

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Έλεγχος ποιότητας ατμοσφαιρικού αέρα με τη χρήση  
ARDUINO»



Του φοιτητή  
Πάτσαρη Κωνσταντίνου  
Αρ. Μητρώου: 516109

Επιβλέπουσα  
Μαρία Παπαδοπούλου  
Επίκουρη Καθηγήτρια

Ημερομηνία 30/05/2025

Τίτλος Δ.Ε. Έλεγχος ποιότητας ατμοσφαιρικού αέρα με τη χρήση ARDUINO

Κωδικός Π.Ε.: 23210

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: Πάτσαρης Κωνσταντίνος

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Μαρία Παπαδοπούλου

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 31/03/2023

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 30/05/2025

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

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

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

## Πρόλογος

Η παρούσα πτυχιακή εργασία υλοποιήθηκε με γνώμονα τη ραγδαία αύξηση της αστικοποίησης και των βιομηχανιών. Λόγω της τάσης των ανθρώπων για διαρκή ανάπτυξη, καθίσταται αναγκαία η διαρκής παρακολούθηση και καταγραφή της ποιότητας του αέρα. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η υλοποίηση ενός συστήματος βασισμένου στην πλατφόρμα Arduino, η οποία συνδυάζει χαμηλό κόστος με υψηλή αποτελεσματικότητα. Αξιοποιώντας τους αισθητήρες MQ135 και DHT11, το συγκεκριμένο σύστημα αποτυπώνει σε οθόνη LCD πληροφορίες για την ποιότητα του αέρα σε ορισμένο χώρο. Κατόπιν βαθμονόμησης με τη χρήση διαλύματος αμμωνίας γνωστής περιεκτικότητας και εφαρμογής μαθηματικών μοντέλων, το σύστημα είναι ικανό να προσεγγίσει την περιεκτικότητα διαφόρων αερίων στην ατμόσφαιρα, μία δεδομένη στιγμή.

## Περίληψη

Η παρούσα εργασία διαχωρίζεται σε πέντε διακριτές ενότητες. Στην 1η ενότητα πραγματοποιείται μια ιστορική αναδρομή αξιοσημείωτων περιπτώσεων ατμοσφαιρικής ρύπανσης, οι οποίες επηρέασαν σημαντικά το περιβάλλον και οδήγησαν σταδιακά στην συστηματική παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τον άνθρωπο. Στη 2η ενότητα εξετάζονται οι ανθρώπινες δραστηριότητες που έχουν άμεσο αντίκτυπο στην ποιότητα του αέρα, αλλά και στην ποιότητα ζωής των υπόλοιπων οργανισμών. Η 3η ενότητα εστιάζει στη σύσταση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και στις πρακτικές που εφαρμόζονται για την επίτευξη της καταγραφής της. Στην 4η ενότητα παρουσιάζουμε τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση ενός οικονομικά προσιτού συστήματος που αποσκοπεί στην προσέγγιση της ποιότητας του αέρα. Στην 5η και τελευταία ενότητα αναλύεται η μεθοδολογία της υλοποίησης του πειράματος και αναγράφονται τα συμπεράσματα, καθώς και οι διάφορες προτάσεις περαιτέρω εξέλιξης των ικανοτήτων του συστήματος.

# «Ambient air quality monitoring using ARDUINO »

«Patsaris Konstantinos»

## **Abstract**

This paper is divided into five distinct sections. Section 1 provides a historical review of notable cases of air pollution, which have had a significant impact on the environment and have gradually led to the systematic monitoring of human air pollution. Section 2 examines human activities that have a direct impact on air quality and on the quality of life of other organisms. The 3rd section focuses on the composition of air pollution and the practices used to achieve air pollution monitoring. In Section 4 we present the materials used to implement an affordable system aimed at approximating air quality. In the 5th and last section, the methodology of the implementation of the experiment is analyzed and the conclusions are reported, as well as the different proposals for further development of the system's capabilities.

## **Ευχαριστίες**

Ευχαριστώ τους καθηγητές και τις καθηγήτριες μου για την καθοδήγηση τους.

# Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	iii
Περίληψη.....	iv
Abstract .....	v
Ευχαριστίες .....	vi
Περιεχόμενα .....	vii
Κατάλογος Εικόνων .....	ix
Κατάλογος Πινάκων.....	ix
Κατάλογος Σχημάτων .....	x
Συντομογραφίες.....	xi
Κεφάλαιο 1ο: Ιστορική Αναδρομή της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης .....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Ιστορική Αναδρομή.....	2
Κεφάλαιο 2ο: Ατμοσφαιρική Ρύπανση και Περιβαλλοντολογικές Συνέπειες.....	9
2.1 Επίδραση των Ρυπογόνων στα Ζώα.....	9
2.2 Έκθεση σε Ζώα Εργαστηρίου .....	10
Κεφάλαιο 3ο: Σύσταση και Παρακολούθηση της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης.....	12
3.1 Κύρια Ρυπογόνα.....	12
3.1.1 Διοξείδιο του Θείου.....	12
3.1.2 Οξείδια του Αζώτου .....	13
3.1.3 Μονοξείδιο του Άνθρακα.....	13
3.1.4 Μικροσωματίδια.....	14
3.1.5 Οι Επικίνδυνοι Ρυπογόνοι .....	14
3.1.6 Η Σωματιδιακή Ύλη.....	15
3.2 Δείκτης Ποιότητας Αέρα (AQI).....	17
3.3 Αισθητήρες για Air Quality για Εφαρμογές σε Εσωτερικούς και Εξωτερικούς Χώρους .....	17
Κεφάλαιο 4ο: Υλικά και Εξοπλισμός Συστήματος Παρακολούθησης Ποιότητας Αέρα .....	19
4.1 Arduino.....	19
4.2 Η Ανάγκη για το Arduino.....	20
4.3 Ανάλυση των Εξαρτημάτων.....	21
4.3.1 Υλικό .....	21
4.3.2 Λογισμικό.....	22
4.4 MQ Gas Sensors.....	22

4.5	Περιγραφή της Δομής του MQ-135 .....	24
4.5.1	Εσωτερικό κύκλωμα του MQ-135 .....	24
4.5.2	Αρχή λειτουργίας, Βαθμονόμηση και Εφαρμογές .....	26
4.6	I2C Adapter .....	26
4.7	Μεταφορά δεδομένων I2C .....	28
4.8	DHT11 .....	29
4.9	Πρώτη Μορφή Κώδικα .....	29
4.10	Διάγραμμα Ροής Προγράμματος .....	33
Κεφάλαιο 5ο: Μεθοδολογία Υλοποίησης Συστήματος και Μετρήσεις .....		34
5.1	Μετρήσεις .....	34
5.1.1	Μετρήσεις στα Προάστια .....	34
5.1.2	Μετρήσεις στο Κέντρο της Πόλης-Μέρος Α .....	38
5.1.3	Μετρήσεις στο Κέντρο της Πόλης-Μερος Β .....	40
5.1.4	Υπολογισμοί .....	42
5.2	Βαθμονόμηση .....	44
5.3	Αποτελέσματα Πειραμάτων .....	46
5.3.1	Πείραμα 1 .....	47
5.3.1	Πείραμα 2 .....	48
5.4	Εξαγωγή Μαθηματικών Μοντέλων Υπολογισμού Μεγεθών .....	48
5.4.1	Διοξείδιο του Άνθρακα (CO <sub>2</sub> ) .....	49
5.4.2	Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO) .....	50
5.4.3	Οξείδια του Αζώτου (NO <sub>x</sub> ) .....	50
5.4.4	Ανακεφαλαίωση Τιμών .....	52
5.4.5	Σωματίδια PM <sub>2.5</sub> και PM <sub>10</sub> .....	52
5.5	Ολοκλήρωση του Κώδικα .....	52
5.5.1	Κώδικας Βαθμονόμησης .....	53
5.5.2	Ανάλυση τελικής μορφής κώδικα .....	55
Κεφάλαιο 6ο: Αποτελέσματα .....		58
6.1	Εισαγωγή .....	58
6.2	Νέο Πείραμα .....	60
6.3	Καιρικές Συνθήκες .....	60
6.4	Μονοξείδιο του άνθρακα .....	60
6.5	Οξείδια του Αζώτου .....	61
6.6	PM <sub>2.5</sub> .....	62
6.7	PM <sub>10</sub> .....	63

6.8	Δείκτης AQI.....	64
6.9	Συμπέρασμα.....	65
6.10	Μελλοντικές Βελτιώσεις και Πιθανές Αναβαθμίσεις.....	65
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	66
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Κώδικας Πειραμάτων.....	70
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Κώδικας Βαθμονόμησης.....	71
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ C : Τελική μορφή του κώδικα.....	72

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1:	Great London Smog of 1952 [28].....	3
Εικόνα 2:	New York City Smog of 1966 [29].....	4
Εικόνα 3:	St. Louis Black Tuesday [30].....	5
Εικόνα 4:	Eastern China Smog by Nasa [31].....	7
Εικόνα 5:	Το Arduino Uno [33].....	20
Εικόνα 6:	Απεικόνιση των εξαρτημάτων του Arduino Uno [34].....	21
Εικόνα 7:	Παράδειγμα προγραμματιστικού περιβάλλοντος Arduino [35].	22
Εικόνα 8:	Απεικόνιση των ειδών αισθητήρων βλαβερών αερίων [36].	23
Εικόνα 9:	Φωτογραφία LCD Monitor [38].	26
Εικόνα 10:	Φωτογραφία Λειτουργίας I2C Adapter [39].....	28
Εικόνα 11:	DHT-11 αισθητήρας Υγρασίας και Θερμοκρασίας [41].	29
Εικόνα 12:	Πείραμα με δοχείο στα προάστια. ....	36
Εικόνα 13:	Πείραμα χωρίς δοχείο στα προάστια. ....	38
Εικόνα 14:	Πείραμα σε αστικό κέντρο.....	40
Εικόνα 15:	Διαδικασία βαθμονόμησης. ....	47
Εικόνα 16:	Ένδειξη βαθμονόμησης. ....	47

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1:	Χαρακτηριστικά των αισθητήρων MQ.....	23
Πίνακας 2:	Μετρήσεις στα προάστια μέσα σε δοχείο.....	34
Πίνακας 3:	Μετρήσεις στα Προάστια χωρίς δοχείο.....	36
Πίνακας 4:	Μετρήσεις στο κέντρο της Θεσσαλονίκης.....	38
Πίνακας 5:	Δεύτερη μέτρηση στο κέντρο της Θεσσαλονίκης με πρόσθετη αντίσταση.....	40
Πίνακας 6:	Στοιχεία για το μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού για το CO <sub>2</sub> .....	49
Πίνακας 7:	Στοιχεία για το μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού για το CO.....	50
Πίνακας 8:	Στοιχεία για το μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού για τα NO <sub>x</sub> .....	50
Πίνακας 9:	Τιμές παραμέτρων για την βαθμονόμηση του αισθητήρα.....	52
Πίνακας 10:	Πίνακας υπολογισμού Air Quality.....	52
Πίνακας 11:	Θερμοκρασία και Υγρασία.....	60
Πίνακας 12:	Μονοξείδιο του άνθρακα.....	61

Πίνακας 13: Οξειδία του αζώτου. ....	61
Πίνακας 14: PM2.5. ....	62
Πίνακας 15: PM 10. ....	63
Πίνακας 16: Δείκτης Ποιότητας του Αέρα.....	64

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: SO <sub>2</sub> through the years [32]. ....	12
Σχήμα 2: Εκπομπή ρυπογόνων στο Ηνωμένο Βασίλειο [32]. ....	13
Σχήμα 3: Εκπομπή μικροσωματιδίων στο Ηνωμένο Βασίλειο [32]. ....	16
Σχήμα 4: Απεικόνιση του κυκλώματος του MQ-135 [37]. ....	25
Σχήμα 5: Εικόνα Λειτουργίας I2C Adapter [40]. ....	28
Σχήμα 6: Διάγραμμα Ροής Αρχικού Προγράμματος.....	33
Σχήμα 7: Μέτρηση των αερίων στην πάροδο του χρόνου .....	35
Σχήμα 8: Μέτρηση αερίων χωρίς το δοχείο .....	37
Σχήμα 9: Μέτρηση αερίων στο κέντρο της πόλης .....	39
Σχήμα 10: Δεύτερη μέτρηση στο κέντρο της πόλης με προσθήκη αντίστασης .....	42
Σχήμα 11: Συνδεσμολογία κυκλώματος.....	43
Σχήμα 12: Λογαριθμικό διάγραμμα συγκέντρωσης αερίων για το MQ-135 [42]. ....	44
Σχήμα 13: Διάγραμμα ροής προγράμματος βαθμονόμησης. ....	55
Σχήμα 14: Διάγραμμα Ροής προγράμματος. ....	58
Σχήμα 15: Γράφημα Σύγκρισης Τιμών CO.....	61
Σχήμα 16: Γράφημα Σύγκρισης Τιμών NO <sub>x</sub> .....	62
Σχήμα 17: Γράφημα Σύγκρισης Τιμών PM <sub>2.5</sub> .....	63
Σχήμα 18: Γράφημα Σύγκρισης Τιμών PM <sub>10</sub> .....	64

## Συντομογραφίες

<b>PPM</b>	<b>PARTS PER MILLION</b>
<b>PM2.5</b>	Particulate Matter of 2.5 micron
<b>AQI</b>	Air Quality Index
<b>NMC</b>	National Meteorological Center
<b>NASA</b>	National Aeronautics and Space Administration
<b>SO2</b>	Sulfur Dioxide
<b>SMS</b>	Short Message Service
<b>IOT</b>	Internet Of Things
<b>WI-FI</b>	Wireless Fidelity
<b>CO</b>	Carbon Oxide
<b>O3</b>	Ozone
<b>NO2</b>	Nitrogen Dioxide
<b>PM10</b>	Particulate Matter of 10 micron
<b>AQMS</b>	Air Quality Measurement Systems
<b>NOX</b>	Nitrogen Oxides
<b>TSP</b>	Total Suspended Particulate matter
<b>PM1</b>	Particulate Matter of less than 1 micron
<b>DDR</b>	Deutsche Demokratische Republik (Λαϊκή Δημοκρατία της Γερμανίας )
<b>PB</b>	Lead (Μόλυβδος)
<b>EOE</b>	Εύφλεκτες Οργανικές Ενώσεις
<b>ΠΑΥ</b>	Πολυαρωματικοί Υδρογονάνθρακες
<b>MTBE</b>	μεθυλ-τερτ-μπουτυλαιθέριο
<b>RR</b>	Relative Risk
<b>IDE</b>	Integrated Development Environment (Ολοκληρωμένο Περιβάλλον Ανάπτυξης)
<b>USB</b>	Universal Serial Bus
<b>LED</b>	light emitting diode (δίοδος εκπομπής φωτός)
<b>LCD</b>	Liquid Crystal Display (Οθόνη υγρών κρυστάλλων)
<b>DC</b>	Direct Current (Συνεχές ρεύμα)
<b>AL203</b>	Aluminum Oxide (Οξείδιο του αλουμινίου)
<b>TTL</b>	Transistor-Transistor Logic
<b>NH3</b>	Αμμωνία

<b>ADC</b>	Analog to digital Converter (μετατροπέας αναλογικού σε ψηφιακό)
<b>AO</b>	Analog Output (Αναλογική έξοδος)
<b>AI</b>	Analog Input (Αναλογική Είσοδος)
<b>SCL</b>	Serial Clock Line (Γραμμή Σειριακού Ρολογιού)
<b>SDA</b>	Serial Data Line (Γραμμή Σειριακών Δεδομένων)
<b>NTC</b>	Negative Temperature Coefficient (Αρνητικός συντελεστής θερμοκρασίας)

# Κεφάλαιο 1ο: Ιστορική Αναδρομή της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης

## 1.1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη των αστικών κέντρων και η αύξηση του πληθυσμού έχουν ως αποτέλεσμα τη ραγδαία αύξηση των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων και αναγκών. Λόγω της βιομηχανικής ανάπτυξης στα αστικά κέντρα, παρατηρείται το φαινόμενο της αστικοποίησης, το οποίο ωθεί τους ανθρώπους να μετακινηθούν στις πόλεις, με αποτέλεσμα την αύξηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Για να βρεθούν λύσεις στο πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, πρέπει πρώτα να ληφθούν υπόψη κρίσιμα δεδομένα για την αύξηση του πληθυσμού και τις τάσεις αστικοποίησης που παρατηρούνται στις αναπτυσσόμενες χώρες του κόσμου. Από το 1950 μέχρι το 1999 ο παγκόσμιος πληθυσμός έχει διπλασιαστεί και, κατ' επέκταση, έχει αυξηθεί και ο παγκόσμιος αριθμός αυτοκινήτων με παράγοντα το 10. Κατά τη διάρκεια αυτών των 50 ετών, παρατηρήθηκε ότι ο αριθμός των κατοικημένων περιοχών με αριθμό κατοίκων άνω των 2000 ανθρώπων, έχει μετατοπιστεί από ποσοστό κάτω από 30% σε 44%.

Πιο συγκεκριμένα, στις ανεπτυγμένες χώρες βρίσκεται στο 73% και στις αναπτυσσόμενες στο 36%. Στις αναπτυσσόμενες χώρες παρατηρούνται κύματα μεταναστεύσεων από την εξοχή προς τα αστικά κέντρα. Το συγκεκριμένο φαινόμενο αποτελεί αποτέλεσμα δύο παραγόντων: Του αυτοματισμού της καλλιέργειας του εδάφους και των καινούργιων εργασιακών ευκαιριών των αστικών κέντρων. Οι αυξημένες ανάγκες για τρόφιμα, λόγω της αύξησης του πληθυσμού, παράγουν με τη σειρά τους την ανάγκη για έρευνα και καινοτομίες στις τεχνολογίες και τεχνικές καλλιέργειας του εδάφους. Παράγωγο των ερευνών και καινοτομιών στον χώρο της καλλιέργειας είναι η διαρκώς αυξανόμενη χρήση τεχνικών και τεχνολογιών αυτοματισμού.

Ο αυτοματισμός συμβάλλει σημαντικά στη ραγδαία βελτίωση της αποτελεσματικότητας της καλλιέργειας της γης, αφού χρησιμοποιεί προγραμματιζόμενες συσκευές και αισθητήρες που αποφέρουν το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Χάρη σε αυτό το αποτέλεσμα, ο αυτοματισμός σχεδόν εξαλείφει την ανάγκη για ανθρώπινο δυναμικό στον χώρο της καλλιέργειας, φαινόμενο το οποίο, κατά συνέπεια, σχεδόν εξαλείφει τις θέσεις εργασίας που προσφέρει η καλλιέργεια της γης στις γύρω περιοχές και ωθεί πολλούς ανθρώπους να μεταναστεύσουν στα αστικά κέντρα για έρευνα εργασίας.

Τα αστικά κέντρα προσφέρουν πολλές νέες θέσεις εργασίας εξαιτίας της ανάπτυξης νέων βιομηχανιών. Για πολλά χρόνια η ρύπανση του αέρα ήταν αποκλειστικά ένα αστικό φαινόμενο και τα ιστορικά αρχεία μαρτυρούν ότι τα προβλήματα ήταν εκτεταμένα. Οι άνθρωποι ήταν λιγότερο επικριτικοί ως προς τις συνθήκες διαβίωσης τους και δεν είχαν μέσα αξιολόγησης των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων των βλαβερών ουσιών στην ατμόσφαιρα (όπως π.χ. των καρκινογόνων ουσιών). Φυσικά, τα περισσότερα αρχεία κάνουν αναφορά για τις αισθητικές επιπτώσεις στην μορφή της οσμής και της ρύπανσης, οι οποίες από μόνες τους δεν ήταν αναγκαστικά επιβλαβείς για την υγεία.

Να σημειωθεί ότι μέχρι τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, οι άνθρωποι είχαν αμφιλεγόμενη στάση απέναντι στη ρύπανση, η οποία παρ' ότι γινόταν αντιληπτή, θεωρούταν σύμβολο πλούτου και ανάπτυξης. Έτσι, υπήρξαν διαφημίσεις που έδειχναν εικόνες με καπνοδόχους και αυτοκίνητα, τα οποία περιλαμβάνονται στα σύμβολα εξέλιξης και ανάπτυξης, οι οποίες θα λάμβαναν σημαντική υποστήριξη τη σήμερον ημέρα. Ημιποσοτικές αξιολογήσεις του πρώιμου αστικού αέρα έχουν επιχειρηθεί με διάφορους τρόπους ανά τα χρόνια και αποτελούν αναδυόμενο κλάδο της επιστήμης ακόμη και σήμερα. Μεταξύ άλλων, αρχεία καταγραφής των υλικών ζημιών και των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία και βλάστηση.

Η συνεχόμενη και λεπτομερής καταγραφή της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, από πηγές όπως η κατανάλωση καυσίμων και πρώτων υλών, αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τη δημιουργία και μοντελοποίηση τρόπων καταπολέμησης του φαινομένου. Ορισμένες άμεσες μετρήσεις είχαν διεξαχθεί κυρίως από μερικούς επιστήμονες και ερασιτέχνες τον τελευταίο αιώνα, αλλά συστηματικές και κοινωνικές έρευνες έρχονται στο προσκήνιο με την πάροδο του χρόνου.

## 1.2 Ιστορική Αναδρομή

Η παρακολούθηση και καταγραφή της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην Αγγλία δεν αυξήθηκε σημαντικά πριν από το επεισόδιο του ισχυρού ρυπογόνου νέφους που παρατηρήθηκε στο Λονδίνο τον Δεκέμβριο του 1952. Το Μεγάλο Νέφος του Λονδίνου, επίσης γνωστό ως Μεγάλο Νέφος του 1952, αποτέλεσε σοβαρό γεγονός ατμοσφαιρικής ρύπανσης και επηρέασε το Λονδίνο της Αγγλίας τον Δεκέμβριο του 1952.

Εκείνη η περίοδος χαρακτηρίστηκε από ασυνήθιστα ψυχρό καιρό και συνθήκες άπνοιας και οδήγησε στη συγκέντρωση ατμοσφαιρικών ρύπων, κυρίως προερχόμενων από τη χρήση άνθρακα, δημιουργώντας ένα παχύ στρώμα αιθαλομίχλης πάνω από την πόλη. Διήρκεσε από την Παρασκευή 5 Δεκεμβρίου, μέχρι και την Τρίτη 9 Δεκεμβρίου του 1952 και στη συνέχεια διαλύθηκε με την αλλαγή του καιρού.

Η αιθαλομίχλη προκάλεσε σημαντικές διαταραχές, όπως τη μείωση της ορατότητας και τη διείσδυση σε εσωτερικούς χώρους, σοβαρότερες από προηγούμενες περιπτώσεις αιθαλομίχλης. Τις ακόλουθες εβδομάδες, οι κυβερνητικές ιατρικές εκθέσεις εκτίμησαν ότι έως και 4.000 άνθρωποι πέθαναν ως άμεση συνέπεια της αιθαλομίχλης, ενώ 100.000 ακόμη αρρώστησαν από τις επιπτώσεις της στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα.

Πιο πρόσφατες έρευνες υποδεικνύουν ότι ο συνολικός αριθμός θανάτων ήταν αρκετά μεγαλύτερος, με εκτιμήσεις από 10.000 έως 12.000 θανάτους. Η κακή ποιότητα του αέρα αποτελούσε πρόβλημα τουλάχιστον από τον 13<sup>ο</sup> αιώνα. Ο ημερολογιογράφος John Evelyn έγραψε το 1661 στο *Fumifugium* (το πρώτο βιβλίο με θέμα την ατμοσφαιρική ρύπανση) για την "ενόχληση από τον αέρα και τον καπνό του Λονδίνου". Ωστόσο, το Μεγάλο Νέφος ήταν αρκετές φορές χειρότερο από οτιδήποτε είχε βιώσει η πόλη στο παρελθόν: Θεωρείται το χειρότερο γεγονός ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ιστορία του Ηνωμένου Βασιλείου και το σημαντικότερο για τις επιπτώσεις του στην περιβαλλοντική έρευνα, την κυβερνητική ρύθμιση και την ευαισθητοποίηση του κοινού σχετικά με τη σχέση μεταξύ της ποιότητας του αέρα και της υγείας. Οδήγησε σε αρκετές αλλαγές στις πρακτικές και τους κανονισμούς, συμπεριλαμβανομένου του νόμου περί καθαρού αέρα του 1956 (Clean Air Act) [1].



Εικόνα 1: Great London Smog of 1952 [28].

Ένα παρόμοιο φαινόμενο παρατηρήθηκε στη Νέα Υόρκη της Αμερικής. Η αιθαλομίχλη της Νέας Υόρκης το 1966 αποτέλεσε ένα σημαντικό επεισόδιο ατμοσφαιρικής ρύπανσης και περιβαλλοντικής καταστροφής, κατά τη διάρκεια των εορτών των Ευχαριστιών. Το νέφος κάλυψε την πόλη και τη γύρω περιοχή από τις 23 έως τις 26 Νοεμβρίου, γεμίζοντας τον αέρα της πόλης με επιβλαβή επίπεδα διαφόρων τοξικών ρύπων. Ήταν η τρίτη μεγάλη αιθαλομίχλη στη Νέα Υόρκη, μετά από γεγονότα παρόμοιας κλίμακας το 1953 και το 1963.

Στις 23 Νοεμβρίου, μια μεγάλη μάζα στάσιμου αέρα εγκλώβισε ρύπους στον αέρα της πόλης, επάνω από την Ανατολική Ακτή. Για τρεις ημέρες, η Νέα Υόρκη κατακλύστηκε από επικίνδυνα υψηλά επίπεδα μονοξειδίου του άνθρακα, διοξειδίου του θείου, καπνού και ομίχλης. Θύλακες ατμοσφαιρικής ρύπανσης διείσδυσαν στην ευρύτερη μητροπολιτική περιοχή της Νέας Υόρκης, συμπεριλαμβανομένων τμημάτων του Νιου Τζέρσεϊ και του Κονέκτικατ.

Μέχρι τις 25 Νοεμβρίου, το νέφος έγινε αρκετά σοβαρό, μέχρι που οι περιφερειακοί ηγέτες ανακοίνωσαν "συναγερμό πρώτου σταδίου". Κατά τη διάρκεια του συναγερμού, οι ηγέτες των τοπικών και πολιτειακών κυβερνήσεων ζήτησαν από τους κατοίκους και τη βιομηχανία να λάβουν εθελοντικά μέτρα για την ελαχιστοποίηση των εκπομπών. Οι αξιωματούχοι υγείας συμβούλευσαν τα άτομα με αναπνευστικές ή καρδιακές παθήσεις να παραμείνουν σε εσωτερικούς χώρους. Το νέφος διαλύθηκε στις 26 Νοεμβρίου και ο συναγερμός έληξε.

Στους μήνες που ακολούθησαν, ιατρικοί ερευνητές μελέτησαν τις επιπτώσεις του νέφους στην υγεία. Αρχικά, οι αξιωματούχοι της πόλης υποστήριξαν ότι το νέφος δεν είχε προκαλέσει θανάτους, ενώ σύντομα έγινε σαφές ότι είχε βλάψει σημαντικά τη δημόσια υγεία. Μια μελέτη που δημοσιεύθηκε τον Δεκέμβριο του 1966, όμως, εκτίμησε ότι το 10% του πληθυσμού της πόλης είχε υποστεί δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία, όπως τσούξιμο στα μάτια, βήχα και αναπνευστική δυσχέρεια. Μια στατιστική ανάλυση που δημοσιεύθηκε τον Οκτώβριο του 1967 διαπίστωσε ότι 168 θάνατοι είχαν πιθανότατα προκληθεί από την αιθαλομίχλη.

Η αιθαλομίχλη προκάλεσε καταλυτικά τη μεγαλύτερη εθνική ευαισθητοποίηση για την ατμοσφαιρική ρύπανση ως σοβαρό πρόβλημα υγείας και πολιτικό ζήτημα. Η κυβέρνηση της Νέας Υόρκης επικαιροποίησε τους τοπικούς νόμους για τον έλεγχο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Με αφορμή την αιθαλομίχλη, ο πρόεδρος Lyndon B. Johnson και μέλη του Κογκρέσου εργάστηκαν για την ψήφιση ομοσπονδιακής νομοθεσίας που ρύθμιζε την ατμοσφαιρική ρύπανση στις Ηνωμένες Πολιτείες, με αποκορύφωμα τον νόμο του 1967 για την ποιότητα του αέρα (Air Quality Act) και τον νόμο του 1970 για τον καθαρό αέρα (Clean Air Act) [19].



Εικόνα 2: New York City Smog of 1966 [29].

Η Νέα Υόρκη δεν ήταν η μόνη πόλη της Αμερικής που υπέφερε από φαινόμενα πυκνού βλαβερού αέρα. Η πολιτεία του Μιζούρι βίωσε παρόμοιο φαινόμενο. Συγκεκριμένα, στο Σεντ Λουίς (Saint Louis) η ρύπανση από τον καπνό αποτέλεσε πρόβλημα για πολλές δεκαετίες πριν από το συμβάν, λόγω της μεγάλης κλίμακας καύσης ασφαλτούχου (μαλακού) άνθρακα για την παροχή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας για τα σπίτια, τις επιχειρήσεις και τις μεταφορές.

Το 1893, το Συμβούλιο ψήφισε διάταγμα που απαγόρευε την εκπομπή "πυκνού γκριζού καπνού εντός των εταιρικών ορίων του Σεντ Λουίς", αλλά δεν μπόρεσε να το εφαρμόσει λόγω της αποτυχίας των νομικών ενεργειών εναντίον της Heitzberg Packing and Provision Company, μιας από τις χειρότερες εταιρίες - παραβάτες.

Οι πρώτες προσπάθειες είχαν βασιστεί στην εκπαίδευση, όπως η εκμάθηση μεθόδων για να ανάβουν φωτιές καταλληλότερες προς το περιβάλλον. Σύντομα έγινε αντιληπτό ότι η πραγματική βελτίωση θα επέλθει μόνο με τη μετάβαση σε ένα καθαρότερο καύσιμο. Το φυσικό αέριο, το πετρέλαιο, ο οπτάνθρακας και ο ανθρακίτης εξετάστηκαν αλλά αποκλείστηκαν για λόγους κόστους. Η εναλλακτική λύση ήταν η διαστασιολόγηση του υπάρχοντος μαλακού άνθρακα και η εξασφάλιση ότι όλος ο άνθρακας που πωλούνταν στο Σεντ Λουίς ήταν αυτής της ποικιλίας. Τον Φεβρουάριο του 1937 ψηφίστηκε διάταγμα για τον καπνό, με το οποίο δημιουργήθηκε ένα "Τμήμα Ρύθμισης του Καπνού στο Τμήμα Δημόσιας Ασφάλειας", υποχρεώνοντας τις μεγαλύτερες επιχειρήσεις να κάψουν μόνο καθαρό άνθρακα και θέτοντας πρότυπα για την εκπομπή καπνού και την επιθεώρηση.

Μέχρι το 1938, οι εκπομπές από τα εργοστασιακά φουγάρα είχαν μειωθεί κατά δύο τρίτα. Παρά τη σχετική βελτίωση, η ρύπανση από τον καπνό εξακολουθούσε να αποτελεί ορατό πρόβλημα, δεδομένου ότι ο νέος νόμος δεν κάλυπτε τις μικρότερες επιχειρήσεις και τους οικιακούς χρήστες - το 97% των σπιτιών εξακολουθούσε να χρησιμοποιεί άνθρακα. Το δημοτικό συμβούλιο ήταν απρόθυμο να περάσει περαιτέρω νομοθεσία που θα μπορούσε να αποξενώσει τους ψηφοφόρους, οπότε ο "εκτελεστής" του δημάρχου, ο Τάκερ, περιορίστηκε να χρησιμοποιήσει την πειθώ μέσω του Τύπου και των ραδιοφωνικών εκπομπών. Μια εφημερίδα, η St. Louis Post-Dispatch, έγινε αξιοσημείωτη για την εκστρατεία της να πείσει τους κατοίκους για τα οφέλη της μετάβασης σε καθαρότερες μορφές άνθρακα.

Ωστόσο, την Τρίτη, 28 Νοεμβρίου 1939, μια μετεωρολογική αναστροφή της θερμοκρασίας παγίδευσε τις εκπομπές από την καύση άνθρακα κοντά στο έδαφος, το οποίο είχε ως αποτέλεσμα "τη μέρα που ο ήλιος δεν έλαμψε". Ένα σύννεφο πυκνού μαύρου καπνού τύλιξε το Σεντ Λούις, πολύ χειρότερο από οποιοδήποτε άλλο που είχε παρατηρηθεί προηγουμένως στην πόλη. Η ημέρα έμεινε γνωστή ως "Μαύρη Τρίτη". Η αιθαλομίχλη παρέμεινε για εννέα ημέρες κατά τη διάρκεια του επόμενου μήνα. Αυτό αποδείχθηκε ότι ήταν ο καταλύτης που ανάγκασε το συμβούλιο να λάβει μέτρα.

Νέες καθαρότερες, οικονομικά προσιτές προμήθειες άνθρακα (ημιανθρακίτη) εξασφαλίστηκαν γρήγορα από το Αρκάνσας εγκαίρως για τον επόμενο χειμώνα. Αυτό, σε συνδυασμό με μια νέα διάταξη περί καπνού, βελτιώσεις στην απόδοση των κλιβάνων και τη συνεχιζόμενη εκστρατεία ενημέρωσης του κοινού, είχε ως αποτέλεσμα τη σημαντική και μόνιμη βελτίωση της ποιότητας του αέρα στην πόλη.



Εικόνα 3: St. Louis Black Tuesday [30].

Τα συμβάντα ατμοσφαιρικής ρύπανσης δεν περιορίζονται μόνο στον προηγούμενο αιώνα καθώς όμοια φαινόμενα έχουν καταγραφεί τόσο πρόσφατα όσο και το 2013 και συνεχίζονται να καταγράφονται μέχρι και σήμερα. Ιδιαίτερης σημασίας φαινόμενο πυκνής ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι αυτό που παρατηρήθηκε τον Δεκέμβριο του 2013 στην Κίνα. Η αιθαλομίχλη της Ανατολικής Κίνας το 2013 ήταν ένα επεισόδιο σοβαρής ατμοσφαιρικής ρύπανσης που επηρέασε την Ανατολική Κίνα, συμπεριλαμβανομένων όλων ή τμημάτων των δήμων Σαγκάης και Τσιαντζίν και των επαρχιών Χεμπεί, Σαντόνγκ, Τζιανγκσού, Ανχούι, Χενάν και Ζετζιάνγκ, κατά τη διάρκεια του Δεκεμβρίου 2013. Η έλλειψη ψυχρής ροής αέρα, σε συνδυασμό με τις αργά κινούμενες αέριες μάζες που μετέφεραν βιομηχανικές εκπομπές, συγκέντρωσαν τους ατμοσφαιρικούς ρύπους σχηματίζοντας ένα παχύ στρώμα

αιθαλομίχλης πάνω από την περιοχή. Τα επίπεδα των σωματιδίων PM<sub>2.5</sub> ξεπερνούσαν κατά μέσο όρο τα 150 μικρογραμμάρια ανά κυβικό μέτρο. Σε ορισμένες περιοχές ήταν 300 έως 500 μικρογραμμάρια ανά κυβικό μέτρο.

Ήταν μια από τις χειρότερες εξάρσεις ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην περιοχή, περιόρισε την ορατότητα και προκάλεσε σημαντικές διαταραχές στις μεταφορές και τις καθημερινές δραστηριότητες. Αεροδρόμια, αυτοκινητόδρομοι και σχολεία έκλεισαν. Τον Ιανουάριο του 2013, η Κίνα αντιμετώπισε μαζική ομίχλη, η οποία επηρέασε περίπου 600 εκατομμύρια ανθρώπους και κάλυψε δεκαεπτά επαρχίες, δήμους και αυτόνομες περιοχές, το ένα τέταρτο της επικράτειας της Κίνας. Στις 12 Σεπτεμβρίου 2013, το Κρατικό Συμβούλιο ανακοίνωσε το "Σχέδιο πρόληψης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης". Η Κίνα περιόρισε το επίπεδο των λεπτών σωματιδίων και ο δείκτης αξιολόγησης των Κινέζων κυβερνητικών αξιωματούχων περιελάμβανε για πρώτη φορά τη βελτίωση του περιβάλλοντος.

Στις 4 Νοεμβρίου 2013, η Κινεζική Ακαδημία Κοινωνικών Επιστημών και η Μετεωρολογική Υπηρεσία της Κίνας εξέδωσαν από κοινού την "Πράσινη Βίβλο για την κλιματική αλλαγή: Αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής (2013)". Σε αυτό το έγγραφο αναφερόταν ότι η ομίχλη και η αιθαλομίχλη στην Κίνα είχαν αυξηθεί τα τελευταία 50 χρόνια με τον αριθμό των ημερών χωρίς ομίχλη να μειώνεται σημαντικά, ενώ οι ημέρες αιθαλομίχλης αυξάνοντα. Η περισσότερη ομίχλη και αιθαλομίχλη σημειώθηκε στις περιοχές του Δέλτα του ποταμού Μαργαριταριού και του ποταμού Γιανγκτσέ, οι οποίες είναι οι πιο βιομηχανοποιημένες περιοχές. Το έγγραφο ανέφερε επίσης ότι ο κύριος λόγος της αύξησης της ομίχλης και αιθαλομίχλης είναι η ετήσια αύξηση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων στην Κίνα.

Αναλύοντας το καιρικό αυτό φαινόμενο, οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι το μείγμα φυσικής ομίχλης και παραγόμενης αιθαλομίχλης άρχισε να συσσωρεύεται το πρώτο Σαββατοκύριακο του Δεκεμβρίου 2013. Στη Σαγκάη, ο Δείκτης Ποιότητας Αέρα (AQI) ξεπέρασε το όριο των 300 στις 2 Δεκεμβρίου. Η παρατεταμένη αιθαλομίχλη έφερε επίσης την ποιότητα του αέρα σε γειτονικές πόλεις, όπως η Ναντζίνγκ, η Τζιαζίνγκ, σε σοβαρά μολυσμένα επίπεδα. Το Εθνικό Μετεωρολογικό Κέντρο (NMC) εξέδωσε κίτρινο συναγερμό για την αιθαλομίχλη και την ομίχλη, τον τρίτο πιο σοβαρό συναγερμό στο τετραβάθμιο σύστημα της Κίνας. Τα επίπεδα των σωματιδίων PM<sub>2.5</sub> έφτασαν στο υψηλότερο σημείο τους στις 6 Δεκεμβρίου 2013, με τη Σαγκάη να φτάνει στο υψηλότερο σημείο των 507. Η πρεσβεία των ΗΠΑ κατηγοριοποιεί τις τιμές της ποιότητας του αέρα πάνω από 300 ως επικίνδυνες για όλους τους ανθρώπους, όχι μόνο για όσους πάσχουν από καρδιακές ή πνευμονικές παθήσεις.

Σύμφωνα με μια εικόνα του δορυφόρου Terra της NASA, η πυκνή ομίχλη εκτείνεται πάνω από την Ανατολική Κίνα, σε μια απόσταση περίπου 1.200 χιλιομέτρων. Ο μολυσμένος αέρας εμφανίζεται γκριζός στην εικόνα και το μεγαλύτερο μέρος της ρύπανσης είναι παγιδευμένο στο κατώτερο οριακό στρώμα μερικών εκατοντάδων μέτρων.



Εικόνα 4: Eastern China Smog by Nasa [31].

Ένας από τους παράγοντες που οδήγησαν σε αυτό το αποτέλεσμα ήταν η καύση άνθρακα, η οποία αποτελεί κύρια πηγή ατμοσφαιρικής ρύπανσης από μικροσωματίδια. Η καύση άνθρακα αυξήθηκε καθώς ο καιρός χειροτέρευε κατά τους χειμερινούς μήνες, αναγκάζοντας τους κατοίκους να κάψουν περισσότερες πηγές άνθρακα για να ζεσταθούν. Αυτό αύξησε την ποσότητα θεικών και νιτρικών (αποτελέσματα της καύσης άνθρακα), γεγονός που οδήγησε σε υψηλότερα PM<sub>2.5</sub>. Η έρευνα υποδεικνύει ότι το 41% του άνθρακα που αποτελούσε αυτά τα υψηλά επίπεδα PM<sub>2.5</sub> στη Σαγκάη προερχόταν επίσης από την καύση άνθρακα.

Επιπλέον, υπήρξε ρύπανση από βιομηχανικές πηγές. Οι Jiangsu, Anhui, Shandong, Henan και πολλές ανατολικές επαρχίες αποτελούν περιοχές με έντονη καύση άνθρακα. Οι έρευνες δείχνουν ότι οι επικρατούντες άνεμοι έπνεαν χαμηλά αιωρούμενες αέριες μάζες εργοστασιακών εκπομπών (κυρίως SO<sub>2</sub>) προς την ανατολική ακτή της Κίνας. Οι περιφερειακές μεταφορές είχαν επίσης σημαντικό αντίκτυπο στην ποιότητα του αέρα.

Η κρατική υπηρεσία προστασίας του περιβάλλοντος ερευνά δεκάδες χιλιάδες ρυπαντές κάθε χρόνο, κλείνοντας χιλιάδες από τους χειρότερους παραβάτες, αλλά δεν έχει επιτύχει τον στόχο της για μείωση των εκπομπών κατά 2%. Το 2011, ένα εργοστάσιο κατασκευής ηλιακών συλλεκτών στην επαρχία Zhejiang είχε κλείσει λόγω τοξικών εκπομπών φθορίου που μόλυναν τον αέρα και το νερό, αρρωσταίνοντας τους κατοίκους της περιοχής. Ιδιαίτερες συνέπειες βίωσε η Σαγκάη καθώς ο αέρας αναφέρθηκε ότι είχε μια παράξενη γεύση - στυπτική και καπνιστή, με μια επίγευση γήινης πικρίας. Ήταν δυνατόν να αισθανθεί κανείς τα σωματίδια που έμοιαζαν με σκόνη στη γλώσσα.

Με μια τόσο υψηλή συγκέντρωση ατμοσφαιρικών ρύπων, οι κυβερνητικές αρχές προειδοποίησαν τους κατοίκους για συμπτώματα υγείας, όπως βήχας και πονοκέφαλος. Οι πολίτες συμβουλευτήκαν να φορούν προστατευτικές μάσκες και να χρησιμοποιούν συσκευές καθαρισμού του αέρα. Πολλοί εργαζόμενοι στην καθαριότητα υποχρεώθηκαν να φορούν μάσκες σκόνης κατά τη διάρκεια της εργασίας τους. Τα σχολεία έκλεισαν, καθώς η κυβέρνηση διέταξε τα παιδιά να παραμείνουν σε εσωτερικούς χώρους και να μειώσουν όσο το δυνατόν περισσότερο τις υπαίθριες δραστηριότητες.

Οι οικοδομικές εργασίες σταμάτησαν και οι αρχές απέσυραν σχεδόν το ένα τρίτο των κυβερνητικών οχημάτων από τους δρόμους. Η πλειονότητα των εισερχόμενων πτήσεων ακυρώθηκε και περισσότερες από 50 πτήσεις εκτράπηκαν στο Διεθνές Αεροδρόμιο Pudong της Σαγκάης.

## Κεφάλαιο 2ο: Ατμοσφαιρική Ρύπανση και Περιβαλλοντολογικές Συνέπειες

### 2.1 Επίδραση των Ρυπογόνων στα Ζώα

Η επίδραση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης επεκτείνεται και στους υπόλοιπους ζωντανούς οργανισμούς. Έτσι, έρευνες ξεκίνησαν για να διαπιστωθεί η έκταση της επιρροής της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην υγεία χλωρίδας και της πανίδας του κόσμου. Περιπτώσεις νοσηρότητας και θνησιμότητας καταγράφηκαν σε ζωντανούς οργανισμούς που εκτέθηκαν σε βλαβερούς ρύπους κατά τη διάρκεια περιστατικών σοβαρής ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Η θνησιμότητα εξημερωμένων ζώων, λόγω επιβαρυσμένης ποιότητας του αέρα επιφέρουν σημαντική οικονομική δυσφορία των ατόμων που σχετίζονται με την εκτροφή και ανάθρεψη ζώων φάρμας.

Παρόλο που υπάρχει ανησυχία για το παραπάνω γεγονός, τα συμβάντα είναι λίγα και η κτηνιατρική βιβλιογραφία αδυνατεί να συνδέσει την θνησιμότητα εξημερωμένων ζώων με τη φυσική έκθεση σε ατμοσφαιρική ρύπανση. Τα μόνα γεγονότα που ενισχύουν το ενδεχόμενο αυτό προέρχονται από αναφορές μεγάλων καταστροφών, όπως στην περίπτωση του Donora, του Λονδίνου και του Poza Rica.

Το 1948 Στο Donora της Πενσυλβάνιας, διεξήχθη εκτενής μελέτη για τις συνέπειες της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στους ζωντανούς οργανισμούς μετά από το περιστατικό ατμοσφαιρικής ρύπανσης που παρατηρήθηκε στην περιοχή. Η μελέτη αυτή αποκάλυψε ότι σημαντικός αριθμός ζώων αρρώστησαν και, στη συνέχεια, πέθαναν κατά τη διάρκεια της βδομάδας που σημειώθηκε το έντονο νέφος.

Οι πληροφορίες της μελέτης συλλέχθηκαν από τις μαρτυρίες τοπικών αγροκτημάτων και ιδιοκτητών κατοικίδιων στα νοσοκομεία και κτηνιατρεία της περιοχής. Έτσι, αναζητήθηκαν στοιχεία που επιβεβαιώνουν την συσχέτιση της θνησιμότητας τους με το νέφος μέσω συναντήσεων με τους τοπικούς κτηνιάτρους, ιδιοκτητών αγροκτημάτων, μέχρι και με χειριστή σφαγείου. Επιπλέον έρευνα έγινε στα αρχεία παραγωγής γάλακτος από γαλακτομικές μονάδες.

Η ομάδα που διεξήγαγε αυτή την έρευνα δεν μπόρεσε, όμως, να συνδέσει το πρόσφατο φαινόμενο ατμοσφαιρικής ρύπανσης με οποιαδήποτε εμφανή επίδραση στην υγεία των ζώων ή την παραγωγή γάλακτος, η οποία παρέμεινε πρακτικά αμετάβλητη, παρά την αυξημένη θνησιμότητα.

Οι συνεντεύξεις, παρόλα αυτά, έδειξαν ότι τα τραύματα που παρατηρήθηκαν στα ζώα της περιοχής ποικίλουν ανά είδος, με τα σκυλιά να παρουσιάζουν την εντονότερη ευπάθεια. Από τα 229 σκυλιά που συμμετείχαν στην έρευνα, το 15.5% αρρώστησε κατά τη διάρκεια του νέφους. Θνησιμότητα στο νέφος αποδείχθηκε σε 10 σκυλιά, κυρίως σε σκυλιά με ηλικία κάτω του ενός έτους [2].

Το νέφος που σημειώθηκε στο Donora αποτέλεσε κρίσιμο σημείο για την μελέτη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην Αμερική και συνέβαλε στην εδραίωση του Clean Air Act το 1963.

Παρόμοιο περιστατικό ατμοσφαιρικής ρύπανσης σημειώθηκε στο Poza Rica, στο Μεξικό. Το υδρόθειο, το οποίο αποτελεί θειούχο αέριο, συνδέθηκε με το περιστατικό. Έρευνες αναφέρουν ότι ο πληθυσμός των ζώων στην περιοχή που εκτέθηκαν στη ρύπανση ήταν αξιοσημείωτος. Θνησιμότητα σε ποσοστό 100% παρατηρήθηκε στα καναρίνια που εκτέθηκαν και 50% θνησιμότητα στα υπόλοιπα ζώα της περιοχής.

## 2.2 Έκθεση σε Ζώα Εργαστηρίου

Οι εργαστηριακοί πειραματισμοί επάνω σε μικρά ζώα μπορούν να προσφέρουν πιο στοχευμένες και αξιόπιστες πληροφορίες σε τρεις βασικές κατηγορίες: Αρχικά, τα ζώα έχουν γνωστή γενετική σύσταση με καλά καθορισμένους φυσιολογικούς παράγοντες και ευαισθησίες σε μολυσματικές ασθένειες [3] και, τελικά, σε ρύπους αέρα. Επιπλέον, μπορούν να ελέγχονται οι εκθέσεις σε ρύπους αέρα, τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά. Τέλος, οι αντιδράσεις των ζώων στις εκθέσεις μπορούν να μετρηθούν με λεπτομέρεια και με τεχνικές που δεν εφαρμόζονται στον άνθρωπο.

Τα εργαστηριακά πειράματα χρησιμεύουν τόσο στον βασικό τομέα της δοκιμής γνωστών ρύπων, όσο και ως παρακολούθηση επιδημιολογικών μελετών πεδίου, όσον αφορά τον προσδιορισμό ενδεχόμενης ύπαρξης από πραγματικές αιτιώδεις σχέσεις μεταξύ των δυνητικών αιτιών και των επιπτώσεων που παρατηρούνται στο πεδίο. Οι περισσότερες διαθέσιμες πληροφορίες από εργαστηριακά πειράματα ορίζουν τις αντιδράσεις των ζώων σε σημαντικές συγκεντρώσεις συγκεκριμένων χημικών ρύπων του αέρα.

Η μελέτη των ενδεχόμενων κινδύνων για την υγεία από τη ρύπανση του αέρα, όπως αυτή συμβαίνει σήμερα, πρέπει να επικεντρώνεται περισσότερο στην χρόνια έκθεση σε χαμηλά επίπεδα, παρά σε επεισόδια με οξεία, σύντομη και υψηλή συγκέντρωση. Παρότι ενδέχεται να αναμένονται και να προβλέπονται περαιτέρω οξεία επεισόδια, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν τοπικές καταστροφές, η μακροχρόνια, εκτεταμένη έκθεση σε καθημερινή ρύπανση του αέρα είναι που πρέπει να εξεταστεί εξονυχιστικά για καθυστερημένα αποτελέσματα στην υγεία των ζώων και των ανθρώπων.

Η επιδημιολογική έρευνα της "φυσικής" ρύπανσης μπορεί να συγγέται τόσο από περιβαλλοντικούς παράγοντες όσο και από άλλες ταυτόχρονες παθολογίες, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να διαφοροποιηθούν τα αποτελέσματα. Αυτή η διαπίστωση καθιστά αναγκαία την επιδημιολογία με πειραματικά ζώα. Οι περισσότερες διαθέσιμες πληροφορίες από εργαστηριακά πειράματα ορίζουν τις αντιδράσεις των ζώων σε σημαντικές συγκεντρώσεις ορισμένων χημικών ρύπων του αέρα.

Οι αρουραίοι που εκτέθηκαν σε σκόνη πυριτίου και πετραδιού δεν παρουσίασαν αυξημένη ευαισθησία στη λοβική πνευμονία [4]. Εκτενείς μελέτες έχουν γίνει για τις επιδράσεις του διοξειδίου του θείου και του θειικού οξέος σε χοιρίδια [5]. Ο συνδυασμός αυτών των δύο είχε πολύ πιο έντονο αποτέλεσμα σε σχέση με ισοδύναμες συγκεντρώσεις του καθενός ξεχωριστά. Τα αποτελέσματα παρατηρήθηκαν στην ανάπτυξη, στη παθολογία των πνευμόνων και στην αντίσταση των αεραγωγών.

Παρόμοιες φυσιολογικές επιδράσεις έχουν παρατηρηθεί και στον άνθρωπο [6], και παρόμοια σημάδια ασθένειας και παθολογία μετά θάνατον σημειώθηκαν στα βοοειδή που εκτέθηκαν στην ομίχλη του Λονδίνου [7]. Η υπέρπνοια, η δύσπνοια και η κατάθλιψη εμφανίζονται συνήθως στα περισσότερα εργαστηριακά ζώα. Τα χοιρίδια καταγράφονται ως πιο ευαίσθητα σε αυτούς τους τοξικούς παράγοντες από τα ποντίκια, τους αρουραίους ή τις αίγες [8].

Οι νεκροψίες εκτεθειμένων χοιριδίων έχουν αποκαλύψει την παρουσία πνευμονικών αιμορραγιών, οιδήματος, καθώς και συμπύκνωσης και ηπατοποίησης [5]. Μελέτες που βρίσκονται σε εξέλιξη στο ίδιο εργαστήριο δείχνουν ότι ο συνδυασμός διοξειδίου του θείου και αερολύματος χλωριούχου νατρίου προκαλεί επιδράσεις στην αντίσταση των αεραγωγών, πολλές φορές μεγαλύτερες από ό,τι το διοξείδιο του θείου μόνο.

Αυτή τη στιγμή, πολλές μελέτες βρίσκονται σε πλήρη εξέλιξη για την καθορισμό των επιδράσεων των μεμονωμένων ή συνδυασμένων ρύπων αέρα στα ένζυμα συγκεκριμένων ιστών ή κυττάρων. Προκαταρκτικές αναφορές για αρκετά από αυτά τα έργα περιλαμβάνονται στις πρακτικές του Σεμιναρίου Σχεδιασμού Έρευνας Ρύπανσης Αέρα [9].

Το όζον θεωρούνταν σημαντικό συστατικό της ρύπανσης του αέρα του Λος Άντζελες. Έχουν διεξαχθεί αρκετές εκτενείς μελέτες για την τοξικολογία του όζοντος και συνεχίζονται μέχρι σήμερα [10]. Οι ερεθιστικές ιδιότητες του όζοντος έχουν αποδειχθεί σε σκύλους, γάτες, κουνέλια, ποντίκια και χοιρίδια. Οι εκθέσεις σε τοξικά επίπεδα έχουν προκαλέσει έντονες πνευμονικές αλλαγές, περιλαμβάνοντας ακόμα και θάνατο. Το οίδημα και η αιμορραγία χαρακτηρίζουν τις μορφολογικές αλλαγές στους πνεύμονες που έχουν υποστεί βλάβες από το όζον.

Σχεδόν σε όλα τα πειράματα, οι συγκεντρώσεις του όζοντος έχουν υπερβεί αυτές που παρατηρούνται σε φυσικό περιβάλλον. Αν και το όζον θεωρούνταν αντιπροσωπευτικό συστατικό του οξειδωτικού τύπου ομίχλης, η άποψη που αναπτύσσεται τώρα είναι ότι το όζον από μόνο του δεν είναι ο υπεύθυνος παράγοντας σε αυτόν τον τύπο ομίχλης. Τα πειράματα σε εξέλιξη υποδεικνύουν ότι τα ζώα ενδέχεται να αναπτύξουν ανεκτικότητα στο όζον ή να γίνουν πιο ευαίσθητα μέσω περιβαλλοντικού στρες. Όλα τα παραπάνω γεγονότα καθιστούν την ανάγκη για την παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σημαντική τόσο για την προστασία του περιβάλλοντος όσο και για την προστασία της ανθρώπινης ζωής.

## Κεφάλαιο 3ο: Σύσταση και Παρακολούθηση της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης

### 3.1 Κύρια Ρυπογόνα

Οι επικίνδυνοι ατμοσφαιρικοί ρύποι που εκπέμπονται κυρίως από ανθρωπογενείς δραστηριότητες όπως η βιομηχανία, οι μεταφορές και η καύση ορυκτών καυσίμων, περιλαμβάνουν διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>), οξειδία του αζώτου (NO<sub>x</sub>), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), όζον (O<sub>3</sub>), αιωρούμενα μικροσωματίδια (PM<sub>2.5</sub> και PM<sub>10</sub>) καθώς και βαρέα μέταλλα και οργανικές πτητικές ενώσεις (VOC).

Οι παραπάνω ρύποι χαρακτηρίζονται από την ικανότητά τους να προξενούν, άμεσα ή έμμεσα, σοβαρά προβλήματα υγείας, όπως αναπνευστικές παθήσεις, καρδιαγγειακά νοσήματα και καρκίνο, ενώ έχουν αρνητική επίδραση στην ατμοσφαιρική χημεία, συμβάλλοντας στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και την κλιματική αλλαγή. Η ανάγκη για συνεχή παρακολούθηση, έλεγχο και περιορισμό των εκπομπών αυτών είναι επιτακτική προκειμένου να προστατευθεί η δημόσια υγεία και να διασφαλιστεί η βιωσιμότητα του περιβάλλοντος.

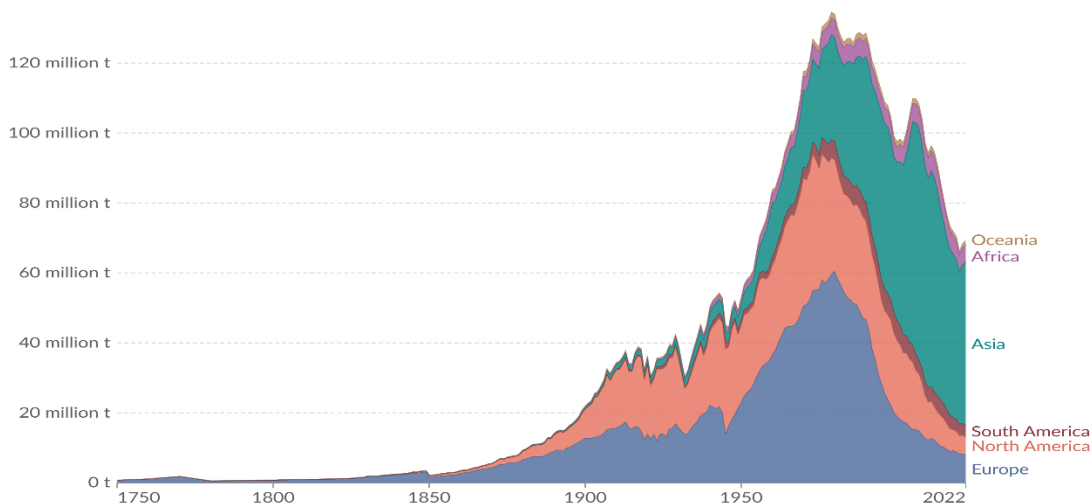
#### 3.1.1 Διοξείδιο του Θείου

Το διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>) είναι ο κλασικός ατμοσφαιρικός ρυπογόνος που συνδέεται με το θείο στα ορυκτά καύσιμα. Η εκπομπή μπορεί να μειωθεί με επιτυχία χρησιμοποιώντας καύσιμα με χαμηλή περιεκτικότητα θείου, όπως το φυσικό αέριο ή το πετρέλαιο αντί του άνθρακα. Σε μεγάλες εργοστασιακές μονάδες στα βιομηχανικά κράτη, η αφαίρεση του θείου από τα αέρια εξαγωγής είναι μια καθιερωμένη τεχνική.

#### Global sulphur dioxide (SO<sub>2</sub>) emissions by world region

Measured in tonnes per year.

Our World  
in Data



Data source: Community Emissions Data System (CEDS) 2024.

OurWorldinData.org/air-pollution | CC BY

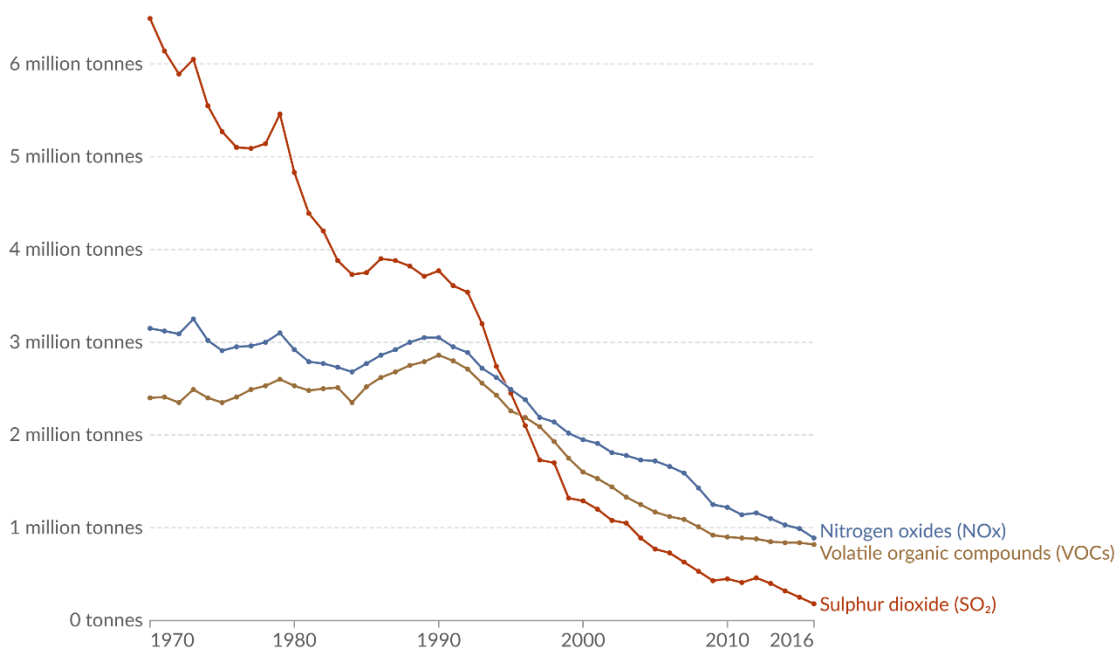
Σχήμα 1: SO<sub>2</sub> through the years [32].

### 3.1.2 Οξείδια του Αζώτου

Τα οξείδια του αζώτου (NOx) δημιουργούνται από την οξείδωση του ατμοσφαιρικού αζώτου κατά την καύση. Το μεγαλύτερο μέρος, ειδικά από αυτοκίνητα, εκπέμπεται στη μορφή του μη τοξικού οξειδίου του αζώτου (NO), το οποίο στη συνέχεια οξειδώνεται στην ατμόσφαιρα στο δευτερεύον πραγματικό ρυπογόνο NO<sub>2</sub>. Οι εκπομπές μπορούν να μειωθούν με τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας καύσης (χαμηλά καύσιμα NOx σε εργοστάσια παραγωγής ενέργειας και κινητήρες με λεπτή καύση σε μηχανοκίνητα οχήματα) ή με τη χρήση καταλυτικών μετατροπέων στην εξάτμιση.

#### Air pollutant emissions, United Kingdom, 1970 to 2016

Annual emissions of nitrogen oxides (NOx), non-methane volatile organic compounds (VOCs) and sulphur dioxide (SO<sub>2</sub>) measured in tonnes per year. This is measured across all human-induced sources.



Data source: UK DEFRA; US EPA

OurWorldinData.org/outdoor-air-pollution | CC BY

Σχήμα 2: Εκπομπή ρυπογόνων στο Ηνωμένο Βασίλειο [32].

### 3.1.3 Μονοξείδιο του Άνθρακα

Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) είναι αποτέλεσμα της ανεπαρκούς καύσης, με τα οχήματα να αποτελούν την απόλυτα κυρίαρχη πηγή. Οι εκπομπές μπορούν να μειωθούν αυξάνοντας τον λόγο αέρα/καυσίμου, αλλά με τον κίνδυνο αύξησης του σχηματισμού των αζώτων. Οι πιο αποτελεσματικές μειώσεις πραγματοποιούνται με τη χρήση καταλυτικών μετατροπέων.

### 3.1.4 Μικροσωματίδια

Το σωματίδιο (PM) δεν είναι ένα καλά καθορισμένο στοιχείο όπως, για παράδειγμα, το μονοξείδιο του άνθρακα. Αρχικά καθορίστηκε ως κάρβουνο ή "μαύρος καπνός", για τον οποίο υπάρχει όριο ποιότητας αέρα της Ευρωπαϊκής Κοινότητας [20]. Αργότερα εισήχθη η έννοια του συνολικού εγκριθέντος σωματιδίου (TSP), αλλά από το 1990 αποπειράθηκε η μεγέθυνση σε επίπεδο μετρήσεων PM10 (σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 10 μm). Δυστυχώς, το μεγαλύτερο μέρος των PM10 μπορεί να έχει φυσική προέλευση (π.χ., ατμοί θαλάσσης ή σκόνη ερήμου και εδάφους), και είναι σημαντικό, επομένως, να μετρώνται τα PM2,5 ή ακόμα, όταν έχει αναπτυχθεί η κατάλληλη τεχνολογία, τα PM1.

Οι εφαρμογές διαφορετικών εννοιών και τεχνικών μέτρησης δυσκολεύουν τις αξιολογήσεις της εξέλιξης στα επίπεδα ρύπανσης. Σε κάποιο βαθμό είναι δυνατόν να θεσπιστούν σχέσεις μεταξύ των συγκεντρώσεων των λεπτών και των μεγαλύτερων σωματιδίων που είναι σημαντικές για επιδημιολογικές μελέτες [21], αλλά μόνον υπό καλώς καθορισμένες συνθήκες.

Μετρήσεις από το Erfurt στην πρώην DDR (*Deutsche Demokratische Republik*) δείχνουν ότι οι συγκεντρώσεις των PM2,5 έχουν μειωθεί σημαντικά μετά την επανένωση και την επόμενη εισαγωγή ενημερωμένης τεχνολογίας. Ωστόσο, η ποσότητα ακόμα μικρότερων σωματιδίων έχει αυξηθεί, μαζί με τον συνολικό αριθμός των σωματιδίων, δείχνοντας μια αλλαγή στις κύριες πηγές [22]. Μια άλλη παράμετρος που προκαλεί περιπλοκές είναι ότι η χημική σύνθεση των σωματιδίων δεν είναι πλήρως κατανοητή και ότι οι επιπτώσεις στην υγεία μπορεί να οφείλονται σε άλλους ρύπους που απορροφώνται σε αυτά, όπως τα βαρέα μέταλλα ή λιγότερο πτητικές οργανικές ενώσεις.

Οι εκπομπές σωματιδίων ανθρωπογενούς προέλευσης μπορούν να μειωθούν με τη χρήση πιο καθαρών καυσίμων, βελτιωμένων τεχνικών καύσης και μιας σειράς τεχνολογιών φιλτραρίσματος ή κατακράτησης. Ο μόλυβδος (Pb) ως πρόσθετο στη βενζίνη έχει καταργηθεί σταδιακά στο μεγαλύτερο μέρος του βιομηχανικού κόσμου, αλλά εξακολουθεί να χρησιμοποιείται σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες και οικονομίες σε μετάβαση, όπου παίζουν ρόλο και οι εκπομπές από βιομηχανικές δραστηριότητες.

### 3.1.5 Οι Επικίνδυνοι Ρυπογόνοι

Οι εύφλεκτες οργανικές ενώσεις (EOE) ως ατμοσφαιρικοί ρύποι είναι το αποτέλεσμα της ανεπαρκούς καύσης των καυσίμων ή δημιουργούνται κατά την καύση, κυρίως σε αυτοκίνητα, όπου η εξάτμιση μπορεί, επίσης, να έχει ρόλο. Ορισμένες βιομηχανικές διαδικασίες, αλλά και η χρήση διαλυτών, οδηγούν στην εκπομπή EOE. Στον αστικό αέρα, οι πιο σημαντικές ενώσεις είναι το βενζόλιο και η σειρά των πολυαρωματικών υδρογονανθράκων (ΠΑΥ), μερικοί από τους οποίους έμεναν μέχρι πρόσφατα απαρατήρητοι, αλλά επίσης, μεταξύ άλλων, το 1,3-βουταδιένιο, η εθένη, η προπένιο και μια σειρά αλδεΐδες έχουν έρθει στο προσκήνιο. Είναι θέμα προσέγγισης εάν οι βιογενείς EOE, για παράδειγμα από τη βλάστηση, αποτελούν ρύπο, αλλά πρέπει να ληφθούν υπόψη σε σχέση με τη φωτοχημική ατμοσφαιρική ρύπανση.

Η απομάκρυνση του μόλυβδου ως πρόσθετο στη βενζίνη δεν ήταν εντελώς χωρίς παρενέργειες. Οι αλλαγές στο αναμειγνυόμενο πετρέλαιο, με στόχο την αύξηση του αριθμού οκτανίων, μπορούν να αυξήσουν την εκπομπή αρωματικών υδρογονανθράκων, μεταξύ άλλων το βενζόλιο. Οι συγκεντρώσεις βενζόλιου έχουν αυξηθεί σε πολλούς αστικούς ατμοσφαιρικούς χώρους με την εισαγωγή καταλυτικών μετατροπέων. Μια εναλλακτική προσθήκη, το MTBE (μεθυλ-τεрт-μπουτυλαιθέριο), όχι μόνο αυξάνει τον αριθμό των οκτανίων, αλλά βελτιώνει επίσης την καύση και, συνεπώς, μειώνει τις εκπομπές

μονοξειδίου του άνθρακα και υδρογονανθράκων. Ωστόσο, είναι ένας ατμοσφαιρικός ρύπος που προκαλεί τόσο άμεσο ερεθισμό των ματιών και του αναπνευστικού συστήματος όσο και μακροπρόθεσμο κίνδυνο καρκίνου.

Πιο σημαντική μπορεί να είναι η μόλυνση του εδάφους και των υπογείων υδάτων, ειδικά γύρω από τα βενζινοπωλεία (μόλυνση δια μέσου των μέσων επικοινωνίας). Στη Δανία, το MTBE χρησιμοποιείται μόνο για βενζίνη 98 οκτανίων. Άλλα βαρέα μέταλλα που χαρακτηρίζονται ως ατμοσφαιρικοί ρύποι περιλαμβάνουν το κάδμιο, το νικέλιο και τον υδράργυρο, όλα με βιομηχανικές πηγές.

### 3.1.6 Η Σωματιδιακή Ύλη

Επιδημιολογικές μελέτες έχουν δείξει σημαντικές συσχετίσεις μεταξύ των συγκεντρώσεων της PM10 και της αυξημένης καθημερινής θνησιμότητας και νοσηρότητας. Αυτές οι μελέτες πραγματοποιήθηκαν σε κοινότητες σε όλη την επικράτεια των Ηνωμένων Πολιτειών, χρησιμοποιώντας διάφορους τύπους μελετών, όπως βραχυπρόθεσμες εκθέσεις, μελλοντικές κοορτές (χρονικές σειρές), διατομεακές μελέτες και μετα-αναλύσεις.

Παρά τις διαφορές στον σχεδιασμό, τη μεθοδολογία και τον πληθυσμιακό στόχο, τα ευρήματα από αυτές οι μελέτες έδειξαν αξιοσημείωτη συνέπεια, καθώς οι εκτιμήσεις του σχετικού κινδύνου για τη συνολική θνησιμότητα και νοσηρότητα ήταν παρόμοιες σε όλες τις μελέτες. Οι μελέτες χρονικής σειράς παρείχαν ισχυρές αποδείξεις ότι η αερομεταφερόμενη σωματιδιακή ρύπανση στα σημερινά επίπεδα σχετίζεται με αυξήσεις στην καθημερινή θνησιμότητα των ανθρώπων. Οι εκτιμήσεις του σχετικού κινδύνου από αυτές τις μελέτες θνησιμότητας δείχνουν ότι μια αύξηση στις συγκεντρώσεις σωματιδιακής ύλης του περιβάλλοντος κατά  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  συνδέεται με έναν σχετικό κίνδυνο 1.015-1.085 στον γενικό πληθυσμό[23]. Ακόμη υψηλότεροι σχετικοί κίνδυνοι παρατηρήθηκαν για τους ηλικιωμένους και για εκείνους με προϋπάρχουσες αναπνευστικές παθήσεις.

Παρά την συνέπεια αυτών των ευρημάτων, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων από αυτές τις μελέτες παραμένει αμφιλεγόμενη. Η αμφιβολία αυτή προκύπτει κυρίως επειδή το σωματιδιακό συστατικό που ευθύνεται για τις αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία δεν έχει ακόμα ταυτοποιηθεί, ούτε έχει διασαφηνιστεί ο βιολογικός μηχανισμός που προκαλεί αυτές τις επιπτώσεις. Αυτές οι δυσκολίες οφείλονται στο γεγονός ότι τα σωματίδια είναι ένα μείγμα ρύπων. Στην απλούστερη μορφή τους, τα εισπνεύσιμα σωματίδια χωρίζονται σε δύο κλάσματα μεγέθους: Αυτά με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη ή ίση με  $2.5 \mu\text{m}$  (PM2.5) που είναι λεπτά σωματίδια, και αυτά με αεροδυναμική διάμετρο μεταξύ  $2.5$  και  $10 \mu\text{m}$  (PM2.5-10) που είναι χονδροειδή σωματίδια.

Τα δύο αυτά κλάσματα έχουν διαφορετική προέλευση και σύνθεση. Τα λεπτά σωματίδια δημιουργούνται κυρίως από καύσεις, όπως αυτές που συμβαίνουν στα αυτοκίνητα, τους σταθμούς παραγωγής ενέργειας και τις ξυλόσομπες. Αυτά σχηματίζονται είτε μέσω της συμπίκνωσης εξαεριζόμενων υλικών (πρωτογενή σωματίδια), είτε από την αντίδραση πρόδρομων αερίων στην ατμόσφαιρα, δημιουργώντας δευτερογενή σωματίδια. Τα βασικά συστατικά των λεπτών σωματιδίων συχνά περιλαμβάνουν θειικά, ανθρακικά υλικά, νιτρικά άλατα, ιχνοστοιχεία και νερό.

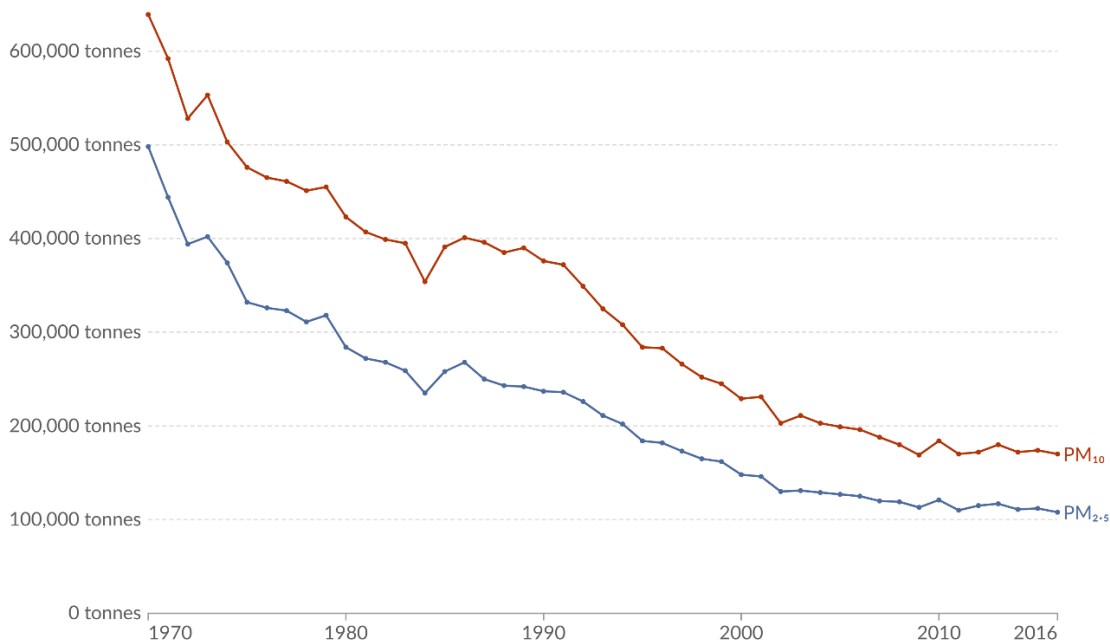
Σε αντίθεση, τα χονδρά σωματίδια δημιουργούνται από μηχανική σύνθλιψη, λείανση ή τριβή επιφανειών και αιωρούνται από τον άνεμο ή τις ανθρώπινες δραστηριότητες όπως η κυκλοφορία και οι γεωργικές εργασίες. Τα χονδρά σωματίδια αποτελούνται κυρίως από αλουμινοπυριτικά και άλλα οξειδία των στοιχείων του φλοιού της γης που υπάρχουν στο έδαφος και στην αιωρούμενη σκόνη.

Λόγω των φυσικών και χημικών διαφορών τους, η έκθεση σε PM<sub>2.5</sub> και PM<sub>10</sub> μπορεί να έχει διαφορετικές αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία. Έμμεσες ενδείξεις από μελέτες που χρησιμοποίησαν βρετανική μέθοδο καπνού, συντελεστή θολότητας ή θειικά άλατα ως δείκτες συγκεντρώσεων λεπτών σωματιδίων, δείχνουν ότι το PM<sub>2.5</sub> συνδέεται περισσότερο με τις αυξήσεις στη θνησιμότητα και νοσηρότητα. Άμεσες αποδείξεις παρέχονται από τη μελέτη των Έξι Πόλεων, η οποία ανέφερε σχετικό κίνδυνο (RR) από 1.020 έως 1.056 ανά 25 µg/m<sup>3</sup> PM<sub>2.5</sub>, ενώ τα χονδρά σωματίδια έδειξαν γενικά μικρούς και μη σημαντικούς κινδύνους (εκτός από το Steubenville, Οχάιο, RR = 1.061 ανά 25 µg/m<sup>3</sup>).

Οι συγγραφείς κατέληξαν ότι στις περισσότερες περιπτώσεις, οι συσχετίσεις μεταξύ υπερβολικής θνησιμότητας και PM<sub>10</sub> οφείλονταν κυρίως στο κλάσμα PM<sub>2.5</sub>. Αυτό το συμπέρασμα ενισχύεται από τα αποτελέσματα μιας πρόσφατης ανάλυσης στοιχειακών δεδομένων από τη μελέτη των Έξι Πόλεων. Σε μια συνδυασμένη ανάλυση δεδομένων από τις έξι πόλεις, μια αύξηση 10 µg/m<sup>3</sup> στο PM<sub>2.5</sub> από κινητές πηγές συνέβαλε σε αύξηση 3.4% στη συνολική θνησιμότητα, ενώ μια ισοδύναμη αύξηση στο PM<sub>2.5</sub> από πηγές καύσης άνθρακα συνέβαλε σε αύξηση 1.1%. Αντίθετα, τα σωματίδια κρούστας που σχετίζονται με το PM<sub>2.5</sub> δεν συνδέθηκαν με την καθημερινή θνησιμότητα.

### Emissions of particulate matter, United Kingdom, 1970 to 2016

Annual emissions of particulate matter from all human-induced sources. This is measured in terms of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>, which denotes particulate matter less than 10 and 2.5 microns in diameter, respectively.



Data source: UK DEFRA; US EPA

OurWorldinData.org/outdoor-air-pollution | CC BY

Σχήμα 3: Εκπομπή μικροσωματιδίων στο Ηνωμένο Βασίλειο [32].

### 3.2 Δείκτης Ποιότητας Αέρα (AQI)

Ο Δείκτης Ποιότητας Αέρα (AQI) υπολογίζεται με βάση τους ατμοσφαιρικούς ρύπους όπως CO, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> και άλλες ενώσεις θείου που έχουν δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Το AQI είναι ένας αριθμός που αντιπροσωπεύει την υψηλότερη συγκέντρωση ενός ατμοσφαιρικού ρύπου σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Κανονικά, οι μικρές συγκεντρώσεις μετρώνται με τη χρήση ppb (σωματίδια ανά δισεκατομμύριο), το οποίο αντιπροσωπεύει μονάδες μάζας ενός ρύπου ανά ένα δισεκατομμύριο μονάδες συνολικής μάζας.

Τα σωματίδια ανά εκατομμύριο (ppm) είναι μία παρόμοια και συνήθως χρησιμοποιούμενη μονάδα μέτρησης για τη μέτρηση των συγκεντρώσεων ρύπων. Η ποιότητα του αέρα θεωρείται πολύ καλή, καλή, μέτρια, κακή και πολύ κακή για τις τιμές AQI, <16, 16- 31, 32-49, 50-99, >99, αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι για τους στερεούς και υγρούς ρύπους που μεταφέρονται στον αέρα (γνωστοί ως σωματιδιακή ύλη ή PM<sub>10</sub>), η συγκέντρωση μετράται με μg/m<sup>3</sup>. Τα σωματίδια αυτά μπορεί να είναι καπνός, βρωμιά, μούχλα, γύρη κ.λπ. Τα PM<sub>10</sub> είναι τα μεγαλύτερα χονδροειδή σωματίδια τα οποία όταν εκτοξεύονται στον αέρα και διασπείρονται, προκαλούν σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία.

Αφού δημιουργήθηκε με τη γέννηση της βιομηχανικής επανάσταση, το πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης συνεχίζει να επιδεινώνεται σημαντικά με την αναπτυσσόμενη ανάγκη για παραγωγή ενέργειας, και τον αυξανόμενο αριθμό οχημάτων. Πρόσφατα, στο πλαίσιο των τελευταίων 25 χρόνων, η ευαισθητοποίηση σχετικά με το πρόβλημα εδραιώθηκε παγκοσμίως. Υπάρχει αυξημένη ανησυχία σε όλα τα έθνη, καθώς είναι ένα σημαντικό πρόβλημα στις χώρες της Μέσης Ανατολής [18]. Για παράδειγμα, το Βασίλειο της Σαουδικής Αραβίας (Kingdom of Saudi Arabia) είναι η 5η χώρα με τη μεγαλύτερη ατμοσφαιρική ρύπανση στον κόσμο, όπου ο ετήσιος μέσος όρος PM<sub>10</sub> είναι 143μg/m<sup>3</sup>. Επιπρόσθετα, το Βασίλειο της Σαουδικής Αραβίας είναι το 14<sup>ο</sup> στην κατάταξη για τον άνθρακα στον κόσμο και είναι υπεύθυνη για το 1,45% των εκπομπών άνθρακα στον πλανήτη. Η αστική περιοχή του Βασιλείου της Σαουδικής Αραβίας αντιπροσωπεύει το 54% της ρύπανσης.

Για τους παραπάνω λόγους, τα AQMS (Air Quality Measurement Systems) οφείλουν να κερδίσουν όλο και περισσότερη προσοχή, δεδομένου ότι η κατανομημένη και εντοπισμένη παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι πραγματικά σημαντικός παράγοντας για τον προσδιορισμό των πηγών και των αιτιών της ρύπανσης και, ως εκ τούτου, στην παροχή λύσεων. Αυτό ισχύει για όλα τα έθνη, ιδίως για τα μεσανατολικά, όπου, παρά τη σοβαρότητα του προβλήματος, δεν έχουν ληφθεί σημαντικά μέτρα για την επίλυσή του.

### 3.3 Αισθητήρες για Air Quality για Εφαρμογές σε Εσωτερικούς και Εξωτερικούς Χώρους

Το 2019, οι Moreno-Rangel και η ομάδα τους [12], ανέπτυξαν ένα σύστημα αισθητήρων αερίου χρησιμοποιώντας τον Arduino Nano ως μικροεπεξεργαστή. Οι αισθητήρες που χρησιμοποίησαν ήταν οι MQ-2, ένας αναγνωριστής συχνότητας, μια οθόνη υγρών κρυστάλλων 16 × 2, ενδο-ολοκληρωμένα κυκλώματα, βομβητές και μονάδες SIM800L. Ο στόχος της έρευνας ήταν να ανιχνεύσουν διαρροές αερίου, και η ασύρματη σύνδεση πραγματοποιήθηκε μέσω SMS. Κατέληξαν ότι οι διαρροές αερίου μπορούσαν να ανιχνευθούν από επίπεδα 52%. [11]

Τα επόμενα χρόνια, άλλοι ερευνητές ανέπτυξαν μελέτες βασισμένες σε αισθητήρες αερίου και χρησιμοποίησαν συστήματα συναγερμού για να προειδοποιούν για διαρροές αερίου. Στη μελέτη των Mluayati και Sadi [13] το 2021, χρησιμοποιήθηκαν οι αισθητήρες MQ-7 και MQ-135 για την ανάπτυξη ενός κινητού συστήματος ειδοποίησης για τη βελτίωση της ασφάλειας στα αυτοκίνητα, ανιχνεύοντας διοξείδιο του άνθρακα και μονοξείδιο του άνθρακα. Ως μικροελεγκτή χρησιμοποίησαν τον ESP32, και όταν τα επίπεδα αερίου υπερέβαιναν τα κατάλληλα επίπεδα ppm, ένας συναγερμός ειδοποιούσε το κινητό τηλέφωνο.

Την ίδια χρονιά, οι Seow και Ali [14] πρότειναν ένα σύστημα συναγερμού για την ανίχνευση επικίνδυνων αερίων σε εργαστήρια, εργοστάσια και αποθήκες χημικών προϊόντων, βασισμένο σε αισθητήρες αερίου και το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT). Οι αισθητήρες που χρησιμοποίησαν ήταν οι SGP40 και BME680, και η επεξεργασία των δεδομένων γινόταν με τον μικροελεγκτή WeMos D1 Mini IoT. Τα δεδομένα μεταδίδονταν μέσω ασύρματου δικτύου (Wi-Fi) και μπορούσαν να προβληθούν άμεσα σε υπολογιστή, smartphone ή tablet. Οι Seow και Ali κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι αυτοί οι αισθητήρες μπορούσαν να ανιχνεύσουν μικρές διαρροές στο εργαστήριο.

Οι παραπάνω αισθητήρες έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί σε εργασιακούς χώρους. Για παράδειγμα, οι AI-Okby και η ομάδα τους [15] ανέπτυξαν ένα σύστημα ανίχνευσης επικίνδυνων αερίων, το οποίο προορίζεται για εργαζόμενους σε ανθρακωρυχεία, βιομηχανίες αερίου και καθαρισμό αποχετεύσεων. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποίησαν αισθητήρες MQ. Η μέθοδος τους περιλάμβανε τρία στάδια: προετοιμασία του συνόλου δεδομένων, δημιουργία του μοντέλου νευρωνικού δικτύου και εκπαίδευση του συστήματος με το σύνολο δεδομένων. Οι τιμές επεξεργάστηκαν χρησιμοποιώντας μια συσκευή IoT βιομηχανικού προτύπου, το National Instruments Compact Reconfigurable Input-Output, για τις διάφορες τιμές των αερίων που καταγράφηκαν από τους αισθητήρες. Τα δεδομένα μπορούσαν επίσης να ενημερωθούν στο cloud, και για τη δημιουργία του μοντέλου νευρωνικού δικτύου χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα Python.

Την ίδια χρονιά, οι Anitha και η ομάδα τους [16] παρουσίασαν ένα σύστημα παρακολούθησης ποιότητας αέρα σε εργαστηριακό περιβάλλον. Χρησιμοποίησαν μια σειρά από αισθητήρες MQ, μια μονάδα Wi-Fi και έναν μικροελεγκτή Arduino. Το σύστημα συνδέθηκε με ένα smartphone, επιτρέποντας την προβολή των δεδομένων που λήφθηκαν από τους αισθητήρες MQ. Επιπλέον, χρησιμοποιώντας την πλατφόρμα ThingSpeak, τα δεδομένα αποστέλλονταν σε μια ιστοσελίδα. Το σύστημα περιλάμβανε επίσης μια σειρά από σήματα για την ειδοποίηση του χρήστη σχετικά με τις αλλαγές στην ποιότητα του αέρα.

Οι Khadim και η ομάδα τους [17] χρησιμοποίησαν τον αισθητήρα MQ-2 για την ανίχνευση καπνού και αερίων καύσης μέσα σε σπίτια. Χρησιμοποίησαν καύσιμα όπως χαρτί, τσιγάρα και αέρια από αναπτήρες και σόμπες. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο αισθητήρας MQ-2, σε συνδυασμό με άλλους αισθητήρες, θα μπορούσε να βελτιώσει τους υπάρχοντες ανιχνευτές καπνού.

## Κεφάλαιο 4ο: Υλικά και Εξοπλισμός Συστήματος Παρακολούθησης Ποιότητας Αέρα

### 4.1 Arduino

Το Arduino είναι ένας μικροελεγκτής ανοιχτού κώδικα, που προσφέρει εξαιρετική εμβέλεια χειρισμού και εφαρμογών. Με ευκολία στον προγραμματισμό και τεράστια ποικιλία εξαρτημάτων, σε αρκετά προσιτές τιμές και διαθεσιμότητα, ένα σύστημα Arduino αποτελεί το κατάλληλο εργαλείο για την εισαγωγή ενός νέου χρήστη σε πειράματα όλων των ειδών.

Η πλατφόρμα Arduino εισήχθη στην αγορά το 2005 και σχεδιάστηκε για να είναι οικονομικό και εύχρηστο προς ερασιτέχνες, φοιτητές αλλά και επαγγελματίες. Παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας συσκευών και συστημάτων που αλληλοεπιδρούν με το περιβάλλον τους μέσω αισθητήρων. Βασισμένο σε απλές πλακέτες μικροελεγκτών και με πλατφόρμα ανοιχτού κώδικα, το Arduino είναι, στην ουσία, ένας μικρός υπολογιστής που με τα κατάλληλα εξαρτήματα και κώδικα, μπορεί να χειριστεί και να ελέγξει εισόδους, εξόδους και σήματα από άλλες συσκευές ή αισθητήρες.

Τα εξαρτήματα του Arduino μπορούν να εμπλουτίσουν το σύστημα με μια συγκεκριμένη λειτουργία όπως, για παράδειγμα, την ικανότητα να λαμβάνει πληροφορίες από το περιβάλλον του με τη χρήση ενός αισθητήρα. Επιπλέον, ένα σύνολο λειτουργιών ή μια πιο περίπλοκη λειτουργία, όπως η ασύρματη επικοινωνία με το ίντερνετ, μπορεί να πραγματοποιηθεί από το Arduino μέσω ειδικών πλακετών που ονομάζονται shields.

Με τον μικροελεγκτή Atmel AVR 8-bit, με κατασκευαστή την Atmel, το Arduino μπορεί να προγραμματιστεί εύκολα με την αξιοποίηση της γλώσσας προγραμματισμού C ή C++ στην πλατφόρμα προγραμματισμού Arduino IDE. Επειδή, όπως αναφέραμε, πρόκειται για πλατφόρμα ανοικτού κώδικα, οποιαδήποτε συνεισφορά πληροφοριών και κώδικα μπορεί, πολύ εύκολα, να διαμοιραστεί ανάμεσα σε όλους τους ενδιαφερόμενους, καλλιεργώντας ένα περιβάλλον συνεργασίας ανάμεσα στους πολλούς χρήστες του.

Κατά την εισαγωγή του στην αγορά, το Arduino και τα εξαρτήματα του, περιοριζόταν σε έργα μικρής κλίμακας. Με την πάροδο του χρόνου, οι ενδιαφερόμενοι για ηλεκτρονικές εφαρμογές αναγνώρισαν τις δυνατότητες και παροχές του, συνέβαλαν στην ανάπτυξη τεράστιας βιβλιοθήκης κώδικα, λειτουργιών και εξαρτημάτων, καθιστώντας το Arduino ένα από τα πιο χρήσιμα και οικονομικά συστήματα για ηλεκτρονικές εφαρμογές σε όλο τον κόσμο.

Τη σήμερον ημέρα, τα συστήματα Arduino χρησιμοποιούνται συχνά για την υλοποίηση ηλεκτρονικών εφαρμογών, λόγω της αυξανόμενης ποικιλίας εξαρτημάτων και φιλικό προς τη χρήση περιβάλλον προγραμματισμού του. Το Arduino, όπως κάθε μικροελεγκτής, είναι μια πλακέτα κυκλωμάτων που μπορεί να προγραμματιστεί για να εκτελεί πολλές και διάφορες λειτουργίες και εντολές. Μια συχνά υλοποιούμενη εφαρμογή του Arduino είναι η ανάγνωση δεδομένων από αισθητήρες, κεραίες, ή και ποτενσιόμετρα, στη συνέχεια η επιθυμητή επεξεργασία των δεδομένων αυτών με τη χρήση του κατάλληλου κώδικα και, τέλος, η αποστολή ή αποτύπωση των δεδομένων από συσκευές εισόδου σε συσκευές εξόδου, όπως οθόνες LCD/LED, ηχεία και κινητήρες.[24]

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του Arduino είναι ότι δεν χρειάζεται επιπρόσθετα εξαρτήματα για να επικοινωνήσει με έναν υπολογιστή. Το Arduino διαθέτει θύρα USB για άμεση σύνδεση με υπολογιστή, κάνοντας τη μεταφορά, και κατ' επέκταση, την εφαρμογή νέου κώδικα εύκολη και άμεση. Επιπλέον, η αξιοποίηση μιας απλοποιημένης έκδοσης της C++ και η διαθεσιμότητα μεγάλης βιβλιοθήκης

πληροφοριών από τους χρήστες, καθιστά την εκμάθηση και χρήση του προγραμματιστικού περιβάλλοντος προσιτή σε χρήστες χωρίς μεγάλο βάθος γνώσεων προγραμματισμού.[25]

Η ποικιλία εκδόσεων και μοντέλων των συστημάτων Arduino καθιστά απαραίτητη την έρευνα αγοράς της κατάλληλης πλακέτας, για να καλύπτει τις προδιαγραφές και δυνατότητες της εκάστοτε εφαρμογής και να χρησιμοποιηθεί κατάλληλα για την υλοποίηση και εκτέλεση του εκάστοτε έργου.

## 4.2 Η Ανάγκη για το Arduino

Το Arduino να αποτελεί μια από τις πιο δημοφιλείς πλατφόρμες ανοιχτού κώδικα για ηλεκτρονικές εφαρμογές, σε συνδυασμό με την ευελιξία και το χαμηλό κόστος υλοποίησης, αποτελεί το ιδανικό σύστημα για την υλοποίηση της συσκευής της παρούσας εργασίας.

Ο συνιδρυτής του Arduino, Massimo Banzi, υπογραμμίζει τη σημασία της προσβασιμότητας και της συνεργατικής φύσης της κοινότητας που έχει δημιουργηθεί γύρω από την πλατφόρμα: «Αν αρχίσεις να χρεώνεις τα πάντα, όλα θα πεθάνουν πολύ γρήγορα». Η ύπαρξη μιας ενεργής κοινότητας χρηστών συμβάλλει καταλυτικά στην υποστήριξη νέων χρηστών, στην ανταλλαγή εμπειριών και στη συνεχή εξέλιξη της τεχνολογίας.

Οι πλακέτες Arduino διατίθενται σε διάφορους τύπους με ενσωματωμένες μονάδες. Πλακέτες όπως το Arduino BT έχουν ενσωματωμένη μονάδα Bluetooth για ασύρματη επικοινωνία. Αυτές οι ενσωματωμένες μονάδες μπορούν επίσης να διατεθούν ξεχωριστά και να συνδεθούν στην πλακέτα. Αυτές οι μονάδες είναι γνωστές ως Shields.

Μερικά από τα πιο συνηθισμένα Shields είναι:

- **Arduino Ethernet Shield:** Παρέχει τη δυνατότητα στην πλακέτα Arduino να συνδεθεί στο διαδίκτυο μέσω της βιβλιοθήκης Ethernet και ανάγνωσης ή γραφής σε κάρτα SD μέσω της χρήσης της κατάλληλης βιβλιοθήκης σχετική με κάρτα SD.
- **Arduino Wireless Shield:** Επιτρέπει στην πλακέτα Arduino να επικοινωνεί ασύρματα μέσω Zigbee.
- **Arduino Motor Driver Shield:** Δίνει τη δυνατότητα στις πλακέτες Arduino να συνδεθούν με οδηγούς κινητήρων και άλλα σχετικά εξαρτήματα.



Εικόνα 5: Το Arduino Uno [33].

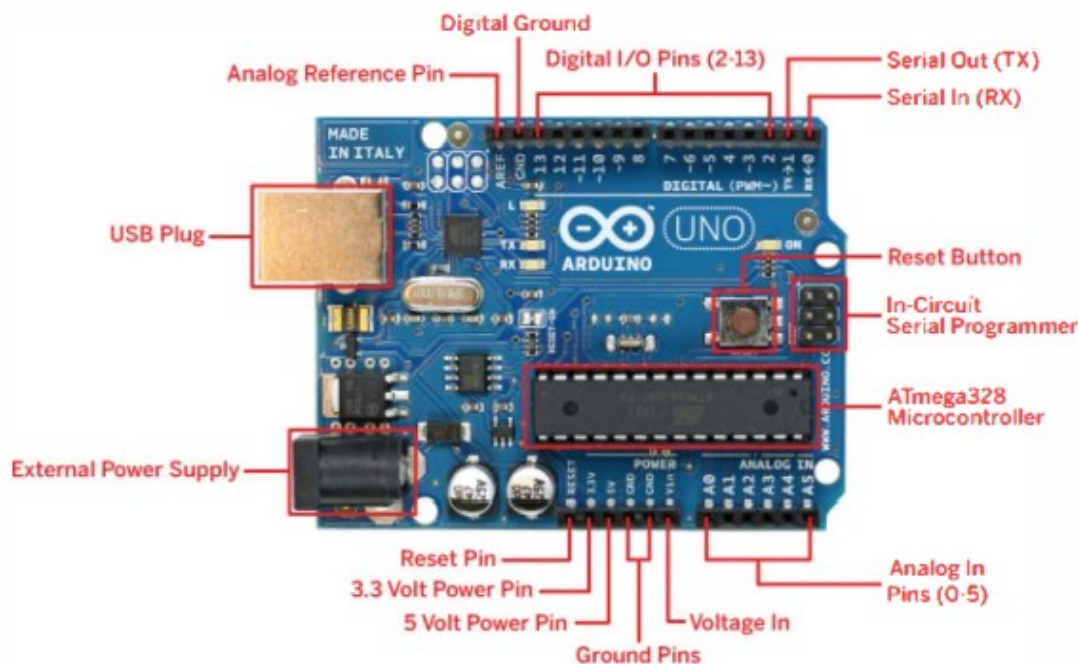
## 4.3 Ανάλυση των Εξαρτημάτων

Μια πλακέτα Arduino μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε δύο μέρη:

### 4.3.1 Υλικό

Το υλικό της πλακέτας Arduino αποτελείται από πολλά εξαρτήματα που συνδυάζονται για να την καταστήσουν λειτουργική. Τα κύρια εξαρτήματα είναι τα εξής:

- **Υποδοχή USB:** Αυτό είναι το πρώτο μέρος του Arduino. Χρησιμοποιείται για τη μεταφόρτωση ενός προγράμματος στο μικροελεγκτή και έχει ρυθμισμένη ισχύ 5 V, η οποία επίσης τροφοδοτεί την πλακέτα Arduino.
- **Εξωτερική Πηγή Τροφοδοσίας:** Χρησιμοποιείται μόνο για την τροφοδοσία της πλακέτας και έχει ρυθμισμένη τάση 9 έως 12 V, κυρίως εάν η υποδοχή USB δεν παρέχει επαρκή ισχύ για τις ανάγκες του προγράμματος.
- **Κουμπί Επαναφοράς:** Επαναφέρει το Arduino σε default κατάσταση, σε περίπτωση που υπάρξει αναβάθμιση στο πρόγραμμα και χρειάζεται να επαναφορτωθεί.
- **Μικροελεγκτής:** Λαμβάνει και αποστέλλει πληροφορίες ή εντολές στο αντίστοιχο κύκλωμα.
- **Αναλογικές Θύρες (A0-A5):** Οι αναλογικές εισοδοί από A0 έως A5.
- **Ψηφιακές Θύρες Εισόδου/Εξόδου:** Ψηφιακές θύρες εισόδου και εξόδου 2 έως 13.
- Ψηφιακές και Αναλογικές Γειώσεις
- **Θύρες Τροφοδοσίας:** Παρέχουν τροφοδοσία 3,3 V, 5 V κτλ.

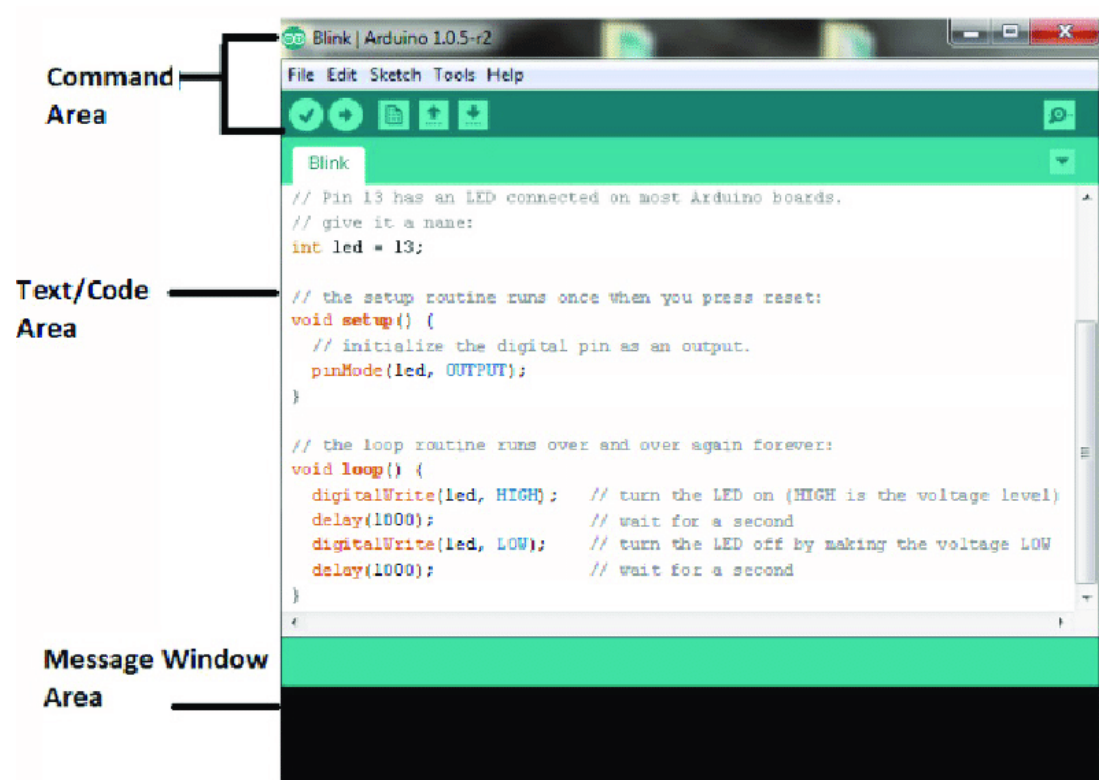


Εικόνα 6: Απεικόνιση των εξαρτημάτων του Arduino Uno [34].

### 4.3.2 Λογισμικό

Το λογισμικό αποτελεί ένα σύνολο οδηγιών που καθορίζει τον τρόπο λειτουργίας του υλικού. Το Arduino IDE, το οποίο χρησιμοποιείται για την υλοποίηση του κώδικα, αποτελείται από τρία μέρη:

- Περιοχή Εντολών: Εδώ βρίσκονται τα στοιχεία του μενού όπως Αρχείο, Επεξεργασία, Σκίτσο, Εργαλεία, Βοήθεια και εικονίδια όπως το εικονίδιο Επαλήθευσης για επικύρωση, το εικονίδιο Μεταφόρτωσης για μεταφόρτωση του προγράμματός, Νέο, Άνοιγμα, Αποθήκευση και Παρακολούθηση Σειριακής για αποστολή και λήψη δεδομένων μεταξύ του Arduino και του IDE.
- Περιοχή Κειμένου: Εδώ γράφεται ο κώδικας (σκίτσο) ο οποίος έχει κατασκευαστεί με τη χρήση μιας απλουστευμένης έκδοσης της γλώσσας προγραμματισμού C++.
- Περιοχή Μηνυμάτων: Εδώ εκτυπώνονται τα αποτελέσματα του compile του κώδικα.



Εικόνα 7: Παράδειγμα προγραμματιστικού περιβάλλοντος Arduino [35].

## 4.4 MQ Gas Sensors

Ένας μικροσκοπικός σωλήνας από κεραμικό AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> χρησιμοποιείται ως η βάση των αισθητήρων MQ που αναπτύχθηκαν από την Figaro Ltd. Μια πλαστική και ανοξειδωτή διχτυωτή επίστρωση συγκρατεί το ευαίσθητο στρώμα διοξειδίου του κασσίτερου, το ηλεκτρόδιο μέτρησης και τον θερμαντήρα. Ο θερμαντήρας δημιουργεί το ιδανικό περιβάλλον για τη λειτουργία των ευαίσθητων εξαρτημάτων. Το μοντέλο αισθητήρων αερίου MQ διαθέτει έναν ψηφιακό ακροδέκτη που επιτρέπει τη λειτουργία του αισθητήρα χωρίς μικροελεγκτή, κάτι που είναι χρήσιμο όταν χρειάζεται να ανιχνευτεί ένα είδος αερίου. Για να μετρηθεί το αέριο ρύπο σε μονάδες ppm, χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί ο αναλογικός ακροδέκτης. Ο αναλογικός TTL τροφοδοτείται με 5 V και μπορεί, επομένως, να χρησιμοποιηθεί με την πλειοψηφία των μικροελεγκτών. Η δομή του αισθητήρα MQ φαίνεται στο Σχήμα 2.



Εικόνα 8: Απεικόνιση των ειδών αισθητήρων βλαβερών αερίων [36].

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά των αισθητήρων MQ

Sensor	Parameter	Technical Condition	Description
	Circuit Voltage Heating Voltage	$5V \pm 0.1$	AC or DC
<b>MQ-7</b>	Load Resistance	Adjustable	
	Heater Resistance	$33 \Omega \pm 5\%$	Room temperature
	Measuring Range	20-2000 ppm CO	
	Circuit Voltage Heating Voltage	$5V \pm 0.1$	AC or DC
	Load Resistance	Adjustable	
<b>MQ-135</b>	Heater Resistance	$33 \Omega \pm 5\%$	Room temperature
	Measuring Range	10-300 ppm NH <sub>3</sub> 10-1000ppm of Benzene 10-300 ppm of Alcohol	
	Circuit Voltage Heating Voltage	$5V \pm 0.1$ $5V \pm 0.1$	AC or DC High AC or DC Low
	Load Resistance	Adjustable	
<b>MQ-9</b>	Heater Resistance	$31 \Omega \pm 3 \Omega$	Room temperature
	Measuring Range	10-1000ppm CO 100-10000ppm combustible ga	

## 4.5 Περιγραφή της Δομής του MQ-135

Ο MQ-135 είναι αισθητήρας αερίων που χρησιμοποιείται ευρέως για την ανίχνευση μιας σειράς παραμέτρων ποιότητας του αέρα, όπως είναι η αμμωνία ( $\text{NH}_3$ ), τα θειούχα αέρια, το βενζόλιο, ο καπνός, το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) και το αλκοόλ. Ακολουθεί λεπτομερής επεξήγηση του κυκλώματος και της λειτουργίας του:

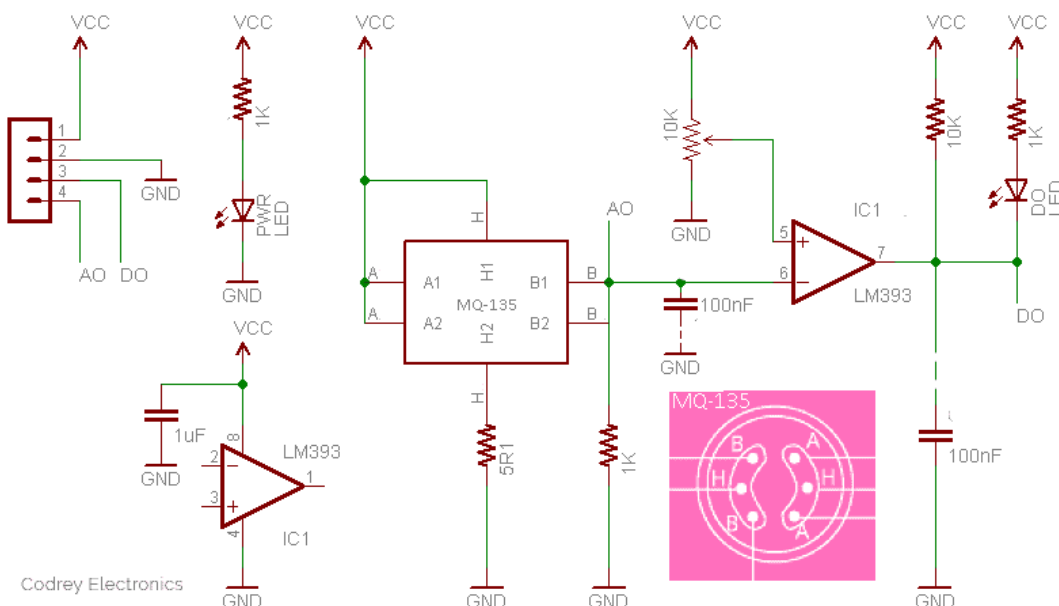
- Εξαρτήματα στο κύκλωμα του MQ-135:
  - **Μονάδα αισθητήρα MQ-135:** Περιέχει τον αισθητήρα αερίων MQ-135, μαζί με πρόσθετα εξαρτήματα για ευκολότερη διασύνδεση.
  - **Πηνίο θέρμανσης:** Θερμαίνει το στοιχείο ανίχνευσης για να βοηθήσει στην ανίχνευση αερίου.
  - **Στοιχείο ανίχνευσης:** Ένας ημιαγωγός μεταλλικού οξειδίου που αλλάζει την αντίστασή του όταν εκτίθεται σε αέρια.
  - **Αντίσταση φορτίου (RL):** Μετατρέπει τη μεταβλητή αντίσταση του στοιχείου ανίχνευσης σε μετρήσιμο σήμα τάσης.
  - **Αναλογικό-ψηφιακός μετατροπέας (ADC):** Μετατρέπει την αναλογική έξοδο τάσης από τον αισθητήρα σε ψηφιακό σήμα για διασύνδεση με μικροελεγκτή.
  - **Μικροελεγκτής (π.χ. Arduino):** Επεξεργάζεται την έξοδο του αισθητήρα και εκτελεί υπολογισμούς ή ενεργοποιεί συναγερμούς με βάση τη συγκέντρωση αερίου.
  - **Τροφοδοτικό:** Παρέχει την απαιτούμενη τάση (συνήθως 5V) για τον αισθητήρα και το κύκλωμα.
- Ο αισθητήρας MQ-135 διαθέτει τέσσερις ακίδες:
  - **VCC:** Τροφοδοσία (συνήθως 5V).
  - **GND:** Γείωση.
  - **AO (αναλογική έξοδος):** Παρέχει αναλογική τάση ανάλογη της συγκέντρωσης αερίου.
  - **DO (ψηφιακή έξοδος):** Βγάζει ένα σήμα HIGH ή LOW όταν η συγκέντρωση αερίου υπερβαίνει ένα καθορισμένο όριο.
- Συνδέσεις:
  - Συνδέουμε τα VCC και GND με την τροφοδοσία 5V και τη γείωση.
  - Συνδέουμε τον ακροδέκτη AO στην αναλογική είσοδο του μικροελεγκτή για ακριβείς μετρήσεις της συγκέντρωσης αερίου. Προαιρετικά, μπορούμε να συνδέσουμε τον ακροδέκτη DO σε μια ψηφιακή είσοδο του μικροελεγκτή για την ενεργοποίηση συναγερμών με βάση ένα προκαθορισμένο κατώφλι.
  - Χρησιμοποιούμε μια αντίσταση φορτίου (RL) μεταξύ της αναλογικής εξόδου και της γείωσης. Οι τυπικές τιμές κυμαίνονται μεταξύ 1 k $\Omega$  έως 10 k $\Omega$ , ανάλογα με την επιθυμητή ευαισθησία και την εφαρμογή.

### 4.5.1 Εσωτερικό κύκλωμα του MQ-135

Το θερμαντικό στοιχείο είναι συνδεδεμένο εσωτερικά και τροφοδοτείται από τον ακροδέκτη VCC. Εξασφαλίζει ότι το αισθητήριο στοιχείο λειτουργεί σε βέλτιστη θερμοκρασία για την αποτελεσματική ανίχνευση αερίων. Η αντίσταση του στοιχείου ανίχνευσης αλλάζει όταν εκτίθεται σε διαφορετικά αέρια, δημιουργώντας έναν διαιρέτη τάσης με την αντίσταση φορτίου. Στην παρακάτω εικόνα μπορούμε να παρατηρήσουμε το εσωτερικό κύκλωμα του αισθητήρα MQ-135. Στην συνέχεια περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας του κυκλώματος του Σχήματος 7:

- **A, B:** Έτσι αναγράφονται οι εσωτερικοί ακροδέκτες θέρμανσης, μέσω των οποίων θερμαίνεται ο αισθητήρας του MQ-135. Το θερμαντικό στοιχείο στο εσωτερικό του MQ-135 τροφοδοτείται από μια παροχή 5 V που συνδέεται μέσω μιας αντίστασης 5  $\Omega$ . Αυτό θερμαίνει το στρώμα ανίχνευσης για να εξασφαλίσει ένα σταθερό περιβάλλον για την ανίχνευση αερίου.
- **H1, H2:** Ακροδέκτες στρώματος ανίχνευσης αερίου. Εδώ βρίσκεται το υλικό ανίχνευσης μεταλλικού οξειδίου για την ανίχνευση αερίων.

- **Διαιρέτης τάσης:** Η αντίσταση 1 kΩ και το στοιχείο ανίχνευσης σχηματίζουν ένα διαιρέτη τάσης, παράγοντας μια τάση σήματος στον ακροδέκτη αναλογικής εξόδου (AO) που εξαρτάται από την αντίσταση του αισθητήρα, η οποία μεταβάλλεται με τη συγκέντρωση του αερίου.
- **Συγκριτής LM393:** Ένας διπλός διαφορικός συγκριτής που συγκρίνει το αναλογικό σήμα, το οποίο προέρχεται από τον αισθητήρα, με την τάση αναφοράς που ρυθμίζουμε μέσω της αντίστασης του ποτενσιόμετρου. Ο αισθητήρας εξάγει μια τάση μέσω του ακροδέκτη αναλογικής εξόδου (AO), η οποία βασίζεται στη συγκέντρωση των ανιχνευόμενων αερίων. Η τάση αυτή είναι ανάλογη της συγκέντρωσης αερίου και αποτελεί την τάση αναλογικού σήματος στην αναστρέφουσα είσοδο του διαφορικού συγκριτή LM393, δηλαδή στην είσοδο με αρνητικό πρόσημο. Ταυτόχρονα μια τάση αναφοράς, που ρυθμίζεται από το ποτενσιόμετρο 10 kΩ, τροφοδοτείται στη μη αναστρέφουσα είσοδο (+) του συγκριτή. Στην συνέχεια, ο συγκριτής συγκρίνει αυτές τις δύο τάσεις. Εάν η τάση του αναλογικού σήματος υπερβαίνει την τάση αναφοράς, η έξοδος του συγκριτή γίνεται HIGH. Διαφορετικά, η έξοδος παραμένει LOW.
- **Αντιστάσεις:**
  - **5 Ω (συνδεδεμένες στον θερμαντήρα):** Παρέχει περιορισμό ρεύματος στο εσωτερικό θερμαντικό στοιχείο του αισθητήρα.
  - **1 kΩ:** Αντίσταση pull-down για τη σταθεροποίηση του σήματος.
  - **Ποτενσιόμετρο 10 kΩ:** Χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της τάσης αναφοράς για τον συγκριτή.
  - **1 kΩ (κοντά στη λυχνία LED):** Αντίσταση περιορισμού ρεύματος για την ενδεικτική λυχνία LED.
  - **10 kΩ:** Αντίσταση φορτίου. Στην προκειμένη περίπτωση, ο MQ-135 έχει αντίσταση φορτίου 1 kΩ, ωστόσο τροποποιώντας τη συνδεσμολογία, προσθέσαμε σε σειρά μία ακόμη αντίσταση 10 kΩ. Συγκεκριμένα, τοποθετήσαμε μία αντίσταση 10 kΩ ανάμεσα στον ακροδέκτη αναλογικής εξόδου (AO) του αισθητήρα και τον ακροδέκτη που συνδέεται στην αναλογική είσοδο (AI) του Arduino. Έτσι, φτάνουμε την συνολική αντίσταση φορτίου στα 11 kΩ εξασφαλίζοντας μετρήσεις με μεγαλύτερη ακρίβεια.
- **Πυκνωτές:** 100 nF (πυκνωτές αποσύζευξης για μείωση του θορύβου).
- **LED:** Οπτική ένδειξη όταν η συγκέντρωση αερίου υπερβαίνει το όριο.
- **Τροφοδοτικό:** Παρέχει τάση συνεχούς ρεύματος 5V στο κύκλωμα.



Σχήμα 4: Απεικόνιση του κυκλώματος του MQ-135 [37].

#### 4.5.2 Αρχή λειτουργίας, Βαθμονόμηση και Εφαρμογές

Η επιφάνεια του ημιαγωγού οξειδίου του μετάλλου του αισθητήρα απορροφά οξυγόνο από τον αέρα, δημιουργώντας ένα στρώμα εξάντλησης. Όταν το αέριο-στόχος έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του αισθητήρα, αντιδρά με το προσροφημένο οξυγόνο, μεταβάλλοντας την αντίσταση του ημιαγωγού. Αυτή η μεταβολή της αντίστασης μετατρέπεται σε τάση εξόδου από το κύκλωμα, η οποία μπορεί στη συνέχεια να διαβαστεί από τον μικροελεγκτή.

Ο αισθητήρας MQ-135 απαιτεί βαθμονόμηση για τη διασφάλιση ακριβών μετρήσεων. Αρχικά, ο αισθητήρας εκτίθεται σε καθαρό αέρα, με στόχο τη μέτρηση της βασικής αντίστασης του στοιχείου ανίχνευσης ( $R_0$ ). Χρησιμοποιώντας γνωστές συγκεντρώσεις αερίων-στόχων, προσδιορίζεται η απόκριση του αισθητήρα και σχεδιάζεται το γράφημα της αντίστασης (ή της τάσης) σε σχέση με τη συγκέντρωση του αερίου. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ενός τύπου ή πίνακα αναζήτησης για τη μετατροπή των ενδείξεων του αισθητήρα σε συγκέντρωση αερίου σε μέρη ανά εκατομμύριο (ppm).

Οι δημοφιλέστερες εφαρμογές περιλαμβάνουν:

- **Παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα:** Μέτρηση ρύπων όπως  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$  ή βενζόλιο.
- **Βιομηχανική ασφάλεια:** Ανίχνευση βλαβερών αερίων σε εργοστάσια ή εργαστήρια.
- **Οικιακός αυτοματισμός:** Παρακολούθηση του καπνού ή των βλαβερών αερίων.
- **Έξυπνες πόλεις:** Ενσωμάτωση σε συστήματα IoT για περιβαλλοντική παρακολούθηση.

#### 4.6 I2C Adapter

Λόγω των περιορισμένων θυρών του Arduino χρησιμοποιήθηκε ένας αντάπτορας I2C. Μια LCD οθόνη για το Arduino με διαστάσεις 16x2 (16 κολώνες, 2 γραμμές) έχει 16 απαραίτητες θύρες, η οποίες συνδέονται στο Arduino προκειμένου να λειτουργήσει η οθόνη. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα να καταναλώσουμε σχεδόν όλες τις διαθέσιμες θύρες του Arduino μόνο για την οθόνη. Επομένως, η χρήση ενός I2C adapter κρίθηκε απαραίτητη. Ένας I2C adapter συνδέεται πάνω στις 16 θύρες μιας LCD οθόνης και μειώνει τις θύρες που απαιτούνται από το Arduino για τη λειτουργία της οθόνης σε μονάχα 4. Πρόκειται για τις θύρες που αφορούν την τροφοδοσία και τη γείωση της οθόνης, καθώς επίσης δύο θύρες για τα Serial Data και Serial Clock.



Εικόνα 9: Φωτογραφία LCD Monitor [38].

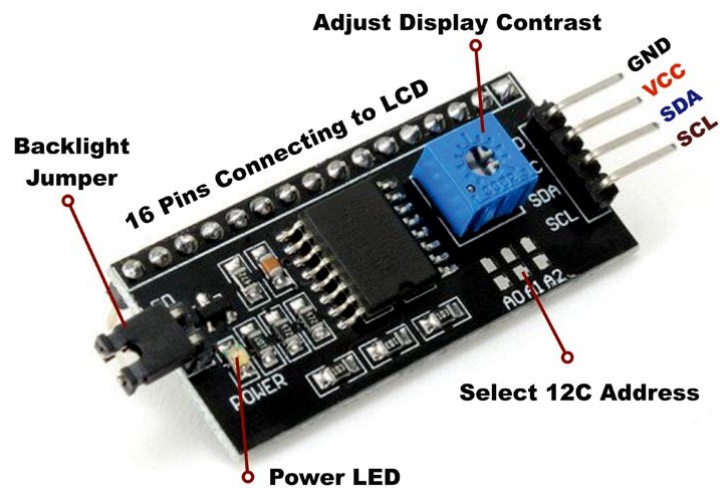
Το I2C bus είναι μια στάνταρ αμφίδρομη διεπαφή, στην οποία ο ελεγκτής, γνωστός ως master, επικοινωνεί με συσκευές slave. Μια συσκευή slave δεν μπορεί να αποστείλει δεδομένα, εκτός εάν έχει προηγηθεί εντολή από τον master. Κάθε συσκευή στο I2C bus διαθέτει μια μοναδική διεύθυνση ώστε να διαχωρίζεται από τις άλλες συσκευές στο ίδιο bus. Πολλές slave συσκευές χρειάζονται ρύθμιση κατά την εκκίνηση, προκειμένου να καθοριστεί η λειτουργία τους. Αυτό επιτυγχάνεται όταν ο master αποκτά πρόσβαση στους εσωτερικούς χάρτες καταχωρητών των slave συσκευών, οι οποίοι έχουν μοναδικές διευθύνσεις. Μια συσκευή μπορεί να διαθέτει έναν ή περισσότερους καταχωρητές για αποθήκευση, εγγραφή ή ανάγνωση δεδομένων.

Η φυσική διεπαφή I2C περιλαμβάνει τις γραμμές σειριακού ρολογιού (SCL) και σειριακών δεδομένων (SDA). Και οι δύο γραμμές SDA και SCL πρέπει να συνδέονται με το VCC μέσω μιας αντίστασης pull-up. Το μέγεθος της αντίστασης pull-up εξαρτάται από τη χωρητικότητα στις γραμμές I2C. Η μεταφορά δεδομένων μπορεί να ξεκινήσει μόνο όταν το bus είναι αδρανές, δηλαδή όταν και οι δύο γραμμές SDA και SCL είναι σε κατάσταση High μετά από συνθήκη STOP.

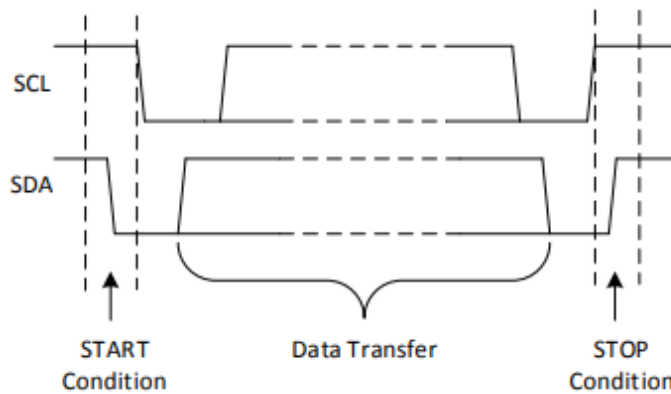
Η γενική διαδικασία για να αποκτήσει ένας master πρόσβαση σε μια συσκευή slave έχει ως εξής:

- Όταν ένας master θέλει να αποστείλει δεδομένα σε ένα slave:
- Ο master-πομπός ξεκινά τη διαδικασία με την αποστολή μιας συνθήκης START και προσδιορίζει τη συσκευή slave-δέκτη.
- Ο master-πομπός μεταδίδει τα δεδομένα στη συσκευή slave-δέκτη.
- Ο master-πομπός ολοκληρώνει τη μεταφορά με μια συνθήκη STOP.
- Όταν ένας master θέλει να λάβει/διαβάσει δεδομένα από ένα slave:
- Ο master-δέκτης ξεκινά τη διαδικασία με την αποστολή μιας συνθήκης START και προσδιορίζει τη συσκευή slave-πομπό.
- Ο master-δέκτης στέλνει τον καταχωρητή που ζητήθηκε για ανάγνωση στη συσκευή slave-πομπό.
- Ο master-δέκτης λαμβάνει τα δεδομένα από τη συσκευή slave-πομπό.
- Ο master-δέκτης ολοκληρώνει τη μεταφορά με μια συνθήκη STOP.

Η επικοινωνία I<sup>2</sup>C με μία συσκευή ξεκινά όταν ο master στέλνει μια συνθήκη START και ολοκληρώνεται όταν ο master στέλνει μια συνθήκη STOP. Μια μετάβαση από υψηλή σε χαμηλή τιμή στην γραμμή SDA, ενώ η γραμμή SCL είναι υψηλή, ορίζει τη συνθήκη START. Αντίστοιχα, μια μετάβαση από χαμηλή σε υψηλή τιμή στην γραμμή SDA, ενώ η γραμμή SCL είναι υψηλή, ορίζει τη συνθήκη STOP.



Εικόνα 10: Φωτογραφία Λειτουργίας I2C Adapter [39].



Σχήμα 5: Εικόνα Λειτουργίας I2C Adapter [40].

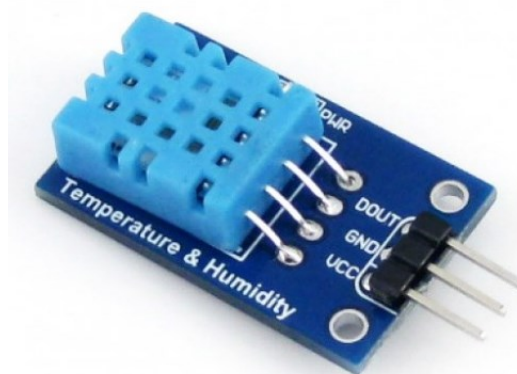
#### 4.7 Μεταφορά δεδομένων I2C

Τα δεδομένα στο PC πρέπει να στέλνονται και να λαμβάνονται από τις συσκευές slave μέσω της ανάγνωσης ή εγγραφής στους καταχωρητές της συσκευής slave. Οι καταχωρητές αυτοί αποτελούν τμήματα της μνήμης της συσκευής, περιέχοντας πληροφορίες, όπως παραμέτρους ρύθμισης ή δεδομένα που πρέπει να επιστραφούν στον master. Ο master καταγράφει πληροφορίες σε αυτούς τους καταχωρητές για να δώσει οδηγίες στη συσκευή slave για να εκτελέσει μια εργασία.

Παρόλο που οι καταχωρητές είναι συνηθισμένοι στις συσκευές PC slave, δεν ισχύει για όλες. Κάποιες απλές συσκευές μπορεί να έχουν μόνο έναν καταχωρητή, ο οποίος μπορεί να γραφτεί απευθείας μετά τη διεύθυνση του slave, χωρίς να χρειάζεται η διεύθυνση ενός συγκεκριμένου καταχωρητή. Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας συσκευής είναι ένας διακόπτης 8-bit PC, ο οποίος ελέγχεται μέσω εντολών PC. Αφού χρειάζεται μόνο 1 bit για την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση ενός καναλιού, απαιτείται μόνο ένας καταχωρητής, και ο master απλώς γράφει τα δεδομένα του καταχωρητή μετά τη διεύθυνση του slave, παρακάμπτοντας την ανάγκη για καθορισμό αριθμού καταχωρητή.

## 4.8 DHT11

Αυτό το module περιλαμβάνει έναν σύνθετο αισθητήρα για την υγρασία και τη θερμοκρασία, με διαβαθμισμένη ψηφιακή έξοδο σήματος. Το αισθητήριο DHT11 συνδυάζει την ανίχνευση υγρασίας και θερμοκρασίας, παρέχοντας ακριβές ψηφιακό σήμα εξόδου. Το DHT11 προσφέρει πολύ ακριβείς μετρήσεις υγρασίας και θερμοκρασίας, εξασφαλίζοντας υψηλή αξιοπιστία και σταθερότητα σε βάθος χρόνου. Ο αισθητήρας διαθέτει έναν αντιστατικό αισθητήρα υγρασίας και έναν αισθητήρα θερμοκρασίας τύπου NTC, με ενσωματωμένο μικροελεγκτή 8-bit, που προσφέρει γρήγορη απόκριση, είναι οικονομικός και διατίθεται σε πακέτο 4 ακίδων [26]. Το module DHT11 λειτουργεί με σειριακή επικοινωνία μέσω ενός μόνο καλωδίου. Στέλνει δεδομένα ως ακολουθία παλμών με συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Πριν τα δεδομένα σταλούν στο Arduino, απαιτείται μια αρχική εντολή με καθυστέρηση χρόνου, και όλη η διαδικασία διαρκεί περίπου 4ms. Η μονή καλωδιακή σειριακή διεπαφή επιτρέπει την εύκολη και γρήγορη ενσωμάτωση στο σύστημα. Το μικρό του μέγεθος, η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, και η ικανότητα μετάδοσης σήματος έως και 20 μέτρα το καθιστούν ιδανική επιλογή για διάφορες εφαρμογές, ακόμα και για τις πιο απαιτητικές. Το εξάρτημα διαθέτει πακέτο 4 ακίδων σε μία σειρά, που είναι εύκολο στη σύνδεση, ενώ μπορούν να παραχθούν ειδικές συσκευασίες κατόπιν ζήτησης.



Εικόνα 11: DHT-11 αισθητήρας Υγρασίας και Θερμοκρασίας [41].

## 4.9 Πρώτη Μορφή Κώδικα

Ακολουθεί ανάλυση της αρχικής μορφής του κώδικα του προγράμματος. Ο κώδικας περιλαμβάνει βιβλιοθήκες, οι οποίες είναι διαθέσιμες στο διαδίκτυο και στο Arduino IDE, και αξιοποιούνται για την ορθή λειτουργία των εξαρτημάτων που συνοδεύουν το Arduino για την υλοποίηση του συστήματος. Επιπλέον, αρχικοποιούνται μεταβλητές στις οποίες αποθηκεύονται τα διάφορα μεγέθη που εξετάζονται με τους αισθητήρες και διαμορφώνεται η λογική εκτύπωσης των δεδομένων εξόδου στην οθόνη. Τέλος, σχηματίζεται ο κατάλληλος κώδικας για την συνεχόμενη λειτουργία του συστήματος.

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <DHT.h>
```

- **‘#include <Wire.h>’**: Εγκαθιστά την απαραίτητη βιβλιοθήκη που επιτρέπει στο Arduino να επικοινωνεί με συσκευές που χρησιμοποιούν πρωτόκολλο επικοινωνίας I2C. Σε αυτήν την περίπτωση χρειαζόμαστε τη βιβλιοθήκη Wire για να επικοινωνούμε με την LCD οθόνη.
- **‘#include <LiquidCrystal\_I2C.h>’**: Εγκαθιστά τη LiquidCrystal\_I2C βιβλιοθήκη, η οποία μας δίνει τη δυνατότητα να χειριστούμε την LCD οθόνη μέσω του I2C adapter.
- **‘#include <DHT.h>’**: Εγκαθιστά την DHT βιβλιοθήκη, η οποία μας επιτρέπει να διαβάζουμε τα δεδομένα που παράγουν οι αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας.

```
#define DHTPIN 2
#define DHTTYPE DHT11
```

- **‘#define DHTPIN 2’**: Καθορίζεται η θύρα του Arduino στην οποία θα γίνει η σύνδεση του αισθητήρα DHT. Σε αυτή την περίπτωση, η σύνδεση πραγματοποιείται στη 2<sup>η</sup> θύρα.
- **‘#define DHTTYPE DHT11’**: Καθορίζεται ότι ο τύπος αισθητήρα DHT που θα χρησιμοποιηθεί είναι ο DHT11.

```
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
```

- **‘LiquidCrystal\_I2C lcd(0x27, 16 , 2)’**: Δημιουργεί ένα αντικείμενο με το όνομα ‘lcd’ της κλάσης LiquidCrystal\_I2C. Στη συνέχεια, ορίζει τις παραμέτρους του αντικείμενου, δηλαδή τη διεύθυνση (0x27), και τις διαστάσεις της οθόνης, η οποία, σε αυτή τη περίπτωση, είναι 16 στήλες και 2 γραμμές.

```
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
```

- **‘DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE)’**: Δημιουργεί ένα αντικείμενο, με το όνομα ‘dht’, της κλάσης DHT. Στην συνέχεια, ενεργοποιεί τη θύρα στην οποία συνδέθηκε ο αισθητήρας DHT και ξεκινάει τη λειτουργία του.

```
void setup() {
  lcd.init();
  lcd.backlight();
}
```

- **‘void setup() {’**: Εκκινεί τη λειτουργία ‘set up’, η οποία τρέχει τη στιγμή έναρξης ή επαναφοράς του Arduino και σηματοδοτεί την αρχή του κυρίως σώματος του κώδικα.
- **‘lcd.init()’**: Ενεργοποιεί την LCD οθόνη.
- **‘lcd.backlight()’**: Ανάβει τον πίσθιο φωτισμό της LCD οθόνης.

```
dht.begin();
```

- **‘dht.begin()’**: Εκκινεί τη λειτουργία του DHT αισθητήρα.

```
Serial.begin(9600);
```

- **'Serial.begin(9600)'**: Εκκινεί τη σειριακή επικοινωνία σε ρυθμό Baud με τιμή 9600 bits το δευτερόλεπτο. Ο ρυθμός Baud του Arduino πρέπει να ταιριάζει με τον ρυθμό Baud που επιλέχθηκε στο Serial Monitor, της εφαρμογής που χρησιμοποιείται για τον προγραμματισμό του Arduino. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να φαίνονται τα αποτελέσματα του κώδικα στην οθόνη του υπολογιστή.

```
void loop() {
```

- **'void loop() {'**: Εκκινεί τη λειτουργία 'loop'. Η λειτουργία 'loop' τρέχει διαρκώς, μετά την λειτουργία 'setup'. Επιπλέον, όλες οι εντολές που βρίσκονται μέσα στην λειτουργία 'loop' εκτελούνται επανειλημμένα.

```
float h = dht.readHumidity();  
float t = dht.readTemperature();
```

- **'float h = dht.readHumidity()'**: Διαβάζει την τιμή που παράγει ο αισθητήρας DHT για την υγρασία και την αποθηκεύει στην μεταβλητή 'h'.
- **'float t = dht.readTemperature()'**: Διαβάζει την τιμή που εμφανίζει ο αισθητήρας DHT για την θερμοκρασία και την αποθηκεύει στην μεταβλητή με όνομα 't'.

```
int mq135Value = analogRead(A0);
```

- **'int mq135Value = analogRead(A0)'**: Διαβάζει την αναλογική τιμή που παράγει ο αισθητήρας βλαβερών αερίων MQ-135, ο οποίος είναι συνδεδεμένος στην αναλογική θύρα 0 του Arduino, και την αποθηκεύει στην μεταβλητή 'mq135Value'.

```
lcd.clear();  
lcd.setCursor(0, 0);  
lcd.print("Temp: ");  
lcd.print(t);  
lcd.print(" C");
```

- **'lcd.clear()'**: Καθαρίζει την LCD οθόνη, δηλαδή εξαφανίζει ότι δείχνει η οθόνη.
- **'lcd.setCursor(0, 0)'**: Τοποθετεί τον κέρσορα στην πρώτη θέση της οθόνης, η οποία είναι η πρώτη στήλη και πρώτη γραμμή. Έτσι, η πρώτη τιμή που θα παραχθεί στην οθόνη, θα εμφανιστεί στην πρώτη θέση της οθόνης.
- **'lcd.print(t)'**: Εκτυπώνει το κείμενο 'Temp' στην οθόνη για την τιμή της θερμοκρασίας που ακολουθεί.
- **'lcd.print(t)'**: Εκτυπώνει την τιμή για την θερμοκρασία που είναι αποθηκευμένη στην μεταβλητή 't' στην οθόνη.
- **'lcd.print(" C")'**: Εκτυπώνει το κείμενο 'C', δηλαδή τους βαθμούς Κελσίου, στην LCD οθόνη.

```
lcd.setCursor(0, 1);  
lcd.print("Hum: ");  
lcd.print(h);  
lcd.print("%");
```

- **'lcd.setCursor(0, 1)'**: Τοποθετεί τον κέρσορα στην πρώτη στήλη της δεύτερης σειράς.
- **'lcd.print("Hum: ")'**: Εμφανίζει στην οθόνη το κείμενο "Hum: ", για την τιμή της υγρασίας που θα ακολουθήσει.
- **'lcd.print(h)'**: Εκτυπώνει την τιμή της υγρασίας, που είναι αποθηκευμένη στη μεταβλητή "h", στην οθόνη.
- **'lcd.print("%")'**: Εκτυπώνει το σύμβολο "%" στην οθόνη, καθώς η υγρασία αποτυπώνεται σε μορφή ποσοστού.

```
lcd.setCursor(8, 1);  
lcd.print("Gas: ");  
lcd.print(mq135Value);
```

- **'lcd.setCursor(8, 1)'**: Τοποθετεί τον κέρσορα στην ένατη στήλη της δεύτερης γραμμής.
- **'lcd.print("Gas: ")'**: Εκτυπώνει το κείμενο "Gas:", στην LCD οθόνη, για την τιμή του αερίου που θα ακολουθήσει.
- **'lcd.print(mq135Value)'**: Εκτυπώνει την τιμή που εκπροσωπεί το βλαβερό αέριο, η οποία είναι αποθηκευμένη στη μεταβλητή "mq135Value".

```
Serial.print("Temp: ");  
Serial.print(t);  
Serial.print(" C, Humidity: ");  
Serial.print(h);  
Serial.print("%, Gas: ");  
Serial.println(mq135Value);
```

- **'Serial.print("Temp: ")'**: Εκτυπώνει το κείμενο "Temp: " στο Serial Monitor της εφαρμογής για τον προγραμματισμό του Arduino.
- **'Serial.print(t)'**: Εκτυπώνει την τιμή της θερμοκρασίας, η οποία βρίσκεται στην μεταβλητή "t", στο Serial Monitor.
- **'Serial.print(" C, Humidity: ")'**: Εκτυπώνει το κείμενο "C, Humidity: " στο Serial Monitor.
- **'Serial.print(h)'**: Εκτυπώνει την τιμή της υγρασίας από την μεταβλητή "h" στο Serial Monitor.
- **'Serial.print("%, Gas: ")'**: Δημιουργεί το κείμενο "%, Gas: " στο Serial Monitor.
- **'Serial.println(mq135Value)'**: Εκτυπώνουμε την τιμή του αερίου, η οποία βρίσκεται στην μεταβλητή "mq135Value", στην οθόνη του Serial Monitor.

```
delay(5000);
```

- **'delay(2000)'**: Σταματάει την εκτέλεση του προγράμματος από το να επαναληφθεί για 5000 millisecond. Ρυθμίζοντας με αυτόν τον τρόπο την καθυστέρηση επανάληψης της εκτέλεσης του κώδικα, ορίζεται η συχνότητα με την οποία θα εμφανίζονται τα αποτελέσματα του κώδικα στην οθόνη του Serial Monitor.

#### 4.10 Διάγραμμα Ροής Προγράμματος

Στο σύνολο του, ο παραπάνω κώδικας έχει ως αποτέλεσμα να εφαρμοστούν οι κατάλληλες βιβλιοθήκες, να διαβαστούν τα δεδομένα που παράγουν οι αισθητήρες DHT11 και MQ135, και να εκτυπωθούν τα αποτελέσματα στην LCD οθόνη και στο Serial Monitor. Επιπρόσθετα, οι βιβλιοθήκες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αναγκαίες για την I2C επικοινωνία, καθώς επίσης και για την ανάγνωση των τιμών που παράγουν οι αισθητήρες DHT11 και MQ135.



Σχήμα 6: Διάγραμμα Ροής Αρχικού Προγράμματος.

## Κεφάλαιο 5ο: Μεθοδολογία Υλοποίησης Συστήματος και Μετρήσεις

### 5.1 Μετρήσεις

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε δύο περιοχές. Η μία περιοχή βρίσκεται λίγο έξω από τη Θεσσαλονίκη, στα ανατολικά προάστια, όπου λόγω της μειωμένης κυκλοφορίας αυτοκινήτων και της μικρότερης ανθρώπινης δραστηριότητας σε σχέση με την πόλη, αλλά και της μεγαλύτερης παρουσίας βλάστησης, είναι αναμενόμενες οι ενδείξεις που αντιπροσωπεύουν μία καθαρή και υγιεινή ατμόσφαιρα. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, ο μετρητής MQ-135 εκτέθηκε άμεσα σε ρύπανση από καυσαέρια αυτοκινήτου και εργοστασιακού τσιγάρου. Αυτή η έκθεση επιτρέπει την εξέταση της ποιότητας του αέρα σε ένα καθαρό περιβάλλον, σε σύγκριση με την έκθεση του αισθητήρα σε κοινές ρυπαντικές πηγές. Οι μετρήσεις, για αυτό το πείραμα πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του Ιουλίου όπου η θερμοκρασία κυμαίνεται στους 30°C.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να ειπωθεί ότι ο αισθητήρας MQ-135 δεν έχει τη δυνατότητα να ξεχωρίσει το είδος του ρυπογόνου που ανιχνεύει.

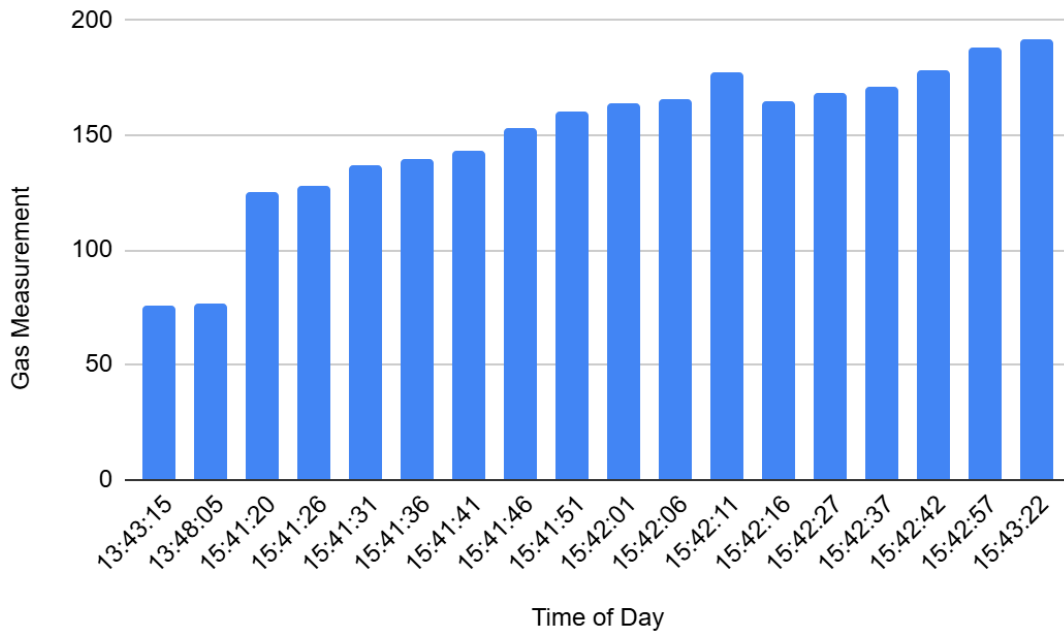
#### 5.1.1 Μετρήσεις στα Προάστια

Πίνακας 2: Μετρήσεις στα προάστια μέσα σε δοχείο

TIME OF DAY	HUMIDITY	GAS	CHANGE IN GAS
13:43:15	38.00%	76	0
13:48:05	40.00%	77	+1
15:41:20	44.00%	125	+48
15:41:26	44.00%	128	+3
15:41:31	45.00%	137	+9
15:41:36	45.00%	140	+3
15:41:41	45.00%	143	+3
15:41:46	45.00%	153	+10
15:41:51	45.00%	160	+7
15:42:01	45.00%	164	+4
15:42:06	45.00%	166	+2
15:42:11	45.00%	177	+11
15:42:16	45.00%	165	-12
15:42:27	45.00%	168	+3
15:42:37	46.00%	171	+3

15:42:42	46.00%	178	+7
15:42:57	46.00%	188	+10
15:43:22	47.00%	192	+4

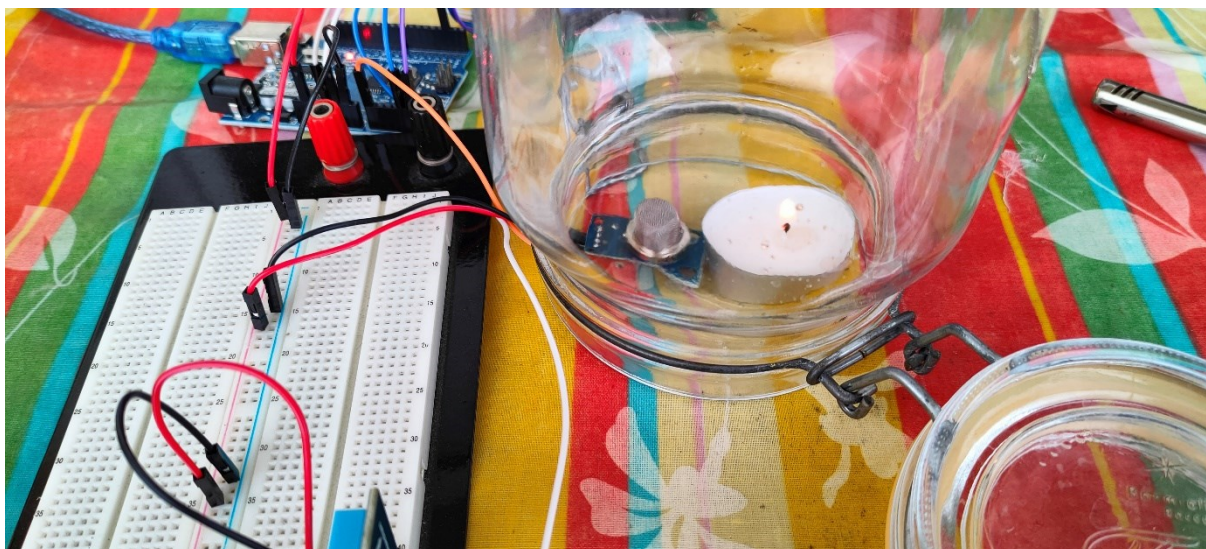
### Gas Over Time



Σχήμα 7: Μέτρηση των αερίων στην πάροδο του χρόνου

Με την έναρξη των μετρήσεων και οι δύο αισθητήρες παρουσιάζουν σταθεροποίηση σε μία τιμή κατά τη διάρκεια έκθεσης στην ατμόσφαιρα χωρίς άλλους παράγοντες, όπως στοχευμένη έκθεση σε ρυπογόνο ή τοποθέτηση δοχείου. Αμέσως μετά τη σταθεροποίηση, ο μετρητής περιορίστηκε σε ένα δοχείο, δίπλα σε ένα συμβατικό κερί. Όπως βλέπουμε στον παραπάνω πίνακα και σχήματα οι ενδείξεις του μετρητή αυξάνονταν διαρκώς αφού πρώτα φάνηκε σημαντική αύξηση στην τιμή του. Αυτή η αύξηση παρατηρήθηκε τη στιγμή που περιορίστηκε ο μετρητής στον ίδιο χώρο με το κερί.

Στη συνέχεια, το δοχείο αφαιρέθηκε και ο μετρητής εκτέθηκε σε καύση εργοστασιακού τσιγάρου, πράγμα που είχε άμεσα αποτελέσματα στις ενδείξεις.



Εικόνα 12: Πείραμα με δοχείο στα προάστια.

Πίνακας 3: Μετρήσεις στα Προάστια χωρίς δοχείο

TIME OF DAY	HUMIDITY	GAS	CHANGE IN GAS
15:43:38	47.00%	183	-
15:43:43	47.00%	194	+11
15:43:48	47.00%	181	-13
15:43:53	47.00%	176	-5
15:43:58	47.00%	166	-10
15:44:01	47.00%	126	-40
15:44:06	47.00%	239	+113
15:44:11	47.00%	142	-97
15:44:16	47.00%	118	-24
15:44:22	47.00%	197	-79
15:44:27	47.00%	132	-65
15:44:32	46.00%	202	+70
15:44:37	46.00%	136	-66
15:44:42	46.00%	120	-16
15:44:47	46.00%	112	-8
15:44:52	47.00%	107	-5
15:44:57	47.00%	489	+382

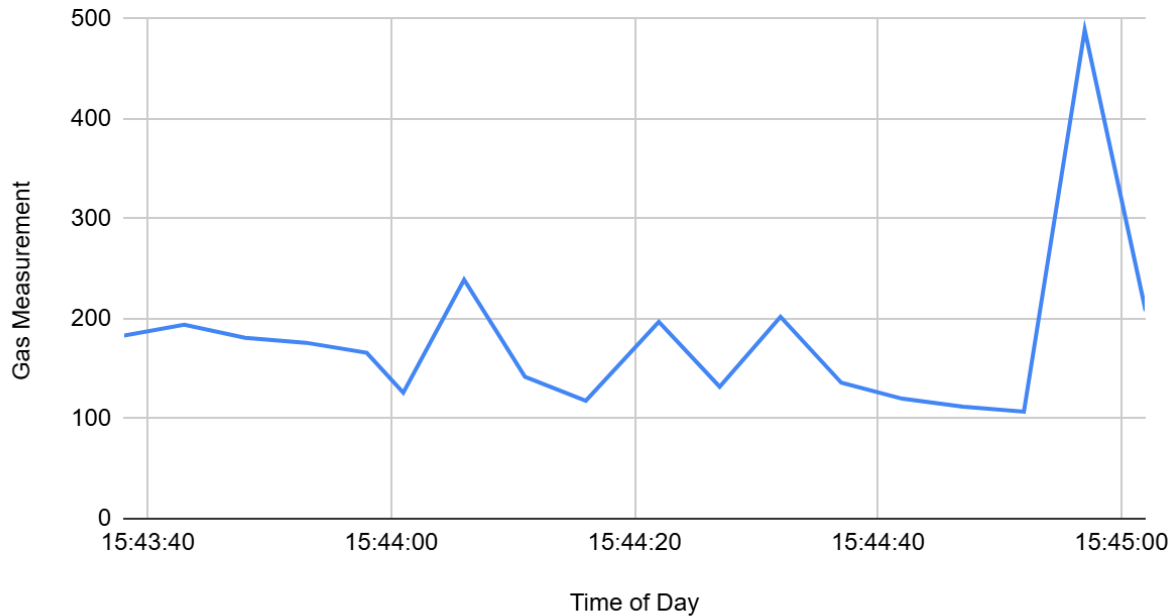
15:45:02

47.00%

208

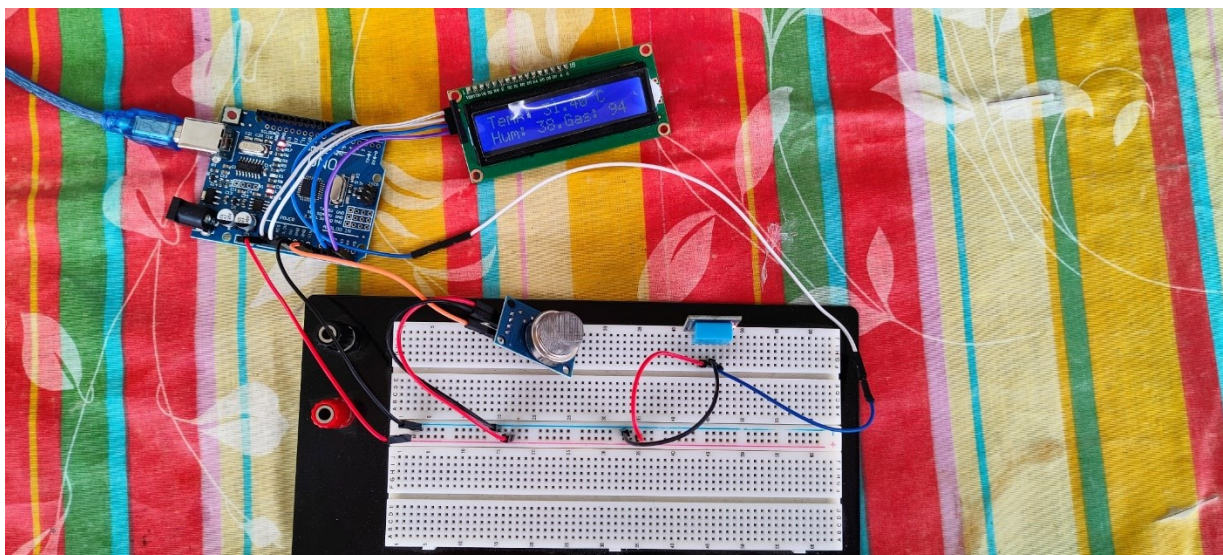
-281

### Gas Over Time of Day



Σχήμα 8: Μέτρηση αερίων χωρίς το δοχείο

Στον παραπάνω πίνακα και σχήμα γίνεται αντιληπτό ότι, παρ' ότι ο αισθητήρας βρίσκεται σε εξωτερικό χώρο, τη στιγμή που έρχεται σε άμεση έκθεση στο βλαβερό αέριο που παράγει η καύση ενός συμβατικού τσιγάρου, η τιμή της ένδειξης εκτοξεύεται, έστω και στιγμιαία. Ταυτόχρονα παρατηρούμε τη δυνατότητα του αισθητήρα να επανέρχεται σε κατάσταση «ηρεμίας» κοντά στην τιμή στην οποία έγινε η μέτρηση σε περιβάλλον καθαρού αέρα. Είναι φανερό ότι κάτι τόσο απλό και καθημερινό όπως το τσιγάρο, μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στην ατμόσφαιρα.



Εικόνα 13: Πείραμα χωρίς δοχείο στα προάστια.

### 5.1.2 Μετρήσεις στο Κέντρο της Πόλης-Μέρος Α

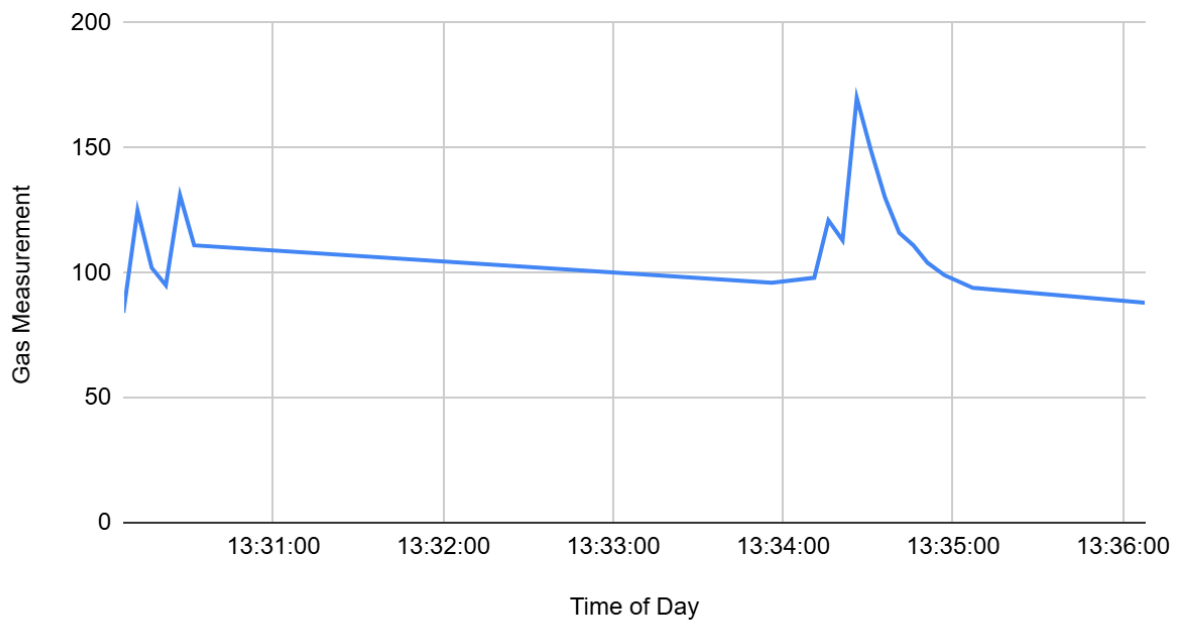
Το δεύτερο σύνολο μετρήσεων πραγματοποιήθηκε στο κέντρο της Θεσσαλονίκης, όπου η ανθρώπινη δραστηριότητα είναι αυξημένη σε σύγκριση με τα προάστια.

Πίνακας 4: Μετρήσεις στο κέντρο της Θεσσαλονίκης

TIME OF DAY	HUMIDITY	GAS	CHANGE IN GAS
13:30:07	41.00%	84	-
13:30:12	41.00%	125	+41
13:30:17	41.00%	102	-23
13:30:22	41.00%	95	-7
13:30:27	42.00%	131	+36
13:30:32	42.00%	111	-20
13:33:56	41.00%	96	-15
13:34:11	41.00%	98	+2
13:34:16	41.00%	121	+23
13:34:21	42.00%	113	-8
13:34:26	42.00%	170	+57
13:34:31	42.00%	149	-21
13:34:36	42.00%	130	-19
13:34:41	42.00%	116	-14

13:34:46	42.00%	111	-5
13:34:51	42.00%	104	-7
13:34:57	42.00%	99	-5
13:35:07	42.00%	94	-5
13:36:08	43.00%	88	-6

### Gas Over Time



Σχήμα 9: Μέτρηση αερίων στο κέντρο της πόλης

Στον παραπάνω πίνακα και σχήμα παρατηρείται ότι υπάρχουν αρκετές αυξομειώσεις. Αυτό συμβαίνει διότι ο αισθητήρας MQ-135 χρειάζεται χρόνο για να θερμανθεί, ώστε να μπορέσει να παράγει τη σωστή μέτρηση. Έτσι, για τα πρώτα λεπτά μέτρησης είναι φυσιολογικό να παρατηρηθούν αυξομειώσεις των ενδείξεων. Ο MQ-135 έρχεται σε αντίθεση με τον DHT-11, ο οποίος δεν χρειάζεται χρόνο προθέρμανσης για να παράγει ακριβές αποτέλεσμα.



Εικόνα 14: Πείραμα σε αστικό κέντρο.

### 5.1.3 Μετρήσεις στο Κέντρο της Πόλης-Μερος Β

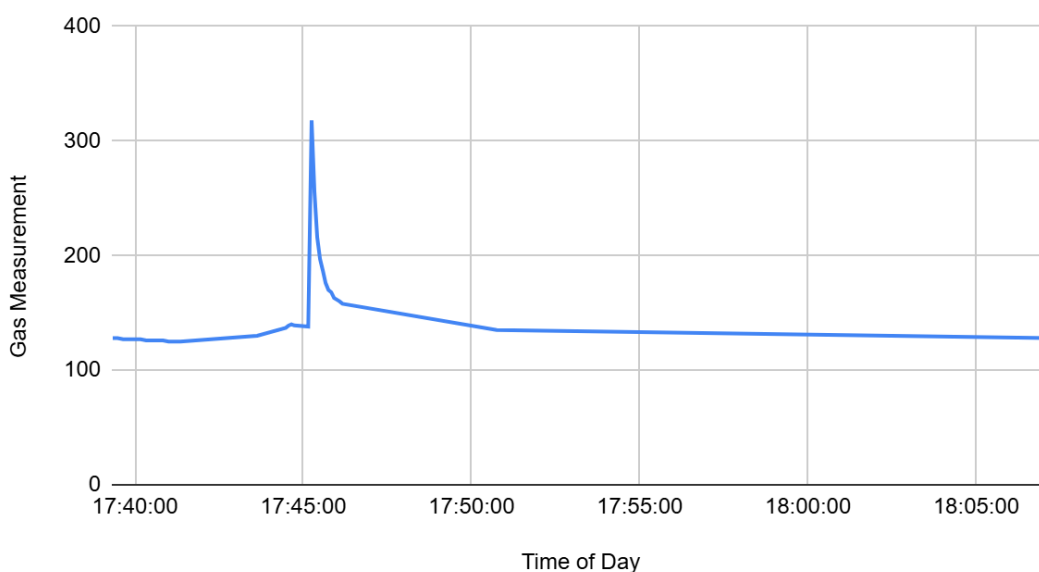
Κατά την προετοιμασία του δεύτερου πειράματος στο κέντρο της Θεσσαλονίκης, προστέθηκε μια αντίσταση 10 kΩ σε σειρά, ανάμεσα από τον αισθητήρα MQ-135 και την έξοδο του προς το analog input του Arduino. Αυτή η προσθήκη κρίθηκε απαραίτητη, καθώς η συγκεκριμένη έκδοση του αισθητήρα περιλαμβάνει εσωτερική αντίσταση που ανέρχεται μόνο στα 1 kΩ. Για να μπορεί να λειτουργήσει κατάλληλα ο μετρητής, είναι απαραίτητη η παρουσία εσωτερικής αντίστασης που ανέρχεται στα 10 kΩ-47 kΩ. Οι νέες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν την 1<sup>η</sup> Φεβρουαρίου 2025, στις 17:00-18:00. Σε αυτό το πείραμα, ο μετρητής είχε προθερμαθεί για μερικές μέρες, ώστε να πάρει έμπιστες μετρήσεις άμεσα, ενώ η θερμοκρασία φάνηκε σταθερή στους 19 βαθμούς Κελσίου. Για τα πρώτα 40 λεπτά του πειράματος, οι ενδείξεις του μετρητή κυμάνθηκαν από 127-130. Στη συνέχεια, εκτέθηκε ξανά σε ρυπογόνα, όπως είναι ο αναπτήρας και η καύση εργοστασιακού τσιγάρου. Ο παρακάτω πίνακας αντιπροσωπεύει τις μετρήσεις που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια, αλλά και μετά την έκθεση του μετρητή στις προαναφερθέντες πηγές ρύπων. Η δειγματοληψία επαναλαμβάνονταν κάθε 5 δευτερόλεπτα, ωστόσο εφόσον η μέτρηση δεν είχε ουσιαστική διαφορά, ο πίνακας απλοποιήθηκε.

Πίνακας 5: Δεύτερη μέτρηση στο κέντρο της Θεσσαλονίκης με πρόσθετη αντίσταση

TIME OF DAY	HUMIDITY	GAS	CHANGE IN GAS
17:39:19	48	128	-
17:39:29	48	128	-
17:39:39	48	127	-1
17:39:59	47	127	-

<b>17:40:10</b>	47	127	-
<b>17:40:20</b>	47	126	-1
<b>17:40:30</b>	47	126	-
<b>17:40:40</b>	48	126	-
<b>17:40:50</b>	47	126	-
<b>17:41:00</b>	48	125	-1
<b>17:41:11</b>	47	125	-
<b>17:41:21</b>	47	125	-
<b>17:43:38</b>	46	130	+5
<b>17:44:29</b>	46	137	+7
<b>17:44:34</b>	46	139	+2
<b>17:44:39</b>	45	140	+1
<b>17:44:44</b>	45	139	-1
<b>17:45:09</b>	45	138	-1
<b>17:45:15</b>	45	318	+180
<b>17:45:20</b>	46	256	-62
<b>17:45:25</b>	45	216	-40
<b>17:45:30</b>	47	197	-19
<b>17:45:35</b>	45	187	-10
<b>17:45:40</b>	46	176	-11
<b>17:45:45</b>	46	170	-6
<b>17:45:50</b>	48	168	-2
<b>17:45:55</b>	48	163	-5
<b>17:46:05</b>	49	160	-3
<b>17:46:10</b>	49	158	-2
<b>17:50:45</b>	50	135	-23
<b>18:07:11</b>	51	128	-7

## Gas Over Time



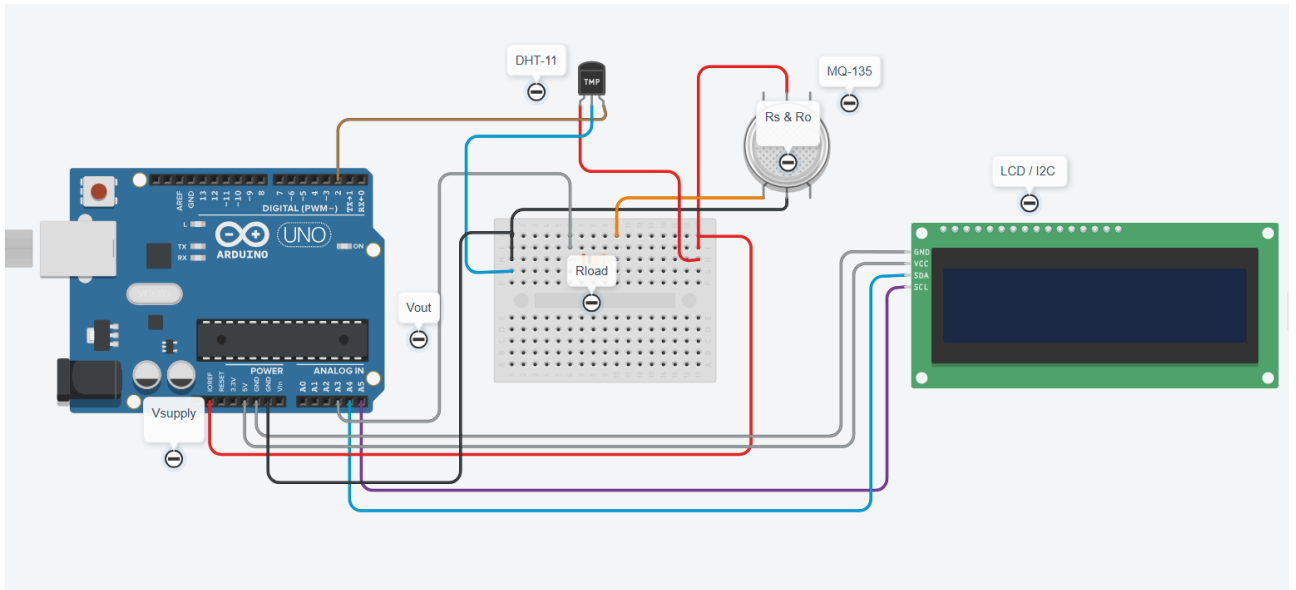
Σχήμα 10: Δεύτερη μέτρηση στο κέντρο της πόλης με προσθήκη αντίστασης

Είναι φανερό από το παραπάνω σχήμα ότι η πρόσθετη αντίσταση η οποία τοποθετεί την τιμή της εσωτερικής αντίστασης του αισθητήρα εντός προβλεπόμενων πλαισίων, είχε αξιοσημείωτη επίδραση στη συμπεριφορά του. Από το σχήμα 10 γίνεται αντιληπτό ότι οι αυξομειώσεις στις τιμές του έχουν μειωθεί αισθητά. Τη στιγμή που παρατηρείται τη μέγιστη μέτρηση του σχήματος 10, ο αισθητήρας εκτέθηκε σε καύση εργοστασιακού τσιγάρου. Επίσης, γίνεται διάκριτη η ικανότητα του αισθητήρα να επιστρέψει σε κατάσταση ηρεμίας μετά την έκθεση σε ρυπογόνα.

### 5.1.4 Υπολογισμοί

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές που εμφανίζει ο μετρητής δεν αντιπροσωπεύουν κάποια μονάδα μέτρησης όπως το ppm (Parts Per million). Για την εξαγωγή μετρήσιμων μεγεθών είναι αναγκαία η ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων, που θα συμβάλουν στην καλύτερη λειτουργία του MQ-135 και στην αποτύπωση ακριβέστερων μετρήσεων.

Παρακάτω παρέχεται σχήμα το οποίο αποτυπώνει την συνδεσμολογία του συστήματος. Για το σχηματισμό των μαθηματικών μοντέλων, πρέπει πρώτα να γίνει ο υπολογισμός μεγεθών που κρίνονται απαραίτητα για τη δημιουργία των μαθηματικών μοντέλων. Τα μεγέθη γίνονται ευδιάκριτα στο παρακάτω σχήμα;



Σχήμα 11: Συνδεσμολογία κυκλώματος[45].

- Η τάση τροφοδοσίας από το Arduino:

$$V_{supply} = 5V \pm 0.1V \quad (1)$$

- Η αναλογική τάση εξόδου του αισθητήρα:

$$V_{out} = 3.10V$$

Η αναλογική τάση εξόδου δεν αποτελεί σταθερό μέγεθος, καθώς επηρεάζεται από την λειτουργία του MQ-135. Για την επίτευξη του στόχου, δηλαδή τη μετατροπή των τιμών του αισθητήρα σε υπολογίσιμα μεγέθη, θα χρησιμοποιηθεί η παραπάνω τιμή. Η τιμή των 3.10V επιλέχθηκε μετά από δοκιμαστικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε χώρο δωματίου, χρησιμοποιώντας τον μέσο όρο των μετρήσεων, συγκεκριμένα για την αναλογική τάση εξόδου.

- Η αντίσταση του αισθητήρα ( $R_S$ ) και η αντίσταση φορτίου  $R_{load}$ :

$$R_S = \frac{(V_{supply} - V_{out}) \times R_{load}}{V_{out}} \quad (2)$$

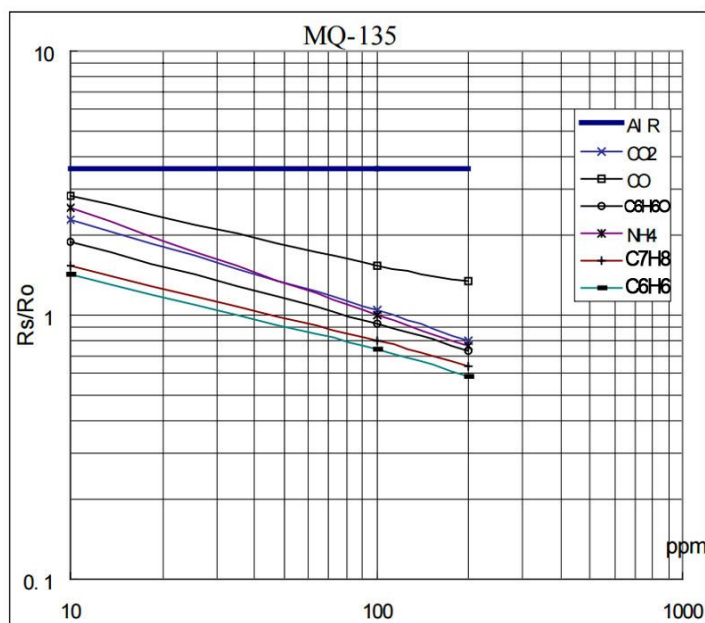
Όπως προαναφέρθηκε, το συγκεκριμένο μοντέλο του MQ-135 διαθέτει εσωτερική αντίσταση που ανέρχεται στα 1 kΩ. Για την επίτευξη ορθών μετρήσεων κρίθηκε απαραίτητη η εισαγωγή αντίστασης 10 kΩ στο κύκλωμα. Για την απλοποίηση των μετρήσεων, ο σχηματισμός των εξισώσεων έγινε με δεδομένη την παρουσία εσωτερικής αντίστασης η οποία ανέρχεται στα 10 kΩ:

$$R_O = R_{O(measured)} \times \frac{R_{L(10k\Omega)}}{R_{L(1k\Omega)}} = 3.31k\Omega \times \frac{10k\Omega}{1k\Omega} = 3.31k\Omega \times 10\Omega = 33.1k\Omega \quad (3)$$

- Τέλος, γίνεται ο υπολογισμός του λόγου των αντιστάσεων  $R_S$  και  $R_O$ :

$$\frac{R_S}{R_O} = \frac{6.13k\Omega}{33.1k\Omega} = 0.185 \quad (4)$$

Με την ολοκλήρωση των παραπάνω υπολογισμών και με την αξιοποίηση του γραφήματος συμπεριφοράς των αερίων, το οποίο είναι διαθέσιμο στο Datasheet του αισθητήρα, είναι εφικτός ο σχηματισμός των εξισώσεων. Το γράφημα που παρουσιάζεται στη συνέχεια είναι λογαριθμικό και αποτυπώνει τη κλίση του κάθε μετρήσιμου, από τον MQ-135, μεγέθους.



Σχήμα 12: Λογαριθμικό διάγραμμα συγκέντρωσης αερίων για το MQ-135 [42].

## 5.2 Βαθμονόμηση

Όπως προαναφέρθηκε, ο MQ-135 αδυνατεί να ξεχωρίσει τα μεγέθη, δηλαδή τα ρυπογόνα αέρια, στα οποία εκτίθεται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Το γεγονός αυτό καθιστά τον MQ-135 επιρρεπή σε λανθάνουσες μετρήσεις. Για την αποφυγή λανθασμένων μετρήσεων είναι απαραίτητη η βαθμονόμηση του αισθητήρα, με τη χρήση αερίου γνωστής περιεκτικότητας.

Η βαθμονόμηση αποτελεί κρίσιμη διαδικασία για την αξιοπιστία των μετρήσεων του MQ-135. Συνήθως, η πρακτική που εφαρμόζεται βασίζεται στον ορισμό της  $R_O$ , σύμφωνα με το Datasheet [42] του αισθητήρα, ως την αντίσταση του αισθητήρα σε καθαρό αέρα, στον οποίο περιέχεται 100 ppm αμμωνίας στους 20 °C.

Ο παραπάνω ορισμός προσφέρει την κανονικοποίηση της διακύμανσης μεταξύ των μετρήσιμων μεγεθών και την εφαρμογή της εξίσωσης 5 με ακρίβεια. Ωστόσο, τα διάφορα ρυπογόνα αέρια προκαλούν διαφορετική μεταβολή της αντίστασης  $R_S$  και η χρήση μίας ενιαίας τιμής για την αντίσταση

$R_o$ , την τιμή της αντίστασης σε καθαρό αέρα, βαθμονομημένης για  $NH_3$  μπορεί να προκαλέσει παραμόρφωση στις μετρήσεις των υπόλοιπων ρυπογόνων αερίων.

Για την αποφυγή της παραμόρφωσης εφαρμόζεται η διατήρηση της  $R_o$  για την  $NH_3$  αλλά και κλιμακωτές τιμές  $R_o$ , συγκεκριμένα για κάθε αέριο με βάση εμπειρικές μελέτες και τεχνικές προσαρμογής της καμπύλης ευαισθησίας [46].

Η υλοποίηση της παραπάνω στρατηγικής προσφέρει την διατήρηση της ακρίβειας της βαθμονόμησης της  $NH_3$ , ενώ παράλληλα αποκαθιστά τη ρεαλιστική συμπεριφορά του αισθητήρα, βελτιστοποιώντας την συνολική απόδοση του συστήματος.

Για την επίτευξη της βαθμονόμησης, ο αισθητήρας τοποθετήθηκε σε ελεγχόμενο περιβάλλον, πιο συγκεκριμένα σε ένα γυάλινο δοχείο, και στη συνέχεια εκτέθηκε σε αέριο γνωστής περιεκτικότητας. Το αέριο αποκτήθηκε από τοπικό φαρμακείο σε μορφή υδατικού διαλύματος αμμωνίας. Το υδατικό διάλυμα που χρησιμοποιήθηκε για τη βαθμονόμηση είχε μέγεθος 800 ml και περιεκτικότητα 24-26% w/w.

Όπως διατυπώθηκε προηγουμένως, ο MQ-135 δεν μπορεί να ξεχωρίσει ποιο αέριο μετράει κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι επιρρεπής σε λανθασμένες μετρήσεις, εάν δεν προηγηθεί βαθμονόμηση. Δυστυχώς δεν υπάρχει επίσημη καταγραφή αυτών των τιμών. Κάθε έγγραφο και κάθε τεχνικός τα υπολογίζει εκ νέου. Αυτό συμβαίνει διότι κάθε συνθήκη πειράματος ή αισθητήρα, καθώς και μοντέλο υπολογισμού, διαφέρει ανά περίπτωση. Επομένως, ο σωστός τρόπος υπολογισμού περιλαμβάνει βαθμονόμηση ως προς ένα μετρήσιμο μέγεθος, ώστε να λειτουργήσει ο αισθητήρας MQ-135 ορθά.

Για να γίνει αποτελεσματικά η βαθμονόμηση, ο αισθητήρας MQ-135 πρέπει να τοποθετηθεί σε ελεγχόμενο περιβάλλον, όπως για παράδειγμα μέσα σε ένα γυάλινο δοχείο. Στη συνέχεια, πρέπει να εκτεθεί σε ένα από τα μετρήσιμα αέρια με γνωστή περιεκτικότητα. Για αυτό το πείραμα αποκτήθηκε 800ml διάλυμα αμμωνίας από το τοπικό φαρμακείο. Το συγκεκριμένο υδατικό διάλυμα έχει περιεκτικότητα 24-26% w/w.

Για την έναρξη της βαθμονόμησης χρησιμοποιήθηκε κόμματι από βαμβάκι βρεγμένο με 1 ml διάλυμα αμμωνίας. Στη συνέχεια, ο αισθητήρας προθερμάθηκε για 24 ώρες, ούτως ώστε να επιτευχθούν τα βέλτιστα αποτελέσματα. Επιπλέον, κρίνεται αναγκαία η χρήση ενός γυάλινου δοχείου, μέσα στο οποίο τοποθετείται το εμποτισμένο βαμβάκι και ο αισθητήρας MQ-135.

Ύστερα από την εξαγωγή τιμών σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα, ακολουθεί η αξιοποίηση των τιμών στον υπολογισμό των σταθερών  $\alpha$  και  $\beta$ , των οποίων οι τιμές διαφέρουν για κάθε υπολογίσιμο αέριο. Οι σταθερές  $\alpha$  και  $\beta$  αφορούν το σχήμα 12 το οποίο είναι λογαριθμικό και αντιπροσωπεύουν ένα σημείο πάνω στην καμπύλη του κάθε αερίου και την κλίση της γραμμής αντιστοίχως. Η παρακάτω εξίσωση επιτρέπει τον υπολογισμό των ppm για την αμμωνία:

$$PPM = a \times \left(\frac{R_s}{R_o}\right)^b \quad (5)$$

Όπου  $R_s$ : Η αντίσταση του αισθητήρα συγκεκριμένα για την αμμωνία.

Επειδή το γράφημα του σχήματος 11 είναι λογαριθμικό, η παραπάνω εξίσωση παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$\log(R_s) = \log(A) + B \times \log(ppm) \quad (6)$$

Στη συνέχεια χρησιμοποιείται η εξίσωση της ευθείας γραμμής:

$$Y = mX + C \quad (7)$$

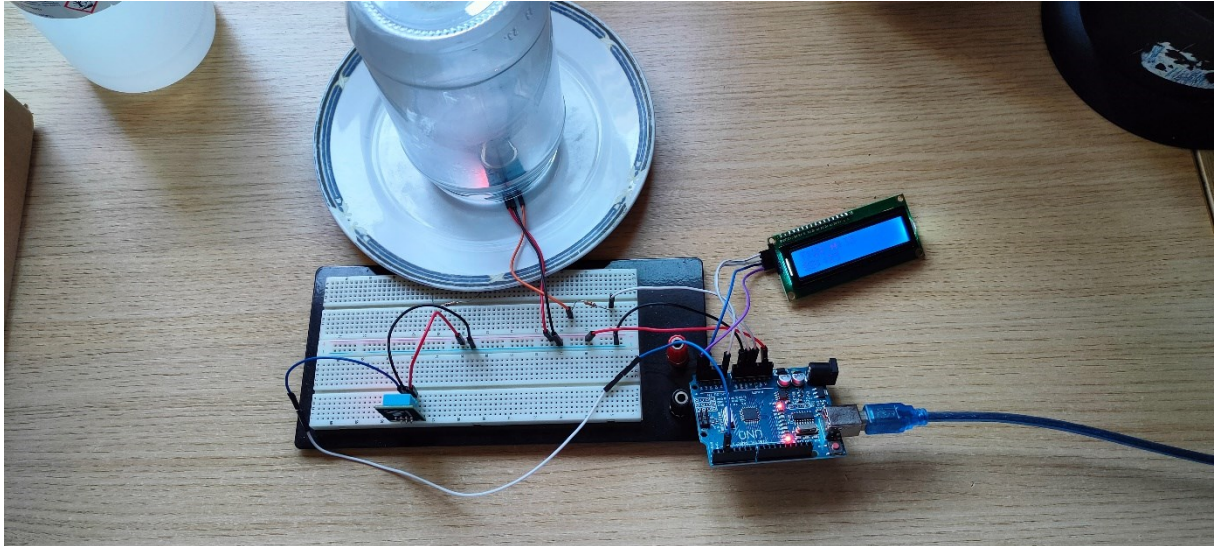
Όπου:

- $Y = \log(R_s)$
- $X = \log(ppm)$
- $m = B$  (κλίση)
- $C = \log(a)$

Στη συνέχεια πραγματοποιείται η επιλογή μεταξύ δυο στιγμών μέτρησης για να οριστούν τα:  $ppm_1$ ,  $ppm_2$ ,  $R_s1$ ,  $R_s2$

### 5.3 Αποτελέσματα Πειραμάτων

Το πείραμα διεξήχθη ύστερα από την απαραίτητη διάρκεια προθέρμανσης του αισθητήρα. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε η τοποθέτηση του αισθητήρα μέσα σε γυάλινο δοχείο περιεκτικότητας 720ml, στο οποίο τοποθετήθηκε βαμβάκι με 2-3 ml αμμωνίας για την πρώτη μέτρηση και 5-6 ml αμμωνίας για τη δεύτερη μέτρηση. Έτσι επιτυγχάνεται η επίλυση της παραπάνω εξίσωσης ως προς τα δύο αποτελέσματα μέτρησης.



Εικόνα 15: Διαδικασία βαθμονόμησης.



Εικόνα 16: Ένδειξη βαθμονόμησης.

### 5.3.1 Πείραμα 1

Στην πρώτη μέτρηση έχουμε το εξής αποτέλεσμα:

- $R_{s1} = 3.49 \text{ k}\Omega$
- $R_o = 2 \text{ k}\Omega$
- $PPM_1 = 387$

Οπότε ο λόγος των αντιστάσεων είναι:

$$\frac{R_{s1}}{R_o(1)} = \frac{3.49k\Omega}{2k\Omega} = 1.74 \quad (8)$$

### 5.3.1 Πείραμα 2

Στην δεύτερη μέτρηση παρατηρούμε τις εξής τιμές:

- $R_{s2} = 1.48k\Omega$
- $R_o = 2 k\Omega$
- $ppm_2 = 650$

Οπότε ο δεύτερος λόγος αντιστάσεων φτάνει την τιμή:

$$\frac{R_{s2}}{R_o(2)} = \frac{2.04k\Omega}{2k\Omega} = 1.015 \quad (9)$$

## 5.4 Εξαγωγή Μαθηματικών Μοντέλων Υπολογισμού Μεγεθών

Γνωρίζοντας πλέον τα απαραίτητα μεγέθη, είναι εφικτό να διαμορφωθούν εξισώσεις για τον σχηματισμό μαθηματικών μοντέλων, με στόχο τον υπολογισμό των απαραίτητων μεγεθών, τα αποτελέσματα των οποίων θα εφαρμοστούν στον νέο κώδικα. Συμπερασματικά, η τελική μορφή του κώδικα θα περιλαμβάνει τον υπολογισμό του ppm για όλα τα αέρια που ανιχνεύει ο αισθητήρας MQ-135. Ο υπολογισμός της αμμωνίας και των σταθερών A και B που τη συνοδεύουν επιτυγχάνεται με:

$$Slope B = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{\log(ppm_2) - \log(ppm_1)}{\log\left(\frac{R_{s2}}{R_o}\right) - \log\left(\frac{R_{s1}}{R_o}\right)} = \frac{\log(417) - \log(387)}{\log(10.15) - \log(1.745)} = \frac{2.620 - 2.588}{0.0065 - 0.241} = -0.136 \quad (10)$$

Στη συνέχεια λύνουμε ως προς A:

$$\log\left(\frac{R_{s1}}{R_{s2}}\right) = \log(A) + B \times \log(ppm) \quad (11)$$

$$A = \frac{ppm_1}{\left(\frac{R_{s1}}{R_o}\right)^B} = \frac{387}{(1.745)^{-0.136}} = \frac{387}{0.866} = 447$$

Χρησιμοποιώντας τις τιμές A και B, είναι εφικτή η επίλυση ως προς την πραγματική τιμή του ppm για την αμμωνία:

$$PPM = a \times \left(\frac{R_{s1}}{R_o}\right)^b = 447 \times \left(\frac{3.49}{2}\right)^{-0.136} = 447 \times 0.927 = 414 \quad (12)$$

$$ppm = \left(\frac{2.04}{1.48 - 26}\right)^{\frac{-1}{0.453}} = 242.02$$

#### 5.4.1 Διοξείδιο του Άνθρακα (CO2)

Όπως και με την αμμωνία, επιλέγονται δυο σημεία από το γράφημα. Στη συνέχεια, οι τιμές τροποποιούνται σε λογαριθμική μορφή, ώστε να επιτευχθεί η διαμόρφωση του μαθηματικού μοντέλου που αφορά το διοξείδιο του άνθρακα.

Πίνακας 6: Στοιχεία για το μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού για το CO2

ppm	Rs/Ro	log(ppm)	log(Rs/Ro)
350	3.6	2.544	0.556
1000	2.0	3.0	0.301

Αφού έγινε η επιλογή των σημείων, πραγματοποιείται επίλυση ως προς τα B και A:

$$B = \frac{0.301 - 0.556}{3 - 2.544} = \frac{-0.255}{0.456} = -0.559 \quad (13)$$

$$\log(A) = 0.556 - (-0.559) \times 2.544 = 0.556 + 1.422 = 1.978 \quad (14)$$

$$A = 10^{1.978} = 95$$

Συνεπώς, το μοντέλο υπολογισμού ppm για το CO2 παίρνει τη εξής μορφή:

$$\frac{R_s}{R_o} = 95 \times ppm^{-0.559} \quad (15)$$

$$ppm = \left(\frac{R_s}{R_o} \div 95\right)^{\frac{1}{-0.559}}$$

### 5.4.2 Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO)

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για την διαμόρφωση μαθηματικού μοντέλου υπολογισμού της περιεκτικότητας του CO<sub>2</sub>. Συγκεκριμένα, επιλέγονται 2 σημεία από τη λογαριθμική καμπύλη που αφορά το CO<sub>2</sub> και στη συνέχεια λύνονται οι εξισώσεις:

Πίνακας 7: Στοιχεία για το μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού για το CO

ppm	Rs/Ro	log(ppm)	log(Rs/Ro)
10	2.0	1.0	0.301
100	0.65	2.0	-0.187

Επίλυση ως προς A και B:

$$B = \frac{-0.187 - 0.301}{2 - 1} = \frac{-0.488}{1} = -0.488$$

$$\log(A) = 0.301 - (-0.488) \times 1 = 0.301 + 0.488 = 0.789$$

$$A = 10^{0.789} = 6.15$$

Παρομοίως, το τελικό μοντέλο υπολογισμού του μονοξειδίου του άνθρακα:

$$\frac{R_s}{R_o} = 6.15 \times ppm^{-0.488}$$

$$ppm = \left(\frac{R_s}{R_o} \div 6.15\right)^{-\frac{1}{0.488}}$$

### 5.4.3 Οξείδια του Αζώτου (NO<sub>x</sub>)

Ομοίως, επιλέγονται 2 σημεία από την λογαριθμική καμπύλη του NO<sub>x</sub> και στη συνέχεια λύνονται οι εξισώσεις:

Πίνακας 8: Στοιχεία για το μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού για τα NO<sub>x</sub>

ppm	Rs/Ro	log(ppm)	log(Rs/Ro)
1	6.8	0.0	0.833
10	2.0	1.0	0.301

Υπολογισμός του A και B:

$$B = \frac{0.301 - 0.833}{1 - 0} = \frac{-0.532}{1} = -0.532$$

Λύση ως προς A:

$$\log(A) = 0.833 - (-0.532) \times 0 = 0.833$$

$$A = 10^{0.833} = 6.8$$

Το μοντέλο υπολογισμού των οξειδίων του Αζώτου παίρνει τη μορφή:

$$\frac{R_s}{R_o} = 6.8 \times ppm^{-0.532}$$

$$ppm = \left( \frac{R_s}{R_o} \div 6.8 \right)^{\frac{1}{-0.532}}$$

#### 5.4.4 Ανακεφαλαίωση Τιμών

Σύμφωνα με τους προηγούμενους υπολογισμούς, διαμορφώνεται ο ακόλουθος πίνακας, ο οποίος αποτυπώνει τα αποτελέσματα:

Πίνακας 9: Τιμές παραμέτρων για την βαθμονόμηση του αισθητήρα

Gas	A	B
$NH_3$ : Αμμωνία	447	-0.136
$CO_2$ : Διοξείδιο του Άνθρακα	95	-0.559
CO: Μονοξείδιο του Άνθρακα	6.15	-0.488
$NO_x$ : Οξείδια του Αζώτου	6.8	-0.532

#### 5.4.5 Σωματίδια PM2.5 και PM10

Τα PM2.5 και PM10 δεν αποτελούν πραγματικά αέρια, αλλά συγκέντρωση σωματιδίων στον αέρα με συγκεκριμένη διάμετρο. Τα PM10 σωματίδια έχουν διάμετρο 10 μικρόμετρα ή λιγότερο και αντιστοίχως τα PM2.5 έχουν διάμετρο 2.5 μικρόμετρα ή λιγότερο. Έτσι ο MQ-135 δεν μπορεί να τα υπολογίσει με ακρίβεια. Στην πράξη, όμως, η παρουσία των σωματιδίων θα συνοδεύεται από αλλαγή στον λόγο των αντιστάσεων  $R_s$  και  $R_o$ . Στην προκειμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε το AQI (Air Quality Index) για να τοποθετηθεί η μέτρηση των αντιστάσεων ανά επίπεδο ποιότητας του αέρα, όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 10: Πίνακας υπολογισμού Air Quality

Rs/Ro Range	Estimated AQI	Air Quality
> 2.0	0-50	Good
1.5–2.0	50-100	Moderate
1.0–1.5	100-150	Unhealthy for sensitive groups
0.5–1.0	150-200	Unhealthy
< 0.5	>200	Very Unhealthy

#### 5.5 Ολοκλήρωση του Κώδικα

Χάρη στη δημιουργία των παραπάνω μαθηματικών μοντέλων για τον υπολογισμό των βλαβερών αερίων, και τη χρήση του AQI για τον καθορισμό των σωματιδίων, είναι εφικτός ο σχηματισμός της τελικής μορφής του κώδικα του Arduino. Πρώτα, όμως, θα χρησιμοποιηθεί ο κώδικας για τη βαθμονόμηση του συστήματος, ώστε να εφαρμοστεί η νέα βαθμονόμηση πριν από την εφαρμογή των μαθηματικών μοντέλων και την παράθεση εξηγήσεων στη λειτουργία του κώδικα.

### 5.5.1 Κώδικας Βαθμονόμησης

Ο κώδικας βαθμονόμησης που εφαρμόζεται για την ολοκλήρωση του πειράματος, έχει διάρκεια 2 λεπτών. Σε αυτό το διάστημα, το Arduino συλλέγει μετρήσεις για την αντίσταση του μετρητή και στη συνέχεια υπολογίζει τον μέσο όρο τους στις 100 μετρήσεις. Τέλος, υπολογίζει το νέο λόγο αντιστάσεων, η τιμή του οποίου αποθηκεύεται στη μνήμη EEPROM, που χρησιμοποιείται στο νέο μοντέλο υπολογισμού. Η μνήμη EEPROM αποτελεί μνήμη του Arduino που συνεχίζει να συγκρατεί την πληροφορία που της δόθηκε και μετά την απενεργοποίηση του. Έτσι, γίνεται εφικτή η μεταφορά των δεδομένων της βαθμονόμησης στο κύριο πρόγραμμα, βελτιστοποιώντας τα αποτελέσματα του πειράματος.

Ακολουθεί η ανάλυση του κώδικα βαθμονόμησης:

```
unsigned long startTime;  
const unsigned long CALIBRATION_DURATION = 2UL * 60UL * 1000UL; // 2 minutes
```

- **startTime:** Αποθηκεύει τη χρονική στιγμή που ξεκινάει η βαθμονόμηση.
- **CALIBRATION\_DURATION:** Ορίζει τη χρονική διάρκεια στην οποία ο αισθητήρας θα συλλέξει μετρήσεις. Σε αυτή την περίπτωση, η διάρκεια είναι 2 λεπτά.

```
void setup() {  
  Serial.begin(9600);  
  delay(2000);  
  Serial.println("Calibrating MQ135 with Ammonia for 2 minutes...");  
  startTime = millis();  
}
```

- Η σειριακή επικοινωνία εκκινείται στα 9600 bps, και εφαρμόζεται καθυστέρηση 2 δευτερολέπτων στην εκκίνηση της καταγραφής, ενώ εκτυπώνεται στην οθόνη το κείμενο που αναγράφεται στην εικόνα.
- **millis():** Επιστρέφει τον χρόνο από τη στιγμή της ενεργοποίησης του Arduino και τον αποθηκεύει στην μεταβλητή “startTime”

```
static float rsTotal = 0;  
static int samples = 0;
```

- **rsTotal και samples:** Γίνεται δήλωση μεταβλητών για το άθροισμα των μετρήσεων της αντίστασης και τον αριθμό των δειγμάτων.

```
if (millis() - startTime < CALIBRATION_DURATION) {  
  int adc = analogRead(MQ135_PIN);  
  float voltage = adc * (5.0 / 1023.0);  
  float Rs = (5.0 - voltage) * RL / voltage;
```

- Πρώτα πραγματοποιείται έλεγχος για το εάν έχει ξεπεραστεί η απαιτούμενη διάρκεια της δειγματοληψίας.
- Στη συνέχεια μετατρέπεται η τιμή της adc σε Τάση χρησιμοποιώντας ως τάση αναφοράς τα 5V.
- Τέλος υπολογίζεται η τιμή της Rs με την εξίσωση του Διαιρέτη τάσης.

```
rsTotal += Rs;
samples++;

Serial.print("ADC: "); Serial.print(adc);
Serial.print(" | Rs: "); Serial.println(Rs, 2);
delay(500);
```

- Γίνεται άθροισμα κάθε μέτρησης στην μεταβλητή της Rs και αύξηση της τιμή των δειγμάτων κατά 1 με κάθε μέτρηση. Ταυτόχρονα, εκτυπώνεται στην οθόνη η τάση και η αντίσταση της κάθε μέτρησης.

```
} else {
float avgRs = rsTotal / samples;
float Ro = avgRs / 3.6;
```

- Με το πέρας των 2 λεπτών δειγματοληψίας, γίνεται ο υπολογισμός του μέσου όρου διαιρώντας με το 3.6, που είναι ο εκτιμώμενος λόγος αντιστάσεων στον καθαρό αέρα με βάση το διάγραμμα του Datasheet.

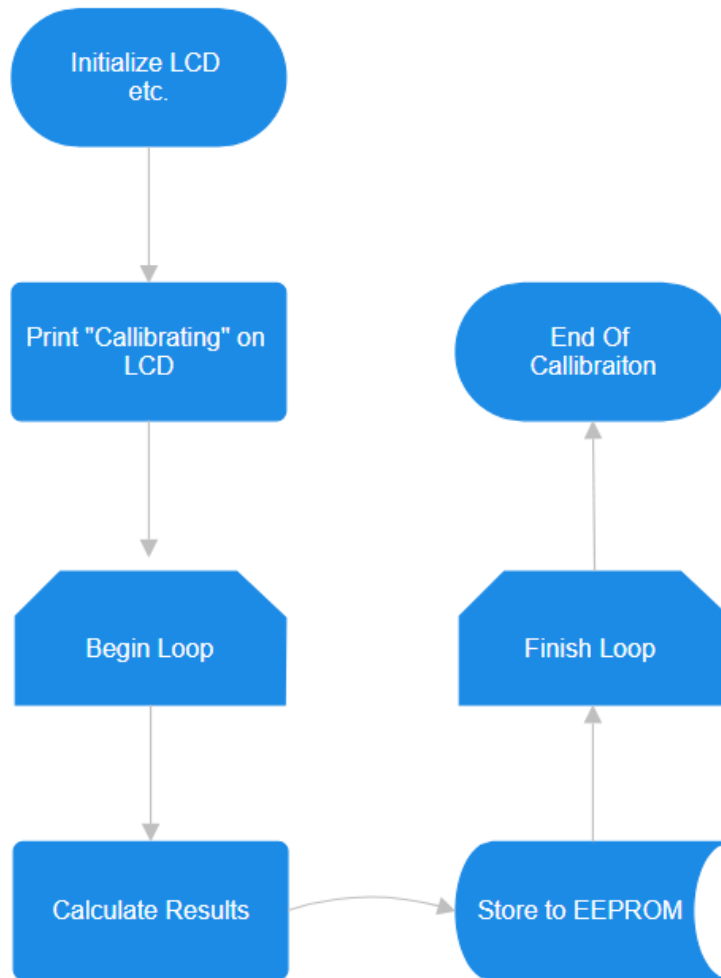
```
EEPROM.put(EEPROM_ADDRESS, Ro);

Serial.println("---- Calibration Complete ----");
Serial.print("Average Rs: "); Serial.println(avgRs, 2);
Serial.print("Calculated Ro: "); Serial.println(Ro, 2);
Serial.println("Ro saved to EEPROM.");

while (true);
}
```

- **“put”**: Τοποθετεί νέα τιμή στην μεταβλητή της EEPROM, εφόσον διαφέρει από την προηγούμενη.
- Εκτυπώνονται τα αποτελέσματα της δειγματοληψίας.

Ακολουθεί το διάγραμμα ροής του προγράμματος Βαθμονόμησης:



Σχήμα 13: Διάγραμμα ροής προγράμματος βαθμονόμησης.

### 5.5.2 Ανάλυση τελικής μορφής κώδικα

Η τελική διαμόρφωση του κώδικα αποσκοπεί:

- Στην εξαγωγή ακριβέστερων τιμών, με τη χρήση φίλτρων που περιορίζουν το σφάλμα της δειγματοληψίας.
- Στην βελτίωση της λογικής της αποτύπωσης των δεδομένων στην LCD οθόνη.

Ακολουθεί η σύντομη επεξήγηση σημαντικών σημείων του κώδικα:

```

const float Ro_NH3 = 4.75;

const float k_CO = 1.8;
const float k_NOx = 1.6;
const float k_CO2 = 0.9;

const float Ro_CO = Ro_NH3 * k_CO;
const float Ro_NOx = Ro_NH3 * k_NOx;
const float Ro_CO2 = Ro_NH3 * k_CO2;

```

- Εφαρμόζεται η βαθμονόμηση της NH3
- Εφαρμόζεται η κλιμάκωση της αντίστασης Ro για τα υπόλοιπα μετρήσιμα μεγέθη

```

void loop() {
  int adc = analogRead(MQ135_PIN);
  float sensorRs = calculateResistance(adc);

```

- Γίνεται ανάγνωση της αναλογικής τιμής του αισθητήρα και η μετατροπή ψηφιακού σε αναλογικό σήμα εξόδου.

```

float ppm_NH3 = calculatePPM(ratio_NH3, a_NH3, b_NH3);
float ppm_CO = calculatePPM(ratio_CO, a_CO, b_CO);
float ppm_NOx = calculatePPM(ratio_NOx, a_NOx, b_NOx);
float ppm_CO2 = calculatePPM(ratio_CO2, a_CO2, b_CO2);

float mg_NH3 = ppm_NH3 * 0.6967;
float mg_CO = ppm_CO * 1.1459;
float mg_NOx = ppm_NOx * 1.8808;
float mg_CO2 = ppm_CO2 * 1.7995;

float pm25 = ppm_NOx * 4.2;
float pm10 = ppm_NOx * 6.9;

```

- Υπολογίζεται το ppm για κάθε μέγεθος, με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων.
- Υπολογίζονται τα PM2.5 και PM10 χρησιμοποιώντας την τιμή του NOx [27].

```

if (millis() - lastScreenSwitch > SCREEN_SWITCH_INTERVAL) {
  lcd.clear();
  switch (currentScreen) {
    case 0:
      lcd.setCursor(0, 0);
      lcd.print("AQI: ");
      lcd.print((int)AQI);
      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.print(AQI_Descriptor);
      break;

```

- “**case 0**”: Αποτελεί το πρώτο σύνολο ενδείξεων στην οθόνη.

- Με την παραπάνω “if”, καθορίζεται η εναλλαγή των συνόλων ενδείξεων που θα εμφανιστούν στην οθόνη.

```
Serial.print("ADC: "); Serial.print(adc);
Serial.print(" | Rs: "); Serial.print(sensorRs, 2); Serial.print(" kΩ");
Serial.print(" | NH3: "); Serial.print(ppm_NH3, 1); Serial.print(" ppm ("); Serial.print(mg_NH3, 1); Serial.print(" mg/m³)");
Serial.print(" | CO: "); Serial.print(ppm_CO, 1); Serial.print(" ppm ("); Serial.print(mg_CO, 1); Serial.print(" mg/m³)");
Serial.print(" | NOx: "); Serial.print(ppm_NOx, 1); Serial.print(" ppm ("); Serial.print(mg_NOx, 1); Serial.print(" mg/m³)");
Serial.print(" | CO2: "); Serial.print(ppm_CO2, 1); Serial.print(" ppm ("); Serial.print(mg_CO2, 1); Serial.print(" mg/m³)");
Serial.print(" | PM2.5: "); Serial.print(pm25, 1);
Serial.print(" | PM10: "); Serial.print(pm10, 1);
Serial.print(" | Temp: "); Serial.print(temperature, 1);
Serial.print(" °C | Hum: "); Serial.print(humidity, 1); Serial.print(" %");
Serial.print(" | AQI: "); Serial.print(AQI, 1); Serial.print(" ("); Serial.print(AQI_Descriptor); Serial.println(")");
```

- Το σύνολο των μεγεθών που θα αναγράφονται στη σειριακή απεικόνιση της οθόνης

```
float calculateResistance(int adc) {
    float voltage = adc * (5.0 / 1023.0);
    return ((5.0 - voltage) * RL) / voltage;
}

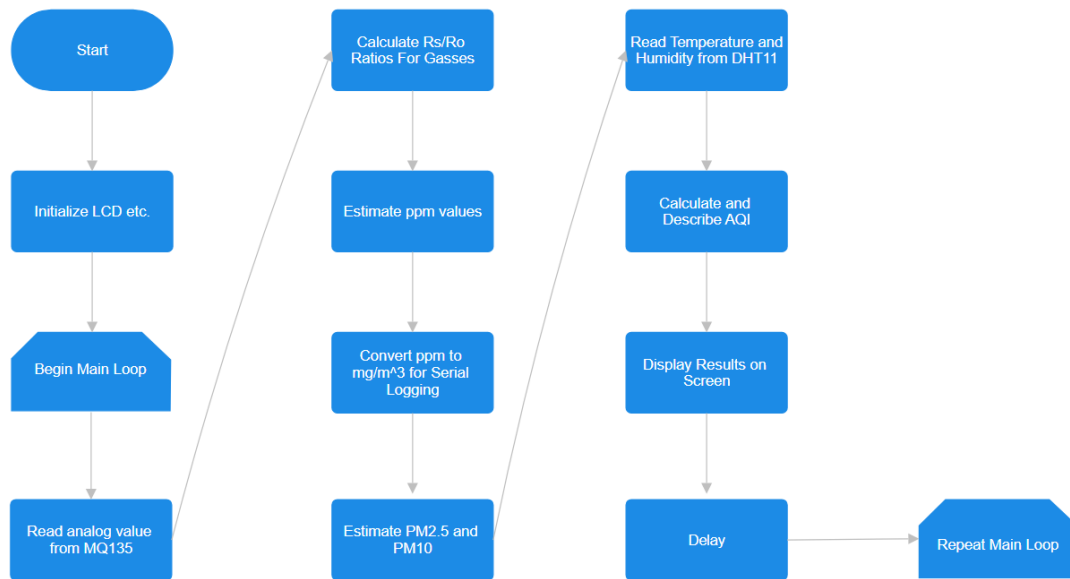
float calculatePPM(float ratio, float a, float b) {
    return a * pow(ratio, b);
}
```

- Υπολογισμός της αντίστασης με την εφαρμογή της εξίσωσης του διαιρέτη τάσης.
- Εφαρμογή της εξίσωσης για τον υπολογισμό του ppm.

```
String describeAQI(float aqi) {
    if (aqi <= 50) return "Good";
    if (aqi <= 100) return "Moderate";
    if (aqi <= 150) return "UnhealthySG";
    if (aqi <= 200) return "Unhealthy";
    if (aqi <= 300) return "VeryUnhealthy";
    return "Hazardous";
}
```

- Η τιμή του AQI συνοδεύεται με σύντομη περιγραφή της ποιότητας του αέρα.

Ακολουθεί το διάγραμμα ροής της τελικής μορφής του κώδικα:



Σχήμα 14: Διάγραμμα Ροής προγράμματος.

## Κεφάλαιο 6ο: Αποτελέσματα

### 6.1 Εισαγωγή

Με την ολοκλήρωση του κώδικα, το σύστημα είναι έτοιμο για περισσότερες δοκιμές και πειράματα. Για την πιστοποίηση των αποτελεσμάτων των μετέπειτα πειραμάτων και μετρήσεων, θα χρησιμοποιηθούν δεδομένα από υπηρεσίες που παρακολουθούν την ποιότητα της ατμόσφαιρας σε καθημερινό επίπεδο. Οργανισμοί, κρατικοί φορείς, αλλά και πανεπιστήμια παρέχουν δεδομένα σχετικά με την ποιότητα του αέρα αξιοποιώντας παρόμοιες ηλεκτρονικές εφαρμογές που τοποθετούνται σε διάφορα σημεία του κόσμου.

Πληροφορίες σχετικά με την περιεκτικότητα διαφόρων κοινών ρυπογόνων αερίων, καιρικών συνθηκών και ποιότητας της ατμόσφαιρας γίνονται ευρέως διαθέσιμες. Μερικές φορές, ακόμα και συνεργατικά, μοιράζοντας τις πληροφορίες που παράγουν οι διάφοροι σταθμοί παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, οι παραπάνω φορείς και οργανισμοί έρχονται σε θέση να παράξουν το δικό τους συμπέρασμα αξιοποιώντας τα δεδομένα της επιλογής τους.

Για την επίτευξη του στόχου της παρούσας εργασίας θα αξιοποιηθούν τα δεδομένα μερικών από τους γνωστούς φορείς που εδρεύουν στη Θεσσαλονίκη. Συγκεκριμένα, ο σταθμός που βρίσκεται στην περιοχή της Αγίας Σοφίας φαίνεται να αξιοποιείται από πολλούς φορείς. Η αφθονία σε υπηρεσίες που αξιοποιούν τον σταθμό αυτό παρέχει τη δυνατότητα της σύγκρισης των αποτελεσμάτων των μετρήσεων με πληθώρα πηγών. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στους οργανισμούς που θα αξιοποιηθούν για την πιστοποίηση των τιμών.

Το OpenAQ ιδρύθηκε το 2005 από την Christa Hasenkorf και την ομάδα της [43]. Είναι ένας μη κερδοσκοπικός οργανισμός με στόχο τη δημιουργία της πρώτης, στον κόσμο, βάσης δεδομένων ανοιχτού κώδικα για μετρήσεις σχετικές με την ποιότητα του αέρα. Η πλατφόρμα του συλλέγει δεδομένα τόσο από κυβερνητικούς μετρητές όσο και από αισθητήρια χαμηλού κόστους, που χρησιμοποιούνται από ερευνητικά ιδρύματα, κυβερνήσεις, ακόμα και από ιδιώτες.

Η πλατφόρμα ανοιχτών δεδομένων που χαρακτηρίζει το OpenAQ δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να αναζητήσουν δεδομένα ποιότητας του αέρα σε πραγματικό χρόνο και παράλληλα υποστηρίζει την αποθήκευση ιστορικών δεδομένων που καλύπτουν μετρήσεις μεγάλης χρονικής διάρκειας.

Το OpenAQ υποστηρίζει σταθμούς παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα σε όλο τον κόσμο. Μεγάλο τμήμα της κάλυψης του περιλαμβάνει την Ευρώπη και, σε τοπικό επίπεδο, υποστηρίζει την Θεσσαλονίκη με 3 σταθμούς παρακολούθησης. Σε συνεργασία με τοπικές έρευνες που διεξάγονται από ιδρύματα όπως το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης έχει τη δυνατότητα να παράγει αποτελέσματα που συμβάλουν στην εξαγωγή συμπερασμάτων για την ποιότητα του αέρα της εκάστοτε περιοχής.

Το OpenAQ επικεντρώνεται στους κοινούς ατμοσφαιρικούς ρύπους που παρακολουθούνται από τους σταθμούς, όπως τα σωματίδια PM10 και PM2.5, αλλά και το διοξείδιο του αζώτου και το μονοξείδιο του άνθρακα. Επιπλέον, συλλέγει πληροφορίες μετεωρολογικών παραμέτρων όπως τη θερμοκρασία και την υγρασία.

Συνεπώς, με όλα τα παραπάνω σε συνδυασμό με την ανοιχτού τύπου πλατφόρμα, συγκεντρώνει σημαντικά δεδομένα για την παρακολούθηση της ατμόσφαιρας, τα οποία έχουν επιτρέψει σε επιστήμονες και δημόσιες υπηρεσίες να δημοσιεύσουν πορίσματα και μελέτες με διακρίσεις σε διεθνή επίπεδο.

Παρόμοιες υπηρεσίες παρέχει και η IQAir, μια ιδιωτική εταιρία η οποία ιδρύθηκε από τους Manfred και Klaus Hammes στη Γερμανία το 1963 με τωρινή έδρα την Ελβετία. Αρχικά, η IQAir αποτελούσε εταιρία παροχής συστημάτων διήθησης αέρα σε εσωτερικούς χώρους. Με την πάροδο του χρόνου ανέπτυξε και αυτή την τεχνολογία παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα παρέχοντας πληθώρα πληροφοριών στους χρήστες των προϊόντων της. Το 2018 ανέπτυξε πλατφόρμα, αντίστοιχη της OpenAQ, για την συλλογή δεδομένων παρακολούθησης του αέρα με όνομα AirVisual [44].

Ομοίως με το OpenAQ [43], το Air Visual συγκεντρώνει πληροφορίες τόσο από τα προϊόντα της ίδιας της εταιρίας αλλά και από κυβερνητικούς σταθμούς και μετρητές χαμηλού κόστους. Σημαντικό πλεονέκτημα του όμως είναι η μοντελοποίηση των δεδομένων που συλλέγει, με αποτέλεσμα την ικανότητα να προσφέρει εκτίμηση της ποιότητας του αέρα, συνδυάζοντας πολλές πηγές, προκειμένου να εκτιμήσει την ποιότητα του αέρα σε περιοχές με χαμηλή κάλυψη σταθμών και συσκευών παρακολούθησης ποιότητας του αέρα.

## 6.2 Νέο Πείραμα

Ανιχνεύοντας τον σταθμό που υποστηρίζεται από τους περισσότερους φορείς, το νέο πείραμα διεξήχθη στην Θεσσαλονίκη, από τις 12:00 μέχρι τις 14:00, κοντά στην Αγία Σοφία όπου βρίσκεται ο σταθμός με την μεγαλύτερη υποστήριξη. Με την αξιοποίηση των ευρημάτων των IQair και OpenAQ θα γίνει η εξέταση της ακρίβειας των τιμών που συλλέχτηκαν από το σύστημα.

Οι τιμές που συλλέγονται από το σύστημα είναι σε ppm, ενώ οι μετρήσεις των σταθμών γίνονται σε  $mg/m^3$  και αποτυπώνονται ανά ώρα. Επομένως, θα γίνουν μετατροπές στις ακόλουθες τιμές για να γίνει ορθά η σύγκριση.

## 6.3 Καιρικές Συνθήκες

Η αποτύπωση της θερμοκρασίας και της υγρασίας έγιναν με την χρήση του αισθητήρα DHT-11. Συγκεκριμένα οι καιρικές συνθήκες που παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων περιλαμβάνουν συννεφία και ελαφρία, μικρής διάρκειας, βροχόπτωση.

Πίνακας 11: Θερμοκρασία και Υγρασία.

Temperature in °C				Humidity in Percentage		
Time	System	IQair	Difference in %	System	IQair	Difference in %
12:00	30	28	+7.14	48	50	-4.00
13:00	30.8	29	+6.21	28	30	-6.67
14:00	27	27	0.00	37	40	-7.5

Από τον παραπάνω πίνακα γίνεται αντιληπτό ότι υπάρχουν μικρές αποκλίσεις στις ενδείξεις της θερμοκρασίας και της υγρασίας. Οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται στην ποιότητα μέτρησης του DHT-11 και στην τοποθεσία που έγιναν οι μετρήσεις του συστήματος και του σταθμού.

## 6.4 Μονοξείδιο του άνθρακα

Για τη μετατροπή της ένδειξης του μονοξειδίου του άνθρακα εφαρμόζεται εξίσωση μετατροπής του μεγέθους ppm σε  $mg/m^3$ :

$$\frac{mg}{m^3} = ppm \times M/22.45 \quad (16)$$

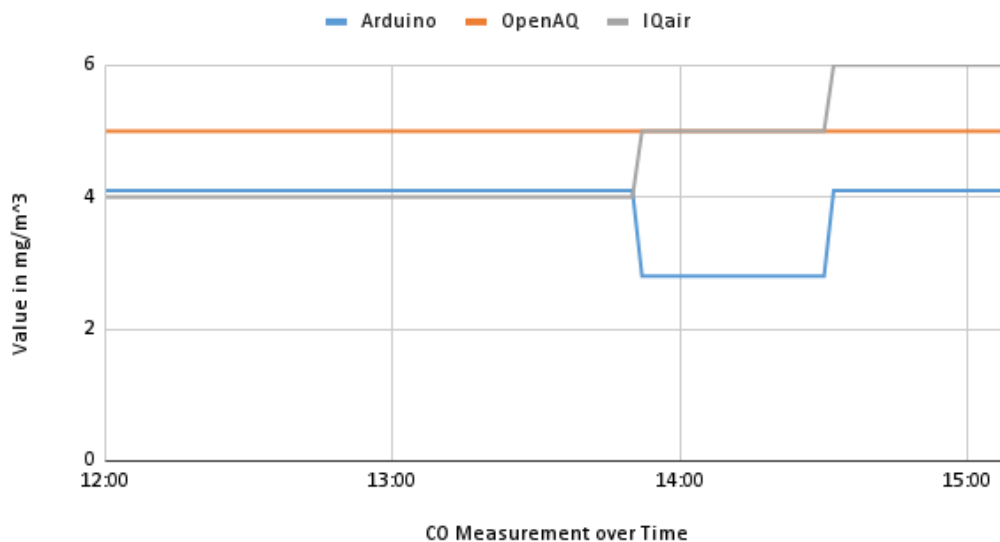
Όπου M η μοριακή μάζα του κάθε αερίου. Για το μονοξείδιο του άνθρακα  $M = 28.01 \text{ g/mol}$ .

Πίνακας 12: Μονοξείδιο του άνθρακα.

CO in mg/mm <sup>3</sup>			
Time	System	OpenAQ	IQair
12:00	4.1	5	4
13:00	3	5	5
14:00	4.1	5	6

Στη μέτρηση του διοξειδίου του άνθρακα γίνεται διακριτό ότι παρόλο που οι φορείς δείχνουν όμοιες μετρήσεις, ο MQ-135 παρουσιάζει αρκετή απόκλιση και αυξομειώση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η εμβέλεια μέτρησης του MQ-135 είναι πολύ μικρότερη από μίας εξειδικευμένης και υψηλότερου κόστους συσκευής

Arduino, OpenAQ and IQair



Σχήμα 15: Γράφημα Σύγκρισης Τιμών CO

## 6.5 Οξείδια του Αζώτου

Αντιστοίχως η μοριακή μάζα του διοξειδίου του αζώτου είναι 46.01 g/mol.

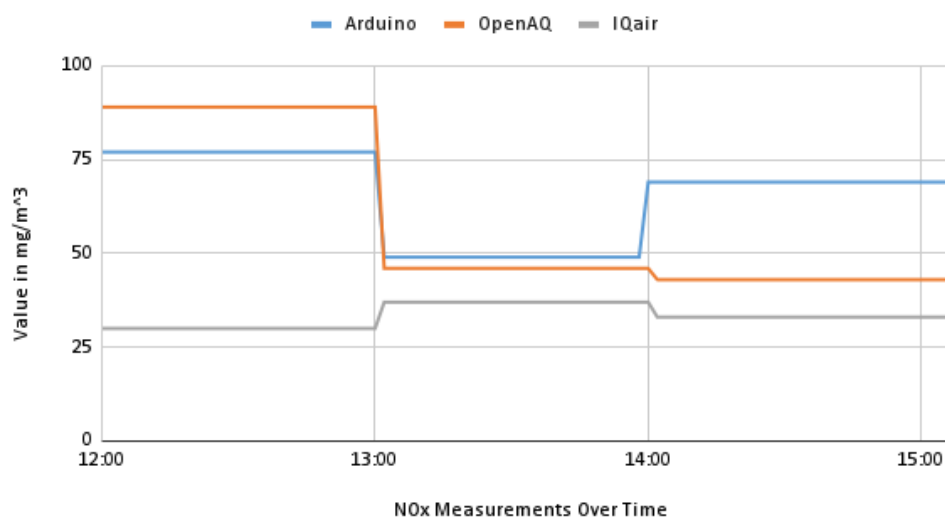
Πίνακας 13: Οξείδια του αζώτου.

NOx in mg/mm <sup>3</sup>			
Time	System	OpenAQ	IQair
12:00	77	89	30
13:00	49	46	37

14:00	69	43	33
-------	----	----	----

Στον παραπάνω πίνακα γίνεται αισθητό το μειονέκτημα του MQ-135, καθώς χρειάζεται χρόνο προθέρμανσης για την βέλτιστη απόδοση του. Οι παραπάνω αποκλείσεις οφείλονται στο γεγονός ότι δεν υπήρξε επαρκής χρόνος προθέρμανσης. Γίνεται, όμως, εξίσου αντιληπτό ότι εντός μερικών ωρών ο MQ-135 πλησιάζει τις τιμές των υπηρεσιών στην εκτίμηση του για την περιεκτικότητα του μονοξειδίου του άνθρακα.

Arduino, OpenAQ and IQair



Σχήμα 16: Γράφημα Σύγκρισης Τιμών NOx

## 6.6 PM2.5

Το σύστημα εκτιμάει την περιεκτικότητα των σωματιδίων PM2.5 στην ίδια μονάδα μέτρησης, αλλά σε διαφορετική κλίμακα. Έτσι:

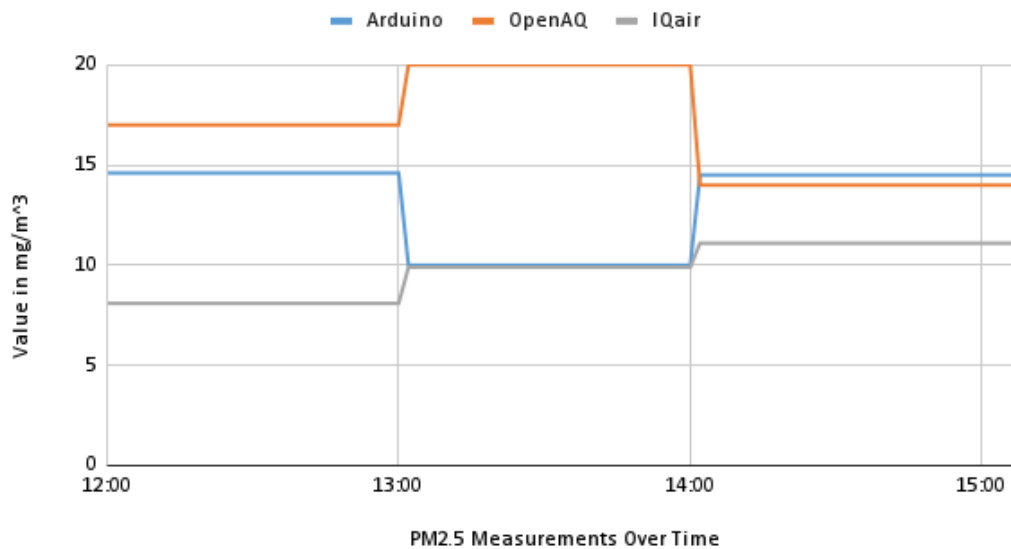
$$mg/m^3_{PM2.5} = \mu g/m^3 \div 1000 \quad (17)$$

Πίνακας 14: PM2.5.

PM2.5			
Time	System	OpenAQ	IQair
12:00	14.6	17	8.1
13:00	10	20	9.9
14:00	14.5	14	11.1

Από τον παραπάνω πίνακα γίνεται αντιληπτό ότι η μέτρηση των σωματιδίων PM2.5 εμφανίζει διαφορά ανάμεσα στις πηγές μετρήσεων που εξετάστηκαν, με τον MQ-135 να πλησιάζει τη μια από τις δυο ενδείξεις σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Οι παραπάνω αποκλίσεις οφείλονται στο γεγονός ότι τα σωματίδια PM2.5 δεν αποτελούνται από αποκλειστικά ένα είδος ρυπογόνων αερίων, αλλά από πολλά διαφορετικά, ανάλογα με το μέγεθος σωματιδίου του κάθε αερίου. Έτσι, η κάθε μέτρηση γίνεται είτε από εξειδικευμένους αισθητήρες, είτε από εκτιμήσεις με βάση ένα σύνολο αερίων, όπως εφαρμόζεται στο σύστημα αυτό.

### Arduino, OpenAQ and IQair



Σχήμα 17: Γράφημα Σύγκρισης Τιμών PM2.5

## 6.7 PM10

Όμοια με τα σωματίδια PM2.5, το σύστημα εκτιμά την περιεκτικότητα των σωματιδίων PM10, στην ατμόσφαιρα στην ίδια μονάδα μετρήσεων, αλλά σε διαφορετική κλίμακα:

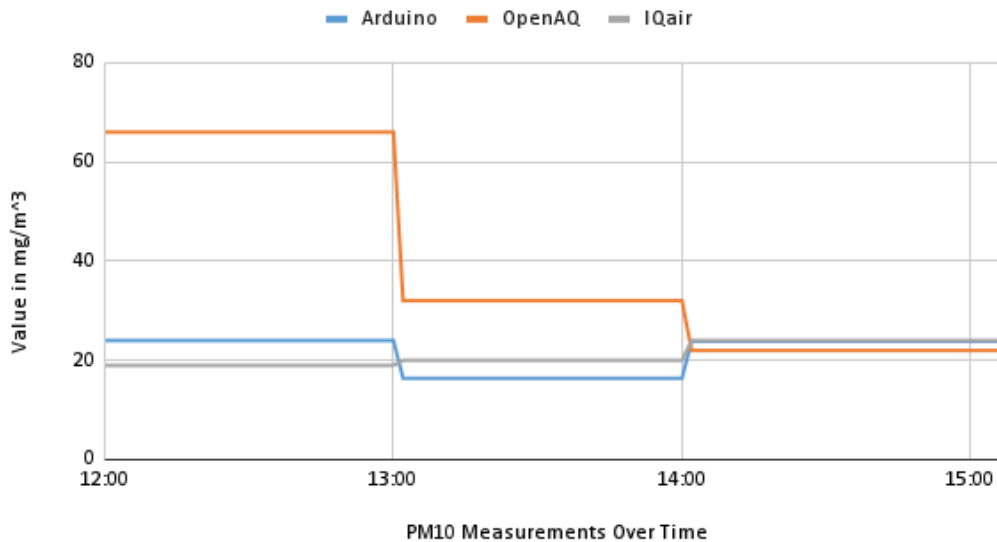
$$mg/m^3_{PM10} = \mu g/m^3 \div 1000 \quad (18)$$

Πίνακας 15: PM 10.

PM10			
Time	System	OpenAQ	IQair
12:00	24	66	19
13:00	16.4	32	20
14:00	23.8	22	24

Για άλλη μία φορά γίνεται αισθητή η απόκλιση του MQ-135, αλλά και των δυο υπηρεσιών μεταξύ τους, με το OpenAQ να εμφανίζει την μεγαλύτερη τιμή σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η περιεκτικότητα των σωματιδίων PM10 στην ατμόσφαιρα εκτιμάται με τον ίδιο τρόπο, όπως την εκτίμηση των σωματιδίων PM2.5. Δηλαδή, με εξειδικευμένες συσκευές μέτρησης ή με εκτίμηση με βάση τη διάμετρο των σωματιδίων των ρυπογόνων αερίων.

### Arduino, OpenAQ and IQair



Σχήμα 18: Γράφημα Σύγκρισης Τιμών PM10

## 6.8 Δείκτης AQI

Ο δείκτης AQI δεν έχει σταθερή μονάδα μέτρησης αλλά αποτελεί μια ένδειξη που συνδυάζει τις τιμές των μετρήσεων που παρέχονται. Στην παρούσα εφαρμογή, για την αποτύπωση του AQI χρησιμοποιήθηκαν όλες οι τιμές των μετρήσιμων μεγεθών.

Πίνακας 16: Δείκτης Ποιότητας του Αέρα.

AQI				
Time	System	OpenAQ	IQair	Difference in %
12:00	85	-	43	+97.67
13:00	84.3	-	45	+87.33
14:00	84.1	-	53	+58.68

Είναι φανερό ότι η τιμή του AQI παραμένει σχετικά σταθερή και για τις δυο πηγές τιμών. Η υψηλή απόκλιση οφείλεται στη χρήση εξειδικευμένων συσκευών μέτρησης και υπολογισμού που διαθέτει ο

σταθμός ελέγχου της ποιότητας του αέρα της περιοχής της Αγίας Σοφίας, που του επιτρέπει να παράξει μια καλύτερη εκτίμηση. Σε αντίθεση με την παρούσα εφαρμογή, το IQair μπορεί να υπολογίσει τον δείκτη ποιότητας του αέρα για κάθε μέγεθος ξεχωριστά, επιτρέποντας του να αποτυπώνει πιο αξιόπιστη τιμή για το συνολικό AQI.

## 6.9 Συμπέρασμα

Το τελευταίο σύνολο μετρήσεων αποδεικνύει ότι είναι εφικτό να σχεδιαστεί ένα σύστημα μέτρησης και εκτίμησης της ποιότητας του αέρα, αξιοποιώντας υλικά χαμηλού κόστους και ευκολίας στη συνδεσμολογία και τον προγραμματισμό, ικανό να εξάγει τιμές σε όμοιο επίπεδο με επίσημους φορείς και οργανώσεις. Το σύστημα του Arduino δεν διαθέτει τον κατάλληλο εξοπλισμό για να υπολογίσει με ακρίβεια το AQI, αλλά χρησιμοποιεί μια εκτίμηση που παράγει από τον συνδυασμό των τιμών όλων των μετρήσιμων μεγεθών. Λόγω των περιορισμένων οικονομικών πόρων, δεν ήταν εφικτό να εξοπλιστεί το σύστημα με εξειδικευμένα εργαλεία υπολογισμού των μικροσωματιδίων και του δείκτη ποιότητας του αέρα, αλλά σε μελλοντικές βελτιώσεις είναι θεμιτό να εξοπλιστεί το σύστημα με τα κατάλληλα εξαρτήματα που θα επιτρέψουν την εκτίμηση του AQI με πιο αξιόπιστο τρόπο.

Κατά τη διάρκεια της έρευνας και υλοποίησης του πειράματος, για την κατασκευή συσκευής εξέτασης της ποιότητας του αέρα, δόθηκε η ευκαιρία στον φοιτητή να κατανοήσει πολλά σημαντικά στοιχεία σχετικά με την ατμοσφαιρική ρύπανση, όπως την αναγκαιότητα της παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα και τα αίτια και αποτελέσματα της έκθεσης σε βλαβερά αέρια, αλλά και την σημερινή εξέλιξη σε έρευνες και εφαρμογές συσκευών. Παρατηρήθηκε πως η ανάγκη για την παρακολούθηση της ατμόσφαιρας παραμένει ζωτικής σημασίας για τον πλανήτη σε καθημερινό επίπεδο. Επιπρόσθετα, τα σημερινά δεδομένα ερευνών και η εξέλιξη της τεχνολογίας προσφέρουν πηγές γνώσης και υλικά που είναι προσβάσιμα σε μεγάλο βαθμό. Πλέον, είναι εφικτό για οποιονδήποτε να ξεκινήσει την δική του έρευνα και πειράματα σχετικά με την παρακολούθηση της ατμόσφαιρας, ανεξαρτήτως επιπέδου γνώσεων και διαθέσιμων οικονομικών πόρων. Το αποτέλεσμα του πειράματος αποδεικνύει ότι με περιορισμένους οικονομικούς πόρους είναι εφικτό να συμβάλουμε στην προσπάθεια παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα που αναπνέουμε. Τέλος, παρατηρείται ότι, διαθέτοντας τους ανάλογους πόρους, είναι εφικτή η κατασκευή συσκευών που καλύπτουν πολλές διαφορετικές ανάγκες και λειτουργίες.

## 6.10 Μελλοντικές Βελτιώσεις και Πιθανές Αναβαθμίσεις

Η τρέχουσα εφαρμογή του συστήματος παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, αν και αποτελεσματική για την κατασκευή πρωτοτύπων και ενδεικτικών μετρήσεων, παρουσιάζει αρκετές ευκαιρίες για βελτίωση, τόσο στην ακρίβεια του υλικού όσο και στην ευφυΐα του συστήματος. Ένας βασικός περιορισμός είναι η εξάρτηση από τον αισθητήρα MQ-135 για την ανίχνευση πολλών αερίων, η οποία εισάγει αβεβαιότητα λόγω της διασταυρούμενης ευαισθησίας και της έμμεσης παρέκτασης. Τα μελλοντικά συστήματα θα χρειαστεί να εξετάσουν το ενδεχόμενο ενσωμάτωσης εξειδικευμένων αισθητήρων για μεμονωμένους ρύπους, όπως ο PMS5003 ή ο SDS011 για τα αιωρούμενα σωματίδια (PM2.5 και PM10), και ηλεκτροχημικών αισθητήρων (π.χ. MQ-7 για το CO, MiCS-2714 για τα NOx και NE4-NH3 για την αμμωνία). Αυτοί οι ειδικοί αισθητήρες προσφέρουν υψηλότερη επιλεκτικότητα και βαθμονομημένη ακρίβεια, βελτιώνοντας τη συνολική αξιοπιστία των μετρήσεων της ποιότητας του αέρα. Πρόσθετα χαρακτηριστικά, όπως ρολόι πραγματικού χρόνου (RTC) και τοπική καταγραφή δεδομένων σε κάρτα SD, θα επιτρέψουν την παρακολούθηση δεδομένων με Timestamps. Τα

Timestamps είναι χρονικές στιγμές στις οποίες γίνεται μια καταγραφή δεδομένων. Έτσι, επιτυγχάνεται η διαχείριση δεδομένων εκτεταμένης χρονικής διάρκειας με μεγάλη ευκολία.

Επιπλέον, το σύστημα μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με την ενσωμάτωση δυνατοτήτων ασύρματης επικοινωνίας, όπως Wi-Fi (μέσω μονάδων ESP8266/ESP32) ή LoRa, επιτρέποντας την απομακρυσμένη μετάδοση δεδομένων και την ανάλυση μέσω cloud. Αυτό μπορεί να διευκολύνει τις επεκτάσιμες εφαρμογές σε αστικά, βιομηχανικά ή γεωργικά περιβάλλοντα. Μια μεγαλύτερη και καλύτερη οθόνη (π.χ. OLED ή TFT) θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την καλύτερη απεικόνιση τάσεων, γραφικών παραστάσεων ή δεικτών AQI σε πραγματικό χρόνο. Η βαθμονόμηση θα μπορούσε επίσης να βελτιωθεί με τη χρήση πιστοποιημένων αερίων βαθμονόμησης, έτσι ώστε να γίνεται στοχευμένα για κάθε αέριο ξεχωριστά. Τέλος, η εφαρμογή αλγορίθμων μηχανικής μάθησης για την ερμηνεία των δεδομένων και την εκτίμηση του δείκτη AQI θα μπορούσε να βελτιώσει τις προβλέψεις για την ποιότητα του αέρα με την προσαρμογή στις πραγματικές περιβαλλοντικές συνθήκες και τη συμπεριφορά του αισθητήρα με την πάροδο του χρόνου.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] J. Martinez, "Great Smog of London," Encyclopedia Britannica, Nov. 28, 2023. Διαθέσιμο: <https://www.britannica.com/event/Great-Smog-of-London>.

[2] K. Barker et al., Air Pollution, World Health Organization Monograph Series, no. 46, World Health Organization, Geneva, Switzerland, 1961. Διαθέσιμο: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/41722>.

[3] Hubrecht RC, Carter E. The 3Rs and Humane Experimental Technique: Implementing Change. *An-imals* (Basel). 2019 Sep 30;9(10):754. doi: 10.3390/ani9100754. PMID: 31575048; PMCID: PMC6826930.

[4] E. H. Baetjer, "Effects of chronic exposure to manganese dioxide dust on the lungs of rats," *Journal of Industrial Hygiene and Toxicology*, vol. 26, no. 1, pp. 43-48, 1944.

- [5] Amdur, M. O., Schulz, R. Z., & Drinker, P. (1952). "Toxicity of sulfuric acid mist to guinea pigs." *AMA Archives of Industrial Hygiene and Occupational Medicine*, vol. 5, no. 4, pp. 318–329.
- [6] Amdur, M. O., Melvin, W. W. Jr., & Drinker, P. (1953). "Effects of inhalation of sulphur dioxide by man." *The Lancet*, vol. 265, no. 6789, pp. 758–759.
- [7] R. E. Pattie and H. Cullumbine, "The pathological effects of inhaled sulfuric acid or related compounds on laboratory animals," *Journal of Industrial Hygiene and Toxicology*, vol. 26, no. 2, pp. 128–134, 1956.
- [8] R. E. Pattie and H. Cullumbine, "The pathological effects of inhaled sulphur dioxide on the lungs of mice and rats," *Journal of Pathology and Bacteriology*, vol. 71, no. 1, pp. 225–234, 1956.
- [9] U.S. Department of Health, Education, and Welfare, *Toxicology and Industrial Hygiene Studies on Sulfuric Acid and Related Compounds*, Washington, DC, USA: Government Printing Office, 1956.
- [10] H. S. Stokinger, W. S. Wagner, and J. A. Wright, "The effects of ozone exposure on respiratory function," *Journal of Industrial Hygiene and Toxicology*, vol. 38, no. 2, pp. 130–138, 1956.
- [11] J. Wang, S. Viciano-Tudela, L. Parra, R. Lacuesta, and J. Lloret, "Evaluation of Suitability of Low-Cost Gas Sensors for Monitoring Indoor and Outdoor Urban Areas," *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, no. 18, pp. 20968–20975, Sept. 15, 2023, doi: 10.1109/JSEN.2023.3301651.
- [12] A. Moreno-Rangel, T. Sharpe, F. Musau, and G. McGill, "Indoor fine particle (PM<sub>2.5</sub>) pollution and occupant perception of the indoor environment during summer of the first passivhaus certified dwelling in Latin America," *J. Natural Resour. Develop.*, vol. 8, pp. 78–90, Aug. 2018.
- [13] S. Mluyati and S. Sadi, "Internet of Things (IoT) pada prototipe pendeteksi kebocoran gas berbasis MQ-2 dan SIM800L," *Jurnal Teknik*, vol. 7, no. 2, pp. 64–72, Feb. 2019.
- [14] M. K. Seow and M. S. M. Ali, "Carbon dioxide and carbon monoxide gas detection system for cars," *ELEKTRIKA-Journal of Electrical Engineering*, vol. 20, nos. 2–3, pp. 65–69, 2021.
- [15] M. F. R. Al-Okby, S. Neubert, T. Roddelkopf, and K. Thurow, "Integration and testing of novel MOX gas sensors for IoT-based indoor air quality monitoring," in *Proc. IEEE 21st Int. Symp. Comput. Intell. In-format. (CINTI)*, Nov. 2021, pp. 173–180.
- [16] R. Anitha, S. Anusooya, V. J. Shilpa, and M. Hishaam, "Real time hazardous gas classification and management system using artificial neural networks," in *Human Communication Technology: Internet of Robotic Things and Ubiquitous Computing*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2021, pp. 219–244.
- [17] H. J. Khadim, F. K. Obaed, and Z. T. A. Ali, "Application of MQ sensors to indoor air quality monitoring in lab based on IoT," in *Proc. Int. Conf. Intell. Technol., Syst. Service Internet Everything (ITSS-IoE)*, Nov. 2021, pp. 1–5.
- [18] S. Mansour, N. Nasser, L. Karim, and A. Ali, "Wireless Sensor Network-based air quality monitoring system," in *2014 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, Honolulu, HI, USA, 2014, pp. 545–550, doi: 10.1109/ICCNC.2014.6785394. Διαθέσιμο: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6785394&isnumber=6785290>.
- [19] J. Fenger, "Urban air quality," *Atmospheric Environment*, vol. 33, no. 29, pp. 4877–4900, 1999, doi:10.1016/S1352-2310(99)00290-3. Διαθέσιμο: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231099002903>.

- [20] E. D. Edwards, "The significance of ppm measurements in environmental toxicology," *Environmental Health Perspectives*, vol. 106, no. 3, pp. 145-150, 1998.
- [21] T. Wilson and S. Sue, "PPM measurement techniques and their application in environmental toxicology," *Journal of Environmental Toxicology*, vol. 22, no. 4, pp. 213-220, 1997.
- [22] A. Tuch, "Advances in ppm measurement and their implications for air quality assessment," *Journal of Environmental Monitoring*, vol. 19, no. 2, pp. 98-105, 1997.
- [23] H. H. Suh, T. Bahadori, J. Vallarino, and J. D. Spengler, "Criteria air pollutants and toxic air pollutants," *Environmental Health Perspectives*, vol. 108, Suppl. 4, pp. 625-633, Aug. 2000, doi: 10.1289/ehp.00108s4625.
- [24] L. Louis, "Working Principle of Arduino and Using it as a Tool for Study and Research," *International Journal of Control Automation Communication and Systems*, vol. 1, no. 2, pp. 21–29, 2016, doi: 10.5121/ijcacs.2016.1203.
- [25] Y. A. Badamasi, "The working principle of an Arduino," in 2014 11th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO), Abuja, Nigeria, 2014, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICECCO.2014.6997578. Διαθέσιμο: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6997578>.
- [26] IRJET, "Measurement of Temperature and Humidity by using Arduino Tool and DHT11," SlideShare, Jan. 3, 2019. Διαθέσιμο: <https://www.slideshare.net/slideshow/irjet-measurement-of-temperature-and-humidity-by-using-arduino-tool-and-dht11/127209707>
- [27] M. Grundström, "Variation and co-variation of PM<sub>10</sub>, particle number concentration, NO<sub>x</sub> and NO<sub>2</sub> in the urban air – Relationships with wind speed, vertical temperature gradient and weather type," 2015. Διαθέσιμο: [https://www.academia.edu/75016563/Variation\\_and\\_co\\_variation\\_of\\_PM\\_10\\_particle\\_number\\_concentration\\_NO\\_x\\_and\\_NO\\_2\\_in\\_the\\_urban\\_air\\_e\\_Relationships\\_with\\_wind\\_speed\\_vertical\\_temperature\\_gradient\\_and\\_weather\\_type](https://www.academia.edu/75016563/Variation_and_co_variation_of_PM_10_particle_number_concentration_NO_x_and_NO_2_in_the_urban_air_e_Relationships_with_wind_speed_vertical_temperature_gradient_and_weather_type)
- [28] Encyclopédie de l'Environnement, "Air pollution, a centuries-old problem." [Online]. Available: <https://www.encyclopedie-environnement.org/en/zoom/air-pollution-a-centuries-old-problem>. [Accessed: 01-May-2025].
- [29] M. Greenstone, "The connection between cleaner air and longer lives," *The New York Times*, 24-Sep-2015. [Online]. Available: <https://www.nytimes.com/2015/09/25/upshot/the-connection-between-cleaner-air-and-longer-lives.html>. [Accessed: 01-May-2025].
- [30] St. Louis Post-Dispatch, "Image accompanying local news article," [https://www.stltoday.com/news/local/article\\_00c3b6cd-ba69-5a19-b498-fbc29f9630c4.html?mode=image](https://www.stltoday.com/news/local/article_00c3b6cd-ba69-5a19-b498-fbc29f9630c4.html?mode=image). [Accessed: 01-May-2025].
- [31] NASA Earth Observatory, "NASA Earth Observatory." [Online]. Available: <https://earthobservatory.nasa.gov>. [Accessed: 01-May-2025].
- [32] Our World in Data, "Our World in Data." [Online]. Available: <https://ourworldindata.org>. [Accessed: 01-May-2025].
- [33] L. Louis, "Working principle of Arduino and using it as a tool for study and research," *Int. J. Control Autom. Commun. Syst.*, vol. 1, no. 2, pp. 21–29, Apr. 2016.

- [34] A. Irfan, “Arduino: The Arduino board is built upon an ATMEL AVR microcontroller ... (Fig. 2),” ResearchGate, 2024. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Arduino-The-Arduino-board-is-built-upon-an-ATMEL-AVR-microcontroller-which-acts-as-its\\_fig2\\_383102712](https://www.researchgate.net/figure/Arduino-The-Arduino-board-is-built-upon-an-ATMEL-AVR-microcontroller-which-acts-as-its_fig2_383102712). [Accessed: 01-May-2025].
- [35] F. R. Jiménez L., “Principales partes del entorno IDE Arduino. Fuente: Abdullahi (2014) (Fig. 8),” ResearchGate, 2017. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Figura-8-Principales-partes-del-entorno-IDE-Arduino-Fuente-Abdullahi-2014\\_fig4\\_320069338](https://www.researchgate.net/figure/Figura-8-Principales-partes-del-entorno-IDE-Arduino-Fuente-Abdullahi-2014_fig4_320069338). [Accessed: 01-May-2025].
- [36] Luxtech, “Sensor Modules Kit — MQ-series gas sensors,” Amazon, 2019. [Online]. Available: <https://www.amazon.co.uk/Luxtech-Sensor-Modules-Kit-Gas/dp/B07P1RCLJP>. [Accessed: 01-May-2025].
- [37] T. K. Hareendran, “How to use MQ-135 gas sensor,” Codrey Electronics, 5-Jul-2020. [Online]. Available: <https://www.codrey.com/electronic-circuits/how-to-use-mq-135-gas-sensor/>. [Accessed: 01-May-2025].
- [38] Arduino, “Liquid crystal displays (LCD) with Arduino,” Arduino Docs, 2023. [Online]. Available: <https://docs.arduino.cc/learn/electronics/lcd-displays>. [Accessed: 01-May-2025].
- [39] Components101, “I2C serial interface adapter module for LCD,” 15-Jun-2021. [Online]. Available: <https://components101.com/modules/i2c-serial-interface-adapter-module>. [Accessed: 01-May-2025].
- [40] Texas Instruments, “Understanding the I2C bus,” Application Report SLVA704, Sep. 2016. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/pdf/slva704>. [Accessed: 01-May-2025].
- [41] M. O. F. Noman, “DHT-11 temperature & humidity sensor (Fig. 07),” ResearchGate, 2020. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Figure-07-DHT-11-Temperature-Humidity-Sensor\\_fig7\\_375604600](https://www.researchgate.net/figure/Figure-07-DHT-11-Temperature-Humidity-Sensor_fig7_375604600). [Accessed: 01-May-2025].
- [42] Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd., “MQ135 semiconductor air quality gas sensor manual,” ver. 1.4, 10-Mar-2015. [Online]. Available: [https://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/Semiconductor%20Gas%20Sensor/MQ135%20\(Ver1.4\)%20-%20Manual.pdf](https://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/Semiconductor%20Gas%20Sensor/MQ135%20(Ver1.4)%20-%20Manual.pdf). [Accessed: 01-May-2025].
- [43] OpenAQ, “OpenAQ’s origin story: How our organization came to be,” Medium, 12-Jan-2023. [Online]. Available: <https://openaq.medium.com/the-openaq-origin-story-31e0ce904529>. [Accessed: 01-May-2025].
- [44] IQAir, “How can I check the data source of a station?” 12-Oct-2016. [Online]. Available: <https://www.iqair.cn/sg/newsroom/how-can-i-check-the-data-source-of-a-station>. [Accessed: 01-May-2025].
- [45] Autodesk Inc., *[Συνδεσμολογία]*, Tinkercad [Online]. Available: <https://www.tinkercad.com/things/hvg8vDAPjzL/editel>.
- [46] “MQ135 Value Conversion,” \*Arduino Forum\*, 2014. [Online]. Available: <https://forum.arduino.cc/t/mq-135-value-conversion/136071>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Κώδικάς Πειραμάτων

```
1  #include <Wire.h>
2  #include <LiquidCrystal_I2C.h>
3  #include <DHT.h>
4
5
6  #define DHTPIN 2
7  #define DHTTYPE DHT11
8
9
10 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
11
12
13 DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
14
15 void setup() {
16
17     lcd.init();
18     lcd.backlight();
19
20     dht.begin();
21
22
23     Serial.begin(9600);
24 }
25
26 void loop() {
27
28     float h = dht.readHumidity();
29     float t = dht.readTemperature();
30
31
32     int mq135Value = analogRead(A0);
33
34
35     lcd.clear();
36     lcd.setCursor(0, 0);
37     lcd.print("Temp: ");
38     lcd.print(t);
39     lcd.print(" C");
40
41     lcd.setCursor(0, 1);
42     lcd.print("Hum: ");
43     lcd.print(h);
44     lcd.print("%");
45
46     lcd.setCursor(8, 1);
47     lcd.print("Gas: ");
48     lcd.print(mq135Value);
49
50
51     Serial.print("Temp: ");
52     Serial.print(t);
53     Serial.print(" C, Humidity: ");
54     Serial.print(h);
55     Serial.print("%, Gas: ");
56     Serial.println(mq135Value);
57
58     delay(5000);
59 }
60
```

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Κώδικας Βαθμονόμησης

```
1 #include <EEPROM.h>
2
3 #define MQ135_PIN A0
4 #define RL 10.0
5 #define EEPROM_ADDRESS 0
6
7 unsigned long startTime;
8 const unsigned long CALIBRATION_DURATION = 2UL * 60UL * 1000UL; // 2 minutes
9
10 void setup() {
11     Serial.begin(9600);
12     delay(2000);
13     Serial.println("Calibrating MQ135 with Ammonia for 2 minutes...");
14     startTime = millis();
15 }
16
17 void loop() {
18     static float rsTotal = 0;
19     static int samples = 0;
20
21     if (millis() - startTime < CALIBRATION_DURATION) {
22         int adc = analogRead(MQ135_PIN);
23         float voltage = adc * (5.0 / 1023.0);
24         float Rs = (5.0 - voltage) * RL / voltage;
25         rsTotal += Rs;
26         samples++;
27
28         Serial.print("ADC: "); Serial.print(adc);
29         Serial.print(" | Rs: "); Serial.println(Rs, 2);
30         delay(500);
31     } else {
32         float avgRs = rsTotal / samples;
33         float Ro = avgRs / 3.6;
34
35         EEPROM.put(EEPROM_ADDRESS, Ro);
36
37         Serial.println("---- Calibration Complete ----");
38         Serial.print("Average Rs: "); Serial.println(avgRs, 2);
39         Serial.print("Calculated Ro: "); Serial.println(Ro, 2);
40         Serial.println("Ro saved to EEPROM.");
41
42         while (true);
43     }
44 }
45
46 String describeAQI(float aqi) {
47     if (aqi <= 50) return "Good";
48     if (aqi <= 100) return "Moderate";
49     if (aqi <= 150) return "UnhealthySG";
50     if (aqi <= 200) return "Unhealthy";
51     if (aqi <= 300) return "VeryUnhealthy";
52     return "Hazardous";
53 }
54
55 void recalibrateRo() {
56     float rsSum = 0;
57     int samples = 10;
58     for (int i = 0; i < samples; i++) {
59         int adc = analogRead(MQ135_PIN);
60         float sensorResistance = calculateResistance(adc);
61         rsSum += sensorResistance;
62         delay(100);
63     }
64     float avgRs = rsSum / samples;
65     Ro = avgRs / 3.6;
66     EEPROM.put(EEPROM_ADDRESS, Ro);
67     Serial.print("Recalibrated Ro: ");
68     Serial.println(Ro, 2);
69 }
```

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ C : Τελική μορφή του κώδικα

```
1 #include <LiquidCrystal_I2C.h>
2 #include <DHT.h>
3
4 #define DHTPIN 2
5 #define DHTTYPE DHT11
6 #define MQ135_PIN A0
7 #define RL 10.0
8
9 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
10 DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
11
12
13 const float Ro_NH3 = 4.75;
14
15
16 const float k_CO = 1.8;
17 const float k_NOx = 1.6;
18 const float k_CO2 = 0.9;
19
20
21 const float Ro_CO = Ro_NH3 * k_CO;
22 const float Ro_NOx = Ro_NH3 * k_NOx;
23 const float Ro_CO2 = Ro_NH3 * k_CO2;
24
25
26 const float a_NH3 = 447.0;
27 const float b_NH3 = -0.136;
28 const float a_CO = 6.15;
29 const float b_CO = -0.488;
30 const float a_NOx = 6.8;
31 const float b_NOx = -0.532;
32 const float a_CO2 = 110.47;
33 const float b_CO2 = -2.862;
34
35 unsigned long lastScreenSwitch = 0;
36 const unsigned long SCREEN_SWITCH_INTERVAL = 3000;
37 int currentScreen = 0;
38
39 void setup() {
40     Serial.begin(9600);
41     lcd.init();
42     lcd.backlight();
43     dht.begin();
44 }
45
46 void loop() {
47     int adc = analogRead(MQ135_PIN);
48     float sensorRs = calculateResistance(adc);
49
50
51     float ratio_NH3 = sensorRs / Ro_NH3;
52     float ratio_CO = sensorRs / Ro_CO;
53     float ratio_NOx = sensorRs / Ro_NOx;
54     float ratio_CO2 = sensorRs / Ro_CO2;
55
56
57     float ppm_NH3 = calculatePPM(ratio_NH3, a_NH3, b_NH3);
58     float ppm_CO = calculatePPM(ratio_CO, a_CO, b_CO);
59     float ppm_NOx = calculatePPM(ratio_NOx, a_NOx, b_NOx);
60     float ppm_CO2 = calculatePPM(ratio_CO2, a_CO2, b_CO2);
61
62
63     float mg_NH3 = ppm_NH3 * 0.6967;
64     float mg_CO = ppm_CO * 1.1459;
65     float mg_NOx = ppm_NOx * 1.8808;
66     float mg_CO2 = ppm_CO2 * 1.7995;
67
68     float pm25 = ppm_NOx * 4.2;
69     float pm10 = ppm_NOx * 6.9;
70
71     float temperature = dht.readTemperature();
72     float humidity = dht.readHumidity();
73
74     float AQI = (ppm_NH3 + ppm_CO + ppm_NOx + pm25 + pm10) / 5.0;
75     String AQI_Descriptor = describeAQI(AQI);
76 }
```

```

77  if (millis() - lastScreenSwitch > SCREEN_SWITCH_INTERVAL) {
78      lcd.clear();
79      switch (currentScreen) {
80          case 0:
81              lcd.setCursor(0, 0);
82              lcd.print("AQI: ");
83              lcd.print((int)AQI);
84              lcd.setCursor(0, 1);
85              lcd.print(AQI_Descriptor);
86              break;
87          case 1:
88              lcd.setCursor(0, 0);
89              lcd.print("Temp:");
90              lcd.print(temperature, 1);
91              lcd.print((char)223);
92              lcd.print("C");
93              lcd.setCursor(0, 1);
94              lcd.print("Hum :");
95              lcd.print(humidity, 1);
96              lcd.print("%");
97              break;
98          case 2:
99              lcd.setCursor(0, 0);
100             lcd.print("NH3:");
101             lcd.print(ppm_NH3, 0);
102             lcd.print(" CO:");
103             lcd.print(ppm_CO, 0);
104             lcd.setCursor(0, 1);
105             lcd.print("NOx:");
106             lcd.print(ppm_NOx, 0);
107             lcd.print(" CO2:");
108             lcd.print(ppm_CO2, 0);
109             break;
110          case 3:
111             lcd.setCursor(0, 0);
112             lcd.print("PM2.5:");
113             lcd.print(pm25, 1);
114             lcd.setCursor(0, 1);
115             lcd.print("PM10 :");
116             lcd.print(pm10, 1);
117             break;
118      }
119
120      currentScreen = (currentScreen + 1) % 4;
121      lastScreenSwitch = millis();
122  }
123
124
125  Serial.print("ADC: "); Serial.print(adc);
126  Serial.print(" | Rs: "); Serial.print(sensorRs, 2); Serial.print(" kΩ");
127  Serial.print(" | NH3: "); Serial.print(ppm_NH3, 1); Serial.print(" ppm ("); Serial.print(mg_NH3, 1); Serial.print(" mg/m³)");
128  Serial.print(" | CO: "); Serial.print(ppm_CO, 1); Serial.print(" ppm ("); Serial.print(mg_CO, 1); Serial.print(" mg/m³)");
129  Serial.print(" | NOx: "); Serial.print(ppm_NOx, 1); Serial.print(" ppm ("); Serial.print(mg_NOx, 1); Serial.print(" mg/m³)");
130  Serial.print(" | CO2: "); Serial.print(ppm_CO2, 1); Serial.print(" ppm ("); Serial.print(mg_CO2, 1); Serial.print(" mg/m³)");
131  Serial.print(" | PM2.5: "); Serial.print(pm25, 1);
132  Serial.print(" | PM10: "); Serial.print(pm10, 1);
133  Serial.print(" | Temp: "); Serial.print(temperature, 1);
134  Serial.print(" °C | Hum: "); Serial.print(humidity, 1); Serial.print(" %");
135  Serial.print(" | AQI: "); Serial.print(AQI, 1); Serial.print(" ("); Serial.print(AQI_Descriptor); Serial.println(")");
136
137  delay(1000);
138  }
139
140  float calculateResistance(int adc) {
141      float voltage = adc * (5.0 / 1023.0);
142      return ((5.0 - voltage) * RL) / voltage;
143  }
144
145  float calculatePPM(float ratio, float a, float b) {
146      return a * pow(ratio, b);
147  }
148
149  String describeAQI(float aqi) {
150      if (aqi <= 50) return "Good";
151      if (aqi <= 100) return "Moderate";
152      if (aqi <= 150) return "UnhealthySG";
153      if (aqi <= 200) return "Unhealthy";
154      if (aqi <= 300) return "VeryUnhealthy";
155      return "Hazardous";
156  }
157

```