμπεραίνοντας, καταλήγουμε ότι οι πυκνωτές και αντιστάσεις αποτρέπουν τον θόρυβο όσο γίνεται η ανάγνωση δεδομένων.

Στη διασύνδεση I²C οι αισθητήρες επικοινωνούν με bus. Έχουμε το SCL (Serial Clock) και SDA (Serial Data) που τα συνδέουμε σε εξωτερικές συσκευές. Οι pull-up αντιστάσεις R1 και R4, είναι βασικές για να λειτουργήσει το I²C bus σωστά.

Το **UART (TX0/RX0)** είναι η κύρια σειριακή θύρα του ESP32. Χρησιμοποιούμε τα TX0/RX0 για:

- Προγραμματισμό μέσω USB-Serial Converter.
- Επικοινωνία debugging με υπολογιστή.

Συνδέονται με εξωτερικό FTDI/USB-UART interface.

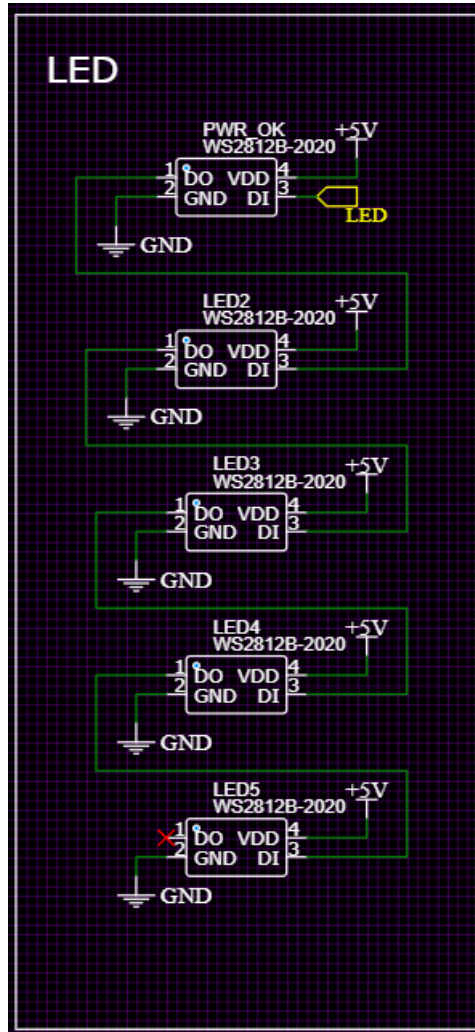
Το **INT/CLKOUT** είναι ένα pin που μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε:

- Σαν εξωτερική διακοπή (interrupt) για συγχρονισμό με αισθητήρες.
- Σαν clock out για χρονισμό σε άλλα κυκλώματα.

5.1.3 Υποσύστημα LEDs

Στην εργασία χρησιμοποιούμε τα LED WS2812B-2020, τα οποία έχουν VDD (τροφοδοσία 5V), γείωση, DI (data in) για να εισαχθούν δεδομένα και DO (data out) για να συνδεθούν στο επόμενο LED.

Τα δεδομένα περνάνε σειριακά από το ένα LED στο άλλο (αλυσίδα). Έτσι, με ένα pin μπορούμε να ελέγξουμε όλα. Αυτά τα LED μας δίνουν την δυνατότητα να τα κάνουμε ότι χρώμα θέλουμε ανάλογα τις ανάγκες μας.



Εικόνα 5.4: Κύκλωμα LED

5.1.4 Αισθητήρας SEN0460

Στην εικόνα 5.5 παρατηρούμε την συνδεσμολογία δύο αισθητήρων. Αρχικά, οι αισθητήρες τροφοδοτούνται με 3.3V. Τοποθετούμε παράλληλα έναν πυκνωτής αποσύζευξης 100nF κοντά σε κάθε αισθητήρα (C8 για τον SEN0460, C7 για τον BME688). Με αυτόν τον τρόπο, έχουμε ως αποτέλεσμα να μειωθεί ο θόρυβος και να σταθεροποιηθεί η τάση. [5]

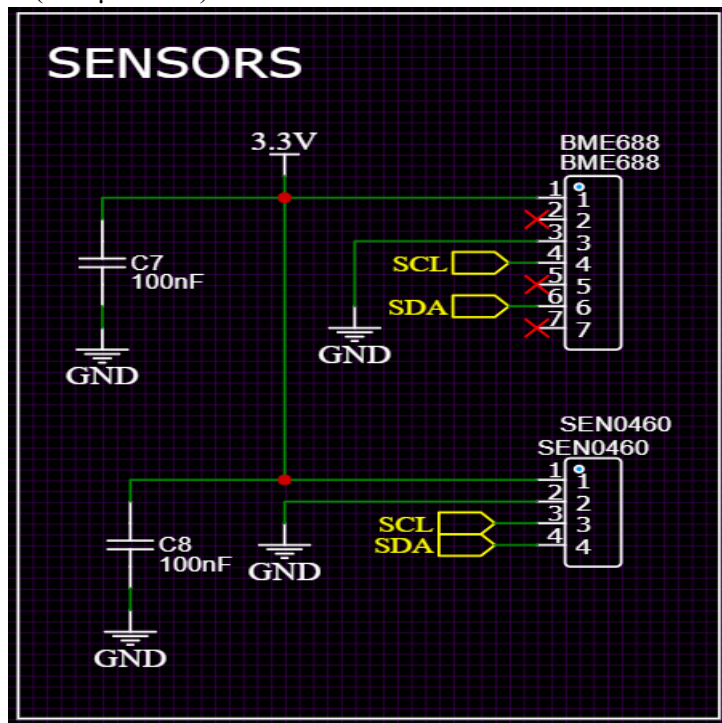
Οι αισθητήρες αυτοί επικοινωνούν με το πρωτόκολλο I²C και την συνδεσμολογία, όπως αναφέραμε πριν. Με το I²C bus έχουμε την δυνατότητα να συνδέσουμε πολλές συσκευές στο ίδιο bus, έχοντας ξεχωριστή διεύθυνση για κάθε συσκευή. Οι pull-up αντιστάσεις διασφαλίζουν την σωστή λειτουργία του bus.

Ο βασικότερος είναι ο αισθητήρας που μας ενδιαφέρει σε αυτήν την εικόνα είναι ο SEN0460. Τα pins του είναι:

- Pin 1 → VCC (3.3V)
- Pin 2 → GND
- Pin 3 → SCL (ρολόι I²C)
- Pin 4 → SDA (δεδομένα I²C)

Ο συγκεκριμένος αισθητήρας BME688 τοποθετήθηκε στο PCB σχέδιο, διότι τον χρησιμοποιήσαμε στην πρώτη εκδοχή της πλακέτας, που θα εξηγήσουμε παρακάτω. Δεν ανήκει στην κατηγορία με τους υπόλοιπους αισθητήρες BME688 λόγω ότι έχει άλλη συνδεσμολογία από τους άλλους. Τα Pins:

- Pin 1 → GND
- Pin 2 → VDD (3.3V)
- Pin 5 → SCL (ρολόι I²C)
- Pin 6 → SDA (δεδομένα I²C)



Εικόνα 5.5: Κύκλωμα SEN0460 (I²C)

5.1.5 Αισθητήρες BME688

Το κύκλωμα της εικόνας 5.6 απαρτίζεται από πολλούς αισθητήρες BME688. Με βάση το σχέδιο της Bosch οι αισθητήρες συνδέονται μεταξύ τους αλλά και με τα γύρω περιφερειακά έχοντας ως αποτέλεσμα την δυνατότητα ενσωμάτωσης AI.

Σημείωση: Δεν είναι αποκλειστική αντιγραφή του σχεδίου αλλά μια κοντινή προσέγγιση που χρειαζόταν, για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί όλη η διαδικασία με το AI πρόγραμμα της Bosch.

Στο κύκλωμα τοποθετήθηκαν 8 αισθητήρες BME688 με όνομα U1 μέχρι U8 αντίστοιχα. Όλοι έχουν τάση τροφοδοσίας 3.3V και γείωση.

Για να γίνει φιλτράρισμα του θορύβου και να σταθεροποιηθεί η τάση τοποθετούμε δίπλα από κάθε αισθητήρα δύο πυκνωτές παράκαμψης (100nF). Όταν οι αισθητήρες λειτουργούν ταυτόχρονα

δημιουργούνται πτώσεις στη τάση. Γι'αυτό τον λόγο βάζουμε τους πυκνωτές ώστε να μη γίνονται τέτοια σφάλματα[1].

Οι αισθητήρες στο συγκεκριμένο κύκλωμα δεν λειτουργούν όπως ο προηγούμενος αισθητήρας που αναφέραμε παραπάνω. Στο συγκεκριμένο κομμάτι οι αισθητήρες επικοινωνούν με το πρωτόκολλο SPI bus, όπου έχει μεγαλύτερη ταχύτητα που είναι ταχύτερο και μας δίνει πιο σταθερό αποτέλεσμα όταν χρησιμοποιούνται πολλοί μαζί [3].

Υπάρχουν όμως κάποιες κοινές γραμμές, όπως:

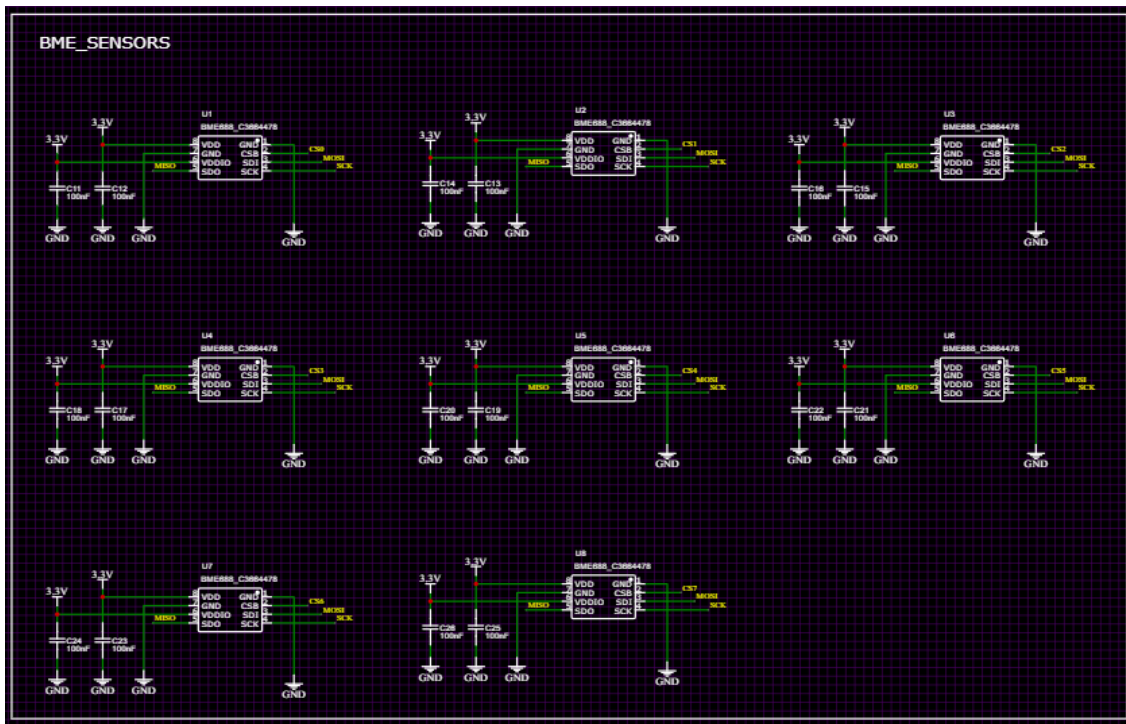
- Όταν τα δεδομένα πάνε από ESP32 προς όλους τους αισθητήρες (MOSI (Master Out Slave In)).
- Όταν τα δεδομένα πάνε από αισθητήρες προς ESP32 (MISO (Master In Slave Out)).
- Όταν έχουν κοινό ρολόι συγχρονισμού (SCK (Serial Clock)).

Κάθε αισθητήρας έχει τη δική του γραμμή επιλογής CS (Chip Select):

- U1 → CS0
- U2 → CS1
- U3 → CS2
- U4 → CS3
- U5 → CS4
- U6 → CS5
- U7 → CS6
- U8 → CS7

Κατά αυτόν τον τρόπο, παρότι όλοι οι αισθητήρες μοιράζονται τις γραμμές MOSI, MISO, SCK, μόνο ένας ενεργοποιείται κάθε φορά μέσω της γραμμής CS.

Με βάση τις δυνατότητας του αισθητήρα που είπαμε παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι όταν χρησιμοποιούνται και οι 8 αισθητήρες ταυτόχρονα μπορούμε να καταγράψουμε μετρήσεις από διαφορετικά σημεία ενός χώρου, να κάνουμε χωρική ανάλυση (π.χ. σε δωμάτια νοσοκομείου, σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις) και τέλος, να επιτύχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια γιατί μπορούμε να συγκρίνουμε τιμές και να ανιχνεύσουμε ανωμαλίες [4].

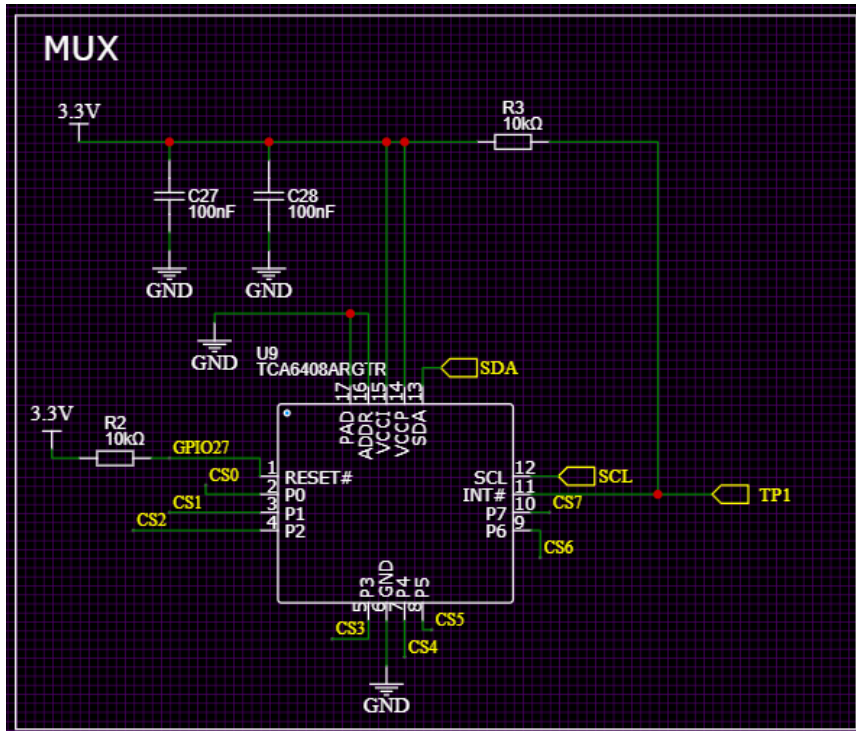


Εικόνα 5.6: Κύκλωμα BME688 (SPI)

5.1.6 Μονάδα επέκτασης MUX για CS

Το κύκλωμα του MUX αποτελείται από το U9 (TCA6408ARGTR) που είναι I/O expander με διασύνδεση I²C. Έχει ως αποτέλεσμα να μας δίνει εισόδους και εξόδους ψηφιακής μορφής που μπορούμε να ελέγξουμε από το ESP32. Σε αυτό το σχέδιο χρησιμοποιούμε τις εξόδους σαν Chip Select (CS) σήματα για να μπορούμε να ελέγξουμε τους 8 αισθητήρες.

Ο πολυπλέκτης χρειάζεται στο VCCP και VCCI τάση λειτουργίας 3.3V. Πάλι και εδώ τοποθετούμε τους πυκνωτές C27 και C28 για να εξαλείψουμε τον θόρυβο και να σταθεροποιήσουμε την τροφοδοσία. Και εδώ όπως και πριν η διασύνδεση γίνεται με I²C για να συνδέσουμε το U9 με το ESP32. Για να μπορέσει ο ESP32 να στείλει εντολές στο U9, συνδέουμε μια pull-up αντίσταση R3 στο SCL. Συνεχίζοντας το ίδιο στοιχείο έχει εξόδους P0 μέχρι P7 που έχουν μετονομασθεί σε σήματα CS0 μέχρι CS7. Το κάθε CS κουμπώνει σε έναν αισθητήρα BME688. Με αυτό τον τρόπο, το ESP32 ξέρει ποιον αισθητήρα διαβάζει.



Εικόνα 5.7: Κύκλωμα MUX

5.1.7 Κουμπιά S1/S2

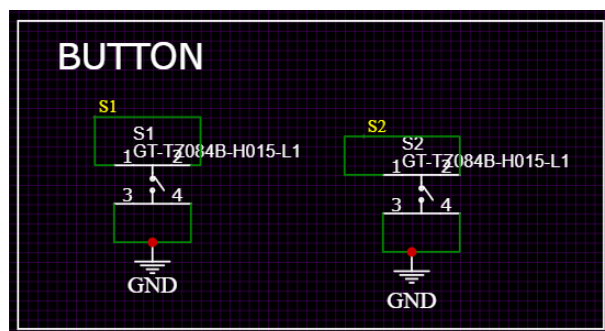
Τα κουμπιά S1 και S2 είναι απλά push buttons, συνδεδεμένα στη γείωση. Μόλις πατήσουμε ένα από αυτά το σήμα πηγαίνει στο ESP32 γίνεται LOW (0V). Ανιχνεύει το πάτημα και έτσι κάνουμε την εναλλαγή για αλλαγή κατάστασης (label).

Το κύκλωμα με τα κουμπιά το χρησιμοποιούμε κυρίως στη διαδικασία εκπαίδευσης των BME688 μέσω Bosch AI Studio, κάθε δείγμα δεδομένων ορίζει ένα label (π.χ. NormalAir, Ajax). Με αυτή την δυνατότητα αλλάζουμε κατάσταση σε πραγματικό χρόνο.

Παράδειγμα Χρήσης

- **S1 πατημένο** → το ESP32 καταγράφει τα δεδομένα με label NormalAir.
- **S2 πατημένο** → το ESP32 αλλάζει το label σε Ajax (ή όποιο άλλο label έχουμε ορίσει).

Είναι μια πολύ απλή λύση η οποία δε χρειάζεται εξωτερικό interface. Μας δίνει την δυνατότητα για να έχουμε άμεση ανταπόκριση στην εναλλαγή labels.



Εικόνα 5.8: Button S1/S2

5.1.8 MicroSD

Σε αυτό το κομμάτι παρουσιάζεται η συνδεσμολογία της κάρτας SD. Για την εργασία η χρήση της κάρτας SD είναι απαραίτητη, διότι μέσα από αυτήν θα δημιουργηθούν και θα μεταφερθούν όλα τα κύρια αρχεία για γίνει η διαδικασία της εκπαίδευσης μέσω του AI Studio. Επίσης, μέσα από τον κώδικα του client παίρνουμε σε CSV αρχείο όλες τις μετρήσεις από τους αισθητήρες (θερμοκρασία, υγρασία, πίεση, αντίσταση αερίου, IAQ, CO₂eq, bVOCeq, PM1.0, PM2.5, PM10, αριθμός σωματιδίων) για μελλοντική ανάλυση ή οτιδήποτε άλλο θέλει ο χρήστης. Τέλος, κάθε μέτρηση καταγράφεται μαζί με την ημερομηνία/ώρα και το label που έχουμε ορίσει (π.χ. NormalAir, Ajax).

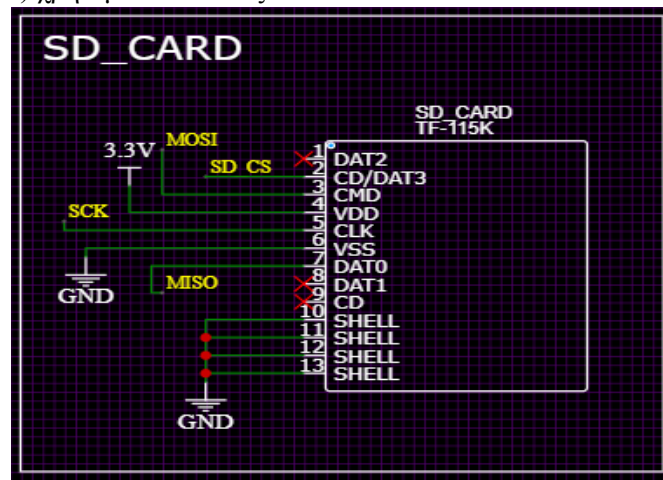
Η σύνδεση της κάρτας γίνεται με 3.3V, στο VDD (Pin 4). Έπειτα, το συνδέουμε και στη γείωση με VSS / GND (Pin 5 & Pin 6). Τέλος, για να γίνει η επικοινωνία των data στα pin 9–13.

Η επικοινωνία της με τον ESP32 είναι με πρωτόκολλο SPI, όπως και οι αισθητήρες BME688. Οι απαραίτητες γραμμές είναι:

- Μεταφέρονται τα δεδομένα από το ESP32 προς την κάρτα SD (MOSI (Master Out Slave In)).
- Μεταφέρονται τα δεδομένα από την κάρτα SD προς το ESP32 (MISO (Master In Slave Out)).
- Υπάρχει ρολόι συγχρονισμού (SCK (Serial Clock)).
- Το CS επιλέγει τότε η κάρτα SD είναι ενεργή στη γραμμή SPI.

Τα σήματα που χρησιμοποιούνται είναι:

- Το Pin 2 (CD/DAT3) χρησιμοποιείται ως CS (SD_CS).
- Το Pin 5 (CLK) χρησιμοποιείται ως SCK (ρολόι SPI).
- Το Pin 7 (DAT0) χρησιμοποιείται ως MISO.
- Το Pin 3 (CMD) χρησιμοποιείται ως σαν MOSI στο SPI mode.



Εικόνα 5.9: Συνδεσμολογία με SD card

5.1.9 Κύκλωμα RTC

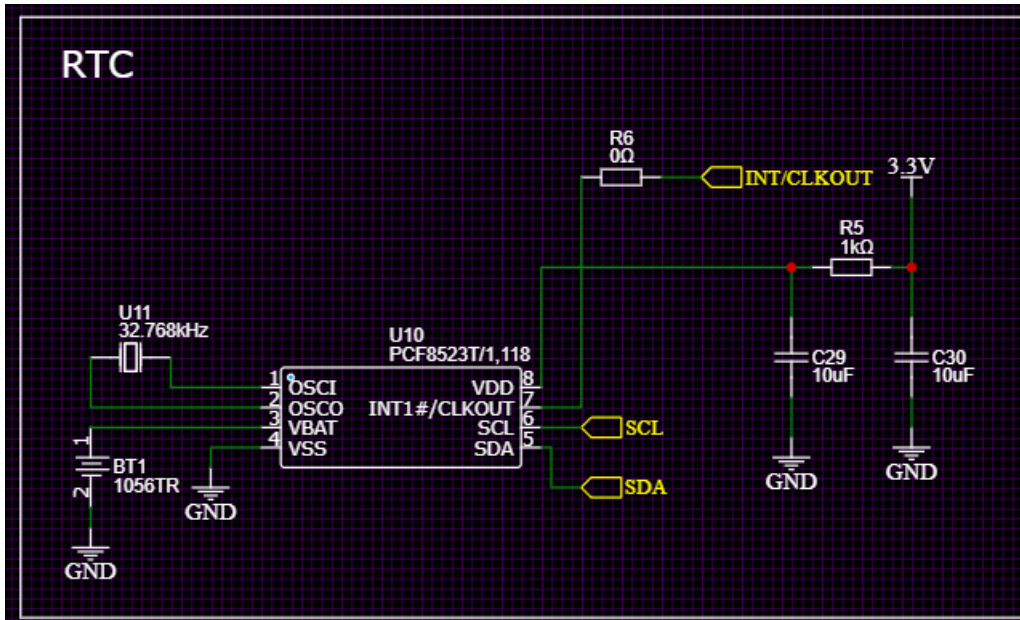
Παρακάτω βλέπουμε το κύκλωμα RTC (Real Time Clock) που χρησιμοποιούμε, πρόκειται για ένα κύκλωμα το οποίο μας δίνει την ακριβή χρονοσήμανση των δεδομένων, δηλαδή αναφέρει ώρα, λεπτά, δευτερόλεπτα και ημερομηνία. Πιο συγκεκριμένα:

Για το RTC που χρησιμοποιούμε είναι το U10 (PCF8523). Και αυτό χρησιμοποιεί την επικοινωνία I²C. Έχει την δυνατότητα να μας δίνει πληροφορίες πραγματικού χρόνου, αριθμητήρες (counters) και alarms.

Έχει τροφοδοσία όπως όλα τα άλλα στα 3.3V και πυκνωτές C29, C30 για την βασική λειτουργία όπως και πιν, δηλαδή φιλτράρισμα και θόρυβος.

Συνδέεται με κρύσταλλο χρονοσμοῦ U11 στα 32.768 kHz (crystal oscillator). Είναι χαμηλής συχνότητας για να μετρήσει με ακρίβεια τον χρόνο. Το συνδέουμε στους ακροδέκτες OSCI / OSCO του U10.

Έχει επίσης, εφεδρική μπαταρία BT1 (1056TR) ὡστε να δίνει δεδομένα αν χρειαστεί και χωρίς να έχει τροφοδοσία. Έτσι, ὅταν ανοίξει ξανά η συσκευή, η ὥρα δεν έχει χαθεί.



Εικόνα 5.10: Κύκλωμα RTC

5.1.10 Header Προγραμματισμού (PROGRAM)

Χρησιμοποιούμε το Header με θηλυκή υποδοχή και 6 pin, μας επιτρέπει να συνδέσουμε εξωτερικό USB ὡστε να φορτώσουμε κάθε κώδικα στον ESP32. Τα σήματα είναι τα εξής:

Pin 1 → +5V

- Τροφοδοσία από τον programmer (USB του υπολογιστή).

Pin 2 → RXD0

- Δεδομένα από τον υπολογιστή προς το ESP32.
- Συνδέεται με το TX του USB-UART.

Pin 3 → TXD0

- Δεδομένα από το ESP32 προς τον υπολογιστή.
- Συνδέεται με το RX του USB-UART.

Pin 4 → EN (Enable / Reset)

- Χρησιμοποιείται για reset του ESP32 κατά τη διαδικασία προγραμματισμού.

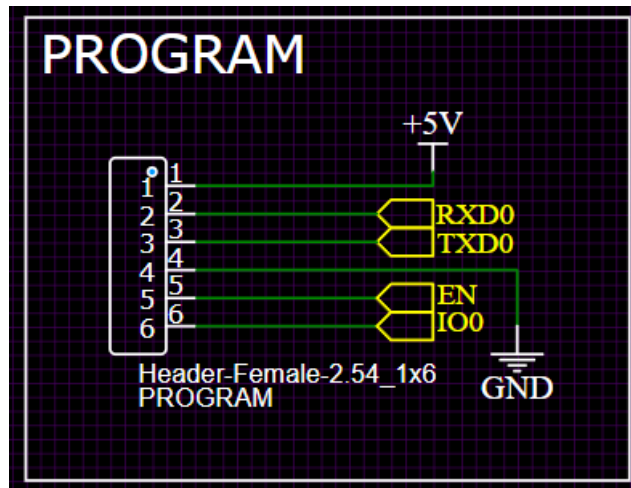
Pin 5 → IO0 (GPIO0 / Boot Mode)

- Ελέγχει αν το ESP32 θα μπει σε mode για να δεχτεί νέο κώδικα.
- Ο ESP32 μπαίνει σε λειτουργία προγραμματισμού ὅταν το IO0 είναι 0V κατά το reset.

Pin 6 → GND

- Γείωση

Τέλος, μετά το upload, το IO0 επιστρέφει σε HIGH και το ESP32 τρέχει το νέο πρόγραμμα.



Εικόνα 5.11: Header Προγραμματισμού

5.1.11 PCB Layout

Η τελική σχεδίαση του κυκλώματος (εικόνα 5.12) ακολουθεί την κυκλική γεωμετρία, κατάλληλη για ενσωματωθεί σε κλειστό περίβλημα. Το σχέδιο και η τοποθέτηση των εξαρτημάτων έγινε με σκοπό να πετύχουμε όσο μεγαλύτερη απόδοση μπορούμε χωρίς να χαθεί η αξιοπιστία. Για να γίνει ο σχεδιασμός της πλακέτας χρησιμοποιήσαμε την διαδικτυακή πλατφόρμα EasyEDA, η οποία προσφέρει εργαλεία για schematic capture, PCB layout και προεπισκόπηση τρισδιάστατης απεικόνισης.

Αρχικά στο κέντρο της πλακέτας τοποθετήθηκε ο πυρήνας της συσκευής ο μικροελεγκτής ESP32, ο οποίος είναι η βασική μονάδα που ελέγχει και επικοινωνεί. Η κεραία βρίσκεται στην πάνω μερία για να πετύχει την καλύτερη λήψη σημάτων Wi-Fi και Bluetooth.

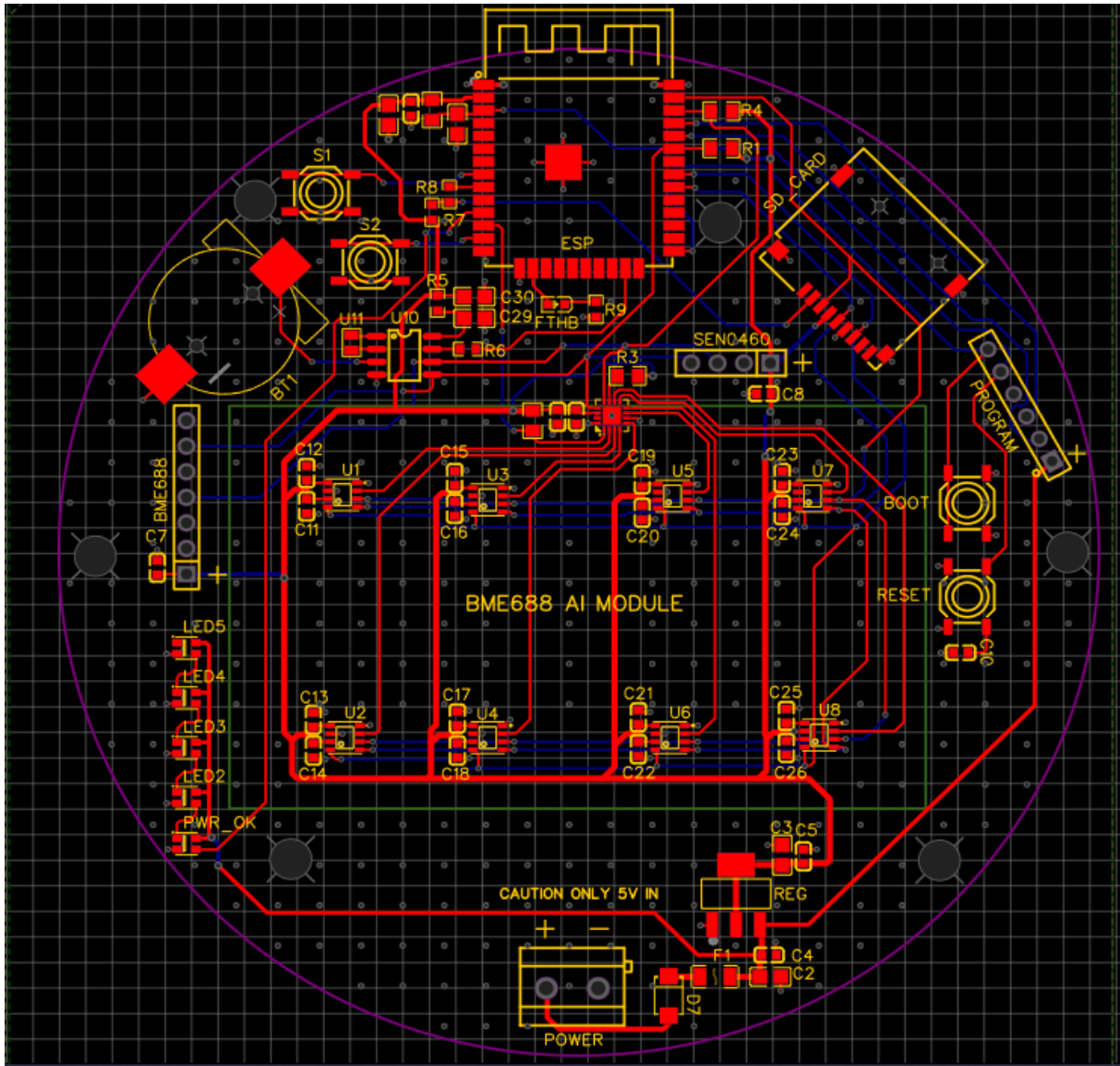
Στη συνέχεια βασικά εξαρτήματα και λόγος της συγκεκριμένης συσκευής είναι οι αισθητήρες BME688 και SEN0460. Για να είναι εκτεθειμένοι στο περιβάλλον και να συλλέξουν όσο πιο εύκολα τα δεδομένα, τοποθετούνται κάπως κεντρικά της πλακέτας.

Το κύκλωμα RTC δεσπόζει στο επάνω αριστερό τμήμα με τα εξαρτήματα του κοντά, ώστε να διασφαλιστεί η συνεχής χρονοσήμανση των δεδομένων. Στην απέναντι μερία (δεξιά πλευρά) βρίσκεται η υποδοχή κάρτας microSD, η οποία βοηθάει στην αποθήκευση των δεδομένων και στη δημιουργία των απαραίτητων αρχείων για την AI εκπαίδευση.

Στο τέρμα κάτω τμήμα τοποθετήσαμε το κύκλωμα τροφοδοσίας, στο οποίο υπάρχει εξωτερική τάση 5V όπως αναφέραμε και μέσα από τον ρυθμιστή τάσης παράγουμε 3.3V για τη λειτουργία του ESP32 και των περιφερειακών του.

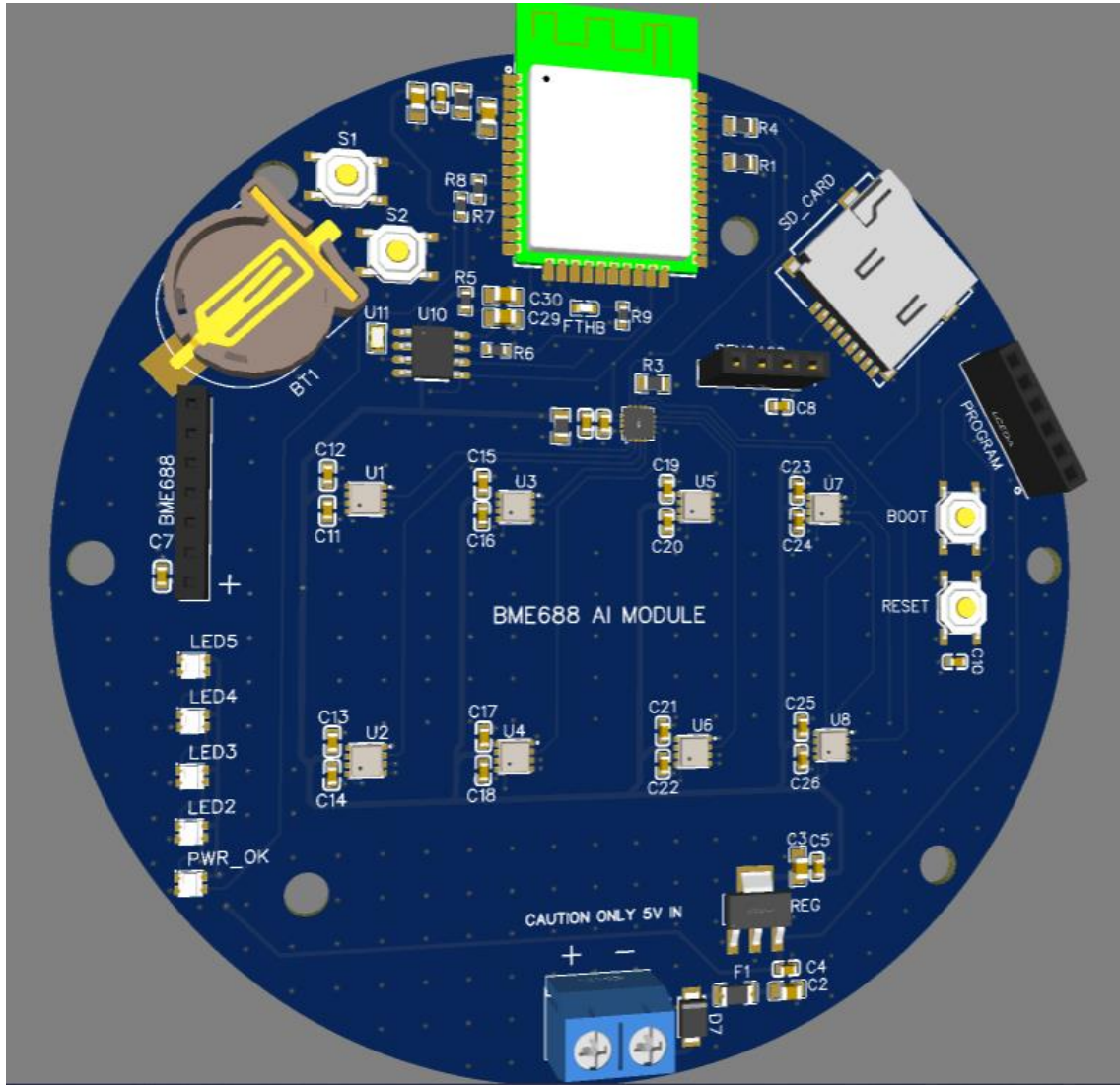
Τα LED τα τοποθετήσαμε στην κάτω αριστερή πλευρά του PCB και τα χρησιμοποιούμε για να απεικονίσουμε γεγονότα που μας ενδιαφέρουν. Στο project τα χρησιμοποιούμε ως κατάσταση τροφοδοσίας και alarm. Από την απέναντι μερία, βρίσκονται τα κουμπιά BOOT και RESET, καθώς και το PROGRAM header, που μας βοηθούν στον αρχικό προγραμματισμό και το upload του κάθε κώδικα.

Τέλος, όπως αναφέραμε σε κάθε κομμάτι κυκλώματος τοποθετήσαμε πυκνωτές για να εξασφαλίσουμε την σταθερή τάση και να αποτρέψουμε τον θόρυβο.



Εικόνα 5.12: PCB Layout

Στη εικόνα 5.13 βλέπουμε το 3D σχέδιο της πλακέτας. Αυτό μας βοηθά να καταλάβουμε πως περίπου θα μοιάζει η συσκευή στην πραγματικότητα. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να δούμε την λογική των εξαρτημάτων, εάν είναι ευθυγραμμισμένα και το πώς θα φαίνεται η υποδοχή των περιφερειακών. Με λίγα λόγια μας δίνει μια καθαρή εικόνα της τελικής μορφής της συσκευής που θα χρησιμοποιηθεί στο project.



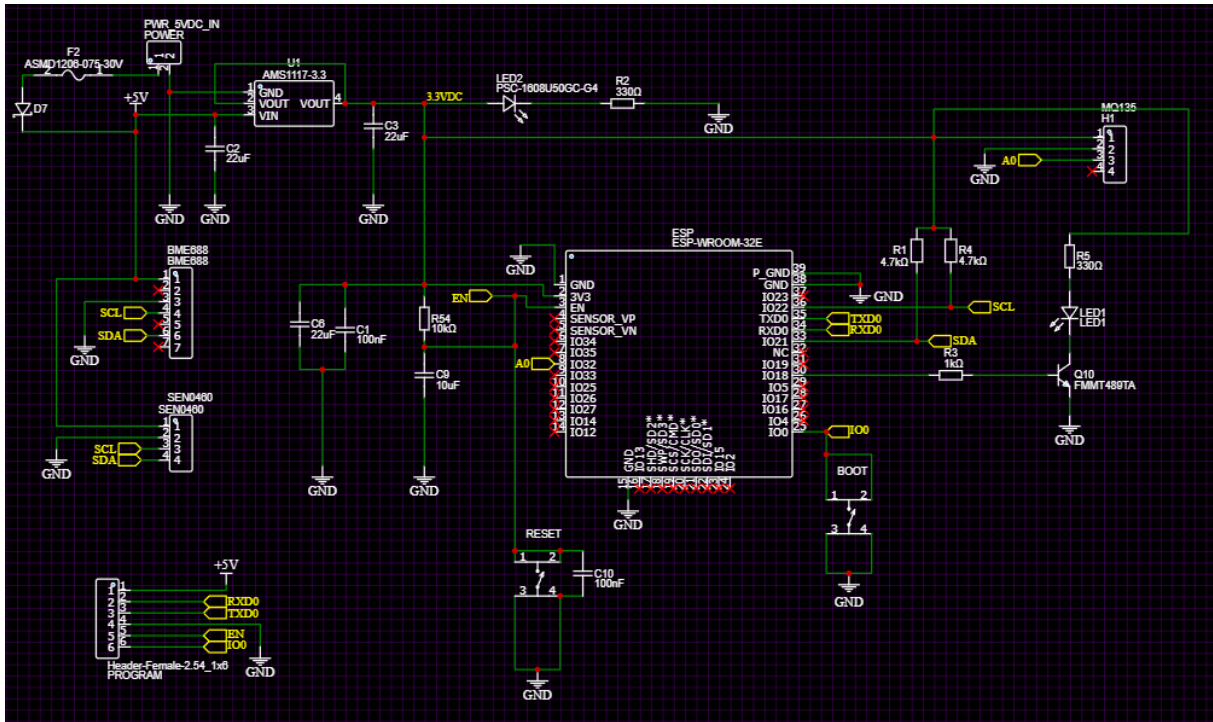
Εικόνα 5.13: 3D View

5.1.12 Αρχική Πλακέτα

Και σε αυτήν την συσκευή ο βασικός πυρήνας είναι ο ESP32. Έχει διαμορφωθεί το κύκλωμα για να παράγει τροφοδοσία στα 3.3V (βέβαια με λίγο πιο διαφορετικό τρόπο) καθώς και η συνδεσμολογία των αισθητήρων SEN0460 και BME688. Σε αυτή την πλακέτα αισθητήρας BME688 ήταν συνδεδεμένος μέσω I²C πράγμα που παρουσίασε σημαντικούς περιορισμούς. Με λίγα λόγια ο αισθητήρας παρείχε κάποιες βασικές τιμές όπως θερμοκρασία, υγρασία, πίεση και αντίσταση αερίου. Δεν μπορούσε να υπολογιστεί πλήρως το κομμάτι της τεχνητής νοημοσύνης ούτε οι υπόλοιπες λειτουργίες που περιγράφονται στο οικοσύστημα της Bosch. Η προσέγγιση αυτή ήταν απλή και μπορούσε να λειτουργήσει μόνο σαν ένα απλό σύστημα μέτρησης και όχι σαν μία ολοκληρωμένη συσκευή εκπαίδευσης και αναγνώρισης αερίων. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε πως στην αρχική πλακέτα είχε τοποθετηθεί ο αισθητήρας MQ135 ο οποίος αποτέλεσε πολύ απλή λύση και δεν το χρησιμοποίησα στην νέα πλακέτα.

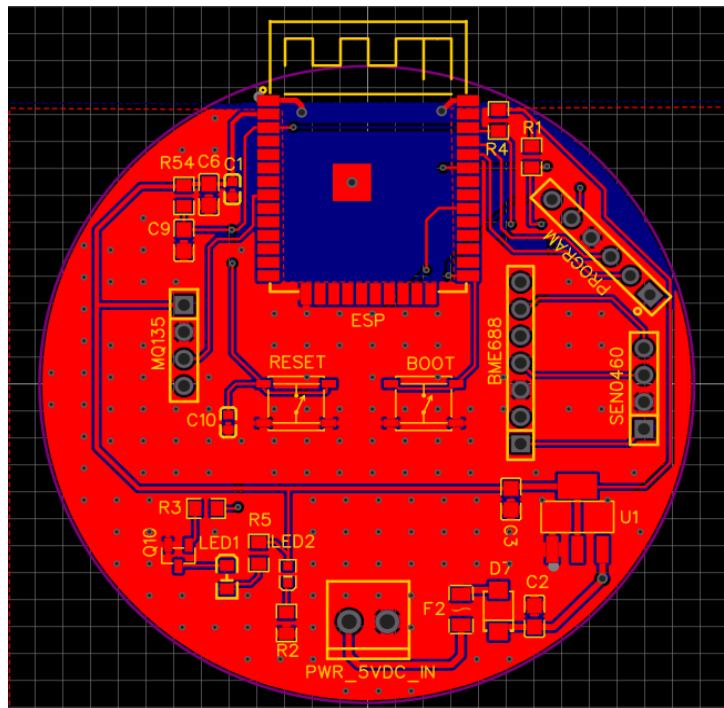
Για αυτόν το λόγο αποφάσισα να προχωρήσω στο σχεδιασμό της νέας πλακέτας η οποία είναι πιο ολοκληρωμένη και όσο το δυνατόν πιο κοντά στο τελικό αποτέλεσμα που επιθυμούσαν να πετύχω. Στο καινούργιο σχέδιο δόθηκε μεγαλύτερη προσοχή στην φιλοσοφία του σχεδιασμού της Bosch με σκοπό

να μπορέσει το κύκλωμα να υποστηρίξει πλήρως την διαδικασία της ΑΙ εκπαίδευσης και της αναγνώρισης των αερίων.



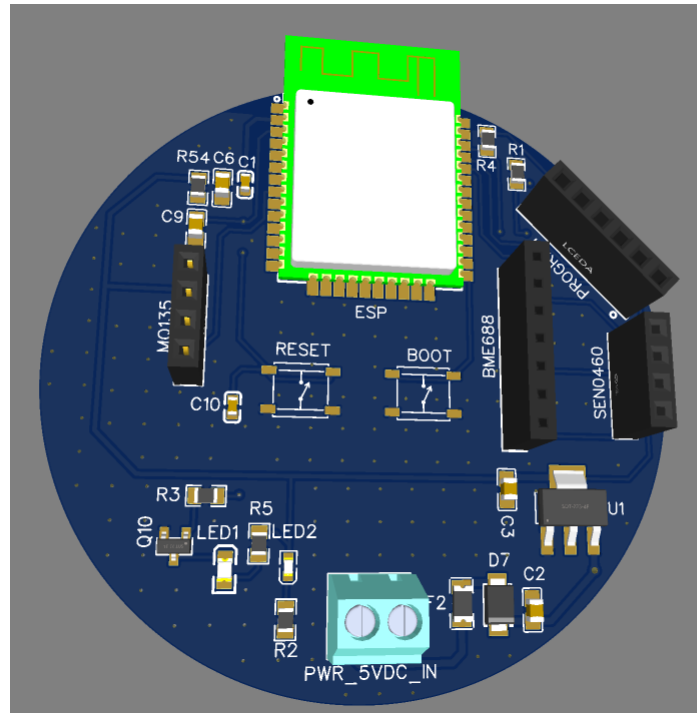
Εικόνα 5.14: Σχέδιο αρχικής πλακέτας

Το PCB Layout στην αρχική πλακέτα, εικόνα 5.15 είναι πιο απλό. Έχει κι αυτό στρογγυλό σχέδιο αλλά λιγότερα περιφερειακά σε σχέση με την νέα πλακέτα. Και εδώ κεντρικά και πάνω τοποθετήσαμε τον μικροελεγκτή και ακριβώς από πάνω την κεραία για να μπορέσει να πιάσει τα σήματα που απαιτούνται. Έχει υποδοχές για να έρθουν να κουμπώσουν οι αισθητήρες που αναφέραμε, καθώς και θύρα για τον προγραμματισμό του ESP32.



Εικόνα 5.15: PCB Layout αρχικής πλακέτας

Η τρισδιάστατη απεικόνιση εικόνα 5.16, δείχνει την απλοποιημένη εικόνα της πλακέτας. Όλες οι απαραίτητες υποδοχές βρίσκονται σε βολικά σημεία για την σύνδεση και αποσύνδεση τους από τον χρήστη καθώς και η είσοδος της τροφοδοσίας στο κάτω μέρος της πλακέτας.



Εικόνα 5.16: 3D View αρχικής πλακέτας

Κεφάλαιο 6ο: Ανάπτυξη του λογισμικού

6.1 Αρχιτεκτονική συστήματος (Client – Server)

Στη παρακάτω ενότητα περιγράφουμε την αρχιτεκτονική του συστήματος. Την λειτουργία του μικροελεγκτή ESP32 και του Server. Το σύστημα υλοποιεί μια end-to-end αλυσίδα όπου:

Συλλέγει, προ επεξεργάζεται, στέλνει, αποθηκεύει, απεικονίζει τις μετρήσεις ποιότητας του αέρα σε πραγματικό χρόνο.

6.1.1 Client

Ο client είναι το κομμάτι της συσκευής το οποίο θα πάρει τα δεδομένα από τους αισθητήρες και θα τα στείλει στον server. Για να κάνουμε τις λειτουργίες αυτές, χρησιμοποιούμε το πρόγραμμα του Arduino IDE, καθώς μέσα από αυτό μπορούμε να επικοινωνήσουμε με τον ESP32. Υπάρχει μια πληθώρα από παραδείγματα και βοηθητικά μέσα που καθιστούν την χρήση του πολύ εύκολη στη κατανόηση. Ένα από τα βασικότερα κομμάτια του είναι η εγκατάσταση και σωστή χρήση των κατάλληλων βιβλιοθηκών. Πιο συγκεκριμένα για το δικό μας project χρησιμοποιήσαμε τις παρακάτω βιβλιοθήκες:

- BSEC2 (v2.5.0.2) για BME688 (IAQ & CLASS)
- SPI για 8x BME688, I²C για MUX & SEN0460
- WS2812B RGB LEDs (ενδείξεις)
- SD (CSV logging)
- Wi-Fi (HTTP/JSON)

Πιο αναλυτικά στο παρακάτω κομμάτι κώδικα αναφέρονται όλα όσα χρειάστηκε να κάνουμε include από βιβλιοθήκες και σε σχόλιο ο λόγος που τα βάλουμε.

```
1 #include <Arduino.h> // Βασικό API Arduino (setup/loop, Serial, pinMode κ.λπ.)
2 #include <Wire.h> // I2C bus (SEN0460, expander/mux)
3 #include <SPI.h> // SPI bus (επικοινωνία με τους 8x BME688)
4 #include <Preferences.h> // NVS αποθήκευση/φόρτωση BSEC state (warm start)
5 #include <bsec2.h> // Bosch BSEC2: IAQ, eCO2, bVOC, gas %, selectivity/class
6 #include <SD.h> // SD κάρτα για CSV logging
7 #include <Adafruit_NeoPixel.h> // Έλεγχος WS2812B LEDs στο PIN 26
8 #include <WiFi.h> // Σύνδεση Wi-Fi (ESP32 core)
9 #include <HTTPClient.h> // HTTP POST προς server
10 #include <ArduinoJson.h> // Δημιουργία/σειριοποίηση JSON payload
11
12 #include "commMux.h" // Custom: SPI μέσω I2C-GPIO expander/mux για 8x BME688
13 #include "ajax_or_not_354_10.h" // Custom: BSEC selectivity config (CLASS: Air/Ajax)
14 #include "DFRobot_AirQualitySensor.h" // Βιβλιοθήκη αισθητήρα σωματιδίων SEN0460 (PM/particle counts)
15
16 // (μέσα στο αρχείο config blob για BSEC IAQ profile)
17 #include <config/bme680/bme680_iaq_33v_3s_28d/bsec_iaq.txt> // BSEC IAQ config blob (3s LP)
```

Στη συνέχεια κάνουμε αναφορά στην αρχιτεκτονική του BME688. Το παρακάτω κομμάτι κώδικα ορίζει το τι ρόλο θα έχει κάθε αισθητήρας. Με το enum Role : uint8_t δημιουργούμε έναν τύπο όπου έχει δύο τιμές που μας ενδιαφέρουν. Ορίζουμε το ROLE_CLASS (0) για τους αισθητήρες που θα χρησιμοποιούν το προφίλ ταξινόμησης δηλαδή αν είναι Air/ Ajax και ROLE_IAQ (1) για τους αισθητήρες που θα χρησιμοποιούν το προφίλ αναγνώρισης ποιότητας αέρα (IAQ, sIAQ, eCO₂, bVOC, Gas%).

Με τον πίνακα SENSOR_ROLE χωρίζουμε τους ρόλους στους αισθητήρες. Συγκεκριμένα, βάζουμε το NUM_OF_SENS να είναι ίσο με 8 και λέμε ότι οι αισθητήρες 0,1,2,3 θα έχουν ρόλο CLASS και οι υπόλοιποι αισθητήρες 4,5,6,7 θα έχουν ρόλο IAQ.

Σημείωση: Για το καλύτερο αποτέλεσμα θα ήταν πιο σωστό να χρησιμοποιήσουμε όλους τους αισθητήρες για έναν ρόλο και να μη το σπάσουμε. Αλλά λόγω της εργασίας και ότι θέλουμε να δείξουμε τις δυνατότητες το χωρίσαμε, χωρίς να σημαίνει πως είναι λάθος τρόπος.

Στη συνέχεια ο κώδικας διαβάζει τον πίνακα και φορτώνει το σωστό BSEC config για κάθε αισθητήρα (ταξινόμηση για CLASS ή bsec_iAQ.txt για IAQ) και μας δίνει τα σωστά αποτελέσματα.

```
1  #define NUM_OF_SENS 8
2  enum Role : uint8_t { ROLE_CLASS = 0, ROLE_IAQ = 1 };
3  const uint8_t SENSOR_ROLE[NUM_OF_SENS] = {
4      ROLE_CLASS, ROLE_CLASS, ROLE_CLASS, ROLE_CLASS,
5      ROLE_IAQ,  ROLE_IAQ,  ROLE_IAQ,  ROLE_IAQ
6  };
```

Με βάση τον κώδικα παρακάτω το subscribeIAQ(Bsec2& inst) δημιουργεί έναν πίνακα full[] με τα δεδομένα των μετρήσεων από την βιβλιοθήκη BSEC. Συγκεκριμένα, εμφανίζει τις ακατέργαστες τιμές, την θερμοκρασία και υγρασία διορθωμένες τιμές, τα IAQ, STATIC_IAQ, CO2_EQUIVALENT, BREATH_VOC_EQUIVALENT και το GAS_PERCENTAGE.

Σημείωση: Υπάρχουν raw & compensated τιμές. Οι raw τιμές είναι καλές για debugging και οι compensated τιμές που λαμβάνονται όταν ο BSEC διορθώνει την επίδραση της θέρμανσης, δηλαδή δείχνει την πραγματική τιμή.

Αντίστοιχα, το subscribeCLASS(Bsec2& inst) ζητά επίσης raw & compensated αλλά και δείκτη που τροφοδοτεί τα μοντέλα ταξινόμηση (RAW_GAS_INDEX). Επίσης, δίνει δύο πιθανότητες ανάμεσα στο Air και το Ajax (GAS_ESTIMATE_1 και GAS_ESTIMATE_2)

```
1  static bool subscribeIAQ(Bsec2& inst) {
2      bsecSensor full[] = { BSEC_OUTPUT_RAW_TEMPERATURE, BSEC_OUTPUT_RAW_PRESSURE,
3          BSEC_OUTPUT_RAW_HUMIDITY, BSEC_OUTPUT_RAW_GAS,
4          BSEC_OUTPUT_SENSOR_HEAT_COMPENSATED_TEMPERATURE,
5          BSEC_OUTPUT_SENSOR_HEAT_COMPENSATED_HUMIDITY,
6          BSEC_OUTPUT_IAQ, BSEC_OUTPUT_STATIC_IAQ,
7          BSEC_OUTPUT_CO2_EQUIVALENT, BSEC_OUTPUT_BREATH_VOC_EQUIVALENT,
8          BSEC_OUTPUT_GAS_PERCENTAGE };
9      return inst.updateSubscription(full, sizeof(full)/sizeof(full[0]), BSEC_SAMPLE_RATE_LP);
10 }
11
12 static bool subscribeCLASS(Bsec2& inst) {
13     bsecSensor full[] = { BSEC_OUTPUT_RAW_TEMPERATURE, BSEC_OUTPUT_RAW_PRESSURE,
14         BSEC_OUTPUT_RAW_HUMIDITY, BSEC_OUTPUT_RAW_GAS, BSEC_OUTPUT_RAW_GAS_INDEX,
15         BSEC_OUTPUT_SENSOR_HEAT_COMPENSATED_TEMPERATURE,
16         BSEC_OUTPUT_SENSOR_HEAT_COMPENSATED_HUMIDITY,
17         BSEC_OUTPUT_GAS_ESTIMATE_1, BSEC_OUTPUT_GAS_ESTIMATE_2 };
18     return inst.updateSubscription(full, sizeof(full)/sizeof(full[0]), BSEC_SAMPLE_RATE_SCAN);
19 }
```

Το παρακάτω κομμάτι κώδικα αποθηκεύει την βαθμονόμηση που μαθαίνει η BSEC όσο δουλεύει. Αν χαθεί και ξεκινήσει από την αρχή θα αργήσει να σταθεροποιηθεί το IAQ. Για αυτόν τον λόγο, το αποθηκεύουμε στο NVS μέσω Preferences

```

1 bool loadStateSlot(Bsec2 bsec, uint8_t idx, Role role) {
2     char key[12]; snprintf(key, sizeof(key), "%uR%u", idx, (unsigned)role);
3     size_t len = prefs.getBytesLength(key);
4     if (len != BSEC_MAX_STATE_BLOB_SIZE) return false;
5     prefs.getBytes(key, bsecState, BSEC_MAX_STATE_BLOB_SIZE);
6     return bsec.setState(bsecState);
7 }
8 bool saveStateSlot(Bsec2 bsec, uint8_t idx, Role role) {
9     if (!bsec.getState(bsecState)) return false;
10    char key[12]; snprintf(key, sizeof(key), "%uR%u", idx, (unsigned)role);
11    prefs.putBytes(key, bsecState, BSEC_MAX_STATE_BLOB_SIZE);
12    return true;
13 }

```

Στο κώδικα στη συνέχεια βλέπουμε το callback που καλεί η βιβλιοθήκη BSEC κάθε φορά που έχει έτοιμα δεδομένα από κάθε BME688. Παίρνει η βιβλιοθήκη τα δεδομένα και τα αποθηκεύει στη δομή SensorCache του αντίστοιχου αισθητήρα.

```

1 void newDataCallback(const bme68xData data, const bsecOutputs outputs, Bsec2 bsec) {
2     SensorCache& c = cache[sensor];
3     for (uint8_t i=0; i<outputs.nOutputs; i++) {
4         const bsecData o = outputs.output[i];
5         switch (o.sensor_id) {
6             case BSEC_OUTPUT_IAQ: c.iaq = o.signal; break;
7             case BSEC_OUTPUT_GAS_ESTIMATE_1: c.p1=o.signal; c.acc=o.accuracy; break; // Ajax
8             case BSEC_OUTPUT_GAS_ESTIMATE_2: c.p2=o.signal; break; // Air
9             // ... όλα τα υπόλοιπα raw/comp...
10        }
11    }
12    leds_update_iaq_status(compute_iaq_status_from_cache());
13    leds_update_class_status(compute_class_status_from_cache());
14    printReport(sensor);
15    logSensorToCSV(sensor, c.last_ts_ns);
16 }

```

Ενδεικτικά LED

Τα LED που χρησιμοποιούνται στο κύκλωμα είναι πέντε. Η δομή που τα εφαρμόσαμε είναι:

- Το **LED0** το ονομάσαμε PWR_OK και θέλουμε να είναι πάντα πράσινο όταν δέχεται τροφοδοσία η συσκευή.
- Το **LED1** να είναι πάντα πράσινο όταν το IAQ βρίσκεται στα επιθυμητά όρια δηλαδή να έχει την ένδειξη Good status όταν $IAQ \leq 50$.
- Το **LED2** να είναι έντονο πορτοκαλί για IAQ 51-150 και κόκκινο για $IAQ > 150$ (χειρότερη τιμή από IAQ sensors).
- Το **LED3** να δείχνει το CLASS. Δηλαδή πράσινο αν $Air \geq Ajax$, αλλιώς Κόκκινο.
- Το **LED4** είναι αφιερωμένο στον αισθητήρα SEN0460. Βάση της μέτρησης των PM2.5 δίνει Πράσινο $\leq 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Πορτοκαλί $16-35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Κόκκινο $>35 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Συγκεκριμένα στον κώδικα το compute_iaq_status_from_cache() σαρώνει όλους τους IAQ αισθητήρες και επιστρέφει το χειρότερο status, δηλαδή 0 (good) εάν αν όλα ≤ 50 , 1 (warn) εάν βρεθεί $IAQ > 50$ και 2 (bad) εάν βρεθεί $IAQ > 150$. Το compute_class_status_from_cache παρατηρεί τους αισθητήρες που έχουν ρόλο CLASS και γυρνά true αν το $Air (p2) \geq Ajax (p1)$ (δηλ. “Air κερδίζει”), αλλιώς false.

Το `leds_update_iaq_status(st)` ορίζει τις λυχνίες όπως αναφέραμε παραπάνω.

```
1  static uint8_t compute_iaq_status_from_cache() {
2      uint8_t worst=0;
3      for (uint8_t i=0; i<NUM_OF_SENS; ++i)
4          if (cache[i].gotAnything && cache[i].role==ROLE_IAQ && !isnan(cache[i].iaq)) {
5              if (cache[i].iaq >150) worst = max<uint8_t>(worst,2);
6              else if (cache[i].iaq>50) worst = max<uint8_t>(worst,1);
7          }
8      return worst;
9  }
10
11 static bool compute_class_status_from_cache() {
12     for (uint8_t i=0; i<NUM_OF_SENS; ++i)
13         if (cache[i].gotAnything && cache[i].role==ROLE_CLASS && !isnan(cache[i].p1) && !isnan(cache[i].p2))
14             return (cache[i].p2 >= cache[i].p1); // Air wins?
15     return true;
16 }
17
18 static void leds_update_iaq_status(uint8_t st) {
19     pixels.setPixelColor(LED_IDX_PWR_OK, pixels.Color(0,255,0));
20     pixels.setPixelColor(LED_IDX_IAQ_GOOD, (st==0)? pixels.Color(0,255,0):0);
21     pixels.setPixelColor(LED_IDX_IAQ_WARN, st==1? pixels.Color(255,100,0): st==2? pixels.Color(255,0,0): 0);
22     pixels.show();
23 }
```

Σε αυτό το κώδικα το `senPoll()` τρέχει κάθε 5 δευτερόλεπτα, διαβάζει τον αισθητήρα SEN0460 και υπολογίζει το status με βάση τα όρια που θέσαμε. Τέλος, καλεί `leds_update_sen_status(status)` για να ανάψει το αντίστοιχο LED.

```
1  static void senPoll() {
2      if (millis() - senLastMs < 5000) return; senLastMs = millis();
3      SenData d = senRead();
4      uint8_t status = (d.pm2_5>35) ? 2 : (d.pm2_5>15) ? 1 : 0;
5      leds_update_sen_status(status); // 0=πράσινο,1=πορτοκαλί,2=κόκκινο
6  }
```

Το `ensureCsvHeader()` ελέγχει αν υπάρχει το αρχείο `/bme_log.csv` στην SD. Μετά εάν δεν υπάρχει, το δημιουργεί (`SD.open("/bme_log.csv", FILE_WRITE)`). Γράφει όλα τα ονόματα των στηλών, όπως φαίνεται στον κώδικα και κλείνει το αρχείο με το `f.close()`.

```
1  static void ensureCsvHeader() {
2      if (!SD.exists("/bme_log.csv")) {
3          File f = SD.open("/bme_log.csv", FILE_WRITE);
4          f.println(F("ms_since_boot,timestamp_ns,sensor,role,RawTemp_C,RawHum_pct,CompTemp_C,CompHum_pct,"
5                  "press_hPa,gasRes_ohm,gasIndex,IAQ,staticIAQ,eCO2_ppm,bVOC_ppm,gasPerc_pct,"
6                  "prob_Air_pct,prob_Ajax_pct,winner,accuracy"));
7          f.close();
8      }
9  }
```

Wi-Fi & HTTP/JSON προς server:

Το `sendDataToServer()` δημιουργεί ένα έγγραφο σε μορφή JSON (`DynamicJsonDocument`). Τοποθετεί γενικές πληροφορίες όπως `timestamp` και `device_id`. Μετά, διαβάζει τον αισθητήρα SEN0460 και φτιάχνει ένα αντικείμενο "sen0460" που περιέχει τις μετρήσεις του PM2.5, PM10. Στη συνέχεια, δημιουργεί πίνακα με όλα τα bme688 και για κάθε αισθητήρα έχει `sensor_id` και `role` (IAQ ή CLASS), `iaq` αν είναι IAQ sensor και τέλος, `prob_air` και `prob_ajax` αν είναι CLASS sensor. Κλείνοντας, το JSON αυτό ετοιμάζεται για POST στον Server.

```

1  static void sendDataToServer() {
2      DynamicJsonDocument doc(4096);
3      doc["timestamp"] = millis();
4      doc["device_id"] = "ESP32_BME688_SEN0460";
5
6      // SEN0460
7      SenData s = senRead();
8      JsonObject sen = doc.createNestedObject("sen0460");
9      sen["pm2_5"] = s.pm2_5; sen["pm10"] = s.pm10; // ...και τα υπόλοιπα
10
11     // BME688 array
12     JsonArray sensors = doc.createNestedArray("bme688");
13     for (uint8_t i=0; i<NUM_OF_SENS; i++) if (cache[i].gotAnything) {
14         JsonObject o = sensors.createNestedObject();
15         o["sensor_id"]=i; o["role"]= cache[i].role==ROLE_IAQ ? "IAQ":"CLASS";
16         o["iaq"] = cache[i].iaq; // αν IAQ
17         o["prob_air"] = cache[i].p2*100.0f; // αν CLASS
18         o["prob_ajax"] = cache[i].p1*100.0f;
19     }
20     // POST ...
21 }

```

Κύρια ροή (setup/loop)

Στη κύρια ροή έχουμε το setup() το οποίο δίνει σήμα στα LED, το I²C, το SPI, το Wi-Fi, την SD και το mux. Κάνει επίσης αρχικοποίηση τον αισθητήρα SEN0460 και για κάθε BME688 ρυθμίζει την επικοινωνία, δεσμεύει την BSEC, ξυπνάει τον αισθητήρα φορτώνει το σωστό ρόλο, βλέπει τις εξόδους και ορίζει το newDataCallback. Τέλος, στο loop() τρέχει όλους τους BME688 (envSensor.run()) και ελέγχει το status αν αποτύχει, καλεί senPoll() για τον SEN0460 και στέλνει τα δεδομένα στον server (sendDataToServer()) κάθε 3 δευτερόλεπτα.

```

1  void setup() {
2      leds_begin(); Wire.begin(21,22); SPI.begin();
3      initWiFi(); initSD(); ensureCsvHeader(); commMuxBegin(Wire, SPI); senInit();
4      for (uint8_t i=0; i<NUM_OF_SENS; i++) {
5          commConfig[i]=commMuxSetConfig(Wire, SPI, i, commConfig[i]);
6          envSensor[i].allocateMemory(bsecMemBlock[i]);
7          envSensor[i].begin(BME688_SPI_INTF, commMuxRead, commMuxWrite, commMuxDelay, &commConfig[i]);
8          envSensor[i].setConfig(SENSOR_ROLE[i]==ROLE_IAQ ? bsec_config_iaq : bsec_config_selectivity);
9          loadStatesSlot(envSensor[i], i, (Role)SENSOR_ROLE[i]);
10         (SENSOR_ROLE[i]==ROLE_IAQ ? subscribeIAQ(envSensor[i]) : subscribeCLASS(envSensor[i]));
11         envSensor[i].attachCallback(newDataCallback);
12     }
13 }
14
15 void loop() {
16     for (sensor=0; sensor<NUM_OF_SENS; sensor++)
17         if (!envSensor[sensor].run()) checkBsecStatus(envSensor[sensor]);
18     senPoll();
19     if (millis()-lastHttpPost >= 3000) { lastHttpPost=millis(); sendDataToServer(); }
20 }

```

6.1.2 Python Server

Ο Server είναι το επόμενο μέρος στο κομμάτι της διαδικασίας πραγματοποίησης του project. Αφού συλλέξει ο Client τα δεδομένα τα στέλνει στον Server και αυτός με την σειρά του τα ανεβάζει στην ιστοσελίδα και τα αποθηκεύει στην βάση δεδομένων. Έχει επίσης την δυνατότητα να καλύπτει το

login/UI, API για το ESP32, να δείχνει τις τελευταίες μετρήσεις, τα γραφήματα και καιρό μέσω api key από το OpenWeatherMap.

Εκκίνηση εφαρμογής & Αρχικοποίηση βάσης

Όταν γίνεται η εκκίνηση του Flask Server μπορούμε να διαβάσουμε τις ρυθμίσεις, ανοίξουμε την σύνδεση στη MySQL και αν χρειαστεί δημιουργήσουμε τη βάση, τους πίνακες και έναν admin χρήστη. Ακόμη εισάγουμε δείγματα δεδομένων για να λειτουργούν άμεσα τα γραφήματα μας.

```
1 app = Flask(__name__)
2 app.secret_key = 'sensor-system-secret-key-2024'
3
4 DB_CONFIG = {'host': 'localhost', 'user': 'root', 'password': '', 'database': 'sensor_system'}
5
6 def get_db_connection():
7     try:
8         return mysql.connector.connect(**DB_CONFIG)
9     except Exception as e:
10        print(f"Database connection error: {e}")
11        return None
12
13 def init_db():
14     conn = get_db_connection()
15     cursor = conn.cursor()
16     cursor.execute("CREATE DATABASE IF NOT EXISTS sensor_system")
17     cursor.execute("USE sensor_system")
18     cursor.execute('''CREATE TABLE IF NOT EXISTS users (... )''')
19     cursor.execute('''CREATE TABLE IF NOT EXISTS sensor_data (... )''')
20     cursor.execute('''CREATE TABLE IF NOT EXISTS sen0460_data (... )''')
21     # admin + sample data ...
22     conn.commit(); cursor.close(); conn.close()
```

Αυθεντικοποίηση χρηστών & συνεδρίες

Έχουμε σελίδες που είναι για login και register. Με το hash_password(p) κάνουμε hash το password με SHA-256 και το verify_password(p, h) ελέγχουμε εάν ο κωδικός p ταιριάζει με το αποθηκευμένο hash h. Το login_required(f) αναφέρει ότι αν ο χρήστης δεν είναι συνδεδεμένος θα τον στείλει στην σελίδα για να κάνει login. Τέλος, το /login route αν είναι GET εμφανίζει τη φόρμα login (login.html) ενώ αν είναι POST βλέπει το username/password από την βάση δεδομένων και αν συμπληρωθούν σωστά τα αποθηκεύει αλλιώς μένει στην σελίδα του login.

```
1 def hash_password(p): return hashlib.sha256(p.encode()).hexdigest()
2 def verify_password(p, h): return hash_password(p) == h
3
4 def login_required(f):
5     @wraps(f)
6     def inner(*a, **kw):
7         if 'user_id' not in session:
8             return redirect(url_for('login'))
9         return f(*a, **kw)
10    return inner
11
12 @app.route('/login', methods=['GET', 'POST'])
13 def login():
14     if request.method == 'POST':
15         # έλεγχος username/password στη MySQL
16         if user and verify_password(password, user['password_hash']):
17             session['user_id'] = user['id']
18             ...
19             return redirect(url_for('dashboard'))
20     return render_template('login.html')
```

UI routes (σελίδες) και ροή front-end

Η διαδικασία για να ανοίξουν οι ιστοσελίδες. Το / (index) εάν υπάρχει θα ανοίξει κατευθείαν η κεντρική σελίδα dashboard, αλλιώς θα μείνει στην σελίδα του login.

Για τις παρακάτω σελίδες είναι απαραίτητα τα στοιχεία της αυθεντικοποίησης των χρηστών:

/dashboard, /bme και /graph

```
1 @app.route('/')
2 def index():
3     return redirect(url_for('dashboard') if 'user_id' in session else url_for('login'))
4
5 @app.route('/dashboard'); @login_required
6 def dashboard():
7     return render_template('dashboard.html', username=session['username'])
8
9 @app.route('/bme'); @login_required
10 def bme_page(): return render_template('bme.html')
11
12 @app.route('/graph'); @login_required
13 def graph_page(): return render_template('graph.html')
```

Ingest API από ESP32: /api/data

Στο παρακάτω κομμάτι κώδικα ορίζεται το latest_data δηλαδή κρατάει τις τελευταίες μετρήσεις BME688, SEN0460 και timestamp. Δημιουργεί το route /api/data με POST όπου παίρνει JSON μορφές από τον Client, ενημερώνει την τρέχουσα ώρα και τις μετρήσεις.

```
1 latest_data = {'bme688': [], 'sen0460': {}, 'timestamp': None}
2 data_lock = threading.Lock()
3
4 @app.route('/api/data', methods=['POST'])
5 def receive_data():
6     data = request.get_json()
7     with data_lock:
8         latest_data['timestamp'] = datetime.now().strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S')
9         latest_data['bme688'] = data.get('bme688', [])
10        latest_data['sen0460'] = data.get('sen0460', {})
11        return jsonify({'status': 'success'}), 200
```

Και αποθήκευση σε DB:

Σύμφωνα με αυτά που αναφέραμε προηγουμένως, στη συνέχεια εάν έχουμε σύνδεση εισάγει τα δεδομένα των αισθητήρων στους αντίστοιχους πίνακες sen0460_data και sensor_data.

```
1 @app.route('/api/data', methods=['POST'])
2 def receive_data():
3     data = request.get_json(force=True)
4     user_id = session.get('user_id', 1)
5     with data_lock:
6         latest_data['timestamp'] = datetime.now().strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S')
7         latest_data['bme688'] = data.get('bme688', [])
8         latest_data['sen0460'] = data.get('sen0460', {})
9     conn = get_db_connection()
10    if conn:
11        cur = conn.cursor()
12        sen = data.get('sen0460', {})
13        if sen:
14            cur.execute('INSERT INTO sen0460_data (timestamp, pm1_0, pm2_5, pm10, user_id)
15                        VALUES (%s,%s,%s,%s,%s)',
16                        (datetime.now(), sen.get('pm1_0'), sen.get('pm2_5'),
17                        sen.get('pm10'), user_id))
18        for s in data.get('bme688', []):
19            cur.execute('INSERT INTO sensor_data
20                        (timestamp, device_id, sensor_id, role, temp, hum, press, iaq, eco2, user_id)
21                        VALUES (%s,%s,%s,%s,%s,%s,%s,%s,%s,%s)',
22                        (datetime.now(), data.get('device_id', 'ESP32'),
23                        s.get('sensor_id'), s.get('role'),
24                        s.get('temp'), s.get('hum'), s.get('press'),
25                        s.get('iaq'), s.get('eco2'), user_id))
26        conn.commit(); cur.close(); conn.close()
27    return jsonify({'status': 'success'}), 200
```

Live endpoints για τον browser (τελευταία δεδομένα)

Από τα /api/latest, /api/bme, /api/sen επιστρέφονται τα αντίστοιχα δεδομένα. Τα endpoints είναι προστατευμένα με login (@login_required) και χρησιμοποιούν lock για να έχουν ασφαλή πρόσβαση στα δεδομένα.

```
1 @app.route('/api/latest'); @login_required
2 def get_latest_data():
3     with data_lock: return jsonify/latest_data)
4
5 @app.route('/api/bme'); @login_required
6 def get_bme_data():
7     with data_lock:
8         return jsonify({'bme688': latest_data['bme688'], 'timestamp': latest_data['timestamp']})
9
10 @app.route('/api/sen'); @login_required
11 def get_sen_data():
12     with data_lock:
13         return jsonify({'sen0460': latest_data['sen0460'], 'timestamp': latest_data['timestamp']})
```

Γραφήματα φίλτρα χρόνου

Για τον BME688:

Το endpoint /api/graph/bme επιστρέφει σε JSON μορφή όλα τα ιστορικά δεδομένα του αισθητήρα BME688. Δέχεται κάποιες παραμέτρους όπως ημέρα, εβδομάδα και μήνα, καθώς και ταξινόμηση ανάλογα με το id του αισθητήρα. Παίρνει τα δεδομένα από την βάση sensor_data και τα δίνει σε πίνακες.

```
1 @app.route('/api/graph/bme'); @login_required
2 def get_bme_graph_data():
3     time_range = request.args.get('range', 'day')
4     sensor_id = request.args.get('sensor_id', 'all')
5     time_filter = datetime.now() - (timedelta(days=1) if time_range=='day'
6                                     else timedelta(weeks=1) if time_range=='week' else timedelta(days=30))
7     conn = get_db_connection(); cur = conn.cursor(dictionary=True)
8     query = '''SELECT timestamp, sensor_id, temp, hum, press, iaq, eco2
9               FROM sensor_data WHERE user_id=%s AND timestamp >= %s'''
10    params = [session['user_id'], time_filter]
11    if sensor_id != 'all': query += ' AND sensor_id=%s'; params.append(int(sensor_id))
12    query += ' ORDER BY timestamp ASC'
13    cur.execute(query, params); rows = cur.fetchall()
14    cur.close(); conn.close()
15    out = {'timestamps':[], 'temperature':[], 'humidity':[], 'pressure':[], 'iaq':[], 'eco2':[]}
16    for r in rows:
17        out['timestamps'].append(r['timestamp'].strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S'))
18        out['temperature'].append(float(r['temp']) if r['temp'] is not None else None)
19        ...
20    return jsonify(out)
```

Για τον SEN0460:

Για τον αισθητήρα αυτόν χρησιμοποιεί το /api/graph/sen όπως και στον άλλον αισθητήρα για τα δεδομένα. Όπως και πριν χωρίζει το εύρος και παίρνει τον πίνακα sen0460_data και επιστρέφει τα δεδομένα του.

```

1 @app.route('/api/graph/sen'); @login_required
2 def get_sen_graph_data():
3     time_range = request.args.get('range', 'day')
4     time_filter = datetime.now() - (timedelta(days=1) if time_range=='day'
5                                     else timedelta(weeks=1) if time_range=='week' else timedelta(days=30))
6     conn = get_db_connection(); cur = conn.cursor(dictionary=True)
7     cur.execute('SELECT timestamp, pm1_0, pm2_5, pm10
8                 FROM sen0460_data WHERE user_id=%s AND timestamp>=%s
9                 ORDER BY timestamp ASC', (session['user_id'], time_filter))
10    rows = cur.fetchall(); cur.close(); conn.close()
11    out = {'timestamps':[], 'pm1_0':[], 'pm2_5':[], 'pm10':[]}
12    for r in rows:
13        out['timestamps'].append(r['timestamp'].strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S'))
14        out['pm1_0'].append(r['pm1_0']); out['pm2_5'].append(r['pm2_5']); out['pm10'].append(r['pm10'])
15    return jsonify(out)

```

Καιρός (OpenWeatherMap)

Ότι αφορά τον καιρό έχουμε το endpoint /api/weather όπου επιστρέφει τον καιρό από το OpenWeatherMap. Βάζουμε στη παράμετρο πόλη την περιοχή που μας ενδιαφέρει. Αυτό σαν default τοποθεσία χρησιμοποιεί την Αθήνα. Κάνει δύο GET, το ένα είναι /weather και το άλλο /forecast.

```

1 WEATHER_API_KEY = "Fb0...25f"
2
3 @app.route('/api/weather'); @login_required
4 def get_weather_data():
5     city = request.args.get('city', 'Athens')
6     cur_r = requests.get(f"http://api.openweathermap.org/data/2.5/weather?q={city}&appid={WEATHER_API_KEY}&units=metric&lang=en")
7     fct_r = requests.get(f"http://api.openweathermap.org/data/2.5/forecast?q={city}&appid={WEATHER_API_KEY}&units=metric&lang=en")
8     current = cur_r.json(); forecast = fct_r.json()
9     # επεξεργασία & σύνολψη ...
10    return jsonify({'current': weather_info, 'forecast': forecast_days_summary})

```

6.2 Συλλογή δεδομένων από τους αισθητήρες

Η συλλογή των δεδομένων γίνεται από το ESP32 με δύο διαφορετικούς τρόπους:

- (α) Ο SEN0460 που μετράει τα αιωρούμενα σωματίδια μέσω I²C και
- (β) Ο BME688 που ανιχνεύει αέρια με πολλούς αισθητήρες με SPI και με λογισμικό BSEC2 της Bosch.

Αρχικά αρχικοποιούνται τα πρωτόκολλα και οι διασυνδέσεις όπως I²C/SPI, SD, Wi-Fi. Μετά ορίζουμε τους ρόλους των αισθητήρων ανάμεσα σε IAQ ή CLASS. Κάθε νέο δείγμα αποθηκεύεται σε μνήμη (ανά αισθητήρα) με δήλωση χρόνου και τέλος, ενημερώνονται τα LED.

6.2.1 Ανάγνωση δεδομένων από τον SEN0460

Συνδέουμε τον SEN0460 στο I²C με τη διεύθυνση 0x19 και χρησιμοποιούμε τη βιβλιοθήκη DFRobot_AirQualitySensor. Στο setup() γίνεται begin() και έλεγχος παρουσίας του αισθητήρα. Οι μετρήσεις ανανεώνονται κάθε κάθε 5 δευτερόλεπτα (παράμετρος SEN_PERIOD_MS=5000) μέσω της senPoll().

- **Μετρούμενα μεγέθη.**
Τα μεγέθη που μετράμε είναι τα αιωρούμενα σωματίδια που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα. Πιο συγκεκριμένα έχουμε τα PM1.0 μg/m³, PM2.5 μg/m³, PM10 μg/m³ και ο αριθμός σωματιδίων ανά 0.1 L αέρα (>0.3 μm, >0.5 μm, μέχρι >10 μm).
- **LED4**
Έχουμε ορίσει το LED4 αποκλειστικά για τις μετρήσεις του SEN0460. Η ένδειξη αφο'ρα την τιμή PM2.5 με όρια να εκτελούνται ως Πράσινο όταν ≤ 15 μg/m³, Πορτοκαλί όταν 16-35 μg/m³ και Κόκκινο όταν > 35 μg/m³.
Η ενημέρωση γίνεται στην leds_update_sen_status() αμέσως μετά από κάθε ανάγνωση.

- **Ενσωμάτωση στη ροή.**
Οι τελευταίες μετρήσεις των PM στέλνονται στον server ως object sen0460 σε JSON μορφή. Επιπλέον, οι μετρήσεις των PM καταγράφονται σε ένα CSV αρχείο μέσω της κάρτας SD για παραπάνω ανάλυση εάν κριθεί απαραίτητο.

6.2.2 Ανάγνωση δεδομένων από τον BME688

Ότι αφορά του αισθητήρες BME688 μπορούμε να επιβεβαιώσουμε ότι η επικοινωνία γίνεται μέσω SPI, για να χρησιμοποιήσει ταυτόχρονα πολλούς αισθητήρες το ESP32 με κοινό bus. Για κάθε αισθητήρα δημιουργείται ανεξάρτητη αναφορά βιβλιοθήκης BSEC2 με δεσμευμένη μνήμη (BSEC_INSTANCE_SIZE) και ρόλο:

Ρόλοι (SENSOR_ROLE): Όπως εξηγήσαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο οι πρώτη τέσσερις αισθητήρες λειτουργούν σε ρόλο ταξινόμησης ανάμεσα σε καθαρό αέρα και Ajax και οι υπόλοιποι τέσσερις λειτουργούν σε ρόλο δείκτη ποιότητας αέρα και τα υπόλοιπα φυσικά μεγέθη. Όλη αυτή η λειτουργία γίνεται μέσω της βιβλιοθήκης BSEC και των αρχείων από το AI Studio

Ρύθμιση BSEC & αποκατάσταση κατάστασης: Στο setup() φορτώνεται το bsec_config_iq για IAQ και γίνεται updateSubscription() στις απαιτούμενες εξόδους:

Για IAQ: RAW_*, COMP_*, IAQ, STATIC_IAQ, CO2_EQUIVALENT, BREATH_VOC_EQUIVALENT, GAS_PERCENTAGE.

Για CLASS: RAW_GAS_INDEX, GAS_ESTIMATE_1 (Ajax), GAS_ESTIMATE_2 (Air) σε ρυθμό SCAN.

Λογική οπτικών ενδείξεων (LEDs):

Το LED0 (PWR_OK) θέλουμε να είναι πάντα πράσινο όταν υπάρχει τροφοδοσία.

Τα LED1 & LED2 (IAQ status) υπολογίζουν τη χειρότερη κατάσταση από όλους τους IAQ αισθητήρες, δηλαδή: Θα είναι Πράσινο όταν $IAQ \leq 50$. Μετά Πορτοκαλί όταν $IAQ 51-150$. Τέλος, Κόκκινο όταν $IAQ > 150$.

Το LED3 δίνει το CLASS. Με λίγα λόγια όταν $Air \geq Ajax$ θα ανάβει πράσινο και όταν $Ajax > Air$ θα ανάβει κόκκινο.

6.3 Επικοινωνία ESP32 με server (HTTP/REST API)

Η ανταλλαγή δεδομένων γίνεται με HTTP/JSON σε τοπικό δίκτυο. Γίνεται συλλογή των δεδομένων από τον ESP32 και στη συνέχεια τα κάνει POST στον Flask server, ενώ οι ιστοσελίδες κάνουν GET στα endpoints για να προβληθούν σε πραγματικό χρόνο οι μετρήσεις και να εμφανιστούν οι υπόλοιπες λειτουργίες που ορίσαμε.

Μεταφορά & συχνότητα

Με την εντολή HTTP_POST_PERIOD_MS = 3000 γίνεται σύνδεση στο Wi-Fi κάθε τρία δευτερόλεπτα από τον μικροελεγκτή, ο οποίος στέλνει HTTP POST στο: <http://192.168.1.6:5000/api/data>

JSON

Στο JSON αναφέρονται κάποιες βασικές πληροφορίες όπως χρόνος και device_id, ο πίνακας του SEN0460 και το BME688 με κάθε εγγραφή μετρήσεων.

Πλευρά client (ESP32)

Ο client προσπαθεί να συνδεθεί στο Wi-Fi και σε περίπτωση που χαθεί η σύνδεση προσαρμόζεται το POST. Μόλις σταθούν τα δεδομένα με επιτυχία μας επιστρέφει την σήμανση 200 (ότι όλα πήγαν καλά).

Πλευρά server (Flask)

Το endpoint POST `/api/data` μπορεί να διαβάσει το JSON και να μας ενημερώσει τη live μνήμη (`latest_data`) με χρονόσημο server. Μπορεί επίσης, να επιστρέφει `{ "status": "success" }` και κωδικό 200. Όταν υπάρχει σφάλμα, θα επιστρέφει μήνυμα και 400/500.

Τα endpoints GET `/api/latest`, `/api/bme`, `/api/sen` σερβίρουν μόνο την cache για άμεση προβολή στο Dashboard/BME/SEN, ενώ τα `/api/graph/*` διαβάζουν από MySQL για ιστορικές σειρές.

6.4 Ανάπτυξη Web Εφαρμογής

Η ιστοσελίδα αποτελεί την οθόνη του συστήματος παρακολούθησης ποιότητας αέρα. Χρησιμοποιεί το σχέδιο των πολλαπλών σελίδων με ελαφρύ front-end σε vanilla JavaScript, το οποίο έχει επικοινωνία με τον server μέσω REST endpoints από τον server. Μετά την αυθεντικοποίηση, ο χρήστης έχει πρόσβαση σε ζωντανές μετρήσεις, ιστορικά δεδομένα, γραφήματα και βοηθητικές πληροφορίες (π.χ. καιρός). Η πληροφορία προβάλλεται σε καρτέλες με ήπια χρωματική παλέτα, ώστε να είναι κατανοητή και ευχάριστη στον χρήστη.

Ροή δεδομένων και ρόλοι

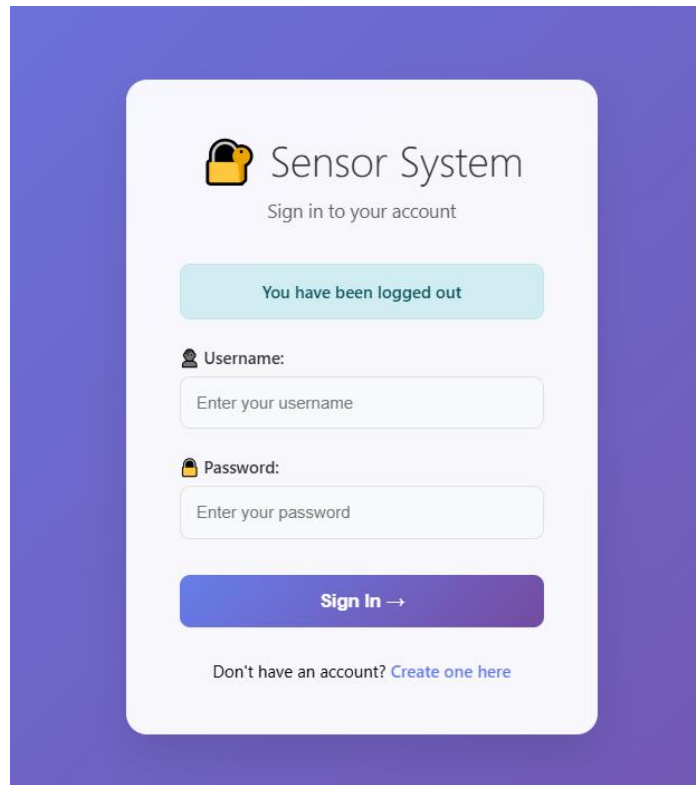
Ο client έχει τη δυνατότητα να συλλέξει τις μετρήσεις από τους αισθητήρες που αναφέραμε παραπάνω και να τα στείλει σε μορφή JSON στον server. Με την σειρά του τον server θα ενημερώσει την μνήμη για να προβληθούν σε πραγματικό χρόνο οι μετρήσεις που συλλέχθηκαν στις αντίστοιχες ιστοσελίδες. Με τη βοήθεια της βάσης δεδομένων MySQL μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις αποθηκευμένες εγγραφές για να παρουσιάσουμε ιστοσελίδες με ιστορικό αλλά και γραφήματα όπου δείχνουν όλες τις μετρήσεις. Οι ιστοσελίδες παίρνουν τα δεδομένα από το server και συγκεκριμένα από τα endpoints `/api/latest`, `/api/bme`, `/api/sen`, `/api/graph`.

Ασφάλεια και πρόσβαση

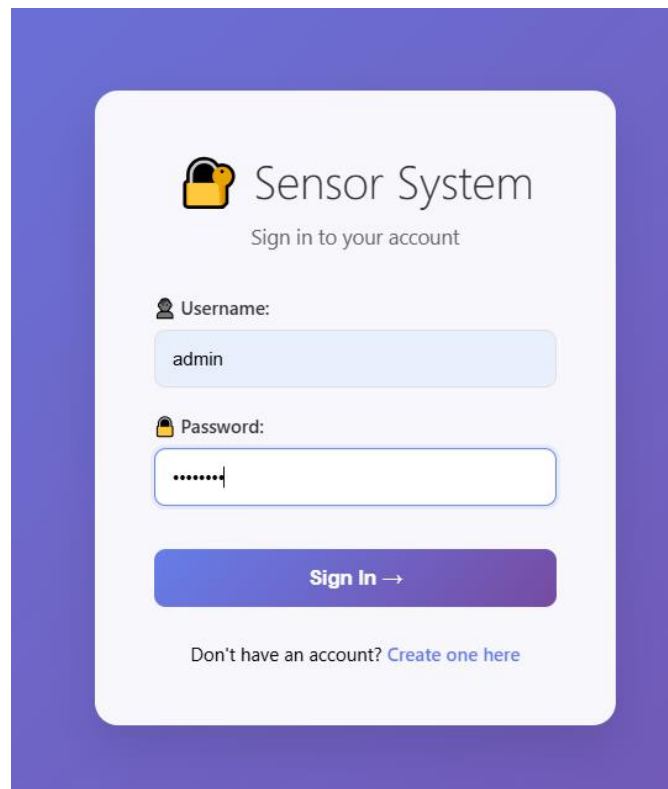
Μέσω του Flask server Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αυθεντικοποίηση των χρηστών και αυτό θα το δούμε στις σελίδες `login/register/logout`. Παρακάτω και στις αντίστοιχες ενότητες θα δούμε περισσότερες πληροφορίες.

6.4.1 Login / Register

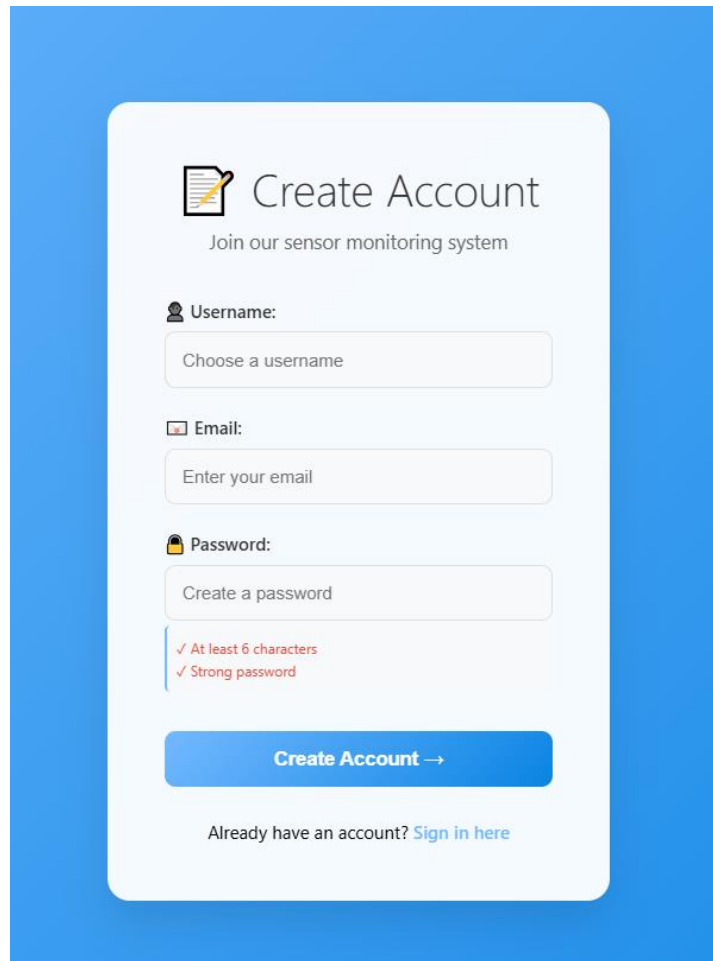
Ιστοσελίδες `login` και `Register` είναι οι αρχικές σελίδες του project μας. Στην εικόνα 6.1 βλέπουμε το `login page` το οποίο ζητά να εισάγουμε `username` και `password` εικόνα 6.2. Εάν τα στοιχεία αυθεντικοποίησης είναι εγγεγραμμένα στον πίνακα `users` της βάσης δεδομένων και επαληθευθούν μόλις πατήσουμε `sign in` θα μας ανοίξει η σελίδα `Dashboard`. Σε κάθε άλλη περίπτωση εάν δεν έχουμε επαληθευμένο λογαριασμό θα πατήσουμε `create one here` ώστε να μας βγάλει στην σελίδα του `Register` όπως φαίνεται στην εικόνα 6.3. Μόλις εισάγουμε `username`, ένα `e-mail` που χρησιμοποιούμε και τον κωδικό με τα χαρακτηριστικά που μας ζητάει ο λογαριασμός θα αποθηκευτεί στον πίνακα των `user` στην βάση δεδομένων. Αυτόματα θα μας επιστρέψει στην σελίδα για να κάνουμε `login` με τα στοιχεία που δημιουργήσαμε μόλις.



Εικόνα 6.1: Login



Εικόνα 6.2: Εισαγωγή στοιχείων

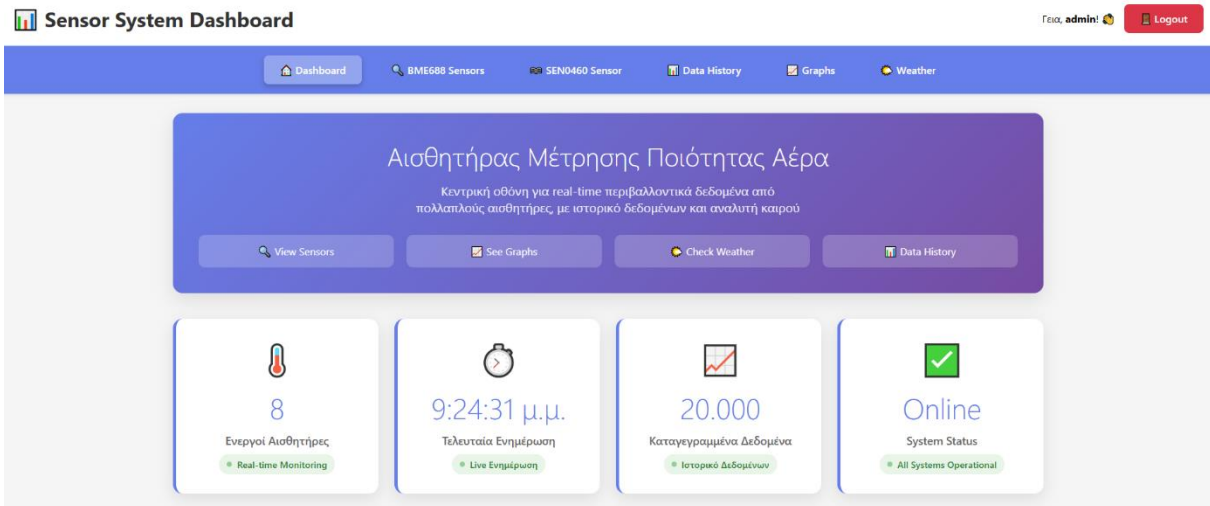


Εικόνα 6.3: Δημιουργία χρήστη

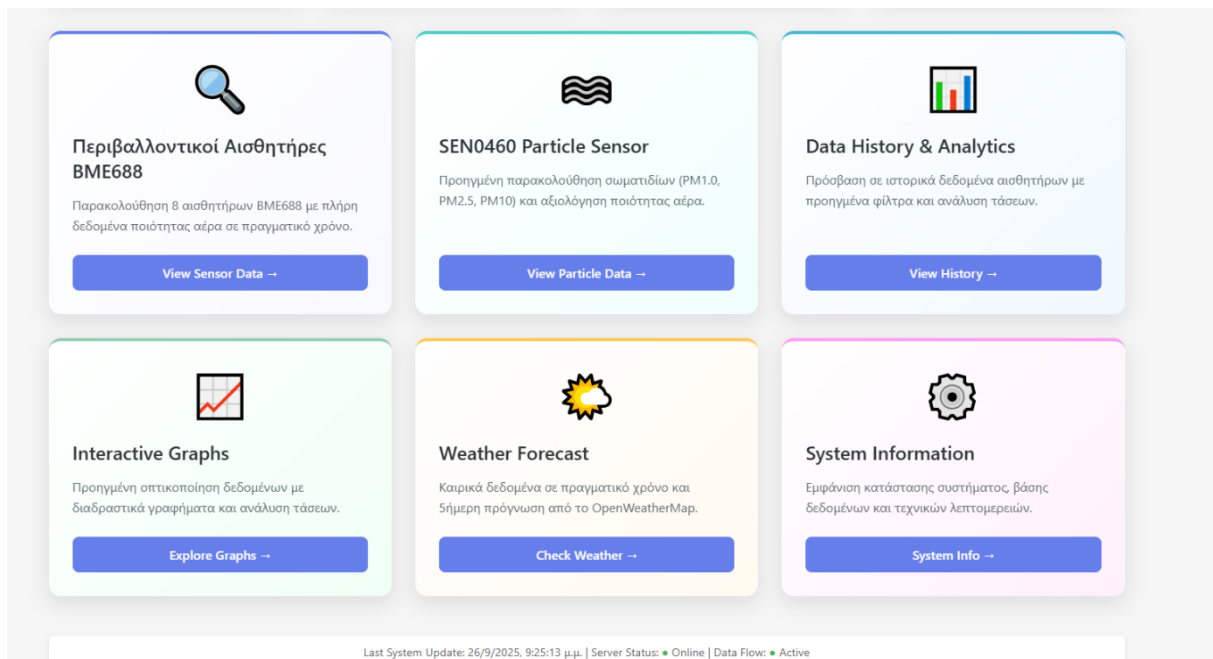
6.4.2 Dashboard

Η σελίδα Dashboard είναι η αρχική σελίδα του project μας. Εμφανίζει όλες τις σημαντικές πληροφορίες που χρειάζεται να ξέρουμε και μας δίνει την επιλογή να διαλέξουμε ανάμεσα στις σελίδες των δύο αισθητήρων, του ιστορικού, των γραφημάτων αλλά και του καιρού.

Επίσης στην εικόνα 6.4 μας δείχνει τους ενεργούς αισθητήρες του συστήματος, την πραγματική ώρα της τελευταίας ενημέρωσης των μετρήσεων, τα καταγεγραμμένα δεδομένα και αν το σύστημα μου είναι online.



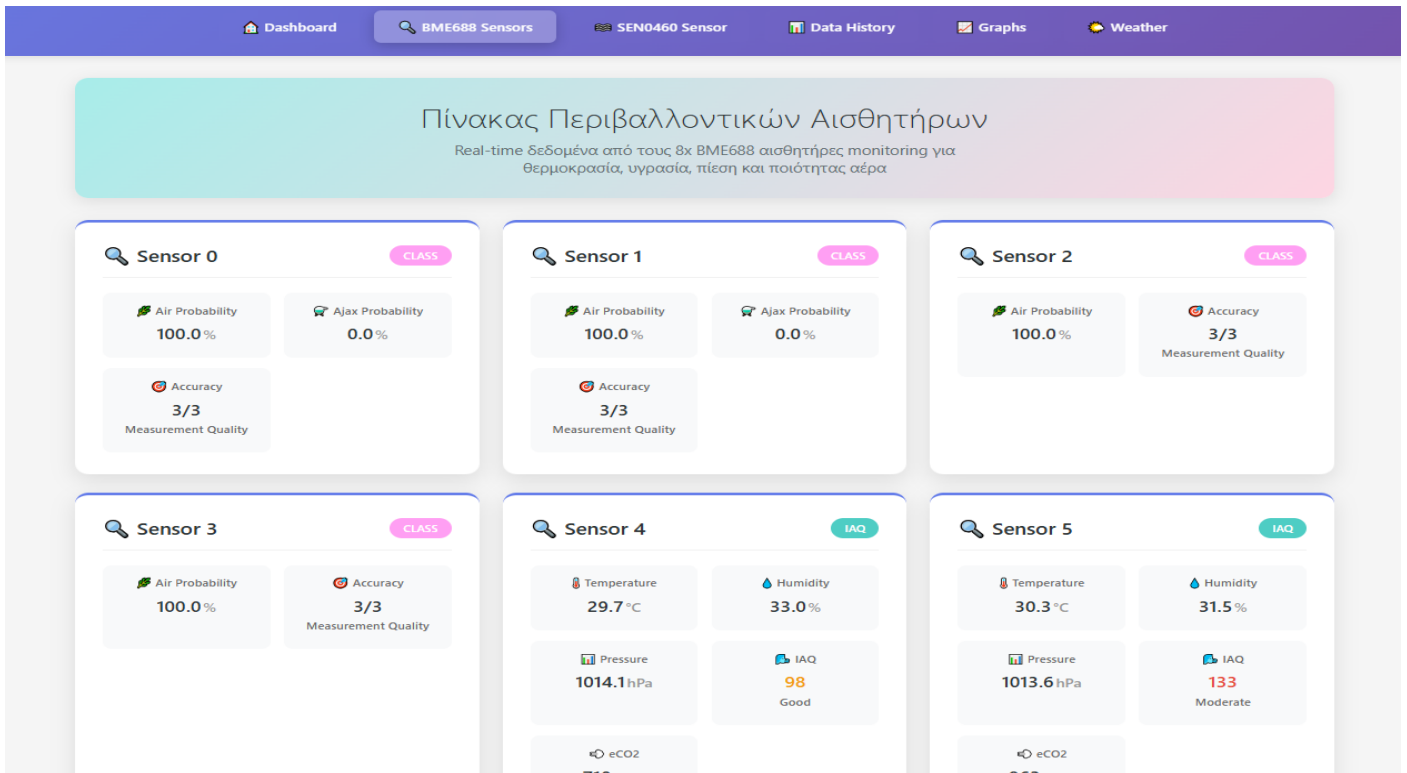
Εικόνα 6.4: Αρχική Dashboard



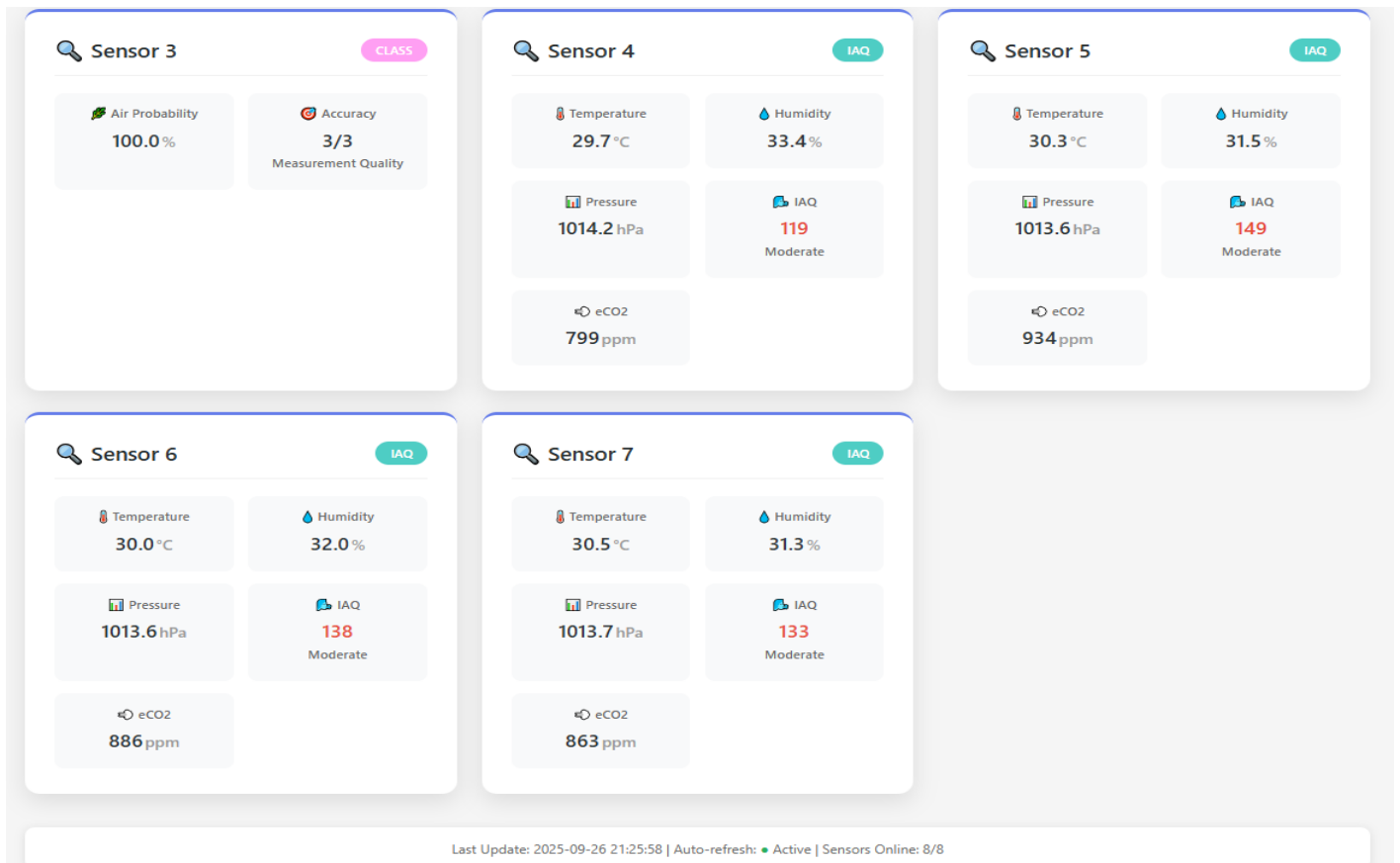
Εικόνα 6.5: Εμφάνιση επιλεγμένων στοιχείων

6.4.3 BME (BME688 overview)

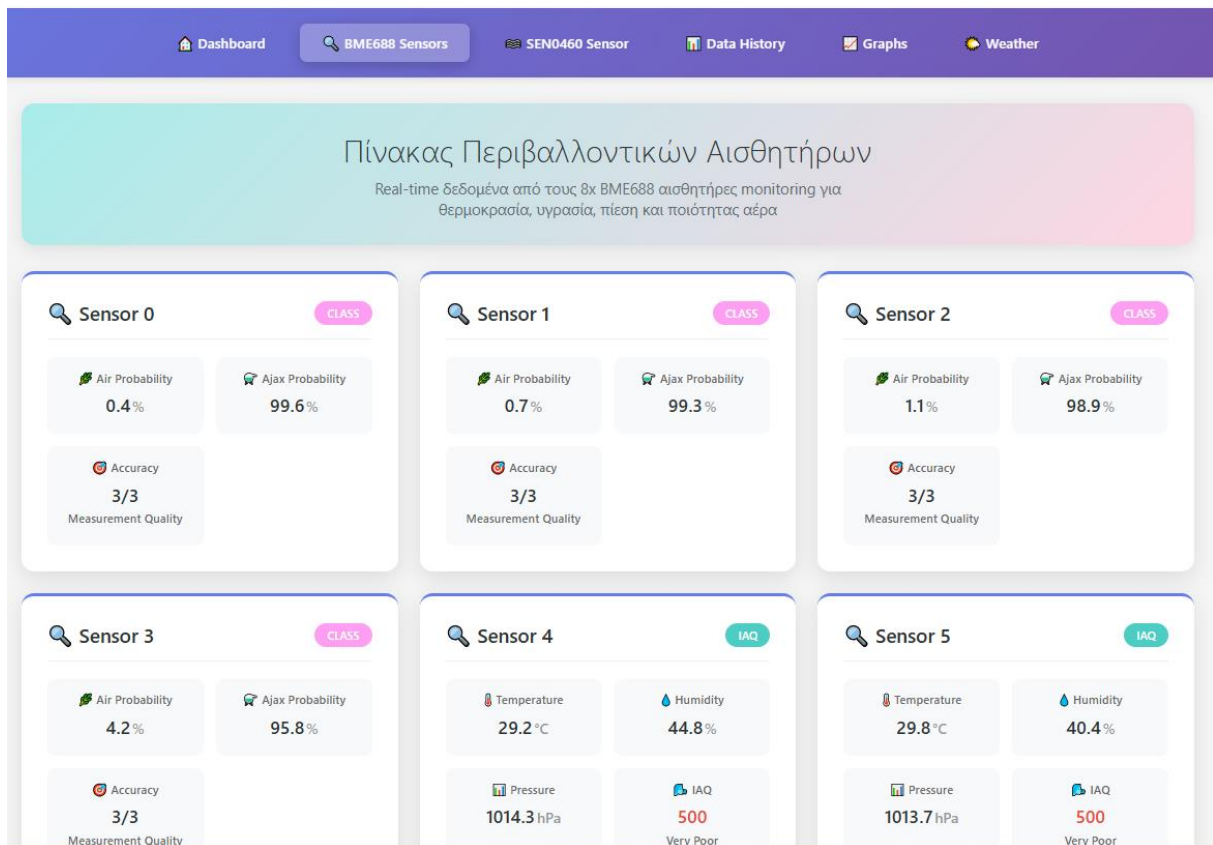
Η σελίδα του αισθητήρα BME688 μας παρουσιάζει έναν πίνακα περιβαλλοντικών αισθητήρων όπου δείχνει τα real time δεδομένα από τους οκτώ αισθητήρες οι οποίοι οι πρώτη τέσσερις αφορούν στο CLASS, Δηλαδή αν είναι Air όπως στην εικόνα 6.6 ή αν είναι Ajax όπως στην εικόνα 6.8. Επίσης οι υπόλοιποι τέσσερις αισθητήρες μαζί δίνουν πληροφορίες για το δείκτη ποιότητας αέρα όπως τις εικόνες 6.7 και 6.9. Τέλος να προσθέσουμε ότι στους αισθητήρες 4,5,6,7 βλέπουμε και τις βασικές μετρήσεις της θερμοκρασίας, υγρασίας, πίεσης και ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα.



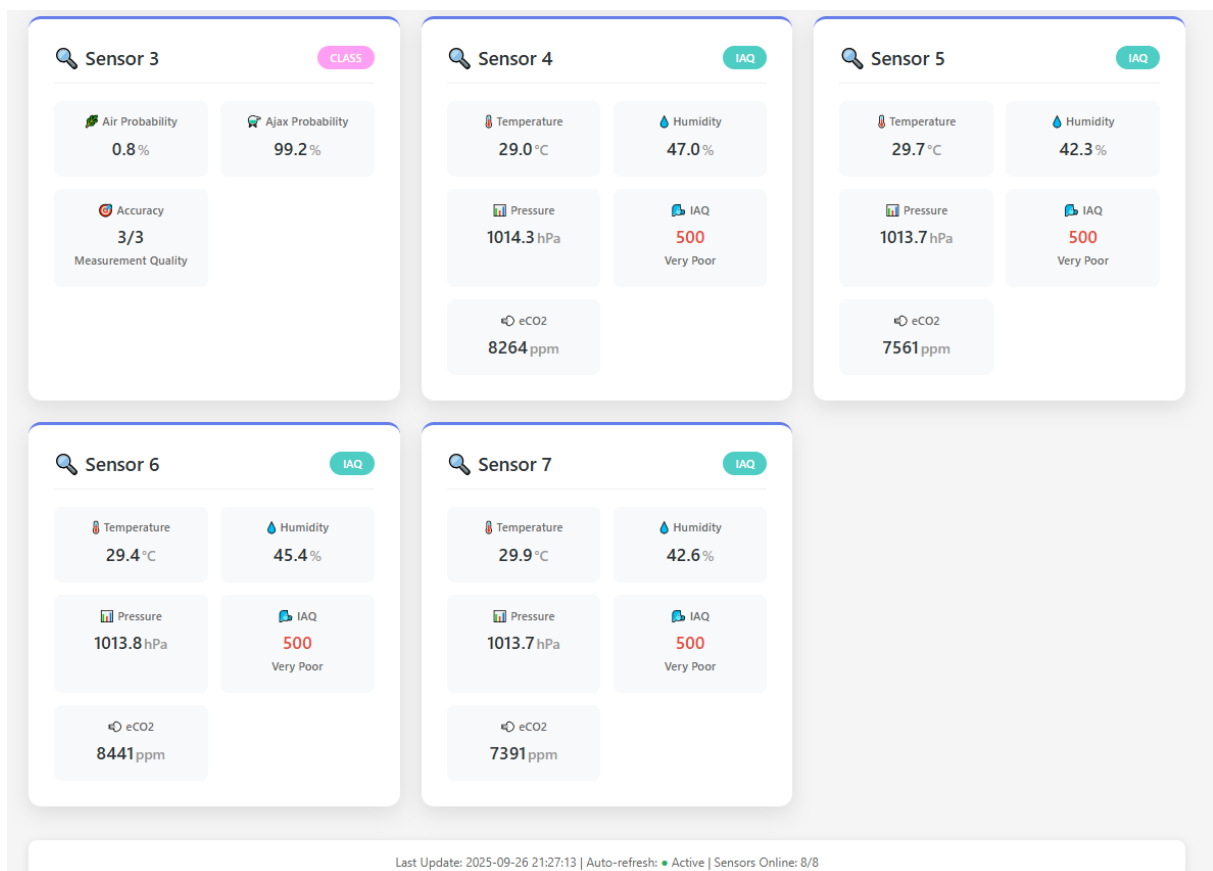
Εικόνα 6.6: Εμφάνιση μετρήσεων BME688 με CLASS = Air



Εικόνα 6.7: Εμφάνιση μετρήσεων BME688 και IAQ



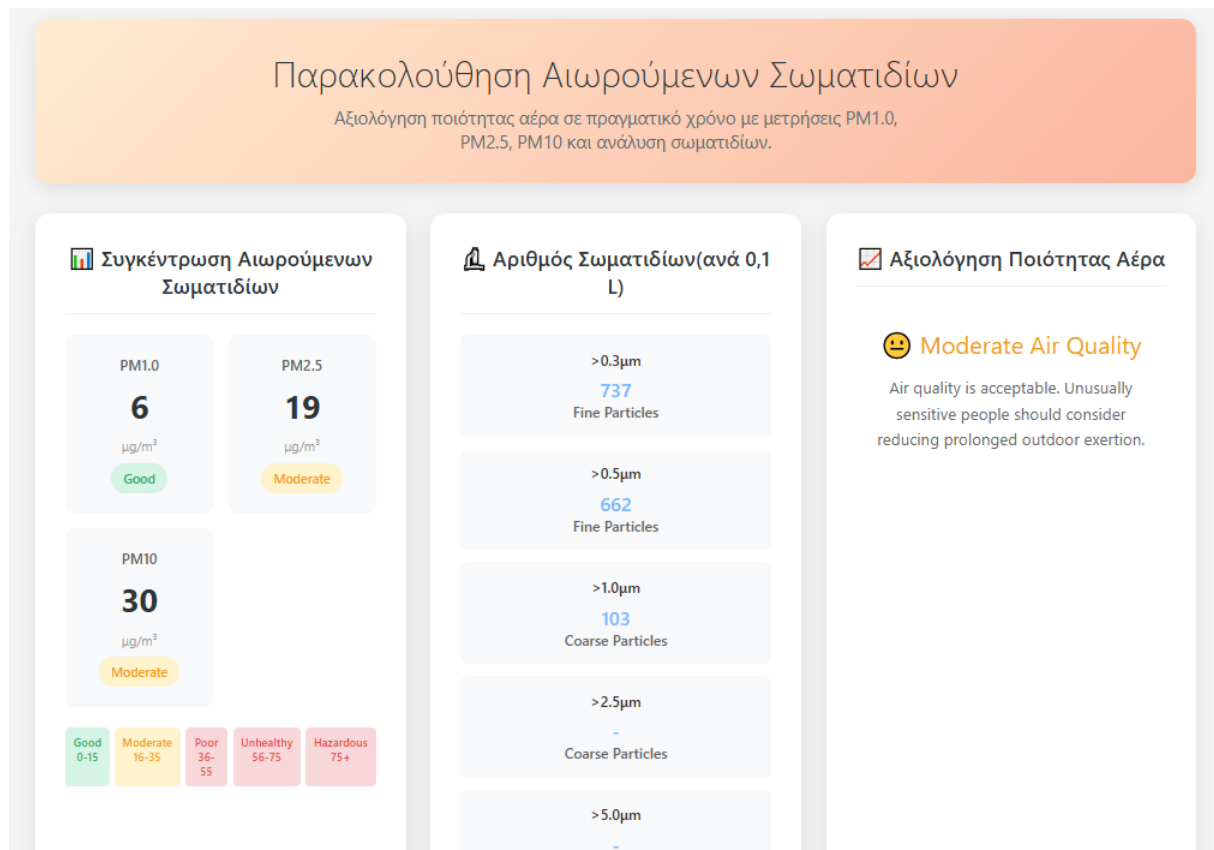
Εικόνα 6.8: Εμφάνιση μετρήσεων BME688 με CLASS = Ajax



Εικόνα 6.9: Εμφάνιση μετρήσεων BME688 και αύξηση IAQ

6.4.4 SEN (SEN0460 – PM)

Σύμφωνα με αυτόν τον αισθητήρα παρατηρούμε την συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων (PM1.0/PM2.5/PM10). Με βάση τα διεθνή όρια κλίμακας που υπάρχουν από τους οργανισμούς και τον αριθμό σωματιδίων ανά 0,1L νερού σχεδιάσαμε την χρωματική παλέτα ώστε ανάλογα με τις μετρήσεις να γίνει αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα με παρουσίαση του κατάλληλου μηνύματος.



Εικόνα 6.10: Εμφάνιση μετρήσεων SEN0460

6.4.5 History (πίνακες ιστορικού)

Η σελίδα του ιστορικού μας δείχνει τι σε 100 τελευταίες εγγραφές που έγιναν στους πίνακες ετών δύο αισθητήρων παρέχοντας μας σε βασικές πληροφορίες που αφορούν το χρόνο την τιμή αλλά και τον ρόλο που έχουν. Είναι ένα κομμάτι που βοηθάει να δούμε γρήγορα τις μετρήσεις καθώς και να κάνουμε ανάλυση και σύγκριση με τα προηγούμενα δεδομένα. Οι μετρήσεις αυτές αποθηκεύονται στην βάση δεδομένων MySQL και παραχωρούνται στην ιστοσελίδα μας. Τέλος, η ανανέωση αυτών γίνεται σε πραγματικό χρόνο, τόσο στη βάση δεδομένων όσο και στη σελίδα.

Αρχείο Ιστορικών Δεδομένων

Πλήρη ιστορικά αρχεία από όλους τους αισθητήρες με προηγμένα φίλτρα και δυνατότητες ανάλυσης.

48

BME688 Records

24

SEN0460 Records

72

Total Records

6

Average per Sensor

All Sensors

Last 100 Records

All Data Types

Export CSV

BME688 Sensor History (Latest 100 records)

Timestamp	Sensor ID	Role	Temperature	Humidity	Pressure	IAQ	Status
2025-09-26 00:35:34	#1	IAQ	31.9°C	65.4%	1022.0 hPa	50	Complete
2025-09-26 00:35:34	#-	CLASS	33.5°C	66.0%	1016.0 hPa	56	Complete
2025-09-25 23:35:34	#1	IAQ	30.6°C	63.6%	1021.0 hPa	48	Complete
2025-09-25 23:35:34	#-	CLASS	32.0°C	64.0%	1015.0 hPa	54	Complete
2025-09-25 22:35:34	#1	IAQ	29.3°C	61.8%	1020.0 hPa	46	Complete
2025-09-25 22:35:34	#-	CLASS	30.5°C	62.0%	1014.0 hPa	52	Complete
2025-09-25 21:35:34	#-	CLASS	32.0°C	60.0%	1013.0 hPa	50	Complete
2025-09-25 21:35:34	#1	IAQ	28.0°C	63.0%	1019.0 hPa	45	Complete
2025-09-25 20:35:34	#1	IAQ	30.7°C	61.2%	1018.0 hPa	44	Complete

Εικόνα 6.11: Ιστορικό μετρήσεων BME688

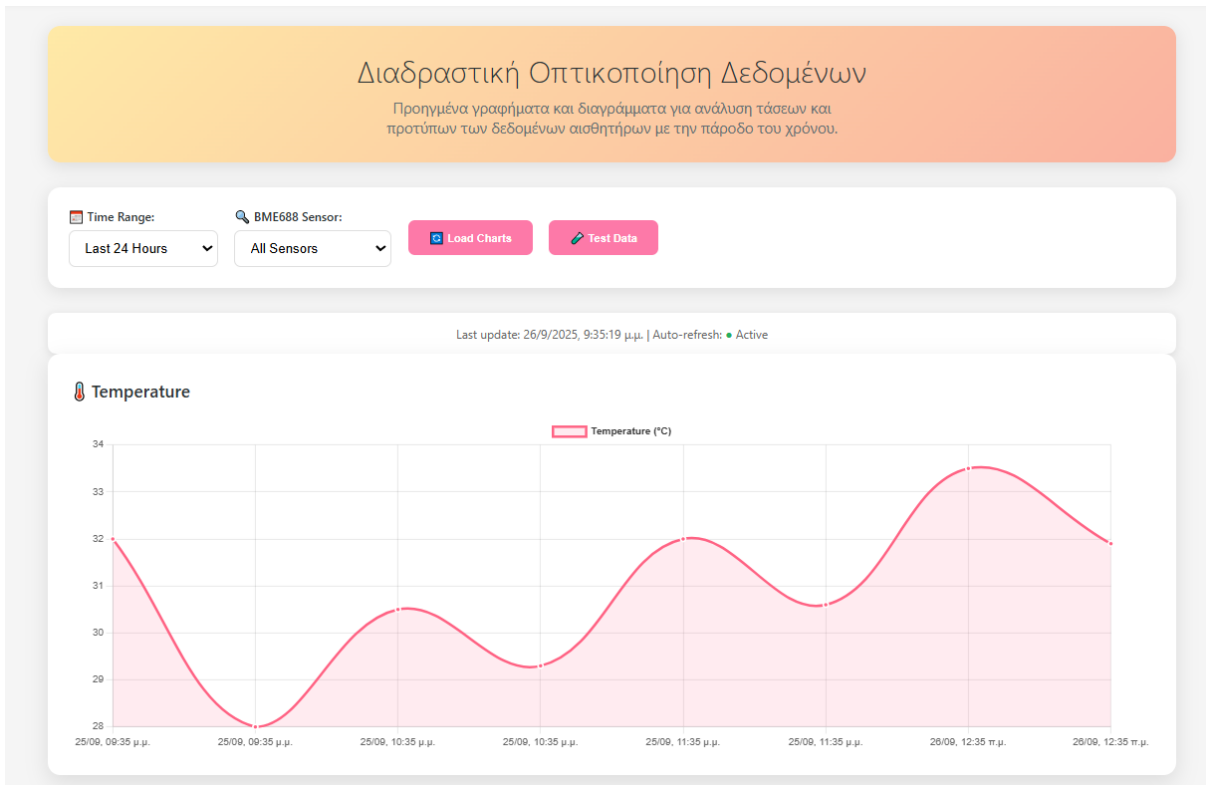
SEN0460 Sensor History (Latest 100 records)

Timestamp	PM2.5	PM10	Air Quality	Status
2025-09-26 00:35:34	26 µg/m ³	30 µg/m ³	Moderate	Complete
2025-09-25 23:35:34	25 µg/m ³	29 µg/m ³	Moderate	Complete
2025-09-25 22:35:34	24 µg/m ³	28 µg/m ³	Moderate	Complete
2025-09-25 21:35:34	23 µg/m ³	26 µg/m ³	Moderate	Complete
2025-09-25 20:35:34	21 µg/m ³	25 µg/m ³	Moderate	Complete
2025-09-25 19:35:34	20 µg/m ³	24 µg/m ³	Moderate	Complete
2025-09-25 18:35:34	19 µg/m ³	22 µg/m ³	Moderate	Complete
2025-09-25 17:35:34	18 µg/m ³	21 µg/m ³	Moderate	Complete
2025-09-25 16:35:34	16 µg/m ³	20 µg/m ³	Moderate	Complete
2025-09-25 15:35:34	15 µg/m ³	33 µg/m ³	Moderate	Complete
2025-09-25 14:35:34	14 µg/m ³	32 µg/m ³	Good	Complete
2025-09-25 13:35:34	13 µg/m ³	31 µg/m ³	Good	Complete
2025-09-25 12:35:34	23 µg/m ³	29 µg/m ³	Moderate	Complete
2025-09-25 11:35:34	22 µg/m ³	28 µg/m ³	Moderate	Complete
2025-09-25 10:35:34	21 µg/m ³	27 µg/m ³	Moderate	Complete
2025-09-25 09:35:34	20 µg/m ³	25 µg/m ³	Moderate	Complete
2025-09-25 08:35:34	18 µg/m ³	24 µg/m ³	Moderate	Complete
2025-09-25 07:35:34	17 µg/m ³	23 µg/m ³	Moderate	Complete

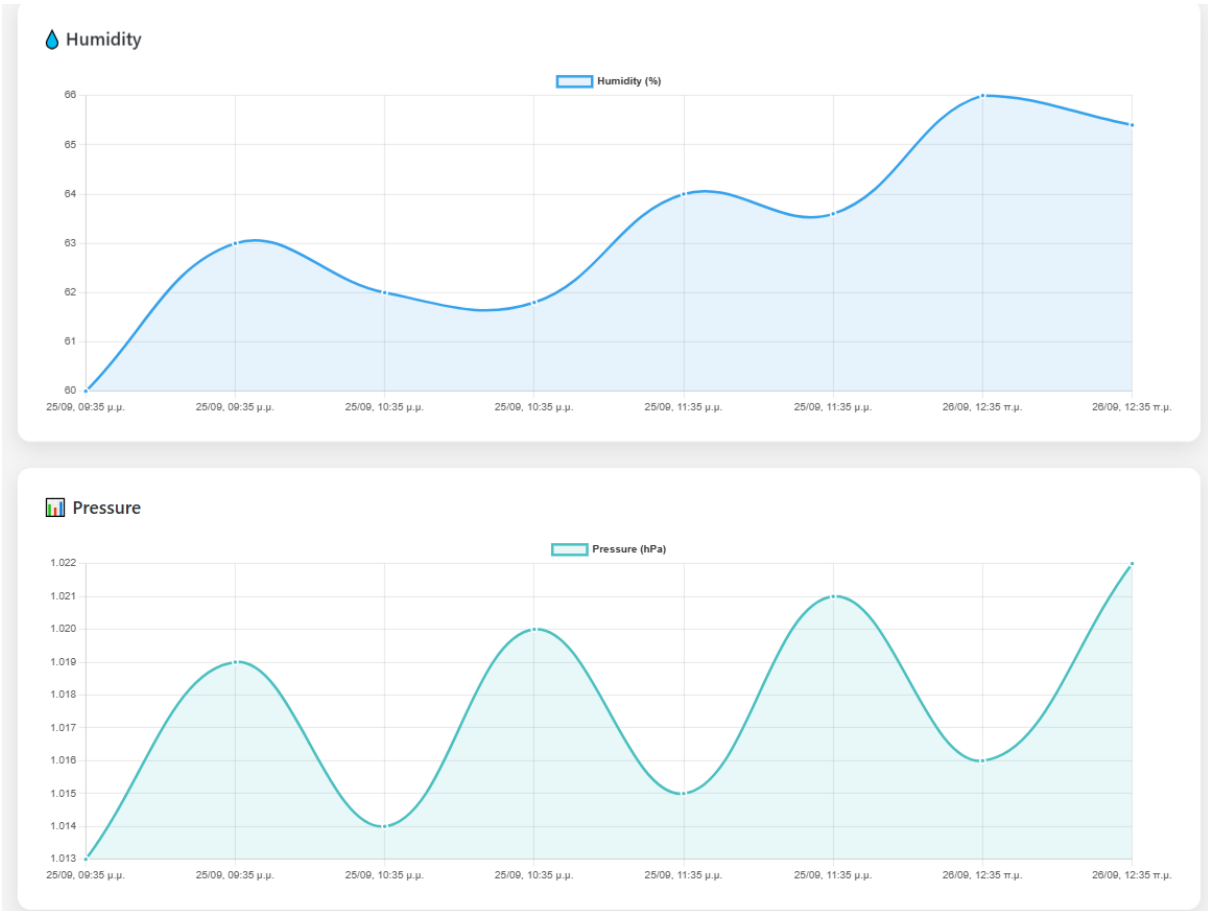
Εικόνα 6.12: Ιστορικό μετρήσεων SEN0460

6.4.6 Graphs (χρονικές σειρές)

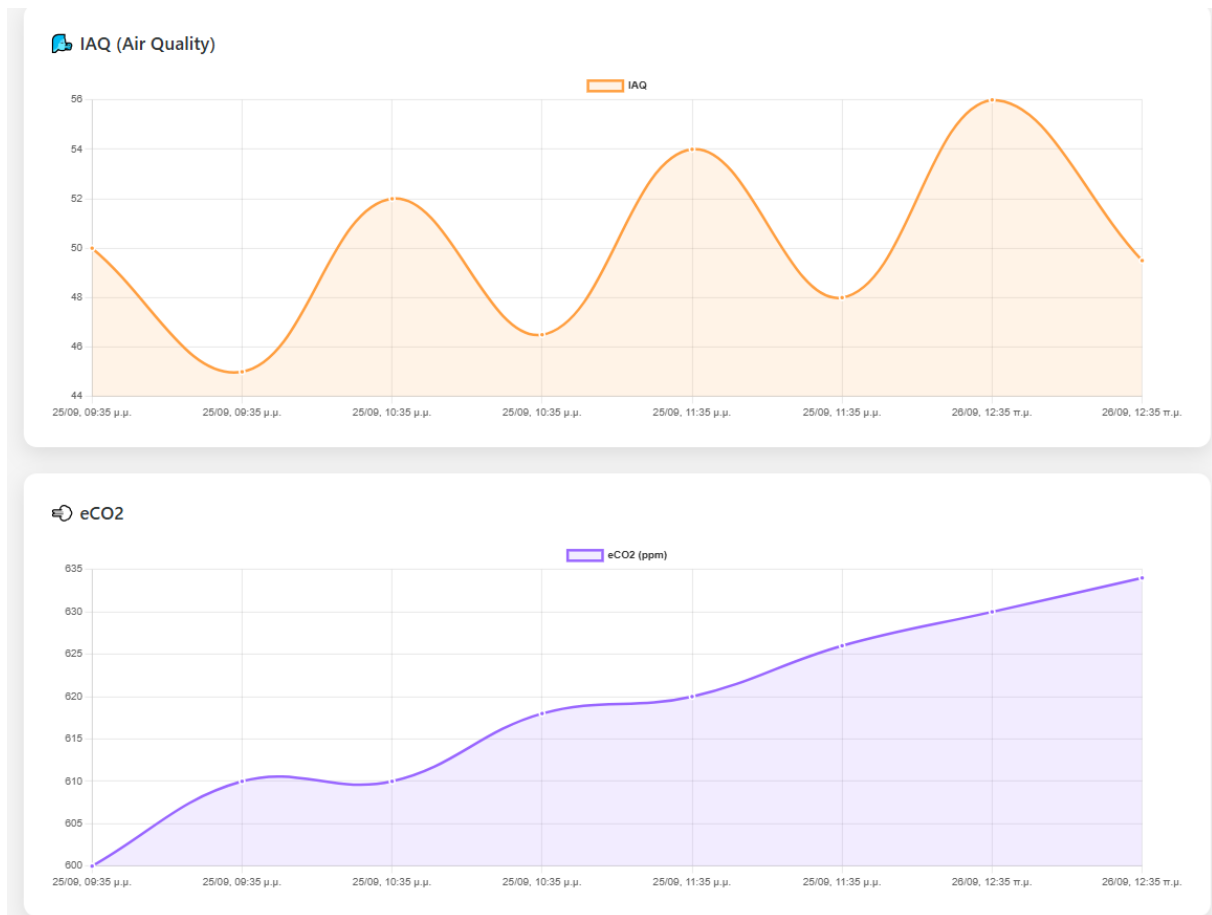
Η σελίδα των γραφημάτων μας παρέχει φίλτρα χρόνου που δίνουν την επιλογή να διαλέξουμε ανάμεσα σε ώρες, μέρες, εβδομάδες και μήνες, καθώς και να επιλέξουμε ποιον αισθητήρα θέλουμε να εμφανιστεί. Και για την συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήσαμε τα διαγράμματα της θερμοκρασίας, υγρασίας, πίεσης, του δείκτη ποιότητας αέρα και του ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα ενώ στο τέλος παρουσιάζεται και το διάγραμμα των αιωρούμενων σωματιδίων. Τα γραφήματα μας επιτρέπουν να κάνουμε αναγνώριση των τάσεων και των εξάρσεων με βάση τα δεδομένα.



Εικόνα 6.13: Γράφημα θερμοκρασίας



Εικόνα 6.14: Γράφημα υγρασίας και πίεσης



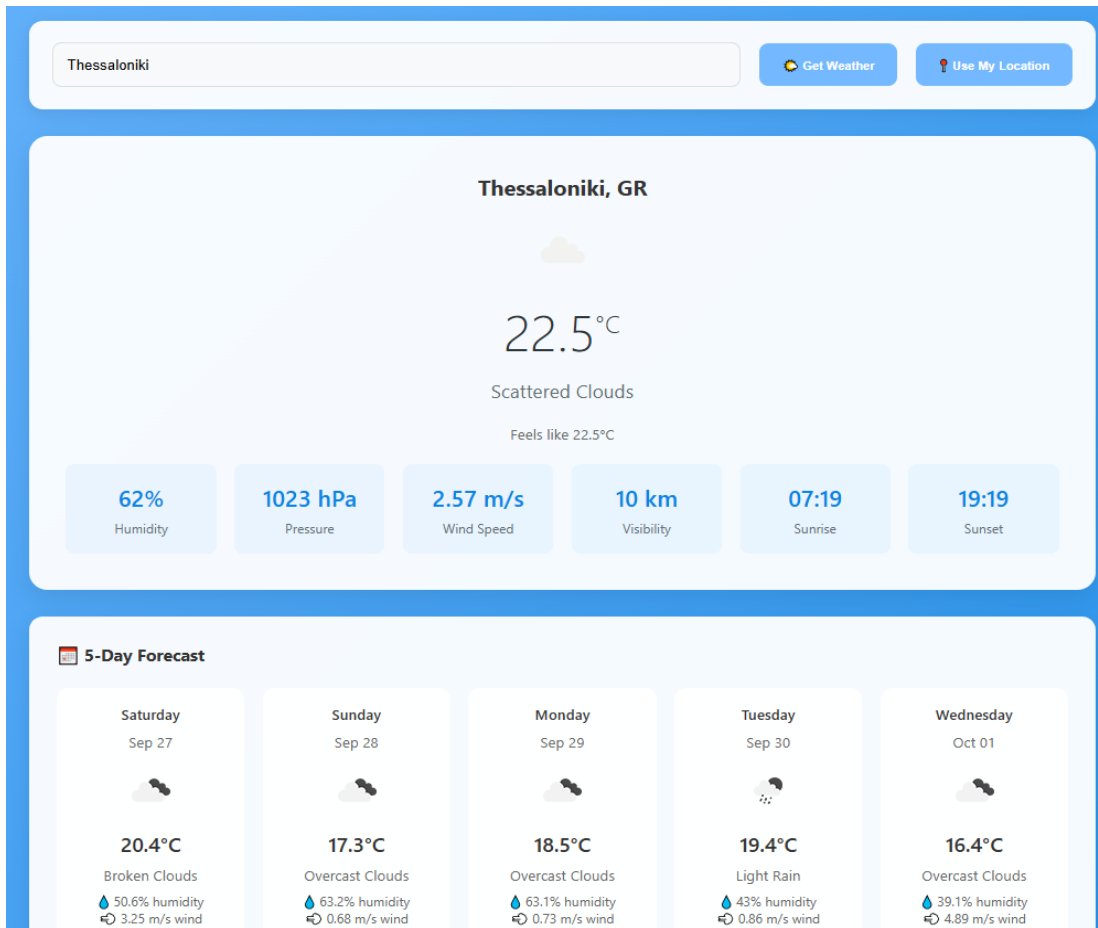
Εικόνα 6.15: Γράφημα IAQ και ισοδύναμο CO₂



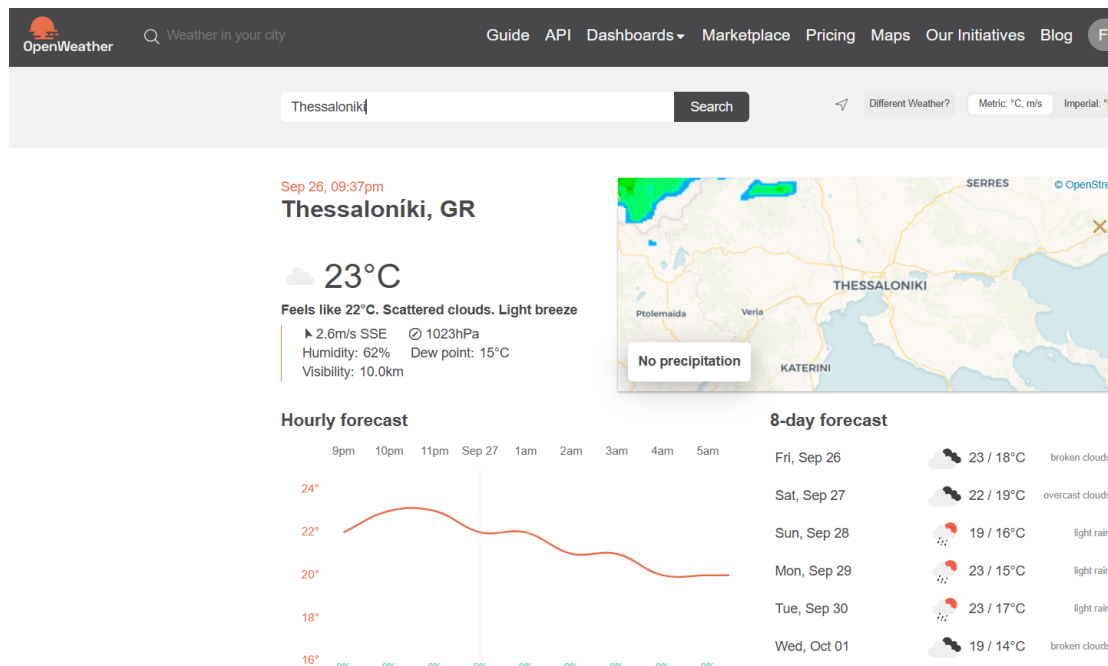
Εικόνα 6.16: Γράφημα PM_{2,5}

6.4.7 Weather

Τέλος η σελίδα του καιρού μας δείχνει τις τρέχουσες συνθήκες και την πρόγνωση πενθημέρου καιρού. Μας δίνει τη δυνατότητα να βάλουμε την πόλη που επιθυμούμε και μέσω του api key στον server θα ενημερώσει την σελίδα με τα δεδομένα της αντίστοιχης περιοχής. Από την εικόνα 6.18 επαληθεύουμε και επιβεβαιώνουμε τις μετρήσεις που φανίζονται στην δική μας ιστοσελίδα απλά η μόνη διαφορά είναι ότι τις εμφανίζει λίγο στρογγυλεμένες.



Εικόνα 6.17: Εμφάνιση καιρού στη τοπική περιοχή



Εικόνα 6.18: Επαλήθευση από το OpenWeatherMap

6.4.8 Σύνδεση client–server–UI

Το σύστημα τροφοδοτείται με μετρήσεις υψηλή συχνότητας από τον client. Με λίγα λόγια εφαρμόζεται ένα thresholds (IAQ και PM) και χωρίζει τους ρόλους στους BME688. Αντίστοιχα στον server θα αποθηκεύσουμε την μνήμη προσωρινά ενώ με την βάση δεδομένων θα αποθηκεύσουμε μόνιμα τα δεδομένα, χρησιμοποιώντας την στα endpoints για να δούμε σε πραγματικό χρόνο τα δεδομένα στην σελίδες. Το UI μας βοηθάει να οργανώσουμε τις σελίδες δηλαδή, το Dashboard, τις live μετρήσεις στο BME και SEN, να αναλύσουμε της τάσεις στα Graphs κλπ.

6.4.9 Αυθεντικοποίηση χρηστών

Η αυθεντικοποίηση γίνεται server-side με Flask και αποθηκεύονται οι χρήστες στον πίνακα της βάσης δεδομένων MySQL. Για να μπορέσουμε να έχουμε πρόσβαση σε όλες τις σελίδες και βασικότερα στην αρχική που είναι το Dashboard, πρέπει να γίνει επιτυχημένο login, τότε ο server δίνει πρόσβαση στις υπόλοιπες σελίδες.

Ροή λειτουργίας.

Αρχικά εμφανίζεται η σελίδα του login, Εφόσον έχουμε δημιουργήσει λογαριασμό πρέπει να εισάγουμε το username και το password Σε κάθε άλλη περίπτωση θα μας ανοίξει η σελίδα για να κάνουμε register. Σε αυτό το κομμάτι θα χρειαστεί να εισάγουμε username, ένα e-mail που χρησιμοποιούμε κι έναν κωδικό με τις απαραίτητες προϋποθέσεις που μας ζητάει. Μόλις δημιουργήσουμε το λογαριασμό, τα στοιχεία μας θα αποθηκευτούν και θα προστεθούν αυτόματα στον πίνακα user τις βάσεις δεδομένων μας θα μας και μετά θα μας επιστρέψει στη σελίδα του login για να κάνουμε είσοδο με τα στοιχεία μας. Εφόσον τα στοιχεία επαληθευθούν από την βάση δεδομένων θα ανοίξει η κεντρική σελίδα Dashboard.

Δεδομένα και αποθήκη.

Στη βάση δεδομένων MySQL (μέσω XAMPP) έχουμε δημιουργήσει τον πίνακα users με τα πεδία: id (PK), username και email (unique), password_hash, created_at, is_admin. Η εφαρμογή χρησιμοποιεί InnoDB και utf8mb4. Ο πίνακας αυτός είναι συνδεδεμένος με τα δεδομένα αισθητήρων μέσω του user_id, διασφαλίζοντας ιδιοκτησία και οριοθέτηση των μετρήσεων ανά λογαριασμό.

Διαχωρισμός από ingest συσκευής.

Η αυθεντικοποίηση των χρηστών δεν έχει καμία σχέση με την αποστολή δεδομένων του ESP32. Το ESP32 στέλνει τις μετρήσεις στο /api/data και ο ελέγχεται η πρόσβαση με API key στο HTTP header.

6.4.10 Εμφάνιση μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο

Για να δούμε τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο βασιζόμαστε στην προσωρινή μνήμη και όχι στη βάση δεδομένων MySQL. Στέλνονται δεδομένα κάθε 3 δευτερόλεπτα σε μορφή JSON στο /api/data. Και με αυτό τον τρόπο ο server ενημερώνει την μεταβλητή latest/data για live απεικόνιση και ταυτόχρονα κάνει την αποθήκευση στην MySQL για τα ιστορικά δεδομένα. Το UI Χρησιμοποιεί τις live τιμές με μικρή καθυστέρηση. Οι τιμές αυτές σε έχουν επίσης χρήσιμες πληροφορίες όπως την ώρα.

6.5 Βάση δεδομένων

Η βάση δεδομένων τρέχει μέσα από το XAMPP (MySQL/MariaDB) και την διαχειριζόμαστε από το phpMyAdmin. Δημιουργήσαμε το schema sensor_system με Import του SQL στο phpMyAdmin (v5.2.1, MariaDB 10.4.x). Οι βασικοί πίνακες είναι:

- users,

- sensor_data (BME688)
- sen0460_data (SEN0460)

Η βάση δεδομένων τρέχει τοπικά, ενώ στο Flask server έχουμε (host=localhost, user=root, password, database=sensor_system). Τα exports γίνονται απευθείας από το phpMyAdmin, ενώ η εκκίνηση και παύση της βάσης γίνεται από το XAMPP Control Panel (MySQL service).

6.5.1 Διάγραμμα και δομή MySQL πινάκων

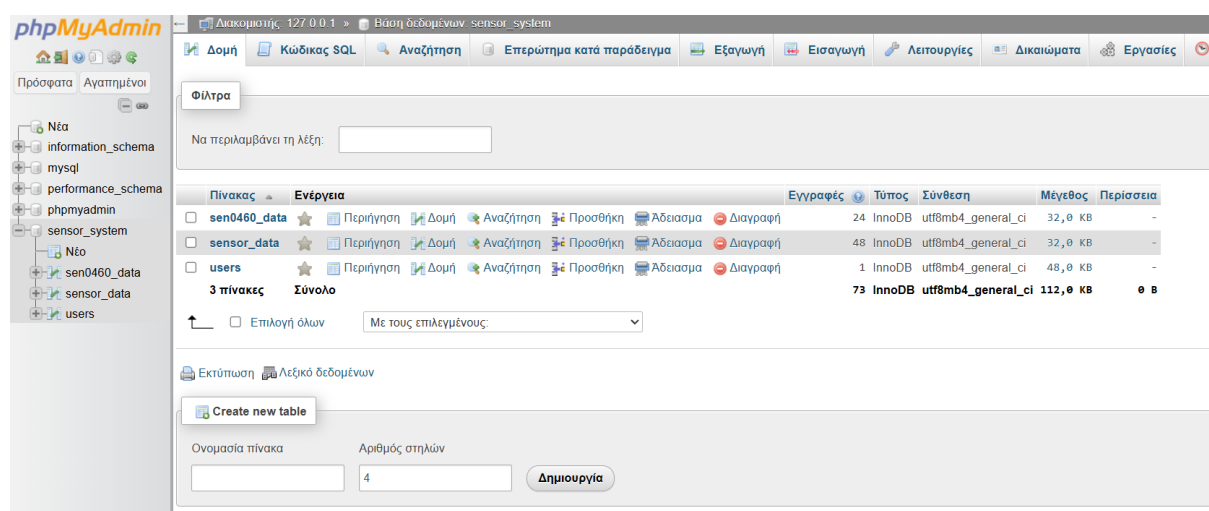
Δημιουργούμε την βάση δεδομένων sensor_system με τρεις βασικούς πίνακες. Ο πίνακας users είναι ο βασικότερος και ο πιο συγκεκριμένος για να γίνει η αυθεντικοποίηση των. Οι πίνακες sensor_data και sen0460_data μπορούν και αποθηκεύουν τα δεδομένα από τους αισθητήρες BME688 και SEN0460.

Ο πίνακας users χρησιμοποιεί το αρχικό κλειδί id και τα μοναδικά πεδία username, email και password. Αναφέρεται το πότε δημιουργήθηκε (created_at) και τον διαχειριστή (is_admin). Κάθε εγγραφή που εισάγεται στους πίνακες μετρήσεων αναφέρεται σε έναν χρήστη, εξασφαλίζοντας ιδιοκτησία και οριοθέτηση δεδομένων ανά λογαριασμό.

Ο πίνακας sensor_data αποθηκεύει τα δεδομένα από τους BME688 και έχει την επιλογή από δύο ρόλους λειτουργίας που έχουμε ορίσει και παραπάνω. Ο ρόλος IAQ συλλέγει τα φυσικά μεγέθη όπως θερμοκρασία, υγρασία, πίεση καθώς και αναφέρει τους δείκτες ποιότητας αέρα όπως IAQ, static IAQ, eCO₂, bVOC και gas percentage. Ο ρόλος CLASS από την άλλη αποθηκεύει και μας δίνει τις πιθανότητες ανάμεσα στα prob_air και prob_ajax, καθώς και την ένδειξη αξιοπιστίας (accuracy). Τέλος, υπάρχουν οι ακατέργαστες μετρήσεις και δείκτες αερίου που αποθηκεύονται στα πεδία. Ο κάθε αισθητήρας έχει δηλωθεί με την μορφή sensor_id 0 με 7 για πίνακα και με το role για IAQ ή CLASS.

Ο πίνακας sen0460_data κρατάει τις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων PM1.0, PM2.5 και PM10. Όπως και στον προηγούμενο πίνακα, έτσι και εδώ έχουμε δηλώσει device_id και user_id. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να προβάλλουμε τα PM ανεξάρτητα από τα αέρια.

Τα JSON Payloads χαρτογραφούνται από την βάση δεδομένων. Στον πίνακα sensor_data το bme και το sen0460_data το sen0460. Το device_id το αποθηκεύουμε το ίδιο.



Εικόνα 6.19: Πίνακες της βάσης δεδομένων

6.5.2 Αποθήκευση και ανάκτηση δεδομένων

Με τιμές sen0460 (PM) και bme688[] (IAQ/CLASS) στέλνει το ESP32 JSON. Πρώτα ενημερώνεται η προσωρινή μνήμη του server, για να γίνει απευθείας η live μετάδοση των δεδομένων. Μετά αποθηκεύεται στην MySQL.

Τα σωστά ευρετήρια εξασφαλίζουν την απόδοση, δηλαδή user_id, timestamp, sensor_id. Το σύστημα γίνεται γρήγορο, συνεπές και έτοιμο για χρήση με την χρωματική κωδικοποίηση.

Εμφάνιση εγγραφών 0 - 23 (24 συνολικά, Το ερώτημα χρειάστηκε 0,0008 δευτερόλεπτα.)

SELECT * FROM `sen0460_data`

Εμφάνιση όλων | Αριθμός εγγραφών: 25 | Φιλτράρισμα εγγραφών: Αναζήτηση σε αυτόν τον πίνακα | Sort by key: Καμία

	id	timestamp	device_id	pm1_0	pm2_5	pm10	um0_3	um0_5	um1_0	um2_5	um5_0	um10	user_id	
<input type="checkbox"/>	Επεξεργασία	Αντιγραφή	Διαγραφή	543	2025-09-25 01:35:34	NULL	5	10	15	NULL	NULL	NULL	NULL	1
<input type="checkbox"/>	Επεξεργασία	Αντιγραφή	Διαγραφή	544	2025-09-25 02:35:34	NULL	6	11	16	NULL	NULL	NULL	NULL	1
<input type="checkbox"/>	Επεξεργασία	Αντιγραφή	Διαγραφή	545	2025-09-25 03:35:34	NULL	7	12	17	NULL	NULL	NULL	NULL	1
<input type="checkbox"/>	Επεξεργασία	Αντιγραφή	Διαγραφή	546	2025-09-25 04:35:34	NULL	8	13	19	NULL	NULL	NULL	NULL	1
<input type="checkbox"/>	Επεξεργασία	Αντιγραφή	Διαγραφή	547	2025-09-25 05:35:34	NULL	9	15	20	NULL	NULL	NULL	NULL	1
<input type="checkbox"/>	Επεξεργασία	Αντιγραφή	Διαγραφή	548	2025-09-25 06:35:34	NULL	10	16	21	NULL	NULL	NULL	NULL	1
<input type="checkbox"/>	Επεξεργασία	Αντιγραφή	Διαγραφή	549	2025-09-25 07:35:34	NULL	12	17	23	NULL	NULL	NULL	NULL	1
<input type="checkbox"/>	Επεξεργασία	Αντιγραφή	Διαγραφή	550	2025-09-25 08:35:34	NULL	13	18	24	NULL	NULL	NULL	NULL	1
<input type="checkbox"/>	Επεξεργασία	Αντιγραφή	Διαγραφή	551	2025-09-25 09:35:34	NULL	6	20	25	NULL	NULL	NULL	NULL	1
<input type="checkbox"/>	Επεξεργασία	Αντιγραφή	Διαγραφή	552	2025-09-25 10:35:34	NULL	7	21	27	NULL	NULL	NULL	NULL	1
<input type="checkbox"/>	Επεξεργασία	Αντιγραφή	Διαγραφή	553	2025-09-25 11:35:34	NULL	8	22	28	NULL	NULL	NULL	NULL	1
<input type="checkbox"/>	Επεξεργασία	Αντιγραφή	Διαγραφή	554	2025-09-25 12:35:34	NULL	9	23	29	NULL	NULL	NULL	NULL	1
<input type="checkbox"/>	Επεξεργασία	Αντιγραφή	Διαγραφή	555	2025-09-25 13:35:34	NULL	11	13	31	NULL	NULL	NULL	NULL	1
<input type="checkbox"/>	Επεξεργασία	Αντιγραφή	Διαγραφή	556	2025-09-25 14:35:34	NULL	12	14	32	NULL	NULL	NULL	NULL	1

Εικόνα 6.20: Πίνακας του sen0460_data

Εμφάνιση εγγραφών 0 - 24 (48 συνολικά, Το ερώτημα χρειάστηκε 0,0009 δευτερόλεπτα.)

SELECT * FROM `sensor_data`

Εμφάνιση όλων | Αριθμός εγγραφών: 25 | Φιλτράρισμα εγγραφών: Αναζήτηση σε αυτόν τον πίνακα | Sort by key: Καμία

	id	timestamp	device_id	sensor_id	role	raw_temp	raw_hum	temp	hum	press	gas_res	gas_index	iaq	static_iaq	eco2	bvoc		
<input type="checkbox"/>	Επεξεργασία	Αντιγραφή	Διαγραφή	3513	2025-09-25 01:35:34	NULL	0	CLASS	NULL	NULL	20	40	1013	NULL	10	NULL	400	NULL
<input type="checkbox"/>	Επεξεργασία	Αντιγραφή	Διαγραφή	3514	2025-09-25 01:35:34	NULL	1	IAQ	NULL	NULL	22	45	1015	NULL	15	NULL	450	NULL
<input type="checkbox"/>	Επεξεργασία	Αντιγραφή	Διαγραφή	3515	2025-09-25 02:35:34	NULL	0	CLASS	NULL	NULL	21.5	42	1014	NULL	12	NULL	410	NULL
<input type="checkbox"/>	Επεξεργασία	Αντιγραφή	Διαγραφή	3516	2025-09-25 02:35:34	NULL	1	IAQ	NULL	NULL	23.3	46.8	1016	NULL	16.5	NULL	458	NULL
<input type="checkbox"/>	Επεξεργασία	Αντιγραφή	Διαγραφή	3517	2025-09-25 03:35:34	NULL	0	CLASS	NULL	NULL	23	44	1015	NULL	14	NULL	420	NULL
<input type="checkbox"/>	Επεξεργασία	Αντιγραφή	Διαγραφή	3518	2025-09-25 03:35:34	NULL	1	IAQ	NULL	NULL	24.6	48.6	1017	NULL	18	NULL	466	NULL
<input type="checkbox"/>	Επεξεργασία	Αντιγραφή	Διαγραφή	3519	2025-09-25 04:35:34	NULL	0	CLASS	NULL	NULL	21.5	46	1016	NULL	16	NULL	430	NULL
<input type="checkbox"/>	Επεξεργασία	Αντιγραφή	Διαγραφή	3520	2025-09-25 04:35:34	NULL	1	IAQ	NULL	NULL	25.9	47.4	1018	NULL	19.5	NULL	474	NULL
<input type="checkbox"/>	Επεξεργασία	Αντιγραφή	Διαγραφή	3521	2025-09-25 04:35:34	NULL	0	CLASS	NULL	NULL	23	48	1017	NULL	18	NULL	440	NULL

Εικόνα 6.21: Πίνακας του sensor_data

The screenshot shows the phpMyAdmin interface. On the left, the database structure is visible, including the 'sensor_system' database and its 'users' table. The main area displays the 'users' table with the following data:

id	username	password_hash	email	created_at	is_admin
1	admin	240be518fabd2724ddb6f04eeb1da5967448d7e831c08c8fa8...	admin@sensors.com	2025-09-25 22:04:30	1

Additional details from the screenshot include the SQL query `SELECT * FROM `users`` and various control options like 'Επιλογή όλων', 'Επεξεργασία', and 'Αντιγραφή'.

Εικόνα 6.22: Πίνακας του users

Κεφάλαιο 7ο: Αποτελέσματα Μετρήσεων και Συμπεράσματα

7.1 Αποτελέσματα Μετρήσεων

Μα βάση όλη την διαδικασία και την υλοποίηση της συσκευής καταλήγουμε σε κάποια αποτελέσματα. Σαν σύνολο από άποψη hardware και software υπάρχει μια ομαλή συνοχή. Οι κώδικες λειτουργούν σωστά χωρίς περιορισμούς και error καθώς και το κομμάτι της πλακέτας φαίνεται να ανταποκρίνεται στις εντολές και τις παραμετροποιήσεις που δέχθηκε.

Οι τιμές που μου έδωσαν οι αισθητήρες πέρασαν κάποια τεστ. Πιο συγκεκριμένα, έκανα κάποιου είδους πειράματα στο χώρο που βρίσκομαι χωρίς να θεωρείται συγκεκριμένος ή ιδανικός. Προσπάθησα όμως να φέρω κάποιες καταστάσεις σε όσο πιο ρεαλιστικά χαρακτηριστικά μπορούσα.

Για να γίνω πιο συγκεκριμένη για την ακρίβεια των μετρήσεων, προσπάθησα να συγκρίνω κάποιες τιμές όπως θερμοκρασία, υγρασία και πίεση με συσκευές που κυκλοφορούν στην αγορά και παρατήρησα ότι είχε πολύ μικρές αποκλίσεις.

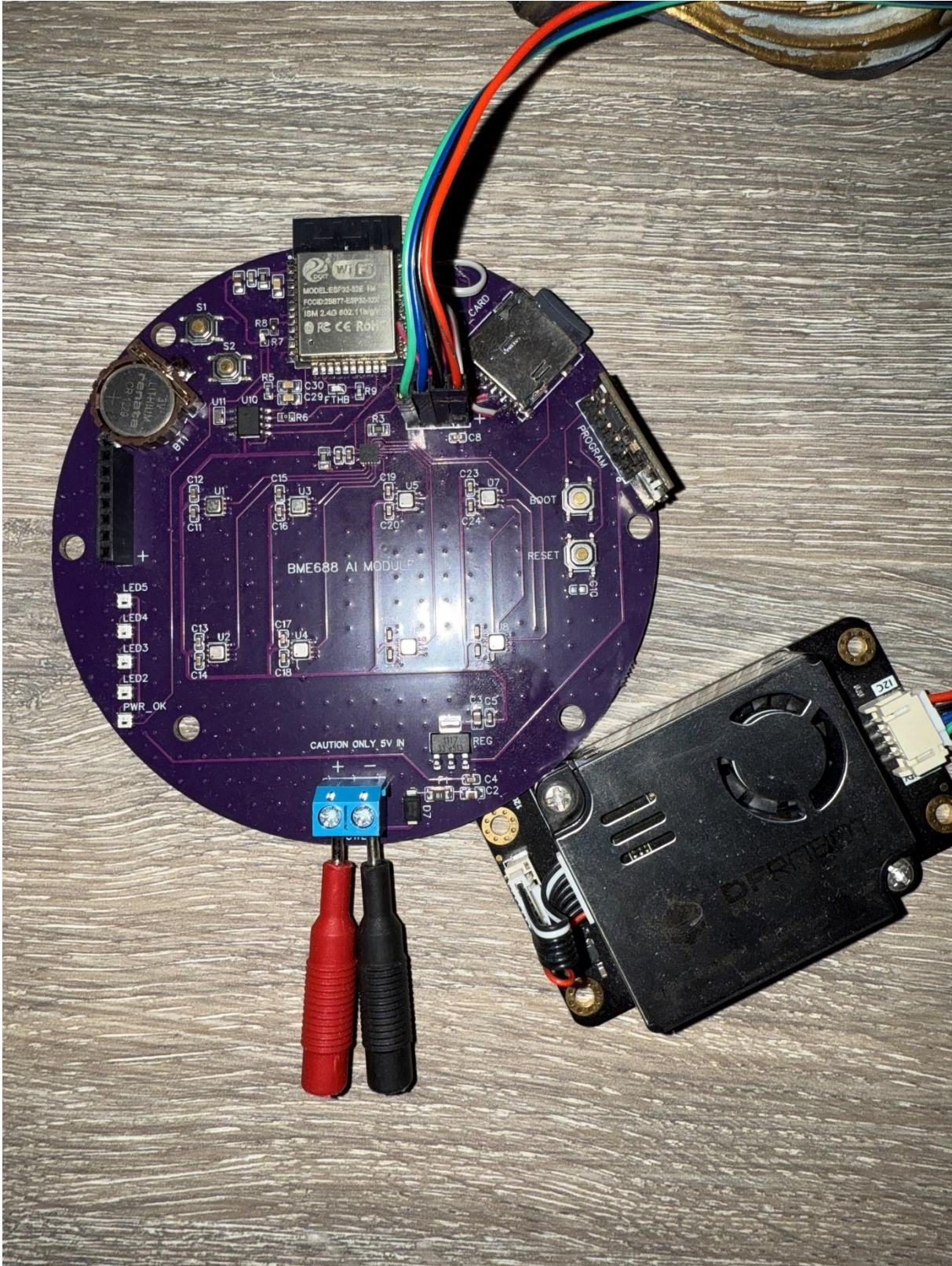
Η raw τιμές που δίνει ο κώδικας μέσω της βιβλιοθήκης είναι τιμές που δείχνουν την θερμοκρασία και την υγρασία αυξημένες, λόγω ότι υπάρχει αύξηση της θερμοκρασίας στη πλακέτα οι τιμές αυτές δεν είναι οι πραγματικές. Αλλά με το offset που δηλώνεται στο κώδικα προσαρμόζεται στα πραγματικά δεδομένα (πράγμα που προτείνει να κάνουμε η Bosch).

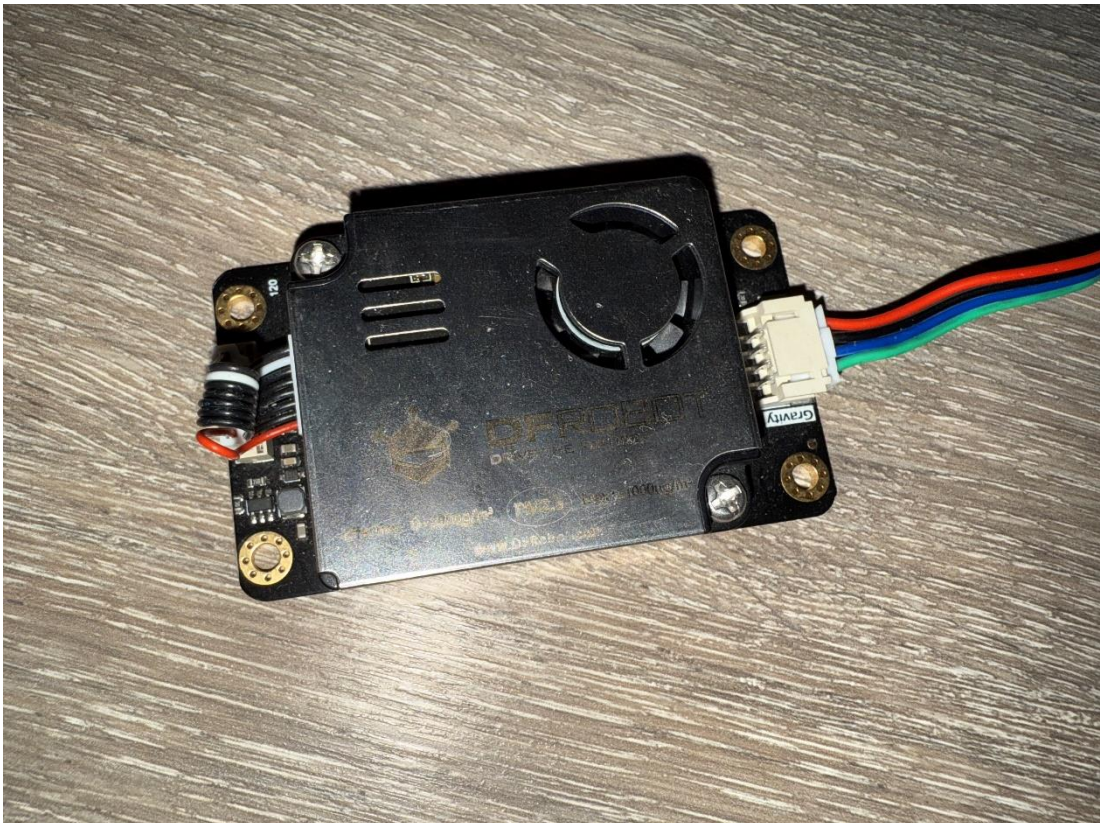
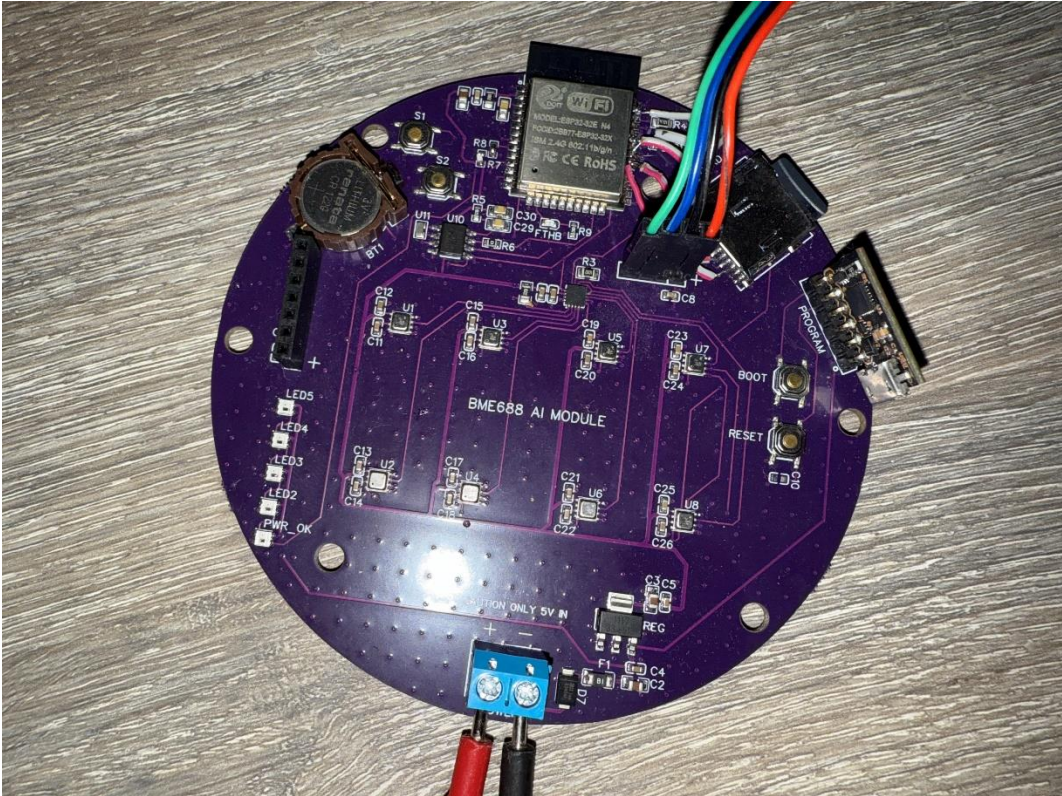
Ότι αφορά το CLASS δηλαδή εάν ήταν Air ή Ajax. Το μόνο που μπορούσα να κάνω είναι να παρατηρήσω την εναλλαγή της κατάστασης ανάλογα την συνθήκη που το είχα. Όπως ανέφερα και παραπάνω χρησιμοποίησα και το LED όπου βοήθησε και στο οπτικό αποτέλεσμα. Μόλις είχα την πλακέτα σε κατάσταση Air όντως μου έβγαζε αυτήν την ένδειξη, μόλις έβαζα την συσκευή σε ένα πλαστικό κουτί με υγρό Ajax άλλαζε η κατάσταση και φαινόταν και στην ιστοσελίδα και άλλαζε κατάσταση σε κόκκινο το LED.

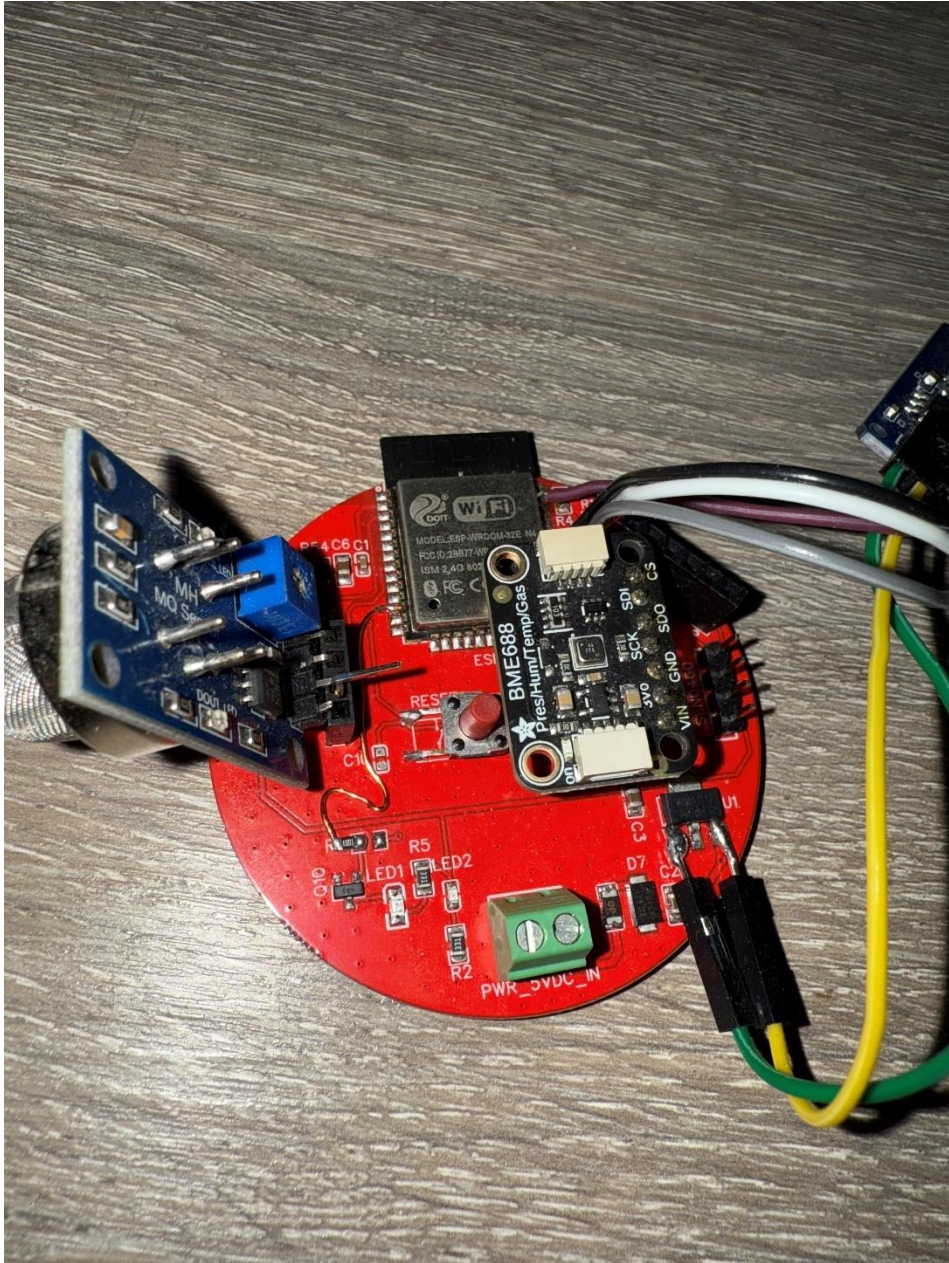
Τέλος, το IAQ υπολογίζεται από την βιβλιοθήκη της Bosch. Ακριβής μέτρηση δεν πήρα αλλά παρατήρησα την εναλλαγή της τιμής ανάλογα την συνθήκη. Δηλαδή προσπάθησα να κάνω κάποιες δοκιμές πχ με σπύρτο, μόλις το άναβα οι τιμές ήταν υψηλές, με βάση πάντα τον παγκόσμιο οργανισμό υγείας. Πάλι ανάλογα την κατάσταση οι τιμές αυξομειώνονται και φαίνεται να είναι στα σωστά όρια. Ακόμη και όταν το έβαλα στο κουτί με το Ajax αμέσως οι τιμές χτυπήσαν κόκκινο και μου έδωσαν και εκεί alarm.

7.2 Κατασκευή

Παρακάτω παρουσιάζονται φωτογραφίες της κατασκευής. Η τελική πλακέτα είναι η παρακάτω μωβ, ενώ η μικρότερη κόκκινη είναι η αρχική πλακέτα.







7.3 Συμπεράσματα

Αποτέλεσμα της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης συσκευής χαμηλού κόστους για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα σε κρίσιμα περιβάλλοντα, όπως νοσοκομεία και βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Αφού αξιοποιηθεί ο μικροελεγκτής ESP32, θα γίνει συνδυασμός αισθητήρων σωματιδίων και αερίων, διασύνδεση με ιστοσελίδα και βάση δεδομένων, θα έχουμε ως αποτέλεσμα ένα σύστημα που παρέχει αξιόπιστες και χρήσιμες μετρήσεις.

Η συμβολή της εργασίας πραγματοποιείται από την ενσωμάτωση τεχνολογιών IoT, τη δημιουργία πλακέτας PCB και στη δυνατότητα real-time παρακολούθησης μέσω διαδικτύου. Εάν το συγκρίνουμε με αντίστοιχες εμπορικές λύσεις συμπεραίνουμε ότι η συσκευή αυτή προσφέρει μεγάλη ευελιξία, χαμηλό κόστος και δυνατότητα να προσαρμοστεί σε συγκεκριμένες ανάγκες.

Μελλοντικά, μπορούμε να επεκτείνουμε το project παραπάνω, εάν γίνει προσθήκη περισσότερων αισθητήρων για επιπλέον αέρια ρύπων, χρήση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης για πρόβλεψη, καθώς και σύνδεση με cloud υπηρεσίες για απομακρυσμένη παρακολούθηση. Μπορεί να προσαρμοσθεί σε ότι κατάσταση επιλέξει ο χρήστης. Έτσι, ανοίγονται δυνατότητες για επιπλέον έρευνα και πρακτικές εφαρμογές σε κρίσιμους τομείς υγείας, βιομηχανίας και όχι μόνο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Data Sheet

- [1] Bosch Sensortec, “BME688: Low power gas, pressure, temperature & humidity sensor,” Datasheet BST-BME688-DS000, Rev. 1.3, Bosch Sensortec GmbH, Feb. 2024. [Online]. Available: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme688-ds000.pdf>
- [2] Bosch Sensortec, “BME688 Development Kit,” Product Flyer BST-BME688-FL001, Bosch Sensortec GmbH, 2021. [Online]. Available: https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/product_flyer/bst-bme688-fl001.pdf
- [3] SmartElex, “BME688 Environmental Sensor (breakout) — datasheet,” SmartElex, 2024. [Online]. Available: <https://robu.in/wp-content/uploads/2024/01/1848637-BME688-1.pdf>
- [4] ItBrainPower / R&D Software Solutions, “BME688 I2C sensor breakout datasheet,” V1.01. [Online]. Available: https://itbrainpower.net/downloadables/s-Sense-I2C-BME688-datasheet_V1_01.pdf

Internet Site

- [5] DFRobot, “Gravity: PM2.5 Air Quality Sensor SKÜ SEN0460,” Wiki. [Online]. Available: https://wiki.dfrobot.com/Gravity_PM2.5_Air_Quality_Sensor_SKU_SEN0460
- [6] AQICN, “AQI Scale (Greek),” AQICN, 2024. [Online]. Available: <https://aqicn.org/scale/el/>
- [7] World Health Organization, “What are the WHO Air quality guidelines?” WHO, Sept. 2021. [Online]. Available: <https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/what-are-the-who-air-quality-guidelines>
- [8] United States Environmental Protection Agency (EPA), “National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) for Particulate Matter,” EPA, 2023. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/pm-pollution/national-ambient-air-quality-standards-naaqs-pm>
- [9] Bosch Sensortec Community, “BME688 calibration and CO₂ equivalent discussions,” Bosch Sensortec Forum, 2022. [Online]. Available: <https://community.bosch-sensortec.com>
- [10] ESPhome, “BME68x BSEC2 Sensor,” ESPhome Documentation, 2023. [Online]. Available: https://esphome.io/components/sensor/bme68x_bsec2

Paper in Conference Proceedings

- [11] World Health Organization, “Global Air Quality Guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide,” in Proc. WHO Publication Launch, Geneva, Switzerland, 2021. [Online]. Available: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- [12] M. F. R. Al-Okby, “Evaluating of IAQ-Index and TVOC Parameter-Based Strategies for Air Quality Thresholds,” in Proc. Int. Conf. Environmental Monitoring, 2022. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8876806/>
- [13] J. Smith, R. Jones, and K. Trello, “Index Air Quality Monitoring for Light and Active Mobility,” in Proc. Int. Workshop on Air Sensing Applications, 2023. [Online]. Available:

<https://www.researchgate.net/publication/380651393> Index Air Quality Monitoring for Light and Active Mobility

Journal Articles

- [14] P. Kumar, L. Morawska, S. Martani, *et al.*, “Updated World Health Organization Air Quality Guidelines: Current Global and Regional Applications,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, no. 11, pp. 6950–6968, Jun. 2022. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9202349>
- [15] A. Baeza, E. Querol, M. Titos, *et al.*, “Air quality standards and guidelines: A global review,” *Atmospheric Environment*, vol. 313, no. 118083, 2023. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11704637>
- [16] R. P. Velasco, *et al.*, “Update of the WHO Global Air Quality Guidelines,” *Environment International*, vol. 162, no. 107158, 2022. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9720155/>
- [17] R. N. Pietraru, S. Mocanu, D-M. Merezeanu, “Easy-to-Use MOX-Based VOC Sensors for Efficient Indoor Air Quality Monitoring,” *Sensors*, vol. 24, no. 8, 2501, 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/8/2501>
- [18] M. F. R. Al-Okby, *et al.*, “Evaluating a Novel Gas Sensor for Ambient Monitoring in Challenging Environments,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 358, pp. 131–142, 2022. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9654358/>
- [19] B. Hoffmann, *et al.*, “WHO Air Quality Guidelines 2021 – Aiming for Healthier Air,” *International Journal of Public Health*, vol. 66, no. 1604221, 2021. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8494774/>
- [20] H. Ouyang, *et al.*, “Implementation of WHO 2021 Global Air Quality Guidelines,” *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 103, no. 7, pp. E1530–E1547, 2022. [Online]. Available: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/103/7/BAMS-D-22-0040.1.xml>