



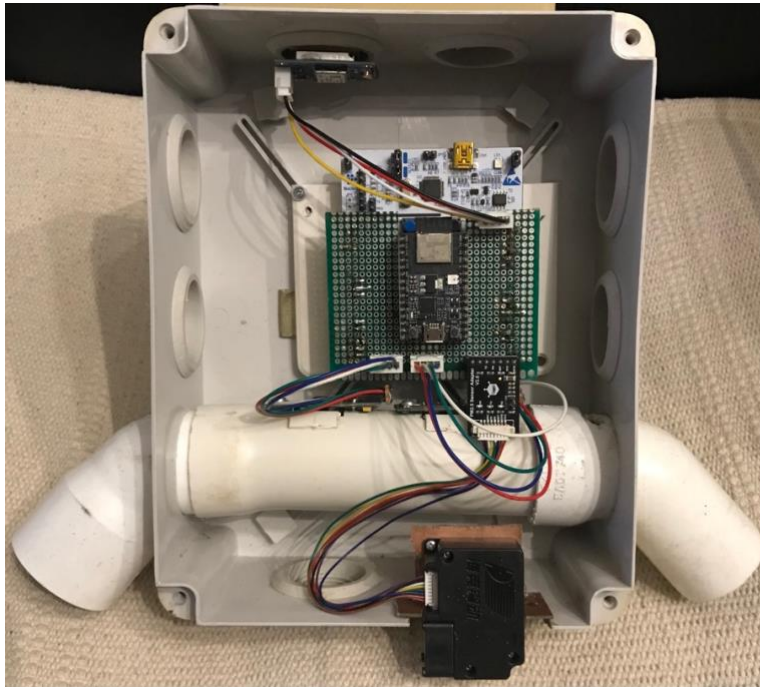
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους



Φοιτητής: Ευάγγελος Περμανταλόγλου

A.M.: 50106871

Επιβλέπων καθηγητής

Ηλίας Σταύρακας

Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2023

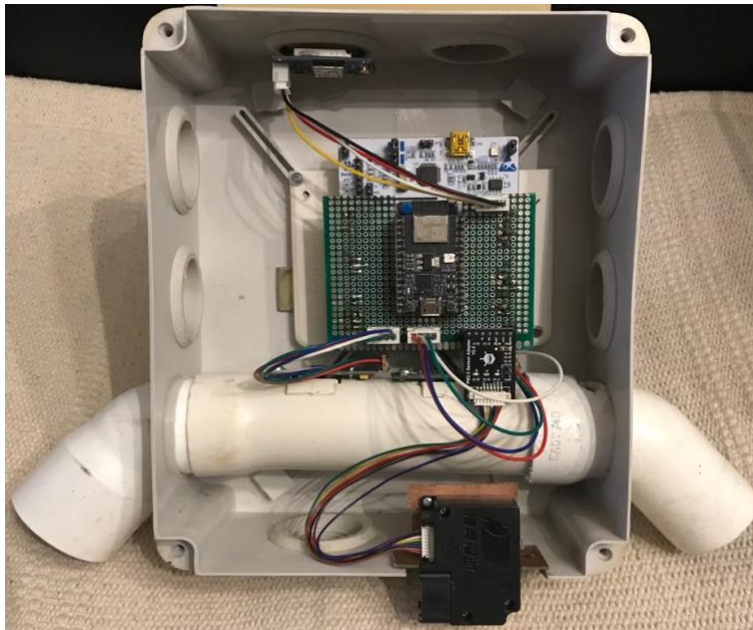
Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING

Diploma Thesis

Low cost air pollution measuring station



Student: Evangelos Permantaloglou

R.N.: 50106871

Supervisor

Ilias Stavrakas

Professor

ATHENS-EGALEO, FEBRUARY 2023

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Σταύρακας Ηλίας, Καθηγητής	Τσακιρίδης Οδυσσέας, Επίκουρος Καθηγητής	Κουλούρας Γρηγόριος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και (Όνοματεπώνυμο Φοιτητή/ήτριας),
Μήνας, Έτος**

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Ευάγγελος Περμανταλόγλου του Χαράλαμπου, με αριθμό μητρώου 50106871 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Ο Δηλών
Ευάγγελος Περμανταλόγλου

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Ηλία Σταύρακα που μου εμπιστεύτηκε το παρόν θέμα διπλωματικής εργασίας, καθώς επίσης για την ευγενική συνεχή παρουσία και καθοδήγησή του σε όλη τη διαδικασία εκπόνησης της εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Ιωάννη Χρηστάκη που με το ειλικρινές ενδιαφέρον του και τη κατασκευή – μεθοδολογία βαθμονόμησης των αισθητήρων, με βοήθησε να κάνω τη διπλωματική μου εργασία καλύτερη.

Περίληψη

Το αντικείμενο που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία είναι ο σχεδιασμός και η κατασκευή σταθμού μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους ενσωματώνοντας δυνατότητες Διαδικτύου των Πραγμάτων. Στόχος είναι το σύστημα να έχει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και να είναι δυνατό να τοποθετηθεί σε σημείο χωρίς ηλεκτρική τροφοδοσία. Ειδική μέριμνα λαμβάνεται για την επιλογή του περιβλήματος του σταθμού το οποίο θα πρέπει να προστατεύει τα ηλεκτρονικά συστήματα και τους αισθητήρες τόσο από τα καιρικά φαινόμενα όσο και από πιθανές άλλες εξωτερικές αιτίες, όπως είναι η μηχανική κρούση ή η σκόνη.

Τα μεγέθη που μετρούνται είναι το διοξείδιο του αζώτου (NO_2), το όζον (O_3), και τη συγκέντρωση των μικροσωματιδίων 1, 2,5 και 10 μm . Ο σταθμός συμπεριλαμβάνει GPS ώστε να λαμβάνεται η ακριβής τοποθεσία και ώρα. Οι τιμές των μεγεθών που καταγράφονται μετά από μία πρώτη βασική επεξεργασία ενθυλακώνονται σε πακέτα και αποστέλλονται μέσω δικτύου στο κεντρικό σύστημα για περαιτέρω επεξεργασία και απεικόνιση.

Λέξεις κλειδιά

Σταθμός μέτρησης, χαμηλού κόστους, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, ατμοσφαιρική ρύπανση, συγκέντρωση μικροσωματιδίων, αισθητήρες αερίων, αναπτυξιακή πλακέτα, σύστημα γεωεντοπισμού, Διαδικτύου των Πραγμάτων.

Abstract

The subject of this thesis is the design and construction of a low-cost air pollution measuring station that integrates Internet of Things capabilities. The goal is for the system to have low energy consumption and to be able to be installed in a space without a power supply. Particular attention is paid to the selection of the station housing, which should protect the electronic systems and sensors both from the weather and from possible other external causes, such as mechanical impact or dust.

The quantities measured are nitrogen dioxide (NO₂), ozone (O₃), and the concentration of 1, 2.5 and 10 μm microparticles. The station includes GPS to get the exact location and time. The values of the quantities recorded after a first basic processing are encapsulated in packets and sent via network to the central system for further processing and display.

Keywords

Measuring station, low cost, low energy consumption, air pollution, concentration of microparticles, gas sensors, development board, GPS, Internet of Things.

Πίνακας περιεχομένων

Σχήματα.....	10
Πίνακες.....	11
1. Εισαγωγή.....	12
1.1 Αιτίες παραγωγής αέριων ρύπων	13
1.2 Επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ανθρώπινη υγεία.....	14
1.3 Τοποθέτηση σταθμού.....	14
1.4 Σκοπός και στόχος.....	15
1.4.1 Σκοπός.....	15
1.4.2 Στόχος.....	15
1.5 Παρόμοια συστήματα.....	16
1.5.1 Integrated open source air quality monitoring platform.....	16
1.5.2 MoreAir.....	16
1.5.3 PurpleAir PA-II.....	16
2. Θεωρητικό υπόβαθρο.....	18
2.1 Αέριοι ρύποι ως χημικά στοιχεία	18
2.1.1 Διοξείδιο του Αζώτου	18
2.1.2 Όζον	19
2.2 Ηλεκτροχημικοί αισθητήρες	20
2.3 Προδιαγραφές	21
2.3.1 Περιοχές μέτρησης.....	21
2.3.2 Δειγματοληψία	21
2.3.3 Χωροταξία.....	21
2.4 Διαδίκτυο των Πραγμάτων	22
2.4.1 Επίπεδα ΔτΠ.....	22
2.4.2 Αισθητήρες και ενεργοποιητές (Sensors & Actuators).....	24
2.4.3 Τρόποι επικοινωνίας μεταξύ των αντικειμένων.....	24
2.4.4 Πρωτόκολλα επικοινωνίας.....	25
2.4.5 Υπολογιστικό Νέφος και Υπολογιστική Ομίχλη (Cloud Computing & Fog Computing)	25
3. Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης	27
3.1 Εξαρτήματα.....	30
3.1.1 Μονάδα επεξεργασίας.....	31
3.1.2 Μονάδα δικτύωσης	33
3.1.3 Αισθητήρας συγκέντρωσης όζοντος	34
3.1.4 Αισθητήρας συγκέντρωσης διοξειδίου του αζώτου.....	36
3.1.5 Αισθητήρας συγκέντρωσης μικροσωματιδίων	37

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

3.1.6 Μονάδα γεωεντοπισμού.....	39
3.2 Λογισμικά εργαλεία	39
3.2.1 Visual Studio Code	40
3.2.2 PlatformIO.....	40
3.2.3 Grafana.....	41
3.3 Κώδικας.....	41
3.3.1 Κώδικας για το NUCLEO-F091RC.....	41
3.3.2 Κώδικας για το ESP32-C3	42
3.6 Δυνατότητες επέκτασης	43
3.6.1 Συνδεσιμότητα	43
3.6.2 Λογισμικό.....	43
3.6.3 Διαδίκτυο των Πραγμάτων	44
3.7 Πεδία βελτίωσης	44
4. Βαθμονόμηση συστήματος και αισθητήρων.....	46
4.1 Σύστημα βαθμονόμησης	46
4.2 Πρώτη μεθοδολογία βαθμονόμησης.....	47
4.3 Αποτελέσματα βαθμονόμησης για τον αισθητήρα όζοντος.....	48
4.4 Αποτελέσματα βαθμονόμησης για τον αισθητήρα διοξειδίου του αζώτου	50
4.5 Δεύτερη μεθοδολογία βαθμονόμησης.....	51
4.5.1 Σειρές μετρήσεων πριν τον μηδενισμό	53
4.5.2 Σειρές μετρήσεων μετά τον μηδενισμό.....	56
4.5.3 Παρατηρήσεις	58
5. Λειτουργία συστήματος – τοποθέτηση - αποτελέσματα	59
5.1 Λειτουργία συστήματος	59
5.2 Μετρήσεις	60
5.2.1 SPEC Sensors.....	60
5.2.2 HK-A5 sensor.....	61
5.2.3 GPS module NEO-6M	62
5.2.4 Πακέτο πληροφορίας	64
5.3 Τοποθέτηση.....	66
5.4 Αποτελέσματα.....	67
5.4.1 Παρατηρήσεις	69
6. Συμπέρασμα.....	70
Βιβλιογραφία - Αναφορές - Πηγές	71
Παραρτήματα	74

Σχήματα

Σχήμα 1 Δημιουργία διοξειδίου του αζώτου (The Hidden Face of Nitrogen Oxides Species: From Toxic Effects to Potential Cure?, 2018)	19
Σχήμα 2 Συγκέντρωση του όζοντος στην Ευρώπη, (European Environment Agency, 2020)	20
Σχήμα 3 Επίπεδα του ΔτΠ	23
Σχήμα 4 Εξαρτήματα σταθμού μέτρησης	28
Σχήμα 5 Ροή δεδομένων αισθητήρων	29
Σχήμα 6 Ροή λογισμικού	30
Σχήμα 7 NUCLEO-F091RC	31
Σχήμα 8 ESP32-C3 DevKitM-1	33
Σχήμα 9 ESP32-C3-DevKitM-1 Pin Layout	34
Σχήμα 10 Ozone DGS-O3	34
Σχήμα 11 O3 Sensor pins	35
Σχήμα 12 Nitrogen Dioxide DGS-NO2	36
Σχήμα 13 NO2 Sensor pins	37
Σχήμα 14 HK-A5 Laser PM 2.5/10 Sensor	37
Σχήμα 15 HK-A5 functional block diagram	38
Σχήμα 16 GPS Module NEO-6M	39
Σχήμα 17 Grafana logo	41
Σχήμα 18 Διαμόρφωση του NUCLEO	42
Σχήμα 19 Χρησιμοποιούμενοι πόροι του NUCLEO	42
Σχήμα 20 Διαμόρφωση του ESP32	42
Σχήμα 21 Χρησιμοποιούμενοι πόροι του ESP32	43
Σχήμα 22 Σύστημα βαθμονόμησης	46
Σχήμα 23 testo Huminator II	52
Σχήμα 24 Συγκεντρωτικό διάγραμμα προ μηδενισμού αισθητήρα	56
Σχήμα 25 Συγκεντρωτικό διάγραμμα μετά μηδενισμού αισθητήρα	57
Σχήμα 26 Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης	59
Σχήμα 27 Διάγραμμα λειτουργίας συστήματος	60
Σχήμα 28 Μετρήσεις αισθητήρων O ₃ και NO ₂	61
Σχήμα 29 Μέτρηση HK-A5 Laser PM 2.5/10 Sensor	62
Σχήμα 30 Λήψη δεδομένων από το GPS	63
Σχήμα 31 Πλήρες πακέτο πληροφορίας	66
Σχήμα 32 Στίγμα του σταθμού στον χάρτη	66
Σχήμα 33 Συγκέντρωση όζοντος	67
Σχήμα 34 Συγκέντρωση διοξειδίου του αζώτου	68
Σχήμα 35 Θερμοκρασία περιβάλλοντος από αισθητήρα SPEC Sensors	68
Σχήμα 36 Σχετική υγρασία περιβάλλοντος από αισθητήρα SPEC Sensors	69
Σχήμα 37 Συγκέντρωση μικροσωματιδίων PM 1 - 2.5 - 10	69

Πίνακες

Πίνακας 1 Επαφές αισθητήρα O ₃	35
Πίνακας 2 Επαφές αισθητήρα NO ₂	36
Πίνακας 3 Λήψη μετρήσεων O ₃	48
Πίνακας 4 Λήψη μετρήσεων NO ₂	50
Πίνακας 5 testo Huminator II τεχνικά χαρακτηριστικά.....	52
Πίνακας 6 Πρώτη σειρά μετρήσεων πριν τον μηδενισμό.....	54
Πίνακας 7 Δεύτερη σειρά μετρήσεων πριν τον μηδενισμό	54
Πίνακας 8 Τρίτη σειρά μετρήσεων πριν τον μηδενισμό.....	54
Πίνακας 9 Τέταρτη σειρά μετρήσεων πριν τον μηδενισμό	55
Πίνακας 10 Πέμπτη σειρά μετρήσεων πριν τον μηδενισμό	55
Πίνακας 11 Πρώτη σειρά μετρήσεων μετά τον μηδενισμό	56
Πίνακας 12 Δεύτερη σειρά μετρήσεων μετά τον μηδενισμό.....	56
Πίνακας 13 Τρίτη σειρά μετρήσεων μετά τον μηδενισμό	57
Πίνακας 14 Χρήσιμα πεδία πακέτου δεδομένων	63

1. Εισαγωγή

Οι κλιματικές αλλαγές τις τελευταίες δεκαετίες και τα έμμεσα αποτελέσματα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ανθρώπινη υγεία, οδήγησαν στην ανάγκη μέτρησης των αερίων ρύπων και ειδικότερα τη παρακολούθηση του όζοντος, του διοξειδίου αζώτου και των μικροσωματιδίων στο αστικό περιβάλλον της Αττικής. Σε αυτό βοήθησε η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών συστημάτων χαμηλού κόστους και ειδικότερα των ολοκληρωμένων αισθητήρων (Deligiorgi and Philippopoulos, 2011).

Πέρα από το αστικό περιβάλλον η παρακολούθηση των ρύπων αυτών είναι σημαντική και για περιοχές εκτός του αστικού ιστού. Λόγω των συνήθων και έντονων πυρκαγιών στις δασικές περιοχές της Ελλάδας, ένα σύστημα παρακολούθησης με αισθητήρες αερίων και συγκέντρωσης μικροσωματιδίων μπορεί να φανεί εξαιρετικά χρήσιμο αφού μέσω της παρακολούθησης των συγκεκριμένων στοιχείων στην ατμόσφαιρα μπορεί να εντοπιστεί πιθανή πυρκαγιά που βρίσκεται σε εξέλιξη (Findlay and Peaslee, 2022). Στον σχεδιασμό και τη κατασκευή τέτοιων συστημάτων σημαντικό ρόλο έχει τόσο το κόστος του σταθμού όσο και η φορητότά του (Miller, 2021; Castell, 2020).

Με γνώμονα τις παραπάνω απαιτήσεις αναπτύχθηκε σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους, όπου διαθέτει τρεις αισθητήρες και μία μονάδα GPS. Επίσης το σύστημα είναι χαμηλής κατανάλωσης ισχύος, χαρακτηριστικό που δίνει τη δυνατότητα για ευρεία χρήση σε εξωτερικούς χώρους όπου δεν υπάρχει διαθέσιμη ηλεκτρική τροφοδοσία. Ως τρόπος δικτύωσης επιλέχθηκαν τα πρωτόκολλα GPRS και WiFi δίνοντας τη δυνατότητα σύνδεσης σε δίκτυο με σύνδεση στο διαδίκτυο, μέσω του οποίου θα αποστέλλει τα δεδομένα στον κεντρικό σταθμό συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων.

Η πλατφόρμα είναι υπεύθυνη για την αποθήκευση των δεδομένων με δυνατότητα για περαιτέρω επεξεργασία τους. Η δημιουργία διαγραμμάτων αξιοποιώντας τα δεδομένα, η εμφάνιση της θέσης του σταθμού στον χάρτη και η εύκολη πρόσβαση από τους χρήστες οπουδήποτε κι αν είναι αυτοί, είναι τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της προτεινόμενης λύσης. Με την οπτικοποίηση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και σε συνδυασμό με την ευανάγνωστη γεωγραφική ένδειξη των σταθμών, η παρατήρηση των φαινομένων γίνεται ευκολότερη (Lopez-Aparicio, 2021).

1.1 Αιτίες παραγωγής αέριων ρύπων

Οι αιτίες παραγωγής αέριων ρύπων διαφέρουν ανάλογα με τη περιοχή και από την ανθρώπινη δραστηριότητα. Στο πλαίσιο αυτό αρχικά πρέπει να αναφερθούν και να αναλυθούν οι τρόποι με τους οποίους παράγονται οι αέριοι ρύποι. Ο βασικότερος εξ αυτών είναι οι μηχανές εσωτερικής και εξωτερικής καύσης ορυκτών καυσίμων όπως είναι το φυσικό αέριο, η βενζίνη, η κηροζίνη, το πετρέλαιο, το λάδι και το αργό πετρέλαιο. Επίσης ορυκτά καύσιμα αποτελούν οι γαιάνθρακες όπως είναι ο λιγνίτης όπου χρησιμοποιείται ευρέως στην Ελλάδα. Η χρήση των ορυκτών καυσίμων έχει τις ρίζες της από τη βιομηχανική επανάσταση που έλαβε χώρα τον 18^ο αιώνα. Έκτοτε καθιερώθηκαν ως πηγή ενέργειας και οικονομικής ανάπτυξης (Stern and Kander, 2012; Yang et al., 2021).

Οι αέριοι ρύποι δεν συναντώνται μόνο στα μεγάλα αστικά κέντρα, άλλα και σε επαρχιακές περιοχές που είναι αραιοκατοικημένες. Αυτό μας προϋποθέτει ότι η παραγωγή της ατμοσφαιρικής ρύπανσης δεν εξαρτάται μόνο από τον πληθυσμό της κάθε περιοχής αλλά και από τις δραστηριότητες που αναπτύσσονται σε αυτή.

Στα αστικά κέντρα οι αέριοι ρύποι παράγονται στις βιομηχανικές ζώνες που είναι πλησίον της πόλης, από τα μέσα μεταφοράς και από τα νοικοκυριά. Στην επαρχία ο κύριος λόγος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι η βιομηχανική δραστηριότητα και η κτηνοτροφία (Munsif et al., 2021).

Οι βιομηχανικές δραστηριότητες χρησιμοποιούν κυρίως πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Τα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρισμού στην Ελλάδα είχαν ως κύριο καύσιμο τον λιγνίτη, όμως τα τελευταία χρόνια τον έχει αντικαταστήσει το φυσικό αέριο (ΔΑΠΕΕΠ, 2021).

Στα μέσα μεταφοράς κυρίως χρησιμοποιούνται το πετρέλαιο, η βενζίνη και η κηροζίνη. Οι μοτοσυκλέτες και η πλειονότητα των αυτοκινήτων χρησιμοποιούν βενζίνη, αυτοκίνητα, βαριά οχήματα και ναυσιπλοΐα χρησιμοποιούν πετρέλαιο. Βέβαια τα οχήματα δεν χρησιμοποιούν το ίδιο είδος πετρελαίου με αυτό των πλοίων. Τέλος για τη κίνηση των αεροπλάνων χρησιμοποιείται η κηροζίνη.

Τα νοικοκυριά καταναλώνουν πετρέλαιο και φυσικό αέριο για τη θέρμανση και τη λειτουργία του νοικοκυριού. Είναι πιθανό ένα νοικοκυριό να χρησιμοποιεί και τα δύο είδη, παραδείγματος χάρη: πετρέλαιο για θέρμανση και φυσικό αέριο για μαγειρική.

1.2 Επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ανθρώπινη υγεία

Αρχικά πρέπει να διευκρινιστεί ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση επηρεάζει είτε άμεσα είτε έμμεσα ολόκληρο τον πλανήτη και συνεπώς όλους τους ζωντανούς οργανισμούς, ανθρώπους και ζώα.

Οι επιπτώσεις των βλαβερών αερίων και μικροσωματιδίων που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα δεν είναι μια πρόσφατη διαπίστωση. Πλέον δεν ερευνάται εάν οι ρύποι βλάπτουν το ανθρώπινο οργανισμό αλλά σε τι βαθμό τον βλάπτουν. Οι έρευνες για τις επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης εντάθηκαν τα τελευταία 2 χρόνια όπου η ανθρωπότητα αντιμετώπισε μία πρωτοφανή για τον αιώνα μας πανδημία. Η μόνη ανάλογη και συντομότερη παρελθοντικά πανδημία ήταν η Ισπανική γρίπη. Οι έρευνες που έγιναν είναι διηπειρωτικές με αποτέλεσμα μία πιο ευρεία οπτική που δεν περιορίζεται από ένα συγκεκριμένο τρόπο ζωής και κουλτούρας. Παρόλα αυτά τα αποτελέσματα φέρουν μεγάλες ομοιότητες, δείχνοντας ότι πρόκειται για ένα παγκόσμιο φαινόμενο (Pansini and Shi, 2022).

Τα αποτελέσματα των ερευνών δείχνουν ότι στις αστικές περιοχές των χωρών όπου συμμετείχαν, η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι πολλαπλάσια από τις επαρχιακές περιοχές. Τα αέρια στοιχεία που απασχόλησαν ήταν τα εξής: NO₂, CO και HCHO, επίσης τα PM 2.5 και PM 10. Διαπιστώθηκε ότι οι πυκνοκατοικημένες περιοχές και οι περιοχές κοντά σε βιομηχανικές ζώνες, οι τιμές των παραπάνω ρύπων είναι υπερβολικά υψηλές.

Εν κατακλείδι σε περιοχές με υψηλή ατμοσφαιρική ρύπανση παρατηρήθηκαν υψηλότερα ποσοστά θνησιμότητας σε σχέση με περιοχές όπου η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι χαμηλή. Συνεπώς, είναι εύστοχη η συσχέτιση των υψηλών επιπέδων ατμοσφαιρικής ρύπανσης με τα υψηλά επίπεδα θνησιμότητας.

1.3 Τοποθέτηση σταθμού

Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής ο σταθμός θα τοποθετηθεί εντός του αστικού ιστού της Αθήνας, με σκοπό τη λήψη μετρήσεων της περιοχής και την παρατήρησή της μέσω της διαδικτυακής πλατφόρμας. Η στρατηγική επιλογής του σημείου τοποθέτησης του σταθμού στοχεύει να δώσει αποτελέσματα τα οποία μετά τον έλεγχο της αξιοπιστίας τους θα

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

οδηγήσουν στη τοποθέτηση περισσότερων ίδιων συστημάτων σε τοποθεσίες της πόλης και ενδεχομένως της χώρας.

Το χαμηλό κόστος του συστήματος είναι το σημαντικότερο πλεονέκτημα για την επιλογή του σε ένα εγχείρημα με σκοπό την ευρεία τοποθέτηση και παρακολούθηση των τοπικών ατμοσφαιρικών ρύπων με συνακόλουθη την ευρεία γεωγραφική κάλυψη. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι επίσης πλεονέκτημα αποτελεί η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας του συστήματος καθώς και στον χαμηλό ρυθμό και κόστος συντήρησης του συστήματος στην περίπτωση όπου προτιμηθεί η τροφοδοσία του μέσω μπαταρίας.

Ο σταθμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε εφαρμογές εσωτερικού χώρου εφαρμόζοντας σχετικές αλλαγές στις περιοχές μετρήσεων των αισθητήρων και στη λειτουργία του GPS. Διευκρινίζεται ότι η θήκη όπου στεγάζεται το σύστημα δεν διαθέτει ηλεκτρομαγνητική θωράκιση, με αποτέλεσμα να μην ενδείκνυται για εφαρμογές σε τοποθεσίες με ισχυρά ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

1.4 Σκοπός και στόχος

1.4.1 Σκοπός

Το παρόν σύστημα σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε με σκοπό τη λήψη μετρήσεων των συγκεντρώσεων των αέριων ρύπων: διοξείδιο του αζώτου, όζον και μικροσωματιδίων 1μm, 2,5μm και 10μm. Επιπλέον το σύστημα θα πρέπει να έχει χαμηλό κόστος ώστε να αποτελέσει εναλλακτική επιλογή των ακριβών μετρητικών συστημάτων που είναι υπεύθυνα για τη λήψη μετρήσεων των ίδιων φυσικών μεγεθών. Μετά από τον έλεγχο αξιοπιστίας των μετρήσεων αλλά αξιοποιώντας παράλληλα τη δυνατότητα πύκνωσης του δικτύου μέτρησης αλλά και άλλες τεχνικές βελτίωσης της αξιοπιστίας που εδράζονται σε τεχνικές μηχανικής μάθησης.

1.4.2 Στόχος

Στόχος της εργασίας είναι η εφαρμογή των νέων τεχνολογιών για τον σχεδιασμό και τη κατασκευή ενός συστήματος μέτρησης αερίων ρύπων. Εφαρμόζονται αντικείμενα που αποτελούν ένα συνδυασμό γνωστικών περιοχών όπως: μικροεπεξεργαστές, αισθητήρες, προγραμματισμός, διαδικτύωση και ενεργειακό ισοζύγιο.

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

Μέσα από την εφαρμογή των παραπάνω και την επιλογή καθορισμού των προδιαγραφών του συστήματος γίνεται προσπάθεια συγκρότησης ενός ολοκληρωμένου συστήματος αξιόπιστης μέτρησης και καταγραφής της ποιότητας του αέρα αλλά και των αέριων ρύπων.

1.5 Παρόμοια συστήματα

Σε αυτή την ενότητα αναφέρονται παρόμοια συστήματα και παρουσιάζονται περιληπτικά. Οι σταθμοί χρησιμοποιούν αισθητήρες και τεχνολογίες με σκοπό τη μέτρηση και παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και της ποιότητας του αέρα.

1.5.1 Integrated open source air quality monitoring platform

Ένα παρόμοιο σύστημα που αναπτύχθηκε από το εργαστήριο ηλεκτρονικών διατάξεων και υλικών του ΠΑΔΑ και χρησιμοποιεί παρόμοιους αισθητήρες με το σύστημα της παρούσας διπλωματικής. Η δομή σχεδίασης και λειτουργίας είναι ίδια καθώς και η χρήση της διαδικτυακής πλατφόρμας καταγραφής και οπτικοποίησης των δεδομένων. Οι διαφορές εντοπίζονται στην επιλογή της αναπτυξιακής πλακέτας που αποτελεί μονάδα επεξεργασίας και στη προσθήκη πλακέτας που φέρει μπαταρία. Για μονάδα επεξεργασίας και δικτύωσης έχει επιλεγεί η Weemos με συμβατικότητα με Arduino και δυνατότητα σύνδεσης σε δίκτυο WiFi (Christakis et al., 2022).

1.5.2 MoreAir

Το MoreAir είναι ένα σύστημα που διαθέτει αισθητήρα για τη μέτρηση συγκέντρωσης μικροσωματιδίων 2,5 και 10 μm. Τα δεδομένα συλλέγονται σε διαδικτυακή βάση δεδομένων που εν συνεχεία εμφανίζονται σε αντίστοιχη πλατφόρμα. Τα δεδομένα οπτικοποιούνται και παρουσιάζονται βάσει της γεωγραφικής θέσης του συστήματος. Επιπλέον φέρει αισθητήρα DHT22 για λήψη μετρήσεων της θερμοκρασίας και της υγρασίας. Το σύστημα δεν διαθέτει αισθητήρες αερίων και κοστίζει 90 \$ (Gryech et al., 2020).

1.5.3 PurpleAir PA-II

Ο PurpleAir είναι σταθμός χαμηλού κόστους και μικρών διαστάσεων που αναπτύχθηκε με σκοπό τη παρατήρηση της ποιότητας του αέρα. Φέρει αισθητήρες με σκοπό τη λήψη μετρήσεων των μεγεθών: ατμοσφαιρική πίεση, θερμοκρασία, υγρασία, συγκέντρωση μικροσωματιδίων 1, 2,5 και 10 μm. Συγκεκριμένα οι αισθητήρες είναι: ο BME280 και δύο

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

PMS-5003. Διαθέτει δυνατότητα σύνδεσης σε δίκτυο WiFi ώστε να αποστέλλει τα δεδομένα που συλλέγει. Το κόστος του ανέρχεται στα περίπου 260 \$ (Miller, 2021; PurpleAir, 2022).

2. Θεωρητικό υπόβαθρο

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε όλο το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για τον καθορισμό των μετρούμενων παραμέτρων, των προδιαγραφών, και της επιλογής των επιμέρους υποσυστημάτων για τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη του σταθμού μέτρησης.

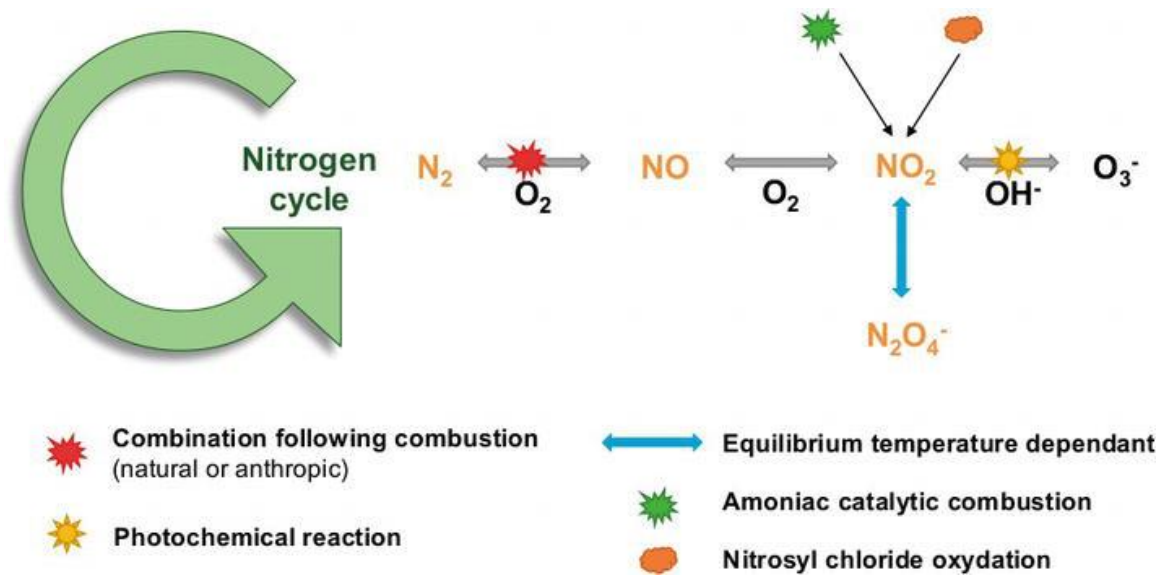
Ειδικότερα παρουσιάζεται η ανάγκη μέτρησης του NO₂, O₃ και της συγκέντρωσης των μικροσωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Επιπλέον παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας των αισθητήρων που επιλέχθηκαν ενώ παράλληλα προσεγγίζεται ο τρόπος δικτύωσης και μεταφοράς δεδομένων αλλά και οι αναγκαίες παράμετροι που καθορίζουν τις προδιαγραφές του συστήματος επεξεργασίας.

2.1 Αέριοι ρύποι ως χημικά στοιχεία

Οι αέριοι ρύποι είναι υπεύθυνοι για αναπνευστικά και καρδιαγγειακά προβλήματα που εμφανίζονται στους ανθρώπους. Οι κύριες χημικές ενώσεις που αναφέρονται στην επιστημονική βιβλιογραφία ως ατμοσφαιρικοί ρύποι είναι: τα οξείδια του αζώτου με κύριο το διοξείδιο του αζώτου, το όζον, το διοξείδιο του θείου και το μονοξείδιο του άνθρακα, τα οποία σε μεγάλες συγκεντρώσεις μπορούν να είναι επικίνδυνες για την ανθρώπινη υγεία. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα αναλυθούν οι αέριοι ρύποι: διοξείδιο του αζώτου και το όζον (Madruga, 2021; Depayras et al., 2018).

2.1.1 Διοξείδιο του Αζώτου

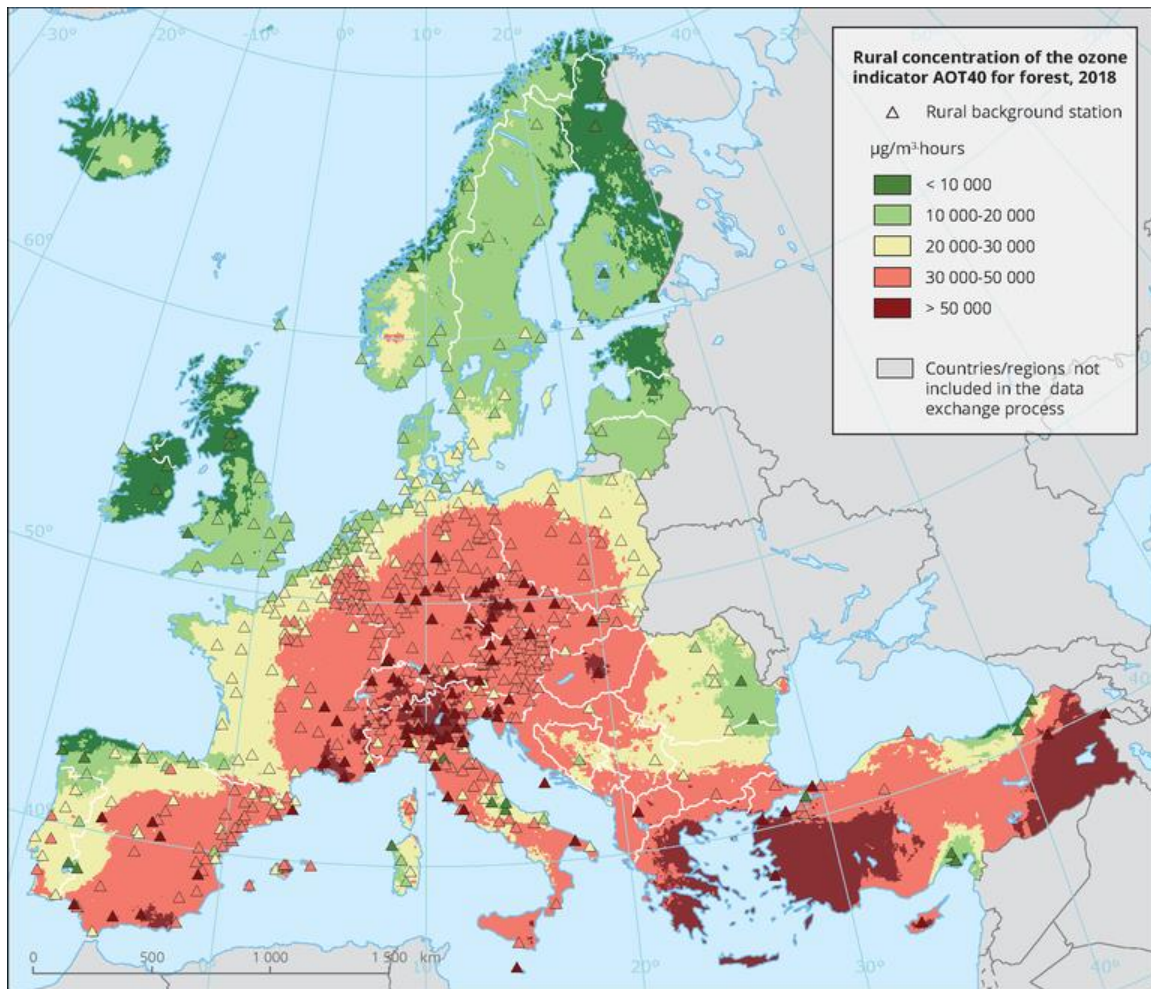
Το διοξείδιο του αζώτου αποτελείται από ένα μόριο αζώτου και δύο μόρια οξυγόνου. Πρόκειται για βασικό τοξικό αέριο ρύπο που δημιουργείται κυρίως από τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Αρχικά υπάρχει ελεύθερο στο περιβάλλον σε διάζωτο (N₂) που σε συνδυασμό με την επερχόμενη καύση του μετατρέπεται σε διοξείδιο του αζώτου, με το φωτοχημικό φαινόμενο μετατρέπεται σε ιόν όζοντος. Η παραπάνω διαδικασία αναπαρίσταται στο σχήμα 1 (Depayras et al., 2018).



Σχήμα 1 Δημιουργία διοξειδίου του αζώτου (*The Hidden Face of Nitrogen Oxides Species: From Toxic Effects to Potential Cure?*, 2018)

2.1.2 Όζον

Το όζον αποτελείται από τρία μόρια οξυγόνου για αυτό αναφέρεται και ως τριοξυγόνο. Πρόκειται για οξειδωτικό και τοξικό αέριο επικίνδυνο για τον ανθρώπινο οργανισμό, όπου με τη μακροχρόνια εισπνοή του προκαλεί πληθώρα παθήσεων όπως αναπνευστικά προβλήματα. Όπως προαναφέρθηκε στη παραπάνω υποενότητα οι ανθρώπινες ενέργειες από τις οποίες παράγεται το όζον αφορούν τη παραγωγή του διοξειδίου του αζώτου, όπου αφορούν τις αιτίες της ατμοσφαιρικής ρύπανση όπως αναλύθηκαν στην ενότητα 1.1 (Madrugá, 2021).



Σχήμα 2 Συγκέντρωση του όζοντος στην Ευρώπη, (European Environment Agency, 2020)

Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται η συγκέντρωση όζοντος στην Ευρώπη ενώ αναδεικνύεται σαφής εξάρτηση με την ανθρώπινη δραστηριότητα αλλά και με τη θέση στη σφαίρα της γης της κάθε περιοχής.

2.2 Ηλεκτροχημικοί αισθητήρες

Η ηλεκτροχημική ανίχνευση αερίου βασίζεται σε αντιδράσεις οξείδωσης αερίων ή αναγωγικές αντιδράσεις σε επιφάνειες ανίχνευσης με καταλυτικό δυναμικό. Στις επιφάνειες αυτές παρατηρούνται αισθητές αλλαγές φορτίου, οι οποίες μπορούν να ενισχυθούν και να υποβληθούν σε επεξεργασία προκειμένου να δημιουργηθεί σήμα. Οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες είναι γρήγοροι, αξιόπιστοι, μικρών διαστάσεων και φθηνοί (Rahman and Asir, 2017).

2.3 Προδιαγραφές

Σε αυτή την ενότητα αναφέρονται οι προδιαγραφές των αισθητήρων και η ταξινόμηση βάσει αυτών καθώς και τα πεδία εφαρμογής των αισθητήρων.

2.3.1 Περιοχές μέτρησης

Το εύρος μέτρησης είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό των αισθητήρων και καθορίζει το πεδίο εφαρμογής του αισθητήρα.

1. Βιομηχανικά κτίρια

Σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις οι απαιτήσεις οδηγούν σε εύρος μέτρησης άνω των 50 ppm. Οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για alarm. Οι αισθητήρες έχουν μικρότερη ευαισθησία από τους υπόλοιπους, αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα καθώς τα μεγέθη των συγκεντρώσεων σε αυτές τις συνθήκες είναι πολύ μεγάλα.

2. Αστικές περιοχές

Στις αστικές περιοχές αντίστοιχα οι απαιτήσεις οδηγούν σε εύρος μέτρησης έως 50 ppm.

3. Οικιακή χρήση

Τέλος για οικιακή χρήση απαιτείται η δυνατότητα μέτρηση σε εύρος έως 5 ppm. Οι αισθητήρες χαρακτηρίζονται ως ευαίσθητοι.

2.3.2 Δειγματοληψία

Οι μετρήσεις λαμβάνονται με τον ρυθμό που επιθυμεί ο χειριστής. Όσο μικρότερος είναι χρόνος δειγματοληψίας τόσο πυκνότερα είναι τα δείγματα που θα δημιουργήσουν το γράφημα της μέτρησης. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται πλουσιότερο σε πληροφορία γράφημα, όμως με την αύξηση του ρυθμού δειγματοληψίας αυξάνεται η κατανάλωση ενέργειας του συστήματος.

Ο ρυθμός δειγματοληψίας με περίοδο 10 λεπτά της ώρας παρέχει ισορροπία ως προς την επαρκή πληροφορία του γραφήματος της μέτρησης και τη κατανάλωση ενέργειας του συστήματος.

2.3.3 Χωροταξία

Η στρατηγική τοποθέτησης των σταθμών είναι υψίστης σημασίας για τη βέλτιστη μέτρηση και παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μίας περιοχής. Σαφώς το πλήθος των

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

σταθμών είναι ένας βασικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη. Στη περίπτωση τοποθέτησης σταθμών σε αστική περιοχή, είναι επιθυμητή η τοποθέτηση ενός σταθμού ανά δήμο ή δημοτική ενότητα. Με αυτό τον τρόπο θα παρακολουθείται το σύνολο της αστικής περιοχής με ακρίβεια. Στη περίπτωση τοποθέτησης σταθμών σε νομό, είναι επιθυμητή η τοποθέτηση σταθμών στο κεντρικό, βόριο, νότιο, ανατολικό και δυτικό τμήμα. Με αυτό τον τρόπο λαμβάνονται επαρκή δεδομένα για τη διεξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Τέλος, σε περίπτωση τοποθέτησης σταθμών σε επίπεδο κλίμακας χώρας θα ήταν επαρκής η τοποθέτηση ενός σταθμού ανά νομό – κρατίδιο – πολιτεία.

Οι διαστάσεις του συστήματος και ο τρόπος λειτουργίας του, του επιτρέπουν να είναι φορητός. Είναι δυνατή η μετακίνησή του για τη λήψη μετρήσεων σε οποιοδήποτε μέρος. Πρέπει να σημειωθεί ότι η θέση του συστήματος περιλαμβάνεται στο πακέτο πληροφορίας που αποστέλλει καθώς διαθέτει μονάδα γεωεντοπισμού.

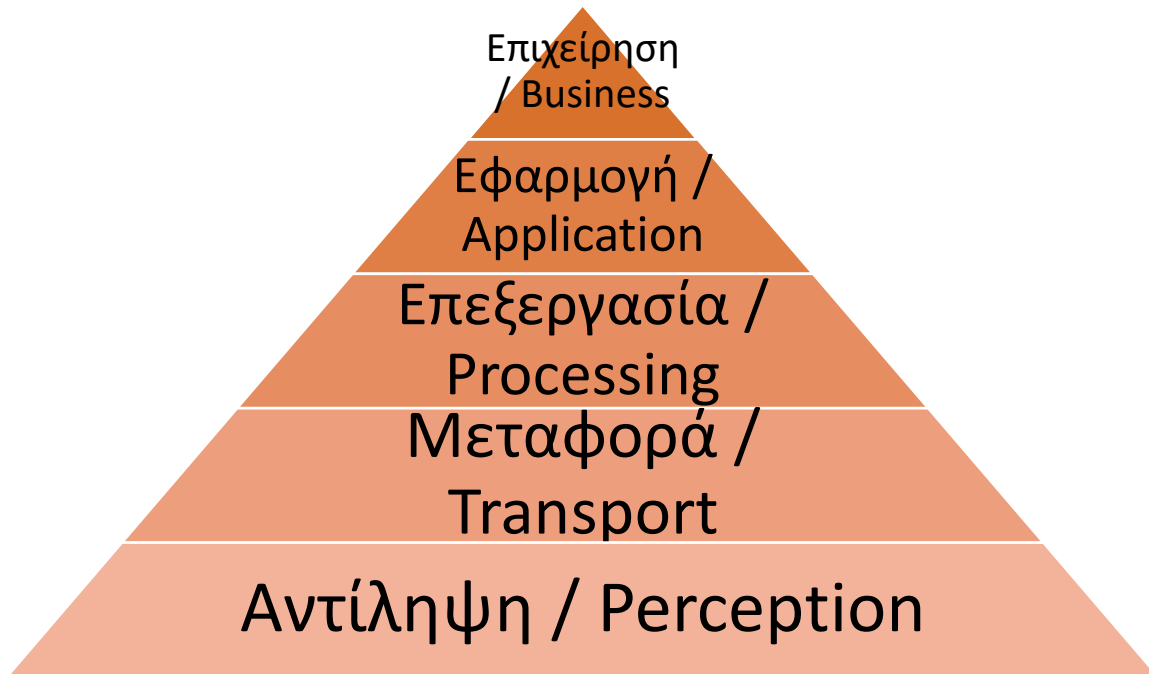
2.4 Διαδίκτυο των Πραγμάτων

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (ΔτΠ) είναι ένα δίκτυο στο οποίο συνδέονται οι συσκευές που διαθέτουν ενεργοποιητές, αισθητήρια και επικοινωνιακά μέσα με σκοπό την επικοινωνία μεταξύ των συσκευών και με το διαδίκτυο (Pal et al., 2018; García Márquez, 2021).

2.4.1 Επίπεδα ΔτΠ

Το ΔτΠ περιγράφεται από πέντε βασικά επίπεδα όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3. Ανάλογα με τον τρόπο προσέγγισης και με την ανάλυση, μπορεί ένα σύστημα ΔτΠ να αναλυθεί σε περισσότερα από πέντε επίπεδα, χωρίς αυτό να καθιστά την ανάλυση των πέντε στρωμάτων ελλιπή (Kumar et al., 2018).

Το κοινό χαρακτηριστικό όλων των στρωμάτων είναι η ασφάλεια που επιβάλλεται να υπάρχει και να είναι ισχυρή. Η προστασία των δεδομένων και το απόρρητο των χρηστών είναι βασική προϋπόθεση στον σχεδιασμό ενός συστήματος ΔτΠ. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται ενδεικτικά τα πέντε επίπεδα ενός συστήματος που ενσωματώνει τεχνολογίες ΔτΠ.



Σχήμα 3 Επίπεδα του ΔτΠ

- **Αντίληψη / Perception layer:** Το επίπεδο της Αντίληψης είναι το κατώτατο επίπεδο του συστήματος. Αφορά τους αισθητήρες (sensors) και τους ενεργοποιητές (actuators) όπου αντιλαμβάνονται και ενεργούν στο περιβάλλον. Σε αυτό το επίπεδο υπάρχουν οι περισσότερες συσκευές και είναι το επίπεδο στο οποίο παράγονται τα δεδομένα του συστήματος.
- **Μεταφορά / Transport layer:** Το επίπεδο της Μεταφοράς αφορά τη μεταφορά δεδομένων είτε μεταξύ των στοιχείων του επιπέδου της Αντίληψης είτε τη μεταφορά δεδομένων στο ανώτερο επίπεδο της Επεξεργασίας. Διακατέχεται από πρωτόκολλα για ασύρματες και ενσύρματες επικοινωνίες, επίσης είναι το επίπεδο με την ευρύτερη και πληθέστερη χρήση πρωτοκόλλων επικοινωνίας.
- **Επεξεργασία / Processing layer:** Το επίπεδο της Επεξεργασίας αφορά την αποθήκευση και επεξεργασία των δεδομένων με τελικό αποτέλεσμα την δημιουργία πληροφορίας. Διαθέτει συσκευές με μεγάλη υπολογιστική ισχύ για τη ταχεία επεξεργασία δεδομένων, όπου πλέον στην αιχμή της τεχνολογίας είναι οι εφαρμογές πραγματικού χρόνου (real-time applications) που απαιτούν να γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων τη στιγμή που αυτά λαμβάνονται. Μπορεί να

υλοποιηθεί σε τοπικό επίπεδο, ομίχλης (FOG computing) ή μπορεί απομακρυσμένα στο νέφος (CLOUD computing).

- **Εφαρμογή / Application layer:** Το επίπεδο της Εφαρμογής αφορά την παροχή υπηρεσιών του συστήματος στον τελικό χρήστη. Οι υπηρεσίες οφείλουν να είναι συγκεκριμένες ανάλογα με την εφαρμογή όπου επιθυμεί ο χρήστης. Σε αυτό το επίπεδο παρουσιάζεται στον χρήστη η εφαρμογή του συστήματος που αναλόγως με τον σχεδιασμό της είναι δυνατόν να αλληλεπιδρά ο χρήστης με το σύστημα.
- **Επιχειρησιακό / Business layer:** Το Επιχειρησιακό επίπεδο είναι το ανώτερο επίπεδο ενός συστήματος ΔτΠ. Αφορά τη διαχείριση όλου του συστήματος και επιβάλλεται να υπάρχουν κανόνες όπου σέβονται το απόρρητο και την ιδιωτικότητα του τελικού χρήστη. Αυτό το επίπεδο αφορά το επιχειρησιακό μέρος του συστήματος όπου είναι δυνατόν να μπορεί ο χρήστης να παραμετροποιήσει τη λειτουργία του σε ό,τι αφορά τη διαχείριση των προσωπικών του δεδομένων.

2.4.2 Αισθητήρες και ενεργοποιητές (Sensors & Actuators)

Οι αισθητήρες και οι ενεργοποιητές απαρτίζουν το επίπεδο της Αντίληψης. Οι αισθητήρες αντιλαμβάνονται το περιβάλλον και γεννούν δεδομένα βάσει αυτού. Αντιστοίχως οι ενεργοποιητές δρουν στο περιβάλλον σύμφωνα με τις εντολές που τους δίνονται, μπορούν να έχουν διάφορες μορφές όπως: διακόπτες, αρπάγες και άλλα.

2.4.3 Τρόποι επικοινωνίας μεταξύ των αντικειμένων

Τα δεδομένα που συλλέγονται από τα αντικείμενα του κατώτερου επιπέδου μεταφέρονται στο επίπεδο της Επεξεργασίας. Η μεταφορά τους μπορεί να γίνει με παραπάνω από έναν τρόπους, που αφορούν το επίπεδο Επικοινωνίας.

Ένας τρόπος είναι κάθε αντικείμενο να αποστέλλει απευθείας τα δεδομένα στα αντικείμενα του επιπέδου Επεξεργασίας. Αυτό προϋποθέτει ότι τα αντικείμενα διαθέτουν τα απαραίτητα χαρακτηριστικά που καθιστούν την επικοινωνία εφικτή.

Άλλος τρόπος είναι η χρήση μεσολαβητή που θα λαμβάνει τα δεδομένα από τα αντικείμενα της Αντίληψης και θα τα μεταφέρει στα αντικείμενα της Επεξεργασίας. Μία συνήθης περίπτωση είναι τα αντικείμενα Αντίληψης να χρησιμοποιούν ενσύρματη επικοινωνία με τον μεσολαβητή και ο μεσολαβητής να χρησιμοποιεί ασύρματη επικοινωνία με τις

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

συσκευές επεξεργασίας. Μπορεί να συμβαίνει και το αντίθετο ή να χρησιμοποιείται μόνο ασύρματη επικοινωνία.

Σε οποιαδήποτε περίπτωση δεν σημαίνει ότι επειδή χρησιμοποιείται ο ίδιος τρόπος επικοινωνίας δηλαδή ενσύρματη ή ασύρματη, ότι χρησιμοποιούνται και τα ίδια πρωτόκολλα. Κάθε πρωτόκολλο έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά και χρησιμοποιείται σε διαφορετική εφαρμογή.

2.4.4 Πρωτόκολλα επικοινωνίας

Υπάρχει πληθώρα πρωτοκόλλων επικοινωνίας που διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τα ενσύρματα και τα ασύρματα. Στην παρούσα υποενότητα θα αναφερθούν τα βασικότερα και ευρέως χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα ανά επίπεδο.

Επίπεδο Αντίληψης:

Τα κυριότερα ενσύρματα πρωτόκολλα είναι: UART, I²C, SPI.

Τα κυριότερα ασύρματα πρωτόκολλα είναι: BLE, WiFi, Cellular, NFC, THREAD, LoRa, ZigBee, Sigfox.

Επίπεδο Μεταφοράς:

Τα ενσύρματα πρωτόκολλα: Ethernet.

Τα ασύρματα πρωτόκολλα: IPv4/IPv6, TCP/UDP, 6LoWPAN.

Για το διαδίκτυο: HTTP, MQTT, CoAP, XMPP, DDS, SMTP, REST.

2.4.5 Υπολογιστικό Νέφος και Υπολογιστική Ομίχλη (Cloud Computing & Fog Computing)

Σε αυτή την υποενότητα παρουσιάζεται περιληπτικά η λειτουργία του υπολογιστικού νέφους και της υπολογιστικής ομίχλης. Επιπλέον αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους (Alimi κ.α., 2021).

Το υπολογιστικό νέφος είναι μία κεντροποιημένη τεχνολογία που εμφανίστηκε πριν από περίπου 20 χρόνια. Πρόκειται για την αποθήκευση, επεξεργασία και παροχή προς τρίτους δεδομένων που όλα αυτά λαμβάνουν χώρο σε έναν διακομιστή (server) που παρέχεται από την εταιρία που διαθέτει το νέφος. Επίσης, μπορεί να υποστηρίξει εφαρμογές στις οποίες

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

ο χρήστης για να εκτελέσει την εφαρμογή δεν χρησιμοποιεί την υπολογιστική ισχύ της συσκευής του αλλά την υπολογιστική ισχύ του server. Αυτή η τεχνολογία χαρακτηρίζεται κεντροποιημένη γιατί όλα συμβαίνουν στον διακομιστή.

Η υπολογιστική ομίχλη είναι μία νεότερη τεχνολογία σε σχέση με το νέφος. Ένας παράγοντας που συνέβαλε στην ανάπτυξή της είναι η αύξηση της υπολογιστικής ισχύος σε οικονομικότερα ολοκληρωμένα κυκλώματα. Πρόκειται για μία τεχνολογία που απευθύνεται στα κατώτερα επίπεδα ενός ΔτΠ σε σχέση με το νέφος. Δηλαδή αντί για τον διακομιστή αφορά τις συσκευές του δικτύου, που όπως παρουσιάζεται στα επόμενα κεφάλαια είναι δυνατόν αυτές οι συσκευές να διαθέτουν πόρους για την επεξεργασία και αποθήκευση των δεδομένων. Οι πόροι που διαθέτουν είναι λιγότεροι από το νέφος (που είναι δυνατή η προσθήκη νέων πόρων ανά πάσα στιγμή αναβαθμίζοντας τη συνδρομή με την εταιρία παροχής), όμως υπάρχει η δυνατότητα για ασφαλέστερη αποθήκευση των δεδομένων, μικρότερη κατανάλωση ενέργειας λόγω των πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούν για να επικοινωνούν μεταξύ τους οι κόμβοι οι οποίοι μπορούν να είναι περισσότεροι από το νέφος.

Ο παρόν σταθμός μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μπορεί να υποστηρίξει και τις δύο τεχνολογίες.

3. Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης

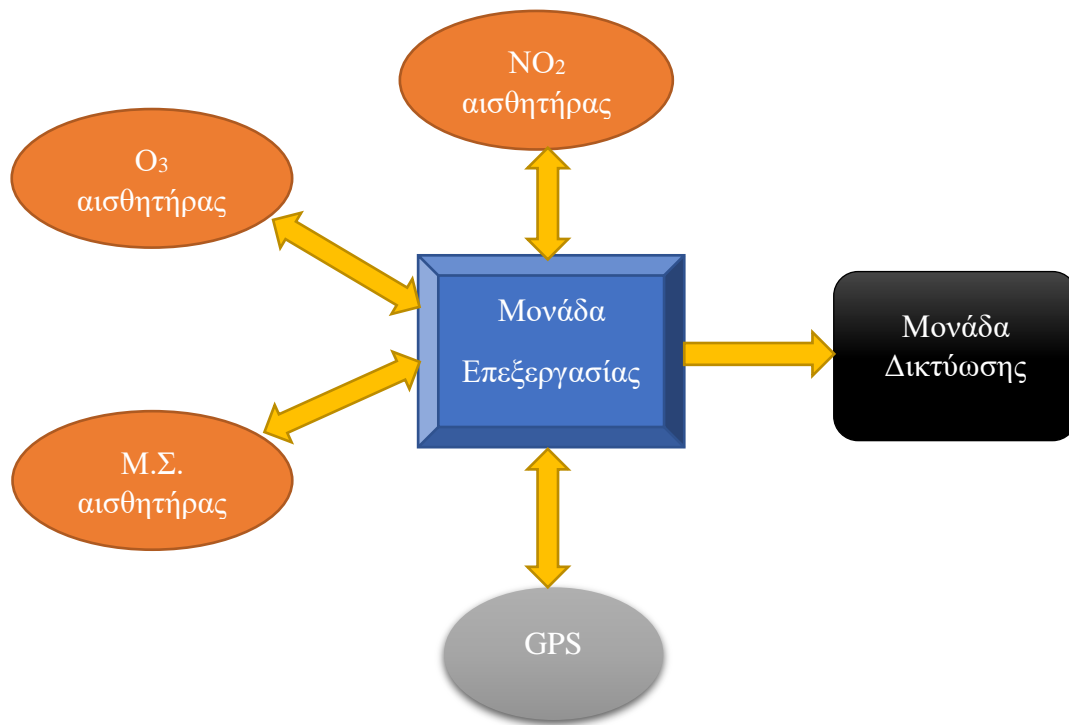
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται ο σταθμός μέτρησης, ειδικότερα δίνονται το γενικό block διάγραμμα του σταθμού και περιγράφεται η λειτουργία του μέσω διαγραμμάτων ροής. Παράλληλα περιγράφονται οι λειτουργικές μονάδες και τα χαρακτηριστικά τους καθώς και οι τεχνικές προδιαγραφές τους όπως προκύπτουν από τα φυλλάδια των κατασκευαστών. Τέλος γίνεται αναλυτική περιγραφή του κεντρικού σταθμού συλλογής και επεξεργασίας καθώς και των επιμέρους λογισμικών με διαγράμματα ροής αλλά και των πρωτοκόλλων επικοινωνίας.

Ο σταθμός ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι ένα σύστημα που αποτελείται από τον συνδυασμό υλισμικού και λογισμικού. Έως τώρα έχουν γίνει αναφορές μονάχα για το υλισμικό μέρος του συστήματος, όπως για το τι είδους αισθητήρες απαιτείται να φέρει.

Το λογισμικό είναι υπεύθυνο για την αξιοποίηση του υλισμικού και για την ομαλή λειτουργία του συστήματος. Όπως το υλισμικό περιγράφεται από απαιτήσεις και προδιαγραφές αντιστοίχως το λογισμικό περιγράφεται από απαιτήσεις και προδιαγραφές. Αυτές τις παραμέτρους τις θέτουν τα προγραμματιζόμενα μέρη του συστήματος, όπου στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι οι δύο αναπτυξιακές πλακέτες που θα χρησιμοποιηθούν ως μονάδα επεξεργασίας και ως μονάδα δικτύωσης.

Αφού ληφθούν υπόψη οι απαιτήσεις και προδιαγραφές του συστήματος επιλέγονται τα κατάλληλα εξαρτήματα και λογισμικά εργαλεία των οποίων ο συνδυασμός θα αποτελέσει το σύστημα, δηλαδή τον σταθμό μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους. Στο block διάγραμμα που ακολουθεί, σχήμα 4, εμφανίζονται τα παραπάνω εξαρτήματα.

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους



Σχήμα 4 Εξαρτήματα σταθμού μέτρησης

Τα δεδομένα που συλλέγονται από τους αισθητήρες αέριων ρύπων ακολουθούν τη ροή όπου παρουσιάζεται στο σχήμα 5.

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

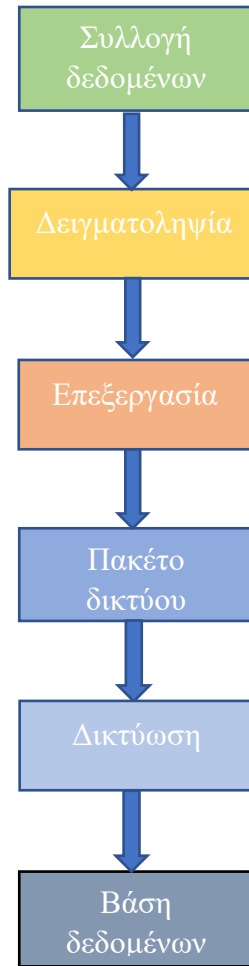


Σχήμα 5 Ροή δεδομένων αισθητήρων

Το φυσικό μέγεθος σε αυτή τη περίπτωση είναι οι αέριοι ρύποι που μεταφράζονται σε ηλεκτρικό μέγεθος από τους αισθητήρες και συγκεκριμένα σε ηλεκτρική τάση. Έπειτα, αυτή η ηλεκτρική τάση μετατρέπεται σε ακολουθία bits μέσω της διαδικασίας της ψηφιοποίησης και με αυτόν τον τρόπο προκύπτει το πακέτο δικτύου που θα φορτωθεί στη μονάδα επεξεργασίας του σταθμού.

Η ροή δεδομένων είναι ένα υποσύνολο της ροής του λογισμικού και κατά επέκταση της λειτουργίας του σταθμού. Μέσω αυτής παρουσιάζεται η συλλογή των δεδομένων όπου είναι η πρώτη διαδικασία που εκτελεί το σύστημα. Εν συνεχεία εκτελούνται οι διαδικασίες όπως παρουσιάζονται στο σχήμα 6 και αποτελούν τη ροή λογισμικού.

Η συλλογή δεδομένων πραγματοποιείται σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα τα οποία απέχουν μεταξύ τους όσο ορίζει ο ρυθμός δειγματοληψίας. Το επόμενο στάδιο αφορά την επεξεργασία των δεδομένων με σκοπό τη δημιουργία πληροφορίας που θα αποτελέσει το πακέτο δικτύου και θα σταλεί στη βάση δεδομένων και στη διαδικτυακή πλατφόρμα. Το ενδιάμεσο επίπεδο είναι αυτό της δικτύωσης το οποίο εκτελείται στη μονάδα δικτύωσης. Τέλος, η βάση δεδομένων είναι ο αποδέκτης της πληροφορίας που αναλαμβάνει την αποθήκευσή της.



Σχήμα 6 Ροή λογισμικού

3.1 Εξαρτήματα

Ως εξαρτήματα αναφέρεται το υλισμικό μέρος του συστήματος. Σε αυτή την ενότητα γίνεται αναφορά στα εξαρτήματα ώστε να υπάρχει μια σύντομη και συγκεντρωτική αναφορά.

Έχουν προαναφερθεί τα είδη υλισμικού που αποτελούν το σύστημα, τα οποία συγκεντρωτικά είναι: δύο (2) αναπτυξιακές πλακέτες, τρεις (3) αισθητήρες εκ των οποίων οι δύο είναι αερίων και ένας μικροσωματιδίων και ένα (1) σύστημα γεωεντοπισμού GPS.

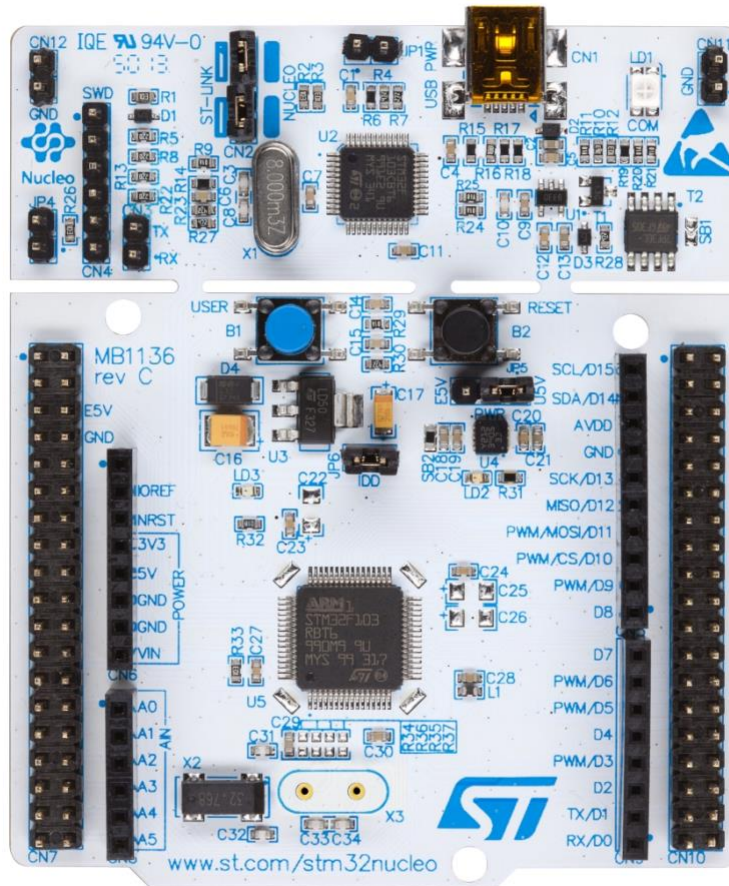
Το σύστημα αποτελείται από:

- Μονάδα επεξεργασίας
- Μονάδα δικτύωσης

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

- Αισθητήρας συγκέντρωσης όζοντος
- Αισθητήρας συγκέντρωσης διοξειδίου του αζώτου
- Αισθητήρας συγκέντρωσης μικροσωματιδίων
- Μονάδα γεωεντοπισμού

3.1.1 Μονάδα επεξεργασίας



Σχήμα 7 NUCLEO-F091RC

Ως μονάδα επεξεργασίας επιλέχθηκε η αναπτυξιακή πλακέτα της εταιρείας STM που φέρει μονάδα μικροελεγκτή (MCU) της σειράς STM32 των 32 bits, εμφανίζεται στο σχήμα 7. Το μοντέλο της πλακέτας είναι το Nucleo-64 που φέρει 64 pins, επίσης είναι συμβατή με τη πλατφόρμα Arduino και σε ό,τι αφορά την συνδεσιμότητα των επαφών της πλακέτας (board connectors). Έχει δυνατότητα υποστήριξης διαφόρων λειτουργικών συστημάτων

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

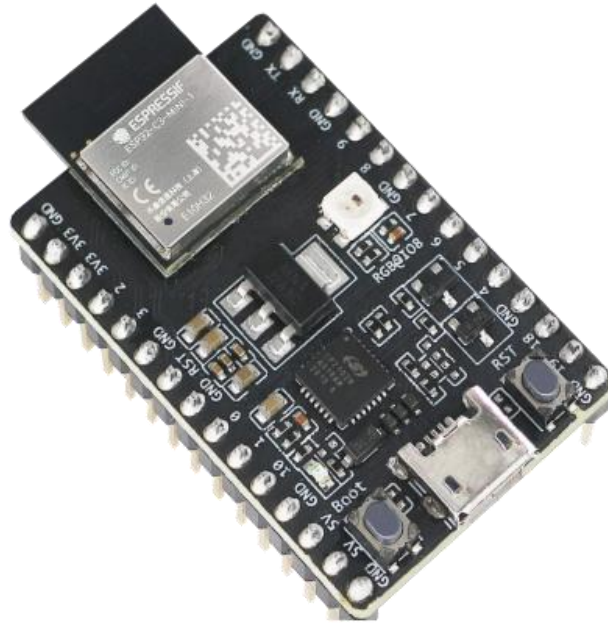
για μικροελεγκτές, μεταξύ αυτών είναι το MbedOS της ARM που είναι και η εταιρία σχεδιασμού της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας (CPU) που φέρει η αναπτυξιακή πλακέτα (ARM, 2022; STM, 2020).

Έχει τα εξής τεχνικά χαρακτηριστικά: STM32F091RCT6 in LQFP64 package, ARM®32-bit Cortex®-M0 CPU, 48 MHz μέγιστη συχνότητα CPU, VDD από 2,0 V έως 3,6 V, παροχή τάσης 3,3 V και 5 V, 256 KB Flash, 32 KB SRAM, GPIO (51) με δυνατότητα εξωτερική διακοπής (external interrupt), 12-bit ADC με 16 κανάλια, 12-bit DAC με 2 κανάλια, 2 Αναλογικοί συγκριτές, RTC, 9 Timers, 2 I²C, 8 USART, 2 SPI, 1 CAN, HDMI CEC, 1 διακόπτη γενικής χρήσης, 1 διακόπτη RESET.

Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή σημαντικά χαρακτηριστικά αποτελούν: το πλήθος των εισόδων – εξόδων γενικού σκοπού (GPIO) που διαθέτει καθώς και το γεγονός ότι διατίθεται σε χαμηλή τιμή. Επιπλέον διαθέτει επεξεργαστή Cortex®-M0 χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας.

Σημαντικό χαρακτηριστικό είναι ότι υποστηρίζεται από πληθώρα εταιριών που παρέχουν τη δική τους δομή εργασίας (framework) και μερικές από αυτές το δικό τους λογισμικό. Πέρα από το προαναφερθέν MbedOS της ARM, χρησιμοποιούνται ευρέως το STM32Cube της STM που είναι η κατασκευάστρια εταιρία της αναπτυξιακής πλακέτας, η δομή εργασίας του Arduino και άλλες λιγότερο γνωστές.

3.1.2 Μονάδα δικτύωσης



Σχήμα 8 ESP32-C3 DevKitM-1

Ως μονάδα δικτύωσης επιλέχθηκε η αναπτυξιακή πλακέτα της Espressif βασισμένη στην σειρά ESP32-C3 των SoC και παρουσιάζεται στο σχήμα 8. Η συγκεκριμένη σειρά είναι χαμηλής κατανάλωσης ισχύος με μονοπύρνηνο επεξεργαστή 32 bits αρχιτεκτονικής RISC-V που υποστηρίζει 2,4 GHz Wi-Fi και Bluetooth Low Energy. Επιπλέον υποστηρίζει Μηχανική Μάθηση για μικροελεγκτές με πληθώρα δυνατοτήτων στην ανάπτυξη εφαρμογών. Ο πηγαίος κώδικας του λειτουργικού συστήματός του είναι διαθέσιμος στο GitHub (Espressif Systems, 2022). Υπάρχουν δύο διαθέσιμες δομές εργασίας το Arduino framework και το Espressif IoT Development framework.

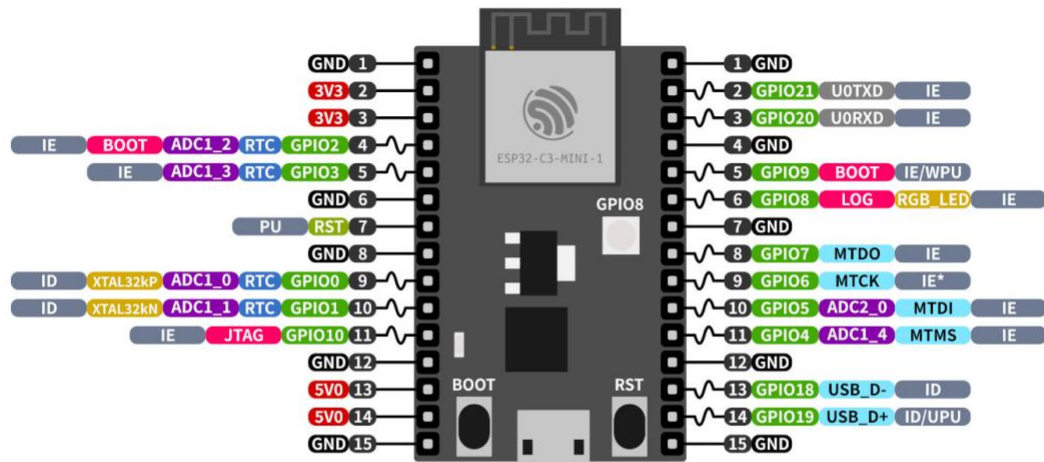
Έχει τα εξής τεχνικά χαρακτηριστικά: 32-bit RISC-V single-core processor με μέγιστη συχνότητα 160 MHz, 384 KB ROM, 400 KB SRAM (16 KB για cache), 4 MB Flash μνήμη, 8 KB SRAM στο RTC, IEEE 802.11 b/g/n-compliant, 20 MHz και 40 MHz bandwidth in 2.4 GHz band, 1T1R mode με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων έως 150 Mbps, Wi-Fi Multimedia (WMM), Bluetooth Low Energy (BLE), TX/RX A-MPDU, TX/RX A-

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

MSDU, παροχή τάσης 3,3 V και 5 V, 22 GPIOs, 3 SPI, 2 UART, 1 I²C, 1 διακόπτη Reset, 1 διακόπτη Boot.

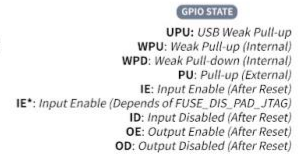
Ακολουθεί το σχηματικό των επαφών της πλακέτας στο σχήμα 9.

ESP32-C3-DevKitM-1



ESP32-C3 Specs

32-bit RISC-V single-core @160MHz
 Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n 2.4GHz
 Bluetooth LE 5
 400 KB SRAM (16 KB for cache)
 384 KB ROM
 22 GPIOs, 3x SPI, 2x UART, I²C,
 I²S, RMT, LED PWM, USB Serial/JTAG,
 GDMA, TWAI[®], 12-bit ADC



Σχήμα 9 ESP32-C3-DevKitM-1 Pin Layout

3.1.3 Αισθητήρας συγκέντρωσης όζοντος



Σχήμα 10 Ozone DGS-O3

Ο Digital Gas Sensor – Ozone της SPEC Sensor είναι ένας ψηφιακός αισθητήρας χαμηλής κατανάλωσης ισχύος που ανιχνεύει το όζον (O₃) στο περιβάλλον και παρουσιάζεται στο

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

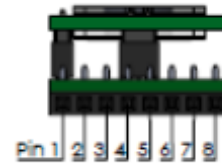
σχήμα 10. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας περιβάλλοντος (SPEC Sensors, 2017).

Τεχνικά χαρακτηριστικά (βασισμένα σε συνθήκες 25 °C, 50% σχετικής υγρασίας και 1 atm): εύρος μέτρησης: από 0 έως 5 ppm, ανάλυση: 20 ppb, ακρίβεια μέτρησης: 15% της αναγνώσιμης τιμής, κατανάλωση ισχύος: σε λειτουργία αναμονής 100μW και σε λειτουργία μέτρησης 14mW, θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας: από -20 έως 40 °C, εύρος λειτουργίας βάσει σχετικής υγρασίας: από 15 έως 95%, ενσωματωμένους αισθητήρες θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, διεπαφή ασύγχρονης σειριακής επικοινωνίας (UART), προσδοκώμενη διάρκεια ζωής: 5 έτη και άνω.

Το πλήθος και η λειτουργία των pins του αισθητήρα εμφανίζονται στο σχήμα 11 και στον πίνακα 1.

Πίνακας 1 Επαφές αισθητήρα O₃

Επαφή	Λειτουργία	Περιγραφή
1	-	
2	RXD	Δέκτης
3	TXD	Πομπός
4	-	
5	-	
6	GND	Γείωση
7	-	
8	V+	Είσοδος τάσης: 3,0 έως 3,6 V



Σχήμα 11 O₃ Sensor pins

Για τη λήψη και εμφάνιση των μετρήσεων χρησιμοποιείται ασύγχρονη σειριακή επικοινωνία με χαρακτηριστικά: Baud: 9600, Data bits: 8, Stop bits: 1, Parity: None, Flow Control: None. Για τον προγραμματισμό και τη χρήση του αισθητήρα διατίθεται από τον κατασκευαστή σχετική βιβλιοθήκη εντολών.

3.1.4 Αισθητήρας συγκέντρωσης διοξειδίου του αζώτου



Σχήμα 12 Nitrogen Dioxide DGS-NO2

Ο Digital Gas Sensor – Nitrogen Dioxide της SPEC Sensor είναι ένας ψηφιακός αισθητήρας χαμηλής κατανάλωσης ισχύος που ανιχνεύει το διοξείδιο του αζώτου (NO₂) στο περιβάλλον και παρουσιάζεται στο σχήμα 12. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας περιβάλλοντος (SPEC Sensors, 2017).

Τεχνικά χαρακτηριστικά (βασισμένα σε συνθήκες 25 °C, 50% σχετικής υγρασίας και 1 atm): εύρος μέτρησης: από 0 έως 5 ppm, ανάλυση: 20 ppb, ακρίβεια μέτρησης: 15% της αναγνώσιμης τιμής, κατανάλωση ισχύος: σε λειτουργία αναμονής 100μW και σε λειτουργία μέτρησης 14mW, θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας: από -20 έως 40 °C, εύρος λειτουργίας βάσει σχετικής υγρασίας: από 15 έως 95%, ενσωματωμένους αισθητήρες θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, διεπαφή ασύγχρονης σειριακής επικοινωνίας (UART), προσδοκώμενη διάρκεια ζωής: 5 έτη και άνω.

Το πλήθος και η λειτουργία των pins του αισθητήρα εμφανίζονται στο σχήμα 13 και στον πίνακα 2.

Πίνακας 2 Επαφές αισθητήρα NO₂

Επαφή	Λειτουργία	Περιγραφή
1	-	
2	RXD	Δέκτης
3	TXD	Πομπός
4	-	
5	-	
6	GND	Γείωση
7	-	

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

8	V+	Είσοδος τάσης: 3,0 έως 3,6 V
---	----	---------------------------------



Σχήμα 13 NO2 Sensor pins

Για τη λήψη και εμφάνιση των μετρήσεων χρησιμοποιείται ασύγχρονη σειριακή επικοινωνία με χαρακτηριστικά: Baud: 9600, Data bits: 8, Stop bits: 1, Parity: None, Flow Control: None. Για τον προγραμματισμό και τη χρήση του αισθητήρα διατίθεται από τον κατασκευαστή σχετική βιβλιοθήκη εντολών.

3.1.5 Αισθητήρας συγκέντρωσης μικροσωματιδίων



Σχήμα 14 HK-A5 Laser PM 2.5/10 Sensor

Ο HK-A5 ο οποίος εμφανίζεται στο σχήμα 14 είναι ένας ψηφιακός αισθητήρας που ανιχνεύει τη συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων στο περιβάλλον της τάξης των 0,3 ~ 10 μm . Ο αισθητήρας βασίζεται στην αρχή της σκέδασης του φωτός στη συγκεκριμένη περίπτωση του λέιζερ. Η ποσότητα του φωτός που εκτρέπεται από τα σωματίδια που διέρχονται από την περιοχή ανίχνευσης του αισθητήρα σωματιδίων μετριέται και χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του πλήθους των σωματιδίων.

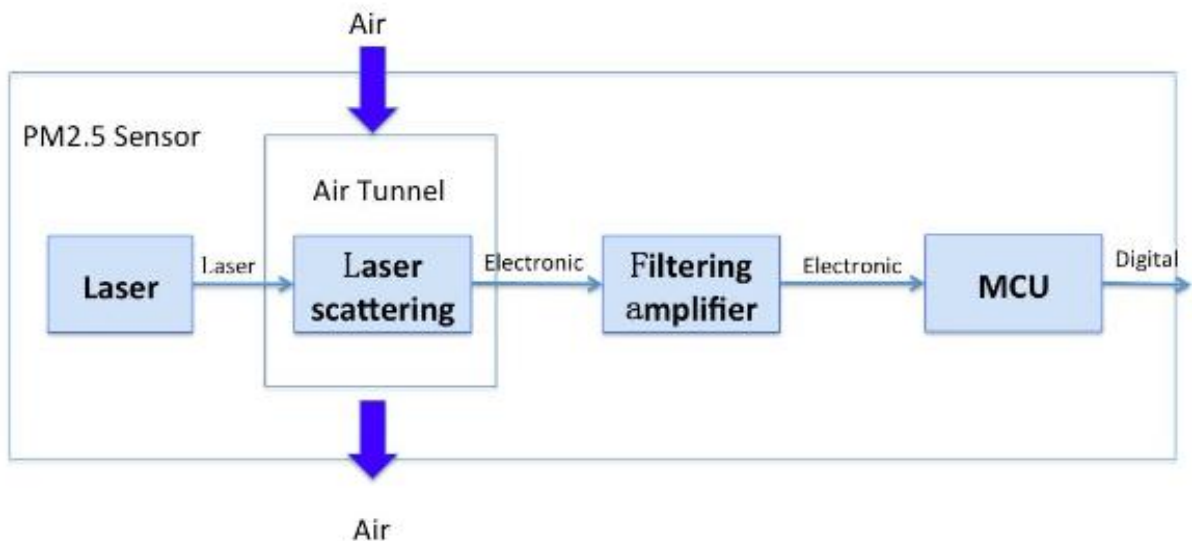
Η συλλογή δεδομένων του μικροεπεξεργαστή, μέσω του μετασχηματισμού Fourier, λαμβάνει τη σχέση μεταξύ πεδίου χρόνου και πεδίου συχνότητας, ακολουθούμενο από μια σειρά πολύπλοκων αλγορίθμων που υπολογίζονται τα σωματίδια ισοδύναμου μεγέθους

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

κόκκου και ανά μονάδα όγκου διαφορετικού μεγέθους σωματιδίου του πλήθους σωματιδίων (HIKE).

Τεχνικά χαρακτηριστικά: εύρος μέτρησης: 0,3 ~ 10 μm , εύρος: 0 ~ 999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ακρίβεια μέτρησης: 50%@0.3 μm , 98% @ $\geq 0.5 \mu\text{m}$, μέγιστος χρόνος απόκρισης: 10 δευτερόλεπτα, τάση λειτουργίας: 5 V, μέγιστο ρεύμα λειτουργίας: 120 mA, θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας: από -20 έως 50 °C, εύρος λειτουργίας βάσει σχετικής υγρασίας: από 0 έως 80%, διεπαφή ασύγχρονης σειριακής επικοινωνίας (UART), προσδοκώμενη διάρκεια ζωής: 5 έτη και άνω.

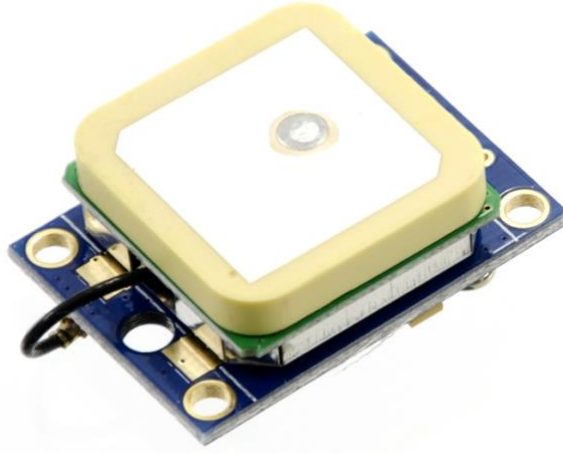
Το διάγραμμα λειτουργίας του αισθητήρα αναπαρίσταται στο σχήμα 15.



Σχήμα 15 HK-A5 functional block diagram

Η αποστολή των δεδομένων γίνεται μέσω πρωτοκόλλου ασύγχρονης σειριακής επικοινωνίας (UART).

3.1.6 Μονάδα γεωεντοπισμού



Σχήμα 16 GPS Module NEO-6M

Το NEO-6M που εμφανίζεται στο σχήμα 16 είναι μια μονάδα που ανήκει στην οικογένεια των αυτόνομων δεκτών GPS που φέρουν το σύστημα εντοπισμού τοποθεσίας u-blox 6. Το u-blox 6 είναι χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και λειτουργεί με τάση από 2,7 έως 3,6 V (u-blox, 2011).

Διαθέτει 50 κανάλια λήψης δορυφορικού σήματος πιο συγκεκριμένα: GPS L1, C/A Code και SBAS: WAAS, EGNOS, MSAS, με αποτέλεσμα την ακριβή λήψη της τοποθεσίας της συσκευής (u-blox, 2013).

Χρήσιμο χαρακτηριστικό είναι τα πρωτόκολλα διεπαφής που διαθέτει, τα οποία συγκεκριμένα είναι τα: UART, USB και SPI.

3.2 Λογισμικά εργαλεία

Τα λογισμικά εργαλεία που επιλέχθηκαν καθορίστηκαν από τις απαιτήσεις του υλισμικού και κατά επέκταση των εξαρτημάτων. Σε αντίθεση με το υλισμικό τα περισσότερα εργαλεία ανάπτυξης κώδικα διατίθενται δωρεάν. Συνήθως οι εταιρίες που είναι υπεύθυνες για την ανάπτυξη των αναπτυξιακών πλακετών ή την ανάπτυξη μικροεπεξεργαστών παρέχουν το δικό τους ολοκληρωμένο αναπτυξιακό περιβάλλον (IDE) ή το δικό τους

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

πλαίσιο εργασίας, με αποτέλεσμα την ευκολότερη και βέλτιστη παραγωγή κώδικα. Σε κάθε περίπτωση ο προγραμματιστής επιλέγει τα εργαλεία που επιθυμεί για την ανάπτυξη της εφαρμογής του.

Για την ανάπτυξη και μεταγλώττιση του κώδικα χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού C++ και τα εξής λογισμικά εργαλεία:

- Visual Studio Code
- PlatformIO
- Grafana

3.2.1 Visual Studio Code

Το Visual Studio Code είναι ένα πρόγραμμα ανάπτυξης και επεξεργασίας κώδικα (code editor), που αναπτύσσει η Microsoft. Προσφέρει δυνατότητες ανάπτυξης κώδικα σε πληθώρα γλωσσών προγραμματισμού.

Επιλέχθηκε γιατί διατίθεται σε αυτό ως επέκταση το PlatformIO που αναλύεται παρακάτω και διευκολύνει την ανάπτυξη κώδικα για πληθώρα αναπτυξιακών πλακετών.

3.2.2 PlatformIO

Το PlatformIO είναι ένα ολοκληρωμένο αναπτυξιακό περιβάλλον (IDE) για εφαρμογές Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT). Βασικό χαρακτηριστικό του είναι ότι διαθέτει δομές εργασίας (frameworks) για τα περισσότερα αναπτυξιακά ενσωματωμένων συστημάτων.

Μέσω αυτού έγινε η ανάπτυξη του κώδικα που χρησιμοποιεί ο NUCLEO-F091RC και ο ESP32-C3. Χρησιμοποιήθηκε το Arduino framework και στις δύο περιπτώσεις, για λόγους απλότητας και συμβατότητας. Με τη μεθοδολογία αυτή είναι δυνατή η ανάπτυξη κώδικα που μπορεί να τρέχει σε διαφορετικές πλατφόρμες (cross platform) χωρίς την ανάγκη τροποποίησης. Αυτό αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό για την εύκολη περαιτέρω ανάπτυξη του συστήματος καθώς και για τη πιθανή αντικατάσταση των υπάρχουσών αναπτυξιακών πλακετών από άλλες ισχυρότερες χωρίς την ανάγκη τροποποίησης ή επανασχεδιασμού πηγαίου κώδικα.

3.2.3 Grafana



Σχήμα 17 Grafana logo

Το Grafana είναι μία διαδικτυακή πλατφόρμα που έχει δυνατότητες επεξεργασίας, οπτικοποίησης δεδομένων και ειδοποίησης των χρηστών σύμφωνα με τα δεδομένα που λαμβάνει σύμφωνα με τους κανόνες που έχουν υλοποιηθεί.

Η οπτικοποίηση γίνεται σε φιλικό για τον προγραμματιστή περιβάλλον με δυνατότητα παραμετροποίησης που διευκολύνει την παρατήρηση των πληροφοριών και διαγραμμάτων από τους χρήστες. Επίσης παρέχονται χάρτες για την εμφάνιση του στίγματος του παρατηρούμενου συστήματος σε πραγματικό χρόνο.

3.3 Κώδικας

Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζεται ο κώδικας τόσο για τη μονάδα επεξεργασίας NUCLEO-F091RC όσο και για τη μονάδα επικοινωνίας ESP32-C3. Ο κώδικας αναπτύχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού C++ και χρησιμοποιήθηκαν βιβλιοθήκες που είτε προσφέρονται από την Arduino όπου παρέχει το framework είτε από άλλους προγραμματιστές που τις διαθέτουν ελεύθερα στο διαδίκτυο. Στον κώδικα περιέχεται η απαραίτητη τεκμηρίωση ώστε να είναι δυνατή η απαραίτητη αποσφαλμάτωση (debugging) αλλά και η περαιτέρω ανάπτυξή του (upgrade).

3.3.1 Κώδικας για το NUCLEO-F091RC

Ο κώδικας που είναι φορτωμένος στο NUCLEO εμφανίζεται στο Παράρτημα 1. Για την γραφή του κώδικα πραγματοποιήθηκε η διαμόρφωση που απεικονίζεται στο σχήμα 18.

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

```
[env:nucleo_f091rc]
platform = ststm32
board = nucleo_f091rc
framework = arduino
lib_deps = fu-hsi/PMS Library@^1.1.0
```

Σχήμα 18 Διαμόρφωση του NUCLEO

Ακολουθεί το σχήμα 19 με τους πόρους που χρησιμοποιεί ο μικροελεγκτής για την εκτέλεση του κώδικα. Είναι εμφανές ότι ο κώδικας δεσμεύει λίγους πόρους από το σύστημα, επιτρέποντας στον προγραμματιστή την περεταίρω ανάπτυξη εφαρμογών δίχως προβληματισμούς για τον όγκο δεδομένων.

```
RAM: [= ] 8.3% (used 2704 bytes from 32768 bytes)
Flash: [= ] 8.7% (used 22752 bytes from 262144 bytes)
```

Σχήμα 19 Χρησιμοποιούμενοι πόροι του NUCLEO

3.3.2 Κώδικας για το ESP32-C3

Ο κώδικας που είναι φορτωμένος στο ESP32 εμφανίζεται στο Παράρτημα 2. Για την γραφή του κώδικα πραγματοποιήθηκε η διαμόρφωση όπου απεικονίζεται στο σχήμα 20.

```
[env:esp32-c3-devkitm-1]
platform = espressif32
board = esp32-c3-devkitm-1
framework = arduino
lib_deps =
  khoih-prog/ESP_WifiManager@^1.12.1
  plerup/EspSoftwareSerial@^6.17.0
  ayushsharma82/EasyDDNS@^1.8.0
```

Σχήμα 20 Διαμόρφωση του ESP32

Ακολουθεί το σχήμα 21 με τους πόρους που χρησιμοποιεί ο μικροελεγκτής για την εκτέλεση του κώδικα. Λόγω των σύνθετων βιβλιοθηκών που χρησιμοποιεί για την σύνδεση σε δίκτυο WiFi και την ασφαλή αποστολή των δεδομένων μέσω αυτού, δεσμεύεται περισσότερος χώρος στην μνήμη Flash.

```
RAM: [ = ] 10.8% (used 35244 bytes from 327680 bytes)
Flash: [ ===== ] 66.5% (used 871504 bytes from 1310720 bytes)
```

Σχήμα 21 Χρησιμοποιούμενοι πόροι του ESP32

3.6 Δυνατότητες επέκτασης

3.6.1 Συνδεσιμότητα

Η επιλογή της προσθήκης της αναπτυξιακής πλακέτας ESP32-C3 προσφέρει στο σύστημα σύγχρονες και καινοτόμες τεχνολογίες, πέρα από τη σύνδεση σε δίκτυο WiFi. Ξεκινώντας από βασικά απλά πλεονεκτήματα, αναφέρεται η δυνατότητα μεγαλύτερης ενσύρματης και ασύρματης συνδεσιμότητας. Σε ό,τι αφορά την ενσύρματη συνδεσιμότητα τα χαρακτηριστικά αναφέρονται στην ενότητα 3.3.2. Επιπροσθέτως για την ασύρματη συνδεσιμότητα υποστηρίζει το πρωτόκολλο THREAD με τη δυνατότητα mesh, ενδείκνυται στη περίπτωση της χρήσης πολλαπλών σταθμών με μικρή απόσταση μεταξύ τους κυρίως σε εσωτερικό χώρο. Η δυνατότητα mesh επιτρέπει την επικοινωνία και ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των σταθμών, με αποτέλεσμα να μην απαιτείται από όλους του σταθμούς να έχουν σύνδεση με το διαδίκτυο αλλά είναι δυνατόν να έχει μόνο ένας από αυτούς. Ο οποίος θα είναι υπεύθυνος για το ανέβασμα όλων των πληροφοριών στη διαδικτυακή πλατφόρμα. Τέλος, ο σχεδιασμός του συστήματος προβλέπει τη δυνατότητα υποστήριξης πρωτοκόλλων επικοινωνίας χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας με μεγάλη γεωγραφική κάλυψη, όπως είναι το LoRa, με τη χρήση της κατάλληλης επέκτασης που προσφέρετε από την STM για τον Nucleo.

3.6.2 Λογισμικό

Σε επίπεδο λογισμικού το σύστημα διαθέτει κατάλληλη υπολογιστική ισχύ για να υποστηρίξει πολυπλοκότερες εφαρμογές και περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων σε τοπικό επίπεδο χωρίς την ανάγκη σύνδεσης στο διαδίκτυο.

Είναι δυνατή η υποστήριξη αλγορίθμων διόρθωσης σφαλμάτων μέτρησης αέριων ρύπων, ξεπερνώντας με αυτό τον τρόπο πιθανές λανθασμένες μετρήσεις που μπορεί να οφείλονται σε εξωγενείς παράγοντες.

Επιπλέον ο ESP32-C3 μπορεί να υποστηρίξει μοντέλα μηχανικής μάθησης δίνοντας στο σύστημα τέτοια χαρακτηριστικά και δυνατότητες. Τέλος ο Nucleo μπορεί να υποστηρίξει

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

πληθώρα λειτουργικών συστημάτων για μικροελεγκτές, αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα που προσφέρει το καθένα.

3.6.3 Διαδίκτυο των Πραγμάτων

Το σύστημα διαθέτει δυνατότητες υποστήριξης Διαδικτύου των Πραγμάτων που μπορούν να υλοποιηθούν είτε άμεσα από τον ESP32 είτε έμμεσα από τη Grafana. Το σύστημα μπορεί να υποστηρίξει λειτουργίες Cloud computing και Fog computing. Ενδεικτικά αναφέρονται υπηρεσίες που μπορούν να υλοποιηθούν σε επόμενη έκδοση του συστήματος:

- 1) Αποστολή μηνύματος ειδοποίησης μέσω ηλεκτρονικού ταχυδρομείου στους χρήστες ή σε αρμόδια υπηρεσία.
- 2) Ενεργοποίηση τοπικού συναγερμού σε περιπτώσεις που οι τιμές αερίων είναι υπερβολικά υψηλές για μεγάλο χρονικό διάστημα.
- 3) Ενεργοποίηση και έλεγχο λειτουργίας μονάδας εξερισμού σε περίπτωση που το σύστημα έχει τοποθετηθεί σε εσωτερικό χώρο και η κατάσταση της ατμόσφαιρας δεν είναι η επιθυμητή. Σε περίπτωση που στο συγκεκριμένο κτίριο έχει εγκατασταθεί πλήθος σταθμών και χρησιμοποιούν την τεχνολογία mesh, τότε η τμηματική λειτουργία του εξερισμού μπορεί να διαφέρει, εάν φυσικά το υποστηρίζει η μονάδα εξερισμού.

3.7 Πεδία βελτίωσης

Το σημαντικότερο αρνητικό είναι ότι οι ψηφιακοί αισθητήρες αερίων επηρεάζονται από τη σχετική υγρασία περιβάλλοντος. Με αποτέλεσμα υπερβολικά υψηλές τιμές συγκέντρωσης των αερίων, πολλαπλάσιες από την πραγματική τιμή τους. Ευτυχώς αυτό δεν είναι σύνηθες φαινόμενο και επίσης για να συμβεί θα πρέπει η σχετική υγρασία να είναι μεγαλύτερη από 80 με 85%. Παρατηρήθηκε μη γραμμική συμπεριφορά κατά την διάρκεια του φαινομένου από τον αισθητήρα.

Ένα χαρακτηριστικό του συστήματος που μπορεί και πρέπει να βελτιωθεί είναι η υλοποίηση περισσότερων πρωτοκόλλων επικοινωνίας αφού το σύστημα που υλοποιήθηκε σε αυτή τη πρώτη έκδοση στέλνει δεδομένα μόνο μέσω WiFi. Μπορεί σχετικά εύκολα να υλοποιήσει και συνδέσεις σε δίκτυα LoRa, GPRS και άλλα.

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

Τέλος, σημαντικό θα ήταν το λογισμικό του συστήματος να μπορεί να ενημερωθεί μέσω του διαδικτύου. Αυτή τη στιγμή η ενημέρωση των λογισμικών που τρέχουν οι αναπτυξιακές πλακέτες είναι εφικτή μόνο μέσω ενσύρματης σύνδεσης με υπολογιστή.

4. Βαθμονόμηση συστήματος και αισθητήρων

Για τη διασφάλιση της καλύτερης δυνατής ποιότητας των μετρήσεων του διοξειδίου του αζώτου και του όζοντος, σχεδιάστηκε, αναπτύχθηκε και αξιολογήθηκε πρωτόκολλο βαθμονόμησης των αισθητήρων χρησιμοποιώντας πρότυπα όργανα στον χώρο της εταιρίας Χημική Τεχνική που εδρεύει στα Σπάτα Αττικής.

4.1 Σύστημα βαθμονόμησης

Η κατασκευή που χρησιμοποιήθηκε για τη βαθμονόμηση των αισθητήρων της SPEC Sensors όζοντος (O_3) και διοξειδίου του αζώτου (NO_2) απεικονίζεται στο σχήμα 22 που ακολουθεί.



Σχήμα 22 Σύστημα βαθμονόμησης

Πρόκειται για πλαστική κυλινδρική διάταξη με ύψος περίπου 15 εκατοστών και διάμετρο περίπου 7 εκατοστών, το οποίο και στις δύο πλευρές του αποτελείται από βιδωτά καπάκια με αεροστεγή μόνωση από σιλικόνη. Στο επάνω μέρος το καπάκι διαθέτει τρεις οπές, οι οποίες καλύπτονται αεροστεγές κάλυμμα με δυνατότητα διέλευσης λαστιχένιου αγωγού, αερίου ή ηλεκτρικών συνδέσεων.

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

Μέσω του ενός αγωγού διέλευσης πραγματοποιείται η ηλεκτρική σύνδεση του αισθητήρα μέσω πρωτοκόλλου USB με το υπολογιστικό σύστημα στο οποίο εισάγονται οι πρότυπες τιμές των μετρούμενων μεγεθών ώστε να επιτευχθεί ο μηδενισμός του αλλά και ο έλεγχος αξιοπιστίας των μετρήσεων όταν αυτός βρίσκεται σε ελεγχόμενο περιβάλλον. Ο δεύτερος αγωγός διέλευσης χρησιμοποιείται για να οδηγήσει στο σύστημα βαθμονόμησης καθαρό αέρα από αντίστοιχη εξωτερική πηγή.

Τέλος μέσω του τρίτου αγωγού διέλευσης οδηγείται δοχείο νερού 35 ml ώστε να εξασφαλίζεται η υψηλότερη πίεση μέσα στο δοχείο βαθμονόμησης.

4.2 Πρώτη μεθοδολογία βαθμονόμησης

Η μεθοδολογία βαθμονόμησης (ZERO) για τους αισθητήρες της SPEC Sensors αποτελείται από οκτώ (8) διαδοχικά βήματα, όπως παρουσιάζονται στη συνέχεια:

Βήματα

1. Ο αισθητήρας τοποθετείται στο δοχείο δοκιμής και παραμένει σε λειτουργία για 30 λεπτά σε συνθήκες περιβάλλοντος.
2. Λαμβάνεται σειρά μετρήσεων (30 τιμές ανά 5 δευτερόλεπτα). Τα αποτελέσματα του βήματος αυτού παρουσιάζονται στη δεύτερη στήλη του Πίνακα 3.
3. Το δοχείο δοκιμής σφραγίζεται αεροστεγώς.
4. Το δοχείο δοκιμής πληρώνεται με Άζωτο για διάρκεια 5 λεπτών.
 - Πίεση Άζωτου στο δοχείο δοκιμής 1,2 Bar.
 - Σχετική υγρασία στο δοχείο δοκιμής 25%.
5. Το δοχείο δοκιμής απομονώνεται σφραγισμένο για μία ώρα (περιέχει μόνο Άζωτο).
6. Στη συνέχεια ακολουθεί πλήρωση του δοχείου δοκιμής με Άζωτο για διάρκεια 5 λεπτών.
 - Λαμβάνονται μετρήσεις (30 τιμές ανά 5 δευτερόλεπτα). Τα αποτελέσματα του βήματος αυτού παρουσιάζονται στη τρίτη στήλη του Πίνακα 3.
 - Στη συνέχεια και μέσω του υπολογιστικού συστήματος καθορίζεται ο μηδενισμός του.

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

- Λαμβάνονται μετρήσεις κυμάτωσης (30 τιμές ανά 5 δευτερόλεπτα). Τα αποτελέσματα του βήματος αυτού παρουσιάζονται στη τέταρτη στήλη του Πίνακα 3.

7. Ακολουθεί η αποσφράγιση του δοχείου δοκιμής και παράμενε σε συνθήκες περιβάλλοντος για 10 λεπτά.
8. Τέλος λαμβάνεται σειρά μετρήσεων (30 τιμές ανά 5 δευτερόλεπτα) σε συνθήκες περιβάλλοντος. Τα αποτελέσματα του βήματος αυτού παρουσιάζονται στη πέμπτη στήλη του Πίνακα 3.

4.3 Αποτελέσματα βαθμονόμησης για τον αισθητήρα όζοντος

Για τον αισθητήρα του όζοντος λήφθηκαν οι τιμές που συμπληρώνουν τον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3 Λήψη μετρήσεων O₃

Μετρήσεις O ₃ (ppb)				
	Περιβάλλον χωρίς αδρανή ατμόσφαιρα	Περιβάλλον με αδρανή ατμόσφαιρα	Περιβάλλον με αδρανή ατμόσφαιρα μετά τον μηδενισμό	Περιβάλλον χωρίς αδρανή ατμόσφαιρα μετά τον μηδενισμό
	T = 24 °C	T = 24 °C	T = 24 °C	T = 24 °C
Χρονική στιγμή (seconds)	RH = 37 %	RH = 25 %	RH = 25 %	RH = 37 %
0	30	1	-4	12
5	27	-12	4	12
10	20	-7	0	6
15	35	1	2	14
20	28	13	-3	7
25	34	6	1	12
30	37	8	2	3
35	27	8	1	2
40	16	4	-3	6
45	32	14	1	0
50	30	18	1	13
55	24	11	-2	12

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

60	30	1	6	-4
65	24	3	2	4
70	18	9	2	-3
75	13	14	-3	1
80	28	6	11	7
85	16	2	-2	19
90	32	14	-9	12
95	17	19	1	22
100	34	20	-4	6
105	28	3	-8	16
110	33	6	-3	12
115	29	-4	3	-4
120	16	17	-11	4
125	25	4	-2	12
130	27	16	2	17
135	29	14	11	-13
140	27	18	4	9
145	22	9	4	11
Τυπική απόκλιση	6,34	7,82	4,85	7,55
Μέση τιμή	26,27	7,87	0,13	7,57

Το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι οι μετρήσεις αερίων έπειτα από τη βαθμονόμηση να είναι μηδέν ή όσο πιο κοντά στο μηδέν. Δεδομένων των χαρακτηριστικών του αισθητήρα αλλά και το γεγονός ότι πρόκειται για σύστημα χαμηλού κόστους, αν παρατηρήσει κανείς τις τιμές που προκύπτουν ως αποτέλεσμα βλέπει ότι κυμαίνονται πλέον γύρω και πολύ κοντά στο μηδέν.

Ειδικότερα στη στήλη 2 των μετρήσεων του όζοντος παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές από τη στήλη 5 όπου απεικονίζονται οι τιμές των μετρήσεων με τις ίδιες συνθήκες, με τη διαφορά ότι έχει προηγηθεί η βαθμονόμηση του αισθητήρα.

Επίσης η μέση τιμή της στήλης 4 όπου πρόκειται για τις τιμές στις συνθήκες όπου έγινε η βαθμονόμηση είναι εξαιρετική καθώς βρίσκεται πολύ κοντά στο μηδέν.

Η τελευταία συνθήκη μέτρησης έγινε με σκοπό τη σύγκριση με τη στήλη 2 και την ανάδειξη αποτελεσματικότητας της βαθμονόμησης.

4.4 Αποτελέσματα βαθμονόμησης για τον αισθητήρα διοξειδίου του αζώτου

Για τον αισθητήρα του διοξειδίου το αζώτου λήφθηκαν οι τιμές που συμπληρώνουν τον πίνακα 4.

Πίνακας 4 Λήψη μετρήσεων NO₂

Μετρήσεις NO ₂ (ppb)				
	Περιβάλλον χωρίς αδρανή ατμόσφαιρα	Περιβάλλον με αδρανή ατμόσφαιρα	Περιβάλλον με αδρανή ατμόσφαιρα μετά τον μηδενισμό	Περιβάλλον χωρίς αδρανή ατμόσφαιρα μετά τον μηδενισμό
	T = 22 °C	T = 22 °C	T = 22 °C	T = 22 °C
Χρονική στιγμή (seconds)	RH = 35 %	RH = 32 %	RH = 10 %	RH = 34 %
0	105	110	57	-61
5	61	126	36	8
10	77	105	57	-40
15	73	101	61	-24
20	77	89	32	-4
25	69	81	69	12
30	57	138	8	-28
35	65	130	57	-40
40	69	97	73	-16
45	81	105	44	-24
50	61	138	40	-24
55	24	134	20	0
60	57	101	36	-8
65	65	101	85	-32
70	52	146	61	-44
75	85	89	44	-28
80	52	81	73	-12
85	97	101	77	-36
90	73	110	69	-36
95	81	126	48	-52
100	61	142	85	-4
105	61	118	36	-16

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

110	52	101	69	-28
115	69	126	48	-16
120	93	126	57	-48
125	48	150	36	0
130	93	146	40	-8
135	77	118	81	-4
140	28	69	77	12
145	101	97	69	-24
Τυπική απόκλιση	19,13	21,66	19,62	19,08
Μέση τιμή	68,80	113,40	54,83	-20,83

Σε αυτή την περίπτωση έγινε βαθμονόμηση με σχετική υγρασία 10% με σκοπό την επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων στο πεδίο. Οι τιμές που συμπληρώνουν τις στήλες 4 και 5 του πίνακα 4 είναι αποδεκτές αν και σε σύγκριση με τις τιμές της βαθμονόμησης του αισθητήρα του όζοντος, είναι φαινομενικά χειρότερες. Να σημειωθούν εδώ ότι πολλοί αισθητήρες που αξιοποιούν αυτή τη μεθοδολογία μέτρησης παρουσιάζουν το φαινόμενο της επίδρασης, δηλαδή της αλλοίωσης στις τιμές μέτρησης και από άλλα πιθανά στοιχεία που περιέχονται στον αέρα.

Με βάση τα παραπάνω πρέπει να σημειωθεί ότι σε δοκιμές στο πεδίο ο αισθητήρας του NO₂ φαίνεται να έχει καλύτερη απόδοση από τον αισθητήρα του O₃.

4.5 Δεύτερη μεθοδολογία βαθμονόμησης

Με δεδομένο ότι οι διαδικασίες βαθμονόμησης τέτοιων συστημάτων δεν έχουν βιβλιογραφικά μελετηθεί και καθοριστεί κρίθηκε απαραίτητη η πραγματοποίηση σειράς μετρήσεων με στόχο τη βαθμονόμηση σε πρότυπο σύστημα μέτρησης. Αξιοποιώντας την εμπειρία από τη πρώτη διαδικασία βαθμονόμησης και τις ακόλουθες μετρήσεις πεδίου το πρωτόκολλο βαθμονόμησης τροποποιήθηκε και αναλυτικά περιγράφεται η διαδικασία και τα αποτελέσματά της στην ενότητα αυτή.

Αρχικά κρίθηκε σκόπιμο να ληφθούν μετρήσεις για διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας με τη χρήση θαλάμου με αέρα περιβάλλοντος και όχι με άζωτο όπως στη προηγούμενη μεθοδολογία. Η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία ρυθμίζονται από

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

την οθόνης αφής που φέρει ο θάλαμος. Ο θάλαμος που χρησιμοποιήθηκε είναι ο testo Huminator II όπως εμφανίζεται στο σχήμα 23.



Σχήμα 23 testo Huminator II

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του θαλάμου αποτυπώνονται στον πίνακα 5.

Πίνακας 5 testo Huminator II τεχνικά χαρακτηριστικά

Χαρακτηριστικά	Θερμοκρασία	Υγρασία
Εύρος μέτρησης και ελέγχου	5 έως 50 °C	5 έως 95 % RH
Σταθερότητα	$\pm 0,02$ °C (στους 25 °C και 50% RH)	$\pm 0,3\%$ RH (10 έως 80% RH στους 10 έως 40 °C) $\pm 0,5\%$ RH (υπόλοιπο εύρος μέτρησης)

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

Ακρίβεια του probe στους 25 °C	$\pm 0,15 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm (1,0\% \text{ RH} + 0,007 \times \text{μετρούμενη τιμή})$ για 0 έως 90% RH
Ομοιογένεια	$\pm 0,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,5\% \text{ RH}$
Χρόνος σταθεροποίησης	3' (από 35 έως 80% RH στους 25 °C)	
Συνθήκες περιβάλλοντος	$20 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$	
Τυπική συνολική αβεβαιότητα μέτρησης της βαθμονόμησης (k=2)	$\pm 0,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (10 έως 85% RH στους 25 °C) $\pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (υπόλοιπο εύρος μέτρησης)	$\pm 1,5\% \text{ RH}$ (10 έως 85% RH στους 25 °C) $\pm 2,0\% \text{ RH}$ (υπόλοιπο εύρος μέτρησης)

Αρχικά λήφθηκαν σειρές μετρήσεων οι οποίες θα εξηγηθούν αναλυτικά στη συνέχεια, ακολουθεί η διαδικασία μηδενισμού του αισθητήρα και εν συνεχεία λαμβάνονται νέες σειρές μετρήσεων για συγκεκριμένες τιμές θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας.

Τα μεγέθη που καταγράφονται είναι τα ακόλουθα:

- Tr: Πραγματική θερμοκρασία (ορίζεται ως η θερμοκρασία που εμφανίζει ο θάλαμος).
- Ts: Θερμοκρασία αισθητήρα (ορίζεται ως η θερμοκρασία που εμφανίζει ο αισθητήρας).
- Hr: Πραγματική σχετική υγρασία (ορίζεται ως η σχετική υγρασία που εμφανίζει ο θάλαμος)
- Hs: Σχετική υγρασία αισθητήρα (ορίζεται ως η σχετική υγρασία που εμφανίζει ο αισθητήρας).

4.5.1 Σειρές μετρήσεων πριν τον μηδενισμό

Η πρώτη σειρά μετρήσεων λήφθηκε με σταθερή θερμοκρασία 25 °C παρουσιάζεται στον πίνακα 6. Επιλέχθηκε βήμα ανόδου σχετικής υγρασίας 10%.

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

Πίνακας 6 Πρώτη σειρά μετρήσεων πριν τον μηδενισμό

Μέτρηση σχετικής υγρασίας από το πρότυπο όργανο	Μέτρηση σχετικής υγρασίας από τον αισθητήρα	Συγκέντρωση μικροσωματιδίων
Hr (%), Tr = 25 °C	Hs (%), Ts = 27 °C	ppb
16,33	18	0
26	28	0
35	37	1
45	47	2
55	56	3
65	65	4
75	74	9
86	83	34
93	93	110

Η δεύτερη σειρά μετρήσεων λήφθηκε με σταθερή θερμοκρασία 30 °C παρουσιάζεται στον πίνακα 7. Επιλέχθηκε να παρθούν μετρήσεις για συγκεκριμένες τιμές υγρασίας: μία πολύ χαμηλή τιμή, μία πολύ υψηλή τιμή και μία ενδιάμεσα.

Οι παρακάτω σειρές μετρήσεων λαμβάνονται για τις ίδιες τιμές σχετική υγρασίας.

Πίνακας 7 Δεύτερη σειρά μετρήσεων πριν τον μηδενισμό

Μέτρηση σχετικής υγρασίας από το πρότυπο όργανο	Μέτρηση σχετικής υγρασίας από τον αισθητήρα	Συγκέντρωση μικροσωματιδίων
Hr (%), Tr = 30 °C	Hs (%), Ts = 32 °C	ppb
35	38	-7
65	66	6
85	84	88

Η τρίτη σειρά μετρήσεων λήφθηκε με σταθερή θερμοκρασία 35 °C παρουσιάζεται στον πίνακα 8.

Πίνακας 8 Τρίτη σειρά μετρήσεων πριν τον μηδενισμό

Μέτρηση σχετικής υγρασίας από το πρότυπο όργανο	Μέτρηση σχετικής υγρασίας από τον αισθητήρα	Συγκέντρωση μικροσωματιδίων
---	---	-----------------------------

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

Hr (%), Tr = 35 °C	Hs (%), Ts = 37 °C	ppb
35	37	-3
65	65	15
85	83	101

Η τέταρτη σειρά μετρήσεων λήφθηκε με σταθερή θερμοκρασία 40 °C παρουσιάζεται στον πίνακα 9.

Πίνακας 9 Τέταρτη σειρά μετρήσεων πριν τον μηδενισμό

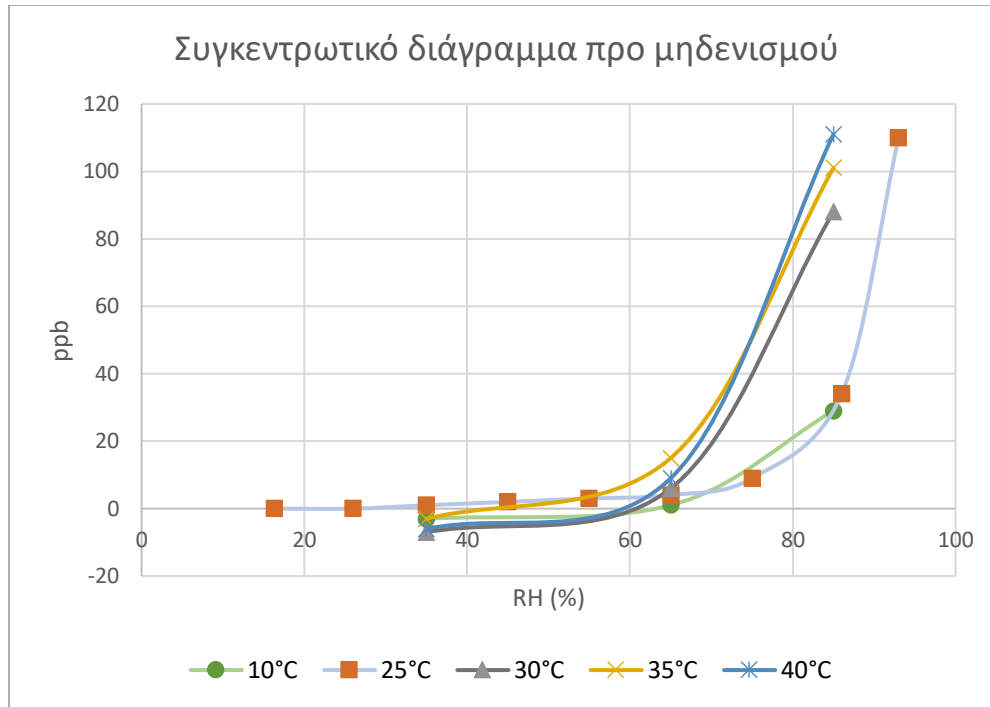
Μέτρηση σχετικής υγρασίας από το πρότυπο όργανο	Μέτρηση σχετικής υγρασίας από τον αισθητήρα	Συγκέντρωση μικροσωματιδίων
Hr (%), Tr = 40 °C	Hs (%), Ts = 42 °C	ppb
35	39	-6
65	65	9
85	83	111

Η πέμπτη σειρά μετρήσεων λήφθηκε με σταθερή θερμοκρασία 10 °C παρουσιάζεται στον πίνακα 10. Προτιμήθηκε μία χαμηλή θερμοκρασίας ώστε να μπορεί να σχηματιστεί συμπέρασμα τόσο βάσει της θερμοκρασίας όσο και της σχετικής υγρασίας.

Πίνακας 10 Πέμπτη σειρά μετρήσεων πριν τον μηδενισμό

Μέτρηση σχετικής υγρασίας από το πρότυπο όργανο	Μέτρηση σχετικής υγρασίας από τον αισθητήρα	Συγκέντρωση μικροσωματιδίων
Hr (%), Tr = 10 °C	Hs (%), Ts = 11 °C	ppb
35	39	-3
65	66	1
85	81	29

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των παραπάνω πινάκων δημιουργήθηκε το συγκεντρωτικό διάγραμμα προ μηδενισμού του αισθητήρα που παρουσιάζεται στο σχήμα 24.



Σχήμα 24 Συγκεντρωτικό διάγραμμα προ μηδενισμού αισθητήρα

4.5.2 Σειρές μετρήσεων μετά τον μηδενισμό

Πραγματοποιήθηκε μηδενισμός για θερμοκρασία 30 °C και σχετική υγρασία 35% οι μετρήσεις που λήφθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα 11.

Πίνακας 11 Πρώτη σειρά μετρήσεων μετά τον μηδενισμό

Μέτρηση σχετικής υγρασίας από το πρότυπο όργανο	Μέτρηση σχετικής υγρασίας από τον αισθητήρα	Συγκέντρωση μικροσωματιδίων
Hr (%), Tr = 30 °C	Hs (%), Ts = 32 °C	ppb
35	38	0
65	65	13
85	84	87

Η δεύτερη σειρά μετρήσεων λήφθηκε με σταθερή θερμοκρασία 35 °C παρουσιάζεται στον πίνακα 12.

Πίνακας 12 Δεύτερη σειρά μετρήσεων μετά τον μηδενισμό

Μέτρηση σχετικής υγρασίας από το πρότυπο όργανο	Μέτρηση σχετικής υγρασίας από τον αισθητήρα	Συγκέντρωση μικροσωματιδίων

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

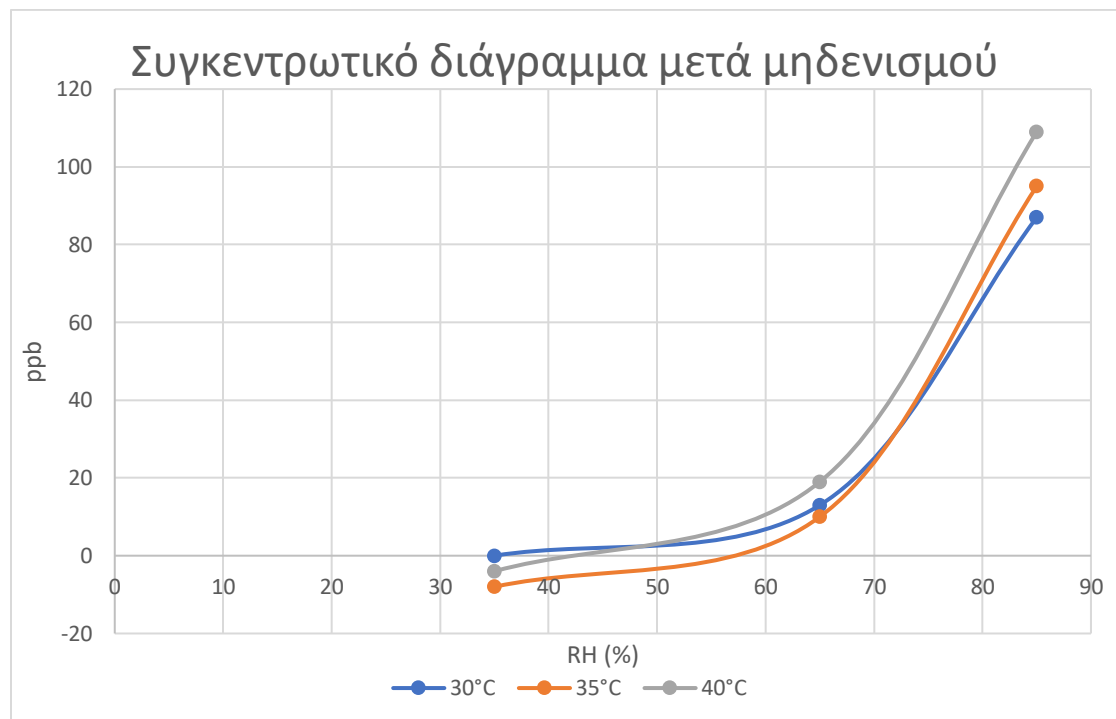
Hr (%), Tr = 35 °C	Hs (%), Ts = 37 °C	ppb
35	39	-8
65	66	10
85	84	95

Η τρίτη σειρά μετρήσεων λήφθηκε με σταθερή θερμοκρασία 40 °C παρουσιάζεται στον πίνακα 13.

Πίνακας 13 Τρίτη σειρά μετρήσεων μετά τον μηδενισμό

Μέτρηση σχετικής υγρασίας από το πρότυπο όργανο	Μέτρηση σχετικής υγρασίας από τον αισθητήρα	Συγκέντρωση μικροσωματιδίων
Hr (%), Tr = 40 °C	Hs (%), Ts = 42 °C	ppb
35	36	-4
65	65	19
85	84	109

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των παραπάνω πινάκων δημιουργήθηκε το συγκεντρωτικό διάγραμμα μετά μηδενισμού του αισθητήρα που παρουσιάζεται στο σχήμα 25.



Σχήμα 25 Συγκεντρωτικό διάγραμμα μετά μηδενισμού αισθητήρα

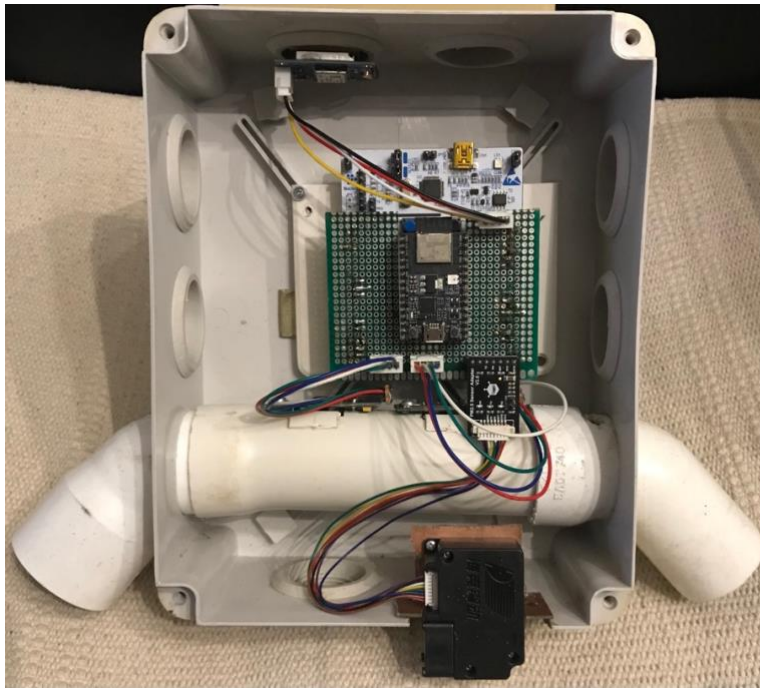
4.5.3 Παρατηρήσεις

Στον πίνακα 6 παρατηρείται ότι από σχετική υγρασία 16% έως 75% ο αισθητήρας παρουσιάζει ομαλή λειτουργία, λαμβάνοντας φυσιολογικές τιμές με αποδεκτό σφάλμα. Έπειτα με σχετική υγρασία 86% η τιμή συγκέντρωσης παρουσιάζει έντονη αύξηση η οποία γίνεται ακόμα εντονότερη για $RH = 93\%$. Η τιμή συγκέντρωσης της τελευταίας μέτρησης δεν μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή αν και βρίσκεται υπό ακραία συνθήκη.

Τα δεδομένα των υπόλοιπων πινάκων δηλαδή από 7 έως 13, επιβεβαιώνουν την προηγούμενη παρατήρηση. Σε αυτούς του πίνακες το δείγμα μετρήσεων είναι μικρότερο, αλλά κοιτώντας την γενική εικόνα, ανεξαρτήτως της θερμοκρασίας οι τιμές συγκέντρωσης του όζοντος μέχρι σχετική υγρασία 65% είναι μικρές κάτω από 20 ppb. Επίσης οι τιμές συγκέντρωσης για σχετική υγρασία 85% είναι αρκετά αυξημένες σε όλες τις θερμοκρασίες.

5. Λειτουργία συστήματος – τοποθέτηση - αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθούν βασικά γνωρίσματα του συστήματος και η χρήση του στο πεδίο, καθώς και τα αποτελέσματα αυτής. Αρχικά θα παρουσιαστεί και θα αναλυθεί η λειτουργία του συστήματος και στη συνέχεια αποτυπώνονται η τοποθέτηση του συστήματος και τα αποτελέσματα της λειτουργίας του. Στο σχήμα 26 εμφανίζεται ο σταθμός μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.



Σχήμα 26 Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης

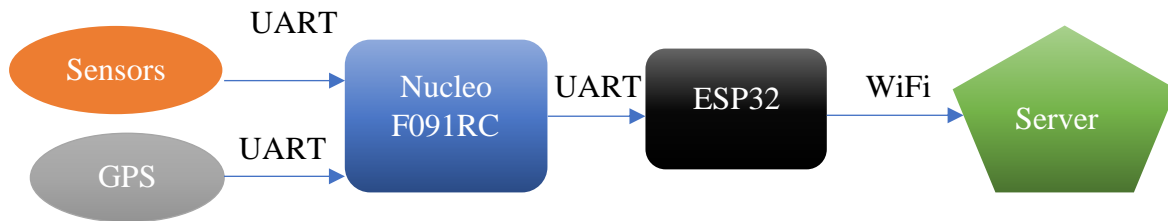
5.1 Λειτουργία συστήματος

Η αναπτυξιακή πλακέτα NUCLEO-F091RC λαμβάνει τις μετρήσεις των NO₂, O₃ και συγκέντρωσης μικροσωματιδίων ανά 10 λεπτά μέσω ασύγχρονης σειριακής επικοινωνίας (UART). Για αντίστοιχο χρονικό διάστημα λαμβάνει το στίγμα της τοποθεσίας μέσω του NEO-6M. Αυτά τα δεδομένα επεξεργάζεται ο F091RC κρατώντας μόνο τα χρήσιμα και απαραίτητα δεδομένα, μετατρέποντάς τα σε πληροφορία. Τα πακέτα δεδομένων των υποσυστημάτων που συγκροτούν τον σταθμό μέτρησης περιέχουν διάφορα στοιχεία όπως ο χρόνος λειτουργίας κ.α. που δεν είναι χρήσιμα στη σύνθεση του τελικού πακέτου πληροφορίας. Έπειτα ο F091RC αποστέλλει τον τελικό πίνακα χαρακτήρων που έχει

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

συνθέσει στον ESP32 μέσω ασύγχρονης σειριακής επικοινωνίας (UART) που είναι υπεύθυνος για την αποστολή του πακέτου πληροφορίας στην πλατφόρμα Grafana μέσω σύνδεσης στο διαδίκτυο. Η σύνδεση επιτυγχάνεται από τον ESP32 μέσω του πρωτοκόλλου WiFi στη συχνότητα των 2,4GHz. Τα δεδομένα αποθηκεύονται σε βάση δεδομένων και είναι διαθέσιμα στους διαχειριστές της πλατφόρμας.

Στο σχήμα 27 αποτυπώνεται το απλοποιημένο διάγραμμα λειτουργίας του συστήματος.



Σχήμα 27 Διάγραμμα λειτουργίας συστήματος

5.2 Μετρήσεις

Η ποιότητα των μετρήσεων καθορίζει την ποιότητα του ολόκληρου του σταθμού, η οποία είναι η προτεραιότητα τόσο στο κομμάτι του σχεδιασμού όσο και στο κομμάτι της υλοποίησης του σταθμού.

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται οι μετρήσεις του συστήματος καθώς και η διαδικασία μέσω της οποίας λήφθηκαν δεδομένα των μετρήσεων πριν την επεξεργασία. Στη συνέχεια τα δεδομένα μετατρέπονται στη τελική πληροφορία που αποστέλλεται στη διαδικτυακή πλατφόρμα. Στη παράγραφο αυτή περιγράφεται όλη η διαδικασία λήψης, πρωτογενούς επεξεργασίας μέχρι το σημείο που τα δεδομένα αποκτούν τη τελική μορφή του πακέτου πληροφορίας που περιέχεται το σύνολο των μετρήσεων.

5.2.1 SPEC Sensors

Οι πρώτες δοκιμαστικές μετρήσεις λήφθηκαν από τους αισθητήρες όζοντος και διοξειδίου του αζώτου στο εργαστήριο κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης.

Εν συνεχεία ελήφθησαν μετρήσεις από τους αισθητήρες μέσω επικοινωνίας με τον μικροελεγκτή F091RC. Αρχικά συνδέθηκαν με τη χρήση πλακέτας δοκιμών (Breadboard) σε ελεγχόμενο περιβάλλον με φυσικές συνθήκες. Αυτό κυρίως έγινε με σκοπό να

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

επαληθευτεί ότι ο F091RC λαμβάνει δεδομένα από τους αισθητήρες και αρχικά αυτά εμφανίζονται στο τερματικό του υπολογιστή.

```
03 measure:
011019010740, 7, 26, 60, 32697, 26484, 34854, 00, 00, 12, 55

NO2 measure:
102419020339, 132295, 24, 51, 0, 26556, 30270, 00, 00, 28, 59
```

Σχήμα 28 Μετρήσεις αισθητήρων O₃ και NO₂

Στο τερματικό εμφανίζεται το πακέτο δεδομένων με έντεκα πεδία του εκάστοτε αισθητήρα, όπως εμφανίζεται στο σχήμα 28. Σε αυτό το σημείο πρέπει να διευκρινιστεί ότι η ετικέτα που εμφανίζεται στην πρώτη και τρίτη γραμμή: «O₃ measure:» και «NO₂ measure:» αντίστοιχα, δεν ανήκει στα προ της επεξεργασίας δεδομένα των αισθητήρων. Το πεδίο έχει προστεθεί με σκοπό την ευκολότερη αναγνώριση του είδους της μέτρησης που λαμβάνεται. Το πακέτο περιλαμβάνει τον σειριακό αριθμό του συστήματος μέτρησης, την τιμή συγκέντρωσης όζοντος ή διοξειδίου του αζώτου (ppb), τη θερμοκρασία (°C) και τη σχετική υγρασία (%), ενώ έπειτα ακολουθούν με τη σειρά τα δεδομένα (raw) των προηγούμενων πεδίων και ο χρόνος λειτουργίας σε χρονικά μεγέθη: ADC Raw, T Raw, RH Raw, ημέρες, ώρες, λεπτά, δευτερόλεπτα.

5.2.2 HK-A5 sensor

Για τη γραφή κώδικα σε πλαίσιο εργασίας Arduino με σκοπό τη λήψη δεδομένων από τον αισθητήρα HK-A5 υπάρχει διαθέσιμη βιβλιοθήκη εντολών. Η βιβλιοθήκη ονομάζεται PMS, διαθέτει εντολές επικοινωνίας με τους συμβατούς αισθητήρες οι οποίοι είναι PMSx003 (1003, 3003, 5003, 6003, 7003).

Ο αισθητήρας συγκέντρωσης μικροσωματιδίων έχει τη δυνατότητα μέτρησης της συγκέντρωσης PM 1.0, PM 2.5 και PM10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Οι πρώτες τρεις μετρήσεις αφορούν τη συγκέντρωση σωματιδίων και οι επόμενες τρεις μετρήσεις αφορούν το πλήθος σωματιδίων σε αέρα 0,1 λίτρων.

Για τη λήψη μετρήσεων απαιτείται ένα δευτερόλεπτο, που είναι ο χρόνος απόκρισης του αισθητήρα.

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

Για τον αισθητήρα συγκέντρωσης μικροσωματιδίων οι πρώτες μετρήσεις που λήφθηκαν ήταν σε περιβάλλον δωματίου με φυσικές συνθήκες. Η μορφή του πακέτου παρουσιάζεται στο σχήμα 29.

```
Calling sensor routine
Send read request...

Wait max. 1 second for read...

Reading...

Concentration_PM_1=9,Concentration_PM_25=13,Concentration_PM_100=16,Concentration_PM_1_env=0,Concentration_PM_25_env=0,Concentration_PM_100_env=0
```

Σχήμα 29 Μέτρηση HK-A5 Laser PM 2.5/10 Sensor

Στη συγκεκριμένη περίπτωση τα πρώτα πεδία που εμφανίζονται στο τερματικό αποτελούν πληροφόρηση για τον μηχανικό και αποσκοπούν τόσο στην διευκόλυνση του στο στάδιο της ανάπτυξης της εφαρμογής όσο και σε περίπτωση επισκευή του συστήματος.

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι τα μηνύματα «Calling sensor routine» και «Send read request» αποσκοπούν στην γνωστοποίηση του μηχανικού ότι κλήθηκε η ρουτίνα λήψης μέτρησης του αισθητήρα. Έπειτα ακολουθεί το μήνυμα «Wait max. 1s second for read...» που όπως έχει αναφερθεί πρόκειται για τον χρόνο απόκρισης του συστήματος. Τέλος το μήνυμα «Reading...» είναι ένδειξη ότι ακολουθεί η μέτρηση.

Το τελευταίο μήνυμα είναι η μέτρηση επεξεργασμένη και έχουν χρησιμοποιηθεί οι κατάλληλες ετικέτες ώστε να είναι εμφανές σε ποια τιμή συγκέντρωσης μικροσωματιδίων αναφέρεται η εκάστοτε τιμή. Οι ετικέτες ακολουθούν την αύξουσα σειρά όγκου των μικροσωματιδίων, δηλαδή PM 1.0, PM 2.5 και PM10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

5.2.3 GPS module NEO-6M

Κατά την πρώτη εκκίνηση του GPS απαιτούνται μερικά λεπτά ώστε να αρχίσει να λαμβάνει δεδομένα από τους δορυφόρους, απαιτείται η συσκευή να βρίσκεται σε εξωτερικό χώρο. Σε αντίθετη περίπτωση το πιθανότερο είναι να μη καταφέρει να λάβει σήμα από τους δορυφόρους και κατά συνέπεια θα εμφανίσει μηνύματα όπου τα πακέτα θα περιέχουν το όνομα του πακέτου και κενά τα πεδία. Το πεδίο «Κατάσταση» όπου εμφανίζεται στον Πίνακα 14 θα εμφανίσει τον χαρακτήρα που υποδεικνύει ότι δεν είναι δυνατή η έγκυρη λήψη δεδομένων.

Από τη στιγμή που ξεκινήσει να λαμβάνει δεδομένα τα πεδία των πακέτων που μέχρι εκείνη τη στιγμή εμφανίζονταν κενά, συμπληρώνονται και έπειτα από μερικά λεπτά είναι

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

γεμάτα. Τα μηνύματα εκτυπώνονται συνεχώς στο τερματικό με το ένα να διαδέχεται το άλλο σε λιγότερο από ένα δευτερόλεπτο. Δεν υπάρχει η δυνατότητα για επιλογή εμφάνισης συγκεκριμένου πακέτου, έτσι η διαδικασία επιλογής θα γίνει μέσω συνθήκης ελέγχου του μικροελεγκτή.

Το χρήσιμο πακέτο δεδομένων για την εφαρμογή είναι το RMC, που σύμφωνα με την περιγραφή της εταιρίας πρόκειται για τα ελάχιστα προτεινόμενα δεδομένα (Recommended Minimum data). Το πακέτο έχει συγκεκριμένη δομή με 15 πεδία τα οποία χωρίζονται με κόμμα (,) ακόμα και αν τα πεδία είναι κενά. Στο σχήμα 30 εμφανίζονται τα λαμβανόμενα δεδομένα από τη μονάδα γεωεντοπισμού.

```
$GPGLL,373758.38828,N,02338.51450,E,090759.00,A,A*64
$GPRMC,090800.00,A,3758.38827,N,02338.51448,E,0.050,090522,,,A*79
$GPVTG,,T,,M,0.050,N,0.094,K,A*2B
$GPGGA,090802.00,3758.38824,N,02338.51446,E,1,08,1.03,63.5,M,33.1,M,,*67
$GPGSA,A,3,25,29,12,02,31,24,20,18,,,,,1.97,1.03,1.69*03
$G
$GPGSV,4,1,13,02,41,054,24,05,08,120,23,06,03,033,,11,38,056,16*7B
$GPGSV,4,2,13,12,46,088,88,30,18,15,193,21,20,16,091,23,22,15,279,*7E
$GPGSV,4,3,13,24,18,166,34,25,73,002,24,29,62,2,62,268,34,31,28,313,31*7A
$GPGSV,4,4,13,32,11,257,09*43
$GPGLL,3758.38817,N,02338.51417,E,090812.00,A,A*64
$GPRMC,090813.00,A,3758.38816,N,02338.51411,E,0.026,090522,,,A*7C
$GPVTG,,T,,M,0.174,N,0.322,K,A*22
$GPGGA,090815.00,3758.38807,N,02338.51389,E,1,08,1.03,63.9,M,33.1,3.1,M,,*6A
$GPGSA,A,3,25,29,12,02,31,24,20,18,,,,,1.98,1.03,1.69*0C
$GPGSV,4,1,13,02,41,054,,20,05,08,120,20,06,03,033,,11,38,056,18*73
$GPGSV,4,2,13,12,46,088,30,18,15,193,23,20,16,09
```

Σχήμα 30 Λήψη δεδομένων από το GPS

Η δομή του πακέτου δεδομένων (μόνο για τα χρήσιμα πεδία) παρουσιάζεται στον πίνακα 14.

Πίνακας 14 Χρήσιμα πεδία πακέτου δεδομένων

Πεδίο	Μορφή	Περιγραφή
1	Αλφαριθμητικό	Όνομα πακέτου
2	hhmmss.sss	UTC Time, ώρες-λεπτά-δευτερόλεπτα
3	Χαρακτήρας	Κατάσταση, A = Έγκυρα δεδομένα
4	ddmm.mmmm	Γεωγραφικό πλάτος, Μοίρες – λεπτά
5	Χαρακτήρας	Δείκτης ημισφαιρίου
6	dddmm.mmmm	Γεωγραφικό μήκος, Μοίρες – λεπτά
7	Χαρακτήρας	Δείκτης ημισφαιρίου
10	ddmmyy	Ημερομηνία, ημέρα-μήνας-έτος

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

Ο πίνακας δεδομένων συμπληρώνεται από τα χρήσιμα πεδία, ενώ υπάρχουν πεδία τα οποία μπορούν να θεωρηθούν περιττά. Αυτό συμβαίνει επειδή είτε θεωρούνται αυτονόητα, είτε μπορούν να ληφθούν από διαφορετική πηγή με αποτέλεσμα τη μη αποθήκευσή τους στο αλφαριθμητικό του GPS.

5.2.4 Πακέτο πληροφορίας

Αφού ληφθούν οι μετρήσεις ακολουθεί η διαλογή των χρήσιμων μετρήσεων όπου θα συνθέσουν το πακέτο πληροφορίας που θα αποσταλεί στη διαδικτυακή πλατφόρμα. Όπως είναι λογικό από κάθε αισθητήρα και σύστημα επιλέγονται διαφορετικά δεδομένα.

SPEC Sensors NO₂ & O₃

Από τους δύο αισθητήρες αερίων, διοξειδίου του αζώτου (NO₂) και όζοντος (O₃) επιλέχθηκαν τα εξής δεδομένα:

- ◆ Σειριακός αριθμός
- ◆ Τιμή συγκέντρωσης αερίου
- ◆ Θερμοκρασία
- ◆ Σχετική υγρασία

Για την αποθήκευση των μετρήσεων στη βάση δεδομένων απαιτείται η προσθήκη ετικετών στους πίνακες των αλφαριθμητικών όπου αποθηκεύονται οι μετρήσεις. Οι ετικέτες προηγούνται των δεδομένων και έχουν επιλεγεί να είναι οι παρακάτω:

- ◆ NO₂_Serial= και O₃_Serial=
- ◆ NO₂_Concentration= και O₃_Concentration=
- ◆ NO₂_Temperature= και O₃_Temperature=
- ◆ NO₂_Humidity= και O₃_Humidity=

Επίσης έπειτα από την μέτρηση ακολουθεί κόμμα (,) ώστε να είναι ευκρινής η αλλαγή πεδίου και μέτρησης.

Επομένως το πακέτο έχει την μορφή: **Ετικέτα + Μέτρηση + , .**

HK-A5 sensor

Για τον αισθητήρα συγκέντρωσης μικροσωματιδίων, επιλέχθηκαν οι μετρήσεις και προστέθηκαν ετικέτες.

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

Επιλέχθηκαν όλες οι τιμές των μικροσωματιδίων που μπορεί να ανιχνεύσει, δηλαδή τη συγκέντρωση και το πλήθος σωματιδίων στον αέρα, όπως έχουν αναφερθεί στην υποενότητα 5.2.2. Συγκεκριμένα μετρούνται τα μεγέθη: PM 1.0, PM 2.5 και PM10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Ενώ ακολουθούν οι ετικέτες που χρησιμοποιήθηκαν:

- ◆ Concentration_PM_1=
- ◆ Concentration_PM_25=
- ◆ Concentration_PM_100=
- ◆ Concentration_PM_1_env=
- ◆ Concentration_PM_25_env=
- ◆ Concentration_PM_100_env=

Η μορφή του πακέτου είναι όμοια με την μορφή των αισθητήρων SPEC Sensors.

GPS module NEO-6M

Για το GPS επιλέχθηκαν οι τιμές του γεωγραφικού πλάτους και μήκους.

Με τις παρακάτω ετικέτες:

- ◆ Latitude
- ◆ Longitude

Η μορφή του πακέτου είναι όμοια με τα παραπάνω στοιχεία.

Τελικό πακέτο

Τα πακέτα που αναφέρθηκαν αφορούν την κάθε μία πηγή δεδομένων του συστήματος ξεχωριστά και δημιουργήθηκαν από τις ρουτίνες του λογισμικού. Έπειτα επιστράφηκαν στο κυρίως πρόγραμμα με σκοπό την ένωση τους και τη δημιουργία του τελικού πακέτου πληροφορίας που θα είναι έτοιμο να αποσταλεί στη διαδικτυακή πλατφόρμα.

Τα πρώτα στοιχεία που εισάγονται στο αλφαριθμητικό είναι το όνομα της βάσης δεδομένων που θα αποθηκευτούν τα δεδομένα και έπειτα το αναγνωριστικό του σταθμού.

Η μορφή του τελικού πακέτου είναι:

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

**Database name + Station ID + PMS string +NO₂ sensor string + O₃ sensor string +
GPS string**

Το πλήρες πακέτο πληροφορίας φέρει όλες τις χρήσιμες πληροφορίες από τους αισθητήρες και από τη μονάδα γεωεντοπισμού (εμφανίζεται το πλήρες string από το GPS) όπως εμφανίζεται στο σχήμα 31.

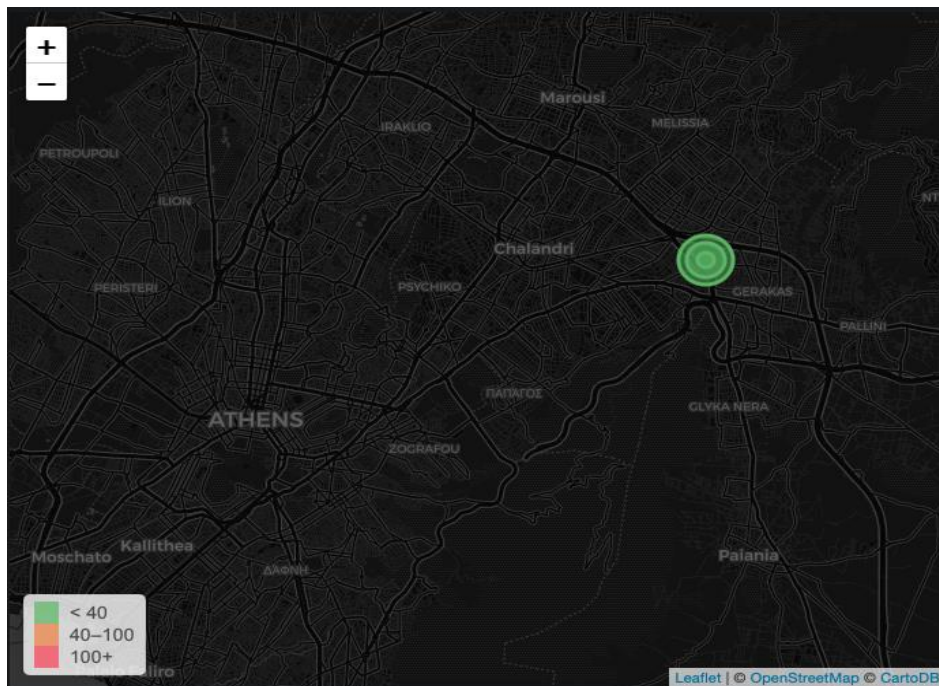
```
Concentration_PM_1=4,Concentration_PM_25=6,Concentration_PM_100=9,Concentration_PM_1_env=0,Concentration_PM_25_env=0,Concentration_PM_100_env=0,SN:011019010740,PPB:2,TMP:27,Hum:35,SN:102419020324,PPB:36,TMP:24,Hum:33,MessageID:GPRMC,UTC Time:130718.00,Status:A,Latitude:3758.38293,Hemisphere:N,Longitude:02338.51132,Hemisphere:E,Date:041022
```

Σχήμα 31 Πλήρες πακέτο πληροφορίας

5.3 Τοποθέτηση

Με σκοπό τη δοκιμή του σταθμού επιλέχθηκε μία θέση εντός του αστικού ιστού του λεκανοπεδίου της Αττικής. Πρέπει να σημειωθεί ότι η θέση που επιλέχθηκε εξυπηρετεί την μελέτη της αξιοπιστίας των μετρήσεων σε εφαρμογή πεδίου αφού βρίσκεται κοντά σε επίσημο σταθμό μέτρησης αέριων ρύπων του επίσημου κρατικού φορέα δηλαδή του ΠΕΡΠΑ.

Η γεωγραφική αναπαράσταση του σταθμού εμφανίζεται στο σχήμα 32.

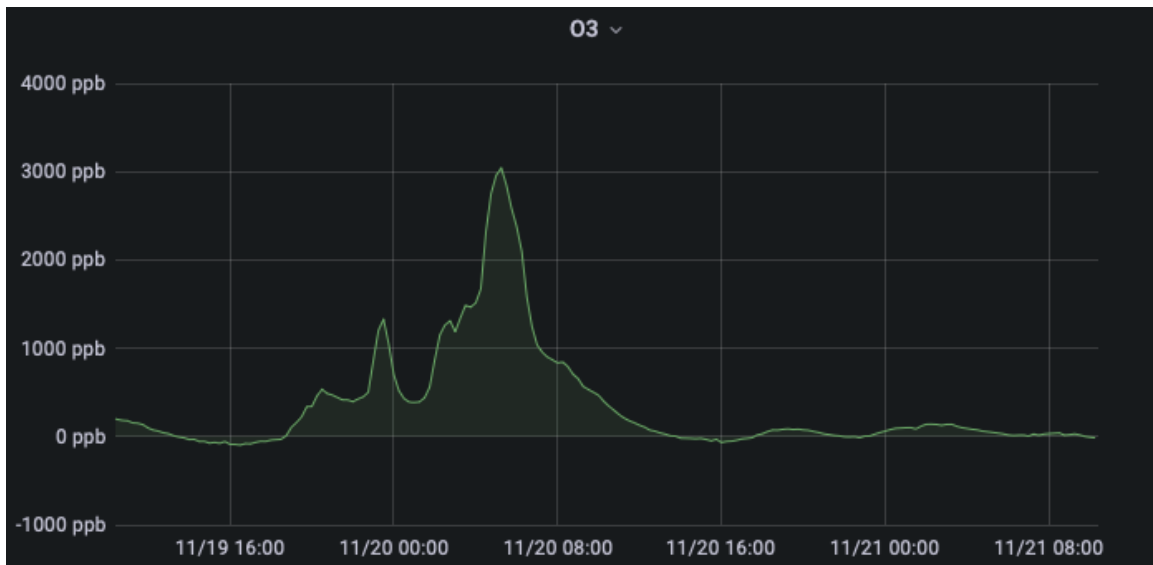


Σχήμα 32 Στίγμα του σταθμού στον χάρτη

5.4 Αποτελέσματα

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικές καταγραφές των μετρούμενων μεγεθών του πρώτου, πιλοτικού σταθμού μέτρησης με στόχο την ανάδειξη του επιπέδου των μετρούμενων μεγεθών.

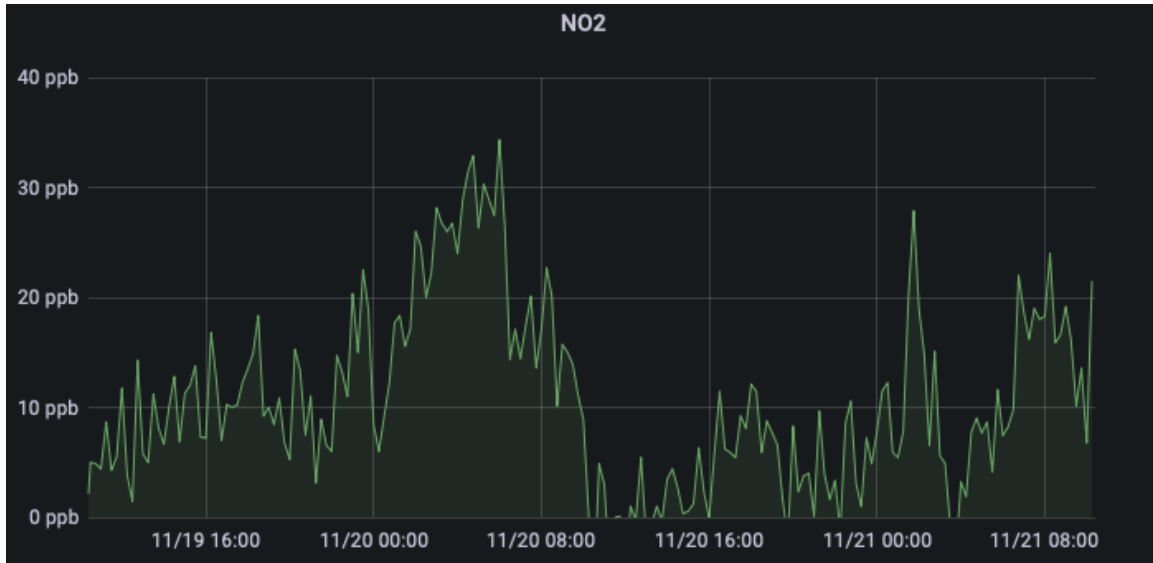
Η γραφική αναπαράσταση της συγκέντρωσης του όζοντος για χρονικό διάστημα δύο ημερών εμφανίζεται στο σχήμα 33.



Σχήμα 33 Συγκέντρωση όζοντος

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

Η γραφική αναπαράσταση της συγκέντρωσης του διοξειδίου του αζώτου για χρονικό διάστημα δύο ημερών εμφανίζεται στο σχήμα 34.



Σχήμα 34 Συγκέντρωση διοξειδίου του αζώτου

Από τους αισθητήρες λαμβάνονται μετρήσεις της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας. Δεν χρειάζεται να υπάρχουν δύο γραφήματα με ακριβώς το ίδιο μετρούμενο μέγεθος, οπότε αναπαρίσταται μόνο σε ένα γράφημα το κάθε ένα. Η γραφική αναπαράσταση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος εμφανίζεται στο σχήμα 35.



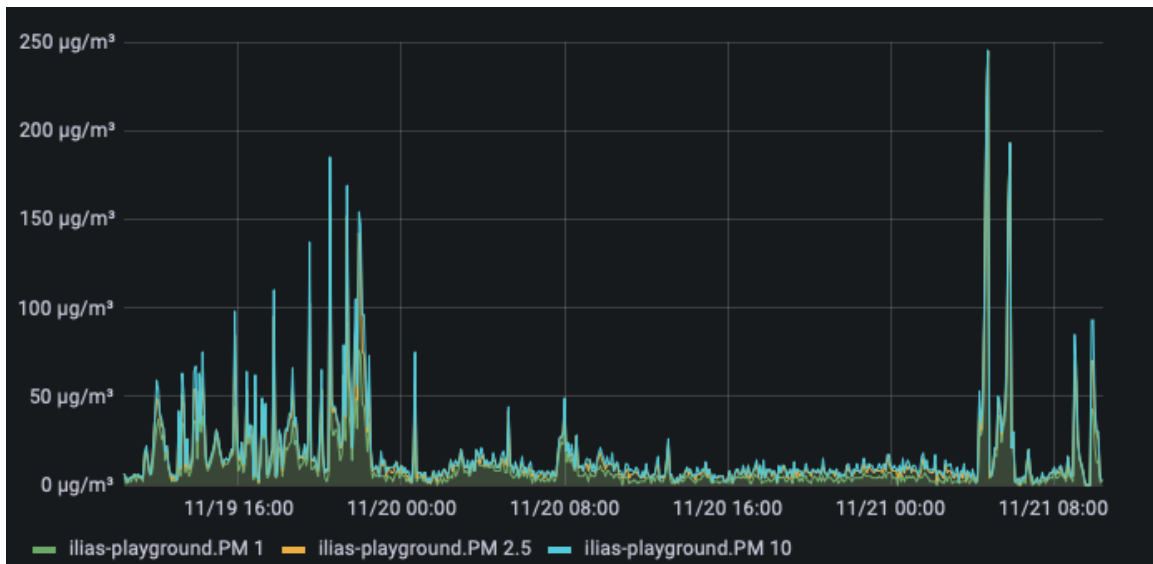
Σχήμα 35 Θερμοκρασία περιβάλλοντος από αισθητήρα SPEC Sensors

Η γραφική αναπαράσταση της σχετικής υγρασίας περιβάλλοντος εμφανίζεται στο σχήμα 36.



Σχήμα 36 Σχετική υγρασία περιβάλλοντος από αισθητήρα SPEC Sensors

Η συγκεντρωτική γραφική αναπαράσταση των συγκεντρώσεων μικροσωματιδίων εμφανίζεται στο σχήμα 37.



Σχήμα 37 Συγκέντρωση μικροσωματιδίων PM 1 - 2.5 - 10

5.4.1 Παρατηρήσεις

Παρατηρείται ότι στο διάγραμμα μέτρησης συγκέντρωσης όζοντος κατά τα ξημερώματα της 20^{ης} Νοεμβρίου οι τιμές είναι ιδιαίτερα αυξημένες. Αυτό σε συνδυασμό με την εξαιρετικά υψηλή σχετική υγρασία για το ίδιο χρονικό διάστημα όπως απεικονίζεται στο σχήμα 33 οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι συγκεκριμένοι αισθητήρες είναι ευαίσθητοι σε αυτό το μέγεθος.

6. Συμπέρασμα

Ο σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους που παρουσιάστηκε σε αυτή τη διπλωματική εργασία, αποτελεί μια οικονομικά αποδοτική λύση για μέτρηση και παρατήρηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε αστικό και μη περιβάλλον. Η σχέση ποιότητας – κόστους του συστήματος αντικατοπτρίζει την φιλοσοφία σχεδιασμού του, που είναι η ποιοτική και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος σε κόστος που του επιτρέπει την ευρεία χρήση του. Το παρόν σύστημα σχεδιάστηκε με στόχο την αξιόπιστη ομαλή λειτουργία του με χαμηλό κόστος, όμως δόθηκε βαρύτητα στη δυνατότητα για τις ενδεχόμενες μετέπειτα βελτιώσεις του.

Γνωρίζοντας ότι οι τεχνολογικές εξελίξεις και ανάγκες εκτυλίσσονται ταχύτατα, ένα σύστημα χωρίς τη δυνατότητα υποστήριξης αναβαθμίσεων είναι πιθανό να θεωρηθεί σε μικρό χρονικό διάστημα παρωχημένο και ανεπαρκές. Κάτι τέτοιο θα εμπόδιζε τους ενδιαφερόμενους να επιλέξουν το παρόν σύστημα καθώς θα θεωρείτο ως μία λύση μη οικονομικά αποδοτική. Το σύστημα σχεδιάστηκε λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω και εστιάζοντας στον στόχο με προτεραιότητα την κάλυψη τόσο των βραχυπρόθεσμων αναγκών της κοινωνίας όσο και των πιθανών μακροπρόθεσμων. Μπορούν να γίνουν παραμετροποιήσεις είτε σε τοπικό επίπεδο του σταθμού είτε σε διαδικτυακό επίπεδο, δηλαδή στη πλατφόρμα. Με σκοπό τη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος στις εκάστοτε απαιτήσεις και ανάγκες.

Παρά τα πρώτα ενθαρρυντικά αποτελέσματα πρέπει να γίνει περεταίρω παρατήρηση του ώστε να διαπιστωθεί η ομαλή λειτουργία του σε βάθος χρόνου. Έχει αναφερθεί η διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων όπως δίνεται από τους κατασκευαστές, όμως μέσω της χρήσης τους στο πεδίο θα εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα ως προς το κατά πόσο αυτό είναι συμπίπτον με τις αναφορές των κατασκευαστών.

Εν κατακλείδι η ευρεία και χρόνια εφαρμογή του συστήματος σε διαφορετικά περιβάλλοντα είναι ο καλύτερος τρόπος για την διεξαγωγή έγκυρων συμπερασμάτων για την πραγματική χρησιμότητα και απόδοση του συστήματος.

Βιβλιογραφία - Αναφορές - Πηγές

Alimi, I.A., Patel, R.K., Zaouga, A., Muga, N.J., Xin, Q., Pinto, A.N., Monteiro, P.P., 2021, Chapter 1. Trend in Cloud Computing Paradigms: Fundamental Issues, Recent Advances, and Research Directions toward 6G Fog Networks, ed. Haidine, A., 2021, *Moving Broadband Mobile Communicaiton Forward – Intelligent Technologies for 5G and Beyond*, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.98315.

ARM, 2022, Mbed, NUCLEO-F091RC, <https://os.mbed.com/platforms/ST-Nucleo-F091RC>.

Castell, N., 2020, Low-cost sensors for monitoring air quality, ed. Kåstad Høiskar, B.A., Tørnkvist, K., Lopez-Aparicio, S., 2020, *Urban air quality*, NILU, <https://www.nilu.com/research/urban-air-quality/low-cost-sensors-for-monitoring-air-quality>.

Christakis, I., Hloupis, G., Tsakiridis, O., Stavrakas, I., Jul. 2022, Integrated open source air quality monitoring platform, IEEE, DOI: 10.1109/MOCASST54814.2022.9837555.

Deligiorgi, D. and Philippopoulos, K., 2011, chapter 19. Spatial Interpolation Methodologies in Urban Air Pollution Modeling: Application for the Greater Area of Metropolitan Athens, Greece, ed. Nejadkoorki, F., 2011, *Advanced Air Pollution*, IntechOpen, DOI: 10.5772/17734.

Depayras, S., Kondakova, T., Heipieper, H.J., Feuilloley, M.G.J., Orange, N., Duclairoir-Poc, C., 2018, Chapter 2. The Hidden Face of Nitrogen Oxides Species: From Toxic Effects to Potential Cure?, ed. Soloneski, S. and Larramendy, M.L., 2018, *Emerging Pollutants – Some Strategies for the Quality Preservation of Out Environment*, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.95481.

Espressif Systems, 2022, Version 1.3, ESP32-C3 Series – Datasheet.

Espressif Systems, 2022, ESP32-C3-DevKitM-1, ESP-IDF Programming Guide, <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32c3/hw-reference/esp32c3/user-guide-devkitm-1.html>.

Espressif Systems, 2022, ESP-IDF Programming Guide API Reference – Networking APIs – Thread, https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/network/esp_openthread.html.

Espressif Systems, Github, <https://github.com/espressif>.

European Environment Agency, Rural concentration of the ozone indicator AOT40 for forest, 2018, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/rural-concentration-of-the-ozone-6>, 1Oct. 2020.

Findlay, M., Peaslee, D., Stetter, J.R., Waller, S., Smallridge, A., 2022, Distributed Sensors for Wildfire Early Warnings, J. Electrochem. Soc. 169 020553, DOI: 10.1149/1945-7111/ac5344.

García Márquez, F.P., 2021, Internet of Things, *Chapter 1. Introductory Chapter: Internet of Things*, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.98268.

Gryech, I., Ben-Aboud, Y., Guermah, B., Sbihi, N., Ghogho, M., Kobbane, A., 2020, MoreAir: A Low-Cost Urban Air Pollution Monitoring System, PubMed Central, DOI: 10.3390/s20040998.

HIKE, HK-A5 Laser PM2.5 Sensor V1.0 Datasheet.

IntechOpen, The Hidden Face of Nitrogen Oxides Species: From Toxic Effects to Potential Cure?, <https://www.intechopen.com/chapters/60135>, 2018.

Kumar, N.M., Malick, V.K., Patel, R.B., Sidike, P., 2018, ‘The Internet of Things: Insights into the building blocks, component interactions, and architecture layers’, *Procedia Computer Science*, vol. 132, pp. 109-117.

Lopez-Aparicio, S., 2021, Atmospheric emissions, ed. Kåstad Høiskar, B.A., Tørnkvist, K., Lopez-Aparicio, S., 2020, *Urban air quality*, NILU, <https://www.nilu.com/research/urban-air-quality/atmospheric-emissions>.

Madruca, D.G., 2021, chapter 2. Implication of Secondary Atmospheric Pollutants in the Air Quality: A Case - Study for Ozone, ed. Rehman Khan, S.A., 2021, *Environmental Sustainability – Preparing for Tomorrow*, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.95481.

Miller, D., 2021, Air Resource Specialist, DOI Regions 6,7,8; National Park Service (currently Environmental Protection Specialist, Air Resources Division, National Park Service) 2021, ‘A Low-cost Air Quality Sensor for Measuring Particulate Matter’, National Park Service U.S. Department of the Interior.

Munsif, R., Zubair, M., Aziz, A., Zafar, M.N., 2021, chapter 2. Sources of air pollution, ed. Viskup, R., 2021, *Industrial Air Emission Pollution: Potential Sources and Sustainable Mitigation*, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.93104.

Pal, A., Rath., H.K., Shailendra., S., Bhattacharyya., A., 2018, IoT Standardization: The Road Ahead, ed. Sen, J., 2018, *Internet of Things - Technology, Applications and Standardization*, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.75137.

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

Pansini, R. and Shi, L. 2022, chapter 4. COVID-19, Air Pollution and One Health at the Climate Change Turning Point, ed. Önal, A.E., 2022, *Air Quality and Health*, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.102943.

PurpleAir, 2022, PA-II Outdoor Air Quality Monitor, <https://www2.purpleair.com/products/purpleair-pa-ii?variant=40067691708513>.

Rahman, M.M. and Asir, A.M., 2017, chapter 1. Introductory Chapter: Electrochemical Sensors Technology, ed. Rahman, M.M., 2017, *Electrochemical Sensors Technology*, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.68709.

SPEC Sensors, August 2017, Digital Gas Sensor – Nitrogen Dioxide (DGS-NO2 968-043) Datasheet.

SPEC Sensors, August 2017, Digital Gas Sensor – Ozone (DGS-O3 968-042) Datasheet.

Stern, D.I. and Kander, A., 2012, The Role of Energy in the Industrial Revolution and Modern Economic Growth, International Association for Energy Economics, *The Energy Journal*, Vol.33, No. 3 pp. 125-152, DOI: 10.5547/01956574.33.3.5.

STM, August 2020, UM1724 User manual, TM32 Nucleo-64 boards (MB1136), NUCLEO-F091RC.

TensorFlow, TensorFlow lite Microcontrollers, <https://www.tensorflow.org/lite/microcontrollers>.

Testo, Huminator II - Precision Humidity Generator technical datasheet, <https://www.testotis.com/fileadmin/DE/downloads/download-center/en/prospekte/huminator-II-precision-humidity-generator.pdf>.

u-blox, 2011, NEO-6M, u-blox 6 GPS Modules Data Sheet, GPS.G6-HW-09005-E.

u-blox, 2013, u-blox6 Receiver Description Including Protocol Specification GPS.G6-SW-10018.

Universiti Malaysia Sarawak, Real-Time Air Quality Monitoring System Based on IoT, <https://www.iotchallengekeysight.com/2019/entries/smart-land/211>, 2019.

Yang, J., Yu, Y., Ma, T., Zhang, C., Wang, Q., 2021, Evolution of energy and metal demand driven by industrial revolution and its trend analysis, *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, Vol. 19, pp. 256-264.

ΔΑΠΕΕΠ, Σεπτέμβριος 2022, Εγγυήσεις Προέλευσεις και Ενεργειακό Μείγμα 2021, <https://www.dapeep.gr/dimosieuseis/eguisseis-proeleusis-energeiako>.

ΔΑΠΕΕΠ, Σεπτέμβριος 2022, Υπολειπόμενο Ενεργειακό Μείγμα της χώρας για το έτος 2021, <https://www.dapeep.gr/viosimi-anaptixi/energeiako-meigma>.

Παράρτηματα

1. Ο κώδικας για το σύστημα επεξεργασίας (NUCLEO-F091RC).

```
#include <Arduino.h>

#include <HardwareSerial.h>

#include <PMS.h>
#include <SoftwareSerial.h>

//HardwareSerial configuration
//      Rx,Tx
HardwareSerial Serial6(A4,A5); //NO2
HardwareSerial Serial4(A1,A0); //O3
HardwareSerial Serial5(D5,D3); //PMS
HardwareSerial Serial1(D2,D8); //GPS
//SoftwareSerial configuration
SoftwareSerial ESP32(D9,D6); //ESP32

PMS pms(Serial5); //class accessing member
PMS::DATA data; //struct accessing member

//Routines
String NO2();
String O3();
String PMS();
String GPS();

//Setup
void setup() {
    //Set up pc terminal communication
    Serial.begin(9600); //Serial = Serial2
    //Set up components communication
    Serial6.begin(9600);
    Serial4.begin(9600);
    Serial5.begin(9600);
}
```

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

```
Serial1.begin(9600);
//Serial3.begin(9600);
ESP32.begin(9600);
//Print welcome message
Serial.println("Air pollution measuring station");
delay(2000);
}

//Global variables
String influxData="";
String NO2message="";
String O3message="";
String PMSmessage="";
String GPSmessage="";
//Trigger message for receiving data (NO2-O3 sensors)
char start[2]="\r";

//Loop
void loop() {
  Serial.println("Running main program");
  influxData="ilias-playground,sensing-type=pollution,station-id=ep-station,";
  Serial.println("Starting PM sensor");
  PMSmessage=PMS();
  NO2message=NO2();
  O3message=O3();
  GPSmessage=GPS();
  //Compose the final string
  influxData+=PMSmessage+NO2message+O3message+GPSmessage+'$';
  Serial.println(influxData);
  ESP32.println(influxData);
  //Clear the final string
  influxData="";
  delay(600000);
}

//NO2 routine
String NO2(){
```

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

```
String measure[5],final="";
measure[0]="NO2_Serial=", measure[1]="NO2_Concentration=", measure[2]="NO2_Temperature=",
measure[3]="NO2_Humidity=";
Serial6.write(start,2);
measure[0]+=Serial6.readStringUntil(',');
measure[1]+=Serial6.readStringUntil(',');
measure[2]+=Serial6.readStringUntil(',');
measure[3]+=Serial6.readStringUntil(',');
measure[4]=Serial6.readString();
for(int i=0; i<4;i++)
    final+=measure[i]+' ';
return(final);
}

//O3 routine
String O3(){
String measure[5],final="";
measure[0]="O3_Serial=", measure[1]="O3_Concentration=", measure[2]="O3_Temperature=",
measure[3]="O3_Humidity=";
Serial4.write(start,2);
measure[0]+=Serial4.readStringUntil(',');
measure[1]+=Serial4.readStringUntil(',');
measure[2]+=Serial4.readStringUntil(',');
measure[3]+=Serial4.readStringUntil(',');
measure[4]=Serial4.readString();
for(int i=0; i<4;i++)
    final+=measure[i]+' ';
return(final);
}

//PMS routine
String PMS(){
pms.wakeUp();
delay(1000);
pms.requestRead();
String measure[6],final = "";
```

Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους

```
measure[0]="Concentration_PM_1=", measure[1]="Concentration_PM_25=",
measure[2]="Concentration_PM_100=", measure[3]="Concentration_PM_1_env=",
measure[4]="Concentration_PM_25_env=", measure[5]="Concentration_PM_100_env=";
if(pms.readUntil(data))
{
  Serial.println("Reading...\n\r");
  measure[0]+=data.PM_SP_UG_1_0+' ';
  measure[1]+=data.PM_SP_UG_2_5+' ';
  measure[2]+=data.PM_SP_UG_10_0+' ';
  measure[3]+=data.PM_AE_UG_1_0+' ';
  measure[4]+=data.PM_AE_UG_2_5+' ';
  measure[5]+=data.PM_AE_UG_10_0+' ';
}
else
{
  Serial.println("Not reading\n\r");
}
for(int i=0; i<6;i++)
  final+=measure[i];
pms.sleep();
final+=' ';
return final;
}

//GPS routine
String GPS(){
  String s[10],v[10],final="";
  int i;
  v[0]="MessageID=",v[1]="UTC
Time=",v[2]="Status=",v[3]="Latitude=",v[4]="Hemisphere=",v[5]="Longitude=",v[6]="Indicator=",v[9]="Date="
;
  if(Serial1.readStringUntil('$')){
    s[0]+=Serial1.readStringUntil(',');
    s[1]+=Serial1.readStringUntil(',');
    s[2]+=Serial1.readStringUntil(',');
    s[3]+=Serial1.readStringUntil(',');
    s[4]=Serial1.readStringUntil(',');
```

```
s[5]=Serial1.readStringUntil(',');
s[6]=Serial1.readStringUntil(',');
s[7]=Serial1.readStringUntil(',');
s[8]=Serial1.readStringUntil(',');
s[9]+=Serial1.readStringUntil(',');
}
//The useful GPS MessageID: GPRMC
if(s[0]=="GPRMC"){
  for(i=0; i<10;i++)
    v[i]+=s[i];
  /* If you want all useful strings
  for(i=0; i<7;i++)
    final+=v[i]+' ';
  final+=v[9];*/
  final+=v[3]+' '+v[5]+''; //Only Latitude & Longitude strings loaded to final string
}
return final;
}
```

2. Ο κώδικας για το σύστημα δικτύωσης (ESP32).

```
#include <Arduino.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <WiFiClientSecure.h>
#include <ESP_WiFiManager.h>
#include <HTTPClient.h>

WiFiClientSecure client; //set class member

//Serial ports
SoftwareSerial NucleoSerial(GPIO_NUM_19, GPIO_NUM_18); // Rx-Tx

//Routines
void configModeCallback (ESP_WiFiManager *myWiFiManager);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
```

```
NucleoSerial.begin(9600);
//Welcome message
Serial.println("Esp starting up");

//-----WIFI CONNECT -----
WiFi.mode(WIFI_STA); // explicitly set mode, esp defaults to STA+AP
// put your setup code here, to run once:
//WiFiManager
//Local initialization. Once its business is done, there is no need to keep it around
ESP_WiFiManager wm; //set class member
//set callback that gets called when connecting to previous WiFi fails, and enters Access Point mode
wm.setAPCallback(configModeCallback);
//Network name and password
WiFi.begin("Network", "Password");
Serial.print("Connecting");
while (WiFi.status() != WL_CONNECTED)
{
  delay(500);
  Serial.print(".");
}
Serial.println();
//Print message of Successful connection and IP address
Serial.print("Connected, IP address: ");
Serial.println(WiFi.localIP());

//If not connected
if (!wm.autoConnect()) {
  Serial.println("failed to connect and hit timeout");
  delay(1000);
  //reset and try again, or maybe put it to deep sleep
  ESP.restart();
}
//-----END WIFI CONNECT -----

delay (2000);
}
```

```
//Strings
String influxData="";

void loop() {
  influxData=NucleoSerial.readStringUntil('$');
  Serial.println(influxData);

  //-----SERVER CONNECT -----

  client.setInsecure();
  int status = client.connect("iote mission.eee.uniwa.gr", 443);
  Serial.print("Client.connect()");
  Serial.println(status);
  client.println("POST /influxdb/write?db=ilias_playground&u=ilias&p=***** HTTP/1.1");
  client.println("Host: iote mission.eee.uniwa.gr");
  client.print("Content-Length: ");
  client.println(influxData.length() + 2);
  client.println("");
  client.println(influxData);
  Serial.println(influxData);
  delay(500);
  Serial.println("Response:");
  while (client.available()) {
    char c = client.read();
    Serial.print(c);
  }
  client.stop();

  //-----END SERVER CONNECT -----

  sleep(1);
}

//configModeCallback routine
void configModeCallback (ESP_WiFiManager *myWiFiManager) {
  Serial.println("Entered config mode");
  Serial.println(WiFi.softAPIP());
  //if you used auto generated SSID, print it
  Serial.println(myWiFiManager->getConfigPortalSSID());
  //entered config mode, make led toggle faster
}
```


Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους