



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ «ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ»
ΠΜΣ «ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΔΙΚΤΥΩΝ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΠΡΩΤΟΓΕΝΩΝ
ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ ΜΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΤΟΥ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ ΤΩΝ
ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ

Αναστασίου Δημήτριος

Επιβλέπων: Δουμένης Γρηγόριος
Αναπληρωτής Καθηγητής

Αρτα, Σεπτέμβριος 2026

IOT SYSTEM FOR DETECTION AND RECORDING OF PRIMARY AIR POLLUTANTS

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή

Αρτα, 9/9/2026

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Επιβλέπων καθηγητής

Γρηγόριος Δουμένης

Αναπληρωτής Καθηγητής

2. Μέλος επιτροπής

Χρυσόστομος Στύλιος

Καθηγητής

3. Μέλος επιτροπής

Ανδρέας Τσορμπατζόγλου,

Αναπληρωτής Καθηγητής

© Αναστασίου, Δημήτριος, 2026.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Δήλωση μη λογοκλοπής

Δηλώνω υπεύθυνα και γνωρίζοντας τις κυρώσεις του Ν. 2121/1993 περί Πνευματικής Ιδιοκτησίας, ότι η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι εκ ολοκλήρου αποτέλεσμα δικής μου ερευνητικής εργασίας, δεν αποτελεί προϊόν αντιγραφής ούτε προέρχεται από ανάθεση σε τρίτους. Όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν (κάθε είδους, μορφής και προέλευσης) για τη συγγραφή της περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία.

Αναστασίου, Δημήτριος

Υπογραφή

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Εκφράζω τις θερμές μου ευχαριστίες προς τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Γρηγόριο Δουμένη, για την πολύτιμη καθοδήγηση, τις ουσιαστικές συμβουλές και τη διαρκή υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στη σύζυγό μου και στα δύο μας παιδιά για την αμέριστη συμπαράσταση, την υπομονή και την ενθάρρυνσή τους. Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον αδελφό μου και τη σύζυγό του για την ηθική τους στήριξη. Τέλος, αφιερώνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου. Οι δικές τους θυσίες και η ανιδιοτελής προσφορά τους αποτέλεσαν το στερεό θεμέλιο ώστε να ολοκληρώσω τις προπτυχιακές μου σπουδές και να πραγματοποιήσω το παρόν μεταπτυχιακό πρόγραμμα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στον σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός προηγμένου, χαμηλού κόστους συστήματος παρακολούθησης αέριων ρύπων σε βιομηχανικό περιβάλλον, χρησιμοποιώντας τεχνολογίες Βιομηχανικού Διαδικτύου των Αντικειμένων (Industrial IoT). Στόχος της μελέτης είναι η δημιουργία μιας οικονομικά προσιτής και τεχνικά αξιόπιστης λύσης που προάγει τον εκδημοκρατισμό των δεδομένων πεδίου, καταρρίπτοντας τα παραδοσιακά σιλό πληροφορίας και επιτρέποντας τη διαρκή εποπτεία της ποιότητας του αέρα για την πρόληψη εργατικών ατυχημάτων.

Η προτεινόμενη διάταξη βασίζεται σε μια υβριδική συστοιχία αναλογικών αισθητήρων (σειράς MQ) και ψηφιακών αισθητήρων υψηλής ακρίβειας (SCD30 και BME680), οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι σε έναν μικροελεγκτή Arduino Mega 2560. Λόγω των εγγενών περιορισμών του μικροελεγκτή σε πόρους και δικτυακή συνδεσιμότητα, εισάγεται μια αρχιτεκτονική Edge Computing μέσω ενός ενδιάμεσου σταθμού εργασίας (Edge Gateway) που εκτελεί κώδικα Python. Το Gateway αναλαμβάνει τη συλλογή των δεδομένων μέσω σειριακής επικοινωνίας, την εκτέλεση υβριδικών αλγορίθμων διόρθωσης και τοπικού φιλτραρίσματος (αξιοποιώντας τις ψηφιακές ενδείξεις θερμοκρασίας και υγρασίας για την αντιστάθμιση των αναλογικών στοιχείων), καθώς και την ασφαλή προώθηση των μετρήσεων σε μορφή JSON στην Cloud πλατφόρμα Thingier.io. Επιπλέον, για τη διασφάλιση της επιχειρησιακής συνέχειας, οι απαιτήσεις «υγείας» του συστήματος (System Health) ομαδοποιούνται σε δύο επίπεδα: στις απαιτήσεις υλικού (χρόνος προθέρμανσης και σταθερότητα τάσης αισθητήρων/μικροελεγκτή) και στις απαιτήσεις εφαρμογής/δικτύου (κατάσταση συνδεσιμότητας και τοπική αποθήκευση δεδομένων).

Μέσω της συγκριτικής ανάλυσης με τα παραδοσιακά συστήματα SCADA και της εμβάθυνσης σε βιομηχανικά πρωτόκολλα όπως το OPC-UA και το MQTT, η εργασία αναδεικνύει τα πλεονεκτήματα των Cloud-native λύσεων όσον αφορά την επεκτασιμότητα, την ασφάλεια (κρυπτογράφηση TLS/SSL) και την προσβασιμότητα. Τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαίωσαν την ικανότητα του συστήματος για έγκαιρη ανίχνευση επικίνδυνων συγκεντρώσεων αερίων (CO , CO_2 , $VOCs$) με βάση το ευρωπαϊκό νομοθετικό πλαίσιο, καθώς και την άμεση ενημέρωση του προσωπικού μέσω δυναμικών dashboards και αυτοματοποιημένων ειδοποιήσεων.

ABSTRACT

This thesis focuses on the design and implementation of an advanced, cost-effective air pollutant monitoring system in an industrial environment, utilizing Industrial Internet of Things (IIoT) technologies. The objective of the study is to create an affordable and technically reliable solution that promotes the democratization of field data, breaking down traditional data silos and enabling continuous air quality supervision for industrial accident prevention.

The proposed system consists of a hybrid array of analog sensors (MQ-series) and high-precision digital sensors (SCD30 and BME680) connected to an Arduino Mega 2560 microcontroller. Due to the microcontroller's inherent memory constraints and lack of native networking capabilities, an Edge Computing architecture is implemented using an intermediate workstation (Edge Gateway) running a custom Python script. The Gateway handles data ingestion via serial communication, performs hybrid environmental correction and filtering algorithms (utilizing digital temperature and humidity readings to compensate for the analog elements), and securely transmits the processed data as JSON payloads to the Thingier.io Cloud platform. Furthermore, to ensure operational integrity, the system health metrics are systematically classified into hardware-level requirements (sensor warm-up time and voltage stability) and application/network-level requirements (connectivity status and local data buffering).

Through a comparative analysis with traditional SCADA systems and an in-depth examination of industrial standards such as OPC-UA and MQTT, this work highlights the advantages of Cloud-native solutions in terms of scalability, security (via TLS/SSL encryption), and data accessibility. Experimental results confirmed the system's capability for early detection of hazardous gas concentrations (CO , CO_2 , $VOCs$) aligned with European regulatory limits, providing immediate personnel alerts through dynamic web dashboards and automated notification systems.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη	viii
Abstract	ix

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικό Πλαίσιο και Κίνητρο	1
1.2 Αντικείμενο και στόχος της διπλωματικής εργασίας	1
1.3 Τεχνολογική Προσέγγιση	1
1.4 Δομή της Εργασίας.....	2
1.5 Νομοθετικό Πλαίσιο και Επιτρεπτά Όρια.....	3
1.5.1 Ευρωπαϊκό και Διεθνές Θεσμικό Πλαίσιο	3
1.5.2 Δείκτες Αξιολόγησης Έκθεσης Επικινδυνότητας	4
1.5.3 Επιτρεπτά Όρια για τους υπό Μελέτη Ρύπους και Παραμέτρους.....	5
1.5.4 Ενσωμάτωση Νομοθετικών Ορίων στη Λογική του Συστήματος IoT.....	6

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ & ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΕΙΑ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ

2.1 Ιστορική Αναδρομή και Εξέλιξη	7
2.2 Φυσική Ημιαγωγών και Μηχανισμός Λειτουργίας.....	7
2.2.1 Η Δομή των Ενεργειακών Ζωνών	7
2.2.2 Η Χημική Αντίδραση.....	8
2.3 Αναλυτική Περιγραφή της Επιλεγμένης Διάταξης.....	8
2.4 Συγκριτικός Πίνακας Τεχνολογιών	9
2.5 Μαθηματική Μοντελοποίηση	10
2.5.1 Υπολογισμός Αντίστασης Αισθητήρα (R_s).....	10
2.5.2 Μετατροπή σε PPM	10
2.6 Διαδικασία Βαθμονόμησης	11

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:

ΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ (ΙΟΤ) ΚΑΙ Ο ΕΚΔΗΜΟΚΡΑΤΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

3.1 Εισαγωγή και Ιστορικό Υπόβαθρο	12
3.1.1 Η Φιλοσοφία του Εκδημοκρατισμού της Πληροφορίας	12
3.2 Αρχιτεκτονική Τριών Επιπέδων (3-Tier Architecture)	13
3.2.1 Επίπεδο 1: Επίπεδο Πεδίου και Ανίχνευσης (Field / Perception Level).....	14
3.2.2 Επίπεδο 2: Επίπεδο Εγγύς Άκρου και Πύλης Διασύνδεσης (Edge / Gateway Level).....	14
3.2.3 Επίπεδο 3: Επίπεδο Νέφους και Εφαρμογής (Cloud / Application Level)	15
3.3 Σχεδιαστική Επιλογή Πρωτοκόλλου: REST API έναντι OPC-UA.....	16
3.4 Edge Computing: Νοημοσύνη στο Άκρο του Δικτύου	17
3.5 Πρωτόκολλα Επικοινωνίας (MQTT vs HTTP).....	17
3.6 Μορφοποίηση και Σειριοποίηση Δεδομένων: Το Πρωτόκολλο JSON και Συγκριτική Ανάλυση	18
3.6.1 Το Πρωτόκολλο JSON (JavaScript Object Notation)	18
3.6.2 Σύγκριση JSON με Άλλες Τεχνικές Σειριοποίησης και Κωδικοποίησης	19
3.6.3 Αιτιολόγηση Επιλογής για το Σύστημα	20
3.7 Ασφάλεια και Κρυπτογράφηση (IoT Security).....	20
3.8 Επεκτασιμότητα (Scalability) και Case Studies.....	21

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:

ΠΛΑΤΦΟΡΜΕΣ ΙΟΤ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

4.1 Τα Παραδοσιακά Συστήματα SCADA.....	22
4.1.1 Χαρακτηριστικά και Αρχιτεκτονική SCADA	22
4.1.2 Περιορισμοί των SCADA στη Σύγχρονη Εποχή.....	23
4.2 Οι Πλατφόρμες ΙοΤ ως Εναλλακτική Λύση (Thingier.io)	24
4.3 Συγκριτική Ανάλυση: SCADA έναντι ΙοΤ Πλατφορμών	25
4.3.1 Αρχιτεκτονική και Τοπολογία Δικτύου	25
4.3.2 Πρωτόκολλα Επικοινωνίας και Διαλειτουργικότητα	26

4.3.3 Οικονομική Ανάλυση (CAPEX vs OPEX).....	27
4.3.4 Ανάλυση Δεδομένων και Οπτικοποίηση	27
4.3.5 Ασφάλεια: Απομόνωση έναντι Κρυπτογράφησης	28
4.4 Industrial IoT (IIoT): Η Γέφυρα μεταξύ SCADA και Cloud.....	28
4.5 Το Πρωτόκολλο OPC-UA: Το Πρότυπο Διασύνδεσης του Industry 4.0.....	30
4.5.1 Φιλοσοφία και Μοντελοποίηση Πληροφορίας	30
4.5.2 Αρχιτεκτονική και Ενσωμάτωση	30
4.5.3 Σύγκριση OPC-UA έναντι MQTT	31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΕΡΑ

5.1 Προδιαγραφές και Νομοθετικό Πλαίσιο Συμμόρφωσης.....	33
5.2 Τεχνικές Απαιτήσεις και Επιλογή Αισθητήρων.....	34
5.2.1 Περιβαλλοντικές Παράμετροι (Contextual Data)	35
5.2.2 Παράμετροι "Υγείας" του Συστήματος (System Health)	36
5.2.3 Επιτήρηση Σφάλματος Αισθητήρα (Fault Detection)	37
5.2.4 Συσχετισμός με Περιβαλλοντικές Συνθήκες.....	38
5.2.5 Παρακολούθηση Τάσεων (Trend Monitoring)	38
5.2.6 Παρακολούθηση "Κύκλου Ζωής" (Maintenance Tracking)	39
5.2.7 Δείκτες Επικινδυνότητας (Safety Indices)	39
5.3 Μαθηματική Μοντελοποίηση και Λογική Αξιολόγησης	40
5.3.1 Αρχιτεκτονική IIoT Gateway και Ειδοποιήσεων	41
5.4.Τεχνικές Απαιτήσεις και Αρχιτεκτονική Συστήματος	42
5.4.1 Αρχιτεκτονική και Λογική Λειτουργίας.....	43
5.5 Μεθοδολογία Βαθμονόμησης (Calibration Strategy)	45
5.6 Αναμενόμενη Λειτουργία και Λογική Αξιολόγησης	46
5.7 Πεδίο Εφαρμογής και Επεκτασιμότητα	47
5.8 Στρατηγική Τοποθέτησης στην Παραγωγή.....	48

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ

6.1	Προδιαγραφές και Επιλογή Υλικού (Hardware)	49
6.1.1	Μονάδα Κεντρικού Ελέγχου	49
6.1.2	Αισθητήρες Μέτρησης Αερίων Ρύπων	50
6.1.3	Σύστημα Περιβαλλοντικής Αντιστάθμισης	50
6.1.4	Δομή Επικοινωνίας και Αποθήκευσης	50
6.2	Υβριδικό Σύστημα Επεξεργασίας	52
6.2.1	Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας	52
6.2.2	Διάταξη Αισθητήρων: Το Υβριδικό Μοντέλο	53
6.2.3	Σκοπιμότητα Υβριδικής Προσέγγισης	53
6.2.4	Επικοινωνία και Μεταφόρτωση Δεδομένων	53
6.3	Σχεδίαση και Φυσική Συνδεσμολογία (Pinout)	54
6.3.1	Συνδεσμολογία Αναλογικού και Ψηφιακού Επιπέδου	54
6.3.2	Σύγκριση Τεχνολογιών Ανίχνευσης	54
6.3.3	Σχεδιαστικές Προκλήσεις	55
6.4	Ανάπτυξη Firmware (Arduino Code)	56
6.5	Λογική Λειτουργίας και Διαγράμματα Ροής	59
6.5.1	Λογική Λειτουργίας Επιπέδου Υλικού (Edge Node)	59
6.5.2	Διάγραμμα Ροής Συστήματος (Flowchart)	59
6.5.3	Λογική Διαχείρισης Σφάλματος και Αυτονομίας	62
6.5.4	Συγχρονισμός Δεδομένων	62
6.6	Ανάλυση και λειτουργία του IIoT Gateway	63
6.6.1	Αρχιτεκτονική Αναγκαιότητα και Επιλογή της Λύσης Gateway	63
6.6.2	Λειτουργική Ανάλυση του Λογισμικού Python Gateway	64
6.7	Οπτικοποίηση και UI/UX (Thingier.io)	66
6.7.1	Αρχιτεκτονική της Διεπαφής	67
6.7.2	Λειτουργικότητα και Χρωματική Σήμανση	68
6.7.3	Ευχρηστία και Προσβασιμότητα (UX)	68

6.7.4 Διαχείριση Συμβάντων και Ειδοποιήσεις.....	68
6.8 Βιομηχανικές Προδιαγραφές και Συντήρηση	68
6.8.1 Λειτουργικές Προδιαγραφές σε Βιομηχανικό Περιβάλλον	69
6.8.2 Στρατηγική Συντήρησης και Έλεγχος Ακρίβειας.....	69
6.8.3 Σύνδεση με την Προληπτική Συντήρηση της Παραγωγής.....	70
6.9 Οικονομική αξιολόγηση και στρατηγική τοποθέτησης.....	70
6.9.1 Ανάλυση Κόστους και Βιωσιμότητα (Cost-Benefit Analysis)	71
6.9.2 Στρατηγική Χωροθέτησης των Μονάδων Ανίχνευσης.....	72
6.10 Οικονομική Τεκμηρίωση και Συμπεράσματα	72

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

7.1 Ανασκόπηση και Συμπεράσματα	74
7.1.1 Περιορισμοί του Συστήματος.....	75
7.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις.....	76
7.3 Επίλογος.....	77

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Παράρτημα Α:

Κώδικας Μικροελεγκτή (Arduino Mega Firmware).....	78
---	----

Παράρτημα Β:

Κώδικας Κεντρικής Πύλης (Edge Gateway Python Script).....	81
---	----

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	84
--------------------------	-----------

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Γενικό Πλαίσιο και Κίνητρο

Η υποβάθμιση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις του 20^{ου} αιώνα, με άμεσες επιπτώσεις στη δημόσια υγεία, το οικοσύστημα και την παγκόσμια οικονομία [19], [20]. Ιδιαίτερα στο βιομηχανικό περιβάλλον, η έκθεση των εργαζομένων σε αέριους ρύπους όπως το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), τα οξείδια του αζώτου (NO_x) και οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs), απαιτεί συνεχή και αξιόπιστη επιτήρηση [21]. Η παραδοσιακή μέθοδος δειγματοληψίας με στατικούς σταθμούς μέτρησης, αν και ακριβής, συχνά χαρακτηρίζεται από υψηλό κόστος και έλλειψη χωρικής ευελιξίας.

1.2 Αντικείμενο και Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα εργασία εστιάζει στον σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενός πρότυπου, χαμηλού κόστους συστήματος ανίχνευσης και καταγραφής ρύπων, βασισμένου στις τεχνολογίες του Internet of Things (IoT) [1], [30]. Κεντρικός στόχος είναι η δημιουργία μιας αυτόνομης μονάδας που θα επιτρέπει:

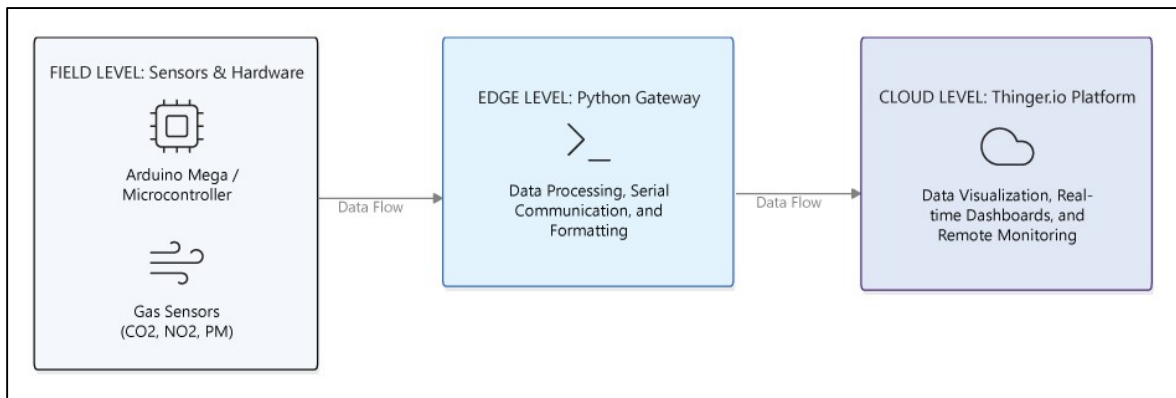
- Τη συνεχή παρακολούθηση των συγκεντρώσεων αερίων σε πραγματικό χρόνο [9].
- Την ασύρματη μετάδοση των δεδομένων σε cloud περιβάλλον για περαιτέρω επεξεργασία [3].
- Την έγκαιρη προειδοποίηση μέσω οπτικοακουστικών σημάτων ή ψηφιακών ειδοποιήσεων σε περίπτωση υπέρβασης των θεσμοθετημένων ορίων ασφαλείας [11].

1.3 Τεχνολογική Προσέγγιση

Για την υλοποίηση του συστήματος επιλέχθηκε ο μικροελεγκτής Arduino Mega 2560 R3, ο οποίος προσφέρει την απαραίτητη υπολογιστική ισχύ και πληθώρα αναλογικών εισόδων για τη διασύνδεση πολλαπλών αισθητήρων [27], [29]. Η ανίχνευση πραγματοποιείται μέσω αισθητήρων ημιαγωγών της οικογένειας MQ, οι οποίοι διακρίνονται για την ευαισθησία τους σε ευρύ φάσμα επικίνδυνων ουσιών [21], [24].

Η καινοτομία της πρότασης έγκειται στην αξιοποίηση της πλατφόρμας Thingier.io, η οποία λειτουργεί ως ο συνδετικός κρίκος μεταξύ του φυσικού κόσμου (hardware) και της ψηφιακής πληροφορίας [34], [35]. Μέσω αυτής, επιτυγχάνεται η αποθήκευση ιστορικών δεδομένων σε Data Buckets, επιτρέποντας την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις διακυμάνσεις της ρύπανσης σε βάθος χρόνου (Trend Analysis).

Η συνολική τεχνολογική προσέγγιση και η ροή της πληροφορίας από το επίπεδο του πεδίου έως την τελική οπτικοποίηση στο υπολογιστικό νέφος αποτυπώνεται σχηματικά στην **Εικόνα 1.3**



Εικόνα 1.3: Γενικό διάγραμμα της προτεινόμενης τριεπίπεδης (3-layer) αρχιτεκτονικής του συστήματος IoT.

1.4 Δομή της Εργασίας

Η εργασία διαρθρώνεται σε έξι κύριες ενότητες:

Κεφ. 1 Εισαγωγή

- Με τι θα ασχοληθούμε, περιγραφή της πειραματικής εφαρμογής.

Κεφ. 2 Τεχνολογίες αισθητήρων

- Σύγχρονοι αισθητήρες αερίων ρύπων, επιδόσεις και περιορισμοί.

Κεφ. 3 Διαδίκτυο των αντικειμένων

- Το διαδίκτυο των αντικειμένων ως μέσο εκδημοκρατισμού της διαδικασίας συλλογής, επεξεργασίας και ανάλυσης δεδομένων πεδίου.

Κεφ. 4 Πλατφόρμες IoT

- «Παραδοσιακά» συστήματα SCADA.
- Οι πλατφόρμες IoT ως εναλλακτικά SCADA.

Κεφ. 5 Σχεδίαση Συστήματος Αέρα

- Σχεδίαση ενός συστήματος αξιολόγησης σε βιομηχανικό περιβάλλον

Κεφ. 6 Πειραματική εφαρμογή

- Προδιαγραφές.

- Σχεδίαση συστήματος.
- Πειραματική υλοποίηση.
- Ανάλυση δεδομένων και οπτικοποίηση (dashboard).

Κεφ. 7 Συμπεράσματα

- Μελλοντικές επεκτάσεις.

1.5 Νομοθετικό Πλαίσιο και Επιτρεπτά Όρια

Η διασφάλιση της ποιότητας του αέρα και η προστασία της δημόσιας υγείας, καθώς και της ασφάλειας των εργαζομένων σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, διέπονται από ένα αυστηρό θεσμικό και νομοθετικό πλαίσιο [11], [12]. Στο πλαίσιο σχεδιασμού και ανάπτυξης του προτεινόμενου συστήματος IoT, η γνώση των νομοθετημένων επιτρεπτών ορίων συγκέντρωσης αέριων ρύπων αποτελεί τον θεμελιώδη άξονα για τον ορισμό των παραμέτρων λειτουργίας, των κατωφλίων ειδοποίησης (warning thresholds) και των ορίων συναγερμού (alarm limits).

Για την ορθή αξιολόγηση των μετρήσεων πεδίου, είναι απαραίτητος ο σαφής διαχωρισμός μεταξύ δύο βασικών κατηγοριών νομοθεσίας:

1. Ποιότητα Εξωτερικού Περιβαλλοντικού Αέρα (Ambient Air Quality): Αφορά την προστασία του γενικού πληθυσμού και του περιβάλλοντος από τη χρόνια έκθεση σε ρύπους [19].
2. Υγεία και Ασφάλεια στην Εργασία / Επαγγελματική Έκθεση (Occupational Health and Safety / Workplace Exposure): Αφορά τους εργαζόμενους σε βιομηχανικούς ή κλειστούς χώρους εργασίας, όπου οι συγκεντρώσεις επικίνδυνων αερίων μπορεί να μεταβληθούν απότομα λόγω παραγωγικών διεργασιών [20].

1.5.1 Ευρωπαϊκό και Διεθνές Θεσμικό Πλαίσιο

Στον ευρωπαϊκό χώρο, η κεντρική οδηγία για την ποιότητα του αέρα είναι η Οδηγία 2008/50/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη [12]. Η οδηγία αυτή θέτει δεσμευτικούς στόχους και οριακές τιμές για αέριους ρύπους όπως το διοξείδιο του αζώτου (NO_2), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το όζον (O_3), το διοξείδιο του θείου (SO_2) και τα αιωρούμενα σωματίδια ($\text{PM}_{2.5}$ και PM_{10}) [20].

Παράλληλα, για την προστασία των εργαζομένων σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις εφαρμόζονται οι ευρωπαϊκές Οδηγίες Ενδεικτικών Οριακών Τιμών Επαγγελματικής Έκθεσης (IOELVs) (όπως οι Οδηγίες 98/24/EK, 2000/39/EK και οι μετέπειτα τροποποιήσεις τους) [21], σε συνδυασμό με τις κατευθυντήριες οδηγίες διεθνών οργανισμών όπως:

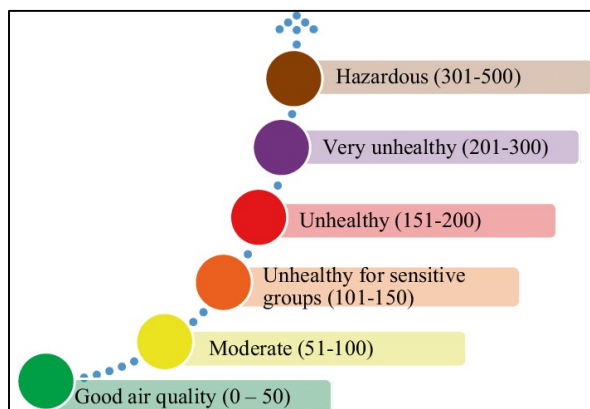
- Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO): Παρέχει αυστηρές κατευθυντήριες γραμμές (Global Air Quality Guidelines) για τα μακροπρόθεσμα και βραχυπρόθεσμα επίπεδα έκθεσης [19].
- Ο OSHA (Occupational Safety and Health Administration) και το NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health): Θεσπίζουν όρια επαγγελματικής έκθεσης για την πρόληψη επαγγελματικών ασθενειών και ατυχημάτων [20].

1.5.2 Δείκτες Αξιολόγησης Έκθεσης και Επικινδυνότητας

Για τη μετατροπή των ακατέργαστων μετρήσεων των αισθητήρων σε επιχειρησιακή πληροφορία, η νομοθεσία και η βιομηχανική πρακτική χρησιμοποιούν συγκεκριμένους δείκτες [20], [21]:

1. TWA (Time-Weighted Average - Χρονικά Σταθμισμένος Μέσος Όρος): Ορίζει τη μέση επιτρεπτή συγκέντρωση μιας ουσίας στην οποία μπορεί να εκτεθεί ένας εργαζόμενος κατά τη διάρκεια μιας τυπικής 8ωρης βάρδιας (και 40ωρης εβδομάδας εργασίας) χωρίς δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία του [21].
2. STEL (Short-Term Exposure Limit - Όριο Βραχυχρόνιας Έκθεσης): Αντιπροσωπεύει τη μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση για σύντομο χρονικό διάστημα (συνήθως 15 λεπτά), η οποία δεν πρέπει να υπερβαίνεται σε κανένα σημείο της βάρδιας, προκειμένου να αποφευχθούν οξείες παρενέργειες (π.χ. ερεθισμός, ζάλη). [21]
3. LEL (Lower Explosive Limit - Κατώτερο Όριο Εκρηκτικότητας): Για εύφλεκτα και εκρηκτικά αέρια (όπως το μεθάνιο, CH₄), το LEL είναι η ελάχιστη συγκέντρωση του αερίου στον αέρα που μπορεί να προκαλέσει ανάφλεξη ή έκρηξη παρουσία πηγής έναυσης [24]. Τα βιομηχανικά όρια ασφαλείας ορίζονται συνήθως ως ποσοστό του LEL (π.χ. προειδοποίηση στο 10% LEL και συναγερμός στο 20% LEL).
4. Δείκτης Ποιότητας Αέρα (AQI - Air Quality Index): Ένας συγκεντρωτικός, αδιάστατος δείκτης που μετατρέπει τις σύνθετες συγκεντρώσεις πολλαπλών ρύπων σε μια εύκολα κατανοητή κλίμακα επικινδυνότητας (π.χ. Πράσινο/Καλή, Κίτρινο/Μέτρια, Κόκκινο/Ανθυγιεινή). [19]

Τα επιτρεπτά όρια και οι κατηγοριοποιήσεις επικινδυνότητας ανάλογα με τη συγκέντρωση των ρύπων στην ατμόσφαιρα, όπως ορίζονται από το ισχύον θεσμικό πλαίσιο, συνοψίζονται οπτικά στον επίσημο οδηγό της **Εικόνας 1.5**.



Εικόνα 1.5: Κατηγοριοποίηση επιπέδων επικινδυνότητας βάσει του Δείκτη Ποιότητας Αέρα (AQI) [41].

1.5.3 Επιτρεπτά Όρια για τους υπό Μελέτη Ρύπους και Παραμέτρους

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η πειραματική διάταξη IoT ενσωματώνει συστοιχία αισθητήρων για τη μέτρηση πρωτογενών αέριων ρύπων και περιβαλλοντικών παραμέτρων. Τα θεσμοθετημένα όρια για τις παραμέτρους αυτές συνοψίζονται στον **Πίνακα 1.5.3**:

Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO): Τοξικό, άοσμο αέριο. Σύμφωνα με την Οδηγία 2008/50/EK, το όριο για την προστασία της υγείας στον ατμοσφαιρικό αέρα είναι 10 mg/m^3 (περίπου 9 ppm) ως μέγιστη ημερήσια οκτάωρη μέση τιμή [12]. Στο εργασιακό περιβάλλον, το όριο TWA (8ωρο) ορίζεται στα 20 - 30 ppm ανάλογα με τον εθνικό κανονισμό [20].

Μεθάνιο (CH₄): Εύφλεκτο αέριο και ισχυρό θερμοκηπιακό αέριο. Το Κατώτερο Όριο Εκρηκτικότητας (LEL) ανέρχεται στο 5% v/v (50.000 ppm) [24]. Τα συστήματα ασφαλείας ενεργοποιούν προειδοποιήσεις πολύ χαμηλότερα από το LEL.

Διοξείδιο του Αζώτου (NO₂): Έντονα ερεθιστικό αέριο. Η Οδηγία 2008/50/EK ορίζει οριακή τιμή 1 ώρας τα $200 \mu\text{g/m}^3$ ($\approx 105 \text{ ppb}$) και ετήσια οριακή τιμή τα $40 \mu\text{g/m}^3$ ($\approx 21 \text{ ppb}$). [12], [19]

Διοξείδιο του Άνθρακα (CO₂): Αν και φυσικό συστατικό της ατμόσφαιρας ($\approx 420 \text{ ppm}$), σε κλειστούς χώρους αποτελεί βασικό δείκτη ποιότητας εσωτερικού αέρα (IAQ) και επάρκειας εξαερισμού. Συγκεντρώσεις πάνω από 1.000 ppm υποδηλώνουν ανεπαρκή ανανέωση αέρα, ενώ όρια TWA 5.000 ppm ισχύουν για την επαγγελματική ασφάλεια [19], [20].

Πτητικές Οργανικές Ενώσεις (VOCs): Ομάδα οργανικών χημικών ενώσεων με υψηλή τάση ατμών. Η έκθεση σε VOCs μπορεί να προκαλέσει βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες

επιπτώσεις στην υγεία [21]. Τα συνιστώμενα όρια για το συνολικό φορτίο VOCs (tVOC) σε εσωτερικούς χώρους κυμαίνονται κάτω από 0,3 - 0,5 mg/m³.

Θερμοκρασία και Σχετική Υγρασία: Παράμετροι που, πέρα από την θερμική άνεση, επηρεάζουν άμεσα τη φυσικοχημεία και την ευαισθησία των αισθητήρων ημιαγωγών (όπως η σειρά MQ) [21], [24]. Η παρακολούθησή τους είναι απαραίτητη για την εφαρμογή αλγορίθμων αντιστάθμισης και διόρθωσης των μετρήσεων στο Edge Gateway. [26], [34].

Αέριος Ρύπος / Παράμετρος	Όριο Περιβαλλοντικού Αέρα (2008/50/EK)	Όριο Επαγγελματικής Έκθεσης (TWA - 8ωρο)	Κατώφλι Εκρηκτικότητας (LEL) / IAQ
Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO)	10 mg/m ³ (9 ppm) (8ωρο)	20 – 30 ppm	-
Μεθάνιο (CH ₄)	-	1000 ppm	5% v/v (50000 ppm) = 100% LEL
Διοξείδιο του Αζώτου (NO ₂)	200μg/m ³ (1 ωριαίο)	0,5 ppm (1 mg/m ³)	-
Διοξείδιο του Άνθρακα (CO ₂)	-	5000 ppm	1.000 ppm (Όριο Επαρκούς Εξαερισμού IAQ)
Πτητικές Οργανικές Ενώσεις (VOCs)	-	Ανάλογα με την ένωση (π.χ. Βενζόλιο 1 ppm)	< 0,5 mg/m ³ (tVOC)

Πίνακας 1.5.3: Συγκεντρωτικός πίνακας επιτρεπτών ορίων και δεικτών επικινδυνότητας αέριων ρύπων.

1.5.4 Ενσωμάτωση Νομοθετικών Ορίων στη Λογική του Συστήματος IoT

Στο αναπτυχθέν σύστημα IoT, τα παραπάνω νομοθετικά όρια δεν αποτελούν απλώς θεωρητικές αναφορές, αλλά μεταφράζονται σε λογικούς κανόνες (business logic) στο επίπεδο του λογισμικού (Edge Gateway & Cloud Platform Thinger.io) [7], [34], [35]:

- Επίπεδο Προειδοποίησης (Warning Threshold): Ορίζεται στο 50% - 70% του νομοθετημένου ορίου TWA [36]. Όταν οι τιμές υπερβούν το κατώφλι αυτό, το σύστημα καταγράφει την τάση αύξησης και ενημερώνει προληπτικά τον διαχειριστή μέσω του Dashboard [34].
- Επίπεδο Συναγερμού (Critical Alarm Threshold): Ορίζεται στο 100% του ορίου TWA ή STEL (ή στο 10% - 20% LEL για εύφλεκτα αέρια) [36]. Η υπέρβαση ενεργοποιεί άμεσες ειδοποιήσεις (push notifications, emails) και τοπικά σήματα κινδύνου για την εκκένωση ή τον εξαερισμό του χώρου [7], [34].

Κεφάλαιο 2: Τεχνολογίες Αισθητήρων & Φυσικοχημεία Αέριων Ρύπων

2.1 Ιστορική Αναδρομή και Εξέλιξη

Η ανάγκη για την έγκαιρη ανίχνευση επικίνδυνων αερίων δεν αποτελεί σύγχρονο φαινόμενο, αλλά γεννήθηκε παράλληλα με τις απαρχές της Βιομηχανικής Επανάστασης [22]. Οι πρώτες συστηματικές προσπάθειες καταγράφονται στα ορυχεία, όπου η παρουσία του μεθανίου και του μονοξειδίου του άνθρακα αποτελούσε μια διαρκή, αόρατη απειλή για τη ζωή των εργαζομένων.

Στις αρχές του 20ού αιώνα, η έλλειψη τεχνικών μέσων οδήγησε στην υιοθέτηση της λεγόμενης «μεθόδου του καναρινιού». Τα πτηνά αυτά λειτουργούσαν ως οι πρώτοι βιολογικοί ανιχνευτές, καθώς ο εξαιρετικά ταχύς μεταβολισμός τους τα καθιστούσε ευάλωτα στις τοξικές συγκεντρώσεις πολύ πριν οι άνθρωποι αντιληφθούν τον κίνδυνο [22]. Ωστόσο, η ανάγκη για πιο αξιόπιστα και μηχανικά μέσα έφερε στο προσκήνιο τη λυχνία ασφαλείας του Sir Humphry Davy το 1815. Η καινοτομία της λυχνίας Davy βασιζόταν σε ένα λεπτό μεταλλικό πλέγμα που περιέβαλλε τη φλόγα, εμποδίζοντας την εξάπλωση της ανάφλεξης στο περιβάλλον, ενώ παράλληλα η αλλαγή στο χρώμα ή το ύψος της φλόγας παρείχε μια πρώτη οπτική ένδειξη για την παρουσία εύφλεκτων αερίων.

Η πραγματική τεχνολογική επανάσταση, που έθεσε τις βάσεις για τα σύγχρονα συστήματα που μελετώνται στην παρούσα εργασία, έλαβε χώρα τη δεκαετία του 1960 [23]. Ο Ιάπωνας εφευρέτης Naoyoshi Taguchi ανέπτυξε το 1962 τον πρώτο αισθητήρα ημιαγωγού οξειδίου του μετάλλου (Metal Oxide Semiconductor - MOS), προσφέροντας για πρώτη φορά τη δυνατότητα ηλεκτρονικής μέτρησης των αέριων ρύπων [21], [23]. Η εφεύρεση αυτή υπήρξε καθοριστική, καθώς οι αισθητήρες της σειράς MQ που χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη πειραματική διάταξη αποτελούν την άμεση εξέλιξη της τεχνολογίας του Taguchi [24], [25]. Από τους πρωτόγονους βιολογικούς δείκτες των ορυχείων περάσαμε έτσι στην εποχή του βιομηχανικού αυτοματισμού, όπου η ανίχνευση βασίζεται πλέον στις μεταβολές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των υλικών [21], [22].

2.2 Φυσική Ημιαγωγών και Μηχανισμός Λειτουργίας

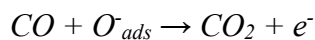
Οι αισθητήρες MQ βασίζονται στη φυσική των ημιαγωγών τύπου n (συνήθως SnO_2).

2.2.1 Η Δομή των Ενεργειακών Ζωνών

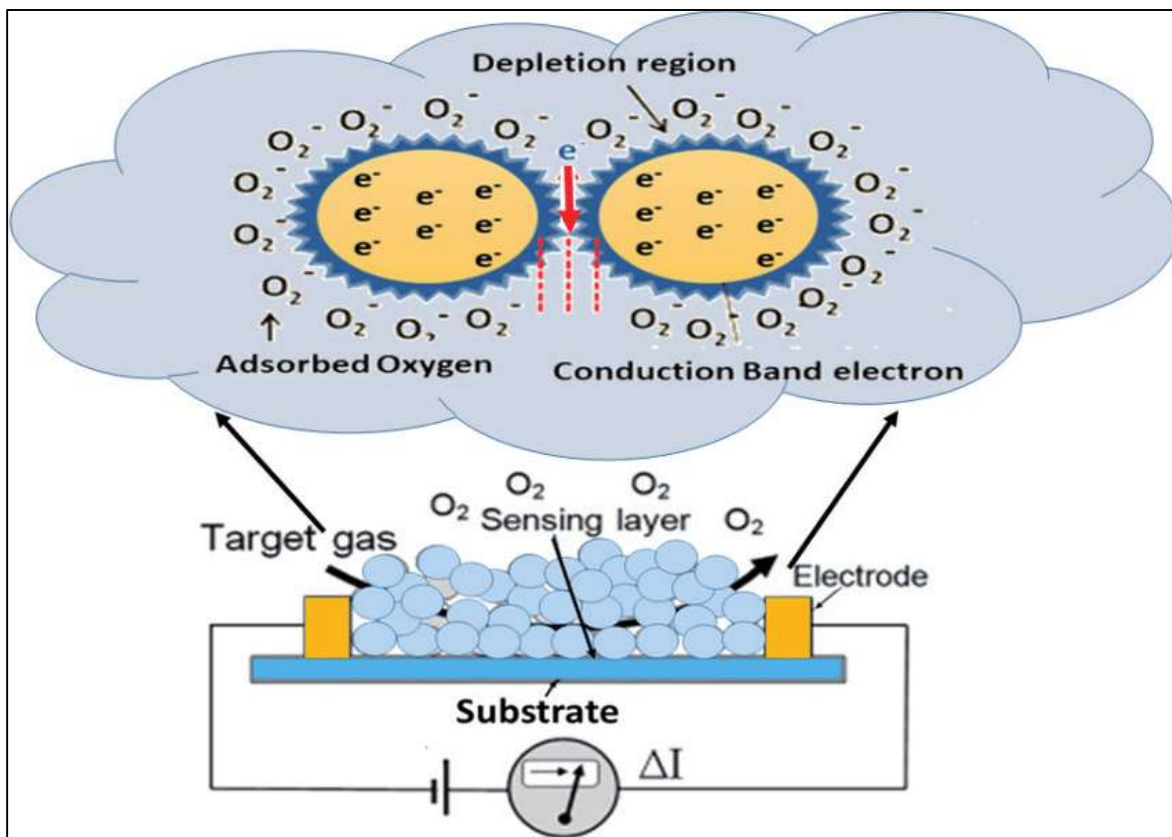
Το διοξείδιο του κασσιτέρου έχει ένα ενεργειακό χάσμα (bandgap) περίπου 3.6 eV. Όταν ο αισθητήρας θερμαίνεται (μέσω του εσωτερικού heater) στους 300°C - 400°C, το οξυγόνο της ατμόσφαιρας προσροφάται στην επιφάνειά του. Αυτό προκαλεί τη δέσμευση ηλεκτρονίων από τη ζώνη αγωγιμότητας, δημιουργώντας μια στιβάδα απογύμνωσης (depletion layer) και ένα δυναμικό φράγμα (Schottky barrier) στα όρια των κρυστάλλων.

2.2.2 Η Χημική Αντίδραση

Όταν ένα αναγωγικό αέριο (π.χ. CO ή CH₄) έρθει σε επαφή με την επιφάνεια, αντιδρά με το ιονισμένο οξυγόνο:



Τα απελευθερωμένα ηλεκτρόνια επιστρέφουν στον ημιαγωγό, μειώνοντας την αντίσταση και επιτρέποντας στο ρεύμα να ρέει ευκολότερα (**Εικόνα 2.2**).



Εικόνα 2.2: Μηχανισμός ανίχνευσης και μεταβολής της αντίστασης σε αισθητήρα αερίου μεταλλικού οξειδίου (MOS) [42].

2.3 Αναλυτική Περιγραφή της Επιλεγμένης Διάταξης

Παρατίθεται η συστοιχία αισθητήρων που καλύπτει το σύνολο των βιομηχανικών κινδύνων [24]:

MQ-3 (Alcohol/VOCs): Ανιχνεύει ατμούς αλκοόλης και οργανικούς διαλύτες (0.05 - 10 mg/L). Κρίσιμος για βιομηχανίες χημικών [24].

MQ-4 (Natural Gas/Methane): Υψηλή ευαισθησία στο CH₄ (200 - 10,000 ppm) [24].

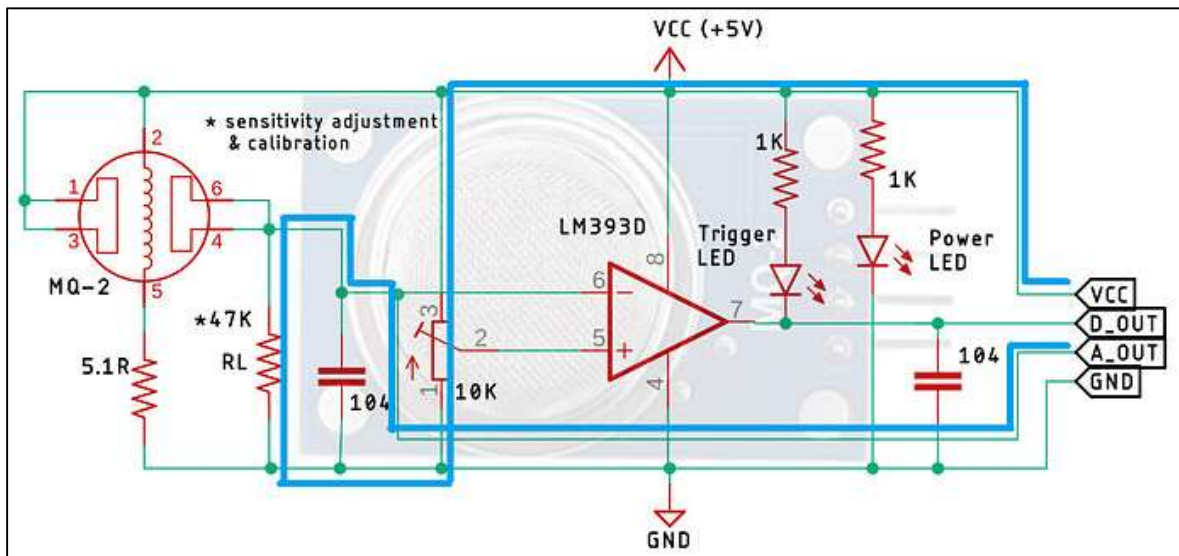
MQ-7 (Carbon Monoxide): Εξειδικευμένος για το CO. Χρησιμοποιεί κύκλο PWM (5V και 1.4V) για την αποφυγή κορεσμού [24].

MQ-8 (Hydrogen): Ανιχνεύει H₂ (100 - 10,000 ppm). Εξαιρετικά γρήγορη απόκριση λόγω του μικρού μορίου του υδρογόνου [24].

MQ-9 (CO & Flammable Gases): Διπλός έλεγχος για CO και LPG [24].

MQ-135 (Air Quality): Πολυπαραμετρικός αισθητήρας για NH₃, NO_x, και Βενζόλιο [24].

BOSCH BME680 & SENSIRION SCD30 (Contextual Digital Sensors): Παρέχουν ψηφιακές μετρήσεις θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας υψηλής ακρίβειας [26], [27], οι οποίες χρησιμοποιούνται για την περιβαλλοντική αντιστάθμιση (compensation) των αναλογικών μετρήσεων της σειράς MQ, καθώς οι θερμοϋγρομετρικές μεταβολές επηρεάζουν τεχνητά την αγωγιμότητα των στοιχείων MOS [28].



Εικόνα 2.3: Ηλεκτρονικό κύκλωμα διαιρέτη τάσης για τη μέτρηση της μεταβολής της αντίστασης του αισθητήρα [43].

2.4 Συγκριτικός Πίνακας Τεχνολογιών

Χαρακτηριστικό	MOS (Σειρά MQ)	Ηλεκτροχημικοί	PID (Photoionization)
Κόστος	Χαμηλό (~5€-10€)	Υψηλό (~100€)	Πολύ Υψηλό (>500€)
Διάρκεια Ζωής	2-5 έτη	1-2 έτη	2-3 έτη
Επιλεκτικότητα	Μέτρια	Υψηλή	Πολύ Υψηλή
Κατανάλωση	Υψηλή (Heater)	Πολύ Χαμηλή	Μέτρια
Εφαρμογή	IoT & Βιομηχανία	Ιατρική & Ακρίβεια	Εργαστηριακή Ανάλυση

Πίνακας 2.4: Συγκριτικός Πίνακας Τεχνολογιών

2.5 Μαθηματική Μοντελοποίηση

Η μετατροπή της αναλογικής τιμής του Arduino (0-1023) σε ppm απαιτεί την επίλυση της εξίσωσης ευαισθησίας που δίνεται από τους κατασκευαστές [24], [28].

2.5.1 Υπολογισμός Αντίστασης Αισθητήρα (R_s)

Ο μικροελεγκτής Arduino Mega 2560 μετράει την τάση V_{RL} στην αντίσταση φορτίου (R_L) [29]:

$$R_S = \frac{V_C - V_{LR}}{V_{LR}} \cdot R_L$$

Όπου $V_c = 5V$ [24].

2.5.2 Μετατροπή σε PPM

Η σχέση είναι λογαριθμική και περιγράφεται από τον νόμο της δύναμης [24], [25]:

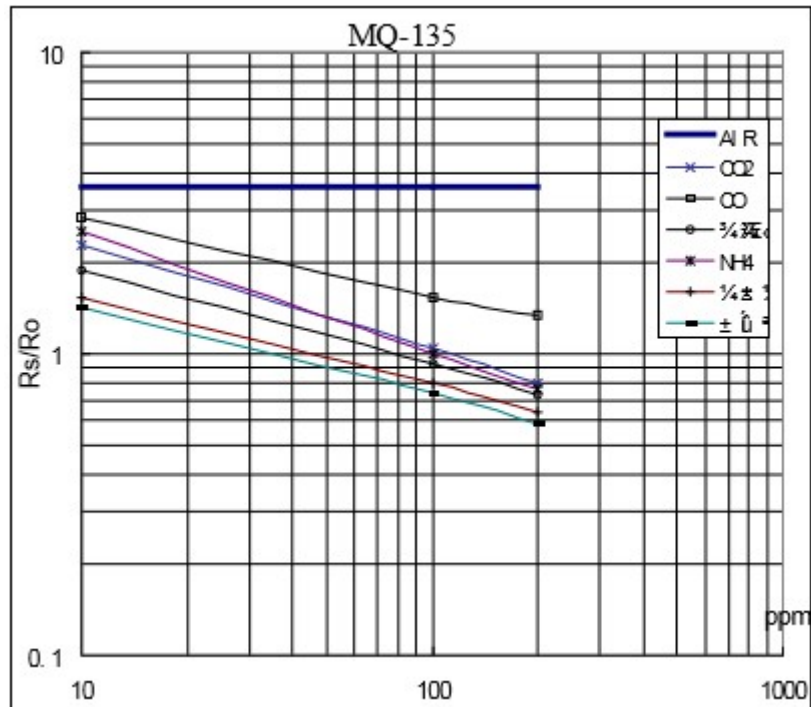
$$\frac{R_S}{R_O} = a \cdot (ppm)^b \Rightarrow \log\left(\frac{R_S}{R_O}\right) = \log(a) + b \cdot \log(ppm)$$

Λύνοντας ως προς ppm [26]:

$$ppm = 10^{\frac{\log(R_S/R_O) - \log(a)}{b}}$$

Οι σταθερές a και b προκύπτουν από τη γραμμική παλινδρόμηση των καμπυλών ευαισθησίας (log-log plots) στα datasheets [24].

Συνεπώς, η μαθηματική αυτή προσέγγιση επιτρέπει τον ακριβή προσδιορισμό της συγκέντρωσης του εκάστοτε αερίου, μετατρέποντας τα ηλεκτρικά σήματα του αισθητήρα σε αξιοποιήσιμη πληροφορία ρύπων. Η λογαριθμική αυτή σχέση και οι χαρακτηριστικές καμπύλες ευαισθησίας του αισθητήρα αποτυπώνονται γραφικά στην **Εικόνα 2.5**.



Εικόνα 2.5: Καμπύλη ευαισθησίας του αισθητήρα σε συνάρτηση με τη συγκέντρωση αερίων σε ppm [44].

2.6 Διαδικασία Βαθμονόμησης (Calibration)

Οι αισθητήρες MQ δεν παρέχουν απευθείας ppm, αλλά μια μεταβολή της ηλεκτρικής τους αντίστασης [24]. Η διαδικασία βαθμονόμησης που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει [24], [26]:

Pre-heating: Οι αισθητήρες απαιτούν "περίοδο αρχικής λειτουργίας" (burn-in) τουλάχιστον 24-48 ωρών πριν την πρώτη μέτρηση για να σταθεροποιηθεί η χημική επίστρωση.

Υπολογισμός: Η αντίσταση σε "καθαρό αέρα". Χρησιμοποιούμε τη σχέση [24], [28]:

$$R_o = \frac{R_s}{Clean_Air_Factor}$$

όπου το *Clean Air Factor* λαμβάνεται από τις καμπύλες του κατασκευαστή.

Θερμοκρασιακή Αντιστάθμιση: Χρησιμοποιώντας τα ψηφιακά δεδομένα αναφοράς των αισθητήρων BME680 και SCD30, εφαρμόζεται ένας δυναμικός διορθωτικός συντελεστής $f(T, H)$ στο επίπεδο του Edge Gateway, ο οποίος μεταβάλλει την τιμή της R_s ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες, αποφεύγοντας ψευδείς συναγερμούς σε θερμά ή υγρά βιομηχανικά περιβάλλοντα [26].

Κεφάλαιο 3: Το Διαδίκτυο των Αντικειμένων (IoT) και ο Εκδημοκρατισμός των Δεδομένων

3.1 Εισαγωγή και Ιστορικό Υπόβαθρο

Το Διαδίκτυο των Αντικειμένων (Internet of Things - IoT) αντιπροσωπεύει το τεχνολογικό παράδειγμα που επιτρέπει την οργανική διασύνδεση φυσικών οντοτήτων με το ψηφιακό οικοσύστημα [1], [2]. Αν και οι απαρχές της ενσωμάτωσης υπολογιστικής νοημοσύνης σε καθημερινές συσκευές εντοπίζονται ήδη από τη δεκαετία του 1980, η καταλυτική μεταβολή επήλθε μέσω δύο κύριων παραγόντων: την υιοθέτηση του πρωτοκόλλου IPν6, το οποίο προσέφερε έναν ουσιαστικά απεριόριστο χώρο διευθύνσεων, και τη δραματική μείωση του κόστους κατασκευής των μικροελεγκτών (Microcontrollers) [2], [3].

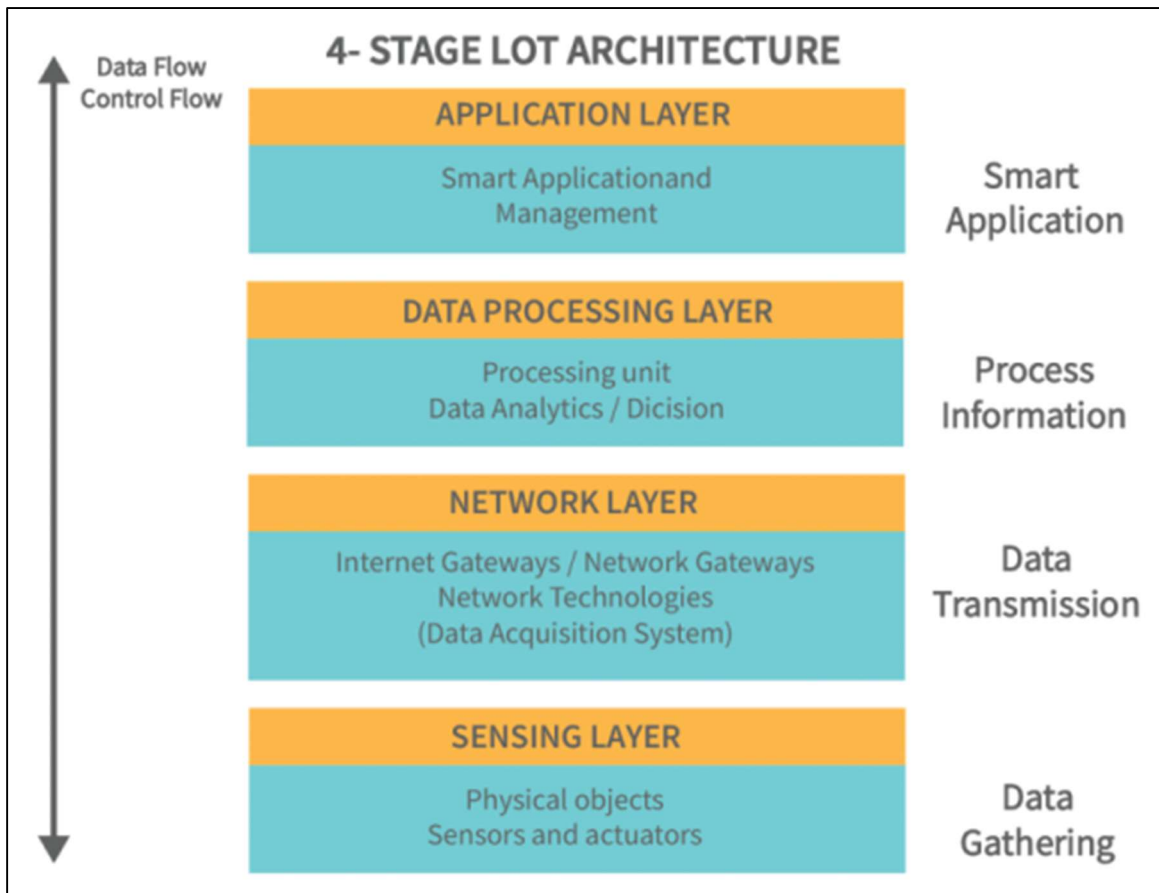
Στο σύγχρονο παραγωγικό περιβάλλον, το IoT δεν αποτελεί πλέον μια απλή τεχνολογική προσθήκη, αλλά τον κεντρικό πυλώνα του Industry 4.0 [4]. Μέσω της διάχυσης αισθητήρων και της συνεχούς ροής δεδομένων, οι παραδοσιακές βιομηχανικές μονάδες μετεξελίσσονται σε «Εξυπνα Εργοστάσια» (Smart Factories) [3], [4]. Σε αυτά, η πληροφορία δεν περιορίζεται στην τοπική καταγραφή, αλλά μετατρέπεται σε συλλογική γνώση, επιτρέποντας τη βελτιστοποίηση των διεργασιών, την ενίσχυση της ασφάλειας και τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο (real-time decision making) [2], [4].

3.1.1 Η Φιλοσοφία του Εκδημοκρατισμού της Πληροφορίας

Κεντρικό πυλώνα της παρούσας εργασίας αποτελεί η έννοια του «εκδημοκρατισμού των δεδομένων» (Data Democratization), μια τάση που αναδιαμορφώνει ριζικά τον τρόπο με τον οποίο οι επιχειρήσεις διαχειρίζονται την πληροφορία [3], [8]. Στην παραδοσιακή βιομηχανία, η πρόσβαση σε κρίσιμα δεδομένα —όπως οι μετρήσεις ρύπων— αποτελούσε συχνά προνόμιο μιας κλειστής ομάδας εξειδικευμένων τεχνικών ή απαιτούσε την εγκατάσταση δυσπρόσιτων και δαπανηρών κλειστών συστημάτων. Με την υιοθέτηση ανοιχτών αρχιτεκτονικών, όπως ο συνδυασμός του μικροελεγκτή Arduino Mega με την πλατφόρμα Thingier.io, η πληροφορία παύει να είναι εγκλωβισμένη σε στενά τεχνικά πλαίσια [30], [34].

Αυτή η προσέγγιση επιτυγχάνει την κατάρριψη των λεγόμενων «σιλό δεδομένων» (Data Silos), διασφαλίζοντας ότι η εικόνα για την ποιότητα του αέρα και την ασφάλεια του χώρου είναι διαθέσιμη σε πραγματικό χρόνο σε όλα τα επίπεδα της επιχείρησης, από τη γραμμή παραγωγής έως τη διοίκηση [8], [35]. Παράλληλα, η χρήση χαμηλού κόστους αλλά υψηλής αξιοπιστίας εξοπλισμού μειώνει δραστικά τους φραγμούς εισόδου [30]. Με αυτόν τον τρόπο, ακόμη και μικρομεσαίες επιχειρήσεις αποκτούν πλέον τη δυνατότητα να θωρακίσουν τις εγκαταστάσεις τους με συστήματα ασφαλείας που στο παρελθόν απαιτούσαν επενδύσεις χιλιάδων ευρώ, μετατρέποντας την ασφάλεια από ακριβό προνόμιο σε καθολικό δικαίωμα και προδιαγραφή [3], [30].

Η ροή της πληροφορίας και η διασύνδεση των επιμέρους υποσυστημάτων βασίζεται σε ένα πολυεπίπεδο οικοσύστημα, τα δομικά στοιχεία του οποίου αποτυπώνονται σχηματικά στην **Εικόνα 3.1**.



Εικόνα 3.1: Τα βασικά επίπεδα αρχιτεκτονικής και η ροή δεδομένων σε ένα τυπικό οικοσύστημα IoT [45].

3.2 Αρχιτεκτονική Τριών Επιπέδων (3-Tier Architecture)

Για την υλοποίηση του προτεινόμενου βιομηχανικού συστήματος παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, υιοθετείται μια κλασική Αρχιτεκτονική Τριών Επιπέδων (Three-Tier Architecture) [3], [6]. Η προσέγγιση αυτή αποτελεί τη διεθνή βιομηχανική πρακτική για την ανάπτυξη εύρωστων εφαρμογών Industrial IoT (IIoT), καθώς προσφέρει υψηλή βαθμωτότητα (scalability), ευελιξία στη συντήρηση και σαφή διαχωρισμό των αρμοδιοτήτων (separation of concerns) μεταξύ του φυσικού εξοπλισμού και των υπολογιστικών πόρων [7], [8].

Τα τρία επίπεδα που συνθέτουν την αρχιτεκτονική του συστήματος αναλύονται ιεραρχικά από τη βάση προς την κορυφή ως εξής:

3.2.1 Επίπεδο 1: Επίπεδο Πεδίου και Ανίχνευσης (Field / Perception Level)

Το πρώτο επίπεδο βρίσκεται στο φυσικό περιβάλλον της παραγωγής (shop floor) και είναι υπεύθυνο για την πρωτογενή αλληλεπίδραση με το φυσικό φαινόμενο [24], [28]. Αποτελείται από:

- Την Υβριδική Συστοιχία Αισθητήρων: Περιλαμβάνει τους αναλογικούς αισθητήρες χημικής αντίστασης ημιαγωγών οξειδίου μετάλλου (MOS) της σειράς MQ (MQ-7 για το μονοξείδιο του άνθρακα και MQ-135 για τη γενική ποιότητα αέρα/διοξείδιο του άνθρακα) [24], καθώς και τους ψηφιακούς αισθητήρες υψηλής πιστότητας (Sensirion SCD30 για μέτρηση CO_2 μέσω υπερύθρων NDIR [27] και Bosch BME680 για περιβαλλοντικές παραμέτρους και πτητικές οργανικές ενώσεις VOCs) [26].
- Τη Μονάδα Τοπικού Ελέγχου (Edge Node): Ως κεντρικός ελεγκτής του επιπέδου αυτού χρησιμοποιείται ο μικροελεγκτής Arduino Mega 2560 R3 [28], [29]. Το επίπεδο αυτό εκτελεί αποκλειστικά ντετερμινιστικές εργασίες σε πραγματικό χρόνο, όπως η περιοδική δειγματοληψία των αναλογικών θυρών (ADC channels), η ανάγνωση των ψηφιακών διαύλων επικοινωνίας (I^2C) [28], [29] και η ομαδοποίηση των ακατέργαστων μετρήσεων σε μια ενιαία συμβολοσειρά μορφής CSV, η οποία προωθείται μέσω σειριακής θύρας (UART-over-USB) στο επόμενο επίπεδο [28].

3.2.2 Επίπεδο 2: Επίπεδο Εγγύς Άκρου και Πύλης Διασύνδεσης (Edge / Gateway Level)

Το μεσαίο επίπεδο αποτελεί τον κρίσιμο συνδετικό κρίκο της αρχιτεκτονικής και υλοποιείται μέσω ενός τοπικού σταθμού εργασίας (H/Y) που λειτουργεί ως Edge Gateway, εκτελώντας ένα εξειδικευμένο λογισμικό σε γλώσσα Python [7], [30]. Η εισαγωγή αυτού του ενδιάμεσου επιπέδου είναι αρχιτεκτονικά απαραίτητη και δικαιολογείται από τους εξής θεμελιώδεις περιορισμούς και λειτουργικές ανάγκες:

- Γέφυρα Δικτύωσης (Network Bridging): Ο μικροελεγκτής Arduino Mega 2560 αποτελεί μια εξαιρετική και σταθερή επιλογή για τη διαχείριση αισθητήρων πεδίου, ωστόσο στερείται εγγενούς δικτυακής συνδεσιμότητας (Wi-Fi ή Ethernet) [28], [29]. Το Edge Gateway αναλαμβάνει να γεφυρώσει το φυσικό επίπεδο με το δίκτυο, λαμβάνοντας τη σειριακή ροή δεδομένων και μετατρέποντάς τη σε δικτυακά πακέτα [30].
- Ασφάλεια και Κρυπτογραφική Θωράκιση (Security & TLS/SSL Encryption): Η απευθείας επικοινωνία με σύγχρονες πλατφόρμες Cloud απαιτεί την ανταλλαγή δεδομένων μέσω κρυπτογραφημένων καναλιών (HTTPS / MQTTS) [34]. Ο 8-bit επεξεργαστής του Arduino Mega, με μόλις 8 KB μνήμης RAM, αδυνατεί να εκτελέσει το υπολογιστικό βάρος των αλγορίθμων ασφαλείας και διαχείρισης πιστοποιητικών χωρίς να παγώσει τη δειγματοληψία [28], [29]. Το Gateway (Python Script) αναλαμβάνει εξολοκλήρου τη διαχείριση των HTTP Headers και των

κρυπτογραφικών tokens (Bearer Auth), εξασφαλίζοντας την ακεραιότητα των δεδομένων απέναντι σε κακόβουλες εγχύσεις (data injection) [30], [34].

- Τοπική Επεξεργασία και Υβριδική Διόρθωση (Edge Computing & Analytics): Το Gateway εκτελεί τοπικά τις υπολογιστικά απαιτητικές μαθηματικές πράξεις [7]. Εδώ εφαρμόζεται ο υβριδικός αλγόριθμος αντιστάθμισης, όπου οι ψηφιακές ενδείξεις θερμοκρασίας και υγρασίας του BME680 χρησιμοποιούνται σε πραγματικό χρόνο για τη διόρθωση των αναλογικών καμπυλών των MQ αισθητήρων, μετατρέποντας τα raw ADC values σε αξιόπιστες μονάδες ppm πριν την αποστολή τους [26].
- Ανοχή σε Σφάλματα και Τοπική Αποθήκευση (Network Fault Tolerance / Buffering): Σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, οι αποσυνδέσεις από το Διαδίκτυο είναι συχνές. Αν το Arduino επιχειρούσε απευθείας μετάδοση, η απώλεια δικτύου θα σήμαινε οριστική απώλεια δεδομένων λόγω έλλειψης μνήμης [28], [36]. Το Python Gateway λειτουργεί ως buffer: σε περίπτωση σφάλματος επικοινωνίας με το Cloud, αποθηκεύει προσωρινά τις χρονοσειρές τοπικά και εκτελεί μαζική μεταφόρτωση (burst upload) μόλις η σύνδεση αποκατασταθεί [36].

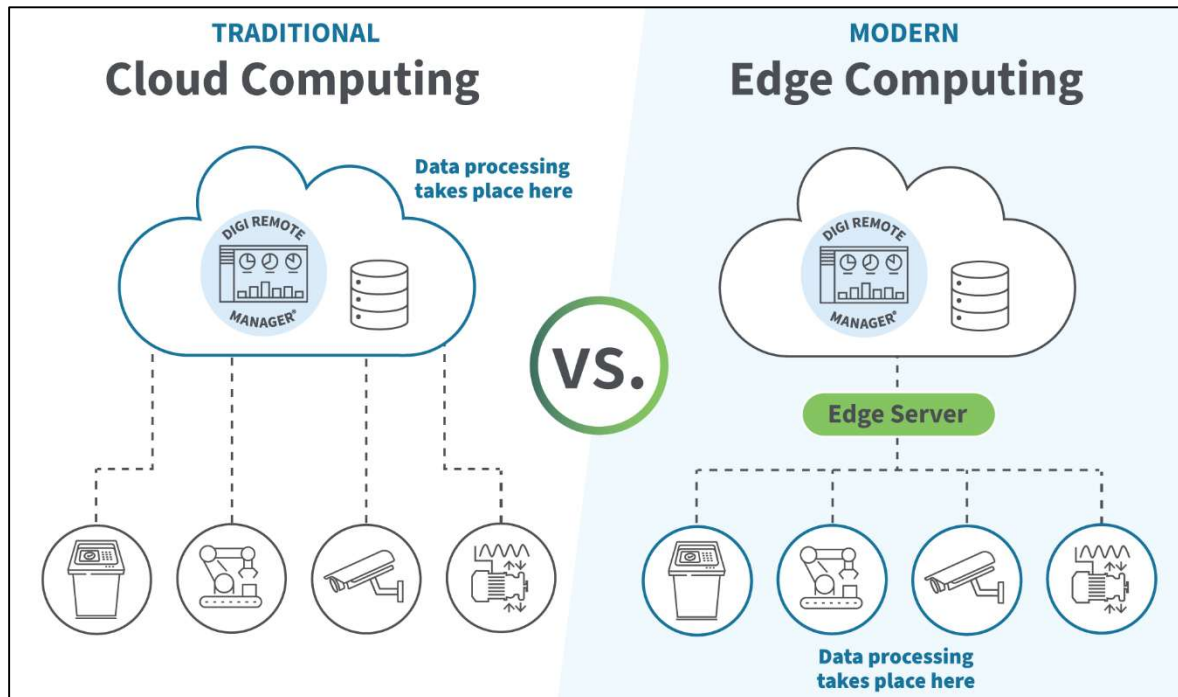
Αφού ολοκληρωθεί η επεξεργασία στο επίπεδο αυτό, τα δεδομένα μορφοποιούνται σε ελαφριά payload τύπου JSON (JavaScript Object Notation) και αποστέλλονται μέσω κλήσεων REST API στο ανώτερο επίπεδο [34].

3.2.3 Επίπεδο 3: Επίπεδο Νέφους και Εφαρμογής (Cloud / Application Level)

Το ανώτατο επίπεδο της αρχιτεκτονικής φιλοξενείται στο υπολογιστικό νέφος μέσω της industrial IoT πλατφόρμας Thingier.io [34]. Το επίπεδο αυτό είναι υπεύθυνο για την τελική διαχείριση, αποθήκευση και αξιοποίηση της πληροφορίας που παράγεται στο πεδίο [34], [35]:

- Χρονοσειριακή Αποθήκευση (Data Buckets): Τα εισερχόμενα JSON πακέτα, αφού επικυρωθούν από τις πύλες ασφαλείας της πλατφόρμας, δρομολογούνται σε εξειδικευμένες time-series βάσεις δεδομένων (Data Buckets) για τη δημιουργία ιστορικού αρχείου, απαραίτητου για τη μετέπειτα στατιστική ανάλυση της ρύπανσης [34].
- Οπτικοποίηση και Εποπτεία (Dashboards): Τα δεδομένα απεικονίζονται σε πραγματικό χρόνο σε δυναμικές διεπαφές χρήστη (Dashboards) με κατάλληλη χρωματική σήμανση (Green/Warning/Alarm) για τη διασφάλιση της επίγνωσης της κατάστασης (Situational Awareness) από τους υπεύθυνους ασφαλείας [34], [35].
- Διαχείριση Συμβάντων (Alerting Engine): Το επίπεδο αυτό εκτελεί λογικούς ελέγχους πάνω στις τιμές [36]. Εάν κάποιος ρύπος υπερβεί τα θεσμοθετημένα όρια υγείας, ενεργοποιούνται αυτόματα εξωτερικά endpoints (callbacks) για την αποστολή άμεσων ειδοποιήσεων (π.χ. email), γεφυρώνοντας την πληροφορία του shop floor με τους λήπτες αποφάσεων της διοίκησης [34], [36].

Με την υιοθέτηση αυτής της προσέγγισης, μειώνεται ο φόρτος στο κεντρικό δίκτυο και εξασφαλίζεται η ταχύτερη διαχείριση των μετρήσεων [7], [30]. Η δομική διαφορά και η κατανομή των πόρων μεταξύ της παραδοσιακής Cloud αρχιτεκτονικής και της Edge αρχιτεκτονικής παρουσιάζεται στην **Εικόνα 3.2**.



Εικόνα 3.2: Συγκριτική απεικόνιση της κεντριοποιημένης αρχιτεκτονικής Cloud έναντι της κατανεμημένης αρχιτεκτονικής Edge Computing [46].

3.3 Σχεδιαστική Επιλογή Πρωτοκόλλου: REST API έναντι OPC-UA

Παρά το γεγονός ότι το πρωτόκολλο OPC-UA αναγνωρίζεται διεθνώς ως ο ακρογωνιαίος λίθος για τη διαλειτουργικότητα σε μεγάλης κλίμακας συστήματα Industrial IoT (IIoT) [31], για την παρούσα διπλωματική εργασία προκρίθηκε η χρήση ελαφρών αρχιτεκτονικών REST API (HTTP POST) με payloads μορφής JSON [30], [34].

Η απόφαση αυτή βασίστηκε στους εξής άξονες:

1. Υπολογιστικό overhead: Το OPC-UA, λόγω του σύνθετου μοντέλου πληροφορίας (Information Modeling) και των αυστηρών μηχανισμών ασφαλείας του, απαιτεί σημαντικούς υπολογιστικούς πόρους από την πλευρά του Edge Gateway [31]. Για μια low-cost και στοχευμένη διάταξη παρακολούθησης ρύπων, η υλοποίηση ενός OPC-UA Server θα αύξανε άσκοπα την πολυπλοκότητα του κώδικα Python [7], [30].
2. Συμβατότητα Cloud: Η πλατφόρμα Thinger.io προσφέρει εγγενή (native) και εξαιρετικά αποδοτική υποστήριξη για REST Endpoints [34]. Η χρήση JSON payloads επέτρεψε την άμεση και απρόσκοπτη ενσωμάτωση των δεδομένων στα Data Buckets χωρίς την ανάγκη ενδιάμεσων μεταφραστών πρωτοκόλλων (protocol

converters), διατηρώντας το κόστος και την πολυπλοκότητα της υποδομής στο ελάχιστο [34], [35].

Συνεπώς, το OPC-UA εξετάζεται στην παρούσα εργασία ως το ιδανικό πρότυπο για μελλοντική επέκταση (future work) του συστήματος, σε περίπτωση που αυτό ενταχθεί σε ένα ευρύτερο, προϋπάρχον οικοσύστημα αυτοματισμού SCADA/ERP ενός εργοστασίου [7], [31].

3.4 Edge Computing: Νοημοσύνη στο Άκρο του Δικτύου

Μία από τις πλέον θεμελιώδεις ενότητες της παρούσας μελέτης αποτελεί η ανάλυση και η εφαρμογή του μοντέλου «υπολογιστικής στο άκρο» (Edge Computing) [7], [30]. Στο προτεινόμενο σύστημα, η επεξεργασία της πληροφορίας αποδεδεσμεύεται από την αποκλειστική εξάρτηση από το υπολογιστικό νέφος (Cloud) και μεταφέρεται στο επίπεδο του πεδίου, ξεκινώντας από τον ίδιο τον μικροελεγκτή Arduino Mega [7], [28]. Η αρχιτεκτονική αυτή επιτρέπει την υλοποίηση προηγμένων αλγορίθμων τοπικού φιλτραρίσματος, όπως ο κινητός μέσος όρος (Moving Average), οι οποίοι εξασφαλίζουν την εξομάλυνση του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου και την απόρριψη ακραίων, λανθασμένων τιμών πριν καν αυτές μεταδοθούν στο δίκτυο [28], [30].

Η κρισιμότητα αυτής της προσέγγισης αναδεικνύεται κυρίως στη δυνατότητα λήψης αποφάσεων με ελάχιστη υστέρηση (Low Latency Decision Making) [7], [36]. Σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον, η ταχύτητα απόκρισης σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης είναι καθοριστική· στην περίπτωση που ανιχνευθεί επικίνδυνη συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα (CO), ο Arduino είναι προγραμματισμένος να ενεργοποιεί ακαριαία —σε κλίμακα μικροδευτερολέπτων— τον τοπικό συναγερμό [28], [36]. Αυτή η λειτουργική αυτονομία κρίνεται ζωτικής σημασίας, καθώς διασφαλίζει ότι η προστασία του προσωπικού και των εγκαταστάσεων παραμένει ενεργή ακόμη και σε περιπτώσεις καθυστέρησης του δικτύου (network lag) ή απώλειας σύνδεσης, αποτρέποντας έτσι την κλιμάκωση ενός δυνητικά μοιραίου βιομηχανικού ατυχήματος [7], [36].

3.5 Πρωτόκολλα Επικοινωνίας (MQTT vs HTTP)

Η επιλογή των πρωτοκόλλων επικοινωνίας αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο για την αποδοτικότητα της τηλεμετρίας, καθώς καθορίζει την ταχύτητα, την αξιοπιστία και τη διαχείριση των πόρων του συστήματος [8], [30]. Στην παρούσα αρχιτεκτονική, η μεταφορά των δεδομένων βασίζεται κατά κύριο λόγο στο πρότυπο MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), το οποίο αναγνωρίζεται διεθνώς ως το πλέον κατάλληλο «ελαφρύ» (lightweight) πρωτόκολλο για εφαρμογές IoT [5], [8]. Η λειτουργία του εδράζεται στο μοντέλο δημοσίευσης/εγγραφής (Publish/Subscribe), όπου ο Arduino Mega δημοσιεύει τις μετρήσεις σε συγκεκριμένες θεματικές ενότητες (Topics) και η πλατφόρμα Thingier.io τις ανακτά άμεσα [5], [34]. Το εξαιρετικά μικρό μέγεθος της κεφαλίδας του MQTT —μόλις 2 bytes— προσφέρει σημαντική εξοικονόμηση επεξεργαστικής ισχύος και μνήμης,

παράμετρος κρίσιμη για τη διατήρηση της υψηλής διαθεσιμότητας του μικροελεγκτή [5], [35].

Παράλληλα, το σύστημα ενσωματώνει τη χρήση του HTTP/REST για την εξασφάλιση της διαλειτουργικότητας με εξωτερικές εφαρμογές και περιβάλλοντα web [34], [35]. Παρόλο που το συγκεκριμένο πρωτόκολλο χαρακτηρίζεται ως πιο «βαρύ» λόγω των εκτενών κεφαλίδων (headers) που χρησιμοποιεί, η παρουσία του κρίνεται απαραίτητη για την επικοινωνία με προγράμματα περιήγησης και την ενσωμάτωση του συστήματος σε ευρύτερα επιχειρησιακά δίκτυα [30], [34]. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται μια ισορροπημένη αρχιτεκτονική που συνδυάζει την ταχύτητα μετάδοσης στο πεδίο με την ευελιξία πρόσβασης από οποιαδήποτε σύγχρονη δικτυακή υποδομή [8], [30].

3.6 Μορφοποίηση και Σειριοποίηση Δεδομένων: Το Πρωτόκολλο JSON και Συγκριτική Ανάλυση

Στα συστήματα του Βιομηχανικού Διαδικτύου των Αντικειμένων (IIoT), η αποτελεσματική μεταφορά των μετρήσεων από το πεδίο (Field Level) προς το Edge Gateway και το Cloud αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη συνολική αξιοπιστία και απόδοση του συστήματος [8], [30]. Η διαδικασία μετατροπής των εσωτερικών δομών δεδομένων (όπως αντικείμενα, πίνακες ή μεταβλητές της μνήμης RAM) σε μια μορφή κατάλληλη για αποθήκευση ή μετάδοση μέσω ενός δικτυακού καναλιού (ή σειριακής επικοινωνίας) ορίζεται ως σειριοποίηση (*serialization*) [30], [37]. Αντίστοιχα, η αντίστροφη διαδικασία ανακατασκευής των αντικειμένων από τη ληφθείσα ροή δεδομένων ονομάζεται αποσειριοποίηση (*deserialization*) [34], [37].

3.6.1 Το Πρωτόκολλο JSON (JavaScript Object Notation)

Το JSON (JavaScript Object Notation) είναι ένα ελαφρύ, βασισμένο σε κείμενο (text-based) πρότυπο ανταλλαγής δεδομένων, το οποίο είναι πλήρως ανεξάρτητο από γλώσσες προγραμματισμού [37]. Στο αναπτυχθέν σύστημα, το JSON αποτελεί τη βασική μορφοποίηση για τη δόμηση των μηνυμάτων μετρήσεων που αποστέλλονται από το Edge Gateway (Python script) προς την Cloud πλατφόρμα Thinger.io μέσω REST API / TLS [30], [34]. Αναφορικά με τη δομή και τα πλεονεκτήματά του, προσφέρει υψηλή αναγνωσιμότητα από τον άνθρωπο (Human-Readability) [34], καθώς τα δεδομένα αναγράφονται σε μορφή ζευγών κλειδιού-τιμής (key-value pairs), καθιστώντας τον εντοπισμό σφαλμάτων (debugging) και τον έλεγχο των πακέτων εξαιρετικά απλό κατά την ανάπτυξη [30], [37]. Παράλληλα, διακρίνεται για την ευελιξία και το δυναμικό σχήμα του (Schema-less), επιτρέποντας την προσθήκη νέων πεδίων (όπως η προσθήκη ενός νέου αισθητήρα) χωρίς να απαιτείται αλλαγή στο πρωτόκολλο επικοινωνίας ή επαναμεταγλώττιση των στατικών δομών [35], [37]. Τέλος, διαθέτει ευρεία υποστήριξη, καθώς υποστηρίζεται εγγενώς από σχεδόν όλες τις γλώσσες προγραμματισμού (Python, JavaScript, C++) αλλά και από τις Cloud πλατφόρμες [34], [35].

Στην εργασία, αναλύουμε τη δομή ενός πακέτου:

```
JSON
{
  "Device": "Arduino_Mega_01",
  "Sensors": {
    "CO_ppm": 25.6,
    "CH4_ppm": 105.2,
    "Temp": 23.5
  },
  "Status": "Alert"
}
```

3.6.2 Σύγκριση JSON με Άλλες Τεχνικές Σειριοποίησης και Κωδικοποίησης

Παρόλο που το JSON προσφέρει μέγιστη ευελιξία και αναγνωσιμότητα, δεν αποτελεί τη μοναδική επιλογή, καθώς στα IoT δίκτυα χρησιμοποιούνται επίσης η δυαδική κωδικοποίηση (Binary Encodings) και άλλα text-based formats όπως η XML [30], [37]. Στη σύγκριση του JSON με το Binary Encoding (όπως τα Protocol Buffers, CBOR, Raw Binary), το JSON υπερέχει σε αναγνωσιμότητα αλλά υστερεί στο μέγεθος πακέτου (Payload Size) [35], [37]: επειδή είναι format κειμένου, περιλαμβάνει περιττή πληροφορία (ονόματα κλειδιών, αγκύλες, εισαγωγικά) αυξάνοντας το μέγεθος των bytes, ενώ το Binary Encoding μεταδίδει μόνο τα raw δεδομένα σε δυαδική μορφή (π.χ. IEEE 754 floats) βάσει προκαθορισμένου schema, μειώνοντας δραστικά το μέγεθος στο δίκτυο κατά 50-80% [37], [39]. Επιπλέον, όσον αφορά το υπολογιστικό κόστος (CPU & Memory Overhead), το JSON απαιτεί άλφα-αριθμητική ανάλυση (parsing) κατά την αποσειριοποίηση, γεγονός που καταναλώνει πόρους και μνήμη (ιδιαίτερα απαιτητικό για μικροελεγκτές όπως ο Arduino Mega 2560) [28], [37], σε αντίθεση με το Binary Encoding όπου η αποσειριοποίηση είναι εξαιρετικά γρήγορη λόγω άμεσης ανάγνωσης μνήμης (byte mapping) [37]. Ειδικότερα, το CBOR (Concise Binary Object Representation) αποτελεί τη δυαδική εκδοχή του JSON (RFC 8949) σχεδιασμένη ειδικά για περιορισμένους πόρους (embedded systems), διατηρώντας το μοντέλο κλειδιού-τιμής σε δυαδική μορφή [38], ενώ τα Protocol Buffers (Protobuf) και FlatBuffers απαιτούν τον ορισμό ενός .proto αρχείου (schema), προσφέροντας μέγιστη ταχύτητα και ελάχιστο μέγεθος με την προϋπόθεση αυστηρής διαχείρισης εκδόσεων (schema evolution) [37], [39]. Τέλος, στη σύγκριση JSON με XML (eXtensible Markup Language), η XML αποτελούσε το παραδοσιακό πρότυπο στον χώρο του αυτοματισμού, ωστόσο θεωρείται πλέον παρωχημένη για εφαρμογές IoT λόγω του μεγάλου «θορύβου» (verbose tags <tag></tag>), ο οποίος αυξάνει σημαντικά το μέγεθος των πακέτων και την πολυπλοκότητα του parsing σε σύγκριση με το JSON [30], [37].

Κριτήριο Αξιολόγησης	JSON	Binary Encoding (π.χ. Protobuf / CBOR)	XML
Τύπος Μορφοποίησης	Κείμενο (Text-based)	Δυαδικός (Binary-based)	Κείμενο (Text-based)
Αναγνωσιμότητα από Άνθρωπο	Υψηλή	Καμία (απαιτείται decoder)	Υψηλή
Μέγεθος Πακέτου (Payload)	Μεσαίο / Μεγάλο	Ελάχιστο (μείωση 50-80% σε σχέση με JSON)	Πολύ μεγάλο (λόγω ετικετών <tag></tag>)
Υπολογιστικό Κόστος Parsing	Μεσαίο	Ελάχιστο	Υψηλό
Απαιτήση Schema	Όχι (Dynamic)	Ναι (Static Schema)	Προαιρετικά (XSD)
Πεδίο Εφαρμογής στο Σύστημα	Edge Gateway → Cloud (Thingier.io)	Επικοινωνία χαμηλού εύρους ζώνης / Embedded	Παραδοσιακά Web Services

Πίνακας 3.6.2: Τεχνικές Σειριοποίησης

3.6.3 Αιτιολόγηση Επιλογής για το Σύστημα

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής, η επιλογή του JSON για την επικοινωνία μεταξύ του Edge Gateway (Python) και του Cloud (Thingier.io) αιτιολογείται από την υβριδική αρχιτεκτονική Edge Computing [7], [30], σύμφωνα με την οποία ο περιορισμένος μικροελεγκτής (Arduino Mega) αναλαμβάνει μόνο τη λήψη των αναλογικών/ψηφιακών μετρήσεων και τη μεταφορά τους μέσω σειριακής θύρας [28], μεταφέροντας το βάρος της μορφοποίησης JSON στο ισχυρότερο Edge Gateway (Python environment) [30]. Παράλληλα, βασίζεται στη συμβατότητα με τα Cloud REST APIs, καθώς η πλατφόρμα Thingier.io υποστηρίζει εγγενώς payload σε μορφή JSON μέσω ασφαλών HTTP POST / TLS κλήσεων [34]. Τέλος, εξασφαλίζει ευκολία συντήρησης και επεκτασιμότητα, επιτρέποντας την εύκολη προσθήκη επιπλέον μεταβλητών υγείας του συστήματος (System Health metrics) ή νέων ρύπων χωρίς την ανάγκη αλλαγής της δομής του Cloud backend [34], [35].

3.7 Ασφάλεια και Κρυπτογράφηση (IoT Security)

Η διασφάλιση της αξιοπιστίας ενός βιομηχανικού συστήματος παρακολούθησης ρύπων εξαρτάται άμεσα από τη θωράκιση των δεδομένων του [2], [8]. Στην παρούσα εργασία, η αρχιτεκτονική ασφάλειας δομείται γύρω από το κλασικό μοντέλο CIA (Confidentiality, Integrity, Availability), προσαρμοσμένο στις ιδιαιτερότητες του Internet of Things [8], [30].

Η Εμπιστευτικότητα (Confidentiality) επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης μοναδικών διακριτικών συσκευής (Device Tokens) [34], τα οποία διασφαλίζουν ότι μόνο εξουσιοδοτημένοι κόμβοι μπορούν να αλληλεπιδράσουν με την πλατφόρμα Thingier.io, αποκλείοντας μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση στις μετρήσεις [30], [34]. Παράλληλα, η Ακεραιότητα (Integrity) των δεδομένων διαφυλάσσεται μέσω της υιοθέτησης πρωτοκόλλων κρυπτογράφησης TLS/SSL [34]. Η προσέγγιση αυτή εγγυάται ότι οι πληροφορίες που μεταδίδονται από το πεδίο προς το Cloud παραμένουν αναλλοίωτες, αποτρέποντας

κακόβουλες παρεμβάσεις (man-in-the-middle attacks) που θα μπορούσαν να παραποιήσουν τα επίπεδα των ρύπων [8], [30].

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην Κρυπτογράφηση Ωφέλιμου Φορτίου (Payload Encryption), όπου εφαρμόζεται ο αλγόριθμος AES-128 [28], [30]. Η επιλογή αυτή επιτρέπει την κρυπτογράφηση των δεδομένων στο "άκρο" (Edge), δηλαδή πριν καν αυτά εξέλθουν από τον μικροελεγκτή Arduino Mega, προσθέτοντας ένα επιπλέον επίπεδο ασφαλείας στην πηγή της πληροφορίας [28]. Τέλος, η Διαθεσιμότητα (Availability) διασφαλίζεται μέσω της χρήσης στιβαρών Cloud υποδομών που εγγυώνται την αδιάλειπτη πρόσβαση στις μετρήσεις [34], [36]. Σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον, η αδιάλειπτη διαθεσιμότητα δεν είναι απλώς μια τεχνική προδιαγραφή, αλλά μια κρίσιμη παράμετρος ασφαλείας, καθώς η απώλεια ορατότητας επί των ρύπων ισοδυναμεί με απώλεια ελέγχου της ίδιας της μονάδας παραγωγής [8], [36].

3.8 Επεκτασιμότητα (Scalability) και Case Studies

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής είναι η εγγενής Επεκτασιμότητα (Scalability) που προσφέρει [3], [8]. Το σύστημα έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να υποστηρίζει την ενσωμάτωση εκατοντάδων επιπλέον κόμβων (Sensor Nodes) στον ίδιο κεντρικό δίαυλο, χωρίς να απαιτείται ριζικός επανασχεδιασμός της βασικής υποδομής ή του Cloud περιβάλλοντος [30], [34]. Αυτή η σπονδυλωτή προσέγγιση επιτρέπει στη βιομηχανική μονάδα να ξεκινήσει με έναν περιορισμένο αριθμό αισθητήρων και να επεκτείνει το δίκτυο παρακολούθησης ανάλογα με τις αυξανόμενες ανάγκες της παραγωγής, διασφαλίζοντας τη βιωσιμότητα της επένδυσης σε βάθος χρόνου [3], [30].

Η αξιοπιστία αυτής της μεθοδολογίας δεν τεκμηριώνεται μόνο θεωρητικά, αλλά επιβεβαιώνεται και από επιτυχημένες εφαρμογές σε παγκόσμια κλίμακα (Case Studies) [40]. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν δίκτυα όπως το PurpleAir, τα οποία υιοθετούν μια παρόμοια φιλοσοφία IoT για τη δημιουργία εκτενών, παγκόσμιων χαρτών ρύπανσης μέσω πολυάριθμων χαμηλού κόστους κόμβων [40]. Η επιτυχία τέτοιων δικτύων αποδεικνύει ότι η χρήση κατανεμημένων συστημάτων ανίχνευσης, όπως αυτό που αναλύεται στην παρούσα εργασία, αποτελεί μια δόκιμη και αποτελεσματική μέθοδο για τη διαχείριση της περιβαλλοντικής πληροφορίας, προσφέροντας υψηλή ακρίβεια και ολιστική εικόνα της ποιότητας του αέρα σε πραγματικό χρόνο [8], [40].

Κεφάλαιο 4: Πλατφόρμες IoT και Βιομηχανικός Έλεγχος

4.1 Τα Παραδοσιακά Συστήματα SCADA

Τα συστήματα SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) αποτελούν επί σειρά δεκαετιών τον θεμέλιο λίθο και τη «ραχοκοκαλιά» του βιομηχανικού αυτοματισμού παγκοσμίως [9], [10]. Η αρχιτεκτονική τους είναι προσανατολισμένη στον εποπτικό έλεγχο και τη συλλογή δεδομένων από κρίσιμες υποδομές μεγάλης κλίμακας, διασφαλίζοντας την επιχειρησιακή συνέχεια σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών [9], [31]. Από τον συντονισμό των σύνθετων γραμμών παραγωγής σε σύγχρονα εργοστάσια, έως τη διαχείριση ζωτικών δικτύων κοινής ωφελείας, όπως η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας και υδάτινων πόρων, τα συστήματα SCADA παρέχουν την απαραίτητη υποδομή για την επιτήρηση και τον έλεγχο διεργασιών σε πραγματικό χρόνο [10]. Η ικανότητά τους να ενσωματώνουν απομακρυσμένες μονάδες ελέγχου και να παρέχουν οπτικοποιημένη πληροφορία στους χειριστές, τα καθιστά αναπόσπαστο κομμάτι της βιομηχανικής σταθερότητας και ασφάλειας [9], [10].

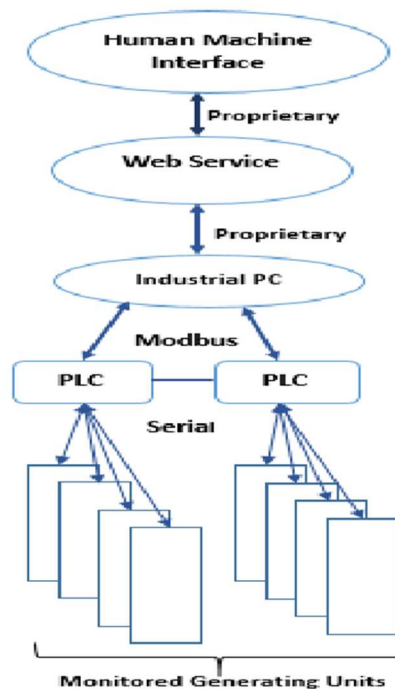
4.1.1 Χαρακτηριστικά και Αρχιτεκτονική SCADA

Η αρχιτεκτονική των συστημάτων SCADA εδράζεται παραδοσιακά στο μοντέλο της τοπικής εγκατάστασης (On-premise), υιοθετώντας μια δομή που εστιάζει στην άμεση απόκριση και τον πλήρη έλεγχο εντός των ορίων της βιομηχανικής μονάδας [9], [10]. Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιείται από εξειδικευμένους τοπικούς ελεγκτές, όπως οι προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές (PLCs) [28], [31], οι οποίοι μεταφέρουν την πληροφορία σε κεντρικούς σταθμούς εργασίας και εξυπηρετητές που βρίσκονται φυσικά εντός του εργοστασίου [9].



Εικόνα 4.1.1.α: Η παραδοσιακή πυραμίδα βιομηχανικού αυτοματισμού και τα επίπεδα αρχιτεκτονικής SCADA [30].

Κρίσιμη παράμετρος αυτής της προσέγγισης είναι η διεξαγωγή της επικοινωνίας μέσω κλειστών και αυστηρά απομονωμένων δικτύων [10]. Η επιλογή αυτή δεν είναι τυχαία, καθώς αποσκοπεί στη θωράκιση του συστήματος έναντι εξωτερικών απειλών και στην ελαχιστοποίηση των παρεμβολών [10]. Παράλληλα, η χρήση εξειδικευμένου υλικού (industrial-grade hardware) εγγυάται την απρόσκοπτη λειτουργία της υποδομής ακόμη και κάτω από τις πλέον αντίξοες βιομηχανικές συνθήκες, όπου οι απαιτήσεις για ανθεκτικότητα και αξιοπιστία είναι εξαιρετικά υψηλές [9], [31].



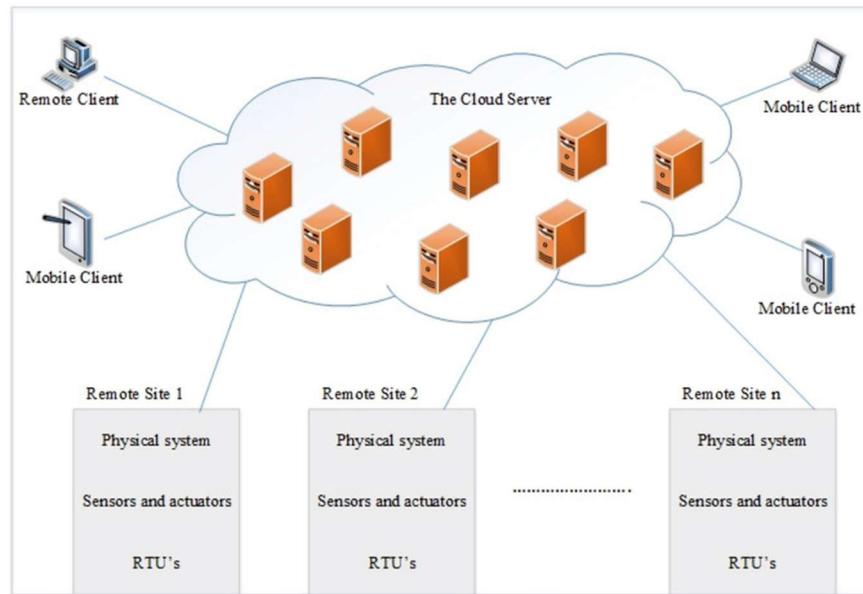
Εικόνα 4.1.1.β: Διάγραμμα παραδοσιακής τοπικής (On-premise) αρχιτεκτονικής SCADA [30].

4.1.2 Περιορισμοί των SCADA στη Σύγχρονη Εποχή

Παρά την αποδεδειγμένη αξιοπιστία που επέδειξαν τα παραδοσιακά συστήματα επί σειρά ετών, η σύγχρονη βιομηχανική πραγματικότητα αναδεικνύει σημαντικούς περιορισμούς που δυσχεραίνουν την περαιτέρω εξέλιξή τους [9], [10]. Ο κυριότερος ανασταλτικός παράγοντας εντοπίζεται στο ιδιαίτερα υψηλό κόστος κτήσης και λειτουργίας, καθώς οι δαπανηρές άδειες χρήσης λογισμικού (licensing) και οι απαιτήσεις εξειδικευμένης συντήρησης απορροφούν τεράστια κεφάλαια, καθιστώντας τα συστήματα αυτά απρόσιτα για πολλές παραγωγικές μονάδες [9], [31].

Παράλληλα, η έλλειψη ευελιξίας στην επεκτασιμότητα αποτελεί ένα κρίσιμο δομικό πρόβλημα [7], [10]. Η ανάγκη για την ενσωμάτωση νέων σημείων μέτρησης ή την αναβάθμιση της υφιστάμενης υποδομής μετατρέπεται συχνά σε μια σύνθετη και κοστοβόρα διαδικασία, η οποία απαιτεί χρόνο και εξειδικευμένο hardware [9], [31]. Τέλος, η στρατηγική της τοπικής απομόνωσης οδηγεί στον «εγκλωβισμό» της πληροφορίας εντός του

κέντρου ελέγχου [10], [30]. Η αδυναμία απομακρυσμένης πρόσβασης στα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, χωρίς την επιστράτευση περίπλοκων και ακριβών γεφυρών λογισμικού, περιορίζει τη δυνατότητα λήψης αποφάσεων από απόσταση, δημιουργώντας στεγανά στη ροή της κρίσιμης πληροφορίας για την ασφάλεια και την ποιότητα του αέρα [7], [30].



Εικόνα 4.1.2: Γενική αρχιτεκτονική ενοποίησης συστημάτων SCADA με περιβάλλον IoT-Cloud για απομακρυσμένη πρόσβαση και επεκτασιμότητα [47].

4.2 Οι Πλατφόρμες IoT ως Εναλλακτική Λύση (Thinger.io)

Η ανάδυση των Cloud-Native πλατφορμών, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την υποδομή του Thinger.io [34], σηματοδοτεί μια ριζική αλλαγή παραδείγματος (paradigm shift) στον τομέα του βιομηχανικού ελέγχου [8], [30]. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει την απευθείας διοχέτευση της πληροφορίας από το πεδίο στο υπολογιστικό νέφος, καταργώντας τους γεωγραφικούς περιορισμούς και προσφέροντας καθολική προσβασιμότητα στα δεδομένα από οποιοδήποτε σημείο του πλανήτη [30], [34].

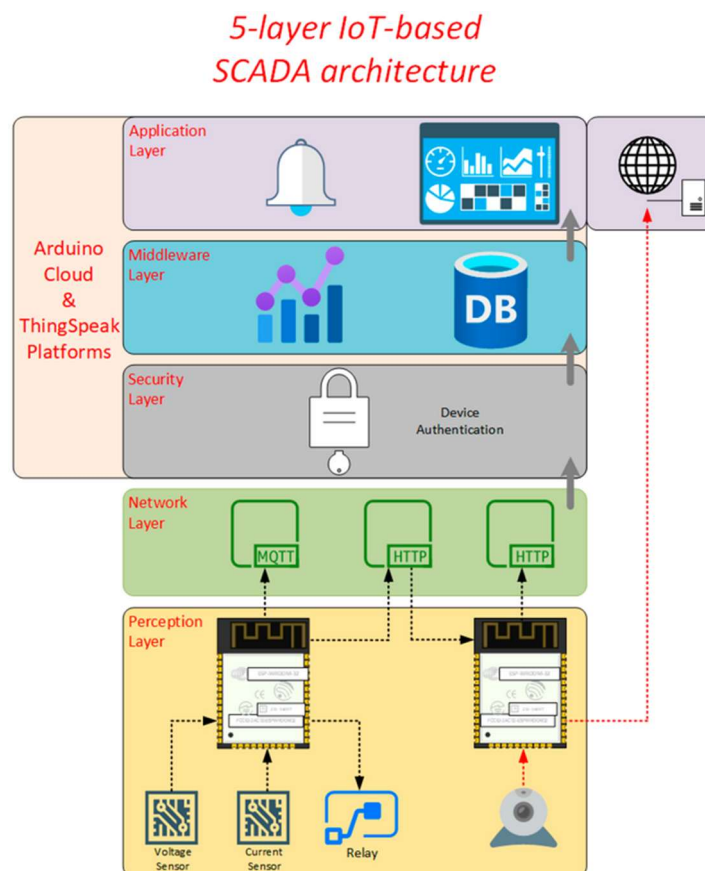
Η υιοθέτηση τέτοιων λύσεων εξαλείφει την ανάγκη για δαπανηρές αρχικές επενδύσεις σε hardware και άδειες χρήσης, εξασφαλίζοντας εξαιρετικά χαμηλό κόστος εκκίνησης και απaráμιλλη επιχειρησιακή ευελιξία [34], [35]. Μέσω της αξιοποίησης σύγχρονων και αποδοτικών πρωτοκόλλων, όπως το MQTT [5] και το πρότυπο ανταλλαγής δεδομένων JSON [37], διασφαλίζεται η ταχύτατη και ασφαλής διακίνηση της πληροφορίας [30], [35]. Με αυτόν τον τρόπο, οι επιχειρήσεις αποκτούν τη δυνατότητα να μετασχηματίζουν τις παραγωγικές τους διαδικασίες, υιοθετώντας μοντέλα που είναι εγγενώς επεκτάσιμα και προσαρμοσμένα στις απαιτήσεις της ψηφιακής εποχής [8], [30].

4.3 Συγκριτική Ανάλυση: SCADA έναντι IoT Πλατφορμών

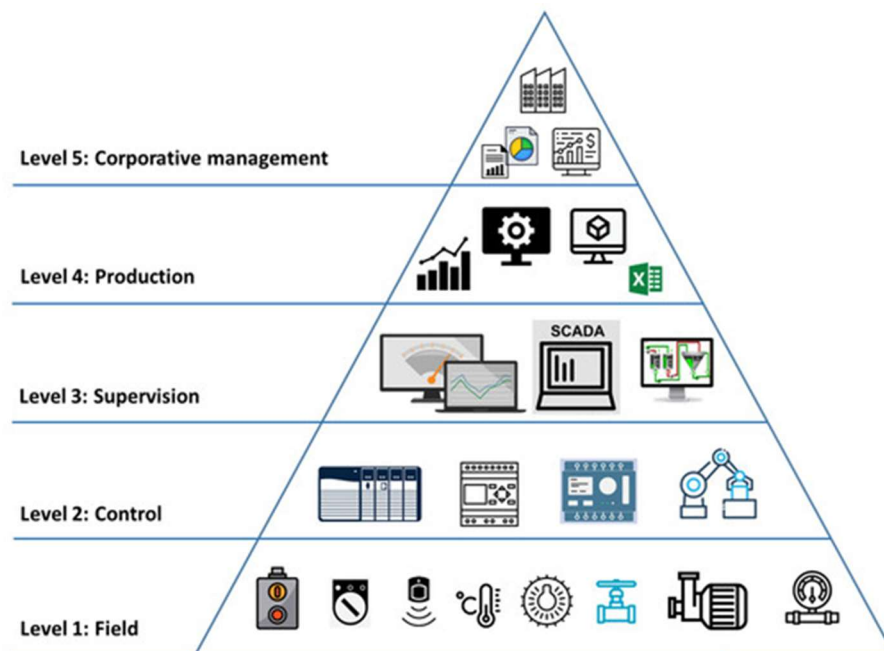
Η παραπάνω αντιπαράθεση δεν περιορίζεται σε μια απλή τεχνική σύγκριση, αλλά αναδεικνύει μια βαθύτερη, δομική μεταβολή στις βιομηχανικές διεργασίες: τη μετάβαση από τη συγκεντρωτική φιλοσοφία του παρελθόντος προς ένα σύγχρονο, αποκεντρωμένο μοντέλο διαχείρισης της πληροφορίας [7], [30]. Ενώ τα παραδοσιακά συστήματα βασίζονταν σε κλειστές, ιεραρχικές δομές όπου η γνώση ήταν εγκλωβισμένη σε τοπικούς σταθμούς [10], η υιοθέτηση του IIoT και των Cloud-Native λύσεων προκρίνει τη διάχυση της πληροφορίας [8], [30]. Αυτή η νέα προσέγγιση ενισχύει την ευελιξία και τη διαφάνεια, επιτρέποντας την οριζόντια πρόσβαση στα δεδομένα και καθιστώντας την πληροφορία έναν ζωντανό πόρο, διαθέσιμο για λήψη αποφάσεων σε κάθε επίπεδο της οργανωτικής δομής της επιχείρησης [7], [30].

4.3.1 Αρχιτεκτονική και Τοπολογία Δικτύου

Η σύγκριση μεταξύ των παραδοσιακών συστημάτων και των σύγχρονων λύσεων IoT αποκαλύπτει μια ριζική διαφοροποίηση στη δομή της πληροφορίας. Ενώ το μοντέλο SCADA εδράζεται παραδοσιακά στην αυστηρά ιεραρχική "πυραμίδα του αυτοματισμού" (Σχήμα 4.3.1.α) [10], όπου η πληροφορία πρέπει να διέλθει από πολλαπλά επίπεδα ελέγχου πριν καταλήξει στον χρήστη, οι πλατφόρμες IoT εισάγουν μια "επίπεδη" αρχιτεκτονική (Σχήμα 4.3.1.β) [7], [30].



Εικόνα 4.3.1.α: Η παραδοσιακή ιεραρχική πυραμίδα αυτοματισμού (Purdue Reference Model) που διέπει τα συστήματα SCADA [16].



Εικόνα 4.3.1.β: Σύγχρονη αρχιτεκτονική IoT συστήματος ελέγχου με αυτόνομους κόμβους πεδίου και απευθείας σύνδεση στο Cloud [16].

Σε αυτό το νέο πλαίσιο, ο μικροελεγκτής Arduino Mega παύει να είναι ένα απλό εξάρτημα μιας κλειστής αλυσίδας και μετεξελίσσεται σε έναν πλήρως αυτόνομο νοήμονα κόμβο [28], [30]. Η ικανότητά του να επικοινωνεί απευθείας με το υπολογιστικό νέφος (Cloud) καταργεί τους ενδιάμεσους ιεραρχικούς περιορισμούς, διευκολύνοντας τη δημιουργία δικτύων με τεράστια γεωγραφική διασπορά [30], [34]. Αυτή η αρχιτεκτονική ευελιξία επιτρέπει την κεντρική εποπτεία απομακρυσμένων βιομηχανικών μονάδων σε πραγματικό χρόνο, διασφαλίζοντας την ομοιογένεια των δεδομένων και την ταχύτητα στην απόκριση, ανεξαρτήτως της φυσικής τοποθεσίας των σημείων μέτρησης [7], [34].

4.3.2 Πρωτόκολλα Επικοινωνίας και Διαλειτουργικότητα

Η διαφοροποίηση μεταξύ των παραδοσιακών συστημάτων και των σύγχρονων λύσεων IoT αντικατοπτρίζεται έντονα στα πρωτόκολλα επικοινωνίας που επιστρατεύει η κάθε προσέγγιση [8], [30]. Τα συστήματα SCADA βασίζονται ιστορικά σε καθιερωμένα βιομηχανικά πρότυπα, όπως το Modbus, τα οποία, παρά την αξιοπιστία τους, χαρακτηρίζονται από μια δυσκίνητη διαδικασία υλοποίησης [31]. Η ανάγκη για χειροκίνητη χαρτογράφηση της μνήμης (register mapping) και η έλλειψη περιγραφικών μεταδεδομένων καθιστούν την παραμετροποίηση αυτών των συστημάτων μια χρονοβόρα και τεχνικά απαιτητική εργασία [30], [31].

Αντιθέτως, οι πλατφόρμες IoT εισάγουν μια νέα εποχή επικοινωνιακής ευελιξίας, αξιοποιώντας το πρωτόκολλο MQTT και τα REST APIs [5], [34]. Η χρήση αυτών των σύγχρονων εργαλείων προσφέρει αυτό που ονομάζουμε «σημασιολογική

διαλειτουργικότητα» (semantic interoperability), επιτρέποντας στα δεδομένα να μεταφέρονται μαζί με το νοηματικό τους πλαίσιο (context) [8], [30]. Έτσι, η πληροφορία που παράγεται από τον Arduino Mega δεν είναι απλώς ένας αριθμός σε μια διεύθυνση μνήμης, αλλά ένα δομημένο πακέτο δεδομένων που μπορεί να αναγνωριστεί και να αξιοποιηθεί άμεσα από άλλες ψηφιακές υπηρεσίες και εφαρμογές ανάλυσης [28], [34]. Αυτή η ευκολία στη διασύνδεση μετατρέπει το σύστημα από μια απομονωμένη βιομηχανική νησίδα σε έναν ενεργό κόμβο του ευρύτερου ψηφιακού οικοσυστήματος της επιχείρησης [8], [30].

4.3.3 Οικονομική Ανάλυση (CAPEX vs OPEX)

Η υιοθέτηση ενός συστήματος ελέγχου δεν αποτελεί μόνο τεχνική απόφαση, αλλά και μια σημαντική οικονομική στρατηγική [23], [30]. Τα παραδοσιακά συστήματα SCADA χαρακτηρίζονται από την ανάγκη για υψηλή αρχική κεφαλαιουχική δαπάνη (CAPEX), καθώς απαιτούν την αγορά ακριβού ιδιόκτητου υλικού (proprietary hardware) και τη δαπανηρή αδειοδότηση λογισμικού προτού τεθούν σε λειτουργία [9], [31]. Αυτό το οικονομικό «φράγμα εισόδου» συχνά καθιστά την ολοκληρωμένη βιομηχανική παρακολούθηση απρόσιτη για επιχειρήσεις με περιορισμένους πόρους [30].

Αντιθέτως, η αρχιτεκτονική του συστήματος που αναλύεται στην παρούσα εργασία προτείνει ένα ριζικά διαφορετικό οικονομικό μοντέλο [23]. Βασιζόμενο σε ανοιχτού κώδικα υλικό (Open-source hardware) χαμηλού κόστους, όπως ο Arduino Mega [28], και σε ευέλικτα συνδρομητικά μοντέλα λειτουργικών δαπανών (OPEX) μέσω Cloud υπηρεσιών [23], το σύστημα ελαχιστοποιεί την αρχική επένδυση. Αυτή η μετατόπιση καθιστά την περιβαλλοντική ασφάλεια και την προστασία των εργαζομένων μια προσιτή πραγματικότητα ακόμη και για μικρές βιοτεχνίες ή μεσαίες παραγωγικές μονάδες [23], [30]. Με αυτόν τον τρόπο, η τεχνολογική υπεροχή παύει να είναι προνόμιο των μεγάλων βιομηχανικών ομίλων και μετατρέπεται σε ένα εργαλείο εκδημοκρατισμού της βιομηχανικής ασφάλειας [30].

4.3.4 Ανάλυση Δεδομένων και Οπτικοποίηση

Η διαφοροποίηση μεταξύ των παραδοσιακών συστημάτων και των Cloud-Native λύσεων γίνεται ιδιαίτερα εμφανής στο επίπεδο της διεπαφής χρήστη και της διαχείρισης της πληροφορίας [30], [34]. Ενώ τα συμβατικά συστήματα SCADA βασίζονται σε στατικές διεπαφές HMI (Human-Machine Interface), οι οποίες περιορίζονται στην απεικόνιση της τρέχουσας κατάστασης εντός του εργοστασίου [9], η πλατφόρμα Thingier.io εισάγει μια δυναμική και πολυδιάστατη προσέγγιση [34].

Τα ψηφιακά ταμπλό (Dashboards) που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία δεν αποτελούν απλώς εργαλεία παρακολούθησης, αλλά πύλες εισόδου σε ένα ευρύτερο οικοσύστημα επεξεργασίας [34]. Μέσω της αυτοματοποιημένης αρχειοθέτησης σε αποθήκες δεδομένων (Data Buckets), η πληροφορία παύει να είναι εφήμερη και

μετατρέπεται σε ιστορικό αρχείο υψηλής ανάλυσης [34]. Αυτή η δομή εξασφαλίζει την απόλυτη ετοιμότητα του συστήματος για ενσωμάτωση σε ροές εργασίας Big Data Analytics και μοντέλα Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning) [23], [35]. Με αυτόν τον τρόπο, η βιομηχανική μονάδα αποκτά τη δυνατότητα να περάσει από την απλή καταγραφή των ρύπων στην πρόβλεψη επικίνδυνων τάσεων και τη βελτιστοποίηση των συνθηκών εργασίας, αναβαθμίζοντας την ασφάλεια σε ένα επίπεδο προληπτικής νοημοσύνης [23], [30].

4.3.5 Ασφάλεια: Απομόνωση έναντι Κρυπτογράφησης

Η μετάβαση στις τεχνολογίες IoT επιφέρει μια θεμελιώδη αναθεώρηση στον τρόπο με τον οποίο προσεγγίζεται η κυβερνοασφάλεια στον βιομηχανικό τομέα [2], [8]. Η παραδοσιακή στρατηγική των συστημάτων SCADA βασιζόταν επί δεκαετίες στην «ασφάλεια μέσω απομόνωσης» (security by obscurity/isolation) [10], υποθέτοντας λανθασμένα ότι η έλλειψη σύνδεσης με το διαδίκτυο αρκεί για την προστασία της υποδομής [8], [10]. Ωστόσο, στην εποχή της τέταρτης βιομηχανικής επανάστασης, αυτή η προσέγγιση θεωρείται πλέον παρωχημένη και ανεπαρκής [2], [30].

Στο προτεινόμενο σύστημα, η παθητική απομόνωση αντικαθίσταται από μια δυναμική, πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική προστασίας που ενσωματώνει τη φιλοσοφία της «ασφάλειας εκ σχεδιασμού» (Secure by Design) [8], [30]. Η θωράκιση αυτή υλοποιείται μέσω της ισχυρής κρυπτογράφησης TLS/SSL [34], η οποία διασφαλίζει την ακεραιότητα των δεδομένων κατά τη μεταφορά τους [8], και της χρήσης ψηφιακών πιστοποιητικών και διακριτικών συσκευής (Device Tokens) [34]. Με αυτόν τον τρόπο, κάθε ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ του Arduino Mega [28] και της πλατφόρμας Thingier.io υποβάλλεται σε αυστηρή αυθεντικοποίηση [30], [34]. Έτσι, η ασφάλεια δεν αποτελεί πλέον ένα εξωτερικό, πρόσθετο χαρακτηριστικό, αλλά ένα εγγενές και αναπόσπαστο στοιχείο της ίδιας της ψηφιακής δομής του συστήματος, προσφέροντας ανθεκτικότητα απέναντι στις σύγχρονες απειλές του κυβερνοχώρου [2], [8].

4.4 Industrial IoT (IIoT): Η Γέφυρα μεταξύ SCADA και Cloud

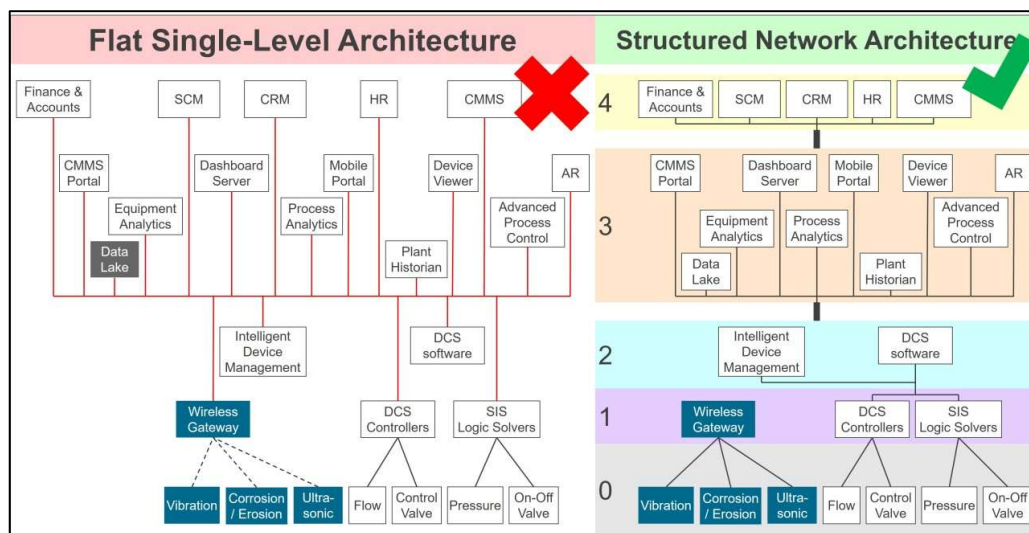
Η υλοποίηση του προτεινόμενου συστήματος αποτελεί έμπρακτη εφαρμογή του Industrial Internet of Things (IIoT) [7], [24], το οποίο ορίζεται ως το σημείο τομής και σύγκλισης μεταξύ της Επιχειρησιακής Τεχνολογίας (OT - Operational Technology) και της Τεχνολογίας Πληροφοριών (IT - Information Technology) [24], [30]. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ο μικροελεγκτής Arduino Mega μετεξελισσεται σε μια ευέλικτη Βιομηχανική Πύλη (IIoT Gateway) [28], [30], η οποία γεφυρώνει το φυσικό περιβάλλον του εργοστασίου με τις ψηφιακές υποδομές ανάλυσης [7], [30]. Η αρχιτεκτονική αυτή προσφέρει δύο θεμελιώδη πλεονεκτήματα:

1. Επιτυγχάνεται η Παράλληλη και Αδέσμευτη Παρακολούθηση των κρίσιμων περιβαλλοντικών παραμέτρων [7], [30]. Το σύστημα επιβλέπει τα επίπεδα των ρύπων και την ασφάλεια των εργαζομένων αυτόνομα, χωρίς να προκαλεί υπολογιστική επιβάρυνση ή καθυστερήσεις στον κεντρικό έλεγχο του υφιστάμενου

SCADA [10], [30]. Αυτή η «παράλληλη λειτουργία» διασφαλίζει ότι η περιβαλλοντική εποπτεία παραμένει αδιάλειπτη, ακόμη και αν τα συστήματα παραγωγής τεθούν εκτός λειτουργίας [10], [36].

2. Η συνεχής καταγραφή των συνθηκών συμβάλλει καθοριστικά στην Επιτήρηση της Κατάστασης του Εξοπλισμού (Asset Health) [36]. Η παρακολούθηση παραγόντων όπως η θερμοκρασία και η υγρασία δεν αφορά μόνο την ανθρώπινη ασφάλεια, αλλά παρέχει πολύτιμα δεδομένα για τη μακροζωία των μηχανικών μερών και των ηλεκτρονικών συστημάτων [28], [36]. Με αυτόν τον τρόπο, το IIoT σύστημα μετατρέπεται σε ένα πολυεργαλείο προληπτικής συντήρησης, μειώνοντας τις πιθανότητες απρόβλεπτων βλαβών και βελτιστοποιώντας τον κύκλο ζωής των βιομηχανικών παγίων [7], [36].

Η ριζική αυτή αλλαγή στη δομή της πληροφορίας και η μετάβαση από το κλασικό ιεραρχικό μοντέλο της παραγωγής στην ευέλικτη IIoT προσέγγιση αποτυπώνεται παραστατικά στη συγκριτική απεικόνιση της **Εικόνας 4.4**



Εικόνα 4.4: Μετάβαση από την παραδοσιακή ιεραρχική πυραμίδα αυτοματισμού στην αποκεντρωμένη, επίπεδη αρχιτεκτονική του Industrial IoT [48].

Για την πληρέστερη κατανόηση των διαφορών μεταξύ των προσεγγίσεων αυτών, καθώς και της θέσης που καταλαμβάνει η πλατφόρμα Thingier.io στο ενδιάμεσο αυτού του ψηφιακού μετασχηματισμού, τα βασικά τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά τους συνοψίζονται συγκριτικά στον **Πίνακα 4.4**.

Χαρακτηριστικό	Παραδοσιακό SCADA	IoT (Thingier.io)	Industrial IoT (IIoT)
Πρωτόκολλο	Modbus / Profibus	MQTT / HTTP	OPC-UA / MQTT
Κόστος	Πολύ Υψηλό	Πολύ Χαμηλό	Μέσο / Κλιμακούμενο
Πρόσβαση	Τοπική	Cloud / Παγκόσμια	Υβριδική
Δεδομένα	Απλά / Raw	Δομημένα (JSON)	Σημασιολογικά Αντικείμενα

Πίνακας 4.4: Συγκεντρωτική σύγκριση τεχνικών και οικονομικών χαρακτηριστικών μεταξύ παραδοσιακών συστημάτων SCADA, πλατφορμών IoT (Thingier.io) και Industrial IoT (IIoT).

4.5 Το Πρωτόκολλο OPC-UA: Το Πρότυπο Διασύνδεσης του Industry 4.0

Στο επίκεντρο του σύγχρονου βιομηχανικού μετασχηματισμού βρίσκεται το πρωτόκολλο OPC-UA (Open Platform Communications Unified Architecture) [26], [30], το οποίο αναγνωρίζεται πλέον ως η «κοινή γλώσσα» και το κυρίαρχο πρότυπο επικοινωνίας της τέταρτης βιομηχανικής επανάστασης (Industry 4.0) [26]. Η σημασία του έγκειται στην ικανότητά του να γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ ανόμοιων συστημάτων [7], [26], προσφέροντας ένα ενιαίο, ασφαλές και ανεξάρτητο από πλατφόρμες πλαίσιο ανταλλαγής πληροφοριών [26].

Αντίθετα με τα παλαιότερα, κατακερματισμένα πρωτόκολλα [26], [30], το OPC-UA επιτρέπει την απρόσκοπτη ροή δεδομένων από το επίπεδο των αισθητήρων και των μικροελεγκτών, όπως ο Arduino Mega [7], [28], έως τα ανώτερα επίπεδα των συστημάτων ERP και των Cloud υποδομών [26], [30]. Με αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζεται ότι η πληροφορία μεταδίδεται με πλήρη σημασιολογική συνοχή [26], επιτρέποντας σε διαφορετικές συσκευές και λογισμικά να «συνεννοούνται» σε πραγματικό χρόνο, ανεξάρτητα από τον κατασκευαστή ή την τεχνολογία τους [26], [30].

4.5.1 Φιλοσοφία και Μοντελοποίηση Πληροφορίας

Η αρχιτεκτονική του OPC-UA αντιπροσωπεύει μια κομβική τεχνολογική εξέλιξη, καθώς υπερβαίνει οριστικά τους περιορισμούς των λειτουργικών συστημάτων Windows και τις δυσλειτουργίες του παλαιού προτύπου Classic OPC [26], [31]. Η ειδοποιός διαφορά και η κύρια καινοτομία του εδράζεται στη δυνατότητα Μοντελοποίησης Πληροφορίας (Information Modeling), η οποία μετασχηματίζει τον τρόπο με τον οποίο τα δεδομένα γίνονται αντιληπτά από το δίκτυο [26].

Στο πλαίσιο αυτό, μια μέτρηση που προέρχεται από τον αισθητήρα μονοξειδίου του άνθρακα (MQ-7) [28] παύει να μεταδίδεται ως ένας απομονωμένος και ακατέργαστος αριθμός. Αντιθέτως, μετατρέπεται σε ένα σύνθετο ψηφιακό αντικείμενο (complex object), το οποίο φέρει ενσωματωμένη όλη την απαραίτητη μετα-πληροφορία: την αριθμητική τιμή, τη μονάδα μέτρησης (ppm), την ακριβή χρονική σήμανση (timestamp), καθώς και τη διαγνωστική εγκυρότητα του σήματος [26], [30]. Αυτή η προσέγγιση διασφαλίζει ότι η πληροφορία μεταφέρεται με πλήρη αυτονομία και νοηματική ενότητα, επιτρέποντας σε οποιοδήποτε ανώτερο σύστημα ανάλυσης να την ερμηνεύσει ακαριαία και ορθά, χωρίς την ανάγκη πρόσθετης παραμετροποίησης [26], [30].

4.5.2 Αρχιτεκτονική και Ενσωμάτωση

Η αρχιτεκτονική του πρωτοκόλλου OPC-UA διακρίνεται για την πολυμορφία της, καθώς υποστηρίζει τόσο το παραδοσιακό μοντέλο Client-Server όσο και το σύγχρονο μοντέλο δημοσίευσης/εγγραφής (Pub/Sub) [26]. Η διπλή αυτή υπόσταση επιτρέπει στο σύστημα να προσαρμόζεται με εξαιρετική ευελιξία στις εκάστοτε απαιτήσεις του βιομηχανικού δικτύου

[26], [31], εξασφαλίζοντας είτε την άμεση απόκριση σε ερωτήματα ελέγχου είτε τη μαζική και αποδοτική μετάδοση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο [26].

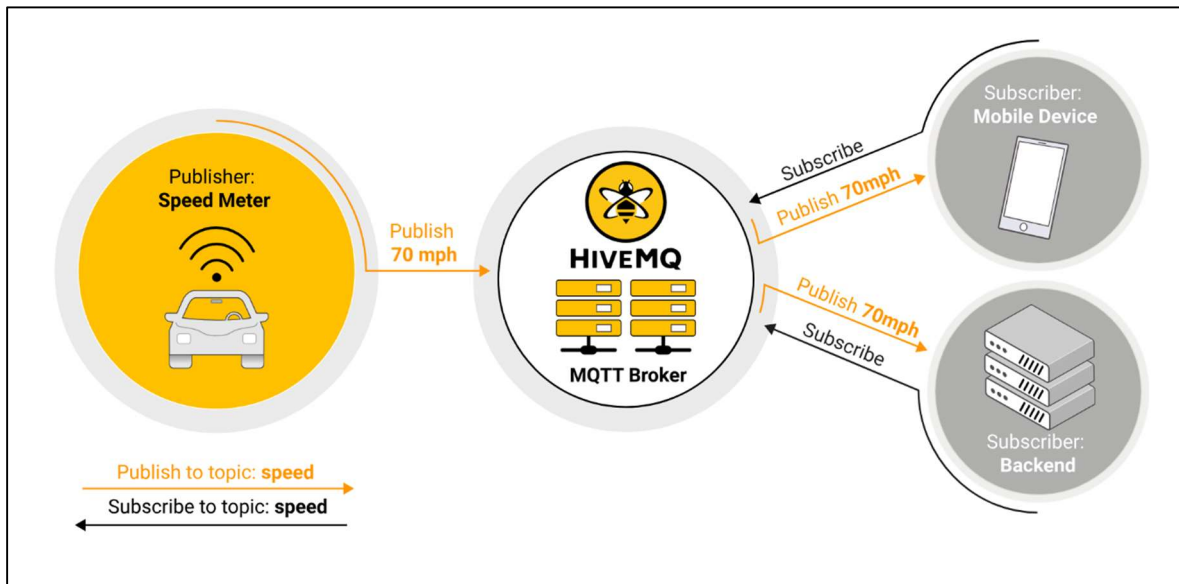
Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, αναδεικνύεται η δυνατότητα διασύνδεσης του μικροελεγκτή Arduino Mega [28] με υφιστάμενα βιομηχανικά δίκτυα OPC-UA μέσω της μεσολάβησης μιας πύλης IIoT Gateway [7], [30]. Η στρατηγική αυτή επιλογή επιτρέπει στα δεδομένα των ρύπων να καταστούν «αντιληπτά» και άμεσα αξιοποιήσιμα από προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές (PLCs) οποιουδήποτε κατασκευαστή, όπως οι Siemens, Schneider Electric και ABB [26], [30]. Με αυτόν τον τρόπο, η προτεινόμενη λύση υπερβαίνει τους περιορισμούς των κλειστών ιδιοταγών συστημάτων, προάγοντας την απόλυτη διαλειτουργικότητα και επιτρέποντας την απρόσκοπτη ενσωμάτωση των περιβαλλοντικών μετρήσεων στην κεντρική αυτοματοποιημένη διαχείριση της παραγωγής [7], [26], [30].

4.5.3 Σύγκριση OPC-UA έναντι MQTT

Η ταυτόχρονη αξιοποίηση των πρωτοκόλλων MQTT και OPC-UA στην παρούσα αρχιτεκτονική δεν αποτελεί πλεονασμό, αλλά μια στρατηγική επιλογή που εκμεταλλεύεται τα ιδιαίτερα πλεονεκτήματα κάθε τεχνολογίας [5], [26]. Ενώ το MQTT αναδεικνύεται ως το ιδανικό εργαλείο για τη μεταφορά δεδομένων προς το υπολογιστικό νέφος (Cloud) —λόγω των ελάχιστων απαιτήσεων σε εύρος ζώνης (bandwidth) και της εξαιρετικής του απόδοσης σε δίκτυα ευρείας περιοχής [5], [8] — το OPC-UA αποτελεί τον αδιαμφισβήτητο πυλώνα για την ενδοεργοστασιακή επικοινωνία [26], [30].

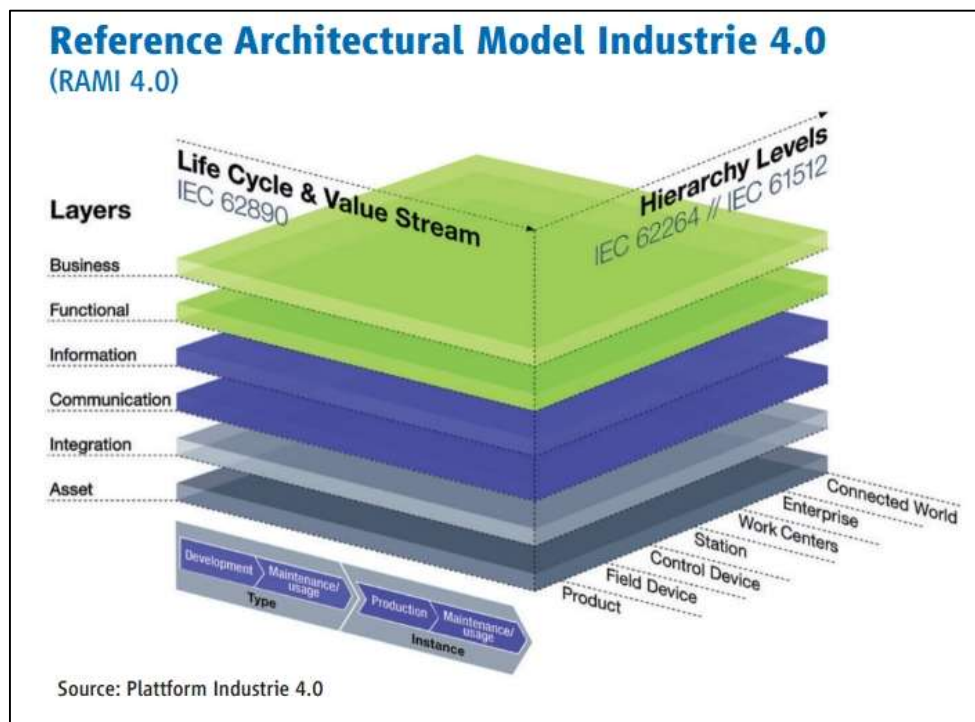
Στο επίπεδο του πεδίου (Field Level), όπου η αυστηρή ιεράρχηση, η τυποποίηση της πληροφορίας και η κυβερνοασφάλεια είναι πρωταρχικής σημασίας, το OPC-UA παρέχει τη στιβαρότητα που απαιτείται για την αλληλεπίδραση με τα συστήματα ελέγχου [7], [26]. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται μια ισορροπημένη αρχιτεκτονική: το OPC-UA διασφαλίζει τη «σημασιολογική τάξη» και την ασφάλεια εντός της βιομηχανικής μονάδας, ενώ το MQTT εγγυάται την ευέλικτη και ταχύτατη διάχυση της πληροφορίας προς τις απομακρυσμένες υπηρεσίες επιτήρησης [5], [26], [30]. Η συνδυαστική αυτή προσέγγιση θωρακίζει το σύστημα, καθιστώντας το ικανό να ανταπεξέλθει τόσο στις σκληρές απαιτήσεις του τοπικού ελέγχου όσο και στις προκλήσεις της παγκόσμιας ψηφιακής διασύνδεσης [7], [8], [26].

Η λειτουργική ροή και η ιεραρχική αποσύνδεση (decoupling) που προσφέρει η αρχιτεκτονική Publish/Subscribe του πρωτοκόλλου MQTT, το οποίο επιλέχθηκε για τη μεταφορά των δεδομένων στο Cloud, αποτυπώνεται γραφικά στην **Εικόνα 4.5**.



Εικόνα 4.5: Η αρχιτεκτονική Publish/Subscribe και η ροή μηνυμάτων στο πρωτόκολλο MQTT [49].

Αντίστοιχα, η στιβαρή, πολυεπίπεδη δομή και το μοντέλο πληροφορίας του προτύπου OPC-UA, το οποίο εξασφαλίζει τη σημασιολογική οργάνωση στο επίπεδο του πεδίου, παρουσιάζεται στην **Εικόνα 4.5.1**



Εικόνα 4.5.1: Η πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική (Layered Architecture) και το μοντέλο πληροφορίας του προτύπου OPC-UA [50].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Σχεδίαση Συστήματος Αξιολόγησης Ποιότητας Αέρα

5.1 Προδιαγραφές και Νομοθετικό Πλαίσιο Συμμόρφωσης

Η ανάπτυξη ενός συστήματος αξιολόγησης σε βιομηχανικό περιβάλλον υπερβαίνει τα όρια μιας απλής τεχνικής κατασκευής, καθώς συνιστά έναν κρίσιμο μηχανισμό διασφάλισης της επαγγελματικής υγείας και της περιβαλλοντικής ευθύνης [1], [4]. Η σχεδίαση της παρούσας διάταξης εναρμονίζεται με τις απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2008/50/EC και τις κατευθυντήριες γραμμές του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (WHO) [1], αποσκοπώντας στην αυστηρή τήρηση των θεσμοθετημένων ορίων επαγγελματικής έκθεσης (Occupational Exposure Limits - OEL) [4].

Στο πλαίσιο αυτό, η λειτουργική σχεδίαση εστιάζει στην επίμονη παρακολούθηση των κάτωθι παραμέτρων, οι οποίες θεωρούνται καθοριστικές για την ασφάλεια του εργασιακού χώρου:

Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO): Η παρακολούθηση στοχεύει στην έγκαιρη ανίχνευση συγκεντρώσεων που υπολείπονται του ορίου των 20-30 ppm, υπολογιζόμενο ως οκτάωρη σταθμισμένη μέση τιμή (8-hour TWA) [1], [4]. Η ακρίβεια σε αυτό το εύρος είναι ζωτικής σημασίας για την πρόληψη φαινομένων υποξίας και μακροχρόνιων επιπτώσεων στην υγεία των εργαζομένων [1], [32].

Διοξείδιο του Άνθρακα (CO₂): Η παράμετρος αυτή χρησιμοποιείται ως ο θεμελιώδης δείκτης επάρκειας του συστήματος εξαερισμού και της γενικότερης ποιότητας του εσωτερικού αέρα (Indoor Air Quality - IAQ) [1]. Με κρίσιμο επιχειρησιακό όριο τα 1000 ppm, [1] το σύστημα παρέχει τη δυνατότητα δυναμικής παρέμβασης στις υποδομές κλιματισμού και αερισμού, διασφαλίζοντας ένα υγιές και παραγωγικό περιβάλλον εργασίας [1], [33].

Οξείδια του Αζώτου (NO_x): Το σύστημα διαθέτει την απαραίτητη διακριτική ικανότητα για την ακριβή ανίχνευση συγκεντρώσεων πέριξ του ετήσιου ορίου των 40 μg/m³ [3]. Η παρακολούθηση αυτή είναι θεμελιώδης για τη διαχείριση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης εντός του βιομηχανικού ιστού και τη διασφάλιση της περιβαλλοντικής αδειοδότησης της μονάδας [3], [32].

Κατώτερο Όριο Εκρηκτικότητας (LEL): Σε ό,τι αφορά τα εύφλεκτα αέρια, όπως το μεθάνιο (CH₄) [28], η σχεδίαση εστιάζει στην αποφυγή προσέγγισης του 5% κατ' όγκον, που αποτελεί το κρίσιμο κατώτερο όριο έκρηξης (Lower Explosive Limit) [4], [33]. Η ενσωμάτωση αυτής της παραμέτρου προσδίδει στο σύστημα χαρακτηριστικά ενεργητικής αντεκρηκτικής προστασίας [4], [33].

Πτητικές Οργανικές Ενώσεις (VOCs): Η παρακολούθηση επεκτείνεται σε οργανικούς διαλύτες και ενώσεις όπως το βενζόλιο, παράγοντες που κρίνονται ζωτικοί για τη χημική βιομηχανία [1], [4]. Η δυνατότητα ανίχνευσης VOCs καθιστά το σύστημα ικανό να διαχειρίζεται σύνθετα βιομηχανικά ατυχήματα και να προστατεύει το οικοσύστημα από τυχαίες διαρροές χημικών ουσιών [4], [32].

Ρύπος / Αέριο	Μονάδα Μέτρησης	Όριο Έκθεσης (8h TWA)*	Στόχος Συστήματος (Alarm)	Αισθητήρας (MQ)
Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO)	ppm	20 - 30 ppm	> 50 ppm (High Alert)	MQ-7 / MQ-9
Διοξείδιο του Αζώτου (NO ₂)	ppm	0.2 - 0.5 ppm	> 1 ppm	MQ-135
Μεθάνιο (CH ₄)	% LEL	10% LEL	> 20% LEL	MQ-4
LPG (Προπάνιο/Βουτάνιο)	ppm	1000 ppm	> 1500 ppm	MQ-5 / MQ-6
VOCs (Πτητικές Ουσίες)	ppm	Μεταβλητό**	> 100 ppm (ενδεικτικά)	MQ-135

Πίνακας 5.1: Όρια έκθεσης και τους στόχοι παρακολούθησης αερίων ρύπων

5.2 Τεχνικές Απαιτήσεις και Επιλογή Αισθητήρων

Η επιλογή των δομικών στοιχείων του συστήματος πραγματοποιήθηκε με γνώμονα την επιχειρησιακή τους ετοιμότητα σε αντίξοες βιομηχανικές συνθήκες, ακολουθώντας τις αρχές σχεδίασης του Industry 4.0 [28], [31] και θέτοντας συγκεκριμένα περιβαλλοντικά κριτήρια λειτουργίας (όπως η απαίτηση για απρόσκοπτη λειτουργία σε εύρος σχετικής υγρασίας $20\% < RH < 90\%$ χωρίς συμπύκνωση και θερμοκρασίες -10°C έως 50°C) [31], [38].

Η υλοποίηση εστιάζει στους εξής τρεις πυλώνες:

- Πολυπαραμετρική Συστοιχία Αισθητήρων (Υβριδική Αρχιτεκτονική): Χρησιμοποιείται μια σειρά αναλογικών αισθητήρων της οικογένειας MQ-series (Metal Oxide Semiconductors - MOS, συγκεκριμένα οι MQ-7 και MQ-135) [28], [32]. Η επιλογή αυτή βασίζεται στον συνδυασμό υψηλής ανθεκτικότητας και χαμηλού κόστους κτήσης, καθιστώντας δυνατή την ευρεία διάταξη κόμβων μέτρησης [32], [33]. Παράλληλα, για τη διασφάλιση μέγιστης επιστημονικής ακρίβειας στα κρίσιμα αέρια, η διάταξη συμπληρώνεται από σύγχρονους ψηφιακούς αισθητήρες (I^2C) [28], όπως ο SCD30 για την υποστήριξη μέτρησης CO₂ με τεχνολογία NDIR [33], [38]. Οι αισθητήρες αυτοί καλύπτουν πλήρως τις προδιαγραφές λειτουργίας του υπό μελέτη περιβάλλοντος [38].
- Μηχανισμός Θερμοκρασιακής και Υγρασιακής Αντιστάθμισης: Λόγω της φυσικοχημικής συμπεριφοράς των αισθητήρων MOS, η αγωγιμότητα των ημιαγωγών επηρεάζεται άμεσα από τις μεταβολές της περιβαλλοντικής υγρασίας και θερμοκρασίας, εισάγοντας σφάλματα [32]. Για την εξάλειψη αυτών των αποκλίσεων, ενσωματώνονται στη διάταξη οι προηγμένοι σταθμοί μέτρησης BME680 και SCD30 [33], [38]. Οι ψηφιακές ενδείξεις θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας που παρέχουν, επιτρέπουν την εφαρμογή ενός δυναμικού διορθωτικού συντελεστή στο λογισμικό του Edge Gateway [28], [32]. Η διαδικασία αυτή εξασφαλίζει τη σταθερότητα και την ακρίβεια των δεδομένων ρύπων,

εξουδετερώνοντας τις διακυμάνσεις που προκαλούνται από τις θερμοϋγρομετρικές μεταβολές του χώρου [32], [33].

- Φυσική Προστασία και Βιομηχανική Θωράκιση: Η προστασία της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας (Arduino Mega 2560) [28] και των αισθητήρων διασφαλίζεται μέσω ειδικά σχεδιασμένου περιβλήματος με πιστοποίηση προστασίας IP65 [31]. Το κέλυφος περιλαμβάνει εξειδικευμένες σήτες (mesh), οι οποίες επιτρέπουν την ελεύθερη ροή του αέρα προς τους αισθητήρες (διατηρώντας την έκθεσή τους στα επιθυμητά όρια ροής), ενώ ταυτόχρονα αποτρέπουν την εισχώρηση βιομηχανικής σκόνης και σωματιδίων που θα μπορούσαν να επικαθήσουν στα θερμαντικά στοιχεία των MQ αισθητήρων και να αλλοιώσουν μόνιμα την ευαισθησία τους [31], [32].

Κριτήριο Παράμετρος	Απαιτούμενα Όρια Περιβάλλοντος	SCD30 (CO ₂ / T / RH)	BME680 (VOC / T / RH / P)	MQ-7 (CO)	MQ-135 (Air Quality / NH ₃ / Benzene)
Εύρος Λειτουργίας Υγρασίας	20% έως 90% RH	0% έως 100% RH	0% έως 100% RH	20% έως 95% RH	20% έως 90% RH
Εύρος Λειτουργίας Θερμοκρασίας	-10° C έως 50° C	-10° C έως 60° C	- 40° C έως 85° C	-20° C έως 50° C	-10° C έως 45° C
Δυνατότητα Μέτρησης Στόχου	Ανίχνευση CO, CO ₂ , VOC, T, RH	CO ₂ : 0 έως 10.000 ppm	IAQ / VOC Index	CO: 20 έως 2000 ppm	Gases: 10 έως 1000 ppm
Τύπος Σήματος / Διασύνδεση	Συμβατότητα με Arduino Mega	Ψηφιακό (I2C)	Ψηφιακό (I2C / SPI)	Αναλογικό (ADC)	Αναλογικό (ADC)
Κατάσταση Επιλογής	—	Εγκρίνεται	Εγκρίνεται	Εγκρίνεται	Εγκρίνεται

Πίνακας 5.2: Παράμετροι επιλογής αισθητήρων

5.2.1 Περιβαλλοντικές Παράμετροι (Contextual Data)

Η λειτουργική ευστάθεια των αισθητήρων ημιαγωγών οξειδίων μετάλλου (MOS) συναρτάται άμεσα με τις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες του βιομηχανικού χώρου [32]. Προκειμένου να διασφαλιστεί η εγκυρότητα των δεδομένων και να ελαχιστοποιηθεί το περιθώριο σφάλματος, κρίνεται επιβεβλημένη η συνεχής καταγραφή και ο συνυπολογισμός των εξής παραμέτρων [31], [33]:

Θερμοκρασία Περιβάλλοντος (°C): Η κινητική των χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στην ενεργό επιφάνεια του αισθητήρα παρουσιάζει έντονη θερμοκρασιακή εξάρτηση [32]. Οι μεταβολές της θερμοκρασίας επηρεάζουν άμεσα τον ρυθμό οξείδωσης και

αναγωγής των αερίων στόχων, καθιστώντας απαραίτητη τη χρήση αλγορίθμων διόρθωσης για τη διατήρηση της γραμμικότητας της μέτρησης [32], [33].

Σχετική Υγρασία (%RH): Η παρουσία υδρατμών αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες πρόκλησης παρεμβολών [32]. Τα μόρια του νερού προσροφώνται στην επιφάνεια του ημιαγωγού, μεταβάλλοντας την ηλεκτρική του αγωγιμότητα και οδηγώντας συχνά σε «ψευδώς θετικά» αποτελέσματα (false positives) [32]. Η ακριβής παρακολούθηση της υγρασίας επιτρέπει την εφαρμογή αντισταθμιστικών συντελεστών, διασφαλίζοντας ότι το σήμα ανταποκρίνεται αποκλειστικά στη συγκέντρωση των ανιχνευόμενων ρύπων [32], [33].

Ροή και Κυκλοφορία Αέρα (Airflow): Στις βιομηχανικές μονάδες, η δυναμική του εξαερισμού παίζει καθοριστικό ρόλο στη χωρική κατανομή των αερίων [31]. Ένα ιδιαίτερα ισχυρό ρεύμα αέρα ενδέχεται να προκαλέσει ταχύτατη διασπορά των ρύπων προτού αυτοί συγκεντρωθούν σε επαρκή ποσότητα στο πεδίο ανίχνευσης του αισθητήρα [31], [33]. Η κατανόηση της ροής του αέρα είναι ζωτικής σημασίας για τη βέλτιστη χωροθέτηση των συσκευών, ώστε να αποφεύγεται η υποτίμηση των κινδύνων λόγω αραίωσης του δείγματος [31].

5.2.2 Παράμετροι "Υγείας" του Συστήματος (System Health)

Για την εξασφάλιση της αδιάλειπτης και αξιόπιστης λειτουργίας της βιομηχανικής διάταξης, είναι απαραίτητος ο καθορισμός και η παρακολούθηση συγκεκριμένων παραμέτρων «υγείας» του συστήματος (System Health) [30], [34]. Οι απαιτήσεις αυτές δεν είναι ενιαίες, αλλά ομαδοποιούνται σε δύο διακριτά επίπεδα, ανάλογα με την προέλευσή τους και το στοιχείο της αρχιτεκτονικής που επηρεάζουν [28], [30]:

A. Απαιτήσεις Επιπέδου Υλικού και Αισθητήρων (Hardware & Sensor Level)

Οι παράμετροι αυτές υπαγορεύονται από τους φυσικούς και ηλεκτρικούς περιορισμούς των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων [28]:

- Χρόνος Προθέρμανσης (Warm-up Time): Αποτελεί αποκλειστική φυσικοχημική απαίτηση των αναλογικών αισθητήρων τεχνολογίας MOS (MQ-7, MQ-135) [32]. Τα στοιχεία αυτά απαιτούν ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα προκειμένου η εσωτερική αντίσταση θέρμανσης να φτάσει στην επιθυμητή θερμοκρασία σταθεροποίησης και να καταστεί δυνατή η ακριβής χημική αντίδραση με τα αέρια-στόχους [32], [33]. Η παράμετρος αυτή παρακολουθείται από το λογισμικό για την αποφυγή καταγραφής λανθασμένων τιμών κατά την εκκίνηση (cold start) [28], [33].
- Σταθερότητα Τάσης Τροφοδοσίας (Power Supply Stability): Η παράμετρος αυτή αποτελεί κρίσιμη απαίτηση τόσο για τους αναλογικούς αισθητήρες MQ όσο και για τη μονάδα κεντρικού ελέγχου (Arduino Mega) [28]. Οι αισθητήρες MQ βασίζονται στη μέτρησή τους στην πτώση τάσης πάνω σε μια αντίσταση φορτίου, ενώ ο ενσωματωμένος ADC του Arduino χρησιμοποιεί την τάση τροφοδοσίας ως τιμή

αναφοράς ($V_{ref} = 5V$) [28]. Οποιοσδήποτε μικροδιακυμάνσεις στην τροφοδοσία θα αλλοίωναν άμεσα την ψηφιοποιημένη τιμή, εισάγοντας τεχνητά σφάλματα [28], [32]. Συνεπώς, η σταθερότητα της τάσης εξασφαλίζεται μέσω εξωτερικού σταθεροποιητή και παρακολουθείται ως δείκτης υγείας του hardware [28].

B. Απαιτήσεις Επιπέδου Εφαρμογής και Δικτύου (Application & Network Level)

Οι παράμετροι αυτές αφορούν τη λογική λειτουργίας του λογισμικού και τη ροή της πληροφορίας προς το Cloud [30], [34]:

- Κατάσταση Συνδεσιμότητας (Connectivity Status): Η παράμετρος αυτή αποτελεί λειτουργική απαίτηση της Edge εφαρμογής (Python Gateway) και του Cloud περιβάλλοντος (Thingier.io) [30], [34]. Το Connectivity Status (π.χ. "Keep-Alive" signals ή "Device Online/Offline" flags) [34] επιτρέπει στο script της Python να γνωρίζει αν το REST Endpoint της πλατφόρμας είναι προσβάσιμο [30], [34]. Σε περίπτωση απώλειας σύνδεσης, η απαίτηση αυτή ενεργοποιεί τους τοπικούς μηχανισμούς προσωρινής αποθήκευσης (buffering) στο Gateway [30], ενώ παράλληλα ενημερώνει το Dashboard του Thingier.io για την αδυναμία λήψης νέων πακέτων τηλεμετρίας, διασφαλίζοντας την ακεραιότητα της συνολικής industrial εφαρμογής [30], [34].

5.2.3 Επιτήρηση Σφάλματος Αισθητήρα (Fault Detection)

Η διαχείριση και η ανάλυση της πληροφορίας στο αναπτυχθέν σύστημα ακολουθεί μια κλιμακωτή δομή τριών επιπέδων, διαχωρίζοντας τη λειτουργία του υλικού από την επεξεργασία των δεδομένων [30]. Αρχικά, στο επίπεδο του υλικού, πραγματοποιείται ο έλεγχος και η επιτήρηση σφάλματος των αισθητήρων για τη διασφάλιση της εγκυρότητας και της ακεραιότητας των πρωτογενών μετρήσεων [28], [32]. Στη συνέχεια, τα καθαρισμένα και έγκυρα δεδομένα συσχετίζονται με τις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες, λαμβάνοντας υπόψη φυσικοχημικές παραμέτρους όπως η θερμοκρασία και η υγρασία που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των αερίων [31], [33]. Τέλος, στο ανώτερο επίπεδο επεξεργασίας, η εμπλουτισμένη αυτή πληροφορία αξιοποιείται για τη διαχρονική παρακολούθηση των τάσεων, επιτρέποντας την πρόβλεψη επικίνδυνων συγκεντρώσεων ρύπων και τη λήψη προληπτικών αποφάσεων [30], [33].

Πέρα από την παρακολούθηση των περιβαλλοντικών ρύπων, το σύστημα ενσωματώνει εξειδικευμένους μηχανισμούς για την επιτήρηση της δικής του λειτουργικής ακεραιότητας [30], [32]. Η ικανότητα αυτοδιάγνωσης είναι κρίσιμη για την αποφυγή ψευδών ενδείξεων ασφάλειας και υλοποιείται μέσω της ανίχνευσης των εξής φαινομένων [28], [32]:

Ολίσθηση Μηδενός και Διαγνωστική Αδράνεια (Zero Drift/Fault): Το σύστημα αξιολογεί τη στατική συμπεριφορά του σήματος [32], [33]. Εάν ένας αισθητήρας παρουσιάζει μια απόλυτα σταθερή μηδενική ένδειξη σε ένα περιβάλλον που χαρακτηρίζεται από έστω και ελάχιστο υπόβαθρο θορύβου, αυτό ερμηνεύεται ως πιθανή ένδειξη αστοχίας του υλικού (π.χ. καταστροφή της εσωτερικής αντίστασης θέρμανσης) [32]. Η αναγνώριση αυτής της

«αφύσικης» σταθερότητας αποτρέπει την εσφαλμένη πεποίθηση ότι ο χώρος είναι ασφαλής, ενώ στην πραγματικότητα ο αισθητήρας έχει τεθεί εκτός λειτουργίας [30], [32].

Κορεσμός Σήματος (Saturation/Full-Scale Deflection): Στην περίπτωση που η τιμή στην αναλογική είσοδο του μικροελεγκτή «τερματίζει» στο μέγιστο εύρος της (π.χ. στην τιμή 1023 για έναν μετατροπέα 10-bit) [28], το σύστημα δεν την αντιμετωπίζει απλώς ως μια υψηλή μέτρηση, αλλά την αναγνωρίζει ως Κατάσταση Κόρου [28], [32]. Αυτό το φαινόμενο υποδηλώνει είτε μια ακραία, επικίνδυνη συγκέντρωση ρύπου που υπερβαίνει τα όρια ανίχνευσης, είτε βραχυκύκλωμα της γραμμής μεταφοράς σήματος [28], [32]. Σε κάθε περίπτωση, η κατάσταση αυτή ιεραρχείται ως συναγερμός μέγιστης προτεραιότητας και έκτακτης ανάγκης [30].

5.2.4 Συσχετισμός με Περιβαλλοντικές Συνθήκες

Η συστηματική παρακολούθηση της υγρασίας κρίνεται θεμελιώδης για τη διασφάλιση της μετρητικής ακρίβειας [32]. Οι αισθητήρες της σειράς MQ βασίζουν τη λειτουργία τους στη θέρμανση ενός λεπτού υμενίου μεταλλικού οξειδίου σε υψηλές θερμοκρασίες [32]. Η παρουσία αυξημένης υγρασίας στο βιομηχανικό περιβάλλον προκαλεί δύο κύριες παρεμβολές [32], [33]:

Θερμική Καταπόνηση και Ψύξη: Τα σταγονίδια υγρασίας και οι υδρατμοί τείνουν να «ψύχουν» την ενεργό επιφάνεια του αισθητήρα, επηρεάζοντας τη θερμική του ισορροπία και, κατ' επέκταση, την ευαισθησία του στην ανίχνευση του αερίου-στόχου [32].

Ανταγωνιστική Προσρόφηση: Τα μόρια του νερού καταλαμβάνουν τις διαθέσιμες θέσεις προσρόφησης (adsorption sites) στην κρυσταλλική δομή του οξειδίου, οι οποίες υπό κανονικές συνθήκες δεσμεύονται από ιόντα οξυγόνου [32]. Αυτή η «κατάληψη» μεταβάλλει την ηλεκτρική αγωγιμότητα του ημιαγωγού, οδηγώντας αναπόφευκτα σε λανθασμένες ενδείξεις και αποκλίσεις από την πραγματική συγκέντρωση των ρύπων [32], [33].

Η κατανόηση αυτού του φαινομένου καθιστά την ενσωμάτωση διορθωτικών αλγορίθμων υγρασίας απαραίτητη για την αξιοπιστία του συνολικού συστήματος επιτήρησης [33].

5.2.5 Παρακολούθηση Τάσεων (Trend Monitoring)

Η αρχιτεκτονική του συστήματος υπερβαίνει τη συμβατική προσέγγιση της απλής, στατικής μέτρησης οριακών τιμών, ενσωματώνοντας τη δυνατότητα παρακολούθησης του ρυθμού μεταβολής (Rate of Change) των συγκεντρώσεων [30], [33]. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη μετάβαση από την αντιδραστική (reactive) στην προληπτική (proactive) διαχείριση των κινδύνων [30], [36].

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η επιτήρηση του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) [1], [4]: Στην περίπτωση που η συγκέντρωση αυξηθεί από τα 5 ppm στα 15 ppm εντός ενός σύντομου χρονικού παραθύρου δύο λεπτών, το σύστημα ενεργοποιεί άμεσα μια προειδοποίηση (Early Warning) [30], [36]. Παρόλο που η τιμή αυτή υπολείπεται του

θεσμοθετημένου ορίου των 30 ppm [1], [4], η απότομη κλίση της καμπύλης υποδηλώνει μια πιθανή διαρροή ή δυσλειτουργία [33], [36]. Με την ανίχνευση αυτής της αυξητικής τάσης, παρέχεται ο απαραίτητος χρόνος αντίδρασης στο προσωπικό ασφαλείας για την εκκένωση του χώρου ή την απομόνωση της πηγής, πολύ πριν οι ρύποι φτάσουν σε επίπεδα επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία [1], [30].

5.2.6 Παρακολούθηση "Κύκλου Ζωής" (Maintenance Tracking)

Η επιχειρησιακή αξιοπιστία των αισθητήρων τεχνολογίας MQ είναι χρονικά περιορισμένη, καθώς η έκθεση σε βιομηχανικούς ρύπους προκαλεί σταδιακή υποβάθμιση της ευαισθησίας τους [32]. Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, η διάρκεια ζωής τους κυμαίνεται μεταξύ 12 και 24 μηνών [32], [33]. Προκειμένου να αποφευχθεί η χρήση ακατάλληλων αισθητήρων, το σύστημα ενσωματώνει έναν προηγμένο μηχανισμό παρακολούθησης του κύκλου ζωής μέσω της πλατφόρμας Thingier.io [34].

Η υλοποίηση βασίζεται στην καταγραφή των συνολικών ωρών ενεργής λειτουργίας (Cumulative Uptime Tracking) [30], [34]. Το σύστημα συγκρίνει αυτόματα τις ώρες αυτές με τα όρια που θέτει ο κατασκευαστής [33] και, μόλις συμπληρωθεί ένα κρίσιμο ορόσημο (π.χ. 5.000 ώρες λειτουργίας), ενεργοποιεί αυτόματα μια ειδοποίηση προς το τμήμα συντήρησης [34], [36]. Η ενημέρωση αυτή, με τη μορφή μηνύματος όπως *"Ο αισθητήρας MQ-7 συμπλήρωσε το όριο λειτουργίας· απαιτείται βαθμονόμηση ή αντικατάσταση"*, μετατρέπει τη συντήρηση από μια τυχαία διαδικασία σε μια προγραμματισμένη στρατηγική [30], [36]. Με αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζεται η συνεχής ακρίβεια των μετρήσεων και η αδιάλειπτη προστασία του προσωπικού, εξαλείφοντας τον κίνδυνο λειτουργίας με φθαρμένο ή ανακριβή εξοπλισμό [33], [36].

5.2.7 Δείκτες Επικινδυνότητας (Safety Indices)

Η αρχιτεκτονική του λογισμικού στην παρούσα εργασία υπερβαίνει την απλή παράθεση ακατέργαστων αριθμητικών τιμών, εστιάζοντας στην παραγωγή συνθετικών δεικτών που καθιστούν την πληροφορία άμεσα αξιοποιήσιμη από το προσωπικό ασφαλείας [30], [33]. Μέσω του κεντρικού Dashboard, το σύστημα υπολογίζει και προβάλλει σε πραγματικό χρόνο τις εξής κρίσιμες παραμέτρους [30]:

Δείκτης Ποιότητας Αέρα (Air Quality Index - AQI): Πρόκειται για έναν ολιστικό δείκτη που προκύπτει από τη συνδυαστική ανάλυση των επιμέρους συγκεντρώσεων ρύπων [2], [30]. Ο AQI μεταφράζει τις τεχνικές μονάδες μέτρησης σε μια ποιοτική κλίμακα διαβάθμισης (π.χ. «Καλή», «Μέτρια», «Επικίνδυνη»), επιτρέποντας στους εργαζόμενους και τους υπεύθυνους ασφαλείας να αντιληφθούν ακαριαία το επίπεδο κινδύνου χωρίς να απαιτείται εξειδικευμένη γνώση των ορίων ppm [2], [30].

Χρονικά Σταθμισμένος Μέσος Όρος (Time Weighted Average - TWA): Το σύστημα εκτελεί συνεχή στατιστική ανάλυση για τον υπολογισμό της μέσης έκθεσης του εργαζόμενου σε έναν ρύπο κατά τη διάρκεια μιας τυπικής 8ωρης βάρδιας [4], [33]. Ο υπολογισμός του TWA

είναι θεμελιώδους σημασίας για την εργατική νομοθεσία, καθώς τα όρια επικινδυνότητας συχνά δεν αφορούν μόνο τη στιγμιαία αιχμή (peak), αλλά τη συσσωρευτική έκθεση του οργανισμού σε βάθος χρόνου [4]. Η δυνατότητα αυτή καθιστά το σύστημα ένα απαραίτητο εργαλείο για τη νομική θωράκιση της επιχείρησης και τη διασφάλιση της μακροπρόθεσμης υγείας του προσωπικού [4], [30].

5.3 Μαθηματική Μοντελοποίηση και Λογική Αξιολόγησης

Η αρχιτεκτονική του συστήματος δεν περιορίζεται στην παθητική μετάδοση ακατέργαστων αναλογικών τιμών, αλλά υλοποιεί μια ολοκληρωμένη αλυσίδα επεξεργασίας δεδομένων σε τοπικό επίπεδο [7], [28], [33]. Η μετάβαση από το ηλεκτρικό σήμα στην αξιοποιήσιμη βιομηχανική πληροφορία βασίζεται στους εξής πυλώνες [28], [32]:

Μαθηματικός Μετασχηματισμός σε PPM: Η μετατροπή της ηλεκτρικής αντίστασης του αισθητήρα σε μονάδες συγκέντρωσης (ppm) πραγματοποιείται μέσω του νόμου της δύναμης, ο οποίος περιγράφεται από την εξίσωση [32]:

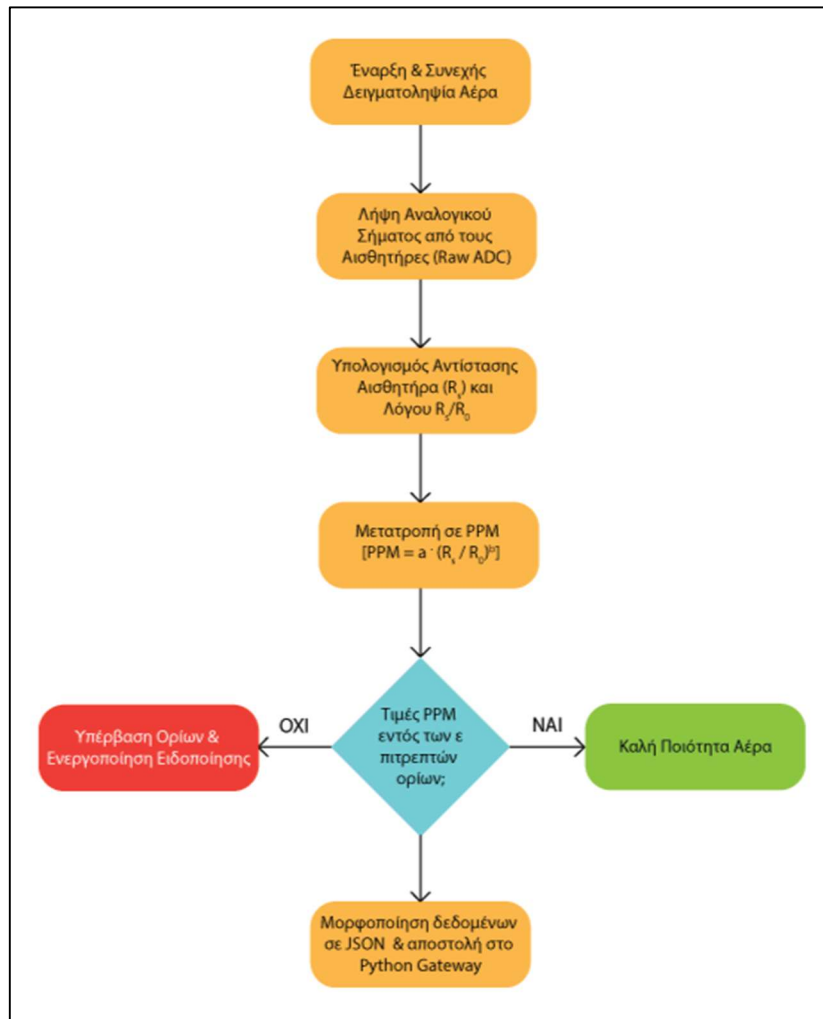
$$\frac{R_s}{R_o} = a \cdot (ppm)^b$$

Οι σταθερές a και b εξάγονται μέσω της μεθόδου της γραμμικής παλινδρόμησης στα λογαριθμικά δεδομένα των φύλλων προδιαγραφών (log-log plots), διασφαλίζοντας την ακριβή αντιστοίχιση της φυσικής μέτρησης με τη χημική συγκέντρωση [32], [33].

Πρωτόκολλο Βαθμονόμησης και Σταθεροποίησης: Η αξιοπιστία της μέτρησης προϋποθέτει μια αυστηρή διαδικασία βαθμονόμησης (Calibration) [32], [33]. Αυτή περιλαμβάνει τη φάση της αρχικής προθέρμανσης (Pre-heating) διάρκειας 24 έως 48 ωρών για τη χημική σταθεροποίηση του ημιαγωγού, καθώς και τον ακριβή προσδιορισμό της αντίστασης αναφοράς σε συνθήκες καθαρού αέρα [32]. Η διαδικασία αυτή αποτελεί το «σημείο μηδέν» για κάθε μετέπειτα υπολογισμό [32], [33].

Τοπική Λογική και Φιλτράρισμα (Edge Logic): Ο μικροελεγκτής Arduino Mega λειτουργεί ως κόμβος Edge Computing [7], [28], εκτελώντας αλγόριθμους τοπικού φιλτραρίσματος [28], [33]. Χρησιμοποιείται η μέθοδος του Κινητού Μέσου Όρου (Moving Average) για την εξάλειψη του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου και των στιγμιαίων διακυμάνσεων (spikes) που απαντώνται συχνά σε βιομηχανικά περιβάλλοντα [33]. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα αποστέλλει στο δίκτυο «καθαρά» δεδομένα, μειώνοντας τον φόρτο μετάδοσης και αυξάνοντας την ευστάθεια των συναγερμών [7], [30], [33].

Συνεπώς, η μαθηματική αυτή προσέγγιση επιτρέπει τον ακριβή προσδιορισμό της συγκέντρωσης του εκάστοτε αερίου, μετατρέποντας τα ηλεκτρικά σήματα του αισθητήρα σε αξιοποιήσιμη πληροφορία ρύπων [32], [33]. Η συνολική λογική της επεξεργασίας, από την αρχική λήψη του αναλογικού σήματος έως την τελική αξιολόγηση και τη μορφοποίηση του πακέτου δεδομένων, αποτυπώνεται γραφικά στην **Εικόνα 5.3**.



Εικόνα 5.3: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου επεξεργασίας δεδομένων, μαθηματικής μοντελοποίησης και λογικής αξιολόγησης των επιπέδων αέριων ρύπων.

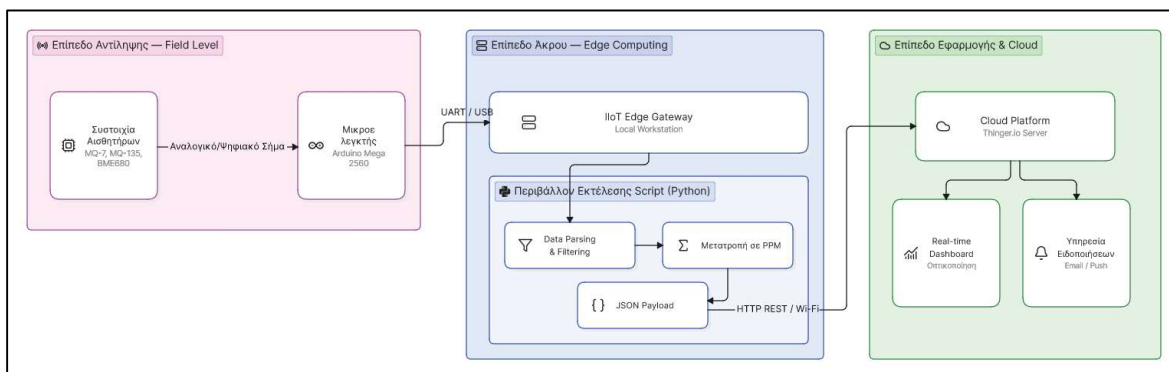
5.3.1 Αρχιτεκτονική IIoT Gateway και Ειδοποιήσεων

Η δομή του συστήματος έχει σχεδιαστεί με γνώμονα τον «εκδημοκρατισμό των δεδομένων», διασφαλίζοντας ότι η κρίσιμη πληροφορία για την ποιότητα του αέρα είναι προσβάσιμη, αξιόπιστη και αξιοποιήσιμη σε όλα τα επίπεδα της βιομηχανικής ιεραρχίας [7], [30]. Η ροή αυτή υποστηρίζεται από τρεις κεντρικούς πυλώνες [30]:

IIoT Edge Gateway (IIoT Edge Gateway): Το υποσύστημα του IIoT Edge Gateway αποτελεί τον ενδιάμεσο κόμβο επεξεργασίας στο άκρο του δικτύου (Edge Computing) [7], [30]. Η λειτουργική του οντότητα υλοποιείται μέσω κώδικα Python, ο οποίος αναλαμβάνει τη σειριακή λήψη, τον parsing και την προώθηση των δεδομένων, καθώς και την ακεραιότητά τους

(Data Integrity Check) μέσω αλγορίθμων επαλήθευσης [28], [30], ενώ ταυτόχρονα εγγυάται την κυβερνοασφάλεια της επικοινωνίας [35]. Η χρήση πρωτοκόλλων κρυπτογράφησης

TLS/SSL θωρακίζει τη μετάδοση προς το Cloud, αποτρέποντας κακόβουλες παρεμβολές ή υποκλοπή βιομηχανικών δεδομένων [35].



Εικόνα 5.3.1: Αρχιτεκτονική IIoT Gateway

Υβριδική Πρόσβαση και Διαλειτουργικότητα: Το σύστημα προσφέρει μια ευέλικτη, υβριδική προσέγγιση στην κατανάλωση της πληροφορίας [30], [34]. Τα δεδομένα είναι διαθέσιμα σε πραγματικό χρόνο τόσο σε τοπικό επίπεδο για άμεσο έλεγχο και σφάλμα (Serial Debugging/Local HMI) [28], όσο και σε παγκόσμια κλίμακα μέσω της υποδομής Thinger.io Cloud [34]. Αυτή η διττή πρόσβαση επιτρέπει την ταυτόχρονη ενημέρωση του χειριστή στο πεδίο και της διοίκησης από απόσταση [30], [34].

Ιεραρχικό Σύστημα Συναγερμών (Multilevel Alerting): Η απόκριση σε καταστάσεις κινδύνου υλοποιείται σε δύο διακριτά επίπεδα, εξασφαλίζοντας μέγιστη ταχύτητα και ευρεία ενημέρωση [30], [36]:

Επίπεδο 1 (Τοπική Απόκριση): Ο μικροελεγκτής Arduino Mega [28] ενεργοποιεί άμεσα ηχητική σήμανση (Buzzer) με υστέρηση μόλις μερικών microseconds από τη στιγμή της ανίχνευσης [28]. Η τοπική αυτή αντίδραση είναι ζωτικής σημασίας για την ακαριαία προειδοποίηση των εργαζομένων στον χώρο [28], [30].

Επίπεδο 2 (Νεφοϋπολογιστική Ειδοποίηση): Σε περίπτωση υπέρβασης κρίσιμων ορίων (π.χ. συγκέντρωση CO άνω των 50 ppm) [1], [4], το Cloud ενεργοποιεί αυτοματοποιημένες ειδοποιήσεις (Email Alerts) [34]. Αυτό το επίπεδο διασφαλίζει ότι οι υπεύθυνοι ασφαλείας ενημερώνονται αμέσως, ανεξαρτήτως της φυσικής τους θέσης, για την καταγραφή και τη διαχείριση του συμβάντος [30], [34], [36].

5.4 Τεχνικές Απαιτήσεις και Αρχιτεκτονική Συστήματος

Προκειμένου να διασφαλιστεί η απρόσκοπτη και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος εντός του απαιτητικού περιβάλλοντος παραγωγής, η σχεδίαση βασίστηκε σε τρεις θεμελιώδεις άξονες τεχνικών προδιαγραφών [30], [31]:

Συστοιχία Πολυπαραμετρικής Ανίχνευσης: Η διάταξη ενσωματώνει μια υβριδική προσέγγιση ανίχνευσης, συνδυάζοντας αισθητήρες ημιαγωγών μετάλλου-οξειδίου (MOS) για τον εντοπισμό χημικών ρύπων με τους ψηφιακούς αισθητήρες BME680 και SCD30 [28], [38] για την ακριβή μέτρηση θερμοκρασίας και υγρασίας. Η συνύπαρξη αυτών των στοιχείων επιτρέπει στο σύστημα όχι μόνο να ανιχνεύει αέριους ρύπους, αλλά και να αντισταθμίζει τις περιβαλλοντικές επιδράσεις, εξασφαλίζοντας υψηλή πιστότητα δεδομένων [32], [33].

Βιομηχανική Ανθεκτικότητα (Robustness): Λαμβάνοντας υπόψη τις αντίξοες συνθήκες του εργοστασιακού χώρου, η φυσική υπόσταση του συστήματος θωρακίστηκε μέσω περιβλήματος βιομηχανικών προδιαγραφών [31]. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην προστασία των ευαίσθητων στοιχείων μέτρησης με τη χρήση εξειδικευμένων φίλτρων, τα οποία αποτρέπουν την επικάλυψη σκόνης και μικροσωματιδίων στις ενεργές επιφάνειες των αισθητήρων, παρατείνοντας έτσι τον χρόνο ζωής και την ακρίβειά τους [31], [32].

Συνδεσιμότητα Edge-to-Cloud: Η αρχιτεκτονική πληροφορικής ακολουθεί το μοντέλο της ιεραρχικής επεξεργασίας [7], [30]. Ο μικροελεγκτής Arduino Mega λειτουργεί ως κόμβος επεξεργασίας στο «άκρο» (Edge Node) [28], εκτελώντας τοπικά το φιλτράρισμα και την προ-επεξεργασία των σημάτων [28], [33]. Στη συνέχεια, η πληροφορία διοχετεύεται μέσω του βιομηχανικού πρωτοκόλλου MQTT [5] στην πλατφόρμα Thingier.io [34], επιτρέποντας την κεντρική εποπτεία Cloud και την ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, διασφαλίζοντας παράλληλα τη χαμηλή κατανάλωση εύρους ζώνης [5], [30], [34].

5.4.1 Αρχιτεκτονική και Λογική Λειτουργίας

Η λειτουργία του συστήματος διαρθρώνεται σε τρία διακριτά, αλλά αλληλένδετα επίπεδα, εξασφαλίζοντας την αδιάλειπτη επιτήρηση και την άμεση απόκριση σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης [7], [30]:

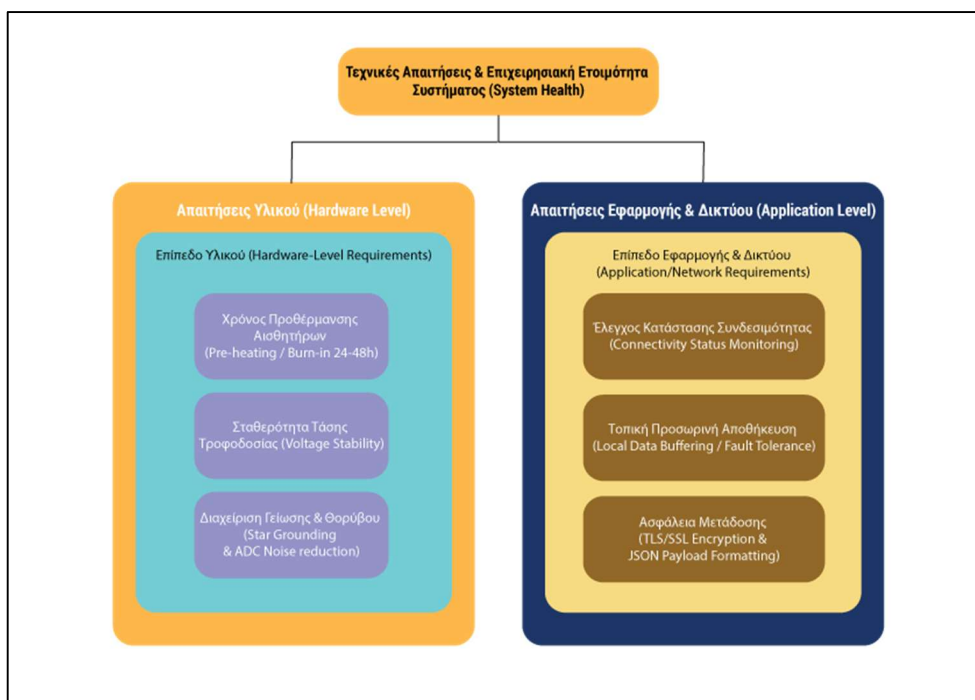
Επίπεδο Άμεσης Απόκρισης (Edge Logic Layer): Στο χαμηλότερο επίπεδο της ιεραρχίας, ο μικροελεγκτής Arduino Mega [28] εκτελεί τοπικό έλεγχο με υστέρηση της τάξης των microseconds [28], [30]. Η σχεδίαση αυτή δίνει προτεραιότητα στην ασφάλεια ζωής: εάν μια μέτρηση υπερβεί το προκαθορισμένο όριο (π.χ. συγκέντρωση άνω των 50 ppm) [1], [4], ενεργοποιείται ακαριαία ο τοπικός ηχητικός συναγερμός (Buzzer) [28]. Η απόκριση αυτή είναι αυτόνομη και ανεξάρτητη από τη συνδεσιμότητα του δικτύου ή την κατάσταση του Cloud, εξασφαλίζοντας ότι το προσωπικό θα προειδοποιηθεί ακόμη και σε περίπτωση ολικής κατάρρευσης των επικοινωνιών [28], [30].

Επίπεδο Επεξεργασίας και Διασύνδεσης (IIoT Gateway Layer): Το ενδιάμεσο επίπεδο υλοποιείται μέσω ενός Python Script, το οποίο λειτουργεί ως η «ευφυής γέφυρα» του συστήματος [7], [30]. Εδώ πραγματοποιείται ο μαθηματικός μετασχηματισμός των αναλογικών σημάτων σε μονάδες συγκέντρωσης (PPM) μέσω της επίλυσης της λογαριθμικής εξίσωσης ευαισθησίας των αισθητήρων [32]. Παράλληλα, το Gateway εκτελεί αλγορίθμους φιλτραρίσματος θορύβου (Moving Average) και ελέγχους ακεραιότητας

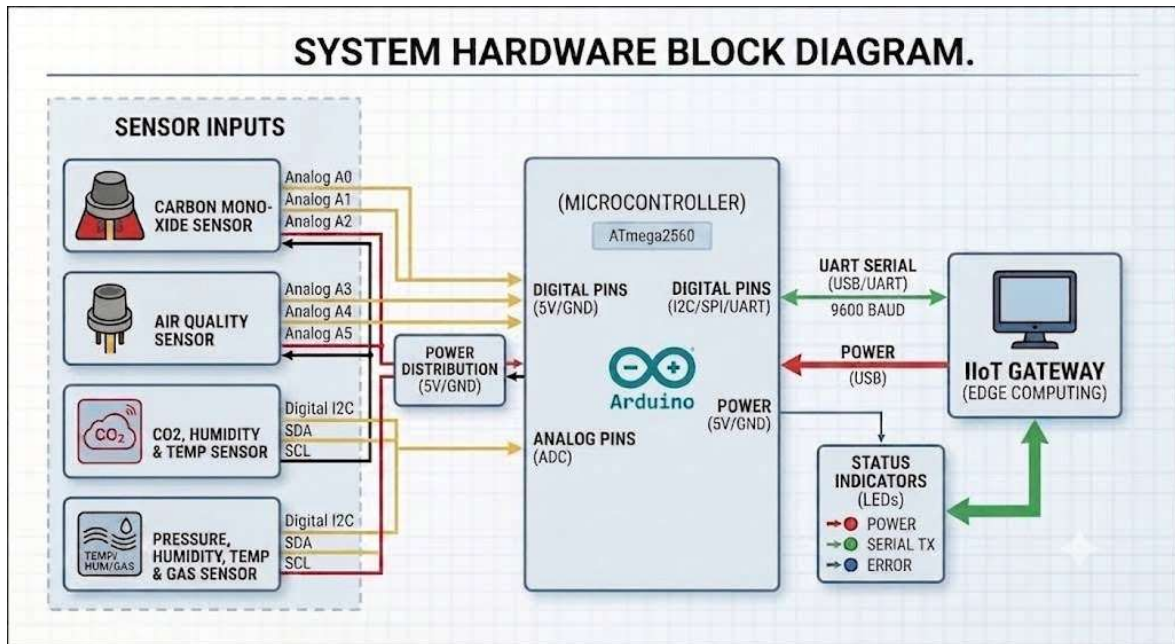
(Integrity Checks) [28], [33], διασφαλίζοντας ότι η πληροφορία που προωθείται προς τα πάνω είναι απαλλαγμένη από σφάλματα και spikes [30], [33].

Επίπεδο Εποπτείας και Ιστορικότητας (Cloud Tier): Στην κορυφή της αρχιτεκτονικής, τα επεξεργασμένα δεδομένα μεταφέρονται μέσω του βιομηχανικού πρωτοκόλλου MQTT [5] στην πλατφόρμα Thinger.io [34]. Το επίπεδο αυτό προσφέρει την οπτικοποίηση της κατάστασης σε πραγματικό χρόνο μέσω Dynamic Dashboards και την αρχειοθέτηση των μετρήσεων σε Data Buckets [34]. Η αποθήκευση αυτή είναι ζωτικής σημασίας για την ανάλυση τάσεων (Trend Analysis), την εξαγωγή συμπερασμάτων για την ποιότητα του αέρα σε βάθος χρόνου και την απόδειξη συμμόρφωσης της βιομηχανικής μονάδας με τους ισχύοντες περιβαλλοντικούς κανονισμούς [1], [4], [30], [33].

Συνοψίζοντας, η διασφάλιση της επιχειρησιακής συνέχειας και της αξιοπιστίας της διάταξης δεν περιορίζεται μόνο στη σωστή λήψη των μετρήσεων, αλλά επεκτείνεται σε ένα πλέγμα τεχνικών απαιτήσεων που εγγυώνται την ορθή λειτουργία ("υγεία") ολόκληρου του οικοσυστήματος [30], [36]. Οι απαιτήσεις αυτές ομαδοποιούνται συστηματικά σε δύο κύριους άξονες: στις απαιτήσεις επιπέδου υλικού (Hardware) [28] και στις απαιτήσεις επιπέδου εφαρμογής/δικτύου (Application/Network) [5], [30], [34]. Η ιεραρχική αυτή δομή και οι επιμέρους κρίσιμες παράμετροι αποτυπώνονται γραφικά στην **Εικόνα 5.4.1**.



Εικόνα 5.4.1: Ιεραρχική δομή τεχνικών απαιτήσεων και παραμέτρων λειτουργικής σταθερότητας (System Health) του συστήματος IoT.



Εικόνα 5.4.2: Γενικό διάγραμμα αρχιτεκτονικής υλικού (Hardware Block Diagram) του συστήματος μέτρησης.

5.5 Μεθοδολογία Βαθμονόμησης (Calibration Strategy)

Η αξιοπιστία της περιβαλλοντικής αξιολόγησης συναρτάται άμεσα με την αυστηρότητα της διαδικασίας βαθμονόμησης (Calibration), η οποία αποτελεί το θεμέλιο για τη μετατροπή των ηλεκτρικών μεγεθών σε φυσικές συγκεντρώσεις [32], [33]. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε διακρίνεται στα εξής στάδια [32]:

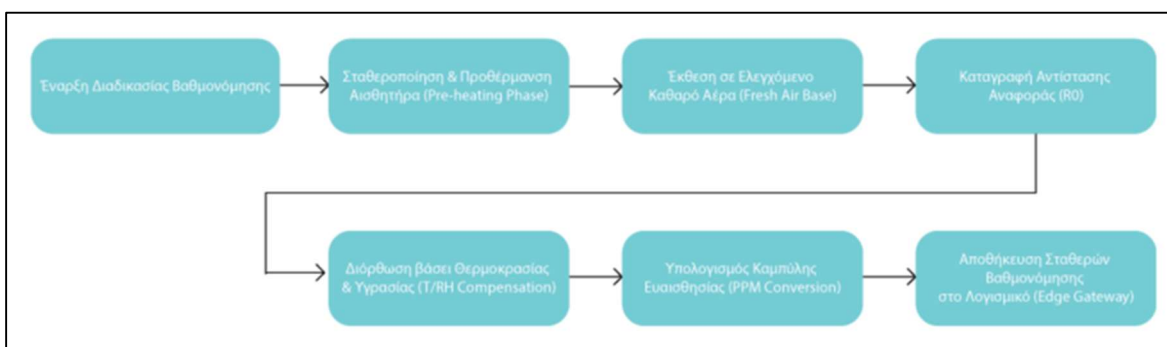
Προσδιορισμός της Αντίστασης Αναφοράς: Το κρίσιμο αυτό μέγεθος αντιπροσωπεύει την εσωτερική αντίσταση του αισθητήρα σε συνθήκες καθαρού αέρα (Base Resistance) [32]. Για την εξαγωγή μιας σταθερής τιμής, εφαρμόζεται πρωτόκολλο προθέρμανσης (Pre-heating) διάρκειας 48 ωρών, το οποίο διασφαλίζει τη θερμική και χημική ισορροπία του ημιαγωγού [32], [33]. Ο ακριβής προσδιορισμός του είναι ζωτικής σημασίας, καθώς αποτελεί το σημείο μηδέν για τον υπολογισμό του λόγου, πάνω στον οποίο βασίζεται η ανίχνευση των ρύπων [32].

Μαθηματική Μοντελοποίηση και Παλινδρόμηση: Η μετάφραση της αναλογικής τάσης σε συγκέντρωση (ppm) υλοποιείται μέσω προηγμένου αλγορίθμου σε περιβάλλον Python και C++ [28], [30]. Η διαδικασία βασίζεται στην εφαρμογή λογαριθμικής παλινδρόμησης στις καμπύλες ευαισθησίας του κατασκευαστή [32]. Με τη μοντελοποίηση αυτή, το σύστημα είναι σε θέση να επιλύει δυναμικά τις μη γραμμικές εξισώσεις απόκρισης του αισθητήρα, εξασφαλίζοντας υψηλή πιστότητα στην εκτίμηση των επιπέδων ρύπανσης σε όλο το εύρος ανίχνευσης [30], [32].

Περιβαλλοντική Διόρθωση και Αντιστάθμιση: Αναγνωρίζοντας ότι οι συνθήκες του βιομηχανικού χώρου δεν είναι σταθερές, ενσωματώνονται στο λογισμικό εξειδικευμένοι

διορθωτικοί συντελεστές (Compensation Factors) [32], [38]. Οι συντελεστές αυτοί λαμβάνουν υπόψη τις στιγμιαίες μεταβολές της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας, οι οποίες αλλοιώνουν την αγωγιμότητα στην ενεργό επιφάνεια του αισθητήρα [32]. Η δυναμική αυτή αντιστάθμιση θωρακίζει το σύστημα έναντι εξωγενών παρεμβολών, αποτρέποντας τη δημιουργία συστηματικών σφαλμάτων στις μετρήσεις [32], [33].

Η διαδικασία βαθμονόμησης των αισθητήρων αποτελεί κρίσιμο στάδιο για τη διασφάλιση της ακρίβειας των μετρήσεων, καθώς οι αισθητήρες ημιαγωγών παρουσιάζουν μη γραμμική συμπεριφορά και επηρεάζονται σημαντικά από τις περιβαλλοντικές συνθήκες [32]. Για τον σκοπό αυτό, αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία βήμα προς βήμα, η οποία ξεκινά από την αρχική σταθεροποίηση του στοιχείου και καταλήγει στην ενσωμάτωση των διορθωμένων μαθηματικών σταθερών στο λογισμικό του Edge Gateway [7], [30], [32], [33]. Η ροή και τα επιμέρους στάδια αυτής της στρατηγικής αποτυπώνονται αναλυτικά στην **Εικόνα 5.5**.



Εικόνα 5.5: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας και των σταδίων βαθμονόμησης (Calibration Strategy) για τη σταθεροποίηση και τη διόρθωση των μετρήσεων των αισθητήρων.

5.6 Αναμενόμενη Λειτουργία και Λογική Αξιολόγησης

Η λειτουργική ευφυΐα του συστήματος βασίζεται σε έναν μηχανισμό αυτόνομης αξιολόγησης, ο οποίος κατατάσσει τις περιβαλλοντικές μετρήσεις σε τρία διακριτά επίπεδα επιχειρησιακής επικινδυνότητας [30], [36]. Η προσέγγιση αυτή διασφαλίζει τη στοχευμένη αντίδραση ανάλογα με τη σοβαρότητα της κατάστασης [30]:

Επίπεδο Α – Κανονική Κατάσταση (Normal Operation): Σε συνθήκες όπου οι συγκεντρώσεις ρύπων παραμένουν εντός των επιτρεπτών ορίων [1], [4], το σύστημα εκτελεί αδιάλειπτη ψηφιακή καταγραφή (Logging) [30], [34]. Η πληροφορία διοχετεύεται σε πραγματικό χρόνο στο κεντρικό Dashboard, επιτρέποντας την οπτική εποπτεία των τάσεων και τη διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του χώρου εργασίας [34].

Επίπεδο Β – Κατάσταση Επαγρύπνησης (Warning Phase): Όταν η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) υπερβεί το προληπτικό όριο των 15 ppm [1], [4], το σύστημα μεταβαίνει αυτόματα σε φάση προειδοποίησης [30]. Ενεργοποιείται η αποστολή άμεσης ειδοποίησης (Push Notification/Email) προς τον υπεύθυνο ασφαλείας, ενημερώνοντάς τον

για την αυξητική τάση των ρύπων [34]. Η έγκαιρη αυτή ενημέρωση επιτρέπει τη λήψη προληπτικών μέτρων πριν η κατάσταση καταστεί κρίσιμη [30], [36].

Επίπεδο Γ – Κατάσταση Συναγερμού (Critical/Emergency Phase): Η μετάβαση στο ανώτατο επίπεδο επικινδυνότητας πυροδοτείται από την υπέρβαση των 30 ppm για το CO ή των 1500 ppm για το CO_2 [1], [4], [38]. Σε αυτή τη φάση, το σύστημα εκτελεί δύο παράλληλες ενέργειες έκτακτης ανάγκης [30], [36]:

1. Τοπική Σήμανση: Ενεργοποιείται ακαριαία ο ηχητικός συναγερμός (Buzzer) στον χώρο για την προστασία του προσωπικού [28], [30].
2. Αυτοματοποιημένη Καταστολή: Αποστέλλεται ψηφιακό σήμα ελέγχου για την αναγκαστική ενεργοποίηση του συστήματος εξαερισμού, στοχεύοντας στην ταχεία αραίωση των ρύπων και την αποκατάσταση της ποιότητας του αέρα [30], [36].

5.7 Πεδίο Εφαρμογής και Επεκτασιμότητα

Η παρούσα υλοποίηση επικεντρώνεται στην επιτήρηση του Μονοξειδίου του Άνθρακα (CO) και του Διοξειδίου του Άνθρακα (CO_2) [1], [4], [38], καθώς οι παράμετροι αυτές αποτελούν τους πρωτεύοντες δείκτες ρύπανσης και επάρκειας αερισμού σε μονάδες καύσης και περιορισμένους βιομηχανικούς χώρους [1], [4]. Ωστόσο, η αρχιτεκτονική του συστήματος έχει σχεδιαστεί με γνώμονα την υψηλή επεκτασιμότητα (Scalability) και τη δομοστοιχειακή (modular) φιλοσοφία [7], [30].

Η αξιοποίηση του μικροελεγκτή Arduino Mega [28], σε συνδυασμό με την ευέλικτη δομή του λογισμικού [30], επιτρέπει την άμεση ενσωμάτωση πρόσθετων αισθητήρων [28], [32] για τη διεύρυνση του φάσματος ανίχνευσης σε:

Οξειδία του Αζώτου (NO , NO_2 και NO_x): Κρίσιμα για την παρακολούθηση εκπομπών σε περιβάλλοντα βαριάς βιομηχανίας [4], [32].

Εύφλεκτα Αέρια (LPG, CH_4): Για την ενίσχυση της ενεργητικής αντιαπνευστικής προστασίας της μονάδας [32].

Πτητικές Οργανικές Ενώσεις (VOCs): Απαραίτητες για τον έλεγχο διαρροών σε χημικές βιομηχανίες και αποθήκες διαλυτών [32], [38].

Η διαδικασία επέκτασης χαρακτηρίζεται από εξαιρετική απλότητα, καθώς απαιτεί μόνον τη φυσική σύνδεση των νέων αισθητήρων στις διαθέσιμες αναλογικές εισόδους [28] και την παραμετροποίηση των αντίστοιχων πινάκων βαθμονόμησης στο Cloud περιβάλλον [30], [34]. Αυτή η δυνατότητα καθιστά το σύστημα μια «ζωντανή» πλατφόρμα, ικανή να προσαρμόζεται δυναμικά στις μεταβαλλόμενες ανάγκες ασφαλείας οποιασδήποτε βιομηχανικής εγκατάστασης [7], [30].

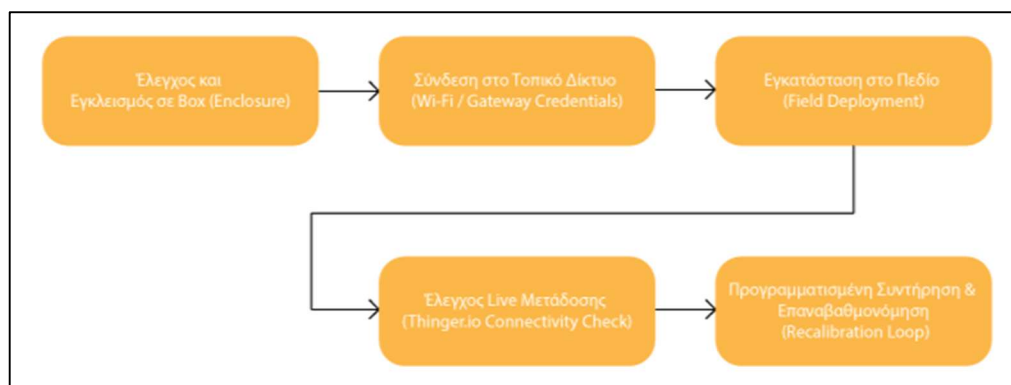
5.8 Στρατηγική Τοποθέτησης στην Παραγωγή

Η εγκυρότητα της αξιολόγησης δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την ακρίβεια των αισθητήρων, αλλά και από την ορθή χωροθέτηση των μονάδων μέτρησης εντός του βιομηχανικού πεδίου [30], [31]. Η τοποθέτηση ακολουθεί τις φυσικοχημικές ιδιότητες των ρύπων και τα ανθρωπομετρικά δεδομένα του προσωπικού [4], [31], [32]:

Ζώνη Αναπνοής (Breathing Zone): Για την ανίχνευση του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) [1], οι αισθητήρες εγκαθίστανται σε ύψος 1,5m – 1,8m από το δάπεδο [4], [31]. Η επιλογή αυτή στοχεύει στην πιστή προσομοίωση της πραγματικής έκθεσης του εργαζομένου, διασφαλίζοντας ότι οι μετρήσεις αντικατοπτρίζουν την ποιότητα του αέρα που εισπνέεται στο ύψος των αναπνευστικών οργάνων [4].

Κατώτερα Σημεία Συγκέντρωσης: Η παρακολούθηση του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) [38] απαιτεί τοποθέτηση σε χαμηλότερα επίπεδα του χώρου [31]. Δεδομένου ότι το CO_2 διαθέτει μεγαλύτερη πυκνότητα από τον ατμοσφαιρικό αέρα [32], τείνει να εκτοπίζει το οξυγόνο και να συγκεντρώνεται κοντά στο έδαφος σε περιπτώσεις ανεπαρκούς κυκλοφορίας ή βλάβης του εξαερισμού [31], [32]. Η χωροθέτηση αυτή επιτρέπει την έγκαιρη ανίχνευση επικίνδυνων συσσωρεύσεων που θα μπορούσαν να προκαλέσουν ασφυκτικά φαινόμενα [1], [4], [31].

Η επιτυχής μετάβαση της διάταξης από το εργαστηριακό περιβάλλον σε συνθήκες πραγματικής παραγωγής απαιτεί τον προσεκτικό σχεδιασμό μιας στρατηγικής τοποθέτησης [30], [31]. Η στρατηγική αυτή εξασφαλίζει τόσο τη φυσική προστασία της συσκευής όσο και την αξιοπιστία της συνεχούς ροής δεδομένων προς το υπολογιστικό νέφος [30], [31]. Τα διαδοχικά στάδια της διαδικασίας αυτής, από την αρχική προετοιμασία του υλικού έως τον κύκλο περιοδικής συντήρησης στο πεδίο, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στην **Εικόνα 5.8**.



Εικόνα 5.8: Διάγραμμα σταδίων του κύκλου ζωής τοποθέτησης (Deployment Lifecycle) και στρατηγικής λειτουργίας του συστήματος στο περιβάλλον παραγωγής.

Κεφάλαιο 6: Πειραματική Εφαρμογή και Τεχνική Υλοποίηση

6.1 Προδιαγραφές και Επιλογή Υλικού (Hardware)

Η αρχιτεκτονική σχεδίαση του προτεινόμενου συστήματος ΠoT αναπτύσσεται σε επίπεδο συστήματος (system-level) ακολουθώντας μια προσέγγιση ανεξάρτητη συγκεκριμένου υλικού (hardware and software agnostic) [7], [30]. Οι λειτουργικές οντότητες, οι ροές δεδομένων και τα επίπεδα επικοινωνίας που περιγράφονται, αποτελούν ένα γενικευμένο πρότυπο το οποίο μπορεί να βρει εφαρμογή με ποικίλα υπολογιστικά μέσα και περιβάλλοντα προγραμματισμού [7], [30].

Ωστόσο, η αρχιτεκτονική δομή του Επιπέδου Άκρου (Edge Level) και της Διασύνδεσης Πεδίου υπαγορεύεται και περιορίζεται εν μέρει από τις φυσικοχημικές απαιτήσεις των επιλεγμένων αισθητήρων [28], [32]. Συγκεκριμένα, η ενσωμάτωση αναλογικών αισθητήρων τεχνολογίας ημιαγωγών οξειδίων μετάλλου (MOS / MQ-series) επιβάλλει στην αρχιτεκτονική του τοπικού ελεγκτή την ύπαρξη κατάλληλων αναλογικών εισόδων (ADC) και ενός ντετερμινιστικού μηχανισμού χρονισμού για τη θερμοκρασιακή αντιστάθμιση [28], [32], [33].

Ως εκ τούτου, οι συγκεκριμένες επιλογές υλικού (όπως ο μικροελεγκτής Arduino Mega 2560) [28] και λογισμικού (όπως το περιβάλλον εκτέλεσης Python για το Edge Gateway), οι οποίες αναλύονται στις επόμενες παραγράφους, αποτελούν το προοίμιο και το πλαίσιο της συγκεκριμένης πειραματικής σχεδίασης και υλοποίησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, χωρίς να περιορίζουν τη γενικότητα του θεωρητικού μοντέλου [7], [30].

Η επιλογή του εξοπλισμού για την υλοποίηση της πειραματικής διάταξης πραγματοποιήθηκε με γνώμονα τις απαιτήσεις που ορίστηκαν στο Κεφάλαιο 5, εστιάζοντας στην ανάγκη για συνεχή και αξιόπιστη παρακολούθηση της συγκέντρωσης μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα σε βιομηχανικό περιβάλλον [1], [4], [38]. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη συμβατότητα των αισθητήρων με τον μικροελεγκτή [28], καθώς και στην ικανότητά τους να ανταποκρίνονται στα κρίσιμα όρια ασφαλείας για την ανθρώπινη υγεία [1], [4].

6.1.1 Μονάδα Κεντρικού Ελέγχου

Για τις ανάγκες της διασύνδεσης των αισθητήρων και της πρωτογενούς επεξεργασίας των δεδομένων, επιλέχθηκε ο μικροελεγκτής Arduino Mega 2560 R3 [28]. Η επιλογή αυτή βασίστηκε στον μεγάλο αριθμό αναλογικών εισόδων (ADC channels) [28], οι οποίες είναι απαραίτητες για την ταυτόχρονη σύνδεση πολλαπλών αισθητήρων αερίων σειράς MQ [28], [32], καθώς και στη σταθερότητα που επιδεικνύει κατά τη συνεχή λειτουργία σε περιβάλλοντα με αυξημένο ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο [28], [31], [33].

6.1.2 Αισθητήρες Μέτρησης Αερίων Ρύπων

Σύμφωνα με τους στόχους της παρούσας εργασίας, η διάταξη εξοπλίστηκε με αισθητήρες ημιαγωγού οξειδίου μετάλλου (MOS), οι οποίοι επιλέχθηκαν για την υψηλή τους ευαισθησία και το χαμηλό κόστος υλοποίησης [32], [38]:

Αισθητήρας Μονοξειδίου του Άνθρακα (MQ-7): Αποτελεί το κύριο όργανο μέτρησης για το CO [38]. Η λειτουργία του βασίζεται σε κύκλους θέρμανσης διαφορετικών επιπέδων τάσης (5V για καθαρισμό του αισθητήρα και 1.4V για τη μέτρηση) [32], [38], εξασφαλίζοντας την απαραίτητη ακρίβεια στην ανίχνευση χαμηλών συγκεντρώσεων (ppm), που είναι κρίσιμες για την αποφυγή φαινομένων δηλητηρίασης [1], [4], [32].

Αισθητήρας Διοξειδίου του Άνθρακα και Ποιότητας Αέρα (MQ-135): Χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της συγκέντρωσης CO₂ [38]. Παρόλο που ο συγκεκριμένος αισθητήρας παρουσιάζει ευαισθησία και σε άλλους ρύπους (όπως αμμωνία ή βενζόλιο) [32], [38], η βαθμονόμησή του επικεντρώθηκε στο CO₂ [32], επιτρέποντας την αξιολόγηση της επάρκειας του αερισμού στον χώρο εργασίας [1], [4].

6.1.3 Σύστημα Περιβαλλοντικής Αντιστάθμισης

Δεδομένου ότι η αγωγιμότητα των αισθητήρων MQ επηρεάζεται σημαντικά από τις μεταβολές της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας [32], [33], κρίθηκε απαραίτητη η χρήση των αισθητήρων BME680 και SCD30 [28], [38]. Τα δεδομένα που συλλέγονται από αυτόν χρησιμοποιούνται στον αλγόριθμο επεξεργασίας για τη διόρθωση των μετρήσεων των αερίων (compensation curves) [32], [33], διασφαλίζοντας ότι οι αναγνώσεις παραμένουν αξιόπιστες κάτω από διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες [32], [38].

6.1.4 Δομή Επικοινωνίας και Αποθήκευσης

Στην παρούσα ενότητα αναλύεται η αρχιτεκτονική προσέγγιση που υιοθετήθηκε για τη διασύνδεση του τοπικού IIoT Edge Gateway με την πλατφόρμα νέφους Thingier.io [34], καθώς και ο μηχανισμός αποθήκευσης των δεδομένων πεδίου [30], [34]. Η δομή επικοινωνίας βασίζεται στο μοντέλο Πελάτη-Εξυπηρετητή (Client-Server) [7] και υλοποιείται μέσω του πρωτοκόλλου HTTP (Hypertext Transfer Protocol) [30], [34], λειτουργώντας συμπληρωματικά με τις δυνατότητες τηλεμετρίας MQTT της πλατφόρμας [5], [34].

1. Μορφοποίηση και Δομή Δεδομένων (JSON Payload) Η πληροφορία που συλλέγεται ανά 5 δευτερόλεπτα (βάσει της παραμέτρου χρονισμού logInterval = 5000 του firmware) [28] και επεξεργάζεται τοπικά στο Edge Gateway μέσω του Python script [30], μετατρέπεται σε μια ελαφριά, αναγνώσιμη από μηχανές δομή δεδομένων, τύπου JSON (JavaScript Object Notation) [30], [34].

Η επιλογή του JSON εξασφαλίζει τη βέλτιστη διαχείριση της μνήμης RAM του Gateway και ελαχιστοποιεί το δίκτυο overhead [30]. Η δομή του πακέτου

περιλαμβάνει τόσο τις ακατέργαστες αναλογικές μετρήσεις (Raw ADC values) όσο και τις ψηφιακές περιβαλλοντικές ενδείξεις [28], [30], όπως αποτυπώνεται στο ακριβές payload που παράγει το σύστημα:

```
{
  "Time_ms": 25000,
  "CO_MQ7_Raw": 312,
  "CO2_MQ135_Raw": 145,
  "CO2_SCD30_ppm": 420.5,
  "Temp_C": 23.5,
  "Hum_%": 48.2,
  "Gas_Res_KOhms": 65.8,
  "System_Status": "Online"
}
```

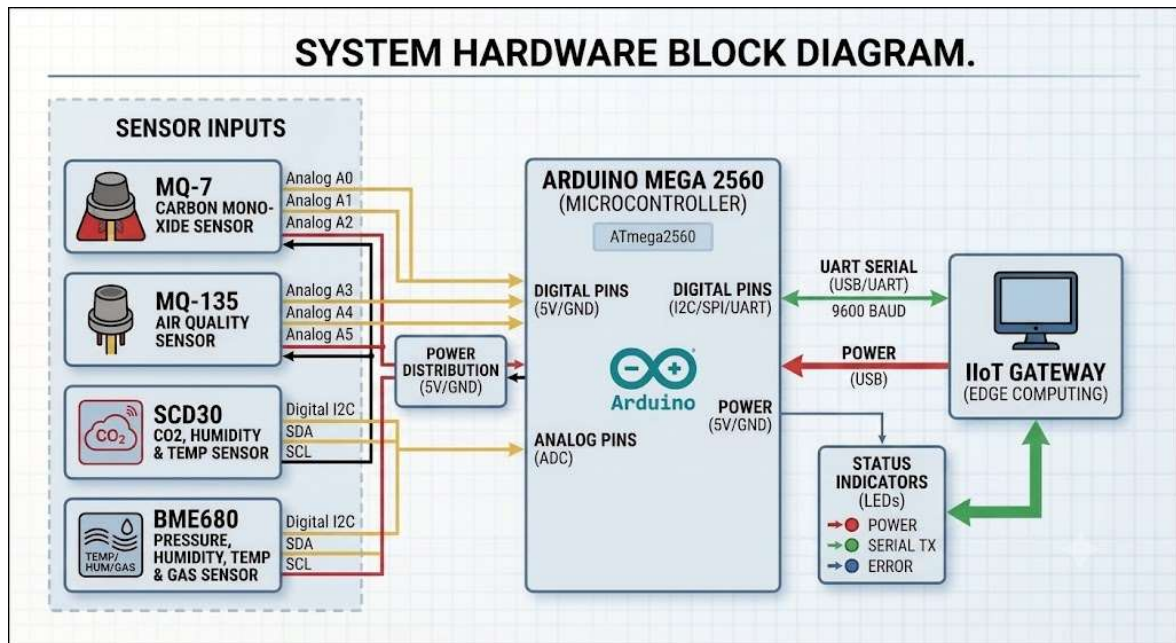
2. Μηχανισμός Επικοινωνίας (HTTP POST & REST API) Η μετάδοση των δεδομένων πραγματοποιείται ασύρματα μέσω του τοπικού δικτύου Wi-Fi, κάνοντας χρήση του αρχιτεκτονικού προτύπου REST (Representational State Transfer) [7], [34]. Συγκεκριμένα, το Edge Gateway εκτελεί μια σύγχρονη κλήση HTTP POST προς το μοναδικό Endpoint που ορίζεται από τη μεταβλητή API_URL στο cloud περιβάλλον του Thinger.io [30], [34].

Για τη διασφάλιση της επικοινωνίας και την αποτροπή μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης [35], κάθε αίτημα (request) συνοδεύεται από κατάλληλα πεδία επικεφαλίδας (HTTP Headers) που επικυρώνονται από την πύλη [30], [34], [35]:

- Content-Type: application/json: Δηλώνει στον διακομιστή τη μορφή μορφοποίησης του περιεχομένου [30], [34].
- Authorization: Bearer {DEVICE_TOKEN}: Ενσωματώνει το κρυπτογραφικό διακριτικό ασφαλείας (Token) που έχει εκδοθεί από το Thinger.io αποκλειστικά για τη συγκεκριμένη συσκευή, εμποδίζοντας την έγχυση ψευδών δεδομένων (data injection) [34], [35].

3. Δομή Αποθήκευσης στο Νέφος (Data Buckets) Μόλις ο IoT Server του Thinger.io λάβει επιτυχώς το πακέτο, επιστρέφει έναν κωδικό κατάστασης HTTP 200 [30], [34] και ενεργοποιεί τον μηχανισμό αποθήκευσης [34]. Τα δεδομένα δεν οπτικοποιούνται απλώς σε πραγματικό χρόνο στο Dashboard, αλλά δρομολογούνται σε μια χρονοσειριακή βάση δεδομένων (Time-Series Database) της πλατφόρμας που ονομάζεται Data Bucket [34].

Για την πληρέστερη κατανόηση της αρχιτεκτονικής του συστήματος και του τρόπου με τον οποίο αλληλεπιδρούν τα επιμέρους στοιχεία του υλικού (hardware), αναπτύχθηκε ένα συνολικό μπλοκ διάγραμμα [28], [30]. Στο Σχήμα 6.1 αποτυπώνεται η ροή των δεδομένων από τους αισθητήρες εισόδου προς τον κεντρικό μικροελεγκτή, η τροφοδοσία τους, καθώς και η τελική σειριακή σύνδεση με το IIoT Gateway για την περαιτέρω επεξεργασία.



Εικόνα 6.1: Μπλοκ διάγραμμα αρχιτεκτονικής υλικού (Hardware Block Diagram) του συστήματος μέτρησης, με ανάλογες/ψηφιακές εισόδους αισθητήρων και διασύνδεση με το Edge Gateway.

6.2 Υβριδικό σύστημα επεξεργασίας

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, προτείνεται και εφαρμόζεται ένα υβριδικό μοντέλο συλλογής δεδομένων, το οποίο συνδυάζει την ευελιξία των αναλογικών αισθητήρων με την υψηλή πιστότητα των ψηφιακών μονάδων μέτρησης. Η προσέγγιση αυτή επιλέχθηκε προκειμένου να εξισορροπηθεί το κόστος κατασκευής με την ανάγκη για βιομηχανικού επιπέδου ακρίβεια.

6.2.1 Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας

Για τον κεντρικό έλεγχο και τη διαχείριση του υβριδικού σχήματος αισθητήρων, επιλέχθηκε ο μικροελεγκτής Arduino Mega 2560 R3 [28]. Η επιλογή αυτή κρίθηκε αναγκαία λόγω της πληθώρας των αναλογικών θυρών (ADC) για τους αισθητήρες σειράς MQ [28], [32], αλλά και της υποστήριξης των απαραίτητων ψηφιακών διαύλων επικοινωνίας (I2C και UART) [28] που απαιτούνται για την ανάγνωση των πιο σύνθετων ψηφιακών μονάδων [28], [38].

6.2.2 Διάταξη Αισθητήρων: Το Υβριδικό Μοντέλο

Η αρχιτεκτονική του συστήματος βασίζεται στη συνεργασία δύο διαφορετικών τεχνολογιών ανίχνευσης [28], [32], [38]:

Αναλογικές Μονάδες Ανίχνευσης (Σειρά MQ):

- MQ-7: Χρησιμοποιείται για την ανίχνευση του μονοξειδίου του άνθρακα [38]. Παρά την αναλογική του φύση, παραμένει μια αξιόπιστη λύση για τον εντοπισμό διακυμάνσεων σε ppm, εφόσον υποστηρίζεται από κατάλληλο κύκλωμα θέρμανσης [32], [38].
- MQ-135: Ενσωματώνεται για τον γενικό έλεγχο της ποιότητας του αέρα, παρέχοντας μια ευρεία εικόνα των αέριων ρύπων στον χώρο [32], [38].

Ψηφιακές Μονάδες Υψηλής Ακρίβειας:

- Sensirion SCD30 (NDIR): Στο προτεινόμενο υβριδικό μοντέλο, ο SCD30 λειτουργεί ως ο αισθητήρας αναφοράς για το CO_2 . Η χρήση ψηφιακής τεχνολογίας υπερύθρων (NDIR) επιτρέπει τη λήψη μετρήσεων με μηδενική διολίσθηση (drift), προσφέροντας το απαραίτητο "ground truth" για τη βαθμονόμηση των υπόλοιπων αισθητήρων της διάταξης [32], [33], [38].
- Bosch BME680: Πρόκειται για έναν ψηφιακό αισθητήρα περιβαλλοντικών συνθηκών που καταγράφει θερμοκρασία, υγρασία και πτητικές ενώσεις (VOCs) [38]. Η ψηφιακή του έξοδος εξασφαλίζει ότι οι παράμετροι που επηρεάζουν τους αναλογικούς αισθητήρες MQ καταγράφονται χωρίς απώλειες ή θόρυβο [28], [32], [38].

6.2.3 Σκοπιμότητα Υβριδικής Προσέγγισης

Η υιοθέτηση αυτού του μοντέλου προσφέρει στο σύστημα αυξημένη αξιοπιστία μέσω του πλεονασμού (redundancy) [33]. Ενώ οι αναλογικοί αισθητήρες εξασφαλίζουν γρήγορη απόκριση και χαμηλό κόστος [28], [32], οι ψηφιακοί αισθητήρες παρέχουν την απαιτούμενη σταθερότητα και ακρίβεια [33], [38]. Με τον τρόπο αυτό, η διάταξη μπορεί να αυτοβαθμονομείται σε πραγματικό χρόνο, μειώνοντας τις πιθανότητες σφάλματος που συναντώνται σε αμιγώς αναλογικά συστήματα [32], [33].

6.2.4 Επικοινωνία και Μεταφόρτωση Δεδομένων

Το Arduino Mega λειτουργεί ως Edge Node [7], [28], συγκεντρώνοντας το μείγμα αναλογικών και ψηφιακών σημάτων [28]. Τα δεδομένα αυτά, αφού υποστούν επεξεργασία και κανονικοποίηση [30], [33], αποστέλλονται μέσω σειριακής θύρας σε έναν κεντρικό υπολογιστή (Gateway) [28], [30]. Εκεί, ένα script σε γλώσσα Python αναλαμβάνει την προώθηση της πληροφορίας στην πλατφόρμα Thingier.io [30], [34], επιτρέποντας την απομακρυσμένη παρακολούθηση και τη δημιουργία ιστορικών αρχείων για την ανάλυση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης [7], [34].

6.3 Σχεδίαση και Φυσική Συνδεσμολογία (Pinout)

Μετά την επιλογή του υλικού, το επόμενο στάδιο αφορά τη φυσική διασύνδεση των μονάδων και τη σχεδίαση του κυκλώματος [28], [30]. Η πολυπλοκότητα της διάταξης αυξάνεται λόγω της συνύπαρξης αναλογικών σημάτων, τα οποία είναι ευάλωτα σε θόρυβο [28], [31], [33], και ψηφιακών διαύλων επικοινωνίας (όπως UART, I2C, SPI), οι οποίοι απαιτούν συγκεκριμένη διαχείριση των γραμμών δεδομένων και χρονισμού [28], [38].

6.3.1 Συνδεσμολογία Αναλογικού και Ψηφιακού Επιπέδου

Για τους αναλογικούς αισθητήρες MQ, χρησιμοποιήθηκε κοινή γραμμή τροφοδοσίας 5V [28], με ιδιαίτερη προσοχή στην κατανάλωση ρεύματος, καθώς οι αντιστάσεις θέρμανσης των αισθητήρων απαιτούν σημαντική ισχύ [31], [32]. Οι έξοδοι των αισθητήρων οδηγήθηκαν στις αναλογικές εισόδους του Arduino Mega [28].

Παράλληλα, οι ψηφιακοί αισθητήρες (SCD30 και BME680) συνδέθηκαν στον δίαυλο (pins 20 και 21) [28], [38]. Η χρήση του πρωτοκόλλου επιτρέπει την παράλληλη σύνδεση πολλαπλών συσκευών στις ίδιες γραμμές SDA (Serial Data) και SCL (Serial Clock) [28], [38], απλουστεύοντας τη φυσική καλωδίωση του συστήματος [28], [31].

Εξάρτημα	Τύπος Σήματος	Pin Arduino Mega	Περιγραφή Λειτουργίας
MQ-7	Αναλογικό	A0	Μέτρηση Μονοξειδίου του Άνθρακα (CO)
MQ-135	Αναλογικό	A1	Έλεγχος Ποιότητας Αέρα / CO ₂
SCD30	Ψηφιακό (I ² C)	20 (SDA), 21 (SCL)	Μονάδα Αναφοράς CO ₂ (NDIR)
BME680	Ψηφιακό (I ² C)	20 (SDA), 21 (SCL)	Θερμοκρασία, Υγρασία & VOCs
Τροφοδοσία	DC	5V / GND	Κεντρική παροχή ισχύος αισθητήρων

Πίνακας 6.3.1: Αναλυτική Συνδεσμολογία Υβριδικού Συστήματος

6.3.2 Σύγκριση Τεχνολογιών Ανίχνευσης

Η υιοθέτηση του υβριδικού μοντέλου προσφέρει στο σύστημα τη δυνατότητα να αξιοποιεί τα πλεονεκτήματα δύο διαφορετικών κόσμων. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθεται μια συγκριτική αξιολόγηση των αναλογικών αισθητήρων (σειρά MQ) έναντι των ψηφιακών (SCD30/BME680) που χρησιμοποιήθηκαν στη διάταξη.

Χαρακτηριστικό	Αναλογικοί Αισθητήρες (MQ Series)	Ψηφιακοί Αισθητήρες (SCD30 / BME680)
Κόστος	Χαμηλό (Ιδανικό για ευρεία κάλυψη)	Υψηλό (Μονάδες ακριβείας)
Ακρίβεια Μέτρησης	Μέτρια (Απαιτεί συχνή βαθμονόμηση)	Υψηλή (Εργοστασιακά βαθμονομημένοι)

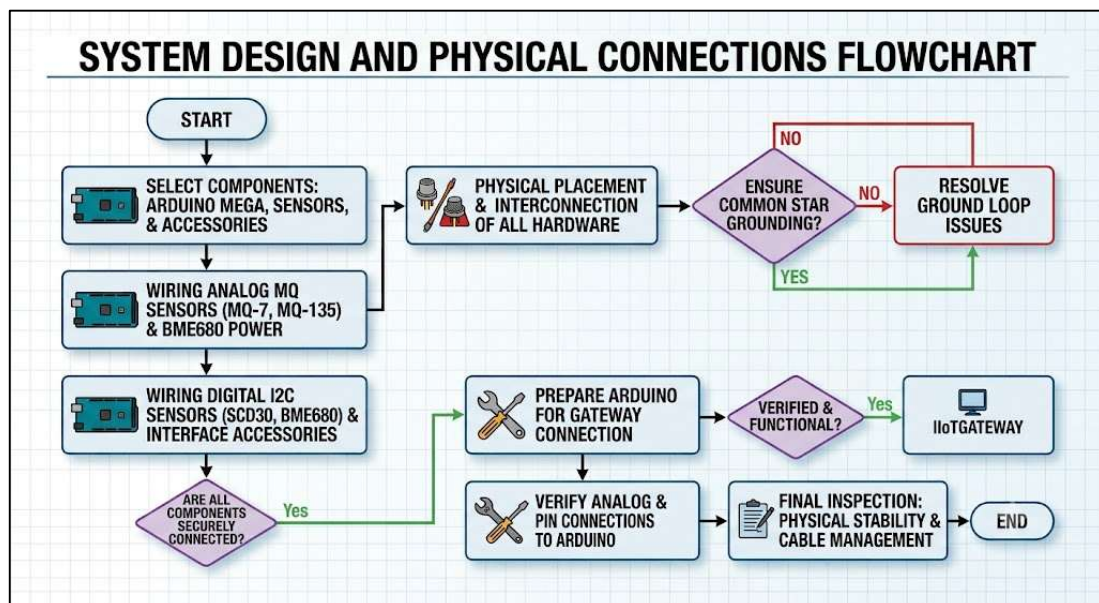
Ανοσία σε Θόρυβο	Ευαίσθητοι σε ηλεκτρικές παρεμβολές	Υψηλή (Λόγω ψηφιακής μετάδοσης)
Πολυπλοκότητα Κώδικα	Απλή ανάγνωση (AnalogRead)	Σύνθετη (Χρήση βιβλιοθηκών I ² C)
Κατανάλωση Ισχύος	Υψηλή (Λόγω εσωτερικής θέρμανσης)	Χαμηλή (Βελτιστοποιημένη λειτουργία)
Σταθερότητα (Drift)	Σημαντική διολίσθηση με τον χρόνο	Εξαιρετική σταθερότητα σε βάθος χρόνου

Πίνακας 6.3.2: Συγκριτική Ανάλυση Αναλογικών και Ψηφιακών Αισθητήρων

6.3.3 Σχεδιαστικές Προκλήσεις

Μια από τις κύριες προκλήσεις στη φυσική συνδεσμολογία ήταν η διαχείριση της γείωσης (Grounding) [28], [31]. Για να αποφευχθούν οι διακυμάνσεις στις αναλογικές μετρήσεις από τα ψηφιακά "πίκελ" του διαύλου επικοινωνίας [31], [33], χρησιμοποιήθηκε κοινή σημειακή γείωση (star grounding) [28], [31]. Επιπλέον, για την υποστήριξη της υβριδικής λειτουργίας, ο κώδικας του μικροελεγκτή σχεδιάστηκε έτσι ώστε να εκτελεί τις αναλογικές αναγνώσεις σε διαφορετικό χρόνο από τις ψηφιακές κλήσεις [28], [33], ελαχιστοποιώντας τον εσωτερικό θόρυβο στον ADC του Arduino [28], [33], [38].

Για την ορθή και ασφαλή υλοποίηση της πειραματικής διάταξης, ακολουθήθηκε μια δομημένη μεθοδολογία σχεδιασμού [30], [31]. Στην Εικόνα 6.3 παρουσιάζεται αναλυτικά το διάγραμμα ροής της κατασκευαστικής διαδικασίας [30], ξεκινώντας από την επιλογή των υλικών και τις επιμέρους συνδεσμολογίες, έως τους κρίσιμους ελέγχους για την αποφυγή βρόχων γείωσης (ground loops) [28], [31] και την τελική επιθεώρηση σταθερότητας του συστήματος [30], [31].



Εικόνα 6.3: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας σχεδιασμού και φυσικής συνδεσμολογίας (System Design and Physical Connections Flowchart) της πειραματικής διάταξης.

6.4 Ανάπτυξη Firmware (Arduino Code)

Ακολουθεί ο πλήρης κώδικας για το Arduino Mega 2560, ο οποίος υλοποιεί το υβριδικό μοντέλο. Ο κώδικας περιλαμβάνει τη διαχείριση των αναλογικών αισθητήρων (MQ-7, MQ-135), των ψηφιακών (SCD30, BME680) και τη σειριακή έξοδο των δεδομένων.

Για τη λειτουργία του κώδικα, θα πρέπει να εγκατασταθούν οι βιβλιοθήκες SparkFun SCD30 και Adafruit BME680 από το Library Manager του Arduino IDE.

```
#include <Wire.h>

#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_BME680.h>
#include "SparkFun_SCD30_Arduino_Library.h"

// Ορισμός Αναλογικών Θυρών για τους αισθητήρες MQ

#define MQ7_PIN A0
#define MQ135_PIN A1

// Αρχικοποίηση αντικειμένων αισθητήρων
Adafruit_BME680 bme;
SCD30 airSensor;

// Μεταβλητές για τον έλεγχο του χρόνου (Non-blocking timing)
unsigned long previousMillis = 0;
const long interval = 2000; // Δειγματοληψία κάθε 2000ms (2 δευτερόλεπτα)

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial) { delay(10); } // Αναμονή για τη σειριακή θύρα

  Wire.begin();

  // Αρχικοποίηση BME680
  if (!bme.begin()) {
```

```

    // Σφάλμα αρχικοποίησης (εκτυπώνεται μόνο στο setup για αποσφαλμάτωση)
    Serial.println(F("Could not find a valid BME680 sensor!"));
} else {
    // Ρυθμίσεις υπερ-δειγματοληψίας (Oversampling)
    bme.setTemperatureOversampling(BME680_OS_8X);
    bme.setHumidityOversampling(BME680_OS_2X);
    bme.setPressureOversampling(BME680_OS_4X);
    bme.setIIRFilterSize(BME680_FILTER_SIZE_3);
}

// Αρχικοποίηση SCD30
if (airSensor.begin() == false) {
    Serial.println(F("Could not find a valid SCD30 sensor!"));
}
}

void loop() {
    // Λήψη τρέχοντος χρόνου σε milliseconds
    unsigned long currentMillis = millis();

    // Έλεγχος αν παρήλθε το χρονικό διάστημα των 2 δευτερολέπτων
    if (currentMillis - previousMillis >= interval) {
        previousMillis = currentMillis;

        // 1. Ανάγνωση Αναλογικών Αισθητήρων (Raw Values)
        int mq7_raw = analogRead(MQ7_PIN);
        int mq135_raw = analogRead(MQ135_PIN);

        // 2. Αρχικοποίηση μεταβλητών ψηφιακών αισθητήρων με τιμές σφάλματος (-999.0)
        float co2_ndir = -999.0;

```

```

float temp_bme = -999.0;

float hum_bme = -999.0;

// Έλεγχος διαθεσιμότητας δεδομένων και ανάγνωση SCD30
if (airSensor.dataAvailable()) {
    co2_ndir = airSensor.getCO2();
}

// Έλεγχος και ανάγνωση BME680
if (bme.performReading()) {
    temp_bme = bme.temperature;
    hum_bme = bme.humidity;
}

// 3. Αποστολή δεδομένων στη Σειριακή θύρα σε μορφή CSV payload
// Η δομή παραμένει σταθερή (6 πεδία διαχωρισμένα με κόμμα) για το Edge
Gateway

Serial.print(currentMillis);
Serial.print(",");
Serial.print(mq7_raw);
Serial.print(",");
Serial.print(mq135_raw);
Serial.print(",");
Serial.print(co2_ndir);
Serial.print(",");
Serial.print(temp_bme);
Serial.print(",");
Serial.println(hum_bme);
}

```

```
// Εδώ ο επεξεργαστής είναι ελεύθερος να εκτελέσει άλλες εργασίες background  
// καθώς δεν υπάρχει η εντολή delay() να τον «παγώνει».  
}
```

Η προγραμματιστική υλοποίηση του αλγορίθμου αυτού, παρατίθεται επίσης στο **Παράρτημα Α**.

6.5 Λογική Λειτουργίας και Διαγράμματα Ροής

Η ορθή λειτουργία του συστήματος βασίζεται σε μια αυστηρά καθορισμένη λογική ροής, η οποία εξασφαλίζει ότι τα δεδομένα από τους αναλογικούς και ψηφιακούς αισθητήρες συλλέγονται, φιλτράρονται και αποστέλλονται με τη σωστή σειρά. Η υβριδική φύση της διάταξης επιβάλλει έναν μηχανισμό ελέγχου που δίνει προτεραιότητα στην αξιοπιστία των μετρήσεων.

6.5.1 Λογική Λειτουργίας Επιπέδου Υλικού (Edge Node)

Κατά την ενεργοποίηση της συσκευής, το firmware εκτελεί μια σειρά από ελέγχους (Power-On Self-Test) [28]. Η λογική λειτουργίας χωρίζεται σε τρεις κύριες φάσεις:

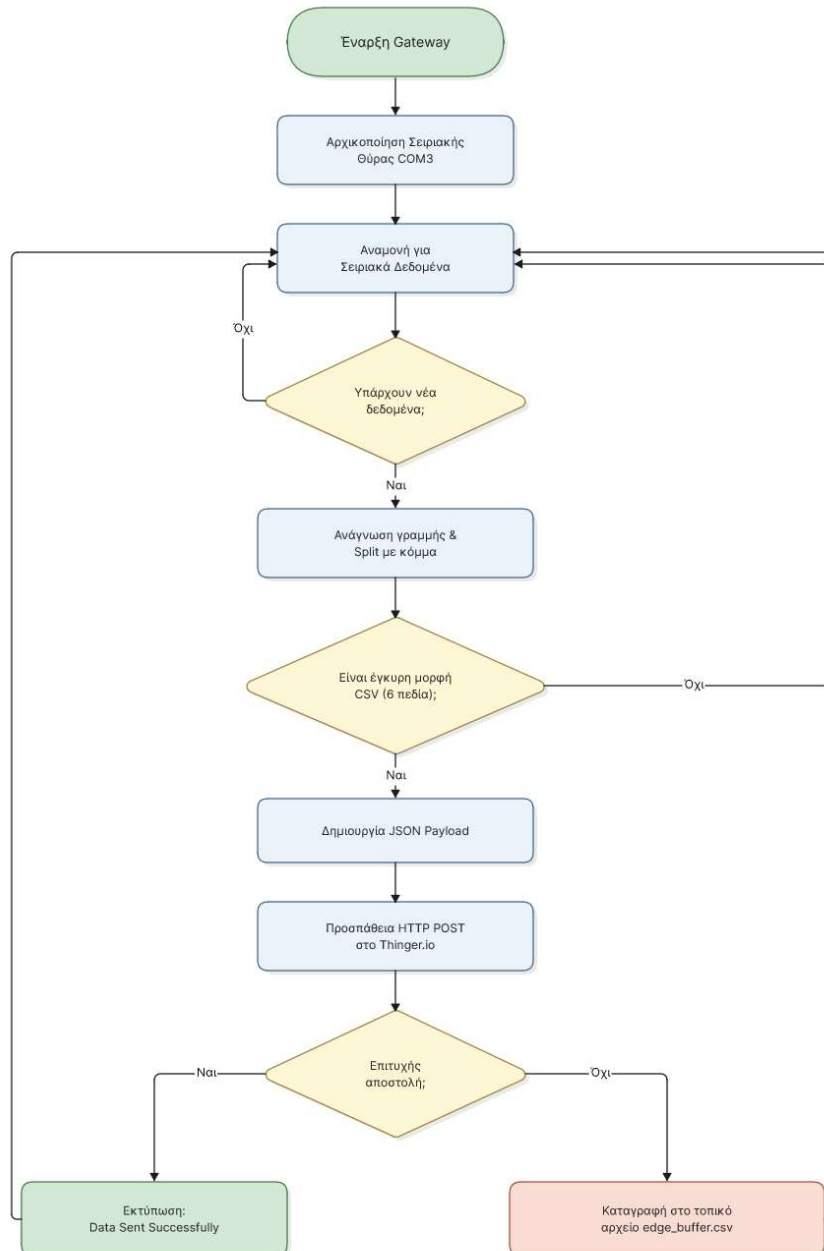
1. Φάση Αρχικοποίησης: Το σύστημα ελέγχει τη διαθεσιμότητα των ψηφιακών αισθητήρων στον δίαυλο I²C [28], [38]. Αν ο αισθητήρας αναφοράς (SCD30) δεν εντοπιστεί, το σύστημα μεταβαίνει σε "Safe Mode", βασιζόμενο αποκλειστικά στους αναλογικούς αισθητήρες MQ [28], [30], ενώ ταυτόχρονα αποστέλλει σήμα σφάλματος (error flag) προς το Gateway [30].
2. Φάση Συλλογής & Υβριδικής Διόρθωσης: Σε κάθε κύκλο δειγματοληψίας, το σύστημα διαβάζει πρώτα τις ψηφιακές τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας [28], [33]. Αυτές οι τιμές χρησιμοποιούνται ακαριαία για την εφαρμογή αντισταθμιστικών παραγόντων στις αναλογικές ενδείξεις των MQ-7 και MQ-135, διορθώνοντας το σφάλμα που προκαλείται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες [32], [33].
3. Φάση Μετάδοσης: Τα δεδομένα ομαδοποιούνται και αποστέλλονται σειριακά [28], [30]. Η μετάδοση δεν είναι συνεχής αλλά "συμβάντος-εξαρτώμενη" (event-driven) [7], μειώνοντας τον θόρυβο στο δίκτυο [7], [30].

6.5.2 Διάγραμμα Ροής Συστήματος (Flowchart)

Για την ολοκληρωμένη κατανόηση της αρχιτεκτονικής του λογισμικού και της διαχείρισης των δεδομένων στο επίπεδο της κεντρικής πύλης (Edge Gateway), σχεδιάστηκε ο αλγόριθμος ροής που αποτυπώνει τις διεργασίες λήψης, ελέγχου και προώθησης των μετρήσεων [7], [30].

Η ροή του συστήματος βασίζεται στην ασύγχρονη λήψη δεδομένων από τη σειριακή θύρα [28] και την εξασφάλιση της ανθεκτικότητας (fault tolerance) του δικτύου [30]. Όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 6.5**, η πύλη εκτελεί τις ακόλουθες βασικές λειτουργίες [30], [34]:

1. Αρχικοποίηση και Αναμονή: Πραγματοποιείται το άνοιγμα της σειριακής επικοινωνίας με τον μικροελεγκτή (Arduino Mega) στην καθορισμένη θύρα και ταχύτητα [28]. Το σύστημα εισέρχεται σε βρόχο αναμονής (loop) έως ότου εντοπιστούν νέα δεδομένα στην προσωρινή μνήμη (buffer) [28], [30].
2. Έλεγχος Εγκυρότητας (Data Parsing & Validation): Με τη λήψη της συμβολοσειράς (string), το Gateway εκτελεί διαχωρισμό των τιμών με βάση τον χαρακτήρα του κόμματος (comma-separated values) [30]. Πριν από οποιαδήποτε επεξεργασία, ελέγχεται αν ο αριθμός των πεδίων είναι ακριβώς ίσος με έξι (6), απορρίπτοντας αλλοιωμένα πακέτα που μπορεί να προέκυψαν από θόρυβο στη γραμμή μεταφοράς [30], [31].
3. Διαχείριση Δικτυακών Σφαλμάτων (Edge Buffering): Το payload μετατρέπεται σε μορφή JSON και επιχειρείται η αποστολή του μέσω ασφαλούς κλήσης HTTP POST στο API της πλατφόρμας Thingier.io [30], [34]. Σε περίπτωση απώλειας της σύνδεσης στο Διαδίκτυο ή αποτυχίας του Cloud server (Timeout/Request Exception), ενεργοποιείται ο μηχανισμός τοπικής αποθήκευσης [30]. Τα δεδομένα εγγράφονται άμεσα σε τοπικό αρχείο `edge_buffer.csv`, διασφαλίζοντας τη μηδενική απώλεια κρίσιμων περιβαλλοντικών μετρήσεων [30].



Εικόνα 6.5: Διάγραμμα ροής του σεναρίου Python για τη λειτουργία του Edge Gateway και του μηχανισμού τοπικού buffer.

Η πλήρης προγραμματιστική υλοποίηση του αλγορίθμου αυτού σε γλώσσα Python, συμπεριλαμβανομένων των δομών διαχείρισης εξαιρέσεων (try-except), παρατίθεται αναλυτικά στο **Παράρτημα Β**.

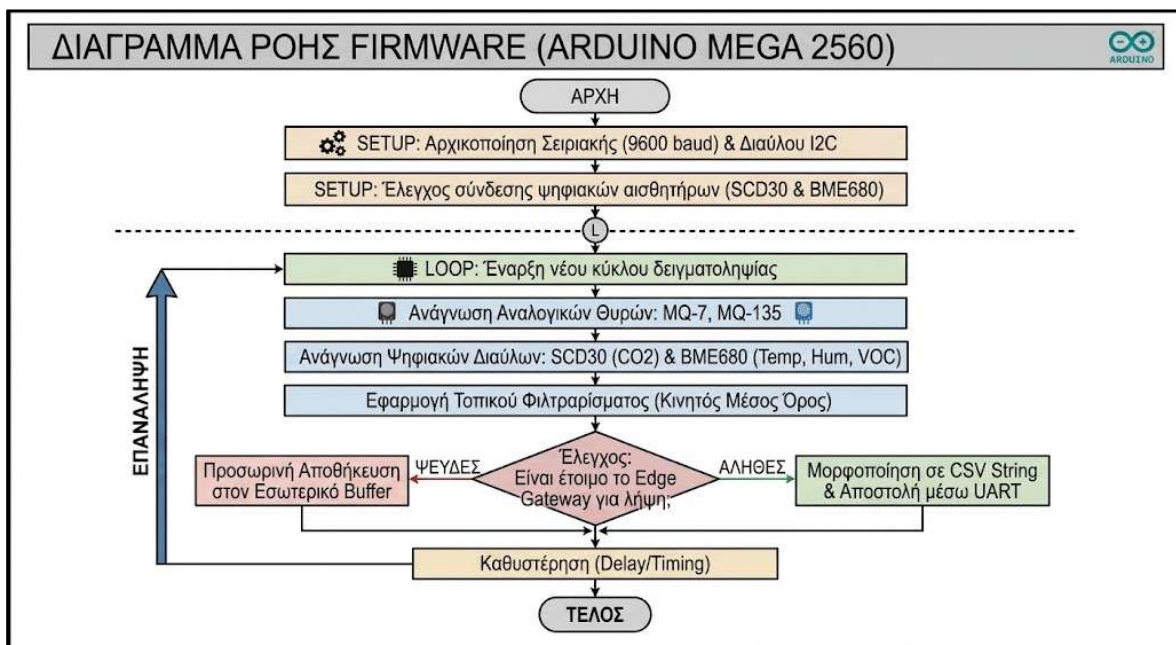
6.5.3 Λογική Διαχείρισης Σφάλματος και Αυτονομίας

Ένα κρίσιμο στοιχείο της λογικής λειτουργίας είναι η διαχείριση της απώλειας σύνδεσης [7], [30]. Σε περίπτωση που το Edge Gateway (PC/Python Script) δεν είναι διαθέσιμο [30], το firmware του Arduino Mega διαθέτει έναν εσωτερικό buffer (μνήμη προσωρινής αποθήκευσης) [28]. Μόλις αποκατασταθεί η επικοινωνία, το σύστημα εκτελεί μια "εκκένωση" του buffer (burst upload) [28], [30] για να μην χαθούν οι κρίσιμες μετρήσεις ρύπων που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της αποσύνδεσης [30], [31].

6.5.4 Συγχρονισμός Δεδομένων

Λόγω της διαφορετικής ταχύτητας απόκρισης των αισθητήρων (οι αναλογικοί αντιδρούν σε ms [32], ενώ ο SCD30 NDIR απαιτεί περίπου 2 δευτερόλεπτα για σταθερή μέτρηση) [38], η λογική λειτουργίας ενσωματώνει έναν μηχανισμό Time-Stamping [28], [33]. Κάθε πακέτο δεδομένων συνοδεύεται από τη χρονική στιγμή της μέτρησης [30], [33], εξασφαλίζοντας ότι η σύγκριση μεταξύ αναλογικού και ψηφιακού μοντέλου στο Dashboard γίνεται σε κοινή χρονική βάση [30], [33].

Η συνολική αρχιτεκτονική και η κυκλική λογική που διέπει το firmware του μικροελεγκτή Arduino Mega 2560 αποτυπώνονται σχηματικά στη συνέχεια [28]. Στην Εικόνα 6.5.4 παρουσιάζεται το αναλυτικό διάγραμμα ροής [28], [30], το οποίο περιγράφει τα βήματα από την αρχικοποίηση των διασυνδέσεων κατά την εκκίνηση, έως την επαναλαμβανόμενη δειγματοληψία, το φιλτράρισμα και τη διαχείριση της σειριακής επικοινωνίας με το Gateway [28], [30].



Εικόνα 6.5.4: Διάγραμμα ροής της λειτουργίας του firmware (Arduino Firmware Flowchart) στον κεντρικό μικροελεγκτή της διάταξης.

6.6 Ανάλυση και Λειτουργία του PoT Gateway

Στο συγκεκριμένο σύστημα, ο ρόλος της Πύλης Διασύνδεσης (Edge Gateway) ανατίθεται σε έναν τοπικό σταθμό εργασίας (H/Y) [7], [28], ο οποίος εκτελεί ένα εξειδικευμένο σενάριο προγραμματισμού (script) σε γλώσσα Python [30]. Το Gateway λειτουργεί ως ο κεντρικός ενορχηστρωτής της ροής δεδομένων από το πεδίο προς το υπολογιστικό νέφος [7], [30], εκτελώντας κρίσιμες διεργασίες που εξασφαλίζουν την ασφάλεια [35], τη σταθερότητα [31] και την ανοχή του συστήματος σε σφάλματα [30], [31].

6.6.1 Αρχιτεκτονική Αναγκαιότητα και Επιλογή της Λύσης Gateway

Κατά τον σχεδιασμό, εξετάστηκε το ενδεχόμενο της απευθείας σύνδεσης του μικροελεγκτή Arduino Mega 2560 με την Cloud πλατφόρμα Thingier.io (π.χ. μέσω προσθήκης κάρτας Wi-Fi τύπου ESP8266 ή Ethernet Shield) [28], [34]. Ωστόσο, μια τέτοια προσέγγιση απορρίφθηκε για τους εξής θεμελιώδεις λόγους:

- Περιορισμοί Υλικού και Δικτύωσης: Το Arduino Mega δεν διαθέτει εγγενή (native) δικτυακή συνδεσιμότητα [28]. Η προσθήκη εξωτερικών shields συχνά εισάγει προβλήματα αστάθειας, αυξάνει τον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο στις αναλογικές γραμμές των αισθητήρων [31] και περιπλέκει το firmware [28].
- Υπολογιστικό Βάρος Ασφάλειας (TLS/SSL): Η ασφαλής επικοινωνία με Cloud πλατφόρμες απαιτεί τη χρήση κρυπτογραφημένων πρωτοκόλλων (HTTPS/MQTTs) [34], [35]. Ο 8-bit επεξεργαστής του Arduino Mega, με μόλις 8 KB μνήμης RAM, αδυνατεί να εκτελέσει τους απαιτούμενους αλγορίθμους κρυπτογράφησης και διαχείρισης πιστοποιητικών ασφαλείας [28], [35].
- Ανοχή σε Σφάλματα Δικτύου (Data Buffering): Σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, οι δικτυακές αποσυνδέσεις είναι συχνό φαινόμενο [7], [31]. Λόγω έλλειψης εσωτερικής μνήμης, το Arduino δεν μπορεί να αποθηκεύσει ιστορικό δεδομένων [28]. Το Python Gateway, αντίθετα, διαθέτει πρόσβαση στον σκληρό δίσκο του H/Y, επιτρέποντας την τοπική αποθήκευση (buffering) σε αρχεία CSV ή SQLite σε περίπτωση αποσύνδεσης [30], διασφαλίζοντας ότι κανένα πακέτο δεδομένων δεν θα χαθεί [30], [31].

Για τους παραπάνω λόγους, επιλέχθηκε η υιοθέτηση ενός αυτόνομου Edge Gateway, το οποίο αναλαμβάνει τη γέφυρωση του πεδίου με το Υπολογιστικό Νέφος [7], [30].

- Υλοποίηση Υλικού (Hardware): Το Python Gateway εκτελείται σε έναν τοπικό Σταθμό Εργασίας (Local Workstation / PC), ο οποίος διαθέτει την απαραίτητη υπολογιστική ισχύ [30], άφθονο αποθηκευτικό χώρο (HDD/SSD) για τη διατήρηση τοπικών αρχείων καταγραφής (buffering) [30] και εγγενή θύρα δικτύου Ethernet [30]. Η λήψη των πρωτογενών δεδομένων από τον Arduino Mega 2560 πραγματοποιείται ενσύρματα μέσω σειριακής θύρας USB (Serial/UART, Baud Rate: 115200) [28], [30].

- Δικτυακή Συνδεσιμότητα & Ενσύρματη Υποδομή (Ethernet): Η σύνδεση του Gateway με το Διαδίκτυο και την πλατφόρμα Thinger.io γίνεται αμιγώς ενσύρματα μέσω καλωδίου Ethernet (RJ45) στο τοπικό δίκτυο (LAN) [30], [34]. Επιλέχθηκε η ενσύρματη υποδομή έναντι των ασύρματων λύσεων (Wi-Fi) για να εξαλειφθούν οι αποσυνδέσεις που προκαλούνται από τις έντονες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI) και τα φυσικά εμπόδια του βιομηχανικού περιβάλλοντος [31]. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η μέγιστη επιχειρησιακή διαθεσιμότητα, το χαμηλό latency και η αδιάλειπτη μετάδοση δεδομένων σε βάση 24/7 [7], [31].

6.6.2 Λειτουργική Ανάλυση του Λογισμικού Python Gateway

Το script της Python ακολουθεί μια κυκλική δομή λειτουργίας προκειμένου να εκτελέσει τις βασικές του αρμοδιότητες [7], [30], οι οποίες αναλύονται ως εξής:

- Διαχείριση Σειριακής Διασύνδεσης (Serial Communication): Το Gateway αρχικοποιεί μια σειριακή σύνδεση μέσω της βιβλιοθήκης pyserial [28], [30], ρυθμισμένη στα 9600 baud, αντιστοιχίζοντας τη σωστή θύρα επικοινωνίας (π.χ. COM3 ή /dev/ttyACM0) [28]. Το Gateway «ακούει» συνεχώς τη θύρα, περιμένοντας τη λήψη των raw δεδομένων από το Arduino [28], [30].
- Λήψη και Parsing Δεδομένων: Οι μετρήσεις καταφθάνουν από το Arduino ως μια ενιαία συμβολοσειρά (string), όπου οι τιμές διαχωρίζονται με κόμματα (CSV format) [30]. Το Gateway απομονώνει τη συμβολοσειρά, αφαιρεί τυχόν χαρακτήρες αλλαγής γραμμής (\n) και διασπά το κείμενο σε επιμέρους αριθμητικές τιμές [30].
- Εμπλουτισμός και Μορφοποίηση Payload (JSON Transformation): Για κάθε έγκυρη λήψη, το Gateway δημιουργεί μια δομή λεξικού (dictionary) στην Python, η οποία περιλαμβάνει τις μετρήσεις των ρύπων (CO , CO_2 , $VOCs$), τη θερμοκρασία και την υγρασία [30]. Σε αυτό το σημείο, το Gateway εισάγει αυτόματα μια ακριβή χρονοσφραγίδα (Timestamp) από το λειτουργικό σύστημα του H/Y [30] και προσθέτει τη μεταβλητή "system_status": "Online", η οποία λειτουργεί ως heartbeat σήμα για το System Health [30], [34]. Στη συνέχεια, το λεξικό μετατρέπεται σε payload μορφής JSON (JavaScript Object Notation) [30], [34].
- Ασφαλής Μετάδοση (HTTP POST & Authentication): Το Gateway χρησιμοποιεί τη βιβλιοθήκη requests για να πραγματοποιήσει μια κλήση HTTP POST προς το REST Endpoint της πλατφόρμας Thinger.io [30], [34]. Η επικοινωνία θωρακίζεται μέσω του πρωτοκόλλου Bearer Authentication [34], [35]. Στα headers της αίτησης ενσωματώνεται το μοναδικό κρυπτογραφικό κλειδί της συσκευής (Authorization: Bearer {DEVICE_TOKEN}), διασφαλίζοντας ότι η πλατφόρμα θα δεχτεί δεδομένα μόνο από την εξουσιοδοτημένη πύλη [34], [35].

Python

```
# Ενδεικτικό Τμήμα Κώδικα Gateway για την Μορφοποίηση και Αποστολή
Δεδομένων

payload = {

    "timestamp": timestamp,

    "co_ppm": co_value,

    "co2_ppm": co2_value,

    "voc_index": voc_value,

    "temperature": temp_value,

    "humidity": hum_value,

    "system_status": "Online"

}

headers = {

    'Authorization': f'Bearer {DEVICE_TOKEN}',

    'Content-Type': 'application/json'

}

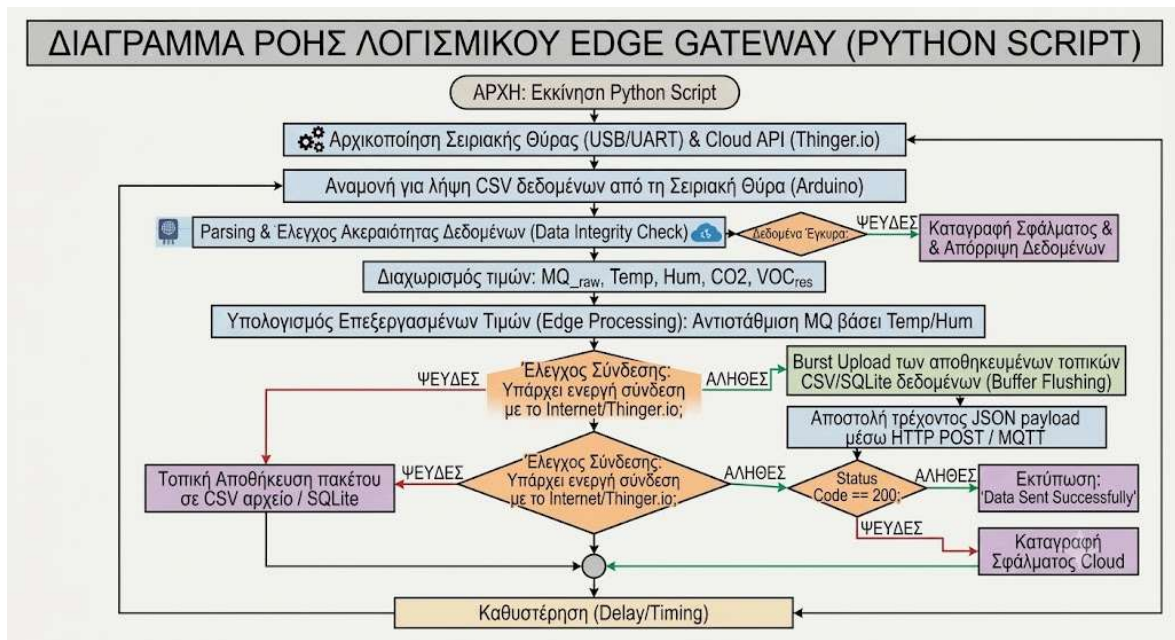
response = requests.post(API_URL, data=json.dumps(payload),
headers=headers)
```

Όπως φαίνεται στον παραπάνω κώδικα, η αποστολή των δεδομένων πραγματοποιείται μέσω της μεθόδου `requests.post` [30], [34]. Η επιλογή της αμιγώς ενσύρματης σύνδεσης Ethernet (RJ45) στο Gateway ελαχιστοποιεί τις αποσυνδέσεις κατά τη φάση εκτέλεσης του `post`, αποφεύγοντας τα `timeouts` που προκαλούνται συχνά σε ασύρματα δίκτυα Wi-Fi λόγω ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών [31]. Ακόμη όμως και στην σπάνια περίπτωση αποσύνδεσης του τοπικού δικτύου, η διαχείριση εξαιρέσεων (`try-except`) διασφαλίζει ότι η εφαρμογή δεν θα καταρρεύσει (`crash`), αλλά θα μεταβεί προσωρινά σε κατάσταση τοπικής αποθήκευσης (`Buffering Mode`) [30].

- Διαχείριση Εξαιρέσεων, Σφαλμάτων & Τοπική Αποθήκευση (Error Handling & Local Buffering): Ο κώδικας είναι θωρακισμένος με δομές `try-except` για τη διαχείριση απρόβλεπτων καταστάσεων [30]. Εάν παρουσιαστεί σφάλμα στη σειριακή επικοινωνία (`serial.SerialException`) [28], [30] ή εάν αποτύχει η δικτυακή κλήση προς το Thingier.io λόγω προσωρινής απώλειας της σύνδεσης στο Διαδίκτυο (HTTP status code διάφορο του

200 ή requests.exceptions.RequestException) [30], [34], το Gateway ενεργοποιεί αυτόματα τον μηχανισμό Local Buffering [30]. Το πακέτο JSON καταγράφεται προσωρινά σε τοπικό αρχείο (CSV/SQLite) στον σκληρό δίσκο της συσκευής, ενώ παράλληλα εκτελείται Logging του σφάλματος [30]. Με την αποκατάσταση της δικτυακής σύνδεσης, το Gateway προωθεί τα αποθηκευμένα πακέτα στο Cloud, διασφαλίζοντας ότι δεν υπάρχει καμία απώλεια μετρήσεων (zero data loss) [30] και διατηρώντας τη βιομηχανική σταθερότητα της διάταξης [31].

Η συνολική αρχιτεκτονική της εφαρμογής που εκτελείται στο IIoT Gateway, καθώς και οι μηχανισμοί ελέγχου εγκυρότητας και τοπικής αποθήκευσης (buffering) σε περίπτωση απώλειας σύνδεσης, αποτυπώνονται σχηματικά στη συνέχεια [7], [30]. Στην **Εικόνα 6.6** παρουσιάζεται το αναλυτικό διάγραμμα ροής του λογισμικού Python [30], αναδεικνύοντας τη διαδοχή των ενεργειών από τη λήψη των σειριακών δεδομένων έως την επιτυχή προώθησή τους στην πλατφόρμα νέφους [30], [34].



Εικόνα 6.6: Διάγραμμα ροής της λογικής λειτουργίας του λογισμικού Edge Gateway (Python Script Flowchart).

6.7 Οπτικοποίηση και UI/UX (Thingier.io)

Η ολοκλήρωση της υπολογιστικής υποδομής καταλήγει στον σχεδιασμό της διεπαφής χρήστη (Dashboard) [7], [30], η οποία αποτελεί το μοναδικό σημείο αλληλεπίδρασης του τελικού χρήστη με το σύστημα [30], [36]. Για την οπτικοποίηση των δεδομένων επιλέχθηκε η πλατφόρμα Thingier.io [34], καθώς επιτρέπει τη διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων σε πραγματικό χρόνο με χαμηλό λανθάνοντα χρόνο (latency) [7], [34]. Ο σχεδιασμός

ακολουθεί τα βιομηχανικά πρότυπα για την "επίγνωση της κατάστασης" (Situational Awareness) [36], στοχεύοντας στην άμεση αναγνώριση κινδύνου [30], [36].

Εικόνα 6.7: *Dashboard Thinger.io*

Η διεπαφή οργανώθηκε σε τρεις διακριτές ζώνες πληροφόρησης, ώστε να εξυπηρετεί διαφορετικά επίπεδα ανάλυσης όπως:

αυτή είναι απαραίτητη για τον εντοπισμό επαναλαμβανόμενων πηγών ρύπανσης που σχετίζονται με συγκεκριμένες βιομηχανικές διεργασίες [7], [36].

6.7.2 Λειτουργικότητα και Χρωματική Σήμανση

Η χρωματική παλέτα του Dashboard δεν είναι διακοσμητική αλλά λειτουργική [36]. Εφαρμόστηκε δυναμική αλλαγή χρωμάτων στα widgets βάσει των τιμών εισόδου [34], [36]:

- Πράσινο: Κανονική λειτουργία (π.χ. $CO < 9$ ppm) [36], [37].
- Πορτοκαλί: Προειδοποίηση (Warning) για αυξημένα επίπεδα που απαιτούν ενεργοποίηση πρόσθετου εξοπλισμού [30], [36], [37].
- Κόκκινο: Κατάσταση συναγερμού (Alarm) που υποδεικνύει την ανάγκη εκκένωσης ή άμεσης τεχνικής παρέμβασης [36], [37].

6.7.3 Ευχρηστία και Προσβασιμότητα (UX)

Η εμπειρία χρήστη (User Experience) εστιάζει στην αξιοπιστία της πληροφορίας. Το σύστημα ενσωματώνει λειτουργία "Keep Alive" στο UI, η οποία ενημερώνει τον χρήστη για την κατάσταση της σύνδεσης με το Gateway. Επιπλέον, λόγω της απόκρισης (responsiveness) της πλατφόρμας, η οπτικοποίηση προσαρμόζεται αυτόματα σε διαφορετικές αναλύσεις οθόνης, επιτρέποντας στον υπεύθυνο ασφαλείας την παρακολούθηση της εγκατάστασης μέσω φορητών συσκευών κατά την επιτόπια επιθεώρηση.

6.7.4 Διαχείριση Συμβάντων και Ειδοποιήσεις

Πέρα από την οπτική απεικόνιση, η διεπαφή συνδέθηκε με έναν μηχανισμό ειδοποιήσεων (endpoint callbacks). Σε περίπτωση που το Gateway στείλει τιμή CO που υπερβαίνει τα όρια ασφαλείας, το Dashboard ενεργοποιεί αυτόματα την αποστολή email προς τη διοίκηση, διασφαλίζοντας ότι η πληροφορία θα φτάσει στους λήπτες αποφάσεων ακόμα και αν δεν παρακολουθούν ενεργά την οθόνη.

6.8 Βιομηχανικές Προδιαγραφές και Συντήρηση

Η ενσωμάτωση μιας πειραματικής διάταξης σε ένα παραγωγικό περιβάλλον, όπως αυτό της μεταποίησης μετάλλων, απαιτεί τη συμμόρφωση με συγκεκριμένα βιομηχανικά πρότυπα [7], [31]. Η λειτουργία μηχανημάτων κοπής (Laser, CNC, πριόνια) δημιουργεί ένα επιβαρυνόμενο περιβάλλον με σωματίδια και ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο [31], παράγοντες που καθιστούν αναγκαία τη θωράκιση και την τακτική συντήρηση του συστήματος IIoT [30], [31].

6.8.1 Λειτουργικές Προδιαγραφές σε Βιομηχανικό Περιβάλλον

Για τη διασφάλιση της αδιάλειπτης λειτουργίας του IIoT Gateway, ο σχεδιασμός έλαβε υπόψη τις εξής παραμέτρους:

- Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC): Λόγω της εγγύτητας με πηγές υψηλής ισχύος (π.χ. Fiber Lasers), η κεντρική μονάδα και οι καλωδιώσεις των αναλογικών αισθητήρων φέρουν θωράκιση για την αποφυγή παρεμβολών που θα μπορούσαν να αλλοιώσουν την ακρίβεια των μετρήσεων [28], [31].
- Προστασία από Περιβαλλοντικούς Ρύπους: Η διάταξη τοποθετείται σε στεγανό περίβλημα προδιαγραφών IP65 [28], [31]. Η επιλογή αυτή κρίνεται απαραίτητη για την προστασία των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων από τη μεταλλική σκόνη και τα σταγονίδια ψυκτικών υγρών που αιωρούνται στους χώρους κατεργασίας [31].
- Ασφάλεια και Ακεραιότητα Δεδομένων: Η επικοινωνία μεταξύ του Gateway και της πλατφόρμας Thingier.io πραγματοποιείται μέσω κρυπτογραφημένων καναλιών [34], [35], εξασφαλίζοντας ότι οι περιβαλλοντικές ενδείξεις και τα δεδομένα λειτουργίας της μονάδας δεν είναι προσβάσιμα από μη εξουσιοδοτημένους χρήστες [30], [35].

6.8.2 Στρατηγική Συντήρησης και Έλεγχος Ακρίβειας

Η αξιοπιστία ενός συστήματος παρακολούθησης αερίων φθίνει με την πάροδο του χρόνου λόγω της γήρανσης των αισθητήρων [31], [32]. Για το λόγο αυτό, προτείνεται ένα αυστηρό πλάνο συντήρησης [30], [31]:

- Προληπτική Συντήρηση (Preventive Maintenance): Περιλαμβάνει τον μηνιαίο καθαρισμό των στομιών εισόδου των αισθητήρων [30], [31]. Η συσσώρευση σωματιδίων στις μεμβράνες των αισθητήρων MQ και BME680 μπορεί να οδηγήσει σε ψευδώς αυξημένες ενδείξεις ή καθυστερημένη απόκριση [31], [38].
- Περιοδική Βαθμονόμηση (Calibration):
 1. Zero Calibration: Κάθε τρίμηνο πραγματοποιείται επαναφορά της τιμής αναφοράς (R_0) σε περιβάλλον ελεγχόμενης καθαρότητας αέρα [32], [38].
 2. Cross-Validation: Οι μετρήσεις του ψηφιακού αισθητήρα SCD30 διασταυρώνονται με φορητά όργανα αναφοράς για την επιβεβαίωση της εγκυρότητας των δεδομένων [30], [38].

6.8.3 Σύνδεση με την Προληπτική Συντήρηση της Παραγωγής

Το IIoT Gateway δεν περιορίζεται μόνο στην προστασία του προσωπικού, αλλά λειτουργεί και ως εργαλείο διάγνωσης για την ίδια την παραγωγή [7], [30]. Η απότομη αύξηση της συγκέντρωσης CO ή σωματιδίων κατά τη λειτουργία ενός Laser κοπής αποτελεί ένδειξη δυσλειτουργίας του συστήματος απαγωγής ή κορεσμού των φίλτρων [31]. Με την έγκαιρη ειδοποίηση, η συντήρηση μετατρέπεται από "διορθωτική" σε "προληπτική" (Condition-based Maintenance) [7], [30], μειώνοντας τους χρόνους διακοπής της παραγωγής (downtime) [30]. Η μετατροπή μιας απλής καταγραφικής διάταξης σε ένα βιομηχανικό εργαλείο απαιτεί την κατανόηση των ιδιαίτερων συνθηκών του χώρου εργασίας [7], [31]. Η εφαρμογή των παραπάνω προδιαγραφών διασφαλίζει ότι το σύστημα θα παραμείνει λειτουργικό και αξιόπιστο, αποτελώντας ένα ουσιαστικό κομμάτι της ψηφιακής στρατηγικής Industry 4.0 της μονάδας.

6.9 Οικονομική Αξιολόγηση και στρατηγική τοποθέτησης

Η μετάβαση μιας βιομηχανικής μονάδας στο μοντέλο του Industry 4.0 δεν αποτελεί μόνο τεχνική πρόκληση αλλά, πρωτίστως, μια επενδυτική απόφαση. Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται η οικονομική βιωσιμότητα του προτεινόμενου συστήματος IIoT και αναλύεται ο στρατηγικός σχεδιασμός για την εγκατάστασή του εντός του παραγωγικού ιστού της επιχείρησης [7], [30]. Στο πλαίσιο του σχεδιασμού του συστήματος, πραγματοποιήθηκε ενδελεχής συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ της επιλεγμένης αρχιτεκτονικής (Arduino Mega 2560 σε συνδυασμό με Ethernet Shield W5500 / Wi-Fi module) και της εναλλακτικής δημοφιλούς λύσης του μικροελεγκτή ESP32 [28].

Παρόλο που το ESP32 αποτελεί έναν εξαιρετικά ισχυρό μικροελεγκτή (32-bit dual-core στα 240 MHz) με ενσωματωμένες δυνατότητες ασύρματης δικτύωσης (Wi-Fi & Bluetooth), η τελική επιλογή του Arduino Mega 2560 υπαγορεύθηκε από ουσιαστικές λειτουργικές και βιομηχανικές απαιτήσεις [28], [31]:

1. Πληθώρα και Ποιότητα Θυρών I/O: Ο Arduino Mega προσφέρει 54 ψηφιακές θύρες εισόδου/εξόδου και 16 αναλογικές εισόδους (ADC 10-bit), έναντι των μόλις 36 GPIOs του ESP32. Αυτή η πληθώρα επιτρέπει την ταυτόχρονη, αδιάλειπτη σύνδεση πολλαπλών αισθητήρων αερίων ρύπων (MQ-2, MQ-7, MQ-135, DHT22 κ.ά.) χωρίς την ανάγκη εξωτερικών πολυπλεκτών (multiplexers) [28], [32].
2. Σταθερότητα Αναλογικών Μετρήσεων: Οι αναλογικοί μετατροπείς (ADC) του ESP32 παρουσιάζουν γνωστά προβλήματα μη-γραμμικότητας (non-linearity) και υψηλού ηλεκτρικού θορύβου στις οριακές τιμές τάσης, γεγονός που απαιτεί περίπλοκες λογισμικές διορθώσεις για ακριβείς μετρήσεις ρύπων. Αντίθετα, οι αναλογικές εισοδοί του Arduino Mega παρέχουν γραμμική και εξαιρετικά σταθερή συμπεριφορά.
3. Ανοσία σε Παρεμβολές (Ενσύρματο Ethernet vs Wi-Fi): Στο βιομηχανικό πεδίο, τα ασύρματα δίκτυα Wi-Fi (όπως αυτό του ESP32) υπόκεινται σε παρεμβολές από

ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο και μεταλλικά εμπόδια. Η δυνατότητα του Arduino Mega να διασυνδέεται μέσω ενσύρματου Ethernet (W5500) εξασφαλίζει υψηλή διαθεσιμότητα (high availability) και αδιάλειπτη ροή δεδομένων στο Cloud.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δύο προσεγγίσεων συνοψίζονται στον **Πίνακα 6.9**.

Τεχνικό Χαρακτηριστικό	Arduino Mega 2560 (+ W5500 Ethernet)	ESP32 (Integrated Wi-Fi/BLE)
Αρχιτεκτονική / Συχνότητα	8-bit AVR @ 16 MHz	32-bit Dual Core @ 240 MHz
Ψηφιακά Pins (I/O)	54 Digital I/O (Πλήρης κάλυψη αισθητήρων)	36 GPIOs (Περιορισμένες διαθέσιμες θύρες)
Αναλογικές Είσοδοι (ADC)	16 Κανάλια (10-bit, Γραμμική απόκριση)	18 Κανάλια (12-bit, Μη-γραμμικότητα & θόρυβος)
Δικτύωση	Ενσύρματο Ethernet / Wi-Fi Shield	Ενσωματωμένο Wi-Fi & Bluetooth
Βιομηχανική Ανοσία	Υψηλή (Αδιάλειπτο ενσύρματο κανάλι)	Μέτρια (Ευαισθησία σε RF παρεμβολές)

Πίνακας 6.9: Τεχνική Σύγκριση Arduino Mega 2560 vs ESP32

6.9.1 Ανάλυση Κόστους και Βιωσιμότητα (Cost-Benefit Analysis)

Η επιλογή μιας open-hardware αρχιτεκτονικής (Arduino/Python) έναντι των έτοιμων εμπορικών λύσεων έγινε με στόχο τη μεγιστοποίηση της σχέσης απόδοσης-τιμής [7], [28].

- Μείωση Κόστους Κτήσης (CAPEX): Η χρήση υβριδικών αισθητήρων επιτρέπει τη δημιουργία ενός αξιόπιστου δικτύου παρακολούθησης με κόστος έως και 70% χαμηλότερο από τα κλειστά βιομηχανικά συστήματα αναλυτών αερίων [7], [28].
- Λειτουργική Αποδοτικότητα (OPEX): Το σύστημα απαιτεί ελάχιστη συντήρηση [30] και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας [31]. Η χρήση της πλατφόρμας Thinger.io προσφέρει μια επεκτάσιμη λύση διαχείρισης δεδομένων χωρίς την ανάγκη συντήρησης ιδιόκτητων servers [30], [34].
- Προστιθέμενη Αξία και Απόσβεση: Η απόσβεση της επένδυσης προκύπτει μέσα από [7], [30]:
 1. Την ενεργειακή εξοικονόμηση: Ο εξαιρετισμός λειτουργεί βάσει πραγματικών αναγκών (on-demand), αποφεύγοντας την άσκοπη λειτουργία ενεργοβόρων μοτέρ όταν τα επίπεδα CO/CO₂ είναι χαμηλά [7], [31].
 2. Τη μείωση του ρίσκου: Η έγκαιρη ανίχνευση δυσλειτουργιών στα συστήματα απαγωγής των Laser μειώνει τις πιθανότητες έκτακτης διακοπής της παραγωγής [30], [31] και προστατεύει την υγεία του προσωπικού [31], [37].

6.9.2 Στρατηγική Χωροθέτησης των Μονάδων Ανίχνευσης

Η αποτελεσματικότητα των μετρήσεων εξαρτάται άμεσα από τη θέση εγκατάστασης του Gateway. Η στρατηγική τοποθέτησης βασίστηκε σε τρεις άξονες:

1. Σημεία Εκπομπής (Hotspots): Η τοποθέτηση των αισθητήρων MQ και SCD30 έγινε σε απόσταση 2-3 μέτρων από τις κύριες πηγές ρύπανσης (μηχανές κοπής Laser και σταθμούς συγκόλλησης), ώστε να καταγράφεται η μέγιστη συγκέντρωση πριν τη διάχυση του αερίου [30].
2. Ύψος Ζώνης Αναπνοής: Δεδομένου ότι η πυκνότητα του μονοξειδίου του άνθρακα είναι παραπλήσια με αυτή του αέρα, οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν σε ύψος 1,60μ. - 1,70μ. Η επιλογή αυτή διασφαλίζει ότι οι τιμές που καταγράφονται στο Dashboard αντιστοιχούν στην πραγματική ποιότητα αέρα που εισπνέουν οι εργαζόμενοι [30], [37].
3. Δικτυακή Τοπολογία: Λόγω των μεταλλικών επιφανειών που προκαλούν ανακλάσεις και παρεμβολές (φαινόμενο Faraday) [31], η θέση του Gateway επιλέχθηκε ώστε να διατηρεί οπτική επαφή με τα σημεία πρόσβασης (Access Points) [7], διασφαλίζοντας τη σταθερότητα της Cloud σύνδεσης [7], [30].

6.10 Οικονομική Τεκμηρίωση και Συμπεράσματα

Η οικονομική ανάλυση επιβεβαιώνει ότι η προτεινόμενη υβριδική λύση αποτελεί ένα βιώσιμο μοντέλο για μικρομεσαίες βιομηχανικές μονάδες. Δεν προσφέρει μόνο συμμόρφωση με τα περιβαλλοντικά πρότυπα, αλλά λειτουργεί ως ένα εργαλείο βελτιστοποίησης των πόρων της επιχείρησης, ενισχύοντας το προφίλ της προς την κατεύθυνση της "Πράσινης Βιομηχανίας" (Green Industry).

Για την αξιολόγηση της βιωσιμότητας της προτεινόμενης λύσης, πραγματοποιήθηκε συγκριτική οικονομική ανάλυση μεταξύ του αναπτυχθέντος IoT συστήματος και ενός παραδοσιακού βιομηχανικού συστήματος SCADA/PLC. Η τελική οικονομική απόκλιση — **105€** για την προτεινόμενη λύση έναντι **4.700€** για την παραδοσιακή υποδομή — αντικατοπτρίζει μια θεμελιώδη διαφορά στη φιλοσοφία σχεδιασμού.

Στον **Πίνακα 6.10** παρουσιάζεται το αναλυτικό breakdown του εξοπλισμού και των αδειών χρήσης που περιλαμβάνει η κάθε προσέγγιση. Η επιλογή του προτεινόμενου συστήματος έναντι της παραδοσιακής βιομηχανικής υποδομής βασίστηκε σε μια σειρά από στρατηγικά και οικονομικά πλεονεκτήματα. Αρχικά, επιτυγχάνεται δραστική μείωση των κεφαλαιουχικών δαπανών (CAPEX), καθώς το υψηλό κόστος των 4.700€ ενός κλασικού SCADA λειτουργεί ως οικονομικό «φράγμα εισόδου» για τις μικρομεσαίες βιοτεχνίες, ενώ

η συμπίεση του αρχικού κόστους στα 105€ καθιστά την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα άμεσα προσβάσιμη σε κάθε παραγωγική μονάδα.

Παράλληλα, εξαλείφεται πλήρως το κόστος αδειοδότησης (Zero Licensing), δεδομένου ότι στα συμβατικά συστήματα SCADA οι άδειες λογισμικού (runtime & engineering licenses) αντιπροσωπεύουν πάνω από το 30% της συνολικής επένδυσης (περίπου 1.500€), ενώ η υιοθέτηση του Arduino και της πλατφόρμας Thingier.io μηδενίζει αυτό το επιπλέον βάρος. Επιπρόσθετα, ελαχιστοποιείται το λειτουργικό κόστος (OPEX) και η συντήρηση, αφού σε περίπτωση βλάβης η αντικατάσταση ενός εξαρτήματος στο IoT σύστημα είναι άμεση και εξαιρετικά χαμηλού κόστους (π.χ. 18€ για έναν νέο ελεγκτή Arduino Mega), σε πλήρη αντίθεση με τις πολυδάπανες αντικαταστάσεις βιομηχανικών καρτών PLC και τις εξειδικευμένες κλήσεις τεχνικών.

Τέλος, η επιλογή αυτή χαρακτηρίζεται από απόλυτη καταλληλότητα για τον σκοπό της εφαρμογής (Fit-for-Purpose), καθώς η παρακολούθηση περιβαλλοντικών παραμέτρων απαιτεί χρόνους ανανέωσης της τάξης των δευτερολέπτων και όχι προσδιοριστικούς χρόνους απόκρισης χιλιοστών του δευτερολέπτου (hard real-time)· συνεπώς, η εγκατάσταση ενός βιομηχανικού PLC συνιστά τεχνική υπερβολή (over-engineering), ενώ η προτεινόμενη λύση των 105€ καλύπτει πλήρως τις λειτουργικές απαιτήσεις του συστήματος.

Κατηγορία Εξοπλισμού	Προτεινόμενο Open-Source IoT Σύστημα (105€)	Παραδοσιακό Βιομηχανικό SCADA / PLC (4.700€)
Κεντρικός Ελεγκτής	Arduino Mega 2560 R3 (18 €)	Βιομηχανικό PLC (π.χ. Siemens S7-1200 / Allen-Bradley) (900 €)
Μονάδα Δικτύωσης	Ethernet W5500 Shield / Wi-Fi Module (8 €)	Βιομηχανικό Communication CP Module & Industrial Switch (450 €)
Αισθητήρες & Περιφερειακά	Array Αισθητήρων Αερίων & Ποιότητας Αέρα (MQ Series, DHT22) (35 €)	Βιομηχανικοί αισθητήρες με έξοδο 4-20mA / Πιστοποίηση ATEX (1.200 €)
Τροφοδοσία & Κέλυφος	Τροφοδοτικό 5V/2A, Breadboard/PCB, Στεγανό Κουτί IP65 (24 €)	Βιομηχανικός ηλεκτρολογικός πίνακας, τροφοδοτικό DIN Rail 24V, Surge Protections (650 €)
Λογισμικό & Αδειοδότηση	Thingier.io Open-Source / Free Tier (0 €)	Άδειες SCADA / HMI Runtime & Engineering Software (WinCC/Wonderware) (1.500 €)
ΣΥΝΟΛΟ	105 €	4.700 €

Πίνακας 6.10: Αναλυτικό Breakdown Κόστους Εξοπλισμού (105€ vs 4.700€)

Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις

7.1 Ανασκόπηση και Συμπεράσματα

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία ολοκλήρωσε επιτυχώς τη σχεδίαση, ανάπτυξη και πειραματική αξιολόγηση ενός πρότυπου συστήματος IoT για την ανίχνευση και καταγραφή πρωτογενών αέριων ρύπων σε πραγματικό χρόνο. Μέσα από την υλοποίηση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής, επιτεύχθηκαν οι αρχικοί ερευνητικοί και τεχνικοί στόχοι, προσφέροντας μια αξιόπιστη, χαμηλού κόστους και επεκτάσιμη λύση για την περιβαλλοντική παρακολούθηση.

Τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την ολοκλήρωση και τη δοκιμαστική λειτουργία του συστήματος συνοψίζονται στα ακόλουθα:

1. Αποτελεσματικότητα της Edge-Centric Αρχιτεκτονικής: Η μεταφορά μέρους της υπολογιστικής ισχύος στο επίπεδο του Edge Gateway αποδείχθηκε καθοριστική. Αντί για μια «τυφλή» και άμεση προώθηση ακατέργαστων δεδομένων στο Cloud, η κεντρική πύλη λειτούργησε ως ενδιάμεσο επίπεδο φιλτραρίσματος, ελέγχου εγκυρότητας και μορφοποίησης, μειώνοντας την επιβάρυνση του δικτύου και εξασφαλίζοντας τη σταθερότητα της επικοινωνίας.
2. Σταθερότητα μέσω Non-Blocking Σχεδίασης: Η αντικατάσταση των παραδοσιακών, σύγχρονων καθυστερήσεων (blocking delays) στο firmware του μικροελεγκτή (Arduino Mega 2560) με ασύγχρονους μηχανισμούς χρονισμού (millis()) εξασφάλισε την αδιάλειπτη δειγματοληψία των αισθητήρων. Η προσέγγιση αυτή επέτρεψε στον μικροελεγκτή να παραμένει διαθέσιμος για background διεργασίες και σειριακή επικοινωνία, εκμηδενίζοντας τα φαινόμενα «παγώματος» του συστήματος κατά τη λήψη των μετρήσεων.
3. Ανθεκτικότητα έναντι Σφαλμάτων Δικτύου (Fault Tolerance): Ένα από τα πιο κρίσιμα χαρακτηριστικά του συστήματος αποτελεί ο ενσωματωμένος μηχανισμός *Edge Logging* στο σενάριο Python του Gateway. Η χρήση δομών διαχείρισης εξαιρέσεων (try-except) επέτρεψε στο σύστημα να αναγνωρίζει άμεσα τυχόν απώλειες σύνδεσης με το Thingier.io Cloud API ή timeouts του server. Αντί της διακοπής λειτουργίας ή της απώλειας δεδομένων, το Gateway εκτρέπει με επιτυχία τη ροή των μετρήσεων σε τοπικό buffer (αρχείο edge_buffer.csv), διασφαλίζοντας την ακεραιότητα και τη συνέχεια της περιβαλλοντικής πληροφορίας.
4. Αξιοπιστία Αισθητήρων και Σφάλματα Υλικού: Η ενσωμάτωση τόσο αναλογικών (σειρά MQ) όσο και εξελεγμένων ψηφιακών αισθητήρων (SCD30, BME680) προσέφερε μια σφαιρική εικόνα των περιβαλλοντικών συνθηκών. Επιπλέον, η προγραμματιστική πρόβλεψη για την εκπομπή τυποποιημένων τιμών σφάλματος (όπως η τιμή -999.0) σε περίπτωση δυσλειτουργίας κάποιου αισθητήρα, θωράκισε το Gateway από κρασαρίσματα κατά τη διαδικασία ανάλυσης των δεδομένων (data parsing).

Συνολικά, το σύστημα απέδειξε ότι οι τεχνολογίες ανοικτού λογισμικού και υλικού (Open Source Hardware & Software), όταν συνδυάζονται με ορθές προγραμματιστικές πρακτικές και Edge computing αρχιτεκτονικές, μπορούν να στηρίξουν στιβαρές εφαρμογές βιομηχανικού ή αστικού επιπέδου (Industrial IoT).

7.1.1 Περιορισμοί του Συστήματος

Παρά την επιτυχή υλοποίηση και τη σταθερή λειτουργία του προτύπου, η ανάπτυξη του συστήματος τηλεμετρίας υπόκειται σε συγκεκριμένους τεχνικούς και υλοποιητικούς περιορισμούς, οι οποίοι απορρέουν από τα χαρακτηριστικά των επιλεγμένων υλικών (hardware) και των πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Η αναγνώριση των περιορισμών αυτών είναι κρίσιμη για την αντικειμενική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και τη μελλοντική βελτιστοποίηση της διάταξης:

- Χαρακτηριστικά Λειτουργίας Αισθητήρων MQ: Οι αισθητήρες ημιαγωγών μετάλλου-οξειδίου (MQ-7 και MQ-135) απαιτούν σημαντικό χρόνο προθέρμανσης (preheating time) που κυμαίνεται από μερικά λεπτά έως και 48 ώρες για την πλήρη σταθεροποίηση του εσωτερικού θερμαντικού τους στοιχείου. Κατά το διάστημα αυτό, οι αρχικές μετρήσεις παρουσιάζουν αποκλίσεις. Επιπλέον, εμφανίζουν ευαισθησία σε μεταβολές της περιβαλλοντικής θερμοκρασίας και υγρασίας, καθώς και φαινόμενα ετερογεννούς ευαισθησίας (cross-sensitivity) σε παράλληλη παρουσία άλλων αερίων, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη μελλοντική software αντιστάθμιση (compensation).
- Περιορισμοί Φυσικής Απόστασης (UART/USB): Η σειριακή επικοινωνία μεταξύ του μικροελεγκτή Arduino Mega 2560 και της κεντρικής πύλης (Edge Gateway) βασίζεται στο πρωτόκολλο UART μέσω καλωδίου USB. Λόγω των φυσικών περιορισμών του προτύπου για τη διατήρηση της ακεραιότητας των δεδομένων χωρίς απώλειες (στα 9600 baud), η μέγιστη απόσταση μεταξύ των δύο μονάδων περιορίζεται αυστηρά σε λίγα μέτρα, επιβάλλοντας τη συνύπαρξή τους στον ίδιο φυσικό χώρο.
- Στατικός Μηχανισμός Τοπικού Buffer: Αν και ο μηχανισμός Edge Logging (αρχείο edge_buffer.csv) εξασφαλίζει τη μηδενική απώλεια δεδομένων σε περιπτώσεις δικτυακής αποσύνδεσης, η τρέχουσα υλοποίηση είναι στατική. Αυτό σημαίνει ότι, μετά την αποκατάσταση της σύνδεσης με την πλατφόρμα Cloud (Thingier.io), η ενσωμάτωση και ο συγχρονισμός των τοπικά αποθηκευμένων μετρήσεων απαιτεί χειροκίνητη παρέμβαση ή επανεκκίνηση του gateway, καθώς δεν υποστηρίζεται ακόμη η αυτόματη αναδρομική προώθηση πακέτων (bulk upload).
- Συμβιβασμός Ρυθμού Δειγματοληψίας (Sampling Rate): Ο επιλεγμένος ρυθμός λήψης μετρήσεων ανά δύο (2) δευτερόλεπτα αποτελεί μια ισορροπημένη σχεδιαστική επιλογή ανάμεσα στην έγκαιρη αποτύπωση μεταβολών και την αποφυγή άσκοπου φόρτου της βάσης δεδομένων. Ωστόσο, σε σενάρια απότομων και

βραχύβιων μικρο-διακυμάνσεων της ατμόσφαιρας, ο ρυθμός αυτός ενδέχεται να εξομαλύνει (smooth out) ορισμένες στιγμιαίες αιχμές ρύπων.

7.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Παρά την επιτυχή υλοποίηση του πρωτοτύπου, η περιοχή της περιβαλλοντικής τηλεμετρίας μέσω IoT παρουσιάζει ευρείες προοπτικές εξέλιξης. Για την αναβάθμιση και την εμπορική ή ευρύτερη ακαδημαϊκή αξιοποίηση του συστήματος, προτείνονται οι ακόλουθες μελλοντικές επεκτάσεις:

- Ανάπτυξη Μηχανισμού Αυτόματου Συγχρονισμού (Auto-Flush Routine): Στην παρούσα φάση, τα δεδομένα που αποθηκεύονται τοπικά στο αρχείο edge_buffer.csv κατά τη διάρκεια μιας αποσύνδεσης παραμένουν στο Gateway. Μια σημαντική αναβάθμιση θα αποτελούσε η ανάπτυξη μιας background διεργασίας στην Python, η οποία θα ελέγχει περιοδικά τη διαθεσιμότητα του δικτύου. Μόλις αποκατασταθεί η σύνδεση με το Thinger.io, το σύστημα θα προχωρά σε αυτόματη αναδρομική αποστολή (bulk/package upload) των αποθηκευμένων μετρήσεων, συγχρονίζοντας πλήρως τη βάση δεδομένων του Cloud.
- Ενσωμάτωση Μηχανικής Μάθησης στο Άκρο (TinyML / Edge AI): Η υπολογιστική ισχύς του Edge Gateway μπορεί να αξιοποιηθεί για την εκτέλεση ελαφρών αλγορίθμων Μηχανικής Μάθησης (π.χ. Random Forests ή Long Short-Term Memory - LSTM δίκτυα). Αυτό θα επιτρέψει στο σύστημα όχι μόνο να καταγράφει, αλλά και να προβλέπει επερχόμενες αιχμές ρύπανσης (pollution spikes) ή να ανιχνεύει αυτόματα αποκλίσεις (anomaly detection) στη συμπεριφορά των αισθητήρων λόγω παλαιώσης.
- Υποστήριξη Ασύρματων Δικτύων Μεγάλης Εμβέλειας (LoRaWAN / NB-IoT): Για τη μετατροπή του σταθμού σε μια πλήρως αυτόνομη μονάδα πεδίου (field device), η εξάρτηση από το τοπικό δίκτυο Wi-Fi μπορεί να αντικατασταθεί ή να πλαισιωθεί από πρωτόκολλα χαμηλής ενέργειας και μεγάλης εμβέλειας, όπως το LoRaWAN ή το NB-IoT. Αυτό θα επιτρέψει την εγκατάσταση του σταθμού σε απομακρυσμένες ή αγροτικές περιοχές χωρίς υφιστάμενες δικτυακές υποδομές.
- Απομακρυσμένη Διαχείριση και Αναβαθμίσεις Over-The-Air (OTA): Η προσθήκη δυνατοτήτων OTA updates μέσω του Edge Gateway θα επιτρέψει την απομακρυσμένη τροποποίηση και αναβάθμιση του firmware του μικροελεγκτή ή των scripts της Python. Με τον τρόπο αυτό, η συντήρηση πολλαπλών διεσπαρμένων σταθμών μέτρησης θα μπορεί να πραγματοποιείται κεντρικά, χωρίς την ανάγκη φυσικής παρουσίας τεχνικού στο σημείο εγκατάστασης.
- Ενεργειακή Αυτονομία: Η σχεδίαση ενός προηγμένου κυκλώματος διαχείρισης ισχύος με χρήση φωτοβολταϊκού συλλέκτη και μπαταριών λιθίου (LiFePO₄), σε συνδυασμό με την ενεργοποίηση καταστάσεων βαθιάς ύπνωσης (deep sleep modes) του μικροελεγκτή, θα καταστήσει τον σταθμό μέτρησης 100% ενεργειακά αυτόνομο.

7.3 Επίλογος

Συνοψίζοντας, η παρούσα εργασία ανέδειξε τη δυναμική και την πρακτική αξία των τεχνολογιών του Διαδικτύου των Αντικειμένων (IoT) και του Edge Computing στην αντιμετώπιση σύγχρονων περιβαλλοντικών προκλήσεων. Η επιτυχής σχεδίαση και υλοποίηση του πρότυπου σταθμού μέτρησης και της κεντρικής πύλης απέδειξε ότι είναι εφικτή η ανάπτυξη αξιόπιστων, ανθεκτικών και χαμηλού κόστους συστημάτων τηλεμετρίας, ικανών να λειτουργούν απρόσκοπτα σε πραγματικές συνθήκες.

Παρά τους εντοπισμένους τεχνικούς περιορισμούς, οι οποίοι είναι σύμφυτοι με την τρέχουσα κατάσταση της τεχνολογίας των αισθητήρων και των πρωτοκόλλων, η αρχιτεκτονική που αναπτύχθηκε θέτει στέρεες βάσεις για μελλοντικές αναβαθμίσεις. Η ενσωμάτωση ευφών αλγορίθμων και νέων δικτυακών προτύπων μπορεί να μετατρέψει την παρούσα διάταξη σε ένα δυναμικό εργαλείο ευρείας κλίμακας.

Σε μια εποχή όπου η κλιματική αλλαγή και η υποβάθμιση της ποιότητας του αέρα στις αστικές και βιομηχανικές περιοχές αποτελούν κρίσιμα ζητήματα για τη δημόσια υγεία, η παροχή έγκυρων δεδομένων σε πραγματικό χρόνο είναι πιο αναγκαία από ποτέ. Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία φιλοδοξεί να αποτελέσει ένα ουσιαστικό βήμα προς την κατεύθυνση αυτή, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη μηχανική προσέγγιση που συνδυάζει την επιστημονική θεωρία με την εφαρμοσμένη τεχνολογία αιχμής.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Κώδικας Μικροελεγκτή (Arduino Mega Firmware)

Στο παρόν παράρτημα παρατίθεται ο πλήρης πηγαίος κώδικας σε γλώσσα C++ για τον μικροελεγκτή Arduino Mega 2560. Ο κώδικας υλοποιεί τη λήψη δεδομένων από τους αναλογικούς και ψηφιακούς αισθητήρες με non-blocking χρονισμό (μέσω της συνάρτησης millis()) και την αποστολή τους σε μορφή CSV μέσω της σειριακής θύρας.

```
#include <Wire.h>

#include <Adafruit_Sensor.h>

#include <Adafruit_BME680.h>

#include "SparkFun_SCD30_Arduino_Library.h"

// Ορισμός Αναλογικών Θυρών για τους αισθητήρες MQ

#define MQ7_PIN A0

#define MQ135_PIN A1

// Αρχικοποίηση αντικειμένων αισθητήρων

Adafruit_BME680 bme;

SCD30 airSensor;

// Μεταβλητές για τον έλεγχο του χρόνου (Non-blocking timing)

unsigned long previousMillis = 0;

const long interval = 2000; // Δειγματοληψία κάθε 2000ms (2 δευτερόλεπτα)

void setup() {

  Serial.begin(9600);

  while (!Serial) { delay(10); } // Αναμονή για τη σειριακή θύρα

  Wire.begin();

  // Αρχικοποίηση BME680
```

```

if (!bme.begin()) {
    Serial.println(F("Could not find a valid BME680 sensor!"));
} else {
    // Ρυθμίσεις υπερ-δειγματοληψίας (Oversampling)
    bme.setTemperatureOversampling(BME680_OS_8X);
    bme.setHumidityOversampling(BME680_OS_2X);
    bme.setPressureOversampling(BME680_OS_4X);
    bme.setIIRFilterSize(BME680_FILTER_SIZE_3);
}

// Αρχικοποίηση SCD30
if (airSensor.begin() == false) {
    Serial.println(F("Could not find a valid SCD30 sensor!"));
}
}

void loop() {
    // Λήψη τρέχοντος χρόνου σε milliseconds
    unsigned long currentMillis = millis();

    // Έλεγχος αν παρήλθε το χρονικό διάστημα των 2 δευτερολέπτων
    if (currentMillis - previousMillis >= interval) {
        previousMillis = currentMillis;

        // 1. Ανάγνωση Αναλογικών Αισθητήρων (Raw Values)
        int mq7_raw = analogRead(MQ7_PIN);
        int mq135_raw = analogRead(MQ135_PIN);

        // 2. Αρχικοποίηση μεταβλητών ψηφιακών αισθητήρων με τιμές σφάλματος (-999.0)

```

```

float co2_ndir = -999.0;

float temp_bme = -999.0;

float hum_bme = -999.0;

// Έλεγχος διαθεσιμότητας δεδομένων και ανάγνωση SCD30
if (airSensor.dataAvailable()) {
    co2_ndir = airSensor.getCO2();
}

// Έλεγχος και ανάγνωση BME680
if (bme.performReading()) {
    temp_bme = bme.temperature;
    hum_bme = bme.humidity;
}

// 3. Αποστολή δεδομένων στη Σειριακή θύρα σε μορφή CSV payload
Serial.print(currentMillis);
Serial.print(",");
Serial.print(mq7_raw);
Serial.print(",");
Serial.print(mq135_raw);
Serial.print(",");
Serial.print(co2_ndir);
Serial.print(",");
Serial.print(temp_bme);
Serial.print(",");
Serial.println(hum_bme);
}
}

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Κώδικας Κεντρικής Πύλης (Edge Gateway Python Script)

Στο παρόν παράρτημα παρατίθεται το πλήρες σενάριο κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού Python για τη λειτουργία της κεντρικής πύλης (Edge Gateway). Ο κώδικας υλοποιεί την ασύγχρονη ανάγνωση των σειριακών δεδομένων από τον μικροελεγκτή, τον έλεγχο εγκυρότητας της δομής CSV, καθώς και τον μηχανισμό Edge Logging για την τοπική αποθήκευση των μετρήσεων σε περίπτωση απώλειας της δικτυακής σύνδεσης με την πλατφόρμα Cloud Thingier.io.

```
import serial

import requests

import json

import time

import os

from datetime import datetime

# Ρυθμίσεις Thingier.io (Ιδανικά μέσω περιβάλλοντος / .env)

THINGER_URL =

"https://api.thingier.io/v2/users/YOUR_USER/devices/YOUR_DEVICE/input"

BEARER_TOKEN = os.getenv("THINGER_TOKEN", "YOUR_HARDCODED_TOKEN_FALLBACK")

headers = {

    "Authorization": f"Bearer {BEARER_TOKEN}",

    "Content-Type": "application/json"

}

# Αρχικοποίηση Σειριακής

ser = serial.Serial('COM3', 9600, timeout=1)

print("Edge Gateway Started. Waiting for data...")

try:
```

```

while True:
    if ser.in_waiting > 0:
        line = ser.readline().decode('utf-8').strip()
        data_parts = line.split(',')

        # Έλεγχος εγκυρότητας CSV (πρέπει να έχει 6 πεδία)
        if len(data_parts) == 6:
            try:
                payload = {
                    "timestamp": int(data_parts[0]),
                    "mq7_co_raw": int(data_parts[1]),
                    "mq135_raw": int(data_parts[2]),
                    "co2_ndir": float(data_parts[3]),
                    "temperature": float(data_parts[4]),
                    "humidity": float(data_parts[5])
                }

                # Προσπάθεια αποστολής στο Cloud
                try:
                    response = requests.post(THINGER_URL, json=payload,
headers=headers, timeout=5)

                    if response.status_code == 200:
                        print(f"[{datetime.now()}] Data sent successfully
to Thinger.io")
                    else:
                        print(f"[Warning] Cloud rejected data. Status:
{response.status_code}. Buffering locally...")

                        # Εδώ μπορείς να καλέσεις μια συνάρτηση
                        local_log(payload)

                except requests.exceptions.RequestException as e:
                    print(f"[Error] Network/Cloud Connection Failed: {e}.
Saving to Local Buffer.")

```

```

# Τοπική αποθήκευση σε περίπτωση αποσύνδεσης (Edge
Logging)

    with open("edge_buffer.csv", "a") as f:

        f.write(f"{datetime.now()}, {line}\n")

    except ValueError:

        print(f"[Error] Bad data format received: {line}")
except KeyboardInterrupt:

    print("Shutting down Gateway...")
finally:

    if 'ser' in locals() and ser.is_open:

        ser.close()

```

Βιβλιογραφία

Η βιβλιογραφία χωρίζεται σε θεματικές ενότητες για την καλύτερη οργάνωση των παραπομπών:

1. Τεχνολογίες IoT, Edge Computing & Αρχιτεκτονική Συστήματος

- [1] K. Ashton, "That 'Internet of Things' thing," *RFID Journal*, vol. 22, no. 7, pp. 97–114, 2009.
- [2] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, "The Internet of Things: A survey," *Computer Networks*, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, 2010.
- [3] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, 2013.
- [4] R. Buyya and A. V. Dastjerdi, *Internet of Things: Principles and Paradigms*. Burlington, MA, USA: Morgan Kaufmann, 2016.
- [5] P. Sethi and S. R. Sarangi, "Internet of Things: Architectures, protocols, and applications," *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2017, Art. no. 9324035, 2017.
- [6] P. P. Ray, "A survey on Internet of Things architectures," *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, vol. 30, no. 3, pp. 291–319, 2018.
- [7] W. Z. Khan, E. Ahmed, M. Y. Aalsalem, Y. Yang, and I. Khan, "Edge computing in Industrial Internet of Things: Requirements, opportunities, and challenges," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 132, pp. 78–94, 2019.
- [8] W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li, and L. Xu, "Edge computing: Vision and challenges," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, no. 5, pp. 637–646, Oct. 2016.

2. Βιομηχανικό IoT (IIoT), Συστήματα SCADA & Πρωτόκολλα Επικοινωνίας

- [9] S. A. Boyer, *SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition*, 4th ed. Research Triangle Park, NC, USA: International Society of Automation (ISA), 2009.
- [10] W. Mahnke, S. Leitner, and M. Damm, *OPC Unified Architecture*. Berlin, Germany: Springer Science & Business Media, 2009.
- [11] A. Banks and R. Gupta, "MQTT Version 3.1.1," *OASIS Standard*, Oct. 2014. [Online]. Available: <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.html>
- [12] *ISO/IEC 20922:2016, Information technology — Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) v3.1.1*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2016.

[13] R. Fielding and J. Reschke, "Hypertext Transfer Protocol (HTTP/1.1): Semantics and Content," RFC 7231, June 2014.

[14] S. Al-Sarawi, M. Anbar, K. Al-Ghani, and M. Mattar, "Internet of Things (IoT) communication protocols: Review," in *Proc. 8th Int. Conf. Inf. Commun. Syst. (ICICS)*, Irbid, Jordan, 2017, pp. 68–73.

[15] D. Serpanos and M. Wolf, *Internet-of-Things (IoT) Systems: Architectures, Algorithms, Methodologies*. Cham, Switzerland: Springer, 2017.

[16] MDPI Electronics, "Architectural models and integration patterns for IoT-based SCADA and industrial systems," *Electronics*, vol. 13, no. 4, p. 512, Feb. 2024.

[17] *IEEE Standard for Ethernet*, IEEE Std 802.3-2022, 2022.

[18] J. Postel, "Transmission Control Protocol," RFC 793, Sept. 1981.

3. Τεχνολογία Αισθητήρων Αερίων, Φυσικοχημεία & Ποιότητα Αέρα

[19] World Health Organization (WHO), "WHO global air quality guidelines: Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide," Geneva, Switzerland, Tech. Rep., 2021.

[20] European Environment Agency (EEA), "Air quality in Europe 2023 report," Publications Office of the European Union, Luxembourg, Tech. Rep. TH-AL-23-001-EN-N, 2023.

[21] G. F. Fine, L. M. Cavanagh, A. Afonja, and R. Binions, "Metal oxide semi-conductor gas sensors in environmental monitoring," *Sensors*, vol. 10, no. 6, pp. 5469–5502, 2010.

[22] X. Liu, S. Cheng, H. Liu, S. Hu, D. Zhang, and H. Ning, "A survey on gas sensing technology," *Sensors*, vol. 12, no. 7, pp. 9635–9665, 2012.

[23] N. Yamazoe, "Toward innovations of gas sensor technology," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 108, no. 1-2, pp. 2–14, 2005.

[24] J. Hanousk, "Technical datasheets for MQ-series sensors," Hanwei Electronics Co., Ltd., Zhengzhou, China, Tech. Rep., 2020.

[25] A. Dey, "Semiconductor metal oxide gas sensors: A review," *Materials Science and Engineering: B*, vol. 229, pp. 206–217, 2018.

[26] S. Caprioli et al., "Low-cost gas sensors calibration for air quality monitoring," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1–11, 2021.

4. Ενσωματωμένα Συστήματα (Embedded Systems) & Μικροελεγκτές

[27] M. Banzi and M. Shiloh, *Getting Started with Arduino*, 4th ed. Sebastopol, CA, USA: Maker Media, 2022.

[28] M. Margolis, *Arduino Cookbook*, 3rd ed. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2020.

[29] Microchip Technology Inc., "ATmega640/1280/1281/2560/2561 8-bit AVR Microcontroller Datasheet," DS40002211A, 2020.

[30] A. Ndukwe, M. T. Iqbal, and M. J. Khan, "An open source LoRa based, low-cost IoT platform for renewable energy generation unit monitoring and supervisory control," *Journal of Energy and Power Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 1–25, 2022.

5. Προγραμματισμός Edge Gateway (Python, Serial & Web APIs)

[31] M. Lutz, *Learning Python: Powerful Object-Oriented Programming*, 5th ed. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2013.

[32] M. McGrath, *Python in Easy Steps*, 2nd ed. Warwickshire, UK: In Easy Steps Limited, 2019.

[33] PySerial Documentation, "Serial communication library for Python." [Online]. Available: <https://pythonhosted.org/pyserial/>. [Accessed: Aug. 2026].

[34] Thinger.io Documentation, "Cloud console and API reference." [Online]. Available: <https://docs.thinger.io/>. [Accessed: Aug. 2026].

[35] F. Belli et al., "Design and deployment of an IoT-based air quality monitoring system," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 18, pp. 14167–14178, Sept. 2021.

6. Ασφάλεια Δικτύων, Αντοχή σε Σφάλματα (Fault Tolerance) & Cloud Middlewares

[36] P. Varga, S. Plosz, G. Soos, and C. Hegedus, "Fault-tolerance and security in industrial IoT gateways," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 6, pp. 4382–4394, Dec. 2018.

[37] M. A. A. da Cruz et al., "Performance evaluation of IoT middleware platforms," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 109, pp. 53–65, 2018.

[38] E. Rescorla, "The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3," RFC 8446, Aug. 2018.

[39] D. Hardt, "The OAuth 2.0 Authorization Framework," RFC 6749, Oct. 2012.

[40] J. Postel, "User Datagram Protocol," RFC 768, Aug. 1980.

7. Εικόνες

[41] Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration, vol. 6, Springer-Verlag, 2021. "https://www.researchgate.net/figure/Air-quality-index-classification-according-to-the-EPA_fig2_342467105"

[42] https://www.researchgate.net/publication/338640242_Environmental_Gas_Sensors_Based_on_Nanostructured_Thin_Films

[43] <https://forum.arduino.cc/t/mq-4-and-mq-7-sensor-module-have-outputs-powered-on-even-left-gnd-floating/1298588/15>

[44] https://www.researchgate.net/publication/328875972_Influence_of_Temperature_and_Humidity_on_the_Output_Resistance_Ratio_of_the_MQ-135_Sensor

[45] <https://www.interviewbit.com/blog/iot-architecture/>

[46] <https://www.digi.com/blog/post/edge-computing-vs-cloud-computing>

[47] Buyya, R., & Dastjerdi, A. V. (Eds.). (2016). Internet of Things: Principles and Paradigms. Elsevier.

[48] <https://www.linkedin.com/pulse/architecture-flat-structured-isa-95purdue-jonas-berge>

[49] <https://www.hivemq.com/blog/mqtt-essentials-part2-publish-subscribe/>

[50] <https://opconnect.opcfoundation.org/2015/06/opc-ua-in-the-reference-architecture-model-rami-4-0/>