

# ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗΝ  
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ  
«ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ  
ΤΩΝ ΠΡΑΓΜΑΤΩΝ»

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Προβλέψεις περιβαλλοντικών συνθηκών σε σχολικά περιβάλλοντα με χρήση IoT  
και Μηχανικής Μάθησης

Εκπόνηση:

Τσαπραΐλη Ευσταθία

A.M. M023124017

Επίβλεψη:

Αδάμ Γεώργιος

Φεβρουάριος 2026

# ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Σχολή Τεχνολογίας

ΤΜΗΜΑ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

**«ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΑΙ  
ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΠΡΑΓΜΑΤΩΝ»**

**« Master of Science in Modern Communication Systems and the  
Internet of Things »**

**«Προβλέψεις περιβαλλοντικών συνθηκών σε σχολικά περιβάλλοντα με  
χρήση IoT και Μηχανικής Μάθησης»**

Διπλωματική Εργασία

που υποβλήθηκε στο Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας  
ως μέρος των απαιτήσεων για την απόκτηση Διπλώματος Μεταπτυχιακών Σπουδών  
στα Σύγχρονα Συστήματα Επικοινωνιών και Διαδίκτυο των Πραγμάτων από την

**Τσαπραΐλη Ευσταθία Στέφανος**

**Δήλωση Αυθεντικότητας, ζητήματα Copyright**

«Ο μεταπτυχιακός φοιτητής που εκπόνησε την παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική  
εργασία φέρει ολόκληρη την ευθύνη προσδιορισμού της δίκαιης χρήσης του υλικού, η  
οποία ορίζεται στη βάση των εξής παραγόντων: του σκοπού και χαρακτήρα της χρήσης  
(μη-εμπορικός, μη-κερδοσκοπικός, αλλά εκπαιδευτικός-ερευνητικός), της φύσης του  
υλικού που χρησιμοποιεί (τμήμα του κειμένου, πίνακες, σχήματα, εικόνες κ.λπ.), του  
ποσοστού και της σημαντικότητας του τμήματος που χρησιμοποιεί σε σχέση με το όλο  
κείμενο υπό copyright, και των πιθανών συνεπειών της χρήσης αυτής στην αγορά ή την  
γενικότερη αξία του υπό copyright κειμένου».

(θέση υπογραφής Μ.Φ)

«Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εγκρίθηκε ομόφωνα από την τριμελή εξεταστική επιτροπή η οποία ορίστηκε από την Συνέλευση του Τμήματος Ψηφιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, σύμφωνα με το νόμο και τον εγκεκριμένο Οδηγό Σπουδών του ΠΜΣ «Σύγχρονα Συστήματα Επικοινωνιών και Διαδίκτυο των Πραγμάτων»». Τα μέλη της Επιτροπής ήταν:

- ..... ( Επιβλέπων)
- ..... ( Μέλος)
- ..... ( Μέλος)

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα.»

## Περίληψη

Η τρέχουσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία έχει έναν ξεκάθαρο στόχο, να σχεδιάσει και να υλοποιήσει ένα πλήρες ενσωματωμένο IoT σύστημα που παρακολουθεί και αξιολογεί τις περιβαλλοντικές συνθήκες μέσα σε μια σχολική αίθουσα ή γενικότερα στο σχολικό περιβάλλον.

Όλη η υλοποίηση βασίζεται σε μικροελεγκτή Wemos D1 R2 (ESP8266) ή Arduino REV4 και σε αισθητήρες που μετρούν βασικές παραμέτρους όπως ρύπους, ποιότητα αέρα και τις επιπτώσεις τους. Για παράδειγμα, χρησιμοποιούμε τον PMS5003 για μέτρηση αιωρούμενων σωματιδίων (PM1.0, PM2.5, PM10) και CCS811 ή SGP30 για να εκτιμήσουμε τα επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) καθώς και τον MQ-2 Analog Gas για να μετρήσουμε προπάνιο, καπνό, μεθάνιο ή και υδρογόνο. Όλα τα δεδομένα συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο και αναλύονται με στόχο να βελτιώσουμε το μικροκλίμα της τάξης, κάτι που επηρεάζει άμεσα τη συγκέντρωση και την απόδοση των μαθητών. Με λίγα λόγια, αυτό το σύστημα στοχεύει να καταγράφει κρίσιμες μεταβλητές της ποιότητας του αέρα που σχετίζονται με την ευεξία και τη συγκέντρωση των παιδιών.

Στην ουσία, προσπαθούμε να συνδυάσουμε καινοτόμες IoT τεχνολογίες με την καθημερινή σχολική πραγματικότητα, προτείνοντας μια λύση που είναι χαμηλού κόστους, επεκτάσιμη και επαναχρησιμοποιήσιμη. Αυτό το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν εκπαιδευτικό εργαλείο στα μαθήματα Πληροφορικής ή STEM, αλλά και σε προγράμματα Περιβαλλοντικής Εκπαίδευσης. Φέρνει κάτι καινούριο, τόσο τεχνικά όσο και παιδαγωγικά, αφού φέρνει τις τεχνολογίες του Διαδικτύου των Πραγμάτων σε πραγματικές σχολικές συνθήκες. Και το σημαντικότερο είναι ότι είναι ένα μοντέλο που μπορεί να το αξιοποιήσει ο κάθε εκπαιδευτικός, χωρίς να χρειάζεται ιδιαίτερη τεχνική εμπειρία.

Η χρήση IoT στην εκπαίδευση έχει ήδη αναγνωριστεί ως μια καινοτόμος κίνηση, με μεγάλες δυνατότητες να βοηθήσει το μάθημα αλλά και τη γενικότερη καθημερινότητα του σχολείου. Όλο και περισσότερες μελέτες ασχολούνται με τα “έξυπνα σχολεία” και με συστήματα που παρακολουθούν αυτόματα το περιβάλλον της τάξης. Με αισθητήρες, φτηνό hardware και εργαλεία ανοιχτού λογισμικού, μπορείς να υλοποιήσεις ευέλικτα και επεκτάσιμα συστήματα για δυναμικές εφαρμογές που προσαρμόζονται στις ανάγκες

κάθε σχολείου. Μέσα από αυτή την εργασία, δίνω στην ερευνητική κοινότητα προτάσεις για νέες μεθόδους ενσωμάτωσης IoT στην εκπαίδευση, δείχνοντας παράλληλα πόσο χρήσιμα είναι τέτοια συστήματα για την ανάπτυξη δεξιοτήτων του 21ου αιώνα όπως ανάλυση δεδομένων, υπολογιστική σκέψη και περιβαλλοντική συνείδηση.

Το σύστημα αυτό είναι υλοποιημένο έτσι ώστε να λειτουργεί σαν εκπαιδευτικό εργαλείο στα μαθήματα Πληροφορικής και STEM, υποστηρίζοντας σύγχρονες διδακτικές μεθόδους. Οι μαθητές μπορούν να ασχοληθούν με μετρήσεις, ανάλυση και οπτικοποίηση δεδομένων, να εξετάσουν πώς επηρεάζει η ποιότητα του αέρα τη συμπεριφορά στην τάξη όπως ο αερισμός, ο συνωστισμός και να μάθουν με πρακτικό τρόπο. Παράλληλα, οι εκπαιδευτικοί μπορούν να παρακολουθούν τις συνθήκες και να προσαρμόζουν το χώρο ανάλογα, λαμβάνοντας ειδοποιήσεις και βελτιώνοντας την καθημερινότητα του σχολείου. Το σύστημα είναι modular, ανοιχτού τύπου και οικονομικό, για να μπορεί να επαναληφθεί ή να επεκταθεί εύκολα από οποιοδήποτε σχολείο ή εκπαιδευτικό, χωρίς να απαιτούνται εξειδικευμένες γνώσεις. Συνολικά, αυτή η μεθοδολογική προσέγγιση παντρεύει νέες ερευνητικές και διδακτικές πρακτικές, φέρνοντας τον κόσμο των ενσωματωμένων συστημάτων μέσα στη σχολική πραγματικότητα. Έτσι, δημιουργείται ένα καινοτόμο μαθησιακό περιβάλλον που μπορεί να αξιοποιηθεί τόσο για το μάθημα όσο και για σχολικές έρευνες, ενισχύοντας τη διεπιστημονική και ενεργή μάθηση.

## Λέξεις Κλειδιά

Διαδίκτυο των πραγμάτων, Έξυπνη τάξη, Αισθητήρες , Ενσωματωμένο Σύστημα, Wemos, MQTT, NodeRed, Grafana, InfluxDB, Μηχανική Μάθηση.

## Abstract

This thesis has a clear objective: to design and implement a complete embedded IoT system that monitors and evaluates the environmental conditions within a classroom or, more broadly, in the school environment.

The entire implementation is based on a Wemos D1 R2 (ESP8266) or Arduino REV4 microcontroller and sensors that measure key parameters such as pollutants, air quality, and their effects. For example, the PMS5003 is used to measure particulate matter (PM1.0, PM2.5, PM10), and either the CCS811 or SGP30 is employed to estimate carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) levels, as well as the MQ-2 Analog Gas to measure propane, smoke, methane or even hydrogen. All data are collected in real time and analyzed with the aim of improving the classroom microclimate, which directly affects students' concentration and performance. In short, this system aims to record critical air-quality variables related to children's well-being and focus.

Essentially, this work seeks to combine innovative IoT technologies with everyday school reality, proposing a solution that is low-cost, scalable, and reusable. This model can also be used as an educational tool in Informatics or STEM courses, as well as in Environmental Education programs. It introduces something new, both technically and pedagogically, by bringing Internet of Things technologies into real school settings. And the important part? It is a model that can be utilized by any teacher without requiring specialized technical expertise.

The use of IoT in education has already been recognized as an innovative approach with significant potential to support teaching and the overall daily operation of schools. An increasing number of studies focus on "smart schools" and systems that automatically monitor classroom environments. With sensors, low-cost hardware, and open-source software tools, flexible and scalable systems can be created for dynamic applications tailored to the needs of each school. Through this work, I offer the research community proposals for new methods of integrating IoT into education, while also demonstrating the usefulness of such systems for developing 21st-century skills, such as data analysis, computational thinking, and environmental awareness.

This system is designed to function as an educational tool in Informatics and STEM courses, supporting modern teaching methods. Students can engage in measurement,

data analysis, and visualization, explore how air quality affects classroom behavior (e.g., ventilation, crowding), and learn in a hands-on manner. At the same time, teachers can monitor conditions and adjust the environment accordingly, receiving notifications and improving the school's daily functioning. The system is modular, open-ended, and cost-effective, so it can be easily replicated or expanded by any school or educator without requiring specialized knowledge. Overall, this methodological approach combines new research and instructional practices, bringing the world of embedded systems into the school environment. In this way, an innovative learning environment is created, which can be used both for teaching and school-based research, fostering interdisciplinary and active learning.

## **Keywords**

Internet of Things, Smart Classroom, Sensors, Embedded System, Wemos, MQTT, NodeRed, Grafana, InfluxDB, Machine Learning,

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κύριο Αδάμ Γεώργιο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε ως προς την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, τις πολύτιμες γνώσεις του και την άμεση ανταπόκρισή του, αλλά και τον υπεύθυνο του μεταπτυχιακού προγράμματος κύριο Καρέτσο Γεώργιο για όλη την υποστήριξη και καθοδήγησή του κατά την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αδιάκοπη και συνεχή στήριξη που μου παρείχαν.

## Περιεχόμενα

Περίληψη .....	4
Λέξεις Κλειδιά.....	5
Abstract .....	6
Keywords.....	7
Ευχαριστίες .....	8
Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων .....	12
Κατάλογος Πινάκων / Γραφημάτων .....	14
Συνοτομογραφίες & Ακρωνύμια .....	15
1. Εισαγωγή .....	16
1.1 Αντικείμενο και σκοπός της έρευνας .....	16
1.2 Ερευνητικά ερωτήματα / Στόχοι .....	18
1.3 Καινοτομία και συμβολή .....	19
1.4 Δομή της εργασίας .....	20
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο και Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας .....	22
2.1 Το διαδίκτυο των πραγμάτων.....	22
2.1.1 Αρχιτεκτονική του IoT.....	24
2.1.2 Πρωτόκολλα Επικοινωνίας .....	26
2.2 Ενσωματωμένα συστήματα.....	27
2.2.1 Wemos D1 R2 / ESP8266 και Arduino REV4 .....	28
2.3 Παρακολούθηση ποιότητας αέρα & αισθητήρες PM/GAS .....	29
2.3.1 Σημασία Μετρήσιμων Παραμέτρων και υγειονομικά όρια .....	29
2.3.2 Αισθητήρες σωματιδίων (PM): τεχνολογία, χαρακτηριστικά και PMS5003 .....	30
2.3.3 Αισθητήρες αερίων (Gas Sensors): τεχνολογία, χαρακτηριστικά και MQ-2.....	31
2.3.4 Ενσωμάτωση αισθητήρων, βαθμονόμηση και cross-calibration.....	33
2.3.5 Ανάπτυξη πεδίου: Τοποθέτηση, ρυθμός δειγματοληψίας, συντήρηση .....	34
2.3.6 Ποιότητα δεδομένων, προεπεξεργασία και αντιμετώπιση θορύβου.....	35
2.3.7 Σύνδεση με Machine Learning & Χρήση μετρήσεων .....	36
2.4 Node-RED, InfluxDB, Grafana – αρχιτεκτονική και λειτουργίες .....	37
2.4.1 Node-RED ως Middleware σε Συστήματα IoT.....	38
2.4.2 InfluxDB και Διαχείριση Δεδομένων Χρονοσειρών.....	38
2.4.3 Grafana: Οπτικοποίηση, Ανάλυση και Υποστήριξη Αποφάσεων.....	39
2.5 Εφαρμογές IoT στην Εκπαίδευση .....	40

2.6 Μηχανική Μάθηση & Προγνωστικά Μοντέλα (linear, polynomial regression, time-series)	41
2.7 Ερευνητικές εργασίες & αναφορές	42
3. Μεθοδολογία και Σχεδιασμός Συστήματος	44
3.1 Περιγραφή της γενικής αρχιτεκτονικής	44
3.2 Υλικό Hardware	46
3.2.1 Wemos D1 R2 (ESP8266)	46
3.2.2 Αισθητήρες PMS5003, MQ-2 ANALOG GAS	47
3.2.3 OLED Display	48
3.3 Σύνδεση Υλικού – καλωδιώσεις	49
3.3.1 Σύνδεση Αισθητήρα PMS5003 (PM2.5 / PM10)	49
3.3.2 Σύνδεση MQ-2 Analog Gas	50
3.3.3 Σύνδεση οθόνης OLED	51
3.4 Λογισμικό Software	53
3.4.1 Arduino IDE	54
3.4.2 MQTTX	59
3.4.3 Node-RED	63
3.4.3.1 Εγκατάσταση και βασική παραμετροποίηση του Node-RED	65
3.4.3.2 Σχεδίαση ροών (flows) και κόμβων nodes στο Node-RED	66
3.4.3.2 Διασύνδεση του Node-RED με τη βάση δεδομένων InfluxDB	73
3.4.3.3 Διαχείριση συμβάντων και ειδοποιήσεων (alerts)	74
3.4.4 InfluxDB	76
3.4.5 Grafana	82
3.4.5.1 Διασύνδεση του Grafana με την InfluxDB	83
3.4.5.2 Δημιουργία Dashboard στο Grafana	84
3.5 Ροή δεδομένων (Data Flow) του Συστήματος IoT	89
3.5.1 Συλλογή Δεδομένων στο Επίπεδο Αισθητήρων	89
3.5.2 Τοπική Επεξεργασία και Προετοιμασία Δεδομένων (Edge Processing)	89
3.5.3 Μετάδοση Δεδομένων μέσω MQTT	90
3.5.4 Διαχείριση Ροής στο Node-RED	90
3.5.5 Αποθήκευση Δεδομένων στην InfluxDB	91
3.5.6 Οπτικοποίηση και Ανάλυση μέσω Grafana	91
3.6.1 Θεωρητικό υπόβαθρο Linear & Polynomial Regression	93
3.6.2 Συλλογή και προετοιμασία δεδομένων	94
3.6.3 Πειραματική εφαρμογή σε Python	95

3.7 Αυτοματισμοί & ειδοποιήσεις (αερισμός, θέρμανση).....	101
3.7.1 Υλοποίηση ειδοποιήσεων μέσω Node-RED & Σενάρια Αυτοματοποιημένων Ενεργειών .....	102
4. Αποτελέσματα και Ανάλυση Δεδομένων .....	106
4.1 Συλλογή πραγματικών μετρήσεων (PM25, PM10,GAS).....	106
4.2 Οπτικοποίηση δεδομένων μέσω Grafana .....	106
4.3 Αποτελέσματα πρόβλεψης μέσω μοντέλων παλινδρόμησης (στατιστική & ML) .....	107
4.4 Ειδοποιήσεις και αυτόματες ενέργειες.....	107
5. Συμπεράσματα .....	109
5.1 Επίτευξη στόχων .....	110
5.2 Οφέλη για εκπαιδευτικό περιβάλλον .....	110
5.3 Περιορισμοί .....	111
6. Βιβλιογραφία / Αναφορές.....	112

## Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Εικόνα 1: Αρχιτεκτονική ΙοΤ συστήματος 4 <sup>ων</sup> επιπέδων.....	45
Εικόνα 2: Μικροελεγκτής Wemos D1 R2.....	47
Εικόνα 3: Αισθητήρας PMS5003.....	47
Εικόνα 4: Αισθητήρας SGP30.....	48
Εικόνα 5: OLED οθόνη.....	49
Εικόνα 6: PMS5003 Adapter Board.....	50
Εικόνα 7: Συνδεσμολογία - Αρχιτεκτονική ενσωματωμένου συστήματος .....	52
Εικόνα 8: Arduino IDE.....	58
Εικόνα 9: Serial Monitor Arduino IDE .....	58
Εικόνα 10: MQTTX.....	61
Εικόνα 11: Alert MQTTX .....	62
Εικόνα 12: Βασική Ροή Flow – Node-Red .....	67
Εικόνα 13: Mqtt In – Node-Red .....	68
Εικόνα 14: Mqtt in – Properties .....	68
Εικόνα 15: Function Node .....	69
Εικόνα 16: Debug NodeRED .....	70
Εικόνα 17: InfluxDB out 1- NodeRed.....	71
Εικόνα 18: InfluxDB out 2- NodeRed.....	72
Εικόνα 19: Flow 1-Node-RED .....	73
Εικόνα 20: Bucket, Measurements, API, Queries .....	77
Εικόνα 21: PM10-InfluxDB.....	78
Εικόνα 22: PM25-InfluxDB.....	79
Εικόνα 23: GAS-InfluxDB .....	79

Εικόνα 24: Δημιουργία Dashboard απεικόνισης μετρήσεων .....	81
Εικόνα 25: Dashboard απεικόνιση μετρήσεων .....	81
Εικόνα 26: Ρυθμίσεις διασύνδεσης Grafana - InfluxDB (language/url).....	84
Εικόνα 27: Ρυθμίσεις διασύνδεσης Grafana – InfluxDB (organization,token,bucket)...	84
Εικόνα 28: Dashboard pm25.....	85
Εικόνα 29: Dashboard pm10.....	85
Εικόνα 30: Dashboard Gas .....	86
Εικόνα 31: Queries Grafana .....	87
Εικόνα 32: Τελικό Dashboard Grafana με γραφήματα PM2.5, PM10 και gas .....	88
Εικόνα 33: Ροή Δεδομένων Συστήματος ΙοΤ.....	92
Εικόνα 34: Ενοποιημένα Δεδομένα IDLE .....	98
Εικόνα 35: Plot Linear & Polynomial Regression PM25.....	99
Εικόνα 36: Plot Linear & Polynomial Regression PM10.....	100
Εικόνα 37: Plot Linear & Polynomial Regression Gas .....	101
Εικόνα 38: Bot Name, Bot Token, Telegram Alert .....	104
Εικόνα 39: Chat ID - Telegram .....	104
Εικόνα 40: Flow 2- Node-Red -Http Request .....	105

## Κατάλογος Πινάκων / Γραφημάτων

Πίνακας 1: Σύνδεση SGP30 – Αισθητήρας CO <sub>2</sub> (eCO <sub>2</sub> ) & TVOCs (I <sup>2</sup> C).....	53
Πίνακας 2: Σύνδεση PMS5003 – Αισθητήρας Αιωρούμενων Σωματιδίων (PM1.0 / PM2.5 / PM10).....	53
Πίνακας 3: MQ-2 Analog Gas.....	53
Πίνακας 4: Σύνδεση OLED 0.91" 128×32 – Τοπική Οπτικοποίηση (I <sup>2</sup> C).....	59
Πίνακας 5: Συγκεντρωτικός πίνακας: Κώδικας ↔ Pins.....	60
Πίνακας 6: MQTTX Topics.....	60
Πίνακας 7: Προτεινόμενα όρια (χαμηλά – για alerts).....	63

## Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

IoT	Internet of Things
WSN	Wireless Sensors Network
ΜΔΕ	Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία
WHO	World Health Organization
COTS	Commercial Of The Shelf
ΠΟΥ	Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας
ΙΑQ	Indoor Air Quality
IIAQ	Intelligent Indoor Air Quality

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Αντικείμενο και σκοπός της έρευνας

Η συνεχώς αναπτυσσόμενη και ραγδαία εκτόξευση του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT) αλλάζει τον τρόπο με τον οποίο συλλέγουμε, αντιλαμβανόμαστε και αξιοποιούμε δεδομένα από το φυσικό περιβάλλον [1], [2]. Στις σχολικές αίθουσες και στα πλαίσια της εκπαίδευσης, η υιοθέτηση τεχνολογιών IoT συμβάλλει στη δημιουργία έξυπνων σχολικών αιθουσών (smart classrooms), όπου με αισθητήρες παρακολουθούνται και ρυθμίζονται οι περιβαλλοντικές συνθήκες με στόχο τη βελτίωση της μαθησιακής εμπειρίας [3], [4], βοηθώντας τα παιδιά να μαθαίνουν καλύτερα και πιο εύκολα.

Η παρούσα διπλωματική επικεντρώνεται στη σχεδίαση, ανάπτυξη και αξιολόγηση ενός ολοκληρωμένου ενσωματωμένου συστήματος IoT που παρακολουθεί και προβλέπει περιβαλλοντικές συνθήκες μέσα σε σχολικά περιβάλλοντα με τη βοήθεια τεχνικών Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning).

Η ποιότητα του αέρα εντός της σχολικής τάξης (Indoor Air Quality – IAQ) αποτελεί ένα κρίσιμο παράγοντα που επηρεάζει άμεσα την υγεία, την ευημερία και τη γνωστική απόδοση των ανθρώπων. Ιδιαίτερη και ακόμα μεγαλύτερη σημασία αποκτά σε χώρους, όπως οι σχολικές αίθουσες, όπου μαθητές και εκπαιδευτικοί περνούν σημαντικό μέρος της ημέρας τους. [3], [4], [7]. Έρευνες δείχνουν ότι η αυξημένη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), αερίων όπως υδρογόνο-προπάνιο-μεθάνιο-καπνό, και η παρουσία αιωρούμενων σωματιδίων (PM<sub>2.5</sub>) οδηγούν σε μείωση της συγκέντρωσης, αίσθημα κόπωσης και επιδείνωση αναπνευστικών προβλημάτων μαθητών και εκπαιδευτικών, επηρεάζοντας αρνητικά τη μαθησιακή διαδικασία [5], [6].

Παλιότερα, η παρακολούθηση των περιβαλλοντικών αυτών συνθηκών ήταν χρονοβόρα, ακριβή και μη συστηματική. Ωστόσο, η ραγδαία ανάπτυξη του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) έχει φέρει επανάσταση στον τομέα της περιβαλλοντικής παρακολούθησης. Τα σύγχρονα, χαμηλού κόστους ενσωματωμένα συστήματα, αξιοποιώντας μικροελεγκτές (όπως ο ESP8266 / Arduino) και προσιτούς, υψηλής ακρίβειας αισθητήρες (PMS5003, MQ-2), μας δίνουν την δυνατότητα να συλλέγουμε δεδομένα συνεχόμενα σε πραγματικό χρόνο.

Στο σημείο αυτό, η ενσωμάτωση των τεχνολογιών IoT με την Μηχανική Μάθηση (Machine Learning – ML) προσφέρει τη δυνατότητα να προχωρήσουμε από την απλή παρακολούθηση στη δυναμική πρόβλεψη [5], [6]. Η πρόβλεψη της εξέλιξης των ρύπων, όπως για παράδειγμα πόσο θα αυξηθεί το προπάνιο και κάθε είδους αέριο στο χώρο την επόμενη ώρα, επιτρέπει τη λήψη προληπτικών και αυτόματων αποφάσεων όπως άνοιγμα παραθύρων και ρύθμιση κλιματισμού, αερισμού της αίθουσας βελτιστοποιώντας έτσι το μικροκλίμα της τάξης πριν καν αρχίσει να χαλάει το ατμοσφαιρικό κλίμα στην τάξη [3], [8].

Το σύστημα που εμείς θα υλοποιήσουμε εδώ βασίζεται στο μικροελεγκτή Wemos D1 R2 (ESP8266), και χρησιμοποιεί τους αισθητήρες PMS5003, SGP30 και MQ-2 για τη μέτρηση αιωρούμενων σωματιδίων (PM2.5, PM10) και GAS προπάνιο-μεθάνιο-καπνό (Gas-smoke index) αντίστοιχα. Τα δεδομένα μεταφέρονται μέσω πρωτοκόλλου MQTT και αποθηκεύονται σε **InfluxDB**, ενώ η επεξεργασία και απεικόνισή τους πραγματοποιείται με **Node-RED** και **Grafana**. Με ανάλυση χρονοσειρών και βασικών αλγορίθμων παλινδρόμησης, το σύστημα μπορεί να προβλέψει την ποιότητα του αέρα, και να στέλνει ειδοποιήσεις μέσω κάποιων alerts για τον αερισμό ή τη θέρμανση της σχολικής τάξης[5], [6].

Κατά την πειραματική φάση υλοποίησης του συστήματος, παρουσιάστηκαν τεχνικοί περιορισμοί στη χρήση του αισθητήρα SGP30, οι οποίοι σχετίζονταν με τη μη αξιόπιστη ηλεκτρική διασύνδεσή του μέσω breadboard, λόγω της απαίτησης συγκόλλησης ακροδεκτών (pin headers). Το γεγονός αυτό οδήγησε σε αστάθεια επικοινωνίας μέσω του διαύλου I<sup>2</sup>C και, κατ' επέκταση, σε αδυναμία λήψης έγκυρων μετρήσεων κατά την εκτέλεση του κώδικα στο περιβάλλον Arduino IDE.

Για τον λόγο αυτό, στο τελικό στάδιο της υλοποίησης αποφασίστηκε η προσαρμογή της αρχιτεκτονικής του συστήματος και η αντικατάσταση του αισθητήρα SGP30 με τον αναλογικό αισθητήρα αερίων MQ-2. Ο MQ-2 επιλέχθηκε ως εναλλακτική λύση χαμηλού κόστους και υψηλής διαθεσιμότητας, προσφέροντας αξιόπιστη ένδειξη γενικής επιβάρυνσης της ατμόσφαιρας (Gas/Smoke Index), μέσω ανίχνευσης αερίων όπως προπάνιο, μεθάνιο και καπνός.

Κατά συνέπεια, ο τελικός κώδικας που αναπτύχθηκε στο Arduino IDE περιλαμβάνει τις μετρήσεις των αισθητήρων PMS5003 και MQ-2, ενώ τα αποτελέσματα απεικονίζονται τόσο στο Serial Monitor όσο και στην οθόνη OLED του συστήματος. Παράλληλα, η

μετάδοση των δεδομένων πραγματοποιείται μέσω του πρωτοκόλλου MQTT, με τη δημιουργία διακριτών θεματικών καναλιών (topics) στο περιβάλλον MQTTX, τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά στον αντίστοιχο πίνακα του Κεφαλαίου 3.

Ταυτόχρονα, η εργασία έχει καθαρά και εκπαιδευτικό χαρακτήρα, καθώς προτείνει την αξιοποίηση του συστήματος σε μαθήματα Πληροφορικής και STEM, δίνοντας τη δυνατότητα στους μαθητές να μάθουν βιωματικά, να αναπτύξουν την περιβαλλοντική συνείδηση και να εξοικειωθούν με την ανάλυση δεδομένων [7], [8], καθώς εντάσσεται στο πλαίσιο της ανάπτυξης έξυπνων τάξεων (smart classrooms) [3], [4], [8], με έμφαση στην εκπαιδευτική και λειτουργική αξιοποίηση της τεχνολογίας, [7].

## 1.2 Ερευνητικά ερωτήματα / Στόχοι

Η εργασία μας στηρίζεται σε ένα σύνολο ερευνητικών ερωτημάτων που αφορούν την ανάπτυξη, αξιολόγηση και εκπαιδευτική αξιοποίηση του συστήματος IoT:

Πρώτα απ'όλα πώς μπορείς να αναπτύξεις ένα οικονομικό σύστημα IoT για την μέτρηση και παρακολούθηση της ποιότητας αέρα σε σχολικές αίθουσες χρησιμοποιώντας αισθητήρες PM και GAS;

Μετά ποιες τεχνικές μηχανικής μάθησης μπορούμε να εφαρμόσουμε για την πρόβλεψη μεταβολών στην ποιότητα αέρα βασιζόμενο σε ιστορικά δεδομένα;

Πόσο αξιόπιστες είναι οι προβλέψεις των επιπέδων PM<sub>2.5</sub> και GAS όταν χρησιμοποιούνται μοντέλα μηχανικής μάθησης σε σχέση με τις πραγματικές μετρήσεις [5], [6], [13];

Πώς μπορεί η πληροφορία της πρόβλεψης να χρησιμοποιηθεί για να δημιουργήσει ένα σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης, ικανού να οδηγήσει σε αυτοματοποιημένες ή υποβοηθούμενες αποφάσεις βελτίωσης του αέρα;

Πώς μπορεί η χρήση τέτοιων συστημάτων να ενταχθεί στην εκπαιδευτική διαδικασία ώστε να προωθήσει τη διερευνητική, συνεργατική μάθηση, την υπολογιστική σκέψη και την περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση των μαθητών [3], [7];

Πώς εκπαιδευτικοί και μαθητές μπορούν να βλέπουν και να καταλαβαίνουν τα δεδομένα χρησιμοποιώντας εργαλεία οπτικοποίησης όπως το Node-RED και το Grafana;

Οι βασικοί μας στόχοι είναι αρχικά η ανάπτυξη, σχεδίαση και υλοποίηση ενός λειτουργικού πρωτοτύπου IoT για συλλογή δεδομένων ατμοσφαιρικών ρύπων με ενσωμάτωση πλατφορμών Node-RED, InfluxDB και Grafana για real-time παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και ιστορική ανάλυση δεδομένων, μια οικονομικά προσιτή, επεκτάσιμη και αναπαραγωγίμη αρχιτεκτονική συστήματος IoT, βασισμένη σε εμπορικά διαθέσιμα εξαρτήματα COTS. Στη συνέχεια να υλοποιηθεί το back-end λογισμικό (Node-RED, InfluxDB, Grafana) για να συλλέγουμε, αποθηκεύουμε και οπτικοποιούμε τα δεδομένα χρονοσειρών [14]. Εν συνέχεια ακολουθεί η εφαρμογή αλγοριθμικών προβλέψεων μηχανικής μάθησης (π.χ. linear / polynomial regression) για εκτίμηση των περιβαλλοντικών μεταβλητών και τέλος να διερευνηθεί και να προταθεί η χρήση του συστήματος ως ενεργό εκπαιδευτικό εργαλείο στο πλαίσιο μαθημάτων Πληροφορικής και STEM [9], [10].

### 1.3 Καινοτομία και συμβολή

Η παρούσα εργασία εισάγει καινοτόμα στοιχεία σε τρία σημεία:

- 1) **Στο τεχνικό μέρος:** Το σύστημα συνδυάζει χαμηλού κόστους COTS hardware (ESP8266, Arduino) με open-source λογισμικό (Node-RED, Grafana, InfluxDB), έτσι δημιουργείτε μια ολοκληρωμένη, επεκτάσιμη και αυτόνομη πλατφόρμα για να συλλέγεις και να αναλύεις δεδομένα [11].
- 2) **Στο ερευνητικό επίπεδο:** Η εφαρμογή και χρήση μοντέλων μηχανικής μάθησης για την πρόβλεψη ποιότητας αέρα σε σχολικές αίθουσες αποτελεί νέα προσέγγιση στη μελέτη μικροκλίματος εκπαιδευτικών περιβαλλόντων [12], [13] αφού δεν μένει μόνο στις μετρήσεις. Με αυτόν τον τρόπο το σύστημα επιτρέπει προγνωστική ανάλυση, παρέχοντας πληροφορίες που μπορούν να οδηγήσουν σε αυτόματες αποφάσεις για αερισμό ή θέρμανση.
- 3) **Στο παιδαγωγικό επίπεδο:** όπου προτείνεται και η αξιοποίηση του συστήματος ως εκπαιδευτικό εργαλείο, ενθαρρύνοντας τη διεπιστημονική μάθηση, την ανάπτυξη δεξιοτήτων ανάλυσης δεδομένων και βλέπουμε πώς η τεχνολογία συνδέεται πρακτικά με την περιβαλλοντική μάθηση [14], [15].

Το σύστημα χαρακτηρίζεται από ανοιχτή αρχιτεκτονική (open design), modular δομή και οικονομική προσβασιμότητα, επιτρέποντας την αναπαραγωγή του από

εκπαιδευτικούς ή μαθητές χωρίς εξειδικευμένες γνώσεις προγραμματισμού ή ηλεκτρονικών.

## 1.4 Δομή της εργασίας

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία χωρίζεται σε έξι ξεχωριστά κεφάλαια, το καθένα με συγκεκριμένους στόχους και ρόλους και συμβάλλει ολιστικά στην κατανόηση του θέματος. Η δομή της εργασίας είναι σχεδιασμένη ώστε να επικρατεί μια λογική αλληλουχία από τη θεωρητική θεμελίωση έως την πρακτική εφαρμογή, υλοποίηση και την αξιολόγηση του συστήματος που προτείνουμε.

Στο **Κεφάλαιο 1, με τίτλο “Εισαγωγή”**, θέτουμε τις βάσεις και περιγράφουμε τι ακριβώς εξετάζουμε, ποιος είναι ο σκοπός μας, ποια ερωτήματα θέλουμε να απαντήσουμε και τι προσφέρει αυτή η εργασία στην έρευνα και στην εκπαίδευση. Στο τέλος του κεφαλαίου περιγράφεται συνοπτικά η δομή ολόκληρης της διπλωματικής εργασίας.

Στο **Κεφάλαιο 2, “Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας”**, εξετάζονται αναλυτικά οι βασικές έννοιες και τεχνολογίες που πλαισιώνουν την έρευνα. Πιο συγκεκριμένα εξετάζουμε τις βασικές έννοιες και τεχνολογίες που χρειάζονται για να καταλάβει κανείς το αντικείμενο. Ξεκινάμε με τα βασικά του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), την αρχιτεκτονική του, τα πρότυπα επικοινωνίας, τα πρωτόκολλα, πώς δηλαδή συνδέονται αισθητήρες και ενσωματωμένα συστήματα. Μετά αναφερόμαστε στα ενσωματωμένα συστήματα και πώς βοηθούν στη δημιουργία “έξυπνων” περιβαλλόντων. Δίνουμε ιδιαίτερη έμφαση στις εφαρμογές του IoT για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα, στις μεθόδους συλλογής και ανάλυσης δεδομένων, αλλά και στη χρήση της μηχανικής μάθησης για πρόβλεψη περιβαλλοντικών παραμέτρων. Στο τέλος, ανατρέχουμε σε σχετικές ερευνητικές εργασίες για “έξυπνες” σχολικές αίθουσες και εκπαιδευτικές εφαρμογές του IoT, δείχνοντας τι λείπει μέχρι τώρα και πού έρχεται να συμβάλει η δική μας δουλειά.

Το **Κεφάλαιο 3, “Μεθοδολογία Ανάπτυξης Συστήματος και Ερευνητική Προσέγγιση”**, είναι το πιο τεχνικό τμήμα όπου περιγράφουμε αναλυτικά την αρχιτεκτονική και τη λειτουργία του προτεινόμενου συστήματος. Εξηγούμε πώς υλοποιήσαμε το σύστημα που προτείνουμε. Περιγράφουμε αναλυτικά τα υλικά που

χρησιμοποιήσαμε, τον μικροελεγκτή Wemos D1 R2 (ESP8266), τους αισθητήρες PMS5003 και SGP30, και την οθόνη OLED που δείχνει την τοπική απεικόνιση τιμών. Περιγράφουμε πώς όλα αυτά συνδέονται και επικοινωνούν μεταξύ τους. Ύστερα, περνάμε στο λογισμικό: χρησιμοποιούμε το Arduino IDE για τον προγραμματισμό, και τα Node-RED, InfluxDB και Grafana για να διαχειριζόμαστε, να αποθηκεύουμε και να βλέπουμε τα δεδομένα. Εξηγούμε πώς συλλέξαμε και αναλύσαμε τα δεδομένα και ποιες τεχνικές στατιστικής και μηχανικής μάθησης εφαρμόσαμε, όπως γραμμική παλινδρόμηση. Κλείνουμε με την παρουσίαση μιας συνολικής εικόνας της αρχιτεκτονικής του συστήματος IoT και τα σενάρια λειτουργίας του σε σχολικό περιβάλλον.

Στο **Κεφάλαιο 4, “Αποτελέσματα, Ανάλυση και Εφαρμογή του Συστήματος”**, δείχνουμε τι πετύχαμε στην πράξη. Παρουσιάζουμε τα δεδομένα που συλλέξαμε, τα βασικά τους χαρακτηριστικά και τα γραφήματα που φτιάξαμε μέσω Grafana. Αναλύουμε τα αποτελέσματα από τους αλγόριθμους πρόβλεψης και ελέγχουμε πόσο καλά και αξιόπιστα λειτουργούν τα μοντέλα μηχανικής μάθησης. Παράλληλα, αξιολογούμε το ίδιο το σύστημα: πόσο σταθερό και γρήγορο είναι και πόσο βολικό αποδείχτηκε σε πραγματικό σχολικό περιβάλλον. Τέλος, προτείνουμε σενάρια για αυτόματες αποφάσεις, όπως ενεργοποίηση αερισμού ή ειδοποιήσεις για την ποιότητα του αέρα, δείχνοντας έτσι τη χρησιμότητα όλου του έργου.

Στο τελευταίο κεφάλαιο, το **Κεφάλαιο 5, “Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις”**, συνοψίζουμε τι μάθαμε και τι καταφέραμε αναπτύσσοντας και αξιολογώντας το σύστημα. Τονίζουμε πού μπορεί να αξιοποιηθεί η εργασία μας, όχι μόνο στην εκπαίδευση, αλλά και σε ευρύτερες εφαρμογές, όπως τα “έξυπνα” κτίρια και η διαχείριση ενέργειας. Κλείνουμε με προτάσεις για το μέλλον όπως το να προστεθούν και άλλοι αισθητήρες (όπως για θερμοκρασία ή θόρυβο), να ενσωματωθούν πιο εξελιγμένοι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης και να δημιουργηθούν συνεργατικά σχολικά δίκτυα για τη μέτρηση περιβαλλοντικών παραμέτρων.

## 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο και Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας

Η παρούσα ενότητα εστιάζει στην παρουσίαση του θεωρητικού και τεχνολογικού πλαισίου που στηρίζει τη μελέτη. Εξετάζονται οι θεμελιώδεις έννοιες του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), τα ενσωματωμένα συστήματα, οι τεχνολογίες για την παρακολούθηση της ποιότητας αέρα και τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή, αποθήκευση και απεικόνιση δεδομένων (Node-RED, InfluxDB, Grafana). Επιπλέον, γίνεται ανάλυση των σύγχρονων εφαρμογών του IoT στην εκπαίδευση, καθώς και των τεχνικών μηχανικής μάθησης που εφαρμόζονται για την πρόβλεψη περιβαλλοντικών παραγόντων. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με μια επισκόπηση των πιο πρόσφατων ερευνητικών εργασιών που σχετίζονται με το θέμα αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας.

### 2.1 Το διαδίκτυο των πραγμάτων

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) θεωρείται μια από τις πιο σημαντικές τεχνολογικές εξελίξεις των ημερών μας. Αυτή η τεχνολογία δεν περιορίζει τη χρήση του διαδικτύου μόνο στους υπολογιστές και τα κινητά, αλλά την επεκτείνει και σε φυσικά αντικείμενα, επιτρέποντάς τους να συνδεθούν και να αλληλεπιδράσουν με τον ψηφιακό κόσμο [1]. Αντικείμενα όπως αισθητήρες, συσκευές, μηχανές ή συστήματα αποκτούν μια μοναδική ταυτότητα, ενσωματωμένους μικροελεγκτές και την ικανότητα να συνδέονται, ώστε να μπορούν να συλλέγουν, να επεξεργάζονται και να μοιράζονται δεδομένα απευθείας, σε πραγματικό χρόνο.

Οι Rayes και Salam [2] τονίζουν ότι το IoT αποτελεί την φυσική εξέλιξη του «Διαδικτύου των ανθρώπων» προς ένα «Διαδίκτυο των πραγμάτων». Σε αυτό το σενάριο, οι συσκευές επικοινωνούν και συνεργάζονται μεταξύ τους αυτόνομα, χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης. Αυτό δημιουργεί ένα δίκτυο «έξυπνων» αντικειμένων που δουλεύουν μαζί για να βελτιώσουν την αποδοτικότητα, την ασφάλεια και την ποιότητα ζωής μας. Η λειτουργία αυτής της ιδέας βασίζεται σε τρία κύρια τεχνολογικά στοιχεία: τους αισθητήρες, την ικανότητα σύνδεσης και την ανάλυση των δεδομένων που συλλέγονται.

Σύμφωνα με τον Buyya [1] τέσσερις είναι οι βασικοί πυλώνες του IoT:

1. **Αισθητήρες και ενεργοποιητές**, που παρακολουθούν διάφορα φυσικά φαινόμενα όπως η θερμοκρασία, η πίεση, η φωτεινότητα και η ποιότητα του αέρα.
2. **Δίκτυα επικοινωνίας**, τα οποία διασφαλίζουν τη μετάδοση δεδομένων μέσω πρωτοκόλλων όπως Wi-Fi, MQTT ή LoRaWAN.
3. **Πλατφόρμες επεξεργασίας και αποθήκευσης**, όπου γίνεται η ανάλυση και αποθήκευση των δεδομένων είτε σε cloud είτε σε τοπικά συστήματα.
4. **Εφαρμογές (applications)**, που επιτρέπουν την οπτικοποίηση και αξιοποίηση των δεδομένων, προσφέροντας λειτουργική αξία στους χρήστες.

Η εξέλιξη του IoT έχει φέρει στο προσκήνιο τα “έξυπνα περιβάλλοντα”, όπως τα έξυπνα σπίτια, οι πόλεις και τα σχολεία, όπου η τεχνολογία χρησιμοποιείται για να ενισχύσει την ενεργειακή αποδοτικότητα, την ασφάλεια και τις περιβαλλοντικές συνθήκες [3]. Στο πλαίσιο των έξυπνων τάξεων, οι Zhang et al. [3] επισημαίνουν ότι το IoT, σε συνδυασμό με την τεχνητή νοημοσύνη (AI), διευκολύνει τη δημιουργία διαδραστικών και προσαρμοστικών μαθησιακών περιβαλλόντων, όπου οι συνθήκες όπως η θερμοκρασία, το CO<sub>2</sub> και η φωτεινότητα μπορούν να ρυθμίζονται αυτόματα για να βελτιώσουν την απόδοση των μαθητών.

Αντίστοιχα, οι Kaderurkar et al. [4] και Apostolopoulos & Donrou [5] παρουσιάζουν πειραματικές υλοποιήσεις IoT συστημάτων χαμηλού κόστους για την παρακολούθηση ποιότητας αέρα σε σχολικές αίθουσες. Αυτό αποδεικνύει ότι η χρήση μικροελεγκτών, όπως το ESP8266 ή το Arduino, σε συνδυασμό με cloud ή τοπικές πλατφόρμες, μπορεί να προσφέρει αξιόπιστα και επεκτάσιμα αποτελέσματα.

Η ευρεία εφαρμογή των τεχνολογιών αυτών έχει επεκταθεί σημαντικά και στον τομέα της εκπαίδευσης. Επισημαίνεται ότι το IoT στην εκπαίδευση σχετίζεται με την ανάπτυξη δεξιοτήτων 21ου αιώνα, όπως ο αναστοχασμός, η ανάλυση δεδομένων, η υπολογιστική σκέψη και η συνεργατική μάθηση. Μέσω αυτών των εφαρμογών, οι μαθητές δεν είναι απλώς χρήστες της τεχνολογίας, αλλά γίνονται ενεργοί δημιουργοί, συμμετέχοντας στη σχεδίαση, προγραμματισμό και αξιολόγηση “έξυπνων” συστημάτων [7].

Συνοψίζοντας, το IoT αποτελεί ένα ολιστικό πλαίσιο συνδεδεμένων συσκευών, οι οποίες συμβάλλουν στη συλλογή και επεξεργασία δεδομένων με σκοπό να βελτιώσουν

φυσικά, κοινωνικά και εκπαιδευτικά περιβάλλοντα.. Στην τομέα της εκπαίδευσης, η αξιοποίησή του οδηγεί στη δημιουργία “ευφυών τάξεων” (intelligent classrooms), όπου συνδυάζονται αισθητήρες, ανάλυση δεδομένων και τεχνητή νοημοσύνη ενισχύοντας έτσι την εμπειρία μάθησης και την περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση. [3], [4], [5], [7].

### 2.1.1 Αρχιτεκτονική του IoT

Η αρχιτεκτονική του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) έχει μια πολυεπίπεδη δομή, η οποία επιτρέπει τη ροή δεδομένων από το φυσικό περιβάλλον προς ψηφιακά συστήματα επεξεργασίας και τελικά προς εφαρμογές που βοηθού στη λήψη αποφάσεων. Η μελέτες (Buyya & Dastjerdi [1], Rayes & Salam [2]) συμφωνούν στην περιγραφή μιας τετραεπίπεδης ή πενταεπίπεδης αρχιτεκτονικής, με σαφώς καθορισμένους ρόλους για κάθε επίπεδο. Στην παρούσα εργασία, υιοθετείται η κλασική μορφή των εξής τεσσάρων επιπέδων:

#### α) Επίπεδο Αντίληψης (Perception Layer)

Το επίπεδο αυτό περιλαμβάνει όλους τους αισθητήρες και τους ενεργοποιητές που έρχονται σε άμεση επαφή με το φυσικό περιβάλλον. Είναι το «σημείο εισόδου» των δεδομένων. Στην εργασία μας αυτό το στρώμα υλοποιείται με τον PMS5003, το οποίο μετρά αιωρούμενα σωματίδια PM1.0, PM2.5 και PM10 καθώς και με τον MQ-2 για τη μέτρηση Gas, προπάνιο-μεθάνιο-καπνό. Επιπλέον και προαιρετικά μπορεί να περιλαμβάνει μία OLED οθόνη, για τοπική και άμεση απεικόνιση. Ακολουθούμε τη λογική των "low-cost air quality modules" που συναντούμε σε παρόμοιες υλοποιήσεις (Apostolopoulos & Dovrou [5], Mota et al. [12]).

#### β) Επίπεδο Μεταφοράς / Δικτύου (Network Layer)

Το επίπεδο αυτό διασφαλίζει ότι τα δεδομένα των αισθητήρων μεταδίδονται από τις συσκευές στο κεντρικό σύστημα επεξεργασίας. Στην παρούσα εργασία, το στρώμα μεταφοράς υλοποιείται μέσω:

- ESP8266 Wi-Fi (Wemos D1 R2)
- Ασύρματης επικοινωνίας μέσω Wi-Fi 2.4 GHz

- Χρήσης πρωτοκόλλου MQTT, ειδικά σχεδιασμένο για IoT εφαρμογές.

Το ESP8266 χρησιμοποιείται ευρέως σε IoT εφαρμογές (Javed et al. [9]) λόγω χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και υποστήριξης TCP/IP stack.

### **γ) Επίπεδο Επεξεργασίας / Υποδομής (Processing / Middleware Layer)**

Σε αυτό το επίπεδο συγκεντρώνουμε δεδομένα, κάνουμε προεπεξεργασία, αποθηκεύουμε και αναλύουμε, ενώ έχουμε τη δυνατότητα να δημιουργούμε αυτοματισμούς. Στην εργασία αυτό το στρώμα υλοποιείται με τα εξής εργαλεία:

1. Node-RED: ένα middleware που χρησιμοποιείται για routing, filtering και εμπλουτισμό δεδομένων.
2. InfluxDB: μία βάση δεδομένων time-series, κατάλληλη για δεδομένα αισθητήρων.
3. Στοιχεία Machine Learning, είτε ενσωματωμένα στο Node-RED είτε μέσω Python modules που συνδέονται μέσω HTTP/REST.

Αυτό το επίπεδο είναι ζωτικής σημασίας καθώς υποστηρίζει την πρόβλεψη των επιπέδων CO<sub>2</sub> και PM, σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες όπως Garcia Pinilla et al. [6].

### **δ) Επίπεδο Εφαρμογής (Application Layer)**

Το τελικό επίπεδο είναι αυτό που αλληλεπιδρά ο χρήστης:

- Grafana dashboards, για οπτικοποίηση και ανάλυση δεδομένων
- Alerts (ειδοποιήσεις) για CO<sub>2</sub>/PM
- Προγνωστικά μοντέλα (π.χ. regression)
- Αυτοματισμοί αερισμού/κλιματισμού

Οι έξυπνες εφαρμογές του IoT στην εκπαίδευση (Zhang et al. [3], Aloufi et al. [7]) δίνουν έμφαση ακριβώς σε αυτό το επίπεδο, όπου οι εκπαιδευτικοί και μαθητές βλέπουν άμεσα τις συνθήκες της τάξης και συμμετέχουν ενεργά στην ερμηνεία των δεδομένων.

### 2.1.2 Πρωτόκολλα Επικοινωνίας

Τα συστήματα IoT βασίζονται σε ειδικά σχεδιασμένα, ελαφριά πρωτόκολλα. Η επικοινωνία μεταξύ των IoT συσκευών απαιτεί παράλληλα αποδοτικά και αξιόπιστα πρωτόκολλα, ειδικά όταν πρόκειται για συσκευές χαμηλής ισχύος όπως το ESP8266.

Τα κατάλληλα πρωτόκολλα για IoT πρέπει να επιτρέπουν:

- χαμηλή καθυστέρηση,
- ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας,
- δυνατότητα λειτουργίας σε ασταθή περιβάλλοντα,
- υποστήριξη για εκατοντάδες συσκευές.

Το MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) είναι ιδιαίτερα δημοφιλές σε εφαρμογές αισθητήρων λόγω της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και του μοντέλου λειτουργίας Publish/Subscribe. Ανάμεσα στα πιο δημοφιλή πρωτόκολλα επίσης είναι και τα CoAP, HTTP/REST και WebSockets.

Για τη συγκεκριμένη μας διπλωματική, το πρωτόκολλο επικοινωνίας που χρησιμοποιείται είναι το MQTT, επειδή είναι το ελαφρύτερο πρωτόκολλο για δεδομένα αισθητήρων, χρησιμοποιεί μοντέλο Publish/Subscribe, είναι ιδανικό για ασύρματα δίκτυα Wi-Fi, υποστηρίζει QoS (εγγύηση παράδοσης), ενσωματώνεται πλήρως σε Node-RED, και λειτουργεί εξαιρετικά με ESP8266. Το MQTT χρησιμοποιείται και στις περισσότερες σύγχρονες εργασίες IAQ monitoring (Apostolopoulos & Donrou [5], Berkani et al. [13]).

Στην πρακτική μας εφαρμογή, το MQTT λειτουργεί ως εξής:

1. Το Wemos ESP8266 συνδέεται στο Wi-Fi δίκτυο.
2. Δημοσιεύει (publish) τιμές σε topics όπως:
  - a. school/iaq/pm25
  - b. school/iaq/pm10
  - c. school/iaq/co2
  - d. school/iaq/tvoc
  - e. school/iaq/alert
  - f.
3. Το Node-RED λειτουργεί ως MQTT subscriber, λαμβάνοντας συνεχώς τα δεδομένα.

4. Τα δεδομένα προωθούνται στην InfluxDB.
5. Η Grafana διαβάζει από την InfluxDB και εμφανίζει γραφήματα, τάσεις και προγνωστικές καμπύλες.

Στην ουσία το MQTT είναι ο σύνδεσμος μεταξύ υλικού (sensors–Wemos) και λογισμικού (Node-RED–InfluxDB–Grafana).

## 2.2 Ενσωματωμένα συστήματα

Τα ενσωματωμένα συστήματα είναι η καρδιά του οικοσυστήματος του IoT, καθώς συνδυάζουν με έξυπνο τρόπο το υλικό-hardware και λογισμικό-software μέρος με τέτοιο τρόπο εξειδικευμένο ώστε να ανταποκριθούν σε απαιτήσεις πραγματικού χρόνου, περιορισμένων πόρων και αδιάλειπτης λειτουργίας [11]. Στην ουσία τα ενσωματωμένα συστήματα αποτελούν το υλικό και το λογισμικό που είναι ενσωματωμένο μέσα σε ένα μεγαλύτερο σύστημα με σκοπό να εκτελούν συγκεκριμένες λειτουργίες.

Σε αντίθεση με τα γενικού σκοπού συστήματα, τα ενσωματωμένα σχεδιάζονται για συγκεκριμένες εφαρμογές πράγμα που σημαίνει ότι πρέπει να λειτουργούν με περιορισμούς σε μνήμη, επεξεργαστή και ενέργειας διασφαλίζοντας ταυτόχρονα αξιοπιστία και αποδοτικότητα [12].

Η πλατφόρμα υλοποίησης ενός ενσωματωμένου συστήματος, όπως αυτές που χρησιμοποιούνται σε έργα IoT, περιλαμβάνει μικροελεγκτές ή μικροεπεξεργαστές, αισθητήρες, ενεργοποιητές (actuators), συστήματα επικοινωνίας όπως Wi-Fi, Bluetooth και LoRa, καθώς και λογισμικό λειτουργικού συστήματος ή πραγματικού χρόνου (RTOS) που διαχειρίζεται τις διεργασίες [11], [10]. Η βιβλιογραφία που βασιζόμαστε τονίζει την ανάγκη για συν-σχεδίαση (co-design) hardware και software, ώστε το σύστημα να ανταποκρίνεται σε απαιτήσεις επιδόσεων και αξιοπιστίας, όπως χρόνους απόκρισης (latency), κατανάλωση ενέργειας και περιβαλλοντικές συνθήκες [7].

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η χρήση πλακετών τύπου Arduino ή Wemos D1 R2 (ESP8266), οι οποίες διαθέτουν Wi-Fi, και είναι πολύ δημοφιλής σε εκπαιδευτικά ή ερευνητικά περιβάλλοντα, κυρίως λόγω του χαμηλού κόστους, επεκτασιμότητας και υποστήριξης από την κοινότητα [8]. Σε συνδυασμό με αισθητήρες παρακολούθησης περιβαλλοντικών στοιχείων όπως η ποιότητα του αέρα και των σωματιδίων, όπως και

θα δούμε στην παρούσα εργασία μας, αυτές οι πλατφόρμες επιτρέπουν τη δημιουργία δικτυωμένων και αυτόνομων συστημάτων που συλλέγουν και μεταδίδουν δεδομένα.

Η βιβλιογραφία στην οποία έχουμε βασιστεί και έχουμε μελετήσει τονίζει επίσης τη σημασία αρχιτεκτονικών λύσεων που ενσωματώνουν Edge Computing δηλαδή επεξεργασία δεδομένων κοντά στους αισθητήρες/συσκευές προκειμένου να μειωθεί το φορτίο στο δίκτυο και να βελτιωθεί η ταχύτητα απόκρισης [13]. Η ικανότητα των ενσωματωμένων συστημάτων να εκτελούν τοπικές αναλύσεις ή να στέλνουν ειδοποιήσεις χωρίς συνεχή εξάρτηση από το cloud είναι κρίσιμη σε περιβάλλοντα όπως οι σχολικές αίθουσες ή οι βιομηχανικές εφαρμογές.

Από παιδαγωγική σκοπιά, η χρήση ενσωματωμένων συστημάτων σε εκπαιδευτικά έργα προάγει την ανάπτυξη υπολογιστικής σκέψης, πειραματισμού και ανάπτυξης δεξιοτήτων προγραμματισμού και ηλεκτρονικής [4], [3]. Όπως αναφέρουν οι Kaderurkar [4] και οι συνεργάτες τους, η δημιουργία μιας “έξυπνης τάξης” απαιτεί όχι μόνο αισθητήρες και πλατφόρμες IoT, αλλά και προσεκτικά σχεδιασμένα ενσωματωμένα συστήματα που συνδέουν το φυσικό περιβάλλον με τον ψηφιακό κόσμο.

Τέλος, η αξιολόγηση αυτών των ενσωματωμένων συστημάτων σε πραγματικές συνθήκες, όπως οι σχολικές αίθουσες, απαιτεί τη μέτρηση παραμέτρων όπως η αξιοπιστία, η ακρίβεια των αισθητήρων, η συντήρηση, η ενεργειακή απόδοση και επεκτασιμότητα. Η εργασία των Apostolopoulos & Donrou [5] σχετικά με ένα σύστημα παρακολούθησης ποιότητας αέρα σε τάξη είναι ένα εξαιρετικό παράδειγμα όπου ενσωματωμένες πλατφόρμες αξιοποιήθηκαν με επιτυχία.

### **2.2.1 Wemos D1 R2 / ESP8266 και Arduino REV4**

Το Wemos D1 R2 που βασίζεται στον μικροελεγκτή ESP8266 και το Arduino REV4 είναι δύο παραδείγματα ενσωματωμένων συστημάτων που είναι ιδανικά για IoT έργα:

ESP8266/Wemos: Ξεχωρίζει για την ενσωματωμένη δυνατότητα Wi-Fi, που το καθιστά ιδανικό για την αποστολή δεδομένων στο διαδίκτυο χωρίς πρόσθετα modules. Είναι βασισμένο σε COTS hardware [10], εξασφαλίζοντας χαμηλό κόστος και εύκολη προμήθεια.

Arduino REV4: Προσφέρει μια σταθερή και επεκτάσιμη πλατφόρμα, γνωστή για την ευκολία προγραμματισμού μέσω του Arduino IDE, και τη μεγάλη κοινότητα υποστήριξης.

Το τμήμα του προγραμματισμού για τα δύο αυτά συστήματα πραγματοποιείται συνήθως στο Arduino IDE, το οποίο επιτρέπει τη συγγραφή κώδικα για την ανάγνωση των αισθητήρων και την επικοινωνία μέσω Wi-Fi ή και ενσύρματα μέσω USB. Στην δική μας μεταπτυχιακή μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία το σύστημα που θα ενσωματώσουμε θα στηρίζετε στο Wemos D1 R2 όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο.

## 2.3 Παρακολούθηση ποιότητας αέρα & αισθητήρες PM/GAS

Η έξυπνη παρακολούθηση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα (Intelligent Indoor Air Quality) είναι ένα σημαντικό πεδίο εφαρμογής για τα συστήματα IoT που στοχεύουν στη βελτίωση των συνθηκών μάθησης. Στις σχολικές αίθουσες, οι κύριες παράμετροι ενδιαφέροντος είναι οι συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων (PM1.0, PM2.5, PM10), καθώς και το αέριο – προπάνιο – μεθάνιο – καπνός σε περίπτωση πυρκαγιάς ή διαφυγής άλλων αερίων, όλοι αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν την ευεξία, τη συγκέντρωση και την υγεία των μαθητών [5], [6]. Στο επόμενο κείμενο θα εξετάσουμε τις τεχνικές πτυχές, τους συνηθισμένους αισθητήρες (PMS5003, MQ-2), καθώς και θέματα αξιοπιστίας, βαθμονόμησης, ενσωμάτωσης και λειτουργίας στο πλαίσιο ενός έργου IoT.

### 2.3.1 Σημασία Μετρήσιμων Παραμέτρων και υγειονομικά όρια

Η παρακολούθηση PM2.5 και GAS είναι δυο συμπληρωματικές προσεγγίσεις: τα PM2.5/PM10 προσδιορίζουν την παρουσία σωματιδιακής ρύπανσης (σκόνη, καπνός, αιωρούμενα σωματίδια), ενώ ο MQ-2 βοηθάει στον εντοπισμό υγραερίου/προπανίου/υδρογόνου/καπνού σε περίπτωση κάποιας διαρροής. Οι διεθνείς οδηγίες WHO (ΠΟΥ) παρέχουν προτεινόμενα όρια έκθεσης όπως τα μακροχρόνια όρια για PM2.5, τα οποία είναι χρήσιμα ως thresholds για ειδοποιήσεις και αυτόματες ενέργειες. Γι' αυτό είναι καλό να αναφέρουμε και να ενσωματώσουμε τα επίσημα όρια κατά τη ρύθμιση των ειδοποιήσεων - alerts (π.χ. όρια ΠΟΥ 2021 για PM2.5).

### 2.3.2 Αισθητήρες σωματιδίων (PM): τεχνολογία, χαρακτηριστικά και PMS5003

Οι περισσότεροι οικονομικοί αισθητήρες PM όπως οι σειρές PMS της Plantower, και συγκεκριμένα ο πρώτος αισθητήρας της εργασίας μας που χρησιμοποιούμε, ο PMS5003, βασίζονται στην τεχνολογία laser scattering. Αυτή η μέθοδος, το laser scattering, περιλαμβάνει ένα λέιζερ που φωτίζει το δείγμα του αέρα και ο φωτισμός των σωματιδίων καταγράφεται από φωτοδιόδους/φωτοπολλαπλασιαστές όπου από την ένταση και τη συχνότητα ανιχνεύονται η συγκέντρωση και η κατανομή των κόκκων των σωματιδίων (PM1.0, PM2.5, PM10) [5], [12].

#### Πλεονεκτήματα PMS5003

- Προσφέρει καλή σχέση κόστους/απόδοσης για εκπαιδευτικά έργα.
- Παρέχει απευθείας μετρήσεις PM1.0/PM2.5/PM10 σε  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- Εύκολη σύνδεση μέσω UART (serial) — εύκολη σύνδεση με μικροελεγκτές (ESP8266/Arduino).

#### Περιορισμοί

- Είναι ευαίσθητος σε υγρασία και σκόνη οπότε χρειάζεται προσεκτική τοποθέτηση και προφυλάξεις.
- Απαιτεί προθέρμανση με ένα σύντομο χρονos σταθεροποίησης κατά την ενεργοποίηση.
- Χρειάζεται βαθμονόμηση ή διόρθωση για καλύτερη αντιστοιχία με αναλυτικά όργανα [5], [12].

#### Σύνδεση και αποτύπωση δεδομένων

- Συνδεσιμότητα: TX/RX στο microcontroller (UART). Συνιστάται χρήση logic-level συμβατότητας (5V/3.3V) και φίλτρων για σταθερή επικοινωνία.
- Sampling: εξαρτάται από ρυθμό ροής και απαιτήσεις, σε σχολική εφαρμογή 1 sample / 10–60 δευτερόλεπτα για να είναι συνήθεις, ενώ για finer analysis 1–5

δευτερόλεπτα. Το trade-off είναι μεταξύ ακρίβειας χρονικής απεικόνισης και διάρκειας ζωής / throughput αποθήκευσης.

### 2.3.3 Αισθητήρες αερίων (Gas Sensors): τεχνολογία, χαρακτηριστικά και MQ-2

Οι αισθητήρες αερίων χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές παρακολούθησης ποιότητας αέρα, ασφάλειας και περιβαλλοντικής επιτήρησης, ιδιαίτερα σε εσωτερικούς χώρους όπως κατοικίες, βιομηχανικούς χώρους και σχολικές αίθουσες. Σε αντίθεση με τους αισθητήρες σωματιδίων (PM), οι οποίοι μετρούν τη συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών και υγρών σωματιδίων, οι αισθητήρες αερίων στοχεύουν στην ανίχνευση χημικών ενώσεων και αερίων ρύπων που σχετίζονται με ανθρώπινη δραστηριότητα, καύση ή διαρροές καυσίμων [10], [14].

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ο αισθητήρας **MQ-2**, ένας χαμηλού κόστους, ευρέως διαδεδομένος αισθητήρας αερίων, κατάλληλος για εκπαιδευτικές και πειραματικές εφαρμογές IoT. Ο MQ-2 ανήκει στην οικογένεια των αισθητήρων MOS (Metal Oxide Semiconductor), οι οποίοι βασίζονται στη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης ενός ημιαγωγικού υλικού όταν αυτό εκτεθεί σε συγκεκριμένα αέρια.

Η λειτουργία του MQ-2 βασίζεται σε ένα στοιχείο κασσιτέρου ( $\text{SnO}_2$ ), το οποίο θερμαίνεται μέσω ενσωματωμένου θερμαντικού κυκλώματος. Σε καθαρό αέρα, το υλικό παρουσιάζει υψηλή ηλεκτρική αντίσταση. Όταν εκτεθεί σε αναγώγιμα αέρια, όπως υγραέριο (LPG), προπάνιο, μεθάνιο, υδρογόνο ή καπνό, η αντίσταση μειώνεται, προκαλώντας μεταβολή στην έξοδο τάσης του αισθητήρα [14].

Η αναλογική αυτή μεταβολή μπορεί να μετρηθεί από τον μικροελεγκτή και να χρησιμοποιηθεί ως **δείκτης επιβάρυνσης της ατμόσφαιρας**, χωρίς να απαιτείται πολύπλοκη επεξεργασία ή εξειδικευμένος εξοπλισμός βαθμονόμησης.

Συγκεκριμένα ο αισθητήρας MQ-2 είναι ικανός να ανιχνεύει:

- καπνό (smoke),
- υγραέριο (LPG),
- προπάνιο και βουτάνιο,
- μεθάνιο,

- υδρογόνο.

Στην εργασία αυτή, ο MQ-2 δεν χρησιμοποιείται ως ποσοτικός μετρητής συγκέντρωσης συγκεκριμένου αερίου, αλλά ως ποιοτικός δείκτης γενικής ποιότητας αέρα (Gas / Smoke Index), ο οποίος συμπληρώνει τις μετρήσεις αιωρούμενων σωματιδίων (PM2.5 / PM10) του PMS5003.

#### Πλεονεκτήματα MQ-2:

- Χαμηλό κόστος και ευρεία διαθεσιμότητα, ιδανικός για εκπαιδευτικά και πειραματικά έργα IoT.
- Αναλογική έξοδος, που επιτρέπει απλή διασύνδεση με μικροελεγκτές (Arduino, ESP8266).
- Κατάλληλος για ανίχνευση αιφνίδιων μεταβολών ποιότητας αέρα (π.χ. καπνός, αυξημένη ρύπανση).
- Δεν απαιτεί σύνθετα πρωτόκολλα επικοινωνίας ή ειδικούς οδηγούς (drivers).

#### Περιορισμοί:

- Δεν παρέχει άμεσες μετρήσεις διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) σε ppm.
- Επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και την υγρασία του περιβάλλοντος.
- Απαιτεί χρόνο προθέρμανσης (warm-up) για σταθερές μετρήσεις.
- Η έξοδος είναι σχετική (relative) και όχι απόλυτα βαθμονομημένη, γεγονός που περιορίζει τη χρήση του σε εφαρμογές υψηλής ακρίβειας [13].

#### Σύνδεση και αποτύπωση δεδομένων:

- Ο MQ-2 παρέχει αναλογική έξοδο (AO), η οποία συνδέεται απευθείας σε αναλογική είσοδο του μικροελεγκτή. Στην παρούσα εργασία, η τιμή αυτή χρησιμοποιείται:
  - για την παρακολούθηση μεταβολών στην ποιότητα αέρα,
  - για τον καθορισμό ορίων (thresholds) κακής ποιότητας,
  - για τη δημιουργία ειδοποιήσεων (alerts) μέσω του συστήματος IoT.

- Η συχνότητα δειγματοληψίας μπορεί να κυμαίνεται από 1 έως 5 δευτερόλεπτα για εκπαιδευτικές εφαρμογές πραγματικού χρόνου, ή να αυξηθεί (π.χ. 10–60 δευτερόλεπτα) για μακροχρόνια στατιστική ανάλυση και αποθήκευση δεδομένων, επιτυγχάνοντας ισορροπία μεταξύ πληρότητας δεδομένων και αποδοτικότητας αποθήκευσης.

### 2.3.4 Ενσωμάτωση αισθητήρων, βαθμονόμηση και cross-calibration

#### **Ενσωμάτωση (hardware & software).**

Οι PMS5003 και MQ-2 συνδέονται απευθείας στο Wemos D1 R2 (ESP8266) ή Arduino μέσω UART και I<sup>2</sup>C αντίστοιχα. Από την σκοπιά του λογισμικού, οι κύριες ενέργειες περιλαμβάνουν την ανάγνωση των raw data, την εφαρμογή smoothing/averaging, την προσθήκη time-stamping και την αποστολή πακέτων προς Node-RED/InfluxDB. Η χρήση έτοιμων βιβλιοθηκών (π.χ. Adafruit\_CCS811, Plantower serial parsers) επιταχύνει και διευκολύνει τη διαδικασία [8], [15].

#### **Βαθμονόμηση.**

Η ποιότητα των μετρήσεων από low-cost αισθητήρες μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με μεθόδους βαθμονόμησης:

- Field calibration έναντι αναλυτικών οργάνων (reference instruments) σε αντιπροσωπευτικές συνθήκες.
- Statistical calibration: γραμμική ή πολλαπλή παλινδρόμηση μεταξύ raw sensor readings και reference measurements για διόρθωση συστηματικού σφάλματος [5].
- Machine learning calibration: χρήση μοντέλων ML (π.χ. Random Forest, SVR) για χαρτογράφηση μη γραμμικών σχέσεων μεταξύ raw signals και πραγματικών τιμών όπως προτείνεται στις σύγχρονες μελέτες [5], [13].

#### **Σημεία διαδικασίας**

1. Συλλογή παράλληλων δεδομένων (sensor + reference) για διαφορετικές συνθήκες (υγρασία, θερμοκρασία, δραστηριότητα).
2. Εκπαίδευση μοντέλου βαθμονόμησης (train/test split) και αξιολόγηση σφαλμάτων (RMSE, MAE).
3. Ενσωμάτωση του μοντέλου στο pipeline: είτε server-side (Node-RED/Python) είτε edge (ελαφριά μορφή ή προειδοποιητικοί δείκτες στο microcontroller).

### 2.3.5 Ανάπτυξη πεδίου: Τοποθέτηση, ρυθμός δειγματοληψίας, συντήρηση

Η εγκατάσταση ενός συστήματος παρακολούθησης ποιότητας αέρα σε μια σχολική αίθουσα απαιτεί προσεκτική μελέτη του χώρου. Η διάταξη των αισθητήρων, η απόσταση από πηγές ρύπανσης και ο τρόπος ροής του αέρα παίζουν καθοριστικό ρόλο στην αξιοπιστία των μετρήσεων. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία οι αισθητήρες PM και GAS θα πρέπει να τοποθετούνται στην λεγόμενη “αναπνεύσιμη ζώνη”, δηλαδή σε ύψος περίπου 1,0–1,5 μέτρου, όπου οι πραγματικές συγκεντρώσεις αερίων και σωματιδίων αντικατοπτρίζουν καλύτερα τις συνθήκες έκθεσης των μαθητών [5], [12]. Είναι σημαντικό η θέση τους να μην είναι πολύ κοντά σε παράθυρα, καθώς ο φυσικός αερισμός μπορεί να προκαλέσει απότομες διακυμάνσεις, ούτε δίπλα σε πηγές θερμότητας ή κλιματιστικά που επηρεάζουν τη ροή αέρα. Επιπλέον, καλό είναι να αποφεύγεται η άμεση έκθεση του PMS5003 σε ρεύματα αέρα ή υπερβολική σκόνη, καθώς αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα μέτρησης λόγω υπερφόρτωσης του οπτικού θαλάμου.

Ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι επίσης ένας κρίσιμος παράγοντας για ένα σύστημα IoT που στοχεύει στη λεπτομερή καταγραφή και ανάλυση της ποιότητας του αέρα. Στο πλαίσιο μιας σχολικής αίθουσας, ένας ρυθμός λήψης δειγμάτων κάθε 10 έως 60 δευτερόλεπτα θεωρείται ιδανικός, καθώς προσφέρει καλή χρονική ανάλυση χωρίς να επιβαρύνει υπερβολικά τη βάση δεδομένων ή τη λειτουργία του μικροελεγκτή [12]. Για πιο λεπτομερείς αναλύσεις ή για συστήματα που προβλέπουν βραχυπρόθεσμες αλλαγές, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ρυθμός 1–5 δευτερολέπτων. Ωστόσο, η υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας απαιτεί προσεκτική διαχείριση του κόστους αποθήκευσης, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται βάσεις δεδομένων τύπου time-series όπως η InfluxDB. Γι' αυτό, οι πολιτικές διατήρησης και οι μηχανισμοί downsampling είναι απαραίτητοι.

Η συντήρηση των αισθητήρων περιλαμβάνει την τακτική επιθεώρηση της συσκευής, τον καθαρισμό του αεραγωγού στα laser-based PM modules, όπως ο PMS5003, και την περιοδική επαναβαθμονόμηση των αισθητήρων αερίων. Το φαινόμενο του “drift”, που αναφέρεται στη σταδιακή μείωση της ακρίβειας λόγω γήρανσης ή επιβάρυνσης του αισθητήρα, είναι καλά τεκμηριωμένο στη βιβλιογραφία. Συνιστάται να γίνεται έλεγχος τουλάχιστον κάθε 6–12 μήνες [13]. Σε περιπτώσεις έντονης χρήσης ή υψηλής υγρασίας, η συχνότητα συντήρησης θα πρέπει να αυξάνεται, καθώς οι πιο οικονομικοί αισθητήρες επηρεάζονται περισσότερο από περιβαλλοντικούς παράγοντες σε σύγκριση με τα επαγγελματικά συστήματα.

### 2.3.6 Ποιότητα δεδομένων, προεπεξεργασία και αντιμετώπιση θορύβου

Η αξιοπιστία ενός συστήματος παρακολούθησης ποιότητας αέρα δεν εξαρτάται μόνο από τους ίδιους τους αισθητήρες, αλλά σε μεγάλο βαθμό από τη διαδικασία προεπεξεργασίας των δεδομένων (preprocessing), η οποία έχει στόχο να απομονώσει τον θόρυβο, να διορθώσει σφάλματα και να εξομαλύνει τις χρονοσειρές πριν αυτές χρησιμοποιηθούν είτε για ανάλυση είτε για προγνωστικά μοντέλα. Τα δεδομένα που παράγουν αισθητήρες όπως ο PMS5003 και ο MQ-2 συχνά περιλαμβάνουν spikes, ακραίες τιμές ή στιγμιαίες αποκλίσεις που οφείλονται σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, λάθη στη σειριακή επικοινωνία ή απότομες αλλαγές στον χώρο. Για τον λόγο αυτό προτείνεται ο εντοπισμός και η απομάκρυνση outliers με στατιστικές τεχνικές όπως interquartile range filtering ή median absolute deviation. Με τον τρόπο αυτό, το σύστημα αποφεύγει να κάνει εσφαλμένες εκτιμήσεις της ποιότητας αέρα ή να ενεργοποιεί λανθασμένα alarms [5], [12].

Ένα δεύτερο κρίσιμο στάδιο είναι η εφαρμογή τεχνικών εξομάλυνσης (smoothing), όπως κινούμενοι μέσοι όροι (moving averages), exponential smoothing, ή ακόμη και low-pass φίλτρα, που μειώνουν τον θόρυβο και αναδεικνύουν την πραγματική τάση. Για αισθητήρες PM, όπου ο θόρυβος είναι συχνός λόγω της φύσης του laser scattering, η χρήση ενός rolling window 3–15 δειγμάτων έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική [12]. Στην περίπτωση αισθητήρων CO<sub>2</sub>, TVOC και GAS η εξομάλυνση είναι εξίσου σημαντική, αφού οι τιμές μπορεί να επηρεαστούν από θερμοκρασία, υγρασία και ανθρώπινη δραστηριότητα.

Επιπλέον, δεδομένου ότι οι αισθητήρες επηρεάζονται από τη θερμοκρασία και την υγρασία, κρίνεται απαραίτητη η εφαρμογή διορθωτικών υπολογισμών (temperature/humidity compensation). Πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι οι χαμηλού κόστους αισθητήρες παρουσιάζουν συστηματικά σφάλματα υπό υψηλή υγρασία ή θερμότητα και ότι η ενσωμάτωση αυτών των παραγόντων βελτιώνει σημαντικά την ακρίβεια των χρονοσειρών [5], [13]. Έτσι πολλές φορές προτείνεται να χρησιμοποιηθεί πρόσθετος αισθητήρας θερμοκρασίας/υγρασίας (π.χ. DHT22 ή BME280), ώστε οι τιμές PM και GAS να διορθώνονται δυναμικά.

Τέλος, επειδή οι αισθητήρες έχουν διαφορετικούς ρυθμούς δειγματοληψίας και παράγουν δεδομένα σε διαφορετικούς χρονικούς δείκτες, απαιτείται χρονική ευθυγράμμιση (time alignment) των χρονοσειρών. Η χρήση timestamps με ακρίβεια δευτερολέπτων και κοινή βάση χρόνου (π.χ. UTC) επιτρέπει τη σωστή συσχέτιση πολλαπλών μετρήσεων. Σε συστήματα IoT η Node-RED μπορεί να εκτελεί αυτούς τους ελέγχους σε πραγματικό χρόνο, εφαρμόζοντας smoothing, alignment και filtering πριν την αποστολή των δεδομένων στη βάση InfluxDB [15]. Με αυτόν τον τρόπο η ποιότητα των δεδομένων εξασφαλίζεται και το σύστημα παράγει αξιόπιστες μετρήσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για στατιστική ανάλυση και μηχανική μάθηση.

### 2.3.7 Σύνδεση με Machine Learning & Χρήση μετρήσεων

Η εφαρμογή τεχνικών μηχανικής μάθησης στην ποιότητα αέρα έχει λάβει ιδιαίτερη προσοχή τα τελευταία χρόνια, καθώς οι χρονοσειρές PM και GAS δείχνουν επαναλαμβανόμενα μοτίβα που μπορούν να προβλεφθούν με μεγάλη ακρίβεια εφόσον χρησιμοποιηθούν τα κατάλληλα μοντέλα. Στις σχολικές αίθουσες, η πρόβλεψη των επιπέδων PM ΚΑΙ GAS είναι κρίσιμη για τον έγκαιρο αερισμό του χώρου, τη μείωση της κόπωσης και την ενίσχυση της συγκέντρωσης των μαθητών [6]. Τα δεδομένα που συλλέγονται από οικονομικούς αισθητήρες, αφού υποστούν επεξεργασία, μπορούν να τροφοδοτήσουν μοντέλα πρόβλεψης για βραχυπρόθεσμες και μεσοπρόθεσμες μεταβολές.

Αρχικά, τα απλούστερα μοντέλα όπως η γραμμική παλινδρόμηση (linear regression), οι πολυωνυμικές παλινδρομήσεις, οι κινούμενοι μέσοι όροι και τα μοντέλα εξομάλυνσης είναι κατάλληλες επιλογές για μικρά σύνολα δεδομένων ή για πρώιμες εφαρμογές. Η

βιβλιογραφία δείχνει ότι αυτά τα μοντέλα λειτουργούν καλά όταν οι μεταβολές των ρύπων είναι σχετικά ομαλές και οφείλονται κυρίως στη δραστηριότητα των μαθητών και στον φυσικό αερισμό [6].

Για πιο περίπλοκα μοτίβα ή για προβλέψεις σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα χρησιμοποιούνται χρονικά μοντέλα όπως ARIMA και SARIMA. Αυτά τα μοντέλα εκμεταλλεύονται την εποχικότητα και τη χρονική εξάρτηση των δεδομένων. Έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία σε μελέτες πρόγνωσης CO<sub>2</sub> σε σχολικές αίθουσες, πετυχαίνοντας εντυπωσιακά ποσοστά ακρίβειας [6].

Σε πιο προηγμένες εφαρμογές, όπου έχουμε στη διάθεσή μας ένα μεγάλο σύνολο ιστορικών δεδομένων, μπορούμε να αξιοποιήσουμε τα νευρωνικά δίκτυα όπως LSTM (Long Short-Term Memory) και GRU. Αυτά τα δίκτυα έχουν τη δυνατότητα να μοντελοποιούν πολύπλοκες χρονικές εξαρτήσεις και μη γραμμικότητες. Επιπλέον, σε περιβάλλοντα με πολλαπλούς αισθητήρες μπορούμε να εφαρμόσουμε μοντέλα πολυμεταβλητής χρονοσειράς, όπου λαμβάνονται υπόψη ταυτόχρονα παράμετροι όπως PM2.5, GAS, θερμοκρασία, υγρασία, αριθμός ατόμων και ώρα σε συνδυασμό, κάτι που οδηγεί σε υψηλότερη ακρίβεια πρόβλεψης [5], [12], [13].

Η πρόβλεψη της ποιότητας του αέρα επιτρέπει την αυτόματη ενεργοποίηση συστημάτων κλιματισμού, αερισμού και θέρμανσης, καθώς και την έκδοση ειδοποιήσεων στους εκπαιδευτικούς και μαθητές. Έτσι δημιουργείται ένα έξυπνο σύστημα που δεν παρακολουθεί απλώς τις συνθήκες αέρα, αλλά λειτουργεί προληπτικά, διασφαλίζοντας ένα υγιές και αποτελεσματικό περιβάλλον μάθησης.

Στο κεφάλαιο 3 και συγκεκριμένα στο κεφάλαιο 3.6 θα δούμε με λεπτομέρεια τις προβλέψεις μέσω αλγορίθμων Μηχανικής Μάθησης αλλά και στο κεφάλαιο 4 τα αποτελέσματα και την ανάλυση δεδομένων και μετρήσεων.

## **2.4 Node-RED, InfluxDB, Grafana – αρχιτεκτονική και λειτουργίες**

Η υλοποίηση σύγχρονων εφαρμογών IoT δεν περιορίζεται στη συλλογή δεδομένων από αισθητήρες, αλλά απαιτεί μια ολοκληρωμένη υποδομή που να υποστηρίζει τη ροή, την αποθήκευση, την επεξεργασία και την οπτικοποίηση μεγάλου όγκου δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Για τον σκοπό αυτό, στη διεθνή βιβλιογραφία και στη βιομηχανική πρακτική έχουν επικρατήσει αρχιτεκτονικές βασισμένες σε middleware πλατφόρμες,

βάσεις δεδομένων χρονοσειρών (time-series databases) και εργαλεία ανάλυσης και οπτικοποίησης [1], [2].

Στο πλαίσιο αυτό, εργαλεία όπως το Node-RED, η InfluxDB και η Grafana αποτελούν βασικά δομικά στοιχεία σύγχρονων IoT συστημάτων, καθώς επιτρέπουν την ανάπτυξη ευέλικτων, επεκτάσιμων και κατανεμημένων εφαρμογών, κατάλληλων τόσο για ερευνητικά όσο και για εκπαιδευτικά περιβάλλοντα [9], [12].

#### **2.4.1 Node-RED ως Middleware σε Συστήματα IoT**

Το Node-RED είναι μια πλατφόρμα οπτικού προγραμματισμού βασισμένη σε ροές (flow-based programming), η οποία αναπτύχθηκε αρχικά από την IBM με στόχο την απλοποίηση της διασύνδεσης συσκευών, υπηρεσιών και εφαρμογών στο οικοσύστημα του IoT [15]. Η βασική φιλοσοφία του Node-RED στηρίζεται στη δημιουργία ροών δεδομένων (flows), όπου κάθε κόμβος (node) εκτελεί μια συγκεκριμένη λειτουργία, όπως λήψη δεδομένων, φιλτράρισμα, μετασχηματισμό ή προώθηση.

Στη γενική αρχιτεκτονική ενός IoT συστήματος, το Node-RED λειτουργεί ως middleware, δηλαδή ως ενδιάμεσο στρώμα μεταξύ του επιπέδου επικοινωνίας και του επιπέδου αποθήκευσης/εφαρμογών. Μέσω της υποστήριξης πλήθους πρωτοκόλλων (MQTT, HTTP, WebSockets, TCP/IP), μπορεί να συλλέγει δεδομένα από ετερογενείς συσκευές και να τα ενοποιεί σε ενιαία ροή επεξεργασίας [9]. Επιπλέον, προσφέρει δυνατότητες προεπεξεργασίας δεδομένων, όπως εξομάλυνση, ανίχνευση ορίων, δημιουργία ειδοποιήσεων και ενεργοποίηση αυτοματισμών.

Στην παρούσα εργασία, το Node-RED αξιοποιείται ως κεντρικός κόμβος λήψης και διαχείρισης των μετρήσεων ποιότητας αέρα. Λαμβάνει δεδομένα από τις IoT συσκευές, τα επεξεργάζεται σε πραγματικό χρόνο και τα προωθεί στη βάση δεδομένων χρονοσειρών, διασφαλίζοντας την αξιοπιστη και δομημένη αποθήκευσή τους.

#### **2.4.2 InfluxDB και Διαχείριση Δεδομένων Χρονοσειρών**

Η αποθήκευση δεδομένων IoT παρουσιάζει ιδιαίτερες απαιτήσεις, καθώς οι μετρήσεις παράγονται συνεχώς, συνοδεύονται από χρονικές σφραγίδες (timestamps) και συχνά απαιτούν ανάλυση τάσεων και ιστορικών μοτίβων. Για τον λόγο αυτό, οι βάσεις

δεδομένων χρονοσειρών (time-series databases) θεωρούνται καταλληλότερες σε σχέση με τις παραδοσιακές σχεσιακές βάσεις [12].

Η InfluxDB είναι μία από τις πλέον διαδεδομένες βάσεις δεδομένων χρονοσειρών, σχεδιασμένη ειδικά για IoT εφαρμογές και συστήματα παρακολούθησης. Υποστηρίζει αποδοτική εγγραφή μεγάλου όγκου δεδομένων, ευέλικτα ερωτήματα βασισμένα στον χρόνο, καθώς και μηχανισμούς διαχείρισης ιστορικών δεδομένων μέσω πολιτικών διατήρησης (retention policies) και συμπίκνωσης (downsampling) [12].

Σε μια γενική IoT αρχιτεκτονική, η InfluxDB λειτουργεί ως το κύριο αποθετήριο δεδομένων, στο οποίο αποθηκεύονται μετρήσεις από αισθητήρες όπως PM2.5, CO<sub>2</sub> και θερμοκρασία, επιτρέποντας τη μεταγενέστερη στατιστική ανάλυση και την εκπαίδευση προγνωστικών μοντέλων. Στην παρούσα εργασία, η InfluxDB χρησιμοποιείται για την αποθήκευση των μετρήσεων ποιότητας αέρα που συλλέγονται μέσω του Node-RED, παρέχοντας τη βάση για την ανάλυση και τις προβλέψεις που ακολουθούν.

#### **2.4.3 Grafana: Οπτικοποίηση, Ανάλυση και Υποστήριξη Αποφάσεων**

Η Grafana αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο οπτικοποίησης δεδομένων, ευρέως χρησιμοποιούμενο σε συστήματα παρακολούθησης και ανάλυσης IoT. Παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας διαδραστικών dashboards, μέσω των οποίων οι χρήστες μπορούν να παρακολουθούν σε πραγματικό χρόνο κρίσιμες μεταβλητές, να αναλύουν ιστορικά δεδομένα και να εντοπίζουν μοτίβα ή ανωμαλίες [12].

Σε γενικές αρχιτεκτονικές IoT, η Grafana συνδέεται με βάσεις δεδομένων όπως η InfluxDB και αντλεί δεδομένα μέσω ερωτημάτων, τα οποία παρουσιάζονται με τη μορφή γραφημάτων, gauges, θερμικών χαρτών και δεικτών ποιότητας. Η δυνατότητα ορισμού ορίων (thresholds) και ειδοποιήσεων (alerts) καθιστά τη Grafana ιδιαίτερα χρήσιμη για εφαρμογές που απαιτούν άμεση αντίδραση, όπως η παρακολούθηση ποιότητας αέρα σε εσωτερικούς χώρους.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η Grafana χρησιμοποιείται για την οπτικοποίηση των επιπέδων PM και CO<sub>2</sub> σε σχολικό περιβάλλον, καθώς και για την απεικόνιση τάσεων και προγνωστικών αποτελεσμάτων. Με τον τρόπο αυτό, το σύστημα δεν περιορίζεται στην απλή καταγραφή δεδομένων, αλλά υποστηρίζει ενεργά

τη λήψη αποφάσεων, όπως η ανάγκη αερισμού ή κλιματισμού της αίθουσας, ενισχύοντας την πρακτική και εκπαιδευτική του αξία.

## 2.5 Εφαρμογές IoT στην Εκπαίδευση

Η αξιοποίηση τεχνολογιών IoT στην εκπαίδευση τα τελευταία χρόνια έχει οδηγήσει στην εμφάνιση του όρου “έξυπνη τάξη” (smart classroom), όπου το φυσικό περιβάλλον μάθησης εμπλουτίζεται με αισθητήρες, δικτυωμένες συσκευές και συστήματα ανάλυσης δεδομένων, με σκοπό τη βελτίωση τόσο της εκπαιδευτικής διαδικασίας όσο και των συνθηκών διαβίωσης των μαθητών. Οι Zhang et al. επισημαίνουν ότι η σύγχρονη τάξη στις έξυπνες αίθουσες συνδέει αισθητήρες και τεχνητή νοημοσύνη ώστε να διαμορφώνονται “προσαρμοστικά” μαθησιακά περιβάλλοντα, όπου μπορούν να παρακολουθούνται παράγοντες όπως θερμοκρασία, επίπεδα CO<sub>2</sub>, φωτισμός και γενικότερη άνεση [3]. Η παρακολούθηση αυτών των παραμέτρων δεν έχει μόνο διαχειριστικό χαρακτήρα, αλλά μπορεί να αξιοποιηθεί και ως μαθησιακό αντικείμενο, ενισχύοντας τη διερευνητική μάθηση και την κατανόηση εννοιών σχετικών με δεδομένα, δίκτυα και περιβάλλον.

Σε πρακτικό επίπεδο, οι εφαρμογές IoT στην εκπαίδευση συναντώνται σε τρεις βασικούς άξονες. Ο πρώτος αφορά την **υποστήριξη της λειτουργίας της σχολικής μονάδας**, μέσω παρακολούθησης του μικροκλίματος, της ενεργειακής κατανάλωσης και της ασφάλειας. Ο δεύτερος σχετίζεται με την **ενίσχυση της διδασκαλίας** μέσω έξυπνων συσκευών, οπτικοποιήσεων και ψηφιακής ανατροφοδότησης. Ο τρίτος άξονας αφορά τη χρήση του IoT ως **εκπαιδευτικού εργαλείου STEM**, όπου οι μαθητές εμπλέκονται ενεργά στη δημιουργία ενός συστήματος μέτρησης, συλλογής και ανάλυσης δεδομένων (project-based learning). Σε αυτή τη λογική, οι Kaderpurkar et al. παρουσιάζουν προσέγγιση “IoT-based smart classroom” που ευνοεί τη βιωματική μάθηση και τη σύνδεση θεωρίας-πράξης μέσω αισθητήρων και πλακετών μικροελεγκτών [4].

Από την πλευρά της εκπαιδευτικής κοινότητας, οι Aloufi et al. καταγράφουν ότι το IoT στην εκπαίδευση μπορεί να προσφέρει νέες διδακτικές πρακτικές και να ενισχύσει τη συμμετοχή, ωστόσο η επιτυχία του εξαρτάται από την κατάλληλη παιδαγωγική αξιοποίηση, την επιμόρφωση των εκπαιδευτικών και την ύπαρξη αξιόπιστων, προσβάσιμων λύσεων [7]. Στο πλαίσιο αυτό, η ανάπτυξη χαμηλού κόστους IoT

υποδομών για σχολικές αίθουσες αποτελεί πρακτική επιλογή, καθώς επιτρέπει την αναπαραγωγή και επέκταση της λύσης από εκπαιδευτικούς και μαθητές.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η σύνδεση του IoT με την περιβαλλοντική εκπαίδευση, αφού η συλλογή μετρήσεων ποιότητας αέρα ή άλλων περιβαλλοντικών μεταβλητών ενισχύει τη σύνδεση της μάθησης με πραγματικά δεδομένα. Σχετικές εφαρμογές παρακολούθησης IAQ (Indoor Air Quality) σε σχολικές αίθουσες έχουν παρουσιαστεί σε σύγχρονες εργασίες, υποδεικνύοντας ότι η συστηματική καταγραφή CO<sub>2</sub> και PM μπορεί να λειτουργήσει τόσο ως εργαλείο βελτίωσης των συνθηκών όσο και ως βάση για εκπαιδευτικές δραστηριότητες ανάλυσης δεδομένων [5], [6]. Συνεπώς, το IoT στο σχολείο μπορεί να λειτουργήσει παράλληλα ως τεχνολογική υποδομή και ως μαθησιακό πλαίσιο, ενισχύοντας δεξιότητες του 21ου αιώνα όπως η ανάλυση δεδομένων, η υπολογιστική σκέψη και η περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση [3], [7].

## **2.6 Μηχανική Μάθηση & Προγνωστικά Μοντέλα (linear, polynomial regression, time-series)**

Η μηχανική μάθηση (Machine Learning – ML) αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την αξιοποίηση των δεδομένων που παράγονται από IoT συστήματα, καθώς επιτρέπει την εξαγωγή προτύπων (patterns) και την πρόβλεψη μελλοντικών τιμών σε περιβάλλοντα όπου οι μεταβλητές παρουσιάζουν χρονική εξάρτηση. Στο πλαίσιο της παρακολούθησης ποιότητας αέρα, οι χρονοσειρές CO<sub>2</sub> και PM επηρεάζονται από παράγοντες όπως ο αριθμός ατόμων στον χώρο, η διάρκεια μαθήματος, ο αερισμός, η ώρα της ημέρας και οι εξωτερικές συνθήκες. Επομένως, η πρόβλεψη των τιμών αυτών μπορεί να υποστηρίξει προληπτικές ενέργειες (π.χ. ειδοποίηση για αερισμό) πριν η ποιότητα αέρα φθάσει σε ανεπιθύμητα επίπεδα [6].

Στις εφαρμογές σχολικών αιθουσών, οι προσεγγίσεις πρόβλεψης CO<sub>2</sub> και IAQ συνήθως ξεκινούν από απλά μοντέλα και εξελίσσονται ανάλογα με τον όγκο και την ποιότητα των διαθέσιμων δεδομένων. Οι Garcia Pinilla et al. παρουσιάζουν συγκριτική μελέτη στρατηγικών πρόβλεψης CO<sub>2</sub> σε σχολικές αίθουσες, αναδεικνύοντας ότι ακόμη και απλούστερες μεθοδολογίες (στατιστικές και παλινδρομήσεις) μπορούν να προσφέρουν ικανοποιητικές προβλέψεις όταν εφαρμόζονται σωστά, με κατάλληλη προεπεξεργασία δεδομένων και σωστή επιλογή χαρακτηριστικών [6]. Επίσης αντίστοιχα, οι Apostolopoulos και Dourou αναδεικνύουν ότι ο συνδυασμός low-cost αισθητήρων με

Machine Learning μπορεί να αυξήσει την αξιοπιστία των μετρήσεων και να επιτρέψει λειτουργικές προβλέψεις IAQ (Indoor Air Quality) σε πραγματικό σχολικό περιβάλλον [5].

Στην παρούσα εργασία, οι βασικές τεχνικές που εξετάζονται περιλαμβάνουν τη **γραμμική παλινδρόμηση (linear regression)** και την **πολυνυμική παλινδρόμηση (polynomial regression)**. Η γραμμική παλινδρόμηση χρησιμοποιείται όταν υπάρχει περίπου γραμμική σχέση μεταξύ εισόδων (π.χ. ιστορικές τιμές CO<sub>2</sub>, ώρα, ρυθμός αύξησης) και εξόδου (μελλοντική τιμή CO<sub>2</sub>). Η πολυνυμική παλινδρόμηση επεκτείνει το μοντέλο εισάγοντας μη γραμμικότητα, κάτι που μπορεί να είναι χρήσιμο όταν οι μεταβολές της ποιότητας αέρα δεν είναι γραμμικές (π.χ. απότομη αύξηση CO<sub>2</sub> όταν κλείνουν παράθυρα) [6]. Παράλληλα, εξετάζονται απλές προσεγγίσεις χρονοσειρών (time-series), όπως κινούμενοι μέσοι όροι (moving averages) και μέθοδοι εξομάλυνσης για πρόβλεψη τάσεων σε μικρούς χρονικούς ορίζοντες, ιδιαίτερα όταν δεν υπάρχει μεγάλο ιστορικό για εκπαίδευση σύνθετων μοντέλων [12].

Η εφαρμογή προγνωστικών μοντέλων προϋποθέτει διαδικασίες προετοιμασίας δεδομένων: καθαρισμό, απομάκρυνση ακραίων τιμών, χρονική ευθυγράμμιση (time alignment) και επιλογή χαρακτηριστικών (features). Σε περιβάλλον IoT, η ύπαρξη βάσης δεδομένων χρονοσειρών διευκολύνει τη δημιουργία training datasets, καθώς παρέχει συγκροτημένες σειρές δεδομένων με timestamps, επιτρέποντας την εξαγωγή παραθύρων (windows) για εκπαίδευση και αξιολόγηση μοντέλων [12]. Τέλος, η αξιολόγηση των προγνωστικών μοντέλων πραγματοποιείται μέσω μετρικών όπως MAE (Mean Absolute Error), RMSE (Root Mean Squared Error) και R<sup>2</sup>, ώστε να τεκμηριωθεί η χρησιμότητα και η ακρίβεια των προβλέψεων σε πραγματικές συνθήκες σχολικής αίθουσας [6].

## 2.7 Ερευνητικές εργασίες & αναφορές

Η βιβλιογραφία που στηριζόμαστε καταδεικνύει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον για την παρακολούθηση της ποιότητας αέρα σε σχολικά περιβάλλοντα με χρήση IoT και τεχνικών μηχανικής μάθησης. Οι Apostolopoulos και Donrou παρουσίασαν ένα low-cost σύστημα παρακολούθησης IAQ (Indoor Air Quality) σε τάξη και ανέδειξαν τη σημασία της συνδυαστικής προσέγγισης αισθητήρων και ML για αύξηση αξιοπιστίας και πρόβλεψη περιβαλλοντικών συνθηκών [5]. Παράλληλα, οι Garcia Pinilla et al.

διερεύνησαν πολλαπλές στρατηγικές πρόβλεψης CO<sub>2</sub> σε σχολικές αίθουσες και κατέληξαν ότι οι προβλέψεις μπορούν να υποστηρίξουν αποτελεσματικές πρακτικές αερισμού, υπό την προϋπόθεση σωστής μοντελοποίησης και διαχείρισης δεδομένων [6].

Σε επίπεδο αρχιτεκτονικής, οι Mota et al. προτείνουν IoT υποδομή παρακολούθησης IAQ με αποθήκευση δεδομένων και συνεχή συλλογή μετρήσεων, υποδεικνύοντας ότι η επιλογή της αρχιτεκτονικής (middleware + time-series storage + dashboards) αποτελεί καθοριστικό παράγοντα επιτυχίας σε συστήματα συνεχούς λειτουργίας [12]. Επιπλέον, οι Berkani et al. τονίζουν τη σημασία των edge-deployable προσεγγίσεων, όπου μέρος της επεξεργασίας γίνεται κοντά στις συσκευές, μειώνοντας καθυστερήσεις και επιτρέποντας ταχύτερη λήψη αποφάσεων [13].

Στο εκπαιδευτικό πλαίσιο, οι Zhang et al. αναδεικνύουν τη σύγκλιση αισθητήρων και AI ως παράγοντα μετασχηματισμού των έξυπνων τάξεων, υποστηρίζοντας ότι τα δεδομένα μπορούν να αξιοποιηθούν όχι μόνο τεχνικά αλλά και παιδαγωγικά, ενισχύοντας εξατομικευμένες και διαδραστικές μορφές μάθησης [3]. Οι Kaderurkar et al. και Burunkaya & Duraklar υπογραμμίζουν ότι χαμηλού κόστους IoT υλοποιήσεις είναι πιο εύκολα αναπαραγώγιμες σε σχολεία και μπορούν να υποστηρίξουν project-based learning και STEM δραστηριότητες [4], [8]. Από την πλευρά των εκπαιδευτικών, οι Aloufi et al. επισημαίνουν ότι η επιτυχής ενσωμάτωση του IoT στο σχολείο απαιτεί έμφαση όχι μόνο στο τεχνικό κομμάτι αλλά και στη χρηστικότητα, την επιμόρφωση και την πρακτική αξία του συστήματος [7].

Με βάση την παραπάνω βιβλιογραφία, παρατηρείται ότι παρότι υπάρχουν εργασίες που εστιάζουν είτε (α) στην παρακολούθηση IAQ είτε (β) στις προβλέψεις CO<sub>2</sub>, συχνά απουσιάζει μία ολοκληρωμένη προσέγγιση που να συνδυάζει: χαμηλού κόστους αισθητήρες, ολοκληρωμένη IoT αρχιτεκτονική (middleware + time-series DB + dashboards), και προγνωστικά μοντέλα σε πραγματικό σχολικό πλαίσιο, με σαφή εκπαιδευτικό προσανατολισμό. Η παρούσα εργασία επιχειρεί να καλύψει αυτό το κενό, σχεδιάζοντας και υλοποιώντας ένα ολοκληρωμένο σύστημα που όχι μόνο παρακολουθεί, αλλά και προβλέπει περιβαλλοντικές συνθήκες, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να αξιοποιηθεί ως εκπαιδευτικό εργαλείο σε δραστηριότητες ανάλυσης δεδομένων και περιβαλλοντικής ευαισθητοποίησης [3], [5], [6], [7], [12], [13].

## 3. Μεθοδολογία και Σχεδιασμός Συστήματος

### 3.1 Περιγραφή της γενικής αρχιτεκτονικής

Το προτεινόμενο σύστημα σχεδιάστηκε ως ένα ολοκληρωμένο ενσωματωμένο σύστημα IoT για την παρακολούθηση και πρόβλεψη περιβαλλοντικών συνθηκών σε σχολικό περιβάλλον, με έμφαση στην ποιότητα εσωτερικού αέρα (Indoor Air Quality – IAQ). Η αρχιτεκτονική του ακολουθεί τη διαστρωματωμένη προσέγγιση που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2, ενσωματώνοντας στοιχεία συλλογής δεδομένων, επικοινωνίας, αποθήκευσης, ανάλυσης και οπτικοποίησης.

Στο χαμηλότερο επίπεδο της αρχιτεκτονικής βρίσκονται οι αισθητήρες περιβαλλοντικών παραμέτρων, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τη συνεχή καταγραφή δεδομένων ποιότητας αέρα. Οι αισθητήρες αυτοί συνδέονται σε μικροελεγκτή τύπου Wemos D1 R2 (ESP8266) ή εναλλακτικά Arduino UNO R4 με δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας, ο οποίος αναλαμβάνει τη συλλογή, την αρχική επεξεργασία και την αποστολή των δεδομένων. Ο μικροελεγκτής λειτουργεί ως κόμβος edge συσκευής, υλοποιώντας βασικές λειτουργίες ανάγνωσης αισθητήρων και διαχείρισης επικοινωνίας.

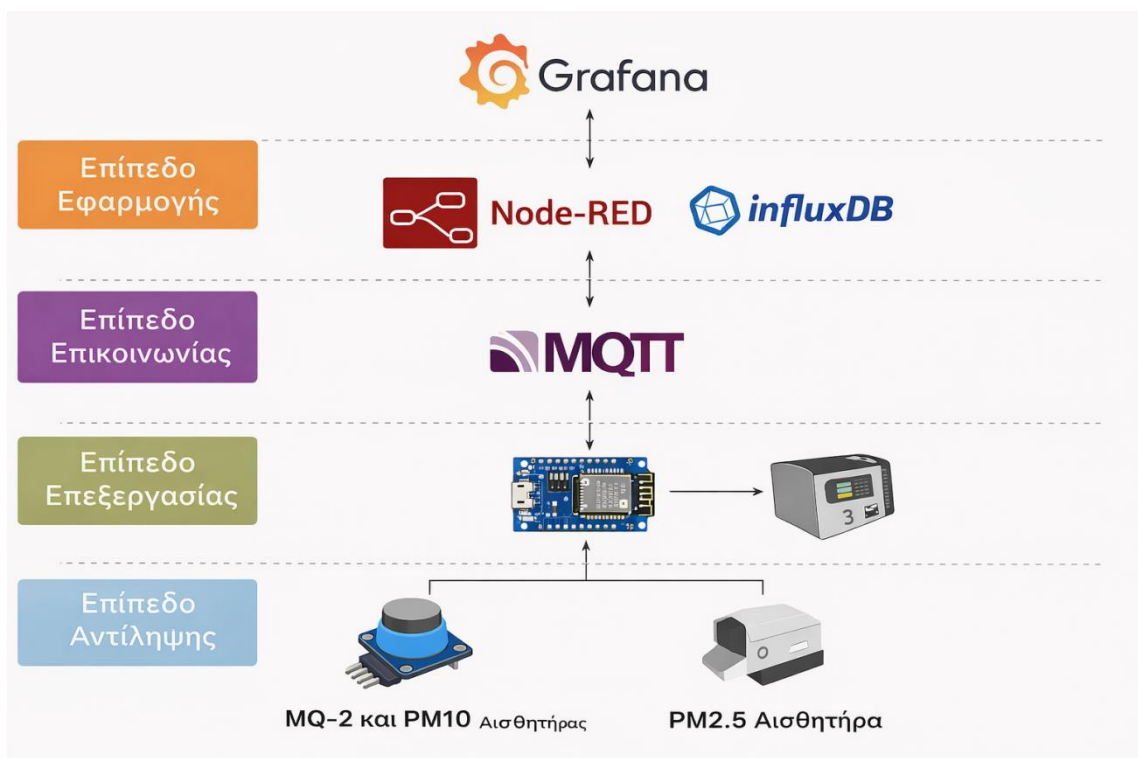
Η μετάδοση των δεδομένων πραγματοποιείται ασύρματα μέσω δικτύου Wi-Fi, αξιοποιώντας ελαφριά πρωτόκολλα επικοινωνίας κατάλληλα για IoT εφαρμογές. Τα δεδομένα αποστέλλονται σε κεντρικό σύστημα επεξεργασίας, όπου το Node-RED λειτουργεί ως middleware, αναλαμβάνοντας τη λήψη, τον μετασχηματισμό και τη δρομολόγηση των μετρήσεων. Το Node-RED επιτρέπει την υλοποίηση ροών επεξεργασίας σε πραγματικό χρόνο, καθώς και την ενεργοποίηση αυτοματισμών και ειδοποιήσεων.

Για την αποθήκευση των δεδομένων χρησιμοποιείται βάση δεδομένων χρονοσειρών InfluxDB, η οποία είναι κατάλληλη για τη διαχείριση συνεχών μετρήσεων με χρονικές σφραγίδες. Η επιλογή time-series βάσης επιτρέπει την αποδοτική αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων και τη μεταγενέστερη στατιστική ανάλυση και εκπαίδευση προγνωστικών μοντέλων. Τα αποθηκευμένα δεδομένα αξιοποιούνται τόσο για ιστορική

ανάλυση όσο και για την ανάπτυξη μοντέλων μηχανικής μάθησης με στόχο την πρόβλεψη μελλοντικών επιπέδων ποιότητας αέρα.

Στο ανώτερο επίπεδο της αρχιτεκτονικής, η πλατφόρμα Grafana χρησιμοποιείται για την οπτικοποίηση των δεδομένων και την υποστήριξη λήψης αποφάσεων. Μέσω διαδραστικών dashboards, οι χρήστες μπορούν να παρακολουθούν σε πραγματικό χρόνο τις μετρήσεις PM και GAS, να αναλύουν τάσεις και να λαμβάνουν ειδοποιήσεις σε περιπτώσεις υπέρβασης προκαθορισμένων ορίων. Η συνολική αρχιτεκτονική όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1 επιτρέπει την επεκτασιμότητα του συστήματος, καθώς μπορούν να προστεθούν επιπλέον αισθητήρες, μοντέλα ανάλυσης ή λειτουργίες αυτοματισμού χωρίς σημαντικές αλλαγές στη βασική δομή.

Η σχεδίαση αυτή καθιστά το σύστημα κατάλληλο τόσο για λειτουργική χρήση σε σχολική αίθουσα όσο και για εκπαιδευτικούς σκοπούς, καθώς επιτρέπει στους μαθητές και εκπαιδευτικούς να κατανοήσουν τη ροή δεδομένων από τον φυσικό κόσμο έως την ανάλυση και την οπτικοποίησή τους σε ψηφιακές πλατφόρμες.



Εικόνα 1: Αρχιτεκτονική IoT συστήματος 4<sup>ων</sup> επιπέδων

## 3.2 Υλικό Hardware

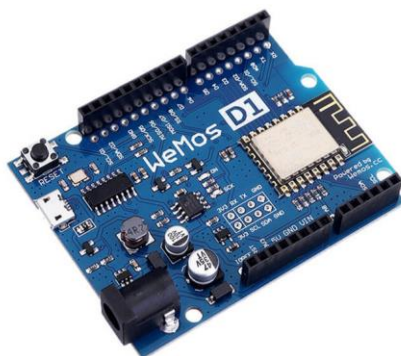
Το παρόν κεφάλαιο περιγράφει το υλικό (hardware) που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του προτεινόμενου ενσωματωμένου συστήματος IoT. Η επιλογή των επιμέρους εξαρτημάτων πραγματοποιήθηκε με κριτήρια τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, το χαμηλό κόστος, την ευκολία διασύνδεσης, καθώς και τη δυνατότητα αξιοποίησης του συστήματος τόσο σε πραγματικές συνθήκες σχολικής αίθουσας όσο και σε εκπαιδευτικά σενάρια. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη συμβατότητα των συσκευών με ανοιχτές πλατφόρμες ανάπτυξης και στη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης και επέκτασης του συστήματος.

### 3.2.1 Wemos D1 R2 (ESP8266)

Ως κεντρική μονάδα ελέγχου και συλλογής δεδομένων του συστήματος επιλέχθηκε ο μικροελεγκτής Wemos D1 R2, ο οποίος βασίζεται στο ολοκληρωμένο κύκλωμα ESP8266. Ο συγκεκριμένος μικροελεγκτής ενσωματώνει δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας μέσω Wi-Fi, γεγονός που τον καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογές Internet of Things.

Ο Wemos D1 R2 λειτουργεί ως edge device, αναλαμβάνοντας την ανάγνωση των δεδομένων από τους αισθητήρες ποιότητας αέρα, την αρχική τους επεξεργασία και την αποστολή τους προς το κεντρικό σύστημα επεξεργασίας. Υποστηρίζεται πλήρως από το περιβάλλον ανάπτυξης Arduino IDE και διαθέτει εκτενή τεκμηρίωση και κοινότητα χρηστών, γεγονός που διευκολύνει την ανάπτυξη και την εκπαιδευτική αξιοποίησή του [9], [11].

Η επιλογή του συγκεκριμένου μικροελεγκτή ευθυγραμμίζεται με σύγχρονες αρχιτεκτονικές IoT που βασίζονται σε χαμηλού κόστους COTS συσκευές, επιτρέποντας την ανάπτυξη αξιόπιστων και επεκτάσιμων συστημάτων παρακολούθησης περιβάλλοντος [1], [10].



Εικόνα 2: Μικροελεγκτής Wemos D1 R2

### 3.2.2 Αισθητήρες PMS5003, MQ-2 ANALOG GAS

Για την έξυπνη παρακολούθηση της ποιότητας εσωτερικού αέρα (Intelligent Indoor Air Quality – IIAQ) χρησιμοποιήθηκαν δύο αισθητήρες, οι οποίοι καλύπτουν συμπληρωματικές παραμέτρους ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Ο αισθητήρας **PMS5003** χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων (PM1.0, PM2.5 και PM10). Τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους δείκτες ποιότητας αέρα, καθώς σχετίζονται άμεσα με επιπτώσεις στην υγεία και τη γνωστική απόδοση, ιδιαίτερα σε κλειστούς χώρους όπως οι σχολικές αίθουσες [5], [12], [13]. Ο PMS5003 προσφέρει ικανοποιητική ακρίβεια για εκπαιδευτικές και ερευνητικές εφαρμογές και χρησιμοποιείται ευρέως στη διεθνή βιβλιογραφία.



Εικόνα 3: Αισθητήρας PMS5003

Ο αισθητήρας **MQ-2 Analog Gas** ανήκει στην οικογένεια των αισθητήρων μεταλλικού οξειδίου (Metal Oxide Semiconductor - MOS) και χρησιμοποιείται για την ανίχνευση ευρείας γκάμας αερίων στο περιβάλλον. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, ο MQ-2 επιλέχθηκε για την παρακολούθηση της γενικής ποιότητας του αέρα και την ανίχνευση πτητικών ουσιών, υγραερίου και καπνού εντός της σχολικής αίθουσας. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας διαθέτει ένα εσωτερικό θερμαντικό στοιχείο που προθερμαίνει ένα ευαίσθητο στρώμα διοξειδίου του κασσιτέρου ( $\text{SnO}_2$ ). Όταν ο αισθητήρας έρχεται σε επαφή με ρύπους ή εύφλεκτα αέρια, η ηλεκτρική του αγωγιμότητα μεταβάλλεται ανάλογα με τη συγκέντρωση του αερίου. Τα κύρια χαρακτηριστικά που τον καθιστούν κατάλληλο για την εφαρμογή είναι:

- **Εύρος Ανίχνευσης:** Είναι ευαίσθητος σε LPG υγραέριο, προπάνιο, υδρογόνο, μεθάνιο και καπνό.
- **Τύπος Εξόδου:** Παρέχει μια αναλογική τάση εξόδου, η οποία είναι άμεσα ανάλογη με τη συγκέντρωση των αερίων.
- **Αξιοπιστία:** Διαθέτει μεγάλη διάρκεια ζωής και χαμηλό κόστος, γεγονός που συνάδει με τη φιλοσοφία χρήσης COTS υλικού [10].



➤ **Εικόνα 4: Αισθητήρας MQ-2 Analog Gas**

### 3.2.3 OLED Display

Για την τοπική απεικόνιση των μετρήσεων επιλέχθηκε μια οθόνη OLED 0.91 ιντσών (128 x 32), η οποία συνδέεται απευθείας στον μικροελεγκτή. Η οθόνη επιτρέπει την άμεση προβολή βασικών τιμών, όπως συγκεντρώσεις PM και  $\text{CO}_2$ , χωρίς την ανάγκη πρόσβασης σε εξωτερική πλατφόρμα οπτικοποίησης.

Η χρήση οθόνης OLED ενισχύει τη λειτουργικότητα του συστήματος σε εκπαιδευτικά περιβάλλοντα, καθώς επιτρέπει την άμεση παρατήρηση των μετρήσεων από μαθητές και εκπαιδευτικούς κατά τη διάρκεια πειραμάτων ή δραστηριοτήτων. Παράλληλα,

λειτουργεί ως εφεδρικός μηχανισμός απεικόνισης σε περίπτωση απώλειας δικτυακής σύνδεσης.



Εικόνα 5: OLED οθόνη

### 3.3 Σύνδεση Υλικού - καλωδιώσεις

Το παρόν κεφάλαιο περιγράφει τη συνδεσμολογία του προτεινόμενου συστήματος IoT, παρουσιάζοντας τον τρόπο με τον οποίο οι επιλεγμένοι αισθητήρες και η οθόνη OLED διασυνδέονται με τον μικροελεγκτή Wemos D1 R2 (ESP8266). Η σωστή καλωδίωση αποτελεί κρίσιμο στάδιο για την αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος, καθώς επηρεάζει τόσο την ακρίβεια των μετρήσεων όσο και τη σταθερότητα της επικοινωνίας μεταξύ των επιμέρους υποσυστημάτων.

Η υλοποίηση πραγματοποιήθηκε με χρήση breadboard και καλωδίων τύπου jumper, ώστε το σύστημα να είναι εύκολα επανασυνδέσιμο, επεκτάσιμο και κατάλληλο για εκπαιδευτική χρήση.

Κατά τη σύνδεση των επιμέρους εξαρτημάτων, κάποια από τα εξαρτήματα τροφοδοτούνται με τάση **3.3V**, κάποια με 5v, συμβατά με τα επίπεδα λειτουργίας του ESP8266. Όλες οι γειώσεις (GND) συνδέονται σε κοινό σημείο, εξασφαλίζοντας κοινή αναφορά τάσης.

#### 3.3.1 Σύνδεση Αισθητήρα PMS5003 (PM2.5 / PM10)

Ο αισθητήρας **PMS5003** επικοινωνεί με τον μικροελεγκτή μέσω **σειριακής επικοινωνίας UART**. Ο αισθητήρας διαθέτει ενσωματωμένο σύστημα μέτρησης και αποστέλλει πακέτα δεδομένων σε προκαθορισμένη μορφή.

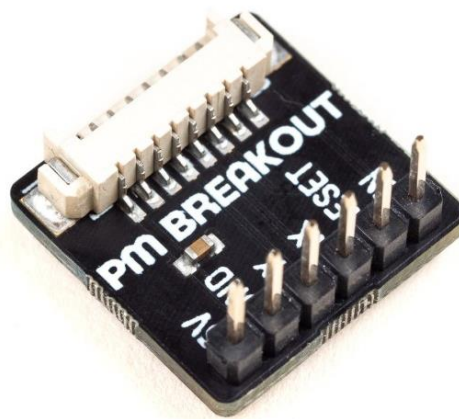
Η σύνδεση πραγματοποιείται ως εξής:

- **VCC** του PMS5003 → **5.0V** του Wemos απευθείας
- **GND** του PMS5003 → **GND** του Wemos μέσω breadboard

- **TX** του PMS5003 breakout (κίτρινο)→ ψηφιακή είσοδος (RX) (MISO/D6) / GPIO12 του Wemos
- **RX** του PMS5003 breakout (πορτοκαλί)→ ψηφιακή έξοδος (TX) (SCK/D5) /GPIO14 του Wemos

Για την αποφυγή συγκρούσεων με τη σειριακή θύρα προγραμματισμού, χρησιμοποιούνται εναλλακτικά ψηφιακά pins και βιβλιοθήκη software serial, όπου απαιτείται. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται η ομαλή λήψη των δεδομένων αιωρούμενων σωματιδίων σε πραγματικό χρόνο. Έτσι Τα pins D5 (GPIO14) και D6 (GPIO12) του Wemos D1 R2 χρησιμοποιήθηκαν για σειριακή επικοινωνία UART με τον αισθητήρα PMS5003 μέσω SoftwareSerial. Παρότι τα pins αυτά φέρουν εναλλακτικές ενδείξεις SPI (SCK, MISO), χρησιμοποιήθηκαν ως γενικής χρήσης GPIO, καθώς το πρωτόκολλο SPI δεν ενεργοποιήθηκε στο σύστημα.

Εδώ θα πρέπει να τονίσουμε ότι ο PMS5003 ΔΕΝ είναι breadboard module. Οι ακροδέκτες του ΔΕΝ είναι pin headers. Είναι υποδοχή JST (μικρού βήματος). Γι' αυτό τα κλασικά jumper (male) δεν χωρούσαν. Έτσι πήραμε ένα μικρό **PMS5003 adapter board** που δέχεται το JST βύσμα του PMS5003 και βγάζει **pins 2.54mm** ώστε να μπαίνει σε breadboard.



Εικόνα 6: PMS Adapter board

### 3.3.2 Σύνδεση MQ-2 Analog Gas

Αποφασίσαμε να προσθέσουμε τον MQ-2 αναλογικό αισθητήρα όπου μετράει τη συγκέντρωση αερίων σε μεταβαλλόμενη τάση (0-3.3V ή 0-5V). Η σύνδεση του αισθητήρα MQ-2 με τον μικροελεγκτή Wemos D1 R2 παρουσιάζει ιδιαιτερότητες σε

σχέση με τους ψηφιακούς αισθητήρες, καθώς απαιτεί τη χρήση του Αναλογικού Μετατροπέα (Analog-to-Digital Converter - ADC). Για την σύνδεση χρησιμοποιήσαμε την ακίδα A0 του Wemos D1 R2, η οποία είναι η μοναδική αναλογική είσοδος του μικροελεγκτή.

- **VCC** → **5V** του Wemos
- **GND** → **GND** του Wemos
- **ANALOG OUT** → **A0** του Wemos

Δεδομένου ότι ο ESP8266 λειτουργεί εσωτερικά στα 3.3V, η χρήση του Wemos D1 R2 προσφέρει το πλεονέκτημα ενός ενσωματωμένου διαιρέτη τάσης στην ακίδα A0, επιτρέποντας την ασφαλή ανάγνωση των τιμών από τον αισθητήρα MQ-2. Κατά την υλοποίηση, κρίθηκε απαραίτητο να προηγηθεί μια περίοδος «προθέρμανσης» (warm-up phase) του αισθητήρα πριν τη λήψη των μετρήσεων, ώστε να σταθεροποιηθεί η χημική αντίδραση στο εσωτερικό του στοιχείου ανίχνευσης.

### 3.3.3 Σύνδεση οθόνης OLED

Η οθόνη **OLED** συνδέεται επίσης μέσω πρωτοκόλλου **I<sup>2</sup>C**, επιτρέποντας την κοινή χρήση του διαύλου με τον αισθητήρα SGP30.

Η σύνδεση πραγματοποιείται ως εξής:

- **VCC** της OLED → **3.3V** μέσω breadboard
- **GND** της OLED → **GND** μέσω breadboard
- **SDA** της OLED → **SDA/D2/GPIO4** του Wemos
- **SCL** της OLED → **SCL/D1/GPIO5** του Wemos

Η χρήση **I<sup>2</sup>C** για την οθόνη μειώνει τον αριθμό των απαιτούμενων pins και διευκολύνει την επέκταση του συστήματος με επιπλέον συσκευές. Η OLED χρησιμοποιείται για την τοπική απεικόνιση βασικών μετρήσεων, προσφέροντας άμεση ανατροφοδότηση στον χρήστη.

Η τελική λογική αρχιτεκτονικής του ενσωματωμένου συστήματος αποτελείται από τον μικροελεγκτή Wemos D1 R2, ο οποίος συλλέγει δεδομένα ποιότητας αέρα μέσω αισθητήρων PMS5003 (UART) και MQ-2 Gas, ενώ η τοπική απεικόνιση υλοποιείται μέσω OLED οθόνης στο ίδιο **I<sup>2</sup>C** bus. Όλα τα υποσυστήματα τροφοδοτούνται στα 5V



Παρακάτω παραθέτουμε τρεις πίνακες όπου εξηγούμε αναλυτικά τις συνδέσεις των αισθητήρων και της οθόνης OLED:

**Πίνακας 1: Σύνδεση PMS5003 – Αισθητήρας Αιωρούμενων Σωματιδίων (PM1.0 / PM2.5 / PM10)**

Λειτουργία	PMS5003 Pin	Χρώμα Jumper	Breadboard	Wemos Pin	Παρατήρηση
<b>Τροφοδοσία</b>	VCC	Κόκκινο	+ rail	3V3	Σταθερή τροφοδοσία
<b>Γείωση</b>	GND	Μαύρο	- rail	GND	Κοινή γείωση
<b>Δεδομένα (TX)</b>	TX	Κίτρινο	row	D6 (GPIO12)	UART → SoftwareSerial
<b>Δεδομένα (RX)</b>	RX	Πορτοκαλί	row	D5 (GPIO14)	UART → SoftwareSerial

**Πίνακας 2: MQ-2 Analog Gas**

Λειτουργία	MQ-2 Pin	Χρώμα Καλωδίου	Wemos Pin	Παρατήρηση
Τροφοδοσία	VCC	<b>Κόκκινο</b>	<b>5V</b>	Απαραίτητο για τη θέρμανση.
Γείωση	GND	<b>Μαύρο</b>	<b>GND</b>	Κοινή γείωση συστήματος.
Δεδομένα	AO	<b>Μπλε</b>	<b>A0</b>	Αναλογική είσοδος (ADC).

**Πίνακας 3: Σύνδεση OLED 0.91" 128×32 – Τοπική Οπτικοποίηση (I<sup>2</sup>C)**

Λειτουργία	OLED Pin	Χρώμα Jumper	Breadboard	Wemos Pin	Παρατήρηση
<b>Τροφοδοσία</b>	VCC	Κόκκινο	+ rail	3V3	Κοινή τροφοδοσία
<b>Γείωση</b>	GND	Μαύρο	- rail	GND	Κοινή γείωση
<b>Δεδομένα</b>	SDA	Πράσινο	row	D2 (GPIO4)	Κοινό I <sup>2</sup> C
<b>Ρολόι</b>	SCL	Μπλε	row	D1 (GPIO5)	Κοινό I <sup>2</sup> C

### 3.4 Λογισμικό Software

Το λογισμικό του προτεινόμενου ενσωματωμένου συστήματος IoT σχεδιάστηκε ως μια ολοκληρωμένη «αλυσίδα» από υποσυστήματα, τα οποία συνεργάζονται για να επιτευχθεί η συλλογή, η μεταφορά, η επεξεργασία, η αποθήκευση και η οπτικοποίηση των έξυπνων μετρήσεων ποιότητας αέρα (IIAQ). Η συνολική λογική υλοποίησης ακολουθεί τη ροή δεδομένων από το edge επίπεδο (μικροελεγκτής/αισθητήρες) προς το middleware και το επίπεδο υποδομής (Node-RED, InfluxDB) και τέλος προς το επίπεδο εφαρμογής (Grafana), όπου τα δεδομένα γίνονται διαθέσιμα στον τελικό χρήστη σε μορφή γραφημάτων και ειδοποιήσεων.

Στην παρούσα εργασία, το λογισμικό του συστήματος αποτελείται από τέσσερα βασικά τμήματα:

- το firmware του μικροελεγκτή που αναπτύσσεται στο Arduino IDE,
- τον μηχανισμό ανταλλαγής μηνυμάτων (MQTT) και το εργαλείο ελέγχου/δοκιμών MQTTX
- το Node-RED ως middleware συλλογής και δρομολόγησης δεδομένων
- την υποδομή αποθήκευσης (InfluxDB) και οπτικοποίησης/alerts (Grafana).

Η σύνθεση αυτή επιλέχθηκε επειδή είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη σε IoT εφαρμογές, είναι επεκτάσιμη και επιτρέπει τόσο λειτουργική αξιοποίηση σε πραγματικές συνθήκες σχολικής αίθουσας όσο και παιδαγωγική αξιοποίηση μέσω δραστηριοτήτων που σχετίζονται με αισθητήρες, δικτυακά πρωτόκολλα και ανάλυση δεδομένων.

### 3.4.1 Arduino IDE

Στο πρώτο επίπεδο, ο μικροελεγκτής Wemos D1 R2 λειτουργεί ως κόμβος edge. Το λογισμικό ελέγχου του μικροελεγκτή που αναπτύσσεται στο Arduino IDE εκτελεί τις παρακάτω βασικές λειτουργίες:

- Αρχικοποίηση αισθητήρων (PMS5003 μέσω UART, MQ-2 Analog GAS και ανάκτηση μετρήσεων σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα.
- Προεπεξεργασία των τιμών, όπως έλεγχος εγκυρότητας (π.χ. αποφυγή μηδενικών ή μη διαθέσιμων τιμών) και μορφοποίηση.
- Δημιουργία payload σε δομή JSON (ή ισοδύναμη μορφή), ώστε οι τιμές να αποστέλλονται οργανωμένα.
- Ασύρματη σύνδεση στο Wi-Fi του σχολείου/χώρου υλοποίησης.
- Δημοσίευση (publish) των μετρήσεων μέσω MQTT προς έναν MQTT broker.

Με αυτό τον τρόπο, ο μικροελεγκτής δεν περιορίζεται μόνο στη συλλογή αισθητήρων, αλλά λειτουργεί ως πραγματικός IoT κόμβος που στέλνει δεδομένα προς τα ανώτερα επίπεδα.

Το πρωτόκολλο MQTT ακολουθεί τη λογική publish/subscribe, όπου οι συσκευές (publishers) δημοσιεύουν δεδομένα σε συγκεκριμένα “topics” και οι εφαρμογές (subscribers) λαμβάνουν τα δεδομένα όταν είναι εγγεγραμμένες στα αντίστοιχα topics.

Στο προτεινόμενο σύστημα ο Wemos λειτουργεί ως publisher και στέλνει τις μετρήσεις, το Node-RED λειτουργεί ως subscriber (και μπορεί επίσης να λειτουργεί ως publisher για alerts), το MQTTX χρησιμοποιείται ως εργαλείο επιβεβαίωσης/δοκιμής, ώστε να είναι δυνατή η παρακολούθηση των μηνυμάτων και η αποσφαλμάτωση πριν τη μόνιμη ενσωμάτωση με Node-RED και InfluxDB.

Εγκαταστήσαμε τις κατάλληλες βιβλιοθήκες στο Arduino IDE, υλοποιήσαμε την συνδεσμολογία του ενσωματωμένου συστήματος στο κεφάλαιο 3, τρέξαμε τον παρακάτω κώδικα στο Arduino IDE και είδαμε στο Serial Monitor τις απαραίτητες μετρήσεις.

Παρακάτω παραθέτουμε τον πλήρη κώδικα στο Arduino IDE με τους PMS5003, MQ-2 Analog GAS και OLED (**sketch\_jan16c**). :

```
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>

// --- Ρυθμίσεις WiFi & MQTT ---
const char* ssid = "TCL 50 5G";
const char* password = "12345678e";
const char* mqtt_server = "10.104.130.120";

WiFiClient espClient;
PubSubClient client(espClient);

// --- Ρυθμίσεις OLED ---
#define SCREEN_WIDTH 128
#define SCREEN_HEIGHT 64
Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire, -1);

// --- Ρυθμίσεις PMS5003 ---
SoftwareSerial pmsSerial(D5, D6);

struct pmsData {
    uint16_t pm10, pm25, pm100;
};
pmsData measurements;

// --- Ρυθμίσεις MQ-2 & Χρονισμού ---
const int mq2Pin = A0;
const int MQ2_THRESHOLD = 400;
const int PM25_THRESHOLD = 6;

unsigned long previousMillis = 0;
const long interval = 3000;
int displayPage = 0;

//---ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ
void setup_wifi() {
```

```

delay(10);
Serial.println();
Serial.print("Connecting to "); Serial.println(ssid);
WiFi.begin(ssid, password);
while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
  delay(500); Serial.print(".");
}
Serial.println("\nWiFi connected");
}

void reconnect() {
  while (!client.connected()) {
    Serial.print("Attempting MQTT connection...");
    if (client.connect("WemosAirQualityClient")) {
      Serial.println("connected");
    } else {
      Serial.print("failed, rc="); Serial.print(client.state());
      Serial.println(" try again in 5 seconds");
      delay(5000);
    }
  }
}

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  pmsSerial.begin(9600);
  setup_wifi();
  client.setServer(mqtt_server, 1883);

  if(!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C)) {
    Serial.println(F("SSD1306 allocation failed"));
    for(;;);
  }
  display.clearDisplay();
  display.setTextColor(WHITE);
  Serial.println("--- Σύστημα Μέτρησης Ποιότητας Αέρα ---");
}

void loop() {
  if (!client.connected()) { reconnect(); }
  client.loop();

  // ΑΝΑΓΝΩΣΗ MQ-2
  int mq2Value = analogRead(mq2Pin);
  float mq2Percentage = (mq2Value / 1024.0) * 100.0;

  //ΑΝΑΓΝΩΣΗ PMS5003
  if (readPMS(&pmsSerial)) {
    // 1. Serial Monitor
    Serial.println("=====");
    Serial.print("PM 1.0: "); Serial.print(measurements.pm10); Serial.println(" ug/m3");
    Serial.print("PM 2.5: "); Serial.print(measurements.pm25); Serial.println(" ug/m3");
    Serial.print("PM 10 : "); Serial.print(measurements.pm100); Serial.println(" ug/m3");
    Serial.print("MQ-2 Raw: "); Serial.print(mq2Value);
    Serial.print(" | MQ-2 Percentage: "); Serial.print(mq2Percentage);
    Serial.println("%");

    // 2. ΑΠΟΣΤΟΛΗ ΣΤΟ MQTT Publish (Βασικές τιμές)
    client.publish("school/iaq/pm25", String(measurements.pm25).c_str());
    client.publish("school/iaq/pm10", String(measurements.pm100).c_str());
  }
}

```

```

client.publish("school/iaq/gas", String(mq2Value).c_str());

// 3. Λογική Alerts με τα μηνύματα 1 και 2 (Μόνο αν υπάρχει υπέρβαση)
if (measurements.pm25 > PM25_THRESHOLD) {
  Serial.println("☹ Alert: Υψηλά σωματίδια PM 2.5!");
  client.publish("school/iaq/alert", "1");
}

if (mq2Value > MQ2_THRESHOLD) {
  Serial.println("Alert: Ανιχνεύθηκε καπνός ή αέριο!");
  client.publish("school/iaq/alert", "2");
}
}

// 4. ΔΙΑΧΕΙΡΗΣΗ ΟΘΟΝΗΣ OLED Display
unsigned long currentMillis = millis();
if (currentMillis - previousMillis >= interval) {
  previousMillis = currentMillis;
  displayPage = (displayPage + 1) % 2;
}

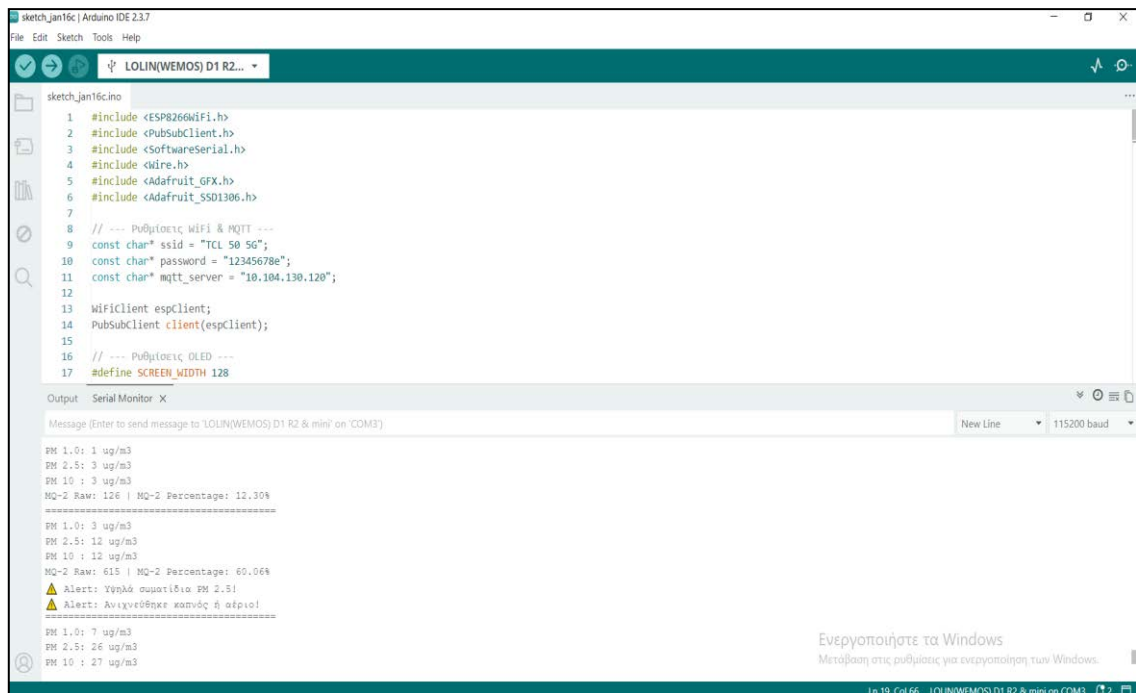
display.clearDisplay();
display.setCursor(0, 0);
if (displayPage == 0) {
  display.setTextSize(1); display.println("PARTICULATE MATTER");
  display.setTextSize(2); display.setCursor(0, 20);
  display.print("PM2.5:"); display.println(measurements.pm25);
  display.print("PM10 :"); display.println(measurements.pm100);
} else {
  display.setTextSize(1); display.println("GAS SENSOR MQ-2");
  display.setTextSize(2); display.setCursor(0, 25);
  display.print("MQ-2 RAW: "); display.println(mq2Value);
  if (mq2Value > MQ2_THRESHOLD) {
    display.setTextSize(1); display.setCursor(0, 50);
    display.print("!!! ALERT: GAS !!!");
  }
}
display.display();

delay(100);
}

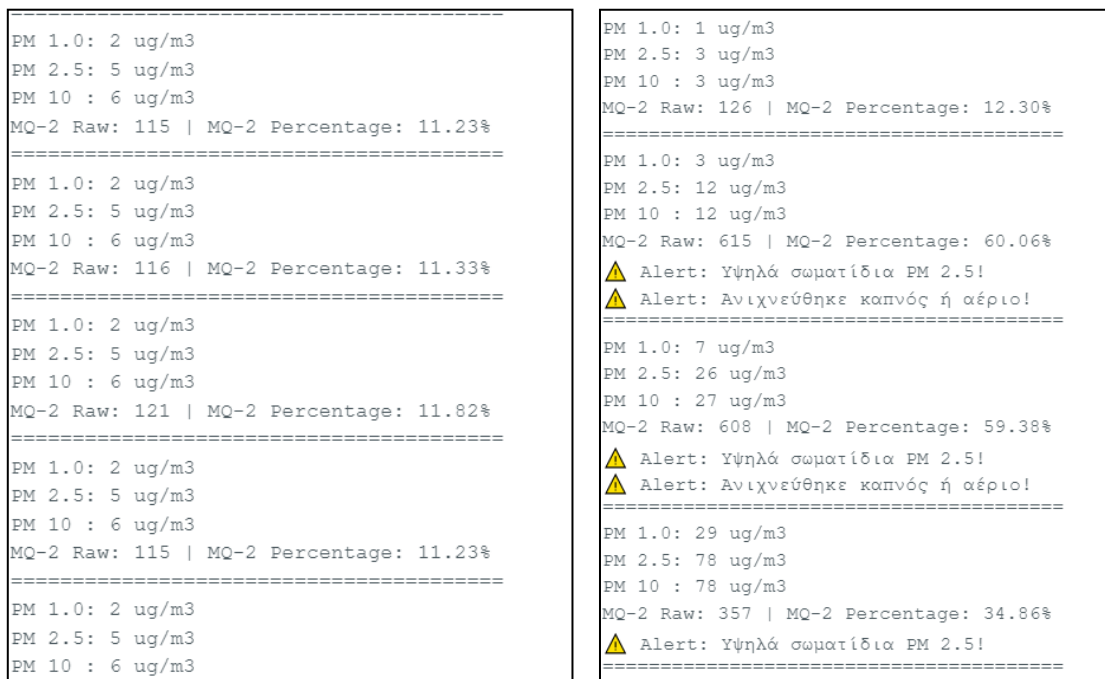
boolean readPMS(Stream *s) {
  if (s->available() < 32) return false;
  if (s->read() != 0x42) return false;
  if (s->read() != 0x4D) return false;
  uint8_t buffer[30];
  s->readBytes(buffer, 30);
  measurements.pm10 = (buffer[2] << 8) | buffer[3];
  measurements.pm25 = (buffer[4] << 8) | buffer[5];
  measurements.pm100 = (buffer[6] << 8) | buffer[7];
  return true;
}

```

Τρέχοντας τον κώδικα στο Arduino IDE παίρνουμε τα εξής αποτελέσματα στο serial monitor όπως φαίνονται στην Εικόνα 8 και 9:



Εικόνα 8: Arduino IDE



Εικόνα 9: Serial Monitor Arduino IDE

Τα δεδομένα, μας δείχνουν έναν πολύ καθαρό χώρο αρχικά. Στα σωματίδια (PM), οι τιμές 2, 5 και 6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  είναι εξαιρετικά χαμηλές και απόλυτα φυσιολογικές για εσωτερικό περιβάλλον. Στο MQ-2 η τιμή 126 (περίπου 11%) είναι η τυπική τιμή βάσης

(baseline) του αισθητήρα όταν δεν υπάρχει καπνός ή εύφλεκτο αέριο. Στο δεξί μέρος της εικόνας 10 παρατηρούμε ότι έχουν ενεργοποιηθεί και τα δύο Alerts καθώς ο αισθητήρας MQ-2 εντόπισε το αέριο βουτάνιο από τον αναπτήρα που κάναμε δοκιμή όταν εξάγαμε το αέριο κοντά του αλλά και ο αισθητήρας PMS2005 εντόπισε αυξημένες τιμές στο Threshold πάνω από 6 όπου το έχουμε ορίσει, φυσώντας και μόνο με την αναπνοή μας κοντά στον αισθητήρα.

Για επιπλέον διευκρινίσεις στις αντίστοιχες θέσεις ακροδεκτών Pin του παραπάνω κώδικα `sketch_jan16c`, παραθέτουμε τον Πίνακα 4. Η αντιστοίχιση των ακροδεκτών υλοποιείται σε επίπεδο λογισμικού μέσω της δήλωσης των διεπαφών UART και I<sup>2</sup>C. Συγκεκριμένα, ο αισθητήρας σωματιδίων PMS5003, που επικοινωνεί μέσω SoftwareSerial με χρήση των ακροδεκτών D6(TX) και D5(PX) του μικροελεγκτή Wemos D1 R2. Η OLED οθόνη χρησιμοποιεί το κοινό I<sup>2</sup>C bus με τον ακροδέκτη SDA στο D2 (GPIO4) και τον ακροδέκτη SCL στο D1 (GPIO5). Ο αισθητήρας αερίων MQ-2 παρέχει αναλογική έξοδο και συνδέεται απευθείας στην αναλογική είσοδο A0 του μικροελεγκτή.

**Πίνακας 4: Συγκεντρωτικός πίνακας: Κώδικας ↔ Pins**

Συσκευή	Κώδικας	Pin Wemos
<b>PMS5003 RX</b>	SoftwareSerial (D6, D5)	D5 (GPIO14)
<b>PMS5003 TX</b>	SoftwareSerial (D6, D5)	D6 (GPIO12)
<b>MQ-2 GAS</b>	Analog in	A0
<b>SDA (OLED)</b>	Wire.begin (D2, D1)	D2 (GPIO4)
<b>SCL (OLED)</b>	Wire.begin (D2, D1)	D1 (GPIO5)
<b>Τροφοδοσία</b>	—	5V / GND / 3.3V

### 3.4.2 MQTTX

Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζεται η χρήση του εργαλείου MQTTX, το οποίο λειτουργεί ως MQTT client και χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση, τον έλεγχο και την αποσφαλμάτωση της επικοινωνίας μεταξύ του μικροελεγκτή και του MQTT broker. Το MQTTX επιλέχθηκε λόγω του γραφικού περιβάλλοντος χρήστη, της ευκολίας ρύθμισης και της δυνατότητας παρακολούθησης πολλαπλών topics σε πραγματικό χρόνο. Το MQTTX δεν αντικαθιστά το Node-RED ούτε τη βάση δεδομένων. Ο ρόλος του είναι να επιβεβαιώνει ότι ο MQTT broker λειτουργεί σωστά, να εμφανίζει τα μηνύματα που δημοσιεύονται (publish), να επιτρέπει δοκιμαστική αποστολή μηνυμάτων (manual publish), να χρησιμοποιείται ως εργαλείο εκμάθησης

του publish/subscribe μοντέλου. Στην παρούσα εργασία, το MQTTX χρησιμοποιείται πριν και παράλληλα με το Node-RED, ώστε να διασφαλιστεί η ορθότητα της επικοινωνίας. Τα δεδομένα αποστέλλονται σε String μορφή. Χρησιμοποιείται το Quality of Service (QoS) 0 για ταχύτητα και το Topic Structure ακολουθεί το πρότυπο school/iaq/[parameter].

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία αφού εγκαταστήσαμε το MQTT Broker Mosquitto στα Windows μας, εγκαταστήσαμε και ανοίξαμε το MQTTX και δημιουργήσαμε ένα νέο connection με βάση την IPv4 του υπολογιστή μας (10.104.130.120) με Port 1883 και όνομα AIRQUALITY. Αφού έγινε το Connect, κάναμε αρχικά τα 5 New Subscriptions όπως φαίνονται στον Πίνακα 5 με τα αντίστοιχα ονόματα που έχουμε στον κώδικα στο IDE για να παίρνουμε τις αντίστοιχες μετρήσεις. Δεν μπορέσαμε να πάρουμε μετρήσεις από τον SGP30 όπως είχαμε προαναφέρει οπότε αλλάξαμε τα topics όπως φαίνεται και στον Πίνακα 6, αφού περάσαμε τον αισθητήρα MQ-2 Gas στο ενσωματωμένο σύστημά μας.

**Πίνακας 5: Αρχικά MQTTX Topics**

Αισθητήρας	Topic
<b>PM2.5</b>	school/iaq/pm25
<b>PM10</b>	school/iaq/pm10
<b>CO<sub>2</sub> (eCO<sub>2</sub>)</b>	school/iaq/co2
<b>TVOCs</b>	school/iaq/tvoc
<b>GAS</b>	school/iaq/gas
<b>alert</b>	school/iaq/alert

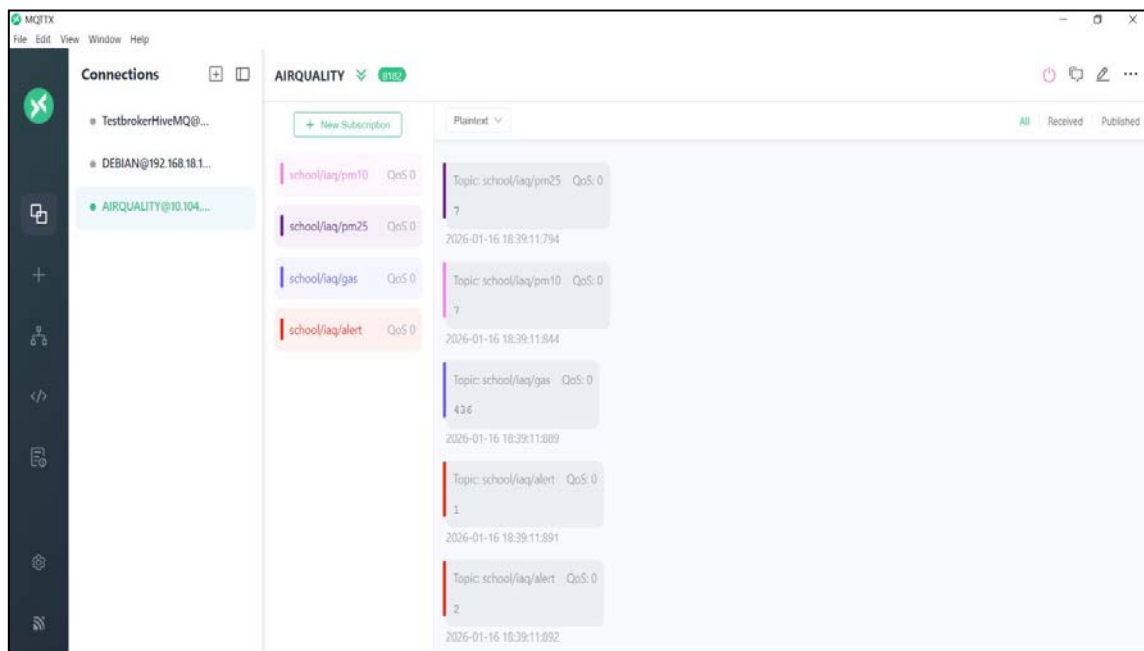
**Πίνακας 6: Τελικά MQTTX Topics**

Αισθητήρας	Topic
PM2.5	school/iaq/pm25
PM10	school/iaq/pm10
GAS	school/iaq/gas
alert	school/iaq/alert

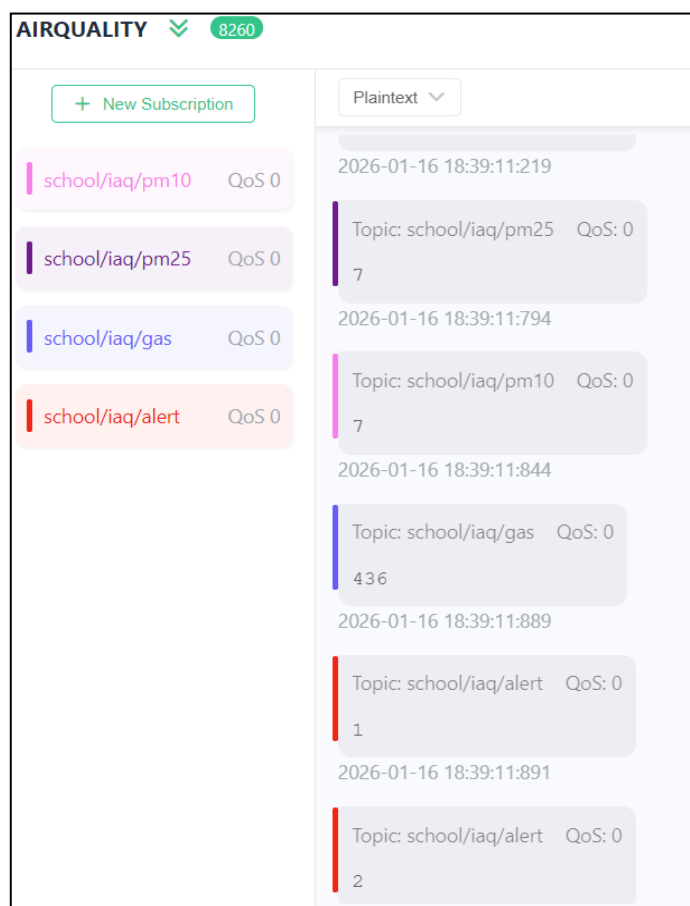
Μόλις ολοκληρώσαμε και τα Subscriptions αρχίσαμε να παίρνουμε τα μηνύματα με τις τιμές pm10, pm25, gas και alert. Για τη διαχείριση ειδοποιήσεων δημιουργήθηκε ξεχωριστό MQTT topic με όνομα school/iaq/alert, στο οποίο δημοσιεύονται

κωδικοποιημένα μηνύματα ειδοποίησης όταν οι μετρούμενες τιμές υπερβαίνουν προκαθορισμένα όρια ποιότητας αέρα.

Για να δούμε λοιπόν αν υλοποιήθηκε σωστά ο μηχανισμός κάναμε δοκιμές στους αισθητήρες και είδαμε ότι ενεργοποιούνταν το Alert και αυτόματα παίρναμε την τιμή **1** όταν ενεργοποιούνταν συγκεκριμένα το **Alert: Υψηλά σωματίδια PM 2.5** και την τιμή **2** όταν ενεργοποιούνταν το **Alert: Ανιχνεύθηκε καπνός ή αέριο.** , όπως φαίνεται και στις Εικόνες 10, 11.



Εικόνα 10: MQTTX



Εικόνα 11: Alert MQTTX

Παρακάτω βλέπουμε τα όρια που ορίσαμε στον κώδικά μας για να λαμβάνουμε τις αντίστοιχες ειδοποιήσεις alerts όταν σε κάποια σχολική αίθουσα οι τιμές ξεπερνάνε το όριο. Για λόγους πειραματικής αξιολόγησης και επαλήθευσης της λειτουργίας του συστήματος, τα όρια ενεργοποίησης ειδοποιήσεων ορίστηκαν χαμηλότερα από τις διεθνείς συστάσεις όπως φαίνεται και στον Πίνακα 7. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την παραγωγή ειδοποιήσεων ακόμη και σε συνθήκες ήπιας ρύπανσης, διευκολύνοντας τον έλεγχο και την αποσφαλμάτωση του συστήματος. Για τον αισθητήρα **MQ-2**, το κανονικό όριο λειτουργίας σε καθαρό αέρα αντιστοιχεί σε συγκεντρώσεις κάτω των **200 ppm** (parts per million). Δεδομένου ότι ο αισθητήρας παρέχει αναλογική έξοδο (0-1023), το όριο δοκιμής ορίστηκε στην τιμή **400**. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε πειραματικά ως το "κατώφλι" πέρα από το οποίο υποδηλώνεται η παρουσία καπνού ή εύφλεκτων αερίων σε ποσότητα που απαιτεί προσοχή, υπερβαίνοντας την τιμή βάσης (baseline) του καθαρού περιβάλλοντος.

Πίνακας 7: Προτεινόμενα όρια (χαμηλά – για alerts)

Παράμετρος	Κανονικό όριο (WHO)	Όριο ΔΟΚΙΜΗΣ	Μήνυμα Alert
<b>PM2.5</b>	15 µg/m <sup>3</sup> (24h)	<b>6 µg/m<sup>3</sup></b>	<b>1</b>
<b>PM10</b>	45 µg/m <sup>3</sup> (24h)	<b>6 µg/m<sup>3</sup></b>	<b>1</b>
<b>GAS</b>	-	<b>400 (Analog Raw)</b>	<b>2</b>

#### **Το PM10 (Particulate Matter ≤ 10 µm) σημαίνει:**

Αιωρούμενα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη ή ίση των 10 μικρομέτρων (µm) τα οποία περιλαμβάνουν σκόνη, γύρη, καπνό και σωματίδια από καύσεις, ρύπους από δρόμους και έδαφος και είναι σημαντικά γιατί εισχωρούν στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα και συνδέονται με ερεθισμούς, άσθμα και αναπνευστικά προβλήματα,.

#### **Το PM2.5 (Particulate Matter ≤ 2.5 µm) σημαίνει:**

Πολύ λεπτά λεπτόκοκκα αιωρούμενα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη ή ίση των 2.5 μικρομέτρων. Είναι πιο επικίνδυνα από τα PM10 γιατί διεισδύουν βαθύτερα στους πνεύμονες, μπορούν να περάσουν στο αίμα, σχετίζονται με: καρδιαγγειακά νοσήματα, μειωμένη συγκέντρωση, πονοκεφάλους, κόπωση. Σχολικές αίθουσες με κακό αερισμό εμφανίζουν συχνά αυξημένα PM2.5.

**MQ-2 (Gas Sensor):** Χρησιμοποιείται για την ανίχνευση εύφλεκτων αερίων LPG, προπάνιο, υδρογόνο και καπνού. Στο σχολικό περιβάλλον, η χρήση του MQ-2 λειτουργεί ως δικλείδα ασφαλείας για την ανίχνευση καύσης ή διαρροών, παρέχοντας μια αναλογική τιμή που αντικατοπτρίζει τη συγκέντρωση των αερίων στον αέρα.»

### **3.4.3 Node-RED**

Το Node-RED αποτελεί βασικό δομικό στοιχείο της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής λογισμικού και λειτουργεί ως ενδιάμεσο επίπεδο (middleware) μεταξύ των συσκευών συλλογής δεδομένων και των υπηρεσιών αποθήκευσης, ανάλυσης και οπτικοποίησης. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, το Node-RED αναλαμβάνει τον ρόλο του κεντρικού μηχανισμού διαχείρισης της ροής δεδομένων, επιτρέποντας τη

σύνδεση του πρωτοκόλλου επικοινωνίας MQTT με τη βάση δεδομένων InfluxDB και τα συστήματα απεικόνισης και ειδοποιήσεων.

Η επιλογή του Node-RED βασίζεται στη φιλοσοφία του οπτικού προγραμματισμού μέσω ροών (flows), όπου η λογική της εφαρμογής υλοποιείται με τη σύνδεση λειτουργικών κόμβων (nodes). Κάθε node αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη λειτουργία, όπως η λήψη δεδομένων, η επεξεργασία τους, ο έλεγχος ορίων (thresholds) ή η αποθήκευση σε βάση δεδομένων. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται σαφής διαχωρισμός των λειτουργικών επιπέδων του συστήματος και αυξημένη αναγνωσιμότητα του λογισμικού.

Στην αρχιτεκτονική που υλοποιείται στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, τα δεδομένα που παράγονται από τον μικροελεγκτή Wemos D1 R2 (ESP8266) και τους αισθητήρες ποιότητας αέρα μεταδίδονται μέσω MQTT προς τον broker. Το Node-RED λειτουργεί ως MQTT subscriber, λαμβάνοντας σε πραγματικό χρόνο τις μετρήσεις (PM2.5, PM10, και gas index) από τα αντίστοιχα topics. Στη συνέχεια, τα δεδομένα αυτά φιλτράρονται, μετασχηματίζονται σε κατάλληλη μορφή (π.χ. JSON αντικείμενα με χρονική σήμανση) και προωθούνται είτε για αποθήκευση στη βάση δεδομένων InfluxDB είτε για περαιτέρω επεξεργασία.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του Node-RED είναι η δυνατότητα ενσωμάτωσης λογικής ελέγχου και αυτοματισμών σε επίπεδο λογισμικού, χωρίς την ανάγκη επιπλέον προγραμματισμού στον μικροελεγκτή. Έτσι, λειτουργίες όπως ο έλεγχος ορίων ποιότητας αέρα, η ενεργοποίηση ειδοποιήσεων ή η προετοιμασία σεναρίων αυτόματου αερισμού μπορούν να υλοποιηθούν κεντρικά και να τροποποιηθούν εύκολα. Η προσέγγιση αυτή μειώνει την πολυπλοκότητα του embedded κώδικα και αυξάνει την ευελιξία του συνολικού συστήματος.

Επιπλέον, το Node-RED υποστηρίζει πλήθος επεκτάσεων (nodes) για βάσεις δεδομένων, υπηρεσίες web και εργαλεία ανάλυσης, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για επεκτάσιμες IoT εφαρμογές. Στην παρούσα διπλωματική μας εργασία, το Node-RED λειτουργεί ως κόμβος ενοποίησης (integration hub), επιτρέποντας τη διασύνδεση αισθητήρων, βάσεων δεδομένων και συστημάτων οπτικοποίησης, ενώ παράλληλα προετοιμάζει το έδαφος για την ενσωμάτωση τεχνικών μηχανικής μάθησης και προγνωστικών μοντέλων σε μεταγενέστερα στάδια.

Συνολικά, ο ρόλος του Node-RED στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική είναι κρίσιμος, καθώς γεφυρώνει το επίπεδο συλλογής δεδομένων με το επίπεδο ανάλυσης και λήψης αποφάσεων. Η χρήση του ενισχύει τη modular σχεδίαση του συστήματος, διευκολύνει τη συντήρηση και καθιστά το σύστημα κατάλληλο τόσο για ερευνητική αξιολόγηση όσο και για εκπαιδευτική αξιοποίηση σε σχολικό περιβάλλον.

#### **3.4.3.1 Εγκατάσταση και βασική παραμετροποίηση του Node-RED**

Η εγκατάσταση του Node-RED πραγματοποιήθηκε σε τοπικό υπολογιστικό σύστημα, το οποίο λειτουργεί ως κεντρικός κόμβος διαχείρισης των δεδομένων του συστήματος IoT. Το Node-RED είναι ένα εργαλείο ανοιχτού λογισμικού, βασισμένο στο περιβάλλον Node.js, και παρέχει ένα web-based γραφικό περιβάλλον ανάπτυξης, μέσω του οποίου ο χρήστης μπορεί να σχεδιάσει και να παραμετροποιήσει τις ροές δεδομένων του συστήματος Node-RED [15].

Η διαδικασία εγκατάστασης περιλαμβάνει την αρχική εγκατάσταση του Node.js και στη συνέχεια του Node-RED μέσω του διαχειριστή πακέτων npm. Μετά την ολοκλήρωση της εγκατάστασης, το Node-RED εκκινεί ως τοπική υπηρεσία και είναι προσβάσιμο μέσω φυλλομετρητή στη διεύθυνση **http://localhost:1880**. Το γραφικό περιβάλλον του Node-RED χωρίζεται σε τρία βασικά τμήματα: την παλέτα κόμβων (nodes palette), τον χώρο σχεδίασης ροών (workspace) και το πλαίσιο πληροφοριών και ρυθμίσεων (sidebar), επιτρέποντας την εύκολη διαμόρφωση και εποπτεία του συστήματος.

Στο πλαίσιο της βασικής παραμετροποίησης, εγκαταστάθηκαν και ενεργοποιήθηκαν οι απαραίτητοι κόμβοι (nodes) που απαιτούνται για την επικοινωνία με το πρωτόκολλο MQTT και τη βάση δεδομένων InfluxDB. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκαν οι κόμβοι **mqtt in** για τη λήψη δεδομένων από τον MQTT broker και οι αντίστοιχοι κόμβοι εξόδου για την αποθήκευση των μετρήσεων σε βάση δεδομένων τύπου time-series. Η διασύνδεση με τον MQTT broker πραγματοποιήθηκε με τη δήλωση της διεύθυνσης του broker, της θύρας επικοινωνίας (port) και των κατάλληλων credentials, όπου αυτό απαιτούνταν.

Για την παρούσα υλοποίηση, το Node-RED παραμετροποιήθηκε ώστε να λειτουργεί ως MQTT subscriber και να λαμβάνει δεδομένα από τα συγκεκριμένα 3 topics που

αντιστοιχούν σε μετρήσεις ποιότητας αέρα και αερίων, όπως οι συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων PM2.5 και PM10, καθώς και η ένδειξη gas από τον αισθητήρα MQ-2. Τα δεδομένα αυτά μεταδίδονται σε μορφή απλών αριθμητικών τιμών ή δομημένων μηνυμάτων JSON, ανάλογα με τον τρόπο υλοποίησης του embedded κώδικα στον μικροελεγκτή.

Η βασική παραμετροποίηση του Node-RED περιλαμβάνει επίσης τη ρύθμιση της διαχείρισης χρόνου (timestamping), έτσι ώστε κάθε εισερχόμενο μήνυμα να συνοδεύεται από χρονική σήμανση κατάλληλη για αποθήκευση και ανάλυση χρονοσειρών. Με τον τρόπο αυτό, διασφαλίζεται η σωστή χρονική συσχέτιση των μετρήσεων, γεγονός που είναι απαραίτητο τόσο για τη μεταγενέστερη οπτικοποίηση μέσω Grafana όσο και για την εφαρμογή προγνωστικών αλγορίθμων.

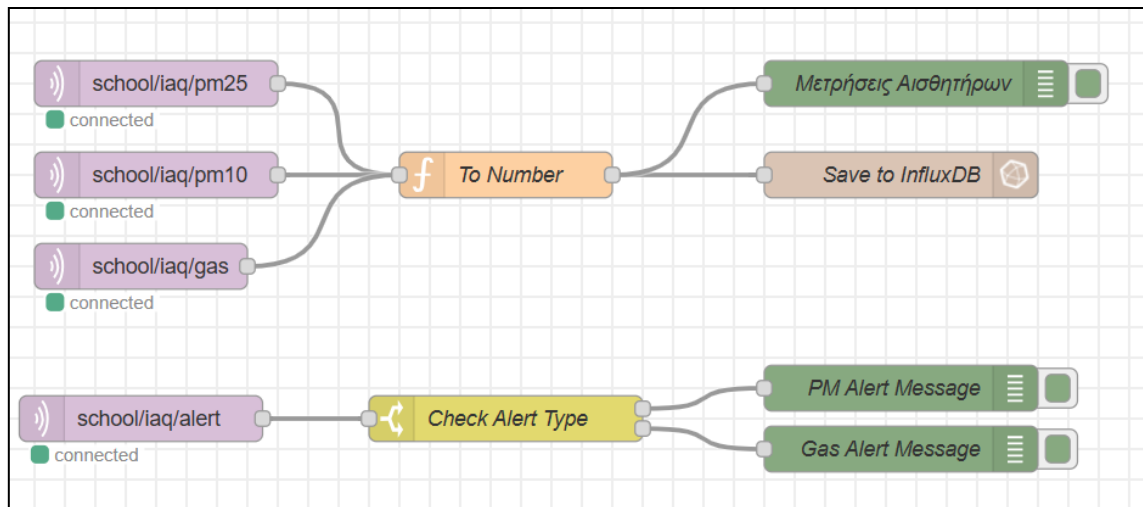
Η επιλογή τοπικής εγκατάστασης του Node-RED προσφέρει αυξημένο έλεγχο στο σύστημα, μειωμένη καθυστέρηση (latency) και ανεξαρτησία από εξωτερικές υπηρεσίες cloud. Παράλληλα, επιτρέπει την άμεση τροποποίηση των ροών δεδομένων και τη δοκιμή διαφορετικών σεναρίων επεξεργασίας και αυτοματισμών, χωρίς να απαιτείται αλλαγή στον κώδικα του μικροελεγκτή. Η προσέγγιση αυτή καθιστά το Node-RED ιδιαίτερα κατάλληλο για εκπαιδευτικά και ερευνητικά περιβάλλοντα, όπου η ευελιξία και η δυνατότητα πειραματισμού αποτελούν βασικές απαιτήσεις [9], [10].

#### **3.4.3.2 Σχεδίαση ροών (flows) και κόμβων nodes στο Node-RED**

Η λειτουργία του Node-RED βασίζεται στη δημιουργία ροών (flows), οι οποίες αποτελούνται από διασυνδεδεμένους κόμβους (nodes) που επεξεργάζονται και προωθούν τα δεδομένα από την πηγή τους έως τον τελικό προορισμό. Στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, οι ροές σχεδιάστηκαν με στόχο τη λήψη δεδομένων ποιότητας αέρα μέσω MQTT, την ελαφριά επεξεργασία και μορφοποίησή τους, καθώς και την προώθησή τους προς αποθήκευση σε βάση δεδομένων χρονοσειρών.

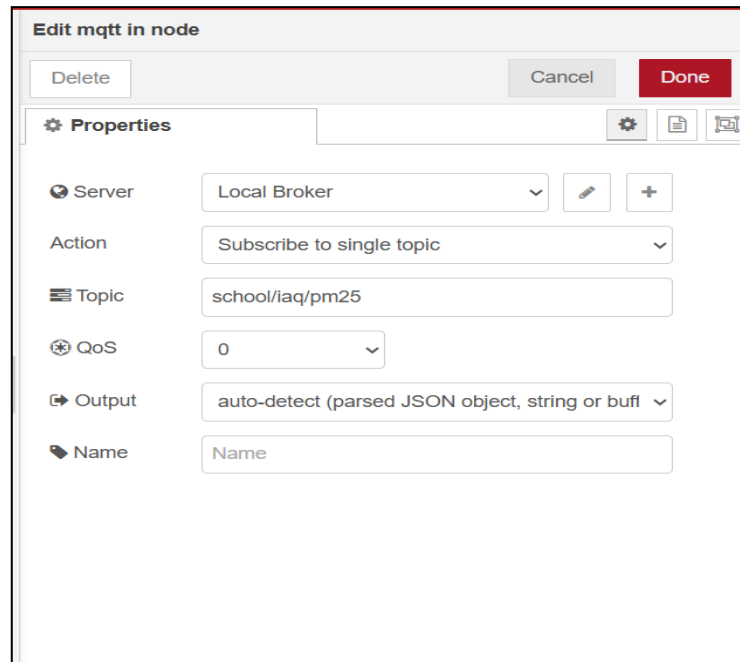
Η βασική ροή δεδομένων ξεκινά από τους κόμβους **MQTT in** όπως φαίνεται στην Εικόνα 12, οι οποίοι λειτουργούν ως συνδρομητές (subscribers) στα topics που δημοσιεύει ο μικροελεγκτής Wemos D1 R2. Κάθε **topic** αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη περιβαλλοντική μεταβλητή και, στη συγκεκριμένη υλοποίηση,

περιλαμβάνονται οι μετρήσεις αιωρούμενων σωματιδίων PM2.5, PM10 και οι ενδείξεις gas από τον αισθητήρα MQ-2. Η χρήση ξεχωριστών topics επιτρέπει την ανεξάρτητη διαχείριση και επεκτασιμότητα του συστήματος.

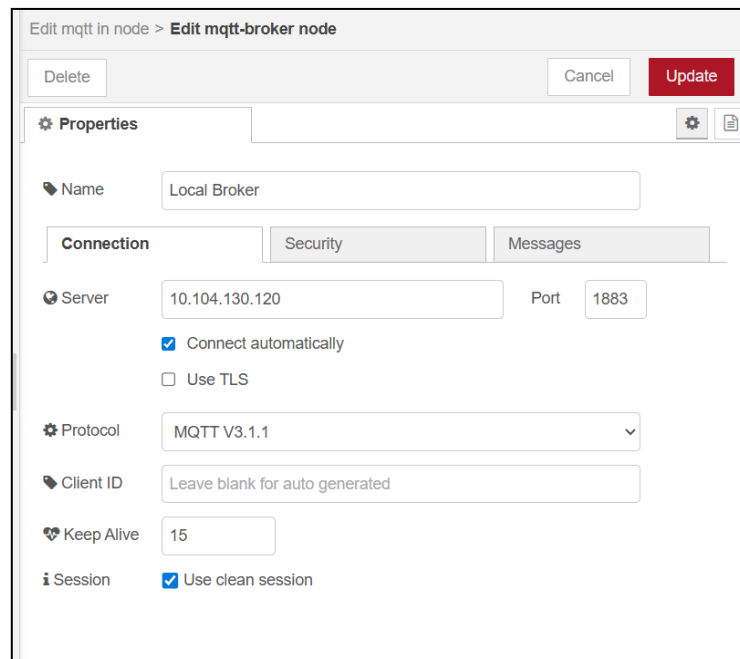


Εικόνα 12: Βασική Ροή Flow – Node-Red

Με απλά βήματα η ρύθμιση των MQTT In κόμβων έγινε με διπλό κλικ επάνω στους αντίστοιχους κόμβους school/iaq/..... . Στο πεδίο Server και στην καρτέλα Properties, πατήσαμε το μολυβάκι (Add new mqtt-broker) όπου εμφανίζεται στην Εικόνα 13. Στην καρτέλα Connection όπως φαίνεται στην Εικόνα 14 κάναμε τις εξής ρυθμίσεις : Name: Local Broker, Server: 10.104.130.120 (Η IP που χρησιμοποιήσαμε), Port: 1883 και τέλος πατήσαμε Add και μετά Done.



Εικόνα 13: Mqtt In – Node-Red

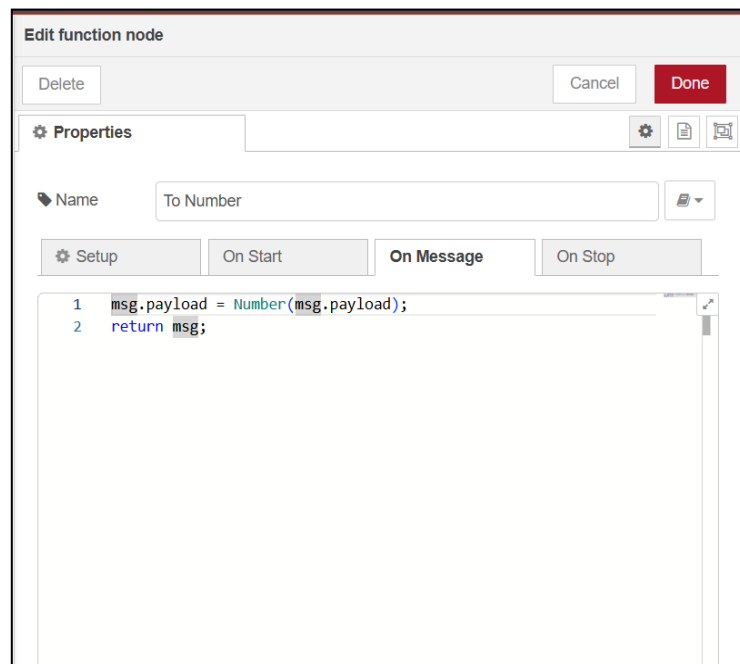


Εικόνα 14: Mqtt in -Properties

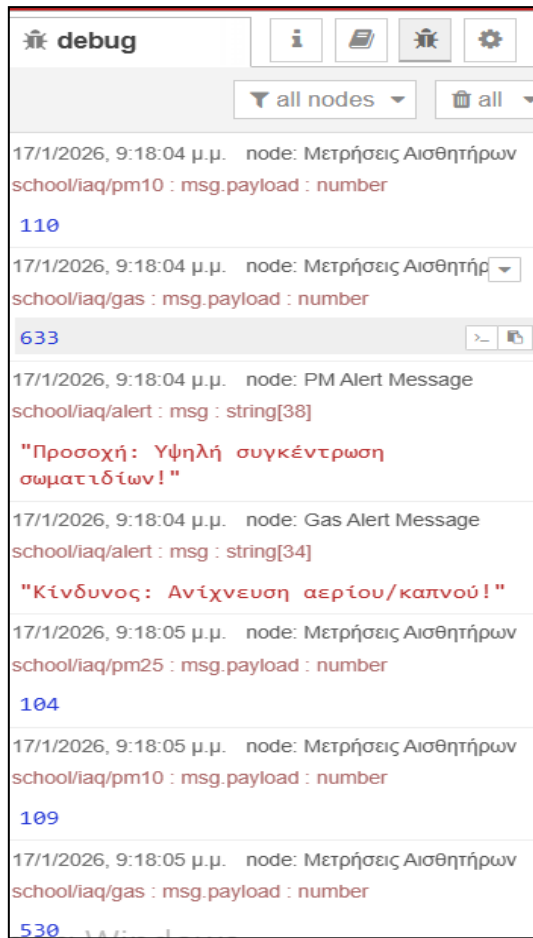
Τα δεδομένα που λαμβάνονται από τους MQTT κόμβους οδηγούνται σε κόμβους τύπου **function**, όπου πραγματοποιείται βασική επεξεργασία. Σε αυτό το στάδιο εφαρμόζεται έλεγχος εγκυρότητας των τιμών, μετατροπή του payload σε αριθμητική μορφή και

προσθήκη χρονικής σήμανσης (timestamp). Επιπλέον, τα δεδομένα μορφοποιούνται σε ενιαία δομή JSON, ώστε να είναι συμβατά με την αποθήκευσή τους στη βάση δεδομένων InfluxDB και να διευκολύνεται η μεταγενέστερη ανάλυση. Πιο αναλυτικά χρησιμοποιήθηκε ένας κόμβος τύπου *function*, ο οποίος έχει ως στόχο την εξασφάλιση της σωστής μορφής των δεδομένων πριν την αποθήκευσή τους στη βάση δεδομένων. Συγκεκριμένα, τα δεδομένα που λαμβάνονται μέσω MQTT μεταφέρονται αρχικά ως συμβολοσειρές (strings) και απαιτείται η μετατροπή τους σε αριθμητική μορφή.

Για τον λόγο αυτό, υλοποιήθηκε ένας απλός μηχανισμός μετατροπής του payload σε αριθμητικό τύπο, μέσω της εντολής `Number(msg.payload)` όπως φαίνεται στην Εικόνα 15. Η προσέγγιση αυτή διασφαλίζει ότι οι τιμές των αισθητήρων είναι κατάλληλες για αποθήκευση σε βάση δεδομένων χρονοσειρών, όπως η InfluxDB, και αποτρέπει σφάλματα τύπου δεδομένων κατά τη διαδικασία εγγραφής.



Εικόνα 15: Function Node

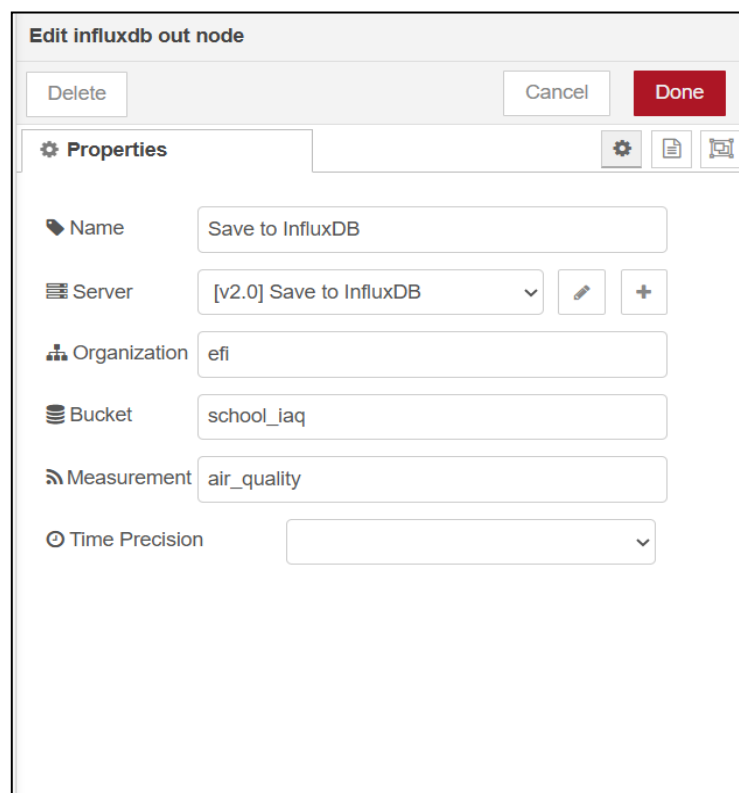


Εικόνα 16: Debug NodeRED

Για λόγους ελέγχου και αποσφαλμάτωσης, ενσωματώθηκαν κόμβοι **debug**, οι οποίοι επιτρέπουν την παρακολούθηση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο μέσα από το περιβάλλον του Node-RED. Η χρήση των debug nodes είναι ιδιαίτερα χρήσιμη κατά τη φάση ανάπτυξης, καθώς επιτρέπει την άμεση επαλήθευση της σωστής λήψης και επεξεργασίας των μετρήσεων όπως φαίνεται και στην παραπάνω Εικόνα 17.

Στη συνέχεια, τα επεξεργασμένα δεδομένα προωθούνται προς αποθήκευση μέσω κόμβων εξόδου προς τη βάση δεδομένων InfluxDB, όπου καταγράφονται ως χρονοσειρές. Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική επιτρέπει την αξιόπιστη και συνεχή καταγραφή των περιβαλλοντικών δεδομένων, διατηρώντας σαφή διαχωρισμό μεταξύ συλλογής, επεξεργασίας και αποθήκευσης. Παράλληλα, η οπτική αναπαράσταση των ροών στο Node-RED διευκολύνει την κατανόηση της συνολικής λειτουργίας του συστήματος και ενισχύει τον εκπαιδευτικό χαρακτήρα της υλοποίησης.

Τέλος ρυθμίσαμε το **InfluxDB Out** για να συνδέσουμε το Node-RED με το Cloud λογαριασμό μας κάνοντας διπλό κλικ στο κόμβο Save to InfluxDB. Στο πεδίο Server, πατήσαμε το μολυβάκι. Εικόνα 17. Ρυθμίσαμε τα εξής : Version 2.0, URL: τη διεύθυνση από τον browser μας (<https://us-east-1-1.aws.cloud2.influxdata.com>). Token: πήγαμε στην καρτέλα API TOKENS της InfluxDB και αντιγράψαμε το Token που δημιουργήσαμε, Organization: efi , Bucket: school\_iaq (Αυτό που φτιάξαμε στην καρτέλα BUCKETS της InfluxDB), Measurement: air\_quality . Πατήσαμε Add και μετά Update ή Done όπως φαίνεται και στην Εικόνα 18.

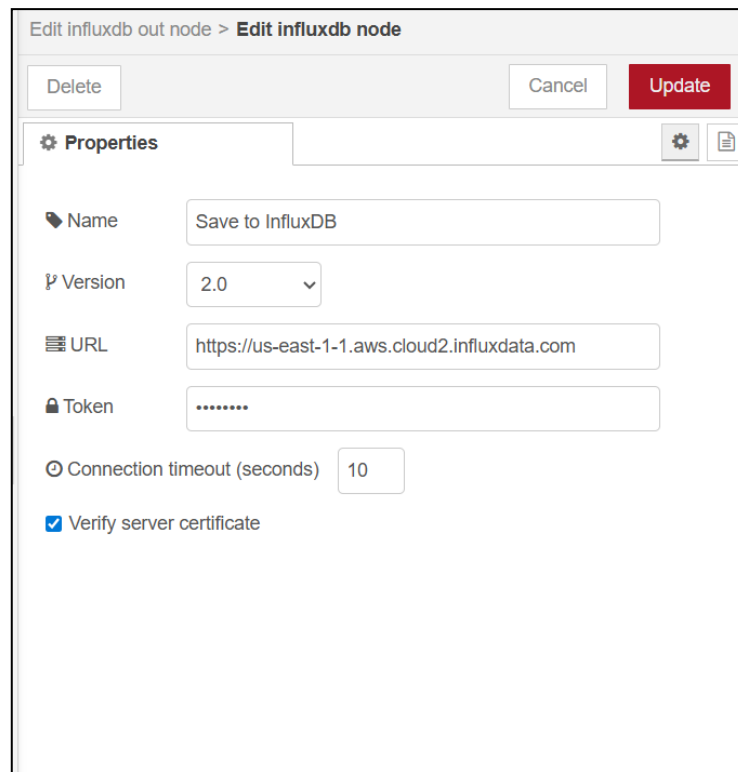


The image shows a dialog box titled "Edit influxdb out node" with the following fields and values:

- Name: Save to InfluxDB
- Server: [v2.0] Save to InfluxDB
- Organization: efi
- Bucket: school\_iaq
- Measurement: air\_quality
- Time Precision: (empty dropdown)

Buttons: Delete, Cancel, Done

Εικόνα 17: InfluxDB out 1 - NodeRED

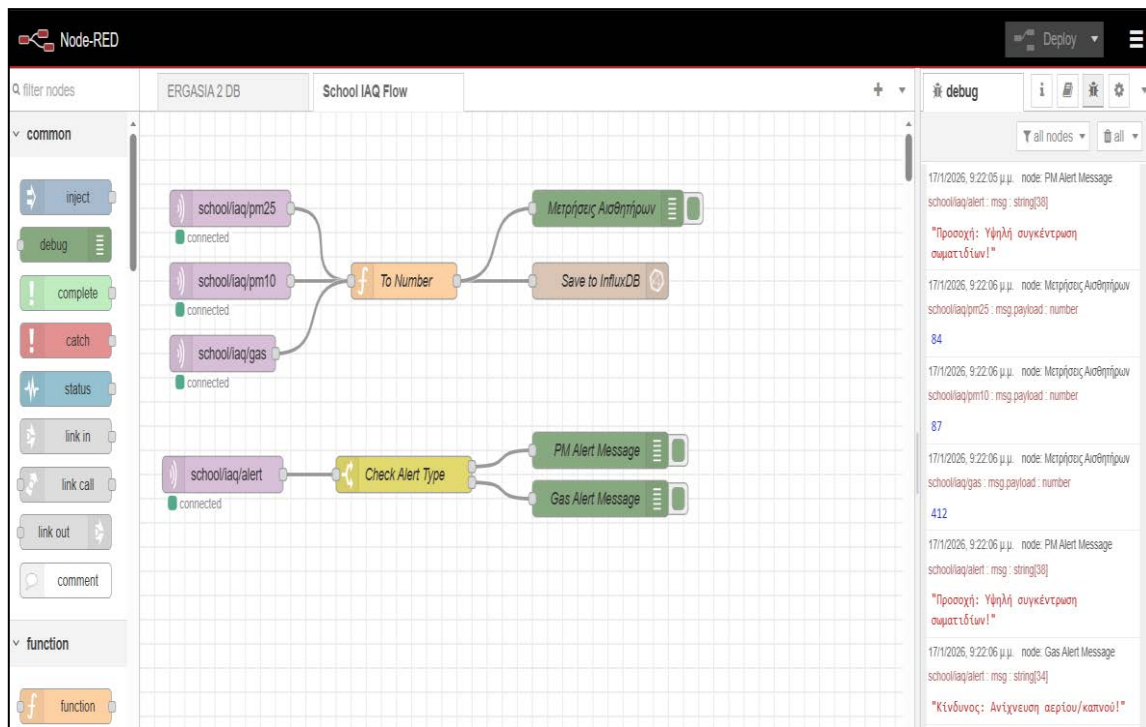


Εικόνα 18: InfluxDB out 2 – Node-RED

Αφού ολοκληρώσαμε τις ρυθμίσεις μας και κάναμε Deploy, οι MQTT κόμβοι δείχνανε "connected". Ο κόμβος "Save to InfluxDB" έδειχνε επίσης "connected", πράγμα που σημαίνει ότι το middleware (Node-RED) στέλνει πλέον δεδομένα στη time-series database (InfluxDB).

Για τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας του συστήματος σε πραγματικό χρόνο, χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο **Debug Panel** του Node-RED. Μέσω της προσθήκης κόμβων αποσφαλμάτωσης (debug nodes), κατέστη δυνατή η οπτική επαλήθευση της ροής των αριθμητικών δεδομένων από τους αισθητήρες, παράλληλα με την εμφάνιση των λεκτικών προειδοποιήσεων. Αυτή η διαδικασία επέτρεψε τον άμεσο εντοπισμό και τη διόρθωση σφαλμάτων στον κώδικα προεπεξεργασίας, διασφαλίζοντας ότι οι τιμές που καταλήγουν στην InfluxDB Cloud είναι έγκυρες και εντός των αναμενόμενων ορίων.

Παραθέτουμε το FLOW στο Node-RED όπως φαίνεται και στην Εικόνα 19.



Εικόνα 19: Flow Node-RED 1

### 3.4.3.2 Διασύνδεση του Node-RED με τη βάση δεδομένων InfluxDB

Η αποθήκευση των δεδομένων που συλλέγονται από το σύστημα αισθητήρων πραγματοποιείται μέσω της διασύνδεσης του Node-RED με τη βάση δεδομένων InfluxDB, η οποία είναι ειδικά σχεδιασμένη για τη διαχείριση δεδομένων χρονοσειρών. Η επιλογή της InfluxDB κρίνεται κατάλληλη για εφαρμογές IoT, καθώς υποστηρίζει υψηλούς ρυθμούς εγγραφής, αποδοτική αποθήκευση χρονικά συσχετισμένων μετρήσεων και εύκολη ανάκτηση δεδομένων για ανάλυση και οπτικοποίηση.

Η σύνδεση του Node-RED με την InfluxDB υλοποιήθηκε μέσω του αντίστοιχου κόμβου εξόδου (*influxdb out*), ο οποίος παραμετροποιήθηκε με τα στοιχεία της βάσης δεδομένων, όπως τη διεύθυνση του server, τη θύρα επικοινωνίας, το όνομα της βάσης και, όπου απαιτείται, τα στοιχεία πιστοποίησης. Με τον τρόπο αυτό, το Node-RED αποκτά τη δυνατότητα να καταγράφει αυτόματα κάθε νέα μέτρηση που λαμβάνεται από τον MQTT broker.

Στην παρούσα υλοποίηση, κάθε περιβαλλοντική παράμετρος (PM2.5, PM10 και gas/smoke) αποθηκεύεται ως ξεχωριστή χρονοσειρά (measurement) στη βάση δεδομένων. Οι τιμές που λαμβάνονται από το Node-RED μετατρέπονται προηγουμένως

σε αριθμητική μορφή, ώστε να διασφαλίζεται η συμβατότητα με το σχήμα αποθήκευσης της InfluxDB. Η χρονική σήμανση των δεδομένων πραγματοποιείται αυτόματα από το σύστημα κατά τη στιγμή της εγγραφής, εξασφαλίζοντας ακριβή χρονική αντιστοίχιση των μετρήσεων.

Η χρήση απλοποιημένου payload, όπου το μήνυμα περιέχει αποκλειστικά την αριθμητική τιμή της μέτρησης, μειώνει την πολυπλοκότητα της ροής δεδομένων και καθιστά τη διαδικασία εγγραφής πιο αξιόπιστη. Παράλληλα, η συγκεκριμένη προσέγγιση διευκολύνει τη μεταγενέστερη οπτικοποίηση των δεδομένων μέσω εργαλείων όπως το Grafana, καθώς οι χρονοσειρές είναι καθαρά ορισμένες και δεν απαιτείται πρόσθετη επεξεργασία.

Η διασύνδεση του Node-RED με την InfluxDB Cloud υλοποιήθηκε μέσω του API V2, χρησιμοποιώντας μοναδικά API Tokens για την εξασφάλιση της αυθεντικοποίησης. Η ροή δεδομένων κατευθύνεται στο Bucket school\_iag, όπου οι μετρήσεις οργανώνονται με βάση τον οργανισμό efi, επιτρέποντας τη διαχείριση των χρονοσειρών σε πραγματικό χρόνο.

Η διασύνδεση Node-RED και InfluxDB επιτρέπει την αξιόπιστη και συνεχή καταγραφή ιστορικών δεδομένων ποιότητας αέρα, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν τόσο για την παρακολούθηση της κατάστασης της σχολικής αίθουσας σε πραγματικό χρόνο όσο και για τη στατιστική ανάλυση και την εφαρμογή προγνωστικών μοντέλων. Με τον τρόπο αυτό, το σύστημα αποκτά μόνιμη μνήμη των μετρήσεων και μεταβαίνει από την απλή παρακολούθηση στη συστηματική ανάλυση περιβαλλοντικών συνθηκών.

#### **3.4.3.3 Διαχείριση συμβάντων και ειδοποιήσεων (alerts)**

Η διαχείριση συμβάντων και ειδοποιήσεων αποτελεί ένα κρίσιμο ενδιάμεσο στάδιο μεταξύ της απλής καταγραφής δεδομένων και της υλοποίησης πλήρως αυτοματοποιημένων ενεργειών. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, το Node-RED αξιοποιείται για την υλοποίηση βασικής λογικής ελέγχου, η οποία επιτρέπει τον εντοπισμό καταστάσεων που υποδηλώνουν υποβάθμιση της ποιότητας του αέρα και απαιτούν ανθρώπινη παρέμβαση ή περαιτέρω επεξεργασία.

Η προσέγγιση που ακολουθήθηκε βασίζεται στη σύγκριση των μετρούμενων τιμών με προκαθορισμένα όρια (thresholds), τα οποία προκύπτουν από διεθνείς οδηγίες και

σχετική βιβλιογραφία. Ενδεικτικά, για τις συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων PM2.5 μπορούν να οριστούν όρια που υποδηλώνουν αυξημένο επίπεδο ρύπανσης, ενώ για τις ενδείξεις gas/smoke από τον αισθητήρα MQ-2 μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατώφλια που σχετίζονται με πιθανή παρουσία καπνού ή εύφλεκτων αερίων. Τα όρια αυτά δεν ενεργοποιούν άμεσα αυτοματισμούς, αλλά λειτουργούν ως μηχανισμός έγκαιρης προειδοποίησης.

Σε επίπεδο Node-RED, η υλοποίηση των alerts πραγματοποιείται με τη χρήση απλών κόμβων λογικής, όπως *function* ή *switch nodes*. Οι κόμβοι αυτοί ελέγχουν αν η αριθμητική τιμή που προκύπτει από τη μέτρηση υπερβαίνει το εκάστοτε καθορισμένο όριο. Σε περίπτωση υπέρβασης, το σύστημα μπορεί να παράγει ένα συμβάν ειδοποίησης, το οποίο καταγράφεται είτε μέσω μηνυμάτων καταγραφής (logs) είτε μέσω ειδικών nodes ειδοποίησης, όπως *debug nodes* ή μηνύματα κατάστασης όπως φαίνεται και στην Εικόνα 16 σελίδα 70.

Η επιλογή υλοποίησης των ειδοποιήσεων στο επίπεδο του Node-RED, και όχι στον μικροελεγκτή, προσφέρει αυξημένη ευελιξία και ευκολία παραμετροποίησης. Τα thresholds μπορούν να τροποποιηθούν δυναμικά, χωρίς επαναπρογραμματισμό του embedded συστήματος, ενώ είναι δυνατή η προσθήκη νέων κανόνων ελέγχου ή συνδυαστικών συνθηκών (π.χ. ταυτόχρονη αύξηση PM2.5 και gas). Με τον τρόπο αυτό, το σύστημα παραμένει απλό σε επίπεδο hardware και μεταφέρει τη λογική απόφασης στο κεντρικό επίπεδο διαχείρισης.

Επιπλέον, η ύπαρξη μηχανισμού ειδοποιήσεων λειτουργεί ως προπαρασκευαστικό στάδιο για πιο σύνθετες λειτουργίες, όπως οι αυτοματισμοί αερισμού ή οι παρεμβάσεις στο μικροκλίμα της τάξης. Στην παρούσα φάση, τα alerts περιορίζονται στην ανίχνευση και επισήμανση μη φυσιολογικών καταστάσεων, αφήνοντας τη λήψη τελικών αποφάσεων στον χρήστη ή σε μεταγενέστερα υποσυστήματα του συστήματος.

Συνολικά, η διαχείριση συμβάντων στο Node-RED ενισχύει τον ρόλο του ως ενδιάμεσου επιπέδου ευφυΐας, επιτρέποντας στο σύστημα να μεταβεί από την παθητική παρακολούθηση δεδομένων σε ενεργή υποστήριξη αποφάσεων. Η λειτουργικότητα αυτή αποτελεί βασικό θεμέλιο για την περαιτέρω ανάπτυξη αυτοματοποιημένων σεναρίων, τα οποία παρουσιάζονται σε επόμενα κεφάλαια της διπλωματικής εργασίας.

### 3.4.4 InfluxDB

Η InfluxDB αποτελεί τη βάση δεδομένων που χρησιμοποιείται στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία για την αποθήκευση και διαχείριση των περιβαλλοντικών μετρήσεων που συλλέγονται από το σύστημα IoT. Πρόκειται για μία βάση δεδομένων χρονοσειρών (time-series database), η οποία έχει σχεδιαστεί ειδικά για την αποδοτική αποθήκευση, αναζήτηση και ανάλυση δεδομένων που συνοδεύονται από χρονική πληροφορία, όπως είναι οι μετρήσεις αισθητήρων σε εφαρμογές IoT [9].

Η επιλογή της InfluxDB κρίνεται κατάλληλη για το συγκεκριμένο σύστημα, καθώς υποστηρίζει υψηλούς ρυθμούς εγγραφής δεδομένων, χαμηλή καθυστέρηση και αποδοτική διαχείριση μεγάλου όγκου χρονοσειρών. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι ιδιαίτερα σημαντικά σε εφαρμογές συνεχούς παρακολούθησης ποιότητας αέρα, όπου τα δεδομένα παράγονται περιοδικά και πρέπει να αποθηκεύονται με ακρίβεια και συνέπεια [12].

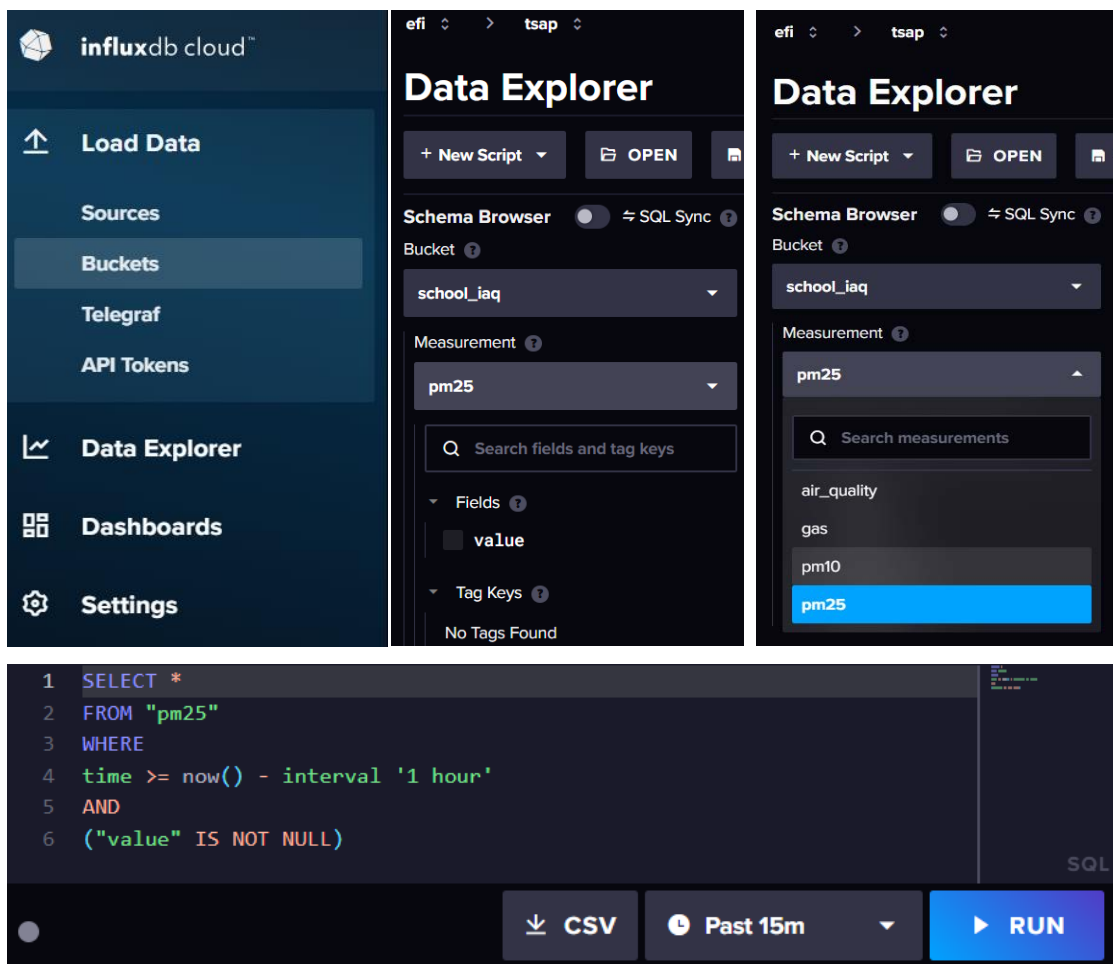
Στο πλαίσιο της παρούσας υλοποίησης, η InfluxDB λειτουργεί ως το κεντρικό αποθετήριο ιστορικών δεδομένων. Οι μετρήσεις αιωρούμενων σωματιδίων (PM2.5, PM10) και οι ενδείξεις gas/smoke που λαμβάνονται μέσω MQTT και επεξεργάζονται από το Node-RED καταγράφονται στη βάση ως ξεχωριστές χρονοσειρές. Κάθε εγγραφή συνοδεύεται από χρονική σήμανση (timestamp), η οποία επιτρέπει την ακριβή αναπαράσταση της εξέλιξης των περιβαλλοντικών συνθηκών στον χρόνο.

Η βασική δομή αποθήκευσης της InfluxDB βασίζεται στην έννοια των *measurements*, *fields* και *timestamps*. Στην παρούσα εργασία, κάθε περιβαλλοντική παράμετρος αποθηκεύεται ως ξεχωριστό *measurement*, ενώ η αριθμητική τιμή της μέτρησης καταγράφεται ως *field*. Η χρονική πληροφορία προστίθεται αυτόματα κατά την εγγραφή, διασφαλίζοντας τη σωστή σειρά και χρονική συσχέτιση των δεδομένων. Η επιλογή απλοποιημένης δομής αποθήκευσης μειώνει την πολυπλοκότητα του συστήματος και διευκολύνει την ανάκτηση των δεδομένων για οπτικοποίηση και ανάλυση [6].

Η διασύνδεση της InfluxDB με το Node-RED πραγματοποιείται μέσω του αντίστοιχου κόμβου εξόδου, ο οποίος έχει παραμετροποιηθεί με τα στοιχεία σύνδεσης της βάσης δεδομένων (διεύθυνση server, θύρα και όνομα βάσης). Με τον τρόπο αυτό, κάθε νέα μέτρηση που εισέρχεται στο Node-RED αποθηκεύεται αυτόματα στη βάση, χωρίς να

απαιτείται χειροκίνητη παρέμβαση. Η συγκεκριμένη προσέγγιση επιτρέπει την αξιόπιστη και συνεχή καταγραφή δεδομένων, ακόμη και σε περιπτώσεις μεγάλης διάρκειας λειτουργίας του συστήματος.

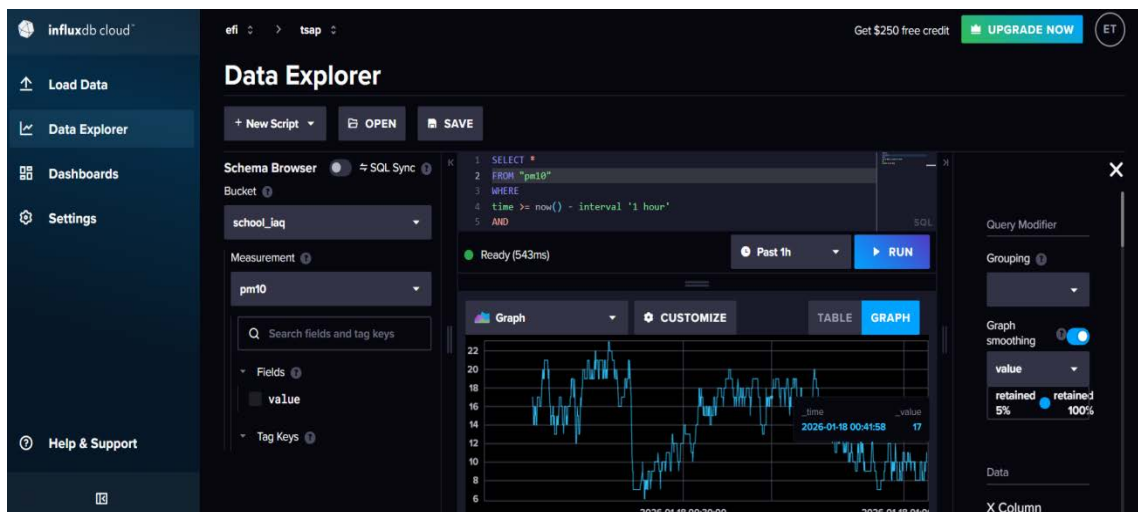
Η βάση δεδομένων InfluxDB Cloud ρυθμίστηκε με ένα **Bucket** με όνομα **school\_iaq**, το οποίο λειτουργεί ως το κύριο αποθετήριο για τις μετρήσεις των αισθητήρων. Η αυθεντικοποίηση της επικοινωνίας μεταξύ Node-RED και InfluxDB επιτυγχάνεται μέσω ενός **API Token** με πλήρη δικαιώματα πρόσβασης, διασφαλίζοντας την ακεραιότητα των δεδομένων κατά την αποθήκευση. Τα δεδομένα αποθηκεύονται σε μορφή χρονοσειρών (measurements), όπου οι μετρήσεις οργανώνονται με βάση τον οργανισμό **efi**, επιτρέποντας την εκτέλεση ερωτημάτων (queries) για την ιστορική ανάλυση και την τροφοδοσία των μοντέλων Μηχανικής Μάθησης όπως φαίνονται στην Εικόνα 20.



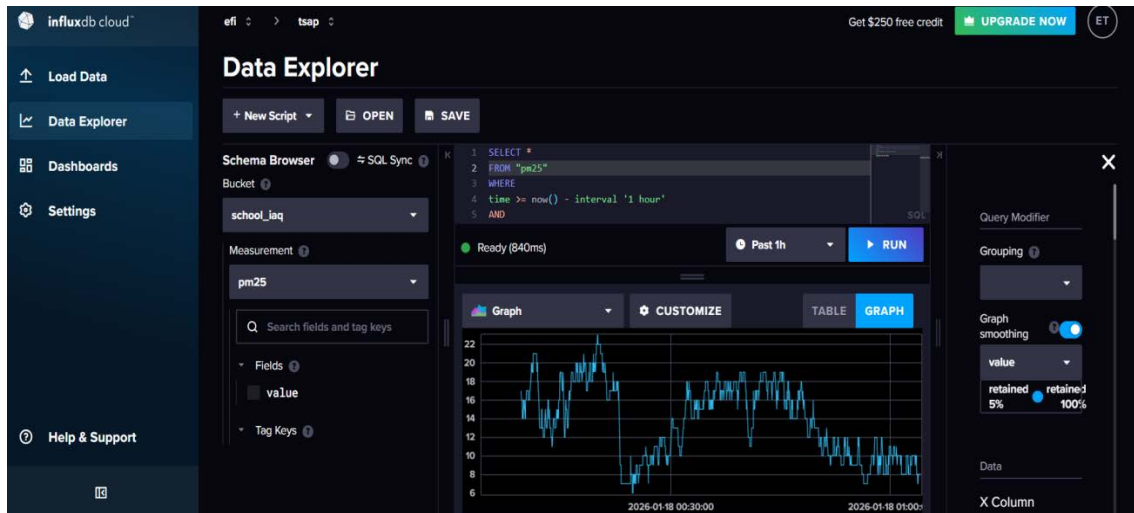
Εικόνα 20: Bucket, Measurements, API, Queries

Όπως προαναφέραμε, οι μετρήσεις αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων ως ξεχωριστές χρονοσειρές (measurements) για κάθε περιβαλλοντική παράμετρο. Συγκεκριμένα, οι τιμές των PM2.5, PM10 και gas καταγράφονται ως ανεξάρτητα measurements, επιτρέποντας τη σαφή διάκριση και την εύκολη ανάκτηση των δεδομένων για περαιτέρω ανάλυση και οπτικοποίηση. Κάποιες στιγμές παρατηρούνταν όμως χρονικά διαστήματα χωρίς καταγεγραμμένες μετρήσεις, τα οποία οφείλονται σε διακοπή λειτουργίας της πηγής δεδομένων ή της δικτυακής επικοινωνίας. Το φαινόμενο αυτό είναι αναμενόμενο σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας συστημάτων IoT και δεν σχετίζεται με σφάλμα της βάσης δεδομένων.

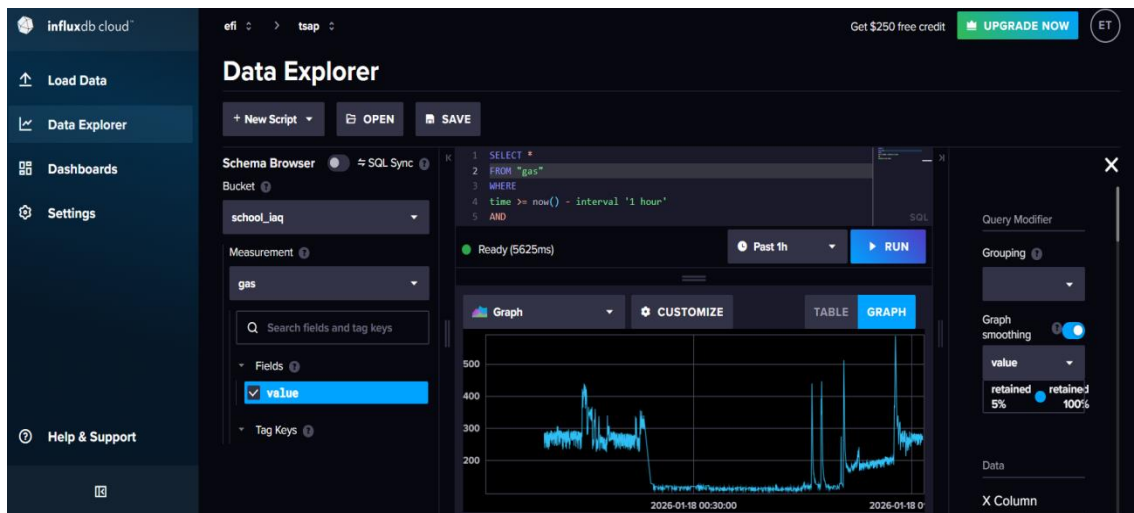
Κατά την ανάκτηση δεδομένων από την InfluxDB, κάθε περιβαλλοντική παράμετρος ανακτάται από το αντίστοιχο measurement, γεγονός που απαιτεί την προσαρμογή των ερωτημάτων ανάλογα με τη μεταβλητή ενδιαφέροντος (PM2.5, PM10 ή gas) όπως φαίνεται και στις Εικόνες 21, 22, 23.



Εικόνα 21: PM10 - InfluxDB



Εικόνα 22:PM25-InfluxDB



Εικόνα 23:GAS-InfluxDB

Το **dashboard** που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον της InfluxDB παρέχει συγκεντρωτική και χρονικά συσχετισμένη απεικόνιση των περιβαλλοντικών παραμέτρων που καταγράφονται από το σύστημα IoT. Συγκεκριμένα, στο ίδιο γράφημα απεικονίζονται οι χρονοσειρές των μετρήσεων PM2.5, PM10 και gas, επιτρέποντας την άμεση σύγκριση της συμπεριφοράς τους στον χρόνο και τη γρήγορη αναγνώριση μεταβολών ή ανωμαλιών.

Η απεικόνιση των δεδομένων βασίζεται σε συνεχή ροή πραγματικών μετρήσεων που ανακτώνται από τη βάση δεδομένων InfluxDB, με κοινό χρονικό άξονα. Η προσέγγιση αυτή διευκολύνει την ανάλυση της δυναμικής του εσωτερικού περιβάλλοντος, καθώς καθίσταται δυνατή η συσχέτιση αιχμών στις συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων

με αντίστοιχες μεταβολές στις ενδείξεις αερίων. Παράλληλα, η χρήση διαφορετικών χρωματικών καμπυλών για κάθε μέτρηση ενισχύει τη διακρίτοτητα των δεδομένων και τη χρηστικότητα του γραφήματος.

Το dashboard επιτρέπει επίσης τη διαδραστική εξερεύνηση των δεδομένων, μέσω της επιλογής χρονικού διαστήματος και της εμφάνισης ακριβών αριθμητικών τιμών για κάθε χρονική στιγμή. Με τον τρόπο αυτό, ο χρήστης μπορεί να παρακολουθεί τόσο τη γενική τάση των μετρήσεων όσο και μεμονωμένα γεγονότα, όπως απότομες αυξήσεις ή πτώσεις των τιμών. Η λειτουργικότητα αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε εκπαιδευτικά και ερευνητικά περιβάλλοντα, όπου απαιτείται άμεση κατανόηση της επίδρασης ανθρώπινων δραστηριοτήτων ή περιβαλλοντικών παραγόντων στην ποιότητα του αέρα [12].

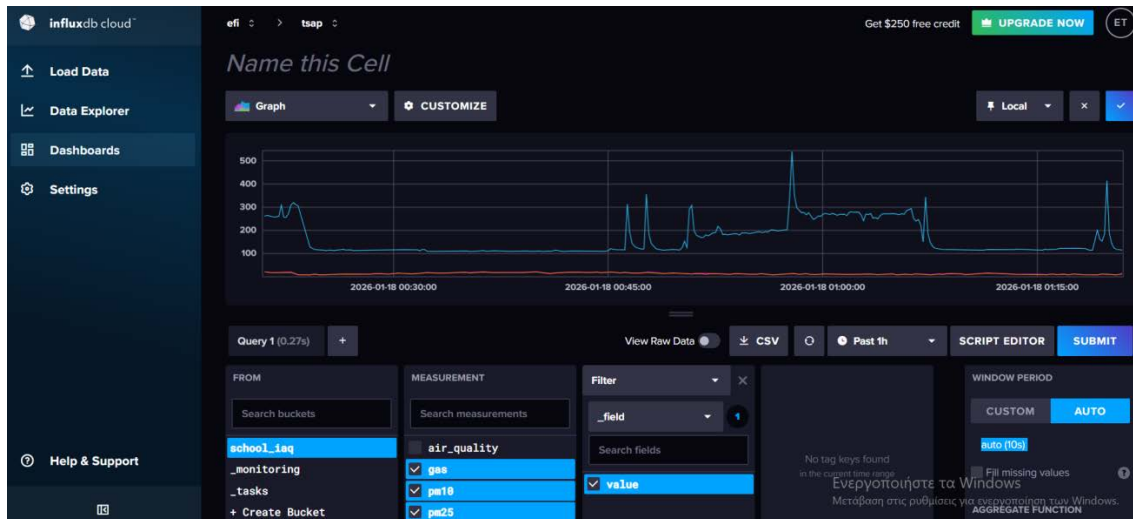
Συνολικά, το dashboard λειτουργεί ως βασικό εργαλείο εποπτείας του συστήματος, γεφυρώνοντας το επίπεδο αποθήκευσης δεδομένων με το επίπεδο ανάλυσης και αξιολόγησης. Η οπτικοποίηση των χρονοσειρών καθιστά δυνατή την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη συμπεριφορά του εσωτερικού περιβάλλοντος της σχολικής αίθουσας και αποτελεί θεμέλιο για την περαιτέρω ανάπτυξη μηχανισμών ειδοποίησης ή αυτοματοποιημένων παρεμβάσεων [6], [12].

Στο παρακάτω διάγραμμα της Εικόνας 24 και της Εικόνας 25 παρουσιάζεται συγκεντρωτική απεικόνιση των περιβαλλοντικών μετρήσεων που έχουν καταγραφεί από το σύστημα IoT και αποθηκευτεί στη βάση δεδομένων InfluxDB. Τα δεδομένα προέρχονται από το bucket **school\_iaq** και αφορούν τις παραμέτρους PM2.5, PM10 και gas, οι οποίες έχουν αποθηκευτεί ως ξεχωριστές χρονοσειρές (measurements) με κοινό χρονικό άξονα.

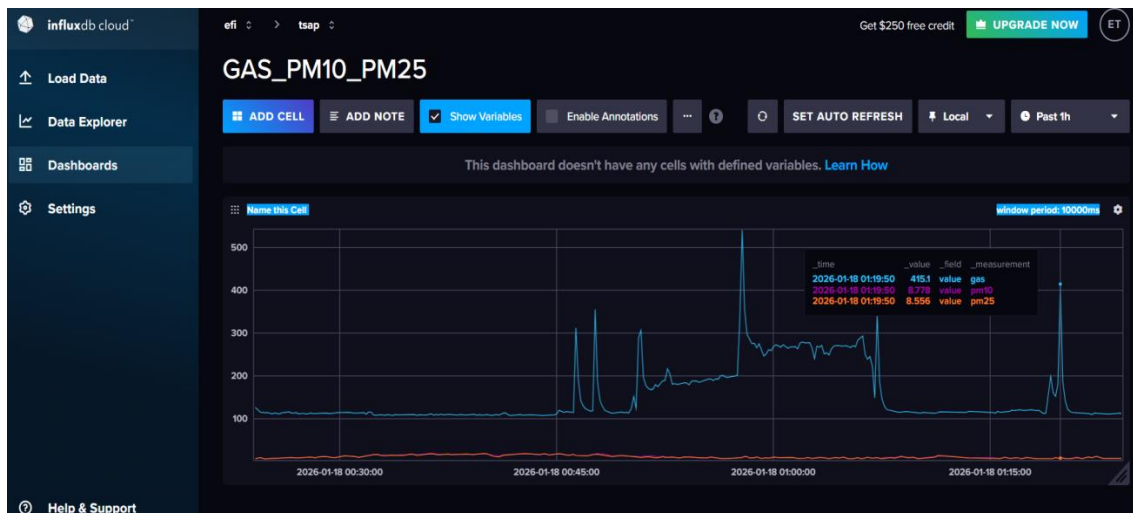
Στα δύο γραφήματα απεικονίζονται ταυτόχρονα οι τρεις μετρήσεις, επιτρέποντας την άμεση σύγκριση της εξέλιξής τους στον χρόνο. Η επιλογή κοινής απεικόνισης καθιστά δυνατή την παρατήρηση χρονικών συσχετίσεων μεταξύ των συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων και των ενδείξεων αερίων. Οι καμπύλες εμφανίζουν διαφορετικά επίπεδα τιμών, γεγονός που είναι αναμενόμενο, καθώς οι παράμετροι αυτές μετρώνται σε διαφορετικές κλίμακες και αντιστοιχούν σε διαφορετικά φυσικά μεγέθη.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι αιχμές που παρατηρούνται σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, οι οποίες υποδηλώνουν απότομες μεταβολές στις συνθήκες του

εσωτερικού περιβάλλοντος. Τέτοιου είδους μεταβολές μπορεί να σχετίζονται με ανθρώπινη δραστηριότητα εντός της αίθουσας, με αλλαγές στον αερισμό ή με εξωτερικούς παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα του αέρα. Η δυνατότητα ταυτόχρονης παρακολούθησης όλων των παραμέτρων διευκολύνει την ερμηνεία τέτοιων φαινομένων και την εξαγωγή συμπερασμάτων.



Εικόνα 24: Δημιουργία Dashboard απεικόνισης μετρήσεων



Εικόνα 25: Dashboard απεικόνιση μετρήσεων

Η συγκεκριμένη μορφή οπτικοποίησης λειτουργεί ως εργαλείο συνολικής εποπτείας του συστήματος, καθώς παρέχει άμεση εικόνα της κατάστασης της ποιότητας του αέρα

σε πραγματικό χρόνο αλλά και ιστορικά. Παράλληλα, υποστηρίζει τη μεταγενέστερη ανάλυση των δεδομένων και αποτελεί βασικό υπόβαθρο για την ανάπτυξη μηχανισμών ειδοποίησης ή αυτοματοποιημένων παρεμβάσεων σε περιβάλλοντα εκπαιδευτικών χώρων [6], [12].

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης της InfluxDB είναι η άμεση συμβατότητά της με εργαλεία οπτικοποίησης όπως το **Grafana**. Η αποθήκευση των δεδομένων σε μορφή χρονοσειρών επιτρέπει την εύκολη δημιουργία γραφημάτων, την ανίχνευση τάσεων και τη σύγκριση ιστορικών περιόδων, χωρίς πρόσθετη επεξεργασία. Αυτό καθιστά τη βάση δεδομένων κρίσιμο στοιχείο για την ανάλυση της ποιότητας του αέρα και την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συστήματος σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας [12], [6].

Συνολικά, η InfluxDB προσφέρει μία αξιόπιστη και επεκτάσιμη λύση αποθήκευσης δεδομένων για εφαρμογές IoT, υποστηρίζοντας τόσο τη συνεχή παρακολούθηση όσο και τη μεταγενέστερη ανάλυση των περιβαλλοντικών παραμέτρων. Η ενσωμάτωσή της στο προτεινόμενο σύστημα ενισχύει τη συνολική αρχιτεκτονική και δημιουργεί τη βάση για προηγμένες λειτουργίες οπτικοποίησης και αξιολόγησης, οι οποίες παρουσιάζονται στο επόμενο υποκεφάλαιο.

### 3.4.5 Grafana

Το Grafana αποτελεί μία πλατφόρμα ανοιχτού λογισμικού για την οπτικοποίηση και παρακολούθηση δεδομένων, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές Internet of Things (IoT), συστήματα παρακολούθησης και ανάλυσης χρονοσειρών. Το Grafana δεν αποθηκεύει δεδομένα, αλλά λειτουργεί ως εργαλείο ανάκτησης και απεικόνισης πληροφοριών που προέρχονται από εξωτερικές πηγές, όπως βάσεις δεδομένων τύπου time-series.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, το Grafana χρησιμοποιείται για την οπτικοποίηση των δεδομένων ποιότητας αέρα που έχουν αποθηκευτεί στη βάση δεδομένων InfluxDB. Η χρήση του επιτρέπει την εύκολη δημιουργία γραφημάτων, τη σύγκριση διαφορετικών περιβαλλοντικών παραμέτρων και την εποπτεία της εξέλιξης των μετρήσεων στον χρόνο, χωρίς να απαιτείται σύνθετη επεξεργασία των δεδομένων [9], [12].

### 3.4.5.1 Διασύνδεση του Grafana με την InfluxDB

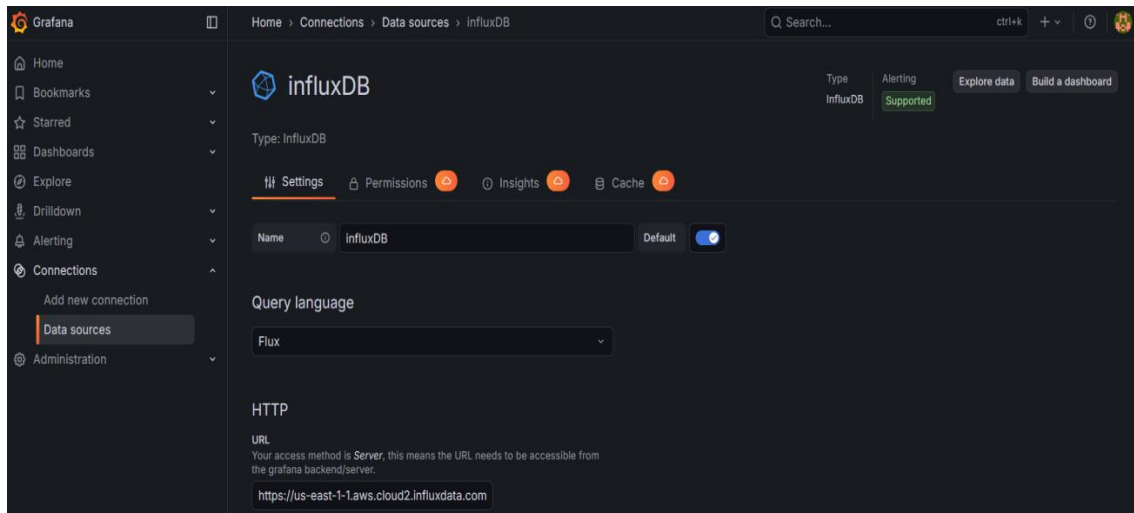
Για να μπορέσει το Grafana να απεικονίσει τα δεδομένα, απαιτείται αρχικά η διασύνδεσή του με τη βάση δεδομένων InfluxDB. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται μέσω της προσθήκης της InfluxDB ως *data source* στο περιβάλλον του Grafana.

Κατά τη ρύθμιση του data source, δηλώνονται τα βασικά στοιχεία σύνδεσης, όπως η διεύθυνση του server, το bucket που περιέχει τα δεδομένα και τα απαραίτητα στοιχεία αυθεντικοποίησης. Μετά την επιτυχή σύνδεση, το Grafana αποκτά πρόσβαση στις χρονοσειρές που έχουν καταγραφεί στη βάση και μπορεί να τις ανακτήσει δυναμικά για απεικόνιση.

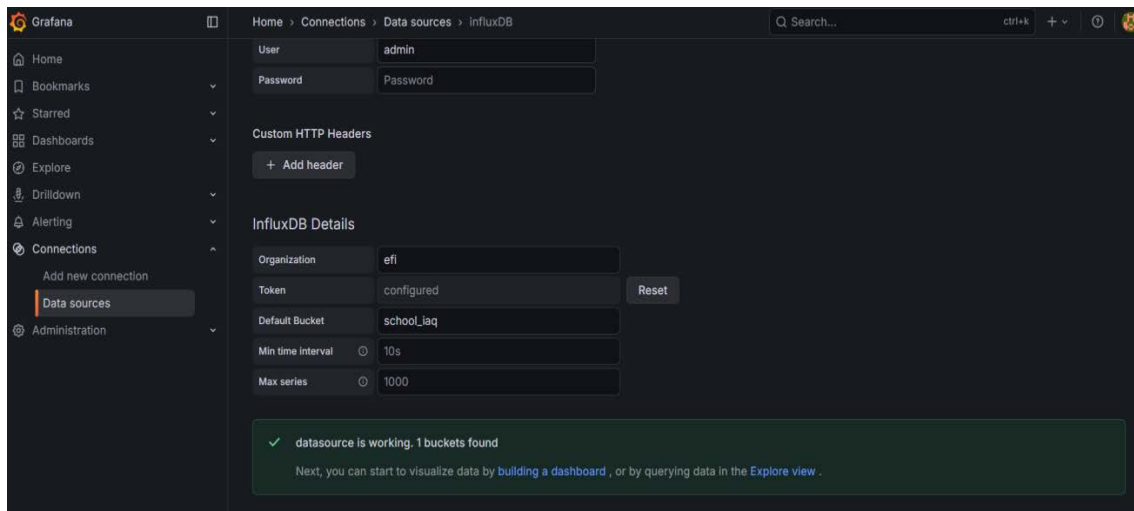
Αναλυτικά στη δική μας μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία όπως φαίνεται και στις Εικόνες 26, 27 κάναμε αρχικά τοπική εγκατάσταση του Grafana στον υπολογιστή μας, ανοίξαμε browser και πήγαμε στο <http://localhost:3000> , ορίσαμε νέο username , password και προχωρήσαμε στη Διασύνδεση Grafana με InfluxDB βάζοντας τις κατάλληλες ρυθμίσεις.απο το Connections και Data sources. Αρκετά σημαντική η διασύνδεση όπου απαιτεί τη χρήση του σωστού regional endpoint της InfluxDB Cloud, καθώς κάθε οργανισμός φιλοξενείται σε συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή.

Ρυθμίσεις στο Grafana:

- Query Language: Flux
- URL: <https://eu-central-1-1.aws.cloud2.influxdata.com>
- Organization: efi
- Bucket: school\_iaq
- Token: το ίδιο που δημιουργήσαμε στην InfluxDB



Εικόνα 26: Ρυθμίσεις διασύνδεσης Grafana – InfluxDB (language/url)



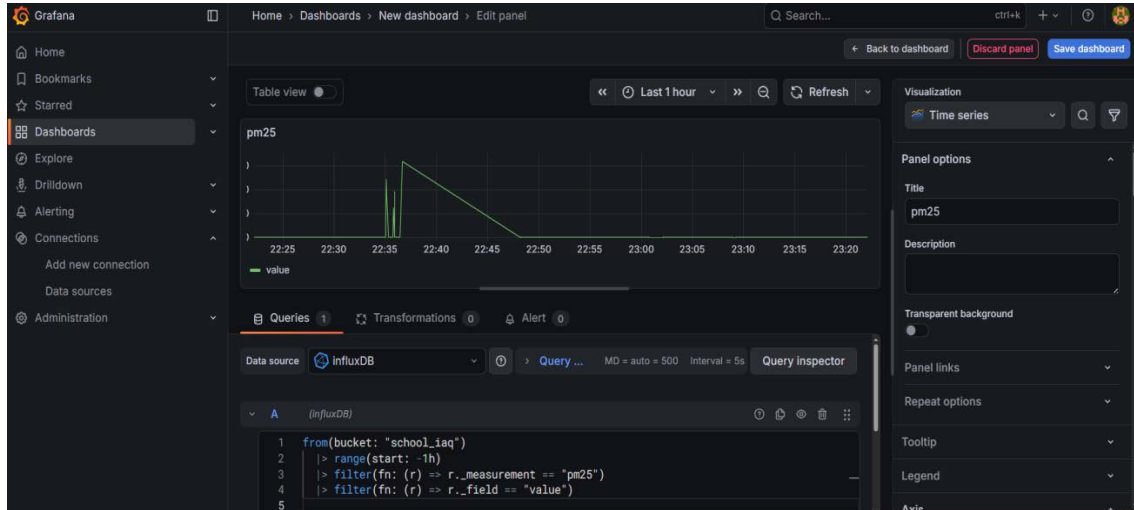
Εικόνα 27: Ρυθμίσεις διασύνδεσης Grafana – InfluxDB (organization,token,bucket)

### 3.4.5.2 Δημιουργία Dashboard στο Grafana

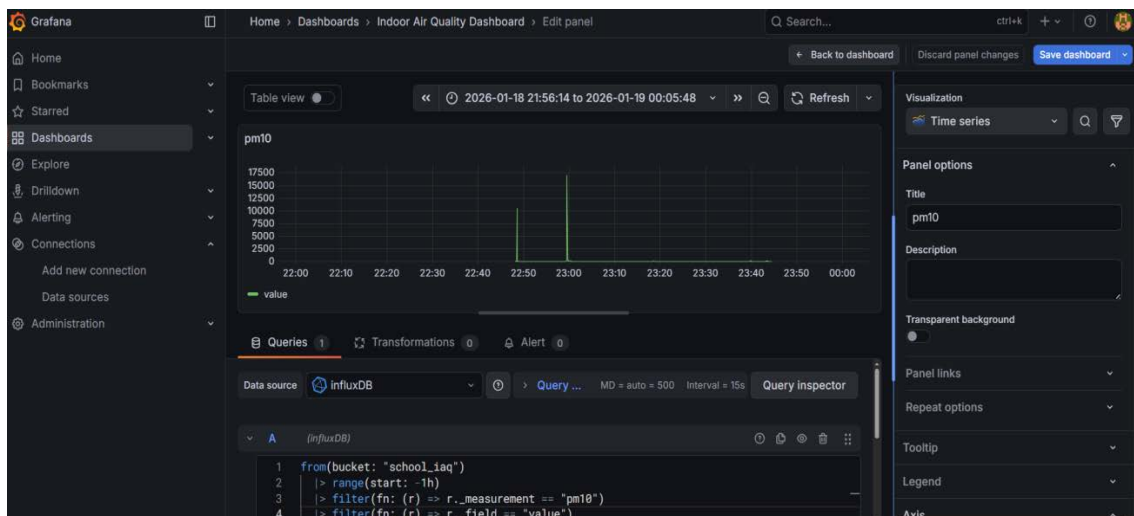
Μετά τη ρύθμιση της πηγής δεδομένων, δημιουργείται ένα νέο dashboard στο Grafana, το οποίο λειτουργεί ως κεντρικός χώρος απεικόνισης των μετρήσεων. Ένα dashboard αποτελείται από επιμέρους γραφήματα (panels), καθένα από τα οποία μπορεί να απεικονίζει μία ή περισσότερες χρονοσειρές.

Στην παρούσα υλοποίηση, δημιουργήθηκε dashboard που περιλαμβάνει γραφήματα για τις μετρήσεις PM2.5, PM10 και gas όπως φαίνονται και στις Εικόνες 28, 29, 30. Κάθε ένα από τα τρία panel ανακτά δεδομένα από το αντίστοιχο measurement της βάσης

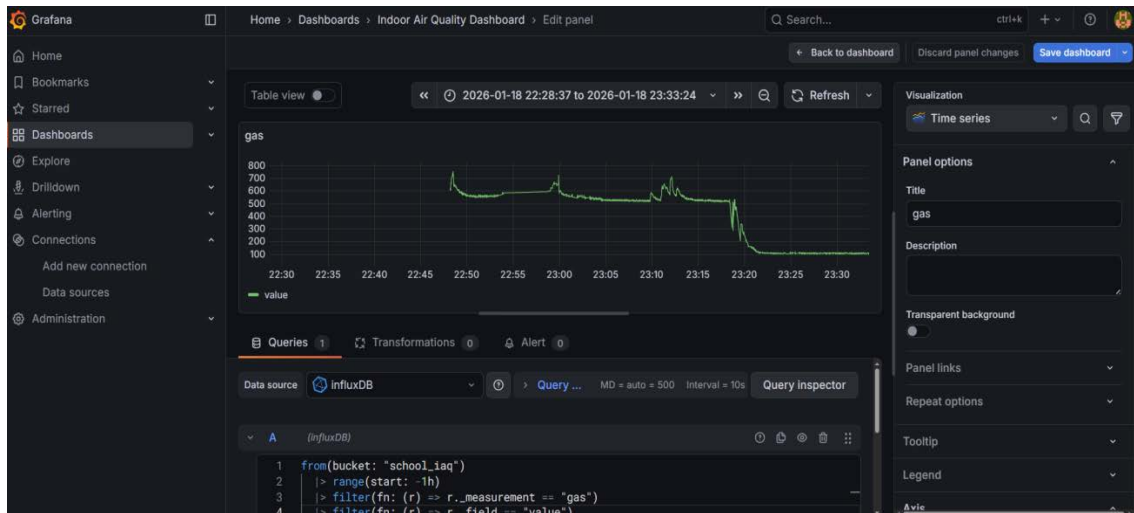
δεδομένων InfluxDB και τα απεικονίζει σε συνάρτηση με τον χρόνο. Η χρήση κοινής χρονικής κλίμακας επιτρέπει την άμεση σύγκριση των παραμέτρων και τη διερεύνηση πιθανών συσχετίσεων μεταξύ τους.



Εικόνα 28: Dashboard pm25



Εικόνα 29: Dashboard pm10



Εικόνα 30: Dashboard Gas

Για την απεικόνιση των περιβαλλοντικών δεδομένων στο dashboard του Grafana χρησιμοποιήθηκαν τρία ανεξάρτητα ερωτήματα (queries) στη γλώσσα Flux, Εικόνα 31, καθένα από τα οποία αντιστοιχεί σε μία διαφορετική παράμετρο ποιότητας αέρα. Τα ερωτήματα ανακτούν δεδομένα από τη βάση δεδομένων InfluxDB και βασίζονται στην ίδια λογική δομή, διαφοροποιούμενα μόνο ως προς το measurement που επιλέγεται.

Κάθε query αρχικά ορίζει το bucket από το οποίο ανακτώνται τα δεδομένα και το χρονικό εύρος ενδιαφέροντος, το οποίο στην παρούσα υλοποίηση περιορίζεται στην τελευταία μία ώρα. Στη συνέχεια εφαρμόζεται φίλτρο επιλογής του κατάλληλου measurement, ώστε να ανακτηθούν αποκλειστικά οι τιμές που αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη περιβαλλοντική παράμετρο (PM2.5, PM10 ή gas). Τέλος, επιλέγεται το πεδίο *value*, το οποίο περιέχει τις αριθμητικές μετρήσεις των αισθητήρων.

Η χρήση ξεχωριστών queries για κάθε παράμετρο επιτρέπει την ανεξάρτητη απεικόνιση των χρονοσειρών και τη σαφή διάκριση των μετρήσεων στο dashboard. Παράλληλα, η κοινή χρονική αναφορά των ερωτημάτων διευκολύνει τη συγκριτική ανάλυση της συμπεριφοράς των διαφορετικών παραμέτρων και την αναγνώριση πιθανών συσχετίσεων μεταξύ τους. Η προσέγγιση αυτή ενισχύει τη σαφήνεια της οπτικοποίησης και καθιστά το dashboard κατάλληλο για εποπτεία και ανάλυση δεδομένων ποιότητας αέρα σε πραγματικό χρόνο [6], [12].

```
A (influxDB)
1 from(bucket: "school_iaq")
2   |> range(start: -1h)
3   |> filter(fn: (r) => r._measurement == "pm25")
4   |> filter(fn: (r) => r._field == "value")
5
A (influxDB)
1 from(bucket: "school_iaq")
2   |> range(start: -1h)
3   |> filter(fn: (r) => r._measurement == "pm10")
4   |> filter(fn: (r) => r._field == "value")
5
A (influxDB)
1 from(bucket: "school_iaq")
2   |> range(start: -1h)
3   |> filter(fn: (r) => r._measurement == "gas")
4   |> filter(fn: (r) => r._field == "value")
```

Εικόνα 31: Queries Grafana

Τα γραφήματα που παράγονται στο Grafana όπως εμφανίζονται στην Εικόνα 32 παρέχουν σαφή εικόνα της χρονικής εξέλιξης των περιβαλλοντικών παραμέτρων. Οι αυξομειώσεις στις συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων και οι μεταβολές στις ενδείξεις gas μπορούν να συσχετιστούν με γεγονότα που λαμβάνουν χώρα στον χώρο, όπως ανθρώπινη δραστηριότητα, μεταβολές στον αερισμό ή εξωτερικές επιδράσεις.

Η ύπαρξη αιχμών (spikes) στις χρονοσειρές αποτελεί αναμενόμενο φαινόμενο σε πραγματικά συστήματα παρακολούθησης ποιότητας αέρα και αναδεικνύει τη δυναμική φύση του εσωτερικού περιβάλλοντος. Μέσω του Grafana, ο χρήστης μπορεί να εντοπίζει τέτοιες μεταβολές, να εξετάζει τη διάρκειά τους και να αξιολογεί τη συνολική συμπεριφορά του συστήματος.

Το τελικό dashboard που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον του Grafana συγκεντρώνει τις βασικές περιβαλλοντικές παραμέτρους που παρακολουθούνται από το προτεινόμενο σύστημα ποιότητας αέρα. Όπως παρουσιάζεται στα τελικά panels, οι μετρήσεις των PM2.5, PM10 και gas απεικονίζονται σε ξεχωριστά γραφήματα χρονοσειράς,

επιτρέποντας την ανεξάρτητη αλλά και συγκριτική παρακολούθησή τους σε κοινό χρονικό πλαίσιο.

Τα γραφήματα των αιωρούμενων σωματιδίων PM2.5 και PM10 εμφανίζουν διακυμάνσεις με σχετικά υψηλή συχνότητα, γεγονός που υποδηλώνει τη δυναμική επίδραση ανθρώπινων δραστηριοτήτων και περιβαλλοντικών συνθηκών στο εσωτερικό της αίθουσας. Αντίστοιχα, το γράφημα του αισθητήρα gas παρουσιάζει πιο ομαλή μεταβολή, με σταδιακές αυξομειώσεις, στοιχείο που συνάδει με τη διαφορετική φύση της συγκεκριμένης μέτρησης και τον τρόπο απόκρισης του αισθητήρα.

Η διάκριση των παραμέτρων σε ξεχωριστά panels βελτιώνει τη σαφήνεια της οπτικοποίησης και καθιστά το dashboard εύχρηστο για εποπτεία σε πραγματικό χρόνο. Παράλληλα, η κοινή χρονική αναφορά των γραφημάτων διευκολύνει την αναγνώριση πιθανών συσχετίσεων μεταξύ των μεταβλητών, προσφέροντας ουσιαστική υποστήριξη στη διαδικασία ανάλυσης της ποιότητας του αέρα.

Συνολικά, το τελικό dashboard λειτουργεί ως το ανώτερο επίπεδο παρουσίασης του συστήματος, γεφυρώνοντας την αποθήκευση δεδομένων στη βάση InfluxDB με την ερμηνεία και αξιολόγηση των μετρήσεων. Η υλοποίηση αυτή αποδεικνύει τη λειτουργικότητα και την επεκτασιμότητα της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής και θέτει τις βάσεις για μελλοντική ενσωμάτωση μηχανισμών ειδοποίησης ή αυτοματοποιημένων παρεμβάσεων σε εκπαιδευτικά περιβάλλοντα [6], [12].



Εικόνα 32: Τελικό Dashboard Grafana με γραφήματα PM2.5, PM10 και gas

### 3.5 Ροή δεδομένων (Data Flow) του Συστήματος IoT

Η ροή δεδομένων (data flow) αποτελεί κρίσιμο στοιχείο της συνολικής αρχιτεκτονικής του προτεινόμενου συστήματος IoT, καθώς καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο οι μετρήσεις από το φυσικό περιβάλλον συλλέγονται, μεταφέρονται, αποθηκεύονται, επεξεργάζονται και τελικά οπτικοποιούνται. Στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, η ροή δεδομένων έχει σχεδιαστεί με γνώμονα την αξιοπιστία, τη χαμηλή καθυστέρηση (low latency) και την επεκτασιμότητα, ακολουθώντας τις αρχές σύγχρονων IoT αρχιτεκτονικών για εφαρμογές παρακολούθησης ποιότητας αέρα (IAQ) [5], [6].

#### 3.5.1 Συλλογή Δεδομένων στο Επίπεδο Αισθητήρων

Η διαδικασία ξεκινά στο επίπεδο αντίληψης (Perception Layer), όπου οι αισθητήρες PMS5003 και MQ-2 συλλέγουν δεδομένα από το εσωτερικό περιβάλλον της σχολικής αίθουσας. Ο αισθητήρας PMS5003 παρέχει ψηφιακές μετρήσεις αιωρούμενων σωματιδίων PM1.0, PM2.5 και PM10 σε μονάδες  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  μέσω σειριακής επικοινωνίας (UART), ενώ ο MQ-2 αποδίδει αναλογική τιμή που αντιστοιχεί στη γενική επιβάρυνση της ατμόσφαιρας από καπνό ή εύφλεκτα αέρια (Gas/Smoke Index) [12], [14].

Ο μικροελεγκτής Wemos D1 R2 (ESP8266) αναλαμβάνει την ανάγνωση των μετρήσεων σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα (sampling interval), τα οποία στην παρούσα υλοποίηση κυμαίνονται μεταξύ 5 και 30 δευτερολέπτων, ώστε να επιτυγχάνεται ισορροπία μεταξύ επάρκειας δεδομένων και αποδοτικής χρήσης πόρων [5].

#### 3.5.2 Τοπική Επεξεργασία και Προετοιμασία Δεδομένων (Edge Processing)

Πριν από τη μετάδοση των δεδομένων, πραγματοποιείται βασική τοπική επεξεργασία (edge processing) στον μικροελεγκτή. Η επεξεργασία αυτή περιλαμβάνει:

- έλεγχο εγκυρότητας των μετρήσεων (π.χ. αποφυγή μηδενικών ή μη ρεαλιστικών τιμών),
- υπολογισμό μέσων όρων (moving average) για μείωση θορύβου,

- μορφοποίηση των δεδομένων σε δομή JSON,
- προσθήκη χρονικής σήμανσης (timestamp).

Η χρήση edge processing μειώνει τον όγκο των μεταδιδόμενων δεδομένων και αυξάνει τη σταθερότητα του συστήματος, ακολουθώντας πρακτικές που προτείνονται στη σύγχρονη βιβλιογραφία IoT [13].

### 3.5.3 Μετάδοση Δεδομένων μέσω MQTT

Η μετάδοση των δεδομένων από το επίπεδο υλικού προς το κεντρικό σύστημα πραγματοποιείται μέσω του πρωτοκόλλου MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Το Wemos D1 R2 λειτουργεί ως MQTT publisher και δημοσιεύει τις μετρήσεις σε προκαθορισμένα topics, όπως:

- school/iaq/pm25
- school/iaq/pm10
- school/iaq/gas
- school/iaq/alert

Το MQTT επιλέχθηκε λόγω του ελαφρού χαρακτήρα του, της χαμηλής κατανάλωσης πόρων και της αξιοπιστίας του σε περιβάλλοντα με περιορισμένες δυνατότητες δικτύου, χαρακτηριστικά που το καθιστούν ιδανικό για εφαρμογές IoT σε εκπαιδευτικούς χώρους [5], [13].

### 3.5.4 Διαχείριση Ροής στο Node-RED

Το Node-RED λειτουργεί ως κεντρικό middleware του συστήματος, αναλαμβάνοντας τον ρόλο του MQTT subscriber. Οι ροές (flows) που έχουν υλοποιηθεί στο Node-RED εκτελούν τα εξής στάδια:

- λήψη των MQTT μηνυμάτων από τον broker,
- αποκωδικοποίηση των JSON δεδομένων,
- έλεγχο ορίων (thresholds) σύμφωνα με διεθνείς οδηγίες (π.χ. WHO για PM2.5),
- δρομολόγηση των δεδομένων προς τη βάση InfluxDB,
- ενεργοποίηση ειδοποιήσεων (alerts) σε περιπτώσεις υπέρβασης ορίων.

Η γραφική φύση του Node-RED διευκολύνει τη γρήγορη τροποποίηση και επέκταση της ροής δεδομένων, γεγονός που το καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλο για εκπαιδευτικά και πειραματικά περιβάλλοντα [6].

### 3.5.5 Αποθήκευση Δεδομένων στην InfluxDB

Τα δεδομένα αποθηκεύονται σε βάση δεδομένων χρονοσειρών InfluxDB, η οποία έχει σχεδιαστεί ειδικά για τη διαχείριση μεγάλου όγκου χρονικά εξαρτώμενων δεδομένων αισθητήρων. Κάθε εγγραφή περιλαμβάνει:

- timestamp,
- τιμές PM2.5, PM10 και Gas Index,
- tags (π.χ. τοποθεσία, τύπος αισθητήρα).

Η επιλογή της InfluxDB επιτρέπει αποδοτικά ερωτήματα, ιστορική ανάλυση και υποστήριξη προγνωστικών μοντέλων, όπως αυτά που παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια [6], [14].

### 3.5.6 Οπτικοποίηση και Ανάλυση μέσω Grafana

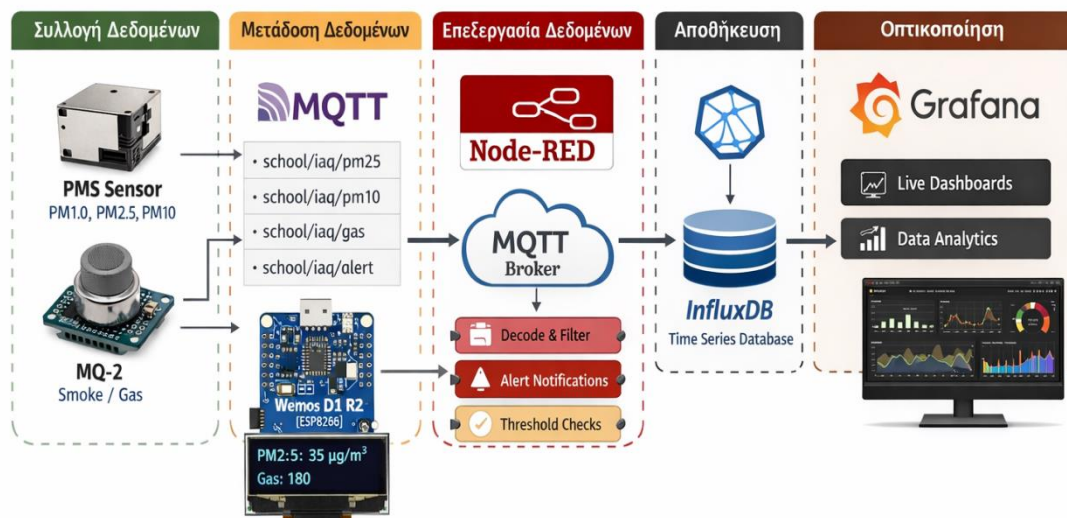
Στο τελικό στάδιο της ροής, το Grafana αντλεί δεδομένα από την InfluxDB και τα παρουσιάζει σε μορφή γραφημάτων και dashboards. Οι χρήστες (εκπαιδευτικοί ή μαθητές) μπορούν να παρακολουθούν:

- την εξέλιξη των PM2.5 και PM10 σε πραγματικό χρόνο,
- τις ημερήσιες και εβδομαδιαίες τάσεις,
- ενδείξεις υπέρβασης ορίων ποιότητας αέρα,
- βασικές προβλέψεις μέσω απλών μοντέλων παλινδρόμησης.

Η οπτικοποίηση αυτή ενισχύει την κατανόηση των δεδομένων και καθιστά το σύστημα όχι μόνο εργαλείο παρακολούθησης, αλλά και εκπαιδευτικό μέσο ανάλυσης περιβαλλοντικών δεδομένων [3], [7].

Το παρακάτω διάγραμμα της Εικόνας 33 απεικονίζει τη συνολική ροή δεδομένων του συστήματος IoT, ξεκινώντας από το επίπεδο αντίληψης, όπου οι αισθητήρες PMS5003 και MQ-2 συλλέγουν δεδομένα από το περιβάλλον της σχολικής αίθουσας. Οι μετρήσεις αποστέλλονται στον μικροελεγκτή Wemos D1 R2 (ESP8266), όπου πραγματοποιείται βασική τοπική επεξεργασία και στη συνέχεια δημοσιεύονται μέσω

του πρωτοκόλλου MQTT σε κατάλληλα θεματικά κανάλια (topics). Το Node-RED λειτουργεί ως middleware, αναλαμβάνοντας τη λήψη, φιλτράρισμα και δρομολόγηση των δεδομένων προς τη βάση InfluxDB για αποθήκευση χρονοσειρών, καθώς και τη δημιουργία ειδοποιήσεων (alerts). Τέλος, το Grafana αντλεί δεδομένα από την InfluxDB και παρέχει δυναμικά dashboards για οπτικοποίηση, ανάλυση και υποστήριξη λήψης αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο [5], [6], [14].



Εικόνα 33: Ροή Δεδομένων Συστήματος IoT

### 3.6 Έξυπνες Λειτουργίες Συστήματος με Ενσωμάτωση Machine Learning (Linear Regression / Polynomial Regression)

Στα σύγχρονα συστήματα Internet of Things (IoT), η έννοια της «έξυπνης λειτουργίας» (smart functionality) υπερβαίνει την απλή συλλογή και απεικόνιση δεδομένων αισθητήρων. Ένα σύστημα χαρακτηρίζεται ως έξυπνο όταν είναι σε θέση να επεξεργάζεται τα δεδομένα που συλλέγει, να εξάγει γνώση και να υποστηρίζει τη λήψη αποφάσεων, είτε αυτόνομα είτε υποβοηθούμενα από τον χρήστη και ενσωματώνει μηχανισμούς πρόβλεψης και υποστήριξης αποφάσεων μέσω αλγορίθμων μηχανικής μάθησης [6], [13].

Στο πλαίσιο της παρακολούθησης ποιότητας αέρα (Indoor Air Quality – IAQ), οι έξυπνες λειτουργίες περιλαμβάνουν:

- την ανάλυση ιστορικών δεδομένων,

- την πρόβλεψη μελλοντικών τιμών ρύπων,
- την έγκαιρη ενεργοποίηση ειδοποιήσεων (alerts),
- και τη δυνατότητα αυτοματοποιημένων ενεργειών, όπως ο αερισμός της αίθουσας.

Η ενσωμάτωση τεχνικών μηχανικής μάθησης σε συστήματα IoT επιτρέπει τη μετάβαση από το απλό monitoring στο predictive monitoring, βελτιώνοντας τη λειτουργικότητα και την πρακτική αξία του συστήματος [5], [6]. Ιδιαίτερα σε σχολικά περιβάλλοντα, η πρόβλεψη μεταβολών της ποιότητας του αέρα μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της υγείας και της συγκέντρωσης μαθητών και εκπαιδευτικών [3], [7].

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, ως έξυπνη λειτουργία ορίζεται η χρήση αλγορίθμων παλινδρόμησης (linear και polynomial regression) για την εκτίμηση της μελλοντικής εξέλιξης των τιμών PM2.5 και Gas Index, βασισμένη σε πραγματικά δεδομένα που συλλέγονται από το σύστημα IoT.

### 3.6.1 Θεωρητικό υπόβαθρο Linear & Polynomial Regression

Η παλινδρόμηση (regression) αποτελεί μία από τις βασικότερες τεχνικές της επιβλεπόμενης μηχανικής μάθησης και χρησιμοποιείται ευρέως για την πρόβλεψη συνεχών μεταβλητών, ιδιαίτερα σε εφαρμογές χρονοσειρών και περιβαλλοντικών δεδομένων [13].

#### Γραμμική Παλινδρόμηση (Linear Regression):

Η γραμμική παλινδρόμηση μοντελοποιεί τη σχέση μεταξύ μίας ανεξάρτητης μεταβλητής  $x$  (π.χ. χρόνος) και μίας εξαρτημένης μεταβλητής  $y$  (π.χ. PM2.5), μέσω μιας ευθείας γραμμής:

$$y = ax + b$$

όπου:

- $a$  είναι ο συντελεστής κλίσης,
- $b$  είναι η σταθερά (intercept).

Η linear regression χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές IoT λόγω της απλότητας, της χαμηλής υπολογιστικής πολυπλοκότητας και της ευκολίας ερμηνείας των αποτελεσμάτων [5], [6]. Ωστόσο, αδυνατεί να περιγράψει μη γραμμικές μεταβολές που παρατηρούνται συχνά σε δεδομένα ποιότητας αέρα.

### **Πολυωνυμική Παλινδρόμηση (Polynomial Regression)**

Η πολυωνυμική παλινδρόμηση επεκτείνει τη γραμμική μορφή, επιτρέποντας την προσαρμογή καμπυλών στα δεδομένα:

$$y=ax^2 + bx + c$$

Η polynomial regression είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις όπου οι μεταβολές των ρύπων παρουσιάζουν μη γραμμική συμπεριφορά, όπως αιχμές λόγω συνωστισμού ή απότομες αυξήσεις λόγω καπνού ή αερισμού [13], [14].

Στην παρούσα εργασία, εφαρμόζονται και οι δύο τεχνικές, με στόχο τη σύγκριση της απόδοσής τους και την αξιολόγηση της καταλληλότητάς τους για εφαρμογές σχολικού περιβάλλοντος.

### **3.6.2 Συλλογή και προετοιμασία δεδομένων**

Για την εφαρμογή των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης απαιτείται η ύπαρξη ιστορικών δεδομένων. Τα δεδομένα συλλέγονται από το σύστημα IoT και αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων InfluxDB ως χρονοσειρές.

Στην παρούσα πειραματική εφαρμογή της διπλωματικής μας εργασίας, τα δεδομένα εξάγονται σε μορφή αρχείου CSV και περιλαμβάνουν:

- χρονική σήμανση (timestamp),
- τιμές PM2.5,
- τιμές PM10,
- τιμές Gas / Smoke Index.

Πριν την ανάλυση, πραγματοποιείται βασική προεπεξεργασία:

- απομάκρυνση ελλειπών ή μη έγκυρων τιμών,
- μετατροπή χρονικών δεδομένων σε αριθμητική μορφή,

- κανονικοποίηση ή εξομάλυνση (όπου απαιτείται).

Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη για τη βελτίωση της ακρίβειας των μοντέλων παλινδρόμησης και συνάδει με τις προτεινόμενες πρακτικές στη βιβλιογραφία μας [5], [13].

### 3.6.3 Πειραματική εφαρμογή σε Python

Για την υλοποίηση των μοντέλων παλινδρόμησης χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού Python, η οποία προσφέρει πληθώρα βιβλιοθηκών για ανάλυση δεδομένων και μηχανική μάθηση. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν οι βιβλιοθήκες `pandas`, `numpy`, `matplotlib` και `scikit-learn`.

Η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει:

- φόρτωση δεδομένων από τρία αρχεία CSV (`pm25.csv`, `pm10.csv`, `gas.csv`),
- εφαρμογή γραμμικής παλινδρόμησης, πολυωνυμικής παλινδρόμησης,
- γραφική απεικόνιση πραγματικών και προβλεπόμενων τιμών.

Λόγω της ανεξάρτητης αποθήκευσης των μετρήσεων ανά αισθητήρα, τα δεδομένα εξήχθησαν σε τρία ξεχωριστά αρχεία CSV και ενοποιήθηκαν σε ενιαίο σύνολο δεδομένων βάσει της χρονικής σήμανσης, με χρήση της γλώσσας Python [13]. Αρχικά αντιμετωπίσαμε δυσκολίες με τις ονομασίες των στηλών στο CSV γιατί δεν υπήρχαν στήλες με όνομα `time` και `pm25` στο CSV και αυτό συμβαίνει γιατί το Grafana δεν κατεβάζει πάντα τις στήλες ως `_time`, `_value`. Έτσι διορθώσαμε τον αρχικό κώδικα όπου διάβασε σωστά το CSV και βρήκε χρόνο & τιμή μέσα στις στήλες όπως φαίνεται και στον παρακάτω κώδικα `iaq_regression.py` της python.

Παραθέτουμε τον πλήρη κώδικα **iaq\_regression.py** σε python :

```

File Edit Format Run Options Window Help
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn.linear_model import LinearRegression
from sklearn.preprocessing import PolynomialFeatures

# =====
# Συνάρτηση φόρτωσης CSV από Grafana
# =====

def load_grafana_csv(filename, value_name):
    df = pd.read_csv(filename)

    print(f"\nΣτήλες στο {filename}:")
    print(df.columns)

    time_col = None
    for col in df.columns:
        if "time" in col.lower():
            time_col = col
            break

    value_col = None
    for col in df.columns:
        if "value" in col.lower():
            value_col = col
            break

    if time_col is None or value_col is None:
        raise ValueError(f"Δεν βρέθηκαν στήλες χρόνου/τιμών στο {filename}")

    df = df[[time_col, value_col]]
    df.columns = ["time", value_name]

    return df

# =====
# 1. Φόρτωση CSV αρχείων
# =====

pm25 = load_grafana_csv("pm25.csv", "pm25")
pm10 = load_grafana_csv("pm10.csv", "pm10")
gas = load_grafana_csv("gas.csv", "gas")

```

```

# =====
# 2. Merge δεδομένων βάσει χρόνου
# =====

data = pm25.merge(pm10, on="time", how="inner") \
        .merge(gas, on="time", how="inner")

data = data.dropna()

print("\nΕνοποιημένα δεδομένα:")
print(data.head())

# =====
# 3. Συνάρτηση παλινδρόμησης & γραφήματος
# =====

def plot_regression(y, label):
    X = np.arange(len(y)).reshape(-1, 1)

    lin = LinearRegression()
    lin.fit(X, y)
    y_lin = lin.predict(X)

    poly = PolynomialFeatures(degree=2)
    X_poly = poly.fit_transform(X)
    poly_model = LinearRegression()
    poly_model.fit(X_poly, y)
    y_poly = poly_model.predict(X_poly)

    plt.figure(figsize=(10, 5))
    plt.scatter(X, y, s=10, label=f"Πραγματικές τιμές {label}")
    plt.plot(X, y_lin, label="Linear Regression")
    plt.plot(X, y_poly, label="Polynomial Regression")
    plt.xlabel("Χρόνος (δείγμα)")
    plt.ylabel(label)
    plt.title(f"Πρόβλεψη {label}")
    plt.legend()
    plt.grid(True)
    plt.tight_layout()
    plt.show()

# =====
# 4. Κλήσεις (ΑΚΡΙΒΩΣ 3 plots)
# =====

plot_regression(data["pm25"].values, "PM2.5 (µg/m³)")
plot_regression(data["pm10"].values, "PM10 (µg/m³)")
plot_regression(data["gas"].values, "Gas Index")
|

```

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 34 ο κώδικας διάβασε σωστά τον χρόνο και τις τιμές από τα csv αρχεία: `Index(['Time', 'Value'], dtype='object')`, η συνένωση (merge) των τριών αρχείων csv έγινε σωστά βάσει time, η παλινδρόμηση λειτουργεί όπως πρέπει σε IAQ δεδομένα.

```

Python 3.13.9 (tags/v3.13.9:8183fa5, Oct 14 2025, 14:09:13) [MSC v.1944 64 bit (AMD64)] on win32
Enter "help" below or click "Help" above for more information.
>>>
===== RESTART: C:\Users\MARIA\Desktop\ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ\iaq_ml\iaq_regression.py =====

Στήλες στο pm25.csv:
Index(['Time', 'value'], dtype='object')

Στήλες στο pm10.csv:
Index(['Time', 'value'], dtype='object')

Στήλες στο gas.csv:
Index(['Time', 'value'], dtype='object')

Ενοποιημένα δεδομένα:
      time  pm25  pm10  gas
0  2026-01-21 00:11:55    29    29   129
1  2026-01-21 00:11:56    28    29   125
2  2026-01-21 00:11:57    28    29   130
3  2026-01-21 00:11:58    28    29   125
4  2026-01-21 00:11:59    28    29   122

```

Εικόνα 34: Ενοποιημένα Δεδομένα IDLE

Από το IDLE βλέπουμε:

```

Στήλες στο pm25.csv: ['Time', 'value']
Στήλες στο pm10.csv: ['Time', 'value']
Στήλες στο gas.csv: ['Time', 'value']

```

και μετά:

```

time                pm25  pm10  gas
2026-01-21 12:11:55    29    29   129
2026-01-21 12:11:56    28    29   125

```

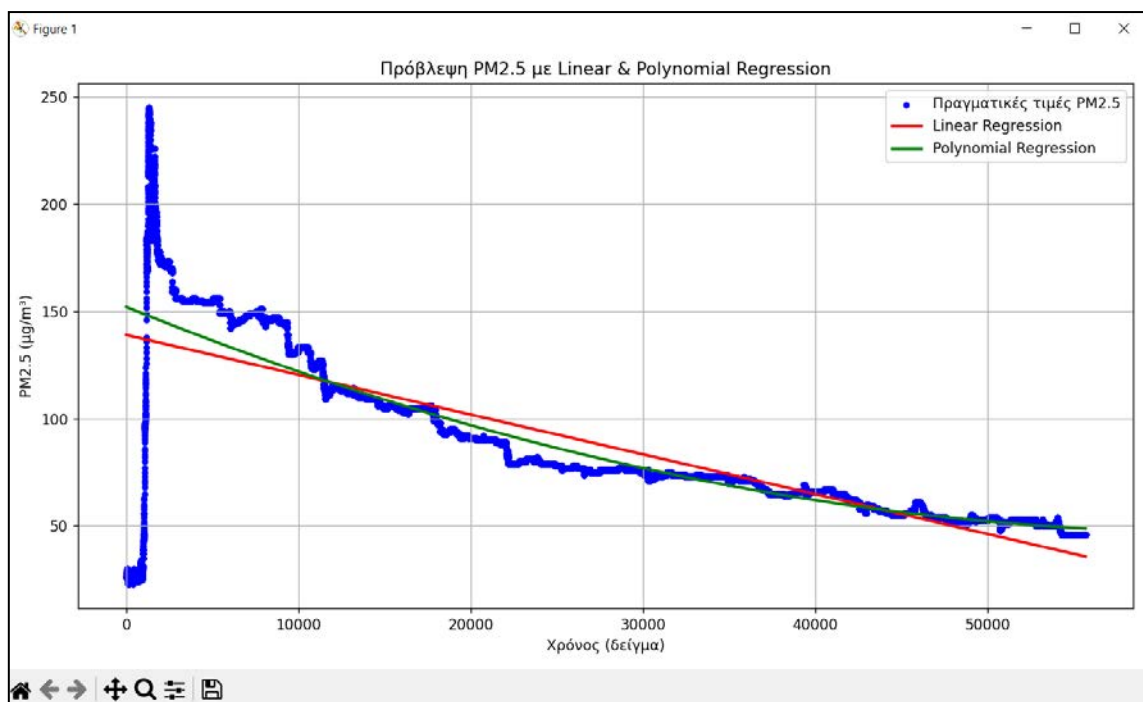
Αυτό σημαίνει ότι έχουμε απόλυτα κοινή χρονική βάση, σωστή αντιστοίχιση αισθητήρων και απολύτως έγκυρο dataset για Machine Learning.

### Ανάλυση Plot Linear & Polynomial Regression PM25:

Στο plot όπως φαίνεται και στην Εικόνα 35 παρατηρούμε ότι οι πραγματικές τιμές PM2.5 (μπλε σημεία) παρουσιάζουν αρχική αιχμή (startup transient), σταδιακή μείωση και σταθεροποίηση καθώς και μικρές διακυμάνσεις γύρω από μια φθίνουσα τάση. Η γραμμική παλινδρόμηση αποτυπώνει τη γενική πτωτική τάση. Η πολυωνυμική παλινδρόμηση ακολουθεί πιο ομαλά τη μη γραμμική συμπεριφορά των δεδομένων, ειδικά στο αρχικό τμήμα. Η συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη σε σχολικό

περιβάλλον, όπου η ποιότητα αέρα επηρεάζεται από την παρουσία ατόμων, τον αερισμό της αίθουσας, και τις χρονικές περιόδους χρήσης του χώρου.

Η ελαφρώς καλύτερη προσαρμογή της πολυωνυμικής παλινδρόμησης υποδηλώνει ότι η μεταβολή του PM<sub>2.5</sub> δεν είναι απολύτως γραμμική, αλλά παρουσιάζει ήπιες καμπυλότητες, όπως αναφέρεται σε μελέτες IAQ [6], [13]. Η πολυωνυμική παλινδρόμηση παρέχει βελτιωμένη προσαρμογή, ωστόσο η γραμμική παλινδρόμηση παραμένει ικανοποιητική για απλή πρόβλεψη τάσης.



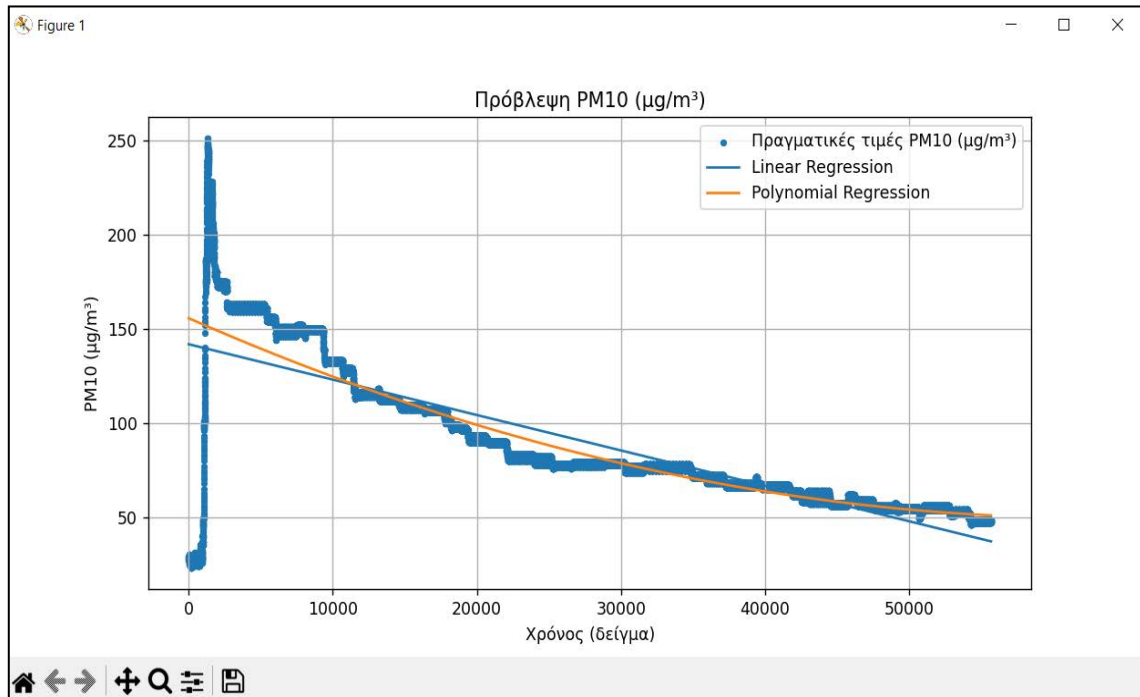
Εικόνα 35: Plot Linear & Polynomial Regression PM25

Η πειραματική εφαρμογή επικεντρώθηκε στην πρόβλεψη των τιμών PM<sub>2.5</sub>, ενώ η ίδια μεθοδολογία εφαρμόστηκε και στις άλλες δύο περιβαλλοντικές παραμέτρους, όπως PM<sub>10</sub> και Gas Index, επιβεβαιώνοντας τη γενικευσιμότητα της προτεινόμενης προσέγγισης.

#### Ανάλυση Plot Linear & Polynomial Regression PM<sub>10</sub>:

Στο δεύτερο plot, Εικόνας 36, οι τιμές PM<sub>10</sub> παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με τα PM<sub>2.5</sub> υψηλές αρχικές τιμές, σταδιακή πτώση, σταθεροποίηση σε χαμηλότερα επίπεδα. Η γραμμική και η πολυωνυμική παλινδρόμηση βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους. Η σχεδόν ταύτιση των δύο μοντέλων υποδηλώνει ότι η μεταβολή των PM<sub>10</sub>

ακολουθεί **σχεδόν γραμμική τάση** στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, τα δεδομένα δεν εμφανίζουν έντονη μη γραμμικότητα. Αυτό είναι συμβατό με την παρατήρηση ότι τα PM10 επηρεάζονται λιγότερο από βραχυπρόθεσμες μεταβολές σε σχέση με τα PM2.5 [5], [6]. Συμπερασματικά η γραμμική παλινδρόμηση επαρκεί για την πρόβλεψη της γενικής τάσης των PM10, χωρίς σημαντικό πλεονέκτημα από τη χρήση πολυωνυμικού μοντέλου.

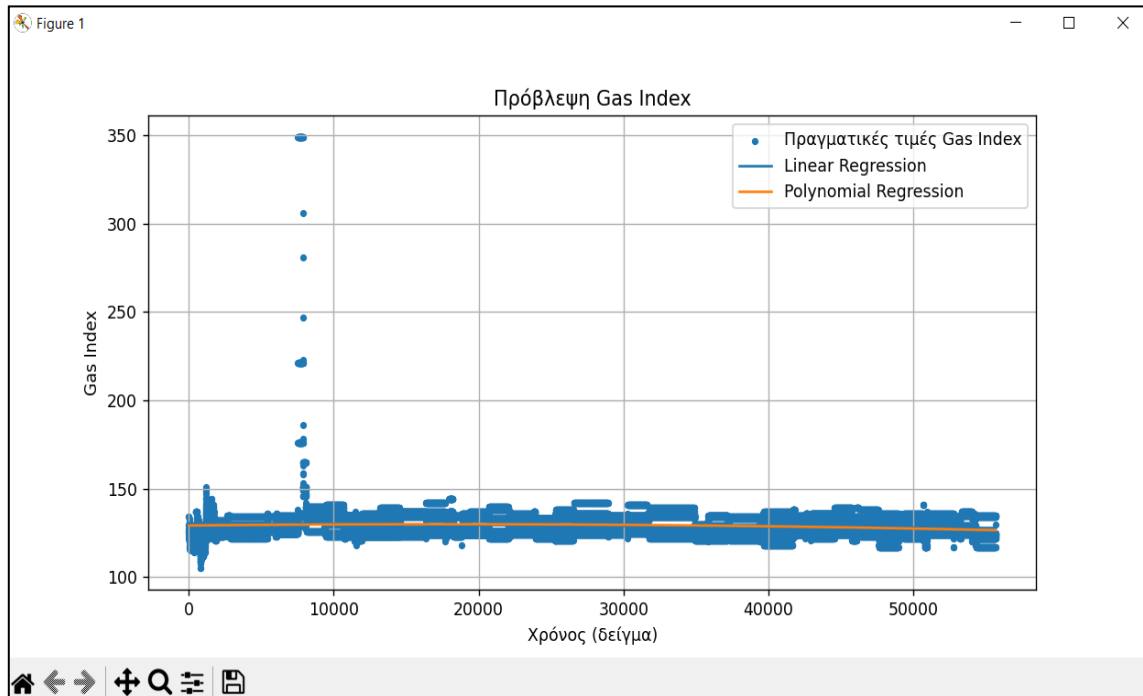


Εικόνα 36: Plot Linear & Polynomial Regression PM10

### Ανάλυση Plot Linear & Polynomial Regression Gas:

Οι τιμές του Gas Index εμφανίζουν γενική σταθερότητα γύρω από μια μέση τιμή, μεμονωμένες αιχμές (outliers), μικρή συνολική μεταβολή στον χρόνο. Και τα δύο μοντέλα παλινδρόμησης αποδίδουν σχεδόν οριζόντια γραμμή. Η συμπεριφορά αυτή υποδηλώνει ότι δεν παρατηρούνται έντονες μεταβολές καύσιμων αερίων στον χώρο, οι αιχμές πιθανόν σχετίζονται με στιγμιαία γεγονότα (π.χ. καθαριστικά, ανθρώπινη δραστηριότητα). Η παλινδρόμηση δεν αποσκοπεί εδώ σε ακριβή πρόβλεψη τιμών, αλλά στον εντοπισμό γενικής τάσης, και στην υποστήριξη μηχανισμών ειδοποίησης (threshold-based alerts) [14]. Συμπερασματικά η παλινδρόμηση επιβεβαιώνει τη

σταθερότητα του περιβάλλοντος και μπορεί να λειτουργήσει συμπληρωματικά σε συστήματα ανίχνευσης ανωμαλιών όπως βλέπουμε και στην Εικόνα 37.



Εικόνα 37: Plot Linear & Polynomial Regression Gas

Τα αποτελέσματα της πειραματικής εφαρμογής δείχνουν ότι τόσο η γραμμική όσο και η πολυωνυμική παλινδρόμηση μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για την εκτίμηση της εξέλιξης της ποιότητας αέρα σε σχολικό περιβάλλον. Η πολυωνυμική παλινδρόμηση παρουσιάζει ελαφρώς καλύτερη προσαρμογή στις τιμές PM<sub>2.5</sub>, ενώ για τις παραμέτρους PM<sub>10</sub> και Gas Index η γραμμική προσέγγιση αποδεικνύεται επαρκής. Τα ευρήματα επιβεβαιώνουν ότι απλές τεχνικές μηχανικής μάθησης μπορούν να ενσωματωθούν επιτυχώς σε συστήματα IoT για εκπαιδευτικές και πρακτικές εφαρμογές [5], [6], [13].

### 3.7 Αυτοματισμοί & ειδοποιήσεις (αερισμός, θέρμανση)

Η συλλογή και αποθήκευση δεδομένων ποιότητας αέρα αποτελεί μόνο το πρώτο βήμα σε ένα σύγχρονο σύστημα IoT. Η πραγματική προστιθέμενη αξία ενός τέτοιου

συστήματος προκύπτει όταν τα δεδομένα αξιοποιούνται για τη λήψη αποφάσεων και την ενεργοποίηση αυτοματοποιημένων ενεργειών. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένα σύνολο αυτοματισμών και ειδοποιήσεων (alerts), με στόχο τη βελτίωση των περιβαλλοντικών συνθηκών στη σχολική αίθουσα και την έγκαιρη ενημέρωση των χρηστών [5], [6].

Οι αυτοματισμοί βασίζονται σε προκαθορισμένα όρια (thresholds) ποιότητας αέρα, τα οποία προκύπτουν τόσο από διεθνείς οδηγίες, όπως αυτές του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (WHO), όσο και από εμπειρική παρατήρηση των πραγματικών μετρήσεων του συστήματος.

Για την υλοποίηση των αυτοματισμών χρησιμοποιήθηκε λογική βασισμένη σε όρια (threshold-based rules). Συγκεκριμένα:

- Για τα αιωρούμενα σωματίδια PM2.5 και PM10 χρησιμοποιήθηκαν ως ενδεικτικά όρια οι συστάσεις του WHO για εσωτερικούς χώρους [5].
- Για τον δείκτη Gas (MQ-2) ορίστηκαν εμπειρικά κατώφλια που υποδεικνύουν αυξημένη επιβάρυνση της ατμόσφαιρας (π.χ. καπνός, καύσιμα αέρια).

Όταν μία τιμή υπερβαίνει το αντίστοιχο όριο για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, το σύστημα θεωρεί ότι η ποιότητα του αέρα έχει υποβαθμιστεί και ενεργοποιεί τον αντίστοιχο μηχανισμό ειδοποίησης.

### **3.7.1 Υλοποίηση ειδοποιήσεων μέσω Node-RED & Σενάρια Αυτοματοποιημένων Ενεργειών**

Το Node-RED αξιοποιήθηκε ως κεντρικό middleware για τη διαχείριση συμβάντων και ειδοποιήσεων. Μέσω των ροών (flows) που σχεδιάστηκαν λαμβάνονται δεδομένα αισθητήρων μέσω MQTT, συγκρίνονται οι τιμές με τα προκαθορισμένα όρια και δημιουργούνται ειδοποιήσεις (alerts) όταν πληρούνται οι συνθήκες ενεργοποίησης.

Οι ειδοποιήσεις αυτές εμφανίζονται στο περιβάλλον Node-RED, αποστέλλονται μέσω MQTT σε ειδικά topics όπως το school/iaq/alert και μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το Grafana για την εμφάνιση οπτικών προειδοποιήσεων στα dashboards. Η προσέγγιση αυτή είναι σύμφωνη με σύγχρονες αρχιτεκτονικές IoT, όπου το middleware αναλαμβάνει τον έλεγχο λογικής και αποφάσεων [6], [14].

Με βάση τις ειδοποιήσεις, το σύστημα υποστηρίζει σενάρια αυτοματισμού όπως:

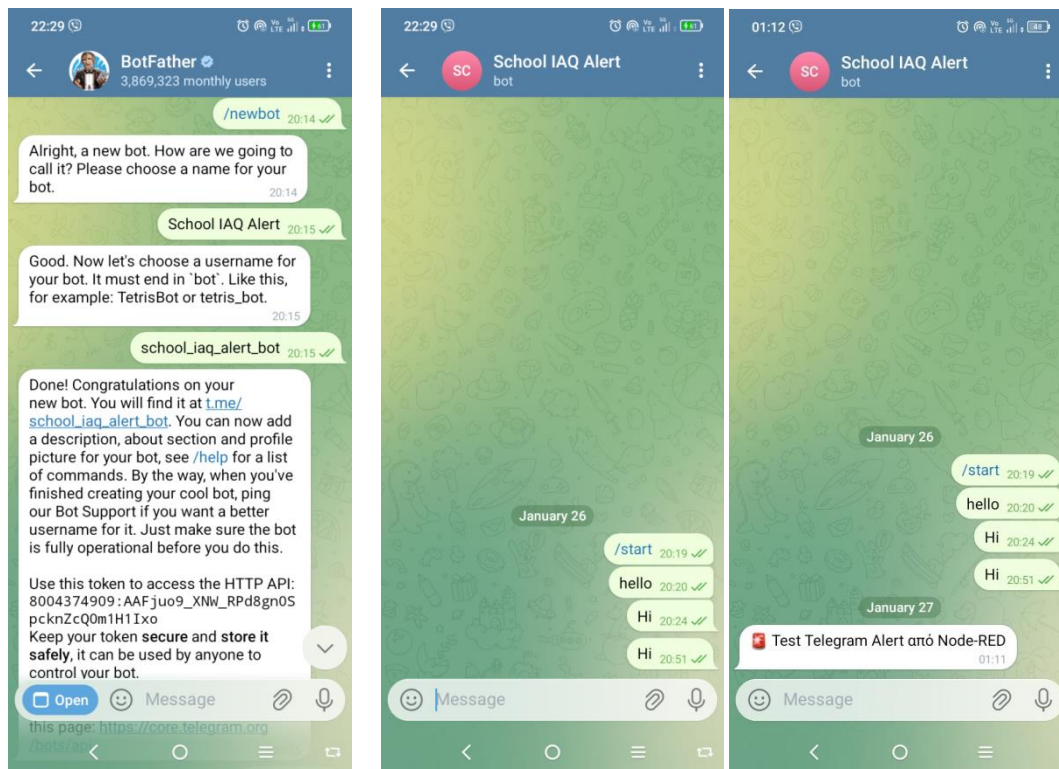
**Υποβοηθούμενος αερισμός:** Σε περίπτωση αυξημένων τιμών PM2.5 ή Gas, το σύστημα ειδοποιεί τον εκπαιδευτικό για άνοιγμα παραθύρων.

**Έλεγχος θέρμανσης ή κλιματισμού:** Η πληροφορία ποιότητας αέρα μπορεί να συνδυαστεί με δεδομένα θερμοκρασίας (μελλοντική επέκταση) για βελτιστοποίηση της λειτουργίας θέρμανσης ή ψύξης.

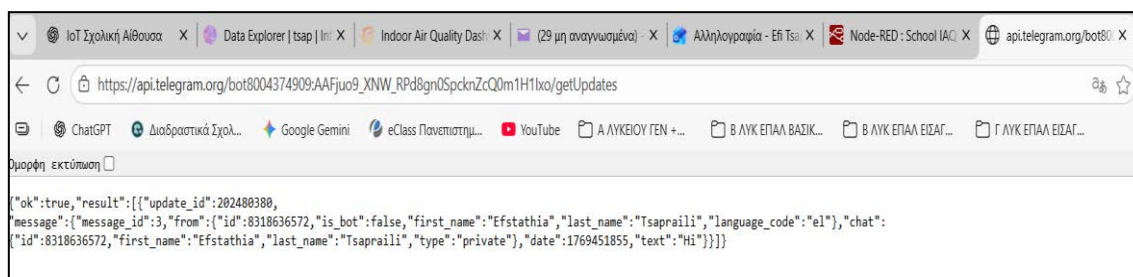
**Προληπτική ενημέρωση:** Μέσω της πρόβλεψης (Machine Learning), το σύστημα μπορεί να προειδοποιεί πριν η ποιότητα αέρα ξεπεράσει τα όρια.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, θέλαμε σε περίπτωση υπέρβασης των προκαθορισμένων ορίων PM2.5 ή Gas Index, το σύστημα να ενεργοποιεί μηχανισμό ειδοποίησης. Για την υλοποίηση του μηχανισμού άμεσης ειδοποίησης επιλέχθηκε η πλατφόρμα **Telegram**, μέσω της χρήσης Telegram Bot, καθώς προσφέρει δωρεάν, αξιόπιστη και γρήγορη αποστολή μηνυμάτων, χωρίς περιορισμούς όπως αυτοί που εμφανίζονται συχνά σε υπηρεσίες ηλεκτρονικού ταχυδρομείου (SMTP) ή SMS. Η επιλογή αυτή είναι σύμφωνη με σύγχρονες πρακτικές IoT ειδοποιήσεων, όπου χρησιμοποιούνται εφαρμογές άμεσης ανταλλαγής μηνυμάτων (instant messaging) για κρίσιμα alerts [14].

Αρχικά δημιουργήθηκε **Telegram Bot με όνομα: school\_iaq\_alert\_bot** μέσω της επίσημης υπηρεσίας BotFather. Μετά τη δημιουργία του bot, παρήχθη ένα μοναδικό **Bot Token: AAFjuo9\_XNW\_RPd8gn0SpcknZcQ0m1H1Ixo** όπως φαίνεται και στην Εικόνα 38, το οποίο χρησιμοποιείται για την αυθεντικοποίηση της επικοινωνίας μεταξύ Node-RED και Telegram Bot API. Το token αυτό αποτελεί βασικό στοιχείο ασφάλειας και επιτρέπει στο Node-RED να αποστέλλει μηνύματα εκ μέρους του bot. Παράλληλα, για την αποστολή ειδοποιήσεων σε συγκεκριμένο παραλήπτη, ανακτήθηκε το μοναδικό Chat ID του εκπαιδευτικού όπως φαίνεται και στην Εικόνα 39. Το Chat ID εξήχθη μέσω της μεθόδου getUpdates του Telegram Bot API, έπειτα από αποστολή δοκιμαστικού μηνύματος προς το bot από την εφαρμογή Telegram στο κινητό τηλέφωνο.

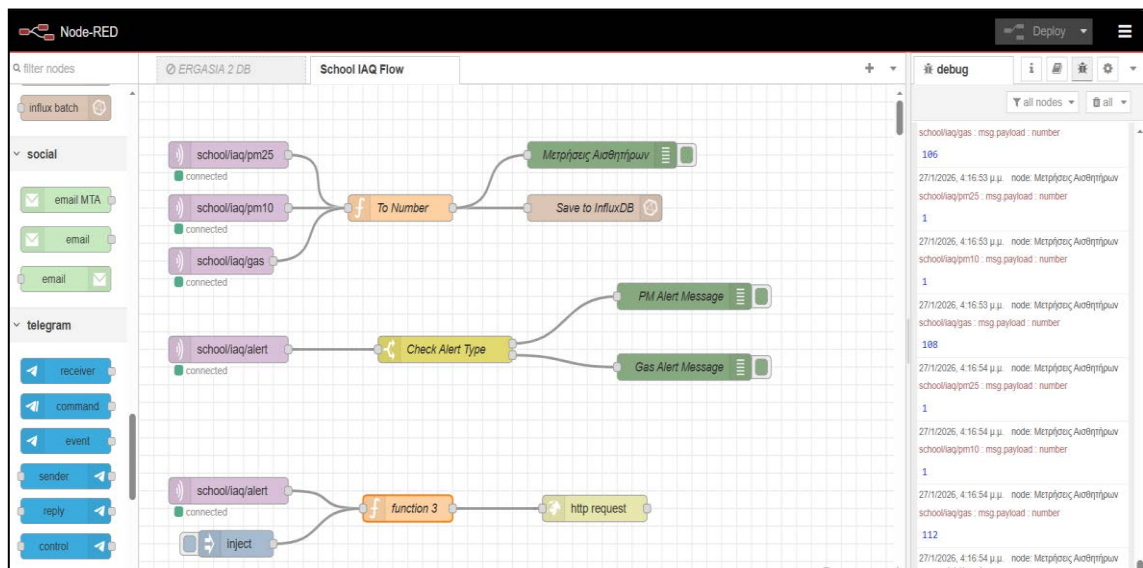


Εικόνα 38: Bot Name, Bot Token, Telegram Alert



Εικόνα 39: Chat ID - Telegram

Στο περιβάλλον **Node-RED** η αποστολή ειδοποιήσεων υλοποιήθηκε μέσω **HTTP request node**, το οποίο πραγματοποιεί απευθείας κλήσεις REST προς το Telegram Bot API. Η προσέγγιση αυτή επιλέχθηκε αντί έτοιμων κόμβων αποστολής, προκειμένου να διασφαλιστεί μεγαλύτερος έλεγχος στη δομή των αιτημάτων και αυξημένη αξιοπιστία της επικοινωνίας. Τα μηνύματα αποστέλλονται μέσω HTTP POST αιτήματος προς το endpoint sendMessage του Telegram Bot API, περιλαμβάνοντας το Bot Token, το Chat ID του παραλήπτη και το περιεχόμενο του προειδοποιητικού μηνύματος, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 40.



Εικόνα 40: Flow 2- Node-Red - Http Request

Οι ειδοποιήσεις ενεργοποιούνται από το MQTT topic **school/iaq/alert**, στο οποίο το μικροελεγκτικό σύστημα δημοσιεύει κωδικοποιημένα μηνύματα όταν ανιχνεύεται υπέρβαση προκαθορισμένων ορίων. Συγκεκριμένα, η τιμή «1» αντιστοιχεί σε υπέρβαση του ορίου PM2.5, ενώ η τιμή «2» αντιστοιχεί σε ανίχνευση καπνού ή αερίων από τον αισθητήρα MQ-2. Στο Node-RED, ένας κόμβος Function αναλαμβάνει την ερμηνεία των μηνυμάτων αυτών και τη μετατροπή τους σε κατανοητά προειδοποιητικά μηνύματα, τα οποία στη συνέχεια αποστέλλονται στον εκπαιδευτικό μέσω Telegram.

Κατά τη λειτουργία του συστήματος, σε περίπτωση υπέρβασης των ορίων, ο εκπαιδευτικός λαμβάνει άμεσα ειδοποίηση στην εφαρμογή Telegram στο κινητό του τηλέφωνο. Το μήνυμα περιγράφει με σαφήνεια το είδος του προβλήματος (αυξημένα σωματίδια PM2.5 ή ανίχνευση αερίων) και προτείνει ενέργειες αντιμετώπισης, όπως άνοιγμα παραθύρων ή άμεσο αερισμό της αίθουσας. Με τον τρόπο αυτό, το σύστημα μετατρέπεται από παθητικό μηχανισμό παρακολούθησης σε ενεργό σύστημα υποστήριξης αποφάσεων, ενισχύοντας την ασφάλεια και τη διασφάλιση υγιεινών συνθηκών στο σχολικό περιβάλλον [6], [14].

## 4. Αποτελέσματα και Ανάλυση Δεδομένων

### 4.1 Συλλογή πραγματικών μετρήσεων (PM25, PM10,GAS)

Κατά τη λειτουργία του προτεινόμενου συστήματος πραγματοποιήθηκε συνεχής συλλογή δεδομένων ποιότητας αέρα από τη σχολική αίθουσα. Οι μετρήσεις αφορούσαν συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων PM2.5 και PM10, καθώς και ενδείξεις παρουσίας καπνού ή αερίων μέσω του αισθητήρα MQ-2. Τα δεδομένα συλλέγονταν σε πραγματικό χρόνο και αποστέλλονταν μέσω του πρωτοκόλλου MQTT στο κεντρικό σύστημα επεξεργασίας.

Η διαδικασία συλλογής πραγματοποιήθηκε χωρίς απώλειες δεδομένων, γεγονός που επιβεβαιώνει την αξιοπιστία της επιλεγμένης αρχιτεκτονικής. Οι μετρήσεις παρουσίασαν φυσιολογικές διακυμάνσεις, με αυξημένες τιμές να παρατηρούνται κυρίως σε περιόδους αυξημένης παρουσίας μαθητών ή περιορισμένου αερισμού της αίθουσας.

Όπως είδαμε και στις Εικόνες 9 και 10, σελίδα 58 της διπλωματικής μας εργασίας τα δεδομένα που λάβαμε από το Serial Monitor στο Arduino IDE μας έδειξαν μια πολύ καθαρή σχολική αίθουσα. Στα σωματίδια (PM), οι τιμές 2, 5 και 6 mg/m<sup>3</sup> ήταν εξαιρετικά χαμηλές και απόλυτα φυσιολογικές για εσωτερικό περιβάλλον σχολικής αίθουσας. Στις μετρήσεις αερίων με τον αισθητήρα MQ-2 η τιμή 126 (περίπου 11%) είναι η τυπική τιμή βάσης (baseline) του αισθητήρα όταν δεν υπάρχει καπνός ή εύφλεκτο αέριο. Οι τιμές άλλαζαν δραματικά όταν μαθητές εισέρχονταν ομαδικά στην τάξη και άλλαζε η ατμόσφαιρα, οπότε και λαμβάναμε ειδοποίηση μέσω alert και ανοίγαμε για λίγο τα παράθυρα.

### 4.2 Οπτικοποίηση δεδομένων μέσω Grafana

Τα δεδομένα που αποθηκεύτηκαν στη βάση δεδομένων InfluxDB αξιοποιήθηκαν για τη δημιουργία δυναμικών γραφημάτων μέσω της πλατφόρμας Grafana. Τα dashboards που σχεδιάστηκαν επέτρεψαν την άμεση παρακολούθηση της ποιότητας αέρα, τόσο σε πραγματικό χρόνο όσο και σε ιστορική βάση.

Μέσω των γραφημάτων κατέστη δυνατή η εύκολη αναγνώριση περιόδων με αυξημένες συγκεντρώσεις σωματιδίων, γεγονός που διευκολύνει τον εκπαιδευτικό ή τον διαχειριστή του χώρου στη λήψη αποφάσεων. Η χρήση του Grafana αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματική για εκπαιδευτικά περιβάλλοντα, καθώς προσφέρει σαφή και κατανοητή απεικόνιση των δεδομένων.

Κάποιες στιγμές στην οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων στο Grafana όπως είχαμε προαναφέρει, παρατηρούνταν χρονικά διαστήματα χωρίς καταγεγραμμένες μετρήσεις, όπου το σφάλμα κυρίως ήταν θέμα δικτυακής επικοινωνίας. Το φαινόμενο αυτό είναι συχνό σε realtime συνθήκες λειτουργίας IoT συστημάτων και δεν σχετίζεται με σφάλμα της βάσης δεδομένων.

### **4.3 Αποτελέσματα πρόβλεψης μέσω μοντέλων παλινδρόμησης (στατιστική & ML)**

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας εφαρμόστηκαν μοντέλα γραμμικής και πολυωνυμικής παλινδρόμησης με στόχο την πρόβλεψη της εξέλιξης των τιμών PM2.5. Τα μοντέλα εκπαιδεύτηκαν πάνω σε πραγματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν από το σύστημα.

Όπως είδαμε και στα αποτελέσματα των γραφημάτων στις Εικόνες 36, 37, 38, η γραμμική παλινδρόμηση μπορεί να αποτυπώσει τη γενική τάση μεταβολής των μετρήσεων, ενώ η πολυωνυμική παλινδρόμηση προσφέρει καλύτερη προσαρμογή σε περιπτώσεις μη γραμμικής συμπεριφοράς. Αν και τα μοντέλα που εφαρμόστηκαν είναι απλά, αποδεικνύουν τη δυνατότητα ενσωμάτωσης τεχνικών Machine Learning σε IoT συστήματα χαμηλού κόστους.

### **4.4 Ειδοποιήσεις και αυτόματες ενέργειες**

Ο μηχανισμός ειδοποιήσεων ενεργοποιήθηκε επιτυχώς σε περιπτώσεις υπέρβασης των προκαθορισμένων ορίων PM2.5 ή ανίχνευσης αερίων. Οι ειδοποιήσεις εμφανίζονταν άμεσα στο περιβάλλον Node-RED και μπορούσαν να αξιοποιηθούν για την ενεργοποίηση περαιτέρω ενεργειών.

Η αποστολή ειδοποιήσεων μέσω της πλατφόρμας Telegram υλοποιήθηκε πιλοτικά μέσω HTTP requests προς το Telegram Bot API στο κινητό μας. Αν και η βασική λειτουργικότητα επιβεβαιώθηκε μέσω δοκιμαστικών μηνυμάτων, η πλήρης αυτοματοποίηση της διαδικασίας απαιτεί περαιτέρω βελτιστοποίηση και αποτελεί αντικείμενο μελλοντικής εργασίας.

## 5. Συμπεράσματα

Κατά την υλοποίηση και δοκιμή του προτεινόμενου συστήματος παρακολούθησης ποιότητας αέρα αναδείχθηκαν τόσο τα πλεονεκτήματα της επιλεγμένης αρχιτεκτονικής όσο και ορισμένοι πρακτικοί περιορισμοί που σχετίζονται με το περιβάλλον δοκιμών. Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι η χρήση κινητού hotspot περιόριζε την απευθείας επικοινωνία μεταξύ των IoT συσκευών και του MQTT broker, λόγω μηχανισμών απομόνωσης συσκευών που εφαρμόζονται στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Το πρόβλημα αυτό ανέδειξε τη σημασία της σωστής δικτυακής υποδομής σε εφαρμογές IoT, ιδιαίτερα όταν απαιτείται επικοινωνία σε τοπικό επίπεδο (LAN).

Για την αντιμετώπιση του ζητήματος, και λόγω απουσίας σταθερής τοπικής δικτυακής υποδομής κατά τη φάση δοκιμών, η επικοινωνία MQTT υλοποιήθηκε μέσω δημόσιου broker (test.mosquitto.org). Η επιλογή αυτή επέτρεψε την απρόσκοπτη ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ της IoT συσκευής και του middleware (Node-RED), ανεξάρτητα από το τοπικό δίκτυο. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει την ευελιξία και την προσαρμοστικότητα της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής, η οποία μπορεί να λειτουργήσει τόσο σε τοπικά όσο και σε κατανεμημένα περιβάλλοντα.

Παρά τις τεχνικές δυσκολίες που προέκυψαν, το σύστημα λειτούργησε σταθερά και επέτρεψε τη συλλογή, αποθήκευση, οπτικοποίηση και ανάλυση δεδομένων ποιότητας αέρα, επιβεβαιώνοντας τη βασική λειτουργικότητα και τον στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος η παρούσα εργασία αναδεικνύει ότι η παρακολούθηση της ποιότητας αέρα σε σχολικά περιβάλλοντα δεν αποτελεί μόνο ζήτημα υγείας, αλλά και στοιχείο ενεργειακής στρατηγικής. Σε ενεργειακά αναβαθμισμένα και θερμομονωμένα σχολικά κτίρια, όπου η φυσική ανανέωση αέρα περιορίζεται, η ύπαρξη έξυπνων συστημάτων IAQ καθίσταται κρίσιμη.

Το προτεινόμενο σύστημα μπορεί να λειτουργήσει ως υποστηρικτικό εργαλείο για:

- τη βελτιστοποίηση του αερισμού,
- τη μείωση περιττής ενεργειακής κατανάλωσης,
- και τη συμβολή στη μετάβαση προς βιώσιμες και «έξυπνες» σχολικές υποδομές.

Η σύνδεση IoT τεχνολογιών και Machine Learning με τη διαχείριση κτιριακής ενέργειας δημιουργεί προοπτικές για μελλοντική ενσωμάτωση σε συστήματα Smart Building και Nearly Zero Energy Buildings (nZEB).

## 5.1 Επίτευξη στόχων

Ο βασικός στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η σχεδίαση και υλοποίηση ενός συστήματος παρακολούθησης ποιότητας αέρα σε σχολική αίθουσα, αξιοποιώντας τεχνολογίες IoT και σύγχρονα εργαλεία ανάλυσης δεδομένων. Ο στόχος αυτός επιτεύχθηκε επιτυχώς, καθώς το σύστημα κατάφερε να συλλέγει δεδομένα από αισθητήρες, να τα μεταδίδει μέσω MQTT, να τα αποθηκεύει σε βάση δεδομένων χρονικών σειρών και να τα απεικονίζει μέσω δυναμικών dashboards.

Επιπλέον, επιτεύχθηκε η ενσωμάτωση βασικών τεχνικών Machine Learning, μέσω εφαρμογής μοντέλων γραμμικής και πολυωνυμικής παλινδρόμησης, επιτρέποντας την ανάλυση τάσεων και τη διερεύνηση της δυνατότητας πρόβλεψης μελλοντικών τιμών. Παράλληλα, υλοποιήθηκε μηχανισμός ειδοποιήσεων σε επίπεδο middleware, ο οποίος ενεργοποιείται όταν ανιχνεύονται υπερβάσεις προκαθορισμένων ορίων ποιότητας αέρα.

Συνολικά, οι αρχικοί στόχοι της εργασίας καλύφθηκαν σε ικανοποιητικό βαθμό, αποδεικνύοντας τη βιωσιμότητα της προτεινόμενης λύσης.

## 5.2 Οφέλη για εκπαιδευτικό περιβάλλον

Η εφαρμογή του προτεινόμενου συστήματος σε σχολικό περιβάλλον προσφέρει σημαντικά οφέλη τόσο για τους εκπαιδευτικούς όσο και για τους μαθητές. Η συνεχής παρακολούθηση της ποιότητας αέρα επιτρέπει την έγκαιρη αναγνώριση συνθηκών που ενδέχεται να επηρεάσουν την υγεία και τη συγκέντρωση των μαθητών, όπως αυξημένα αιωρούμενα σωματίδια ή κακή ποιότητα αερισμού.

Επιπλέον, η οπτικοποίηση των δεδομένων μέσω Grafana καθιστά την πληροφορία άμεσα κατανοητή, διευκολύνοντας τη λήψη αποφάσεων, όπως ο αερισμός της αίθουσας. Το σύστημα μπορεί επίσης να αξιοποιηθεί εκπαιδευτικά, καθώς προσφέρει ένα πρακτικό παράδειγμα εφαρμογής τεχνολογιών IoT, ανάλυσης δεδομένων και βασικών εννοιών Machine Learning, ενισχύοντας τη βιωματική μάθηση.

Η εφαρμογή του συστήματος παρακολούθησης ποιότητας αέρα αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε σύγχρονες σχολικές μονάδες που έχουν υποστεί ενεργειακή αναβάθμιση και θερμομονωτική βελτίωση. Τα ενεργειακά αποδοτικά κτίρια χαρακτηρίζονται από αυξημένη αεροστεγανότητα, η οποία συμβάλλει στη μείωση θερμικών απωλειών, αλλά ταυτόχρονα περιορίζει τον φυσικό αερισμό.

Στο πλαίσιο αυτό, η συνεχής παρακολούθηση της ποιότητας αέρα επιτρέπει την έγκαιρη ανίχνευση αυξημένων συγκεντρώσεων ρύπων και τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σχετικά με τον αερισμό του χώρου. Έτσι επιτυγχάνεται ισορροπία μεταξύ ενεργειακής απόδοσης και υγιεινών συνθηκών μάθησης.

Η αξιοποίηση έξυπνων τεχνολογιών IoT σε σχολικά περιβάλλοντα συμβάλλει:

- στη διατήρηση της υγείας μαθητών και εκπαιδευτικών,
- στη βελτίωση της συγκέντρωσης και της γνωστικής απόδοσης,
- στη μείωση άσκοπης ενεργειακής κατανάλωσης λόγω ανεξέλεγκτου αερισμού,
- και στη μετάβαση προς βιώσιμες και «έξυπνες» σχολικές υποδομές.

### 5.3 Περιορισμοί

Παρά τα θετικά αποτελέσματα, η παρούσα εργασία παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν είναι χαμηλού κόστους και παρέχουν ενδεικτικές μετρήσεις, χωρίς πιστοποίηση επαγγελματικού επιπέδου. Επίσης, τα μοντέλα Machine Learning που εφαρμόστηκαν είναι απλά και δεν περιλαμβάνουν δυναμική επανεκπαίδευση σε πραγματικό χρόνο.

Όσον αφορά τον μηχανισμό ειδοποιήσεων, η αποστολή μηνυμάτων μέσω Telegram υλοποιήθηκε πιλοτικά και απαιτεί περαιτέρω βελτιστοποίηση για πλήρη αυτοματοποίηση. Το ζήτημα αυτό, σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις δικτυακής υποδομής, αποτελεί αντικείμενο μελλοντικής εργασίας.

Μελλοντικές επεκτάσεις του συστήματος θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν την ενσωμάτωση επιπλέον αισθητήρων (όπως CO<sub>2</sub>, θερμοκρασίας και υγρασίας), τη χρήση πιο προηγμένων αλγορίθμων Machine Learning και τη διασύνδεση με αυτοματοποιημένα συστήματα εξαερισμού ή κλιματισμού. Με τον τρόπο αυτό, το σύστημα μπορεί να εξελιχθεί σε ένα ολοκληρωμένο εργαλείο διαχείρισης ποιότητας εσωτερικού αέρα σε σχολικούς χώρους.

## 6. Βιβλιογραφία / Αναφορές

- [1] R. Buyya and A. Dastjerdi, *Internet of Things: Principles and Paradigms*, Morgan Kaufmann, 2016.
- [2] A. Rayes and S. Salam, *Internet of Things: From Hype to Reality*, Springer, 2017.
- [3] X. Zhang, Y. Ding, X. Huang, W. Li, L. Long, and S. Ding, “Smart Classrooms: How Sensors and AI Are Shaping Educational Paradigms,” 2024.
- [4] P. Kadepurkar, P. Dsouza, and N. Jomichan, “IoT-Based Smart Classroom,” *Int. J. of Applied Sciences and Smart Technologies*, 2021.
- [5] I. D. Apostolopoulos and E. Dovrou, “Monitoring of Indoor Air Quality in a Classroom Combining a Low-Cost Sensor System and Machine Learning,” *Chemosensors*, 2025.
- [6] G. Pinilla et al., “A Comparative Study of CO<sub>2</sub> Forecasting Strategies in School Classrooms,” *Sensors*, 2025.
- [7] F. Aloufi et al., “Internet of Things (IoT) in Education: Teachers’ Perspectives, Practices and Challenges,” *WSEAS Trans. on Computer Research*, 2024.
- [8] M. Burunkaya and K. Duraklar, “Design and Implementation of an IoT-Based Smart Classroom Incubator,” *Applied Sciences*, 2022.
- [9] F. Javed et al., “IoT Operating Systems Support, Networking Technologies, Applications, and Challenges,” *IEEE Comm. Surveys & Tutorials*, 2018.
- [10] G. K. Adam et al., “COTS-Based Real-Time System Development,” *MDPI Computers*, 2020.
- [11] M. Wolf, *Computers as Components: Principles of Embedded Computing System Design*, Morgan Kaufmann, 2017.
- [12] M. Mota et al., “Implementation of an IoT Architecture to Monitor Indoor Air Quality: Case Study During Sleep Periods,” *Sensors*, 2025.
- [13] A. Berkani et al., “Intelligent Edge Deployable Indoor Air Quality Monitoring and Activity Recognition Approach,” *Sensors*, 2023.
- [14] K. Peppas, *Δίκτυα Αισθητήρων – Διαλέξεις*, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, 2016.
- [15] Node-RED Documentation: [Online]. Available: <https://nodered.org/docs>