



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

Τμήμα Χημικών Μηχανικών

**ΧΡΗΣΗ ΜΙΚΡΩΝ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΕΝΑΕΡΙΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ
ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΣΗΜΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

Επιβλέπων : Δρ. Βασίλειος Ευαγγελόπουλος

Κοζάνη, Σεπτέμβριος 2022



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

Τμήμα Χημικών Μηχανικών

**ΧΡΗΣΗ ΜΙΚΡΩΝ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΕΝΑΕΡΙΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ
ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΣΗΜΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

Επιβλέπων : Δρ. Βασίλειος Ευαγγελόπουλος

Κοζάνη, Σεπτέμβριος 2022

Περίληψη

Στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η χρήση αισθητήρων χαμηλού κόστους σε συνδυασμό με μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα για την μέτρηση της ποιότητας της ατμόσφαιρας.

Παρουσιάζονται αρχικά οι ατμοσφαιρικοί ρύποι που επηρεάζουν τον άνθρωπο, στην συνέχεια παρουσιάζονται οι κλασσικές μέθοδοι με τις οποίες μπορεί να μετρηθούν με ακρίβεια οι ρύποι στην ατμόσφαιρα και οι χαμηλού κόστους τεχνολογίες οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα. Τέλος παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα μετρήσεων αιωρούμενων σωματιδίων σε ύψη από 0 ως 100 μέτρα με την χρήση ενός αισθητήρα χαμηλού κόστους αναρτημένο σε ένα drone.

Abstract

In this diploma thesis, the use of low-cost sensors in combination with unmanned flying vehicles to measure air quality was studied. The air pollutants that affect humans are first presented, then the classical methods by which pollutants in the atmosphere can be accurately measured and low-cost technologies that can be used to monitor air quality are presented. Finally, the results of measurements of suspended particles at heights from 0 to 100 meters are presented and analyzed using a low-cost sensor posted on a drone

Turnitin Originality Report

Processed on: 27-Sep-2022 22:57 EEST
ID: 1910647635
Word Count: 15578
Submitted: 1

Thesis By Konstantinos Christos Asimopoulos

DOCUMENT VIEW

Similarity by Source	
Similarity Index	
20%	
Internet Sources:	19%
Publications:	1%
Student Papers:	15%

Copyright Κωνσταντίνος Ασημόπουλος, 2022.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του Προπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του Τμήματος Χημικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας και σηματοδοτεί την ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Για αυτό το λόγο πριν αναφερθώ στο θέμα που έχει αναπτυχθεί παρακάτω θα ήθελα ευχαριστήσω όλους που με υποστήριξαν σε όλη τη πορεία των σπουδών μου. Πρώτα από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Βασίλειο Ευαγγελόπουλο αρχικά που με τα μαθήματα του με έκανε να ασχοληθώ με ένα αντικείμενο που με ελκύει ιδιαίτερα και κατά δεύτερον για τη συνεχή του στήριξη και πίεση στο διάστημα εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος , θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τον αδερφό μου που με υποστήριξαν με όποιο τρόπο μπορούσαν στις σπουδές μου, αλλά και όσους ήταν εκεί και με στήριξαν τα τελευταία πέντε χρόνια.

Ασημόπουλος Κωνσταντίνος Χρήστος ,

Κοζάνη, 27 Σεπτεμβρίου 2022

Περιεχόμενα

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
2.	ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΙ ΡΥΠΟΙ.....	11
2.1	ΠΗΓΕΣ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ.....	11
2.2	ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ	12
2.3	ΚΥΡΙΟΤΕΡΟΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΙ ΡΥΠΟΙ.....	12
2.3.1	Μονοξείδιο του άνθρακα (CO).....	12
2.3.2	Διοξείδιο του θείου (SO ₂), σουλφίδια	13
2.3.3	Οξείδια του αζώτου (NO/NO ₂)	15
2.3.4	Όζον (O ₃)	17
2.3.5	Αιωρούμενα σωματίδια (PM)	18
2.3.6	Μόλυβδος (Pb)	20
2.3.7	Βενζόλιο.....	20
2.3.8	Αρσενικό (As).....	20
2.3.9	Κάδμιο (Cd).....	21
2.3.10	Νικέλιο (Ni).....	21
2.3.11	Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs)	21
3.	ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ	23
3.1	ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ.....	23
3.1.1	Δομή διάταξης δειγματοληψίας.	24
3.1.2	Δειγματοληψία ατμοσφαιρικού αέρα	25
3.1.3	Δειγματοληψία από καπνοδόχο	25
3.2	ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	25
	Εικόνα 2. Σύστημα Stauscheibe.....	26
A.	Σωλήνας Pitot.....	26
a)	Άνοιγμα προς το άνω μέρος της ροής.....	26
β)	Άνοιγμα προς το κάτω μέρος της ροής.....	26
B.	Μέτρηση Διαφορικής Πίεσης/Εμφάνιση Ταχύτητας Ροής.....	26
3.3	ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ	27
3.3.1	Επιτόπια ανάλυση (in-situ analysis)	27
3.3.2	Ενόργανες μέθοδοι (Instrumental Methods).....	27
3.3.3	Χημικές Μέθοδοι.....	30
3.4	ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΤΕΡΟΧΡΟΝΙΣΜΕΝΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ	32
3.4.1	Συλλογή δείγματος σε εκκενωμένο δέκτη	32

3.4.2	Συλλογή σε μέσο	32
4.	ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ.....	35
4.1	ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΘΕΙΟΥ (SO ₂).....	36
4.2	ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΞΕΙΔΙΩΝ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ (NO, NO ₂)	38
4.3	ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΞΕΙΔΩΤΙΚΩΝ (OXIDANTS).....	39
4.4	ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ	39
4.5	ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ.....	41
4.6	ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΛΥΒΔΟΥ (Pb).....	41
4.7	ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ (PM).....	41
5.	ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ.....	43
5.1	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ.....	43
5.2	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ	43
5.3	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ	44
5.4	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ	44
5.5	ΧΡΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΜΕ UAV	45
5.5.1	Μετρήσεις ποιότητας του αέρα	46
5.5.2	Τύποι UAV και απαιτήσεις για μετρήσεις ατμοσφαιρικού αέρα.....	46
5.5.3	Οι επιδόσεις και η ικανότητα των UAV	47
6.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	49
6.1	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ.....	49
6.2	ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ	49
6.2.1	Αισθητήρες	49
6.2.2	Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα	50
6.4	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	64
6.5	ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	68
	68
	68
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	69
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	70

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η προστασία των πληθυσμών από την έκθεση σε κακή ποιότητα του αέρα είναι μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις για τη δημόσια υγεία που επηρεάζουν τις κοινωνίες τις τελευταίες δεκαετίες. Οι πιο ανεπτυγμένες χώρες καταβάλλουν συστηματικές προσπάθειες για τη μέτρηση διαφόρων ρύπων οι οποίοι υποβαθμίζουν την υγεία των ανθρώπων ή βλάπτουν τα φυτά και τις φυσικές δομές. Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται κυρίως σε πυκνοκατοικημένες περιοχές στις οποίες καταγράφονται και αναλύονται συστηματικά οι ημερήσιες, μηνιαίες και ετήσιες τιμές ρύπων από διάφορες πηγές.

Για την καλύτερη μελέτη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης απαιτούνται μετρήσεις υψηλής χωρικής ανάλυσης, συχνές δειγματοληψίες και ακριβείς τιμές απαλλαγμένες από προσωρινές παρεμβολές. Η επίτευξη αυτών των απαιτήσεων συνεπάγεται την χρήση εξειδικευμένων οργάνων, τα οποία και έχουν πολύ υψηλό κόστος αγοράς και συντήρησης. Είναι επομένως κατανοητό το κίνητρο για την ανάπτυξη φθηνών συσκευών παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα με γρήγορες αποκρίσεις, οι οποίες και μπορούν να εγκατασταθούν σε πολλά σημεία γύρω από πηγές ρύπανσης και να δημιουργήσουν ένα διασπαρμένο δίκτυο μετρήσεων με υψηλή χωρική και χρονική ανάλυση. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλά τέτοια δίκτυα[1].

Παραδοσιακά στα ερευνητικά εργαστήρια και σε κλειστούς χώρους εργασίας, για την μέτρηση διαφόρων ουσιών χρησιμοποιούνται ηλεκτροχημικοί αισθητήρες. Η δυσκολία στην χρήση των μεθόδων αυτών στον ατμοσφαιρικό αέρα, όπου υπάρχουν αρκετοί αστάθμητοι παράγοντες και πηγές παρεμβολών, σε συνδυασμό με τις πολύ χαμηλότερες συγκεντρώσεις των ουσιών που πρέπει να μετρηθούν, έχουν οδηγήσει σε συνεχείς βελτιώσεις των αισθητήρων αλλά και των μεθόδων μέτρησης ατμοσφαιρικών ρύπων.

Σε κάθε περίπτωση παράλληλα με την βελτίωση των οργάνων μέτρησης, είναι αναγκαία και η κατανόηση και μοντελοποίηση της επίδρασης των παρεμβολών που προκύπτουν από μεταβαλλόμενη θερμοκρασία (T), σχετική υγρασία (RH), πίεση (P) ή άλλα μόρια αερίου που μπορεί να επηρεάζουν τις αντιδράσεις οξειδωσης-αναγωγής που συμβαίνουν στο ηλεκτρόδιο εργασίας ενός δεδομένου αισθητήρα. Οι παρεμβολές αυτές μπορεί να οδηγήσουν σε μετρώμενες συγκεντρώσεις ρύπων που είναι τάξεις μεγέθους διαφορετικές από τις πραγματικές τιμές. Οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες βασίζονται στην μέτρηση πολύ μικρών αλλαγών στο ρεύμα (μA) και στη αξιόπιστη μετατροπή αυτού του ακατέργαστου σήματος του αισθητήρα σε συγκέντρωση της μετρώμενης ουσίας. Για τον σωστό υπολογισμό της συγκέντρωσης πρέπει να πληρούνται οι παρακάτω συνθήκες:

- Το σύστημα μέτρησης να είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να παρέχει συνεπή και επικυρωμένη δειγματοληψία του ατμοσφαιρικού αέρα,
- Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση και την μέτρηση μικρών αλλαγών στο ρεύμα να είναι πολύ χαμηλού θορύβου.
- Να υπάρχουν ενσωματωμένα ηλεκτρονικά φίλτρα για την απομάκρυνση ηλεκτρικών μεταβατικών φαινομένων (π.χ. παρεμβολές ραδιοσυχνότητων)
- Η Διαδικασία μετατροπής του ακατέργαστου σήματος σε συγκέντρωση να λαμβάνει υπόψη όλα τα δεδομένα βαθμονόμησης και τις παρεμβολές που μπορεί να παραμένουν.

2. ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΙ ΡΥΠΟΙ

2.1 ΠΗΓΕΣ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ

Ως αέριοι ρύποι νοούνται αέρια, αιωρούμενα υγρά (σταγονίδια τα οποία δημιουργούν πολύ έντονα τοπικά προβλήματα, droplets) και αιωρούμενα σωματίδια (suspended solids/particles, particulate matter–PM). [2,3,4] Οι αέριοι ρύποι μπορούν να χωριστούν σε δύο γενικές κατηγορίες. Σε ρύπους που προέρχονται από φυσικές πηγές όπως:

- Ηφαιστειακή δραστηριότητα
- Σήψη οργανικών ουσιών
- Πυρκαγιές.
- Βιολογικές διεργασίες.

Και σε ρύπους που προέρχονται από ανθρώπινες δραστηριότητες όπως:

- Παραγωγή ενέργειας
- Βιομηχανικές διεργασίες
- Γεωργικές Δραστηριότητες
- Οικιακές Δραστηριότητες
- Μεταφορές (επίγειες, αεροπορικές και θαλάσσιες)

Παλαιότερα οι ρύποι από φυσικές πηγές ήταν περισσότεροι από τους ρύπους που προέρχονται από ανθρώπινες δραστηριότητες, με την βιομηχανική επανάσταση όμως η κατάσταση έχει μερικώς αναστραφεί. Οι ρύποι που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα από τις ανθρώπινες δραστηριότητες χωρίζονται, ανάλογα με την προέλευσή τους, στις παρακάτω γενικές κατηγορίες:

Πρωτογενείς ρύποι: εκπέμπονται άμεσα από τις πηγές ρύπανσης. Για παράδειγμα το διοξείδιο του θείου και το μονοξείδιο του αζώτου. Οι πρωτογενείς ρύποι που συμμετέχουν στη φωτοχημική δημιουργία του όζοντος ονομάζονται πρόδρομοι ρύποι.

Δευτερογενείς ρύποι: Αυτοί σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα από τις χημικές αντιδράσεις μεταξύ πρωτογενών ρύπων. Τυπικό παράδειγμα δευτερογενούς ρύπου είναι το όζον.

Οι σημαντικότεροι αέριοι ρύποι που επηρεάζουν την ποιότητα της ατμόσφαιρας είναι:

- το διοξείδιο του θείου (SO₂)
- το μονοξείδιο του άνθρακα (CO)
- τα οξείδια του αζώτου (κυρίως το διοξείδιο του αζώτου) (NO/NO₂)
- τα αιωρούμενα σωματίδια (κυρίως τα PM₁₀ και τα PM_{2.5})
- μμόλυβδος (Pb).
- Υδρογονάνθρακες(HC)

Οι ανωτέρω ρύποι παράγονται από διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες όπως

- CO, SO₂, NO/NO₂, CO₂, σωματίδια: παράγονται από την καύση άνθρακα και πετρελαίου.

- CO, Υδρογονάνθρακες(HC), NO/NO₂: προέρχονται από εξατμίσεις οχημάτων
- HC, HM, POPs, H₂S, SO₂, NO/NO₂, CO₂, σωματίδια (οξείδια σιδήρου, ιπτάμενη τέφρα, αιθάλη, καπνός), (HCN), (HF), (Cl₂), φωσγένιο, (VOCs): Σημαντική πηγή τους είναι η χημική βιομηχανία.
- (H₂S), (NH₃): Είναι αποτέλεσμα της επεξεργασία αποβλήτων.
- Σωματίδια (πολλές φορές περιέχουν και βαρέα μέταλλα): Εκπέμπονται από εξορυκτικές δραστηριότητες, κατασκευές και δημόσια έργα.

2.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ

Οι αέριοι ρύποι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με την φύση τους σε:

- Όξινους ρύπους: Διοξείδιο του Θείου(SO₂), Οξείδια Αζώτου (NO_x), Αμμωνία (NH₃).
- Τοξικούς ρύπους: Persistent Organic Pollutants (POP), Βαρέα Μέταλλα.
- Πρόδρομες ενώσεις του όζοντος: Οξείδια Αζώτου(NO_x), Μεθάνιο (CH₄), Μονοξείδιο του Άνθρακα(CO), Πτητικές Οργανικές Ενώσεις
- Πρωτογενή σωματίδια: PM₁₀, PM_{2,5}.
- Πρόδρομες ενώσεις δευτερογενών σωματιδίων: ανόργανες όπως SO₂, NO_x, NH₃ και οργανικές όπως NMVOC.

Ενώ ως προς τη δράση τους μπορούν να χωριστούν σε :

- Ρύπους που έχουν άμεσες επιπτώσεις στην υγεία όπως το όζον, σωματίδια, και σε μικρότερο βαθμό ο μόλυβδος, βενζόλιο, SO₂, NO_x, CO.
- Ρύπους που επηρεάζουν τα ύδατα και το έδαφος όπως: O₃, SO₂, NO_x, NH₃.
- Ρύπους που προκαλούν βλάβες στη βλάστηση και στους καρπούς: Όζον εδάφους.
- Ρύπους που μπορούν να καταστρέψουν υλικά και μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς: Όζον και όξινα.
- Ρύπους που μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στην υγεία από τοξικά, όπως: HMs, POPs.

2.3 ΚΥΡΙΟΤΕΡΟΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΙ ΡΥΠΟΙ

2.3.1 Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)

Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι δηλητηριώδες αέριο που εκλύεται κατά τις ατελείς καύσεις. Κύριες πηγές για την έκθεση του ανθρώπου στο μονοξείδιο του άνθρακα είναι ο καπνός από τα τσιγάρα και οι εκπομπές από τις εξατμίσεις αυτοκινήτων. Υψηλές συγκεντρώσεις μονοξειδίου του άνθρακα σε κλειστούς χώρους μπορεί να είναι ακόμη και θανατηφόρες. Το μονοξείδιο του άνθρακα ευθύνεται για τις περισσότερες χημικές δηλητηριάσεις σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο στοιχείο καθώς μπορεί να παραχθεί από λανθασμένη χρήση οικιακών συσκευών όπως κουζίνες υγραερίου στις οποίες δεν γίνεται σωστή καύση. [2,3]

Ιδιότητες

Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι αέριο μη ερεθιστικό, άχρωμο, άγευστο και άοσμο και ελάχιστα διαλυτό στο νερό. Η αυξημένη συγκέντρωση προκαλεί στέρηση του οργανισμού από το οξυγόνο. Όταν εισπνέεται, εκτοπίζει το οξυγόνο, δεσμεύει την αιμοσφαιρίνη στο αίμα, και δημιουργεί ένα σύμπλοκο που ονομάζεται καρβοξιαιμοσφαιρίνη. Η ποσότητα της καρβοξιαιμοσφαιρίνης στο αίμα χρησιμοποιείται ως δείκτης της έκθεσης του οργανισμού σε μονοξείδιο του άνθρακα.

Πηγές

Το μονοξείδιο του άνθρακα παράγεται κατά την ατελή καύση οργανικής ύλης. Εκπέμπεται κυρίως από καμινάδες, εξατμίσεις οχημάτων και άλλα συστήματα καύσης. Ενώ δεν είναι αέριο του θερμοκηπίου, εντούτοις επειδή μπορεί να οξειδωθεί σε διοξείδιο του άνθρακα επηρεάζει έμμεσα το παγκόσμιο κλίμα. Σε παγκόσμια κλίμακα τα ποσοστά εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα σε εξωτερικούς χώρους κατανέμονται ως εξής:

Μεταφορές	77%
Βιομηχανικές διαδικασίες	7%,
Καύσεις για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	5%
Άλλες πηγές	11%.

Επίπεδα συγκέντρωσης - Έκθεση

Τα όρια που έχουν ορισθεί διεθνώς για τις συγκεντρώσεις μονοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα είναι για την Ευρωπαϊκή Ένωση μικρότερη από 10 mg/m³ ημερήσια μέση τιμή ανά οκτώωρο και για τις ΗΠΑ μέση τιμή οκτώωρου μικρότερη από 9ppm και μέση ωριαία τιμή μικρότερη από 35ppm

Η μεγαλύτερη έκθεση του ανθρώπου στο μονοξείδιο του άνθρακα προέρχεται από τον καπνό του τσιγάρου. Η περιεκτικότητα της καρβοξιαιμοσφαιρίνης σε έναν μη καπνιστή είναι περίπου 0.5%, ενώ σε έναν καπνιστή είναι έως δέκα φορές μεγαλύτερη. Επίσης υψηλές συγκεντρώσεις στις οποίες οι άνθρωποι συνήθως εκτίθενται παρατηρούνται σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές με μμεγάλη κυκλοφοριακή συμφόρηση. Τα συμπτώματα της δηλητηρίασης λόγω της έκθεσης στο μονοξείδιο του άνθρακα είναι μεταξύ άλλων ο πονοκέφαλος, η ζάλη, η υπνηλία και η ναυτία. Σε περιπτώσεις μεγαλύτερης έκθεσης, μπορεί να προκληθεί εμετός, λιποθυμία, κώμα ή ακόμα και θάνατος, ανάλογα με τον βαθμό έλλειψης οξυγόνου.

2.3.2 Διοξείδιο του θείου (SO₂), σουλφίδια

Το διοξείδιο του θείου και κάποιες από τις ουσίες που προέρχονται από τις χημικές αντιδράσεις του (πχ. θειικό άλας), είναι υπεύθυνα για κάποιες από τις βαρύτερες αέριες ρυπάνσεις της εποχής μας. Για παράδειγμα, η αιθαλομίχλη του Λονδίνου το 1950, περιείχε διοξείδιο του θείου και καπνό. Οι επιπτώσεις από την έκθεση σε διοξείδιο του θείου είναι πολύ επιβαρυντικές και μπορεί να προκαλέσουν βαριά αναπνευστικά προβλήματα ακόμη και θάνατο [2,3].

Ιδιότητες

Το διοξείδιο του θείου είναι ένα έριο άχρωμο με έντονη ερεθιστική οσμή όταν βρίσκεται σε υψηλές συγκεντρώσεις. Είναι πολύ ευδιάλυτο στο νερό και μπορεί να υγροποιηθεί σε υψηλή πίεση. Κάτω από ατμοσφαιρικές συνθήκες αντιδρά εύκολα με οξειδωτικά ή σωματίδια, και σχηματίζει σουλφίδια και όξινα σωματίδια του θείου, τα οποία είναι πιο επικίνδυνα από το αρχικό διοξείδιο του θείου. Τα όξινα σωματίδια του θείου αποτελούν και τα βασικά συστατικά της όξινης βροχής, που είναι καταστροφική για το περιβάλλον.

Πηγές

Το διοξείδιο του θείου προέρχεται από καύσεις ορυκτών καυσίμων και από την επεξεργασία μεταλλευμάτων. Οι γαιάνθρακες και το πετρέλαιο περιέχουν μέχρι και 6% θείο. Επίσης μπορεί να προέλθει από την οξείδωση των διμεθυλοσουλφιδίων, τις ηφαιστειακές εκπομπές και τις εκπομπές των βιομηχανιών. Επίσης, το SO₂ ελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα με την χημική αντίδραση μεταξύ (CH₃)₂S και H₂S.

Συνολικά οι ποσότητες διοξειδίου του θείου στην ατμόσφαιρα προέρχονται από:

Καύσεις	85%
Μέσα μεταφοράς	7%
Άλλες πηγές	8%

Το διοξείδιο του θείου χρησιμοποιείται ως συντηρητικό στα τρόφιμα και λόγω της δραστηριότητας του ευθύνεται για αλλεργικές αντιδράσεις σε όσους καταναλώνουν τροφές που το περιέχουν. Επιπλέον χρησιμοποιείται στην οινοποιία ως απολυμαντικό για τα σταφύλια και τα βαρέλια του κρασιού αλλά και ως συντηρητικό.

Επίπεδα συγκέντρωσης - Έκθεση

Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις στο διοξείδιο του θείου παρατηρούνται σε περιοχές με εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με καύσιμο λιγνίτη ή μαζούτ και σε περιοχές με εργοστάσια επεξεργασίας μεταλλευμάτων.

Με την αύξηση της απόστασης από την πηγή του διοξειδίου (πχ. καπνοδόχος) αυξάνεται και η συγκέντρωση επικίνδυνων μορφών θειικών αλάτων που δημιουργούνται δευτερογενώς από το διοξείδιο του θείου. Καθώς τα αέρια διασκορπίζονται στην ατμόσφαιρα, η επικίνδυνη για τον ανθρώπινο οργανισμό περιοχή μπορεί να εκτείνεται και σε 25 χιλιόμετρα από την πηγή.

Για την μείωση των εκπομπών διοξειδίου του θείου εγκαθίστανται συστήματα αποθείωσης των απαερίων στις εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και συστήματα μείωσης της περιεκτικότητας θείου σε υγρά καύσιμα.

Τα όρια που έχουν τεθεί για συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου στην Ευρωπαϊκή Ένωση είναι:

- 350μg/m³ μέση ωριαία συγκέντρωση και λιγότερες από 24 παραβιάσεις το χρόνο.
- 125μg/m³ μέση ημερήσια συγκέντρωση και λιγότερες από 3 παραβιάσεις το χρόνο.

Σε αστικές περιοχές, οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του θείου μπορεί να είναι δεκαπλάσιες από εκείνες που παρατηρούνται σε απομακρυσμένες περιοχές, ενώ κοντά σε βιομηχανικές πηγές, μπορεί να παρατηρηθούν και συγκεντρώσεις ως και 1000 φορές μεγαλύτερες.

Η βραχυπρόθεσμη έκθεση στο διοξείδιο του θείου προκαλεί συστολή των αναπνευστικών αγγείων και κατά συνέπεια μπορεί να επιφέρει ασθματικά επεισόδια. Η χρόνια έκθεση στο διοξείδιο του θείου προκαλεί στένωση στην τραχεία, παρόμοια με την χρόνια βρογχίτιδα.

Στο περιβάλλον, το διοξείδιο του θείου προκαλεί αποχρωματισμό των φυτών και ζημιές στα φυλλώματα. Η μετατροπή του διοξειδίου του θείου σε θειικό οξύ που συμβαίνει στην ατμόσφαιρα (όξινη βροχή, χιόνι και όξινα σωματίδια). Μπορεί να προκαλέσει ρύπανση σε περιοχές που βρίσκονται πολύ μακριά από την πρωτογενή πηγή του διοξειδίου του θείου.

2.3.3 Οξείδια του αζώτου (NO/NO₂)

Τα οξείδια του αζώτου είναι αέριοι ρύποι που παράγονται κατά την ανάφλεξη καύσιμης ύλης καθώς και σε φωτοχημικές αντιδράσεις στην ατμόσφαιρα. Τα δύο κύρια οξείδια του αζώτου είναι το διοξείδιο του αζώτου (NO₂) και το μονοξείδιο του αζώτου (NO). Συνήθως αναφερόμαστε σε εκπομπές NO_x που αναφέρονται στο άθροισμα των NO και NO₂ καθώς στην ατμόσφαιρα συντελείται συνεχής αλληλομετατροπή μεταξύ NO και NO₂. [2,3]

Επηρεάζουν άμεσα την υγεία και υποβαθμίζουν το περιβάλλον καθώς συντελούν στην δημιουργία όζοντος στην επιφάνεια της γης, προκαλώντας επιπλέον επιβάρυνση στην ατμόσφαιρα. Το διοξείδιο του αζώτου, μπορεί να διαλυθεί στο νερό, στην ομίχλη, στη βροχή και το χιόνι, και να μετατραπεί σε νιτρικό οξύ.

Ιδιότητες

Το μονοξείδιο του αζώτου είναι ένα άχρωμο αέριο. Είναι πρόδρομος του όζοντος και του νιτρικού οξέος. Δεν επηρεάζει άμεσα την όξινη βροχή.

Το διοξείδιο του αζώτου είναι ένα κιτρινωπό-καφέ αέριο που δίνει στην αιθαλομίχλη το χαρακτηριστικό της καφέ χρώμα. Είναι πολύ δραστικό και ανήκει στην κατηγορία των οξειδωτικών (απομακρύνει ηλεκτρόνια από τα μόρια). Η ιδιότητα καθιστά το διοξείδιο του αζώτου βιολογικά επιβλαβές και επίσης μπορεί να δράσει ως καταλύτης για την παραγωγή όζοντος από πτητικές οργανικές ουσίες (VOCs), με την παρουσία ηλιακού φωτός. Το διοξείδιο του αζώτου μπορεί να αντιδράσει με τους υδρατμούς στην ατμόσφαιρα και με άλλες ουσίες παράγοντας νιτρικό οξύ και όξινα σωματίδια.

Πηγές

Το μονοξείδιο του αζώτου παράγεται από φυσικές πηγές όπως μικρόβια στο χώμα και φυτά μέσω της απονιτροποίησης. Επίσης παράγεται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες όπως η καύση ορυκτών καυσίμων (μέσα μεταφοράς, διυλιστήρια, κλπ), η καύση βιομάζας και διάφορες φωτοχημικές αντιδράσεις.

Το διοξείδιο του αζώτου προέρχεται κυρίως από την οξείδωση του μονοξειδίου του αζώτου και σε μικρό βαθμό από την καύση ορυκτών καυσίμων και βιομάζας. Σε εσωτερικούς χώρους, διοξείδιο του αζώτου παράγεται από συσκευές θέρμανσης μέσω καύσης και από τα τσιγάρα.

Οι κυριότερες πηγές οξειδίων του αζώτου:

Καύση για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και βιομηχανίες	45%
Μεταφορικά μέσα	49%.

Επίπεδα συγκέντρωσης - Έκθεση

Στους εξωτερικούς χώρους, η μέγιστη έκθεση σε οξείδια του αζώτου συμβαίνει σε αστικές περιοχές με επιβαρυσμένη ατμόσφαιρα. Η συγκέντρωση των οξειδίων αυξάνεται κατά τις πρωινές ώρες, λόγω της αυξημένης κυκλοφορίας αυτοκινήτων και της παρουσίας του ηλιακού φωτός το οποίο είναι απαραίτητο για την πραγματοποίηση των φωτοχημικών αντιδράσεων. Επιπλέον τις πρωινές ώρες, οι άνεμοι είναι χαμηλοί και δεν διευκολύνουν την διασπορά των αερίων ρύπων ενώ ταυτόχρονα παρατηρούνται και θερμοκρασιακές αναστροφές. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις σε αστικές περιοχές μπορεί να είναι εκατοντάδες φορές μεγαλύτερες σε σχέση με εξοχικές περιοχές.

Τα όρια που έχουν ορισθεί διεθνώς για τις συγκεντρώσεις οξειδίων του αζώτου στην ατμόσφαιρα είναι για την Ευρωπαϊκή Ένωση 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ως ανώτερη μέση ετήσια συγκέντρωση και ανώτερη μέση ωριαία συγκέντρωση 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (18 φορές ετησίως) και για τις ΗΠΑ μέση ωριαία συγκέντρωση 100 ppb, τιμή για το 98% των ημερήσιων μέγιστων συγκεντρώσεων 1 ώρας, κατά μέσο όρο για 3 χρόνια.

Το διοξείδιο του αζώτου, το πιο τοξικό οξείδιο του αζώτου, ερεθίζει τους πνεύμονες προκαλώντας βλάβη στα ευαίσθητα κύτταρα που τους περιβάλλουν. Οι συγκεντρώσεις στον περιβάλλοντα αέρα πολύ σπάνια φτάνουν σε τιμές που μπορούν να προκαλέσουν ακραία αποτελέσματα, σε μερικά επαγγέλματα όμως μπορεί να εκτεθεί ο οργανισμός σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις.

Μελέτες έχουν δείξει ότι η μακροχρόνια έκθεση σε χαμηλές συγκεντρώσεις μπορεί να προκαλέσει αλλαγές στη δομή των πνευμόνων αλλά και στη λειτουργία τους προκαλώντας εμφύσημα και χρόνια βρογχίτιδα. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται μερικές από τις επιπτώσεις που προκαλεί το διοξείδιο του αζώτου και οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις στις οποίες παρατηρούνται. Αξίζει να σημειωθεί ότι έρευνες δείχνουν ότι η έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις για μικρά χρονικά διαστήματα, είναι πιο επικίνδυνη από την μακροχρόνια έκθεση σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις που παραμένουν σταθερές.

Τα οξείδια του αζώτου έχουν σοβαρές οικολογικές συνέπειες. Οι χειρότερες από αυτές φαίνεται να οφείλονται στο νιτρικό οξύ, που παράγεται από τις αντιδράσεις του διοξειδίου του αζώτου στον αέρα. Η οξίνιση των υδάτων έχει αρνητικές συνέπειες στα ψάρια και άλλα είδη. Η όξινη βροχή σε συνδυασμό με άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες μπορούν να προκαλέσουν συρρίκνωση δασικών εκτάσεων και ανάπτυξη ανεπιθύμητων μορφών χλωρίδας.

2.3.4 Όζον (O3)

Το όζον, το οποίο αποτελεί και το βασικό συστατικό της αιθαλομίχλης, είναι υπεύθυνο για πολλά επεισόδια αέριας ρύπανσης. Όταν βρίσκεται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, απορροφά την επικίνδυνη υπεριώδη ακτινοβολία και δρα προστατευτικά για τους ανθρώπους. Διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες μπορούν να προκαλέσουν μείωση της συγκέντρωσης όζοντος στη στρατόσφαιρα και μπορούν να οδηγήσουν σε αύξηση των καρκίνων του δέρματος από τις υπεριώδεις ακτινοβολίες. Η συγκέντρωση όζοντος στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας έχει πολύ βλαβερές συνέπειες στη υγεία των ζωικών οργανισμών και προκαλεί σημαντικές βλάβες στα δάση και στις καλλιέργειες. [2,3]

Ιδιότητες

Το όζον είναι αέριο με χρώμα κυανό, έχει ευδιάκριτη δριμεία οσμή και μικρή διαλυτότητα στο νερό. Δεν εκλύεται άμεσα στον αέρα αλλά σχηματίζεται από τη χημική αντίδραση πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) με το διοξείδιο του αζώτου, με την παρουσία ηλιακού φωτός (φωτοχημική αντίδραση). Σε υψηλές θερμοκρασίες η αντίδραση είναι πιο έντονη, γι αυτό το καλοκαίρι παρατηρούνται υψηλότερα επίπεδα όζοντος στην ατμόσφαιρα.

Το όζον είναι οξειδωτικό και τοξικό καθώς έχει την ικανότητα να απομακρύνει ηλεκτρόνια από τα μόρια και να ξεκινάει αλυσιδωτές αντιδράσεις οι οποίες διαταράσσουν βασικές δομές στα κύτταρα. Κατά την διάρκεια των φωτοχημικών αντιδράσεων που παράγουν το όζον, παράγονται επίσης και άλλα οξειδωτικά, επίσης επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον, αλλά επειδή οι συγκεντρώσεις τους είναι ανάλογες με την συγκέντρωση του όζοντος, ως ένδειξη της ολικής συγκέντρωσης οξειδωτικών αναφέρονται μόνο τα επίπεδα του όζοντος.

Πηγές

Το όζον δεν εκπέμπεται πρωτογενώς από κάποια πηγή. Παράγεται στην ατμόσφαιρα από τη αντίδραση του μονατομικού οξυγόνου (O) με το διατομικό οξυγόνο (O₂). Το όζον παράγεται δευτερογενώς κατά τη φωτοχημική αντίδραση πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) με το διοξείδιο του αζώτου.

Οι εκπομπές των πρόδρομων ενώσεων προέρχονται από αρκετές διαφορετικές πηγές. Τα VOCs εκπέμπονται από αυτοκίνητα, μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, χημικές βιομηχανίες, διυλιστήρια πετρελαίου και άλλες μονάδες που χρησιμοποιούν διαλύτες όπως στεγνοκαθαριστήρια και καταστήματα χρωμάτων.

Επίπεδα συγκέντρωσης - Έκθεση

Τα όρια που έχουν τεθεί στην Ευρωπαϊκή Ένωση για την συγκέντρωση όζοντος είναι:

- 120μg/m³ ημερήσια μέση τιμή οκταώρου και λιγότερες από 25 παραβιάσεις σε 3 χρόνια.

Η συγκέντρωση του όζοντος μεταβάλλεται κατά την διάρκεια της ημέρας. Νωρίς το πρωί παρατηρούνται τα χαμηλότερα επίπεδα όζοντος, και σταδιακά αυξάνονται καθώς από την κυκλοφορία των οχημάτων αυξάνεται η εκπομπή των πρόδρομων ενώσεων (NO_x, VOC) και αυξάνεται η θερμοκρασία. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις εμφανίζονται στο μέσον της ημέρας. Καθώς το όζον και άλλες οξειδωτικές ουσίες δημιουργούνται αργά (κάποιες ώρες) πολλές φορές, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις οξειδωτικών εμφανίζονται μακριά από την κυρίως πηγή παραγωγής των πρόδρομων ουσιών και προς την κατεύθυνση των επικρατούντων ανέμων.

Τα συμπτώματα από την έκθεση σε επίπεδα όζοντος υψηλότερα των ορίων που έχουν τεθεί περιλαμβάνουν πόνο στο στήθος, βήχα, άσθμα, πνευμονική και ρινική συμφόρηση, ερεθισμό στα μάτια και τη μύτη. Μελέτες έχουν δείξει ότι η τυπική έκθεση στο όζον σε συνδυασμό με έλλειψη άσκησης, επηρεάζει αρνητικά την λειτουργία των πνευμόνων.

Το όζον και τα άλλα οξειδωτικά προκαλούν επίσης σημαντικές ζημιές στις καλλιέργειες και τα δάση κυρίως στο φύλλωμα και γενικότερα στην ανάπτυξη των φυτών.

Τα οξειδωτικά προκαλούν επίσης βλάβες σε διάφορα υλικά, όπως ράγισμα των πλαστικών και του λάστιχου και εξασθένηση των υφαντικών ινών και των χρωστικών ουσιών.

2.3.5 Αιωρούμενα σωματίδια (PM)

Αιωρούμενα σωματίδια ονομάζονται διάφορες ουσίες που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα με μορφή υγρών ή στερεών διακριτών σωματιδίων. Θεωρούνται από τους πιο επικίνδυνους αέριους ρύπους διότι περιέχουν καρκινογόνες ουσίες όπως αμίαντος και καπνός, και διότι επιβαρύνουν ακόμη περισσότερο την δράση άλλων αέριων ρύπων. Το μεγαλύτερο μέρος της μάζας των αιρούμενων σωματιδίων βρίσκεται στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας κυρίως λόγω του ότι οι σημαντικότερες πηγές εκπομπής βρίσκονται κοντά στο έδαφος και το μέγεθος τους δεν επιτρέπει την εύκολη μεταφορά σε υψηλότερα σημεία.[2,3]

Ιδιότητες

Οι ιδιότητες των αιρούμενων σωματιδίων δεν μπορούν να γενικευθούν εύκολα καθώς αναφερόμαστε σε πολλά διαφορετικά σωματίδια από ποικίλες δραστηριότητες.

Γενικά, η διάμετρος αποτελεί βασική παράμετρο για την επικινδυνότητα των σωματιδίων.

Τα μικρότερα σωματίδια είναι συνήθως πιο επικίνδυνα από τα μεγαλύτερα διότι εισπνέονται πιο βαθιά στους πνεύμονες, όπου εγκαθίστανται και προκαλούν βλάβες στους ευαίσθητους ιστούς που εμπλέκονται στην ανταλλαγή του αέρα. Τα μικρότερα σωματίδια παρέχουν επίσης μεγαλύτερη συνολικά επιφάνεια (για συγκεκριμένο βάρος σωματιδίων) για την πραγματοποίηση χημικών αντιδράσεων, κάνοντας ευκολότερη την προσκόλληση τοξικών ουσιών. Τα μικρότερα σωματίδια μπορούν να παραμείνουν στον αέρα για μεγάλα χρονικά διαστήματα και κατά συνέπεια μπορούν να μεταφερθούν σε μεγάλες αποστάσεις από την πηγή. Τα μεγαλύτερα σωματίδια προέρχονται κυρίως από μεταλλεύματα, κατασκευαστικές δραστηριότητες, πυρκαγιές και σκόνη. Κατακάθονται εναποτίθενται πιο γρήγορα και γενικότερα αποτελούν κίνδυνο κυρίως κοντά στην πηγή τους.

Τα αιωρούμενα σωματίδια κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την διάμετρο τους σε:

- PM10 (έχουν διάμετρο μικρότερη από 10 μm).
- PM2.5 (έχουν διάμετρο μικρότερη από 2.5 μm)
- PM1.0 (έχουν διάμετρο μικρότερη από 1.0 μm)

Εκτός από το μέγεθος, σημαντικό χαρακτηριστικό των αιωρούμενων σωματιδίων αποτελεί η χημική τους σύσταση καθώς:

- καθορίζει την επίδραση των ρύπων στην ανθρώπινη υγεία.
- Μπορεί να χρησιμεύσει στον προσδιορισμό της πηγής των ρύπων.

Τα αιωρούμενα σωματίδια συνολικά προέρχονται από τις εξής πηγές:

Βιομηχανικές δραστηριότητες
 Στάσιμες πηγές καύσης
 Μέσα μεταφοράς
 Άλλες πηγές

Επίπεδα συγκέντρωσης - Έκθεση

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει τα παρακάτω όρια συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων:

- PM2.5 : Μέση ετήσια συγκέντρωση 25 μg/m³.
- PM10 : Μέση ετήσια συγκέντρωση 40 μg/m³. Ημερήσια συγκέντρωση 50 μg/m³ λιγότερο από 35 φορές το χρόνο.

Τα παιδιά σε σχέση με τους ενήλικες εισπνέουν βαθύτερα στους πνεύμονες τους αιωρούμενα σωματίδια, και λόγω της αυξημένης δραστηριότητας αλλά και λόγω της μεγαλύτερης παραμονής σε εξωτερικούς χώρους. Γενικότερα, η μμεγαλύτερη έκθεση στα αιωρούμενα σωματίδια παρατηρείται στις αστικές περιοχές και γύρω από σημειακές πηγές ρύπανσης

Οι επιπτώσεις στην υγεία περιλαμβάνουν επιδείνωση της βρογχίτιδας αλλά και σημαντικές αλλαγές στη λειτουργία των πνευμόνων αν τα όρια συγκέντρωσης είναι υψηλά.

Η ύπαρξη αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα έχει επίσης πολύ σημαντικές περιβαλλοντικές συνέπειες όπως.

- Απορροφούν και διαχέουν την ορατή ακτινοβολία περιορίζοντας την ορατότητα της ατμόσφαιρας και συμβάλλοντας αρνητικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.
- Χρησιμεύουν σαν πυρήνες συμπύκνωσης για την δημιουργία νεφών.
- Έχουν σημαντικό ρόλο σε χημικές αντιδράσεις.
- Τα σωματίδια ρυπαίνουν (λερώνουν) τα υφάσματα, τα κτίρια και τα αγάλματα, και προκαλούν ζημιές στα κτίρια και τα υλικά.

2.3.6 Μόλυβδος (Pb)

Είναι βαρύ μέταλλο.

Πηγές

Ο μόλυβδος στην ατμόσφαιρα προέρχεται κυρίως από την επεξεργασία μεταλλευμάτων και μετάλλων και τις μηχανές των αεροσκαφών που λειτουργούν με καύσιμα που περιέχουν μόλυβδο. Επίσης μπορεί να προέρχεται από αποτεφρωτήρες αποβλήτων και βιομηχανίες που χρησιμοποιούν μολυβδούχες ουσίες [2,3]

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει το εξής όριο για την συγκέντρωση Μολύβδου:

- Μέση ετήσια συγκέντρωση 0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Ο μόλυβδος αν προσληφτεί από το οργανισμό διανέμεται με την κυκλοφορία του αίματος και συσσωρεύεται στα οστά. Υψηλά επίπεδα έκθεσης μπορούν να επηρεάσουν το νευρικό σύστημα, τη νεφρική λειτουργία, το ανοσοποιητικό σύστημα, τα αναπαραγωγικά και αναπτυξιακά συστήματα και το καρδιαγγειακό σύστημα. Σε μικρά παιδιά, ακόμη και χαμηλή απορρόφηση μπορεί να συμβάλει σε προβλήματα συμπεριφοράς και μαθησιακά προβλήματα.

Αυξημένες συγκεντρώσεις μολύβδου στο περιβάλλον μπορούν να οδηγήσουν σε μειωμένη ανάπτυξη και ρυθμούς αναπαραγωγής σε φυτά και ζώα και νευρολογικές επιδράσεις στα σπονδυλωτά.

2.3.7 Βενζόλιο

Μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία, ακόμα και εκδήλωση καρκίνου καθώς είναι τοξικό αέριο.[2,3]

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει το εξής όριο για την συγκέντρωση Βενζολίου:

- 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ μέση ετήσια συγκέντρωση

Πηγές

Στη φύση εκπέμπεται από την ηφαιστειακή δραστηριότητα και κατά τις δασικές πυρκαγιές.

Ανθρωπογενείς δραστηριότητες που μπορούν να εκπέμψουν βενζόλιο είναι η καύση άνθρακα, οι λειτουργίες των αυτοκινήτων, οι εξατμίσεις υδρογονανθράκων από πρατήρια βενζίνης, η χρήση βιομηχανικών διαλυτών και καθαριστικών υλικών, και το κάπνισμα

2.3.8 Αρσενικό (As)

Μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία, ακόμα και εκδήλωση καρκίνου καθώς είναι πολύ τοξικό.[2,3]

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει το εξής όριο για την συγκέντρωση Αρσενικού:

- 6 ng/m³ ως μέση ετήσια συγκέντρωση

Πηγές

Στη φύση εκπέμπεται από την ηφαιστειακή δραστηριότητα.

Ανθρώπινες δραστηριότητες που συντελούν στην παρουσία αρσενικού στον αέρα είναι η εξόρυξη, η τήξη μετάλλων, η καύση ορυκτών καυσίμων, η παραγωγή και χρήση γεωργικών παρασιτοκτόνων και η επεξεργασία ξύλου με συντηρητικά.

2.3.9 Κάδμιο (Cd)

Μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα στα νεφρά και στους πνεύμονες, ακόμα και καρκίνο των πνευμόνων.[2,3]

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει το εξής όριο για την συγκέντρωση Καδμίου:

- 5 ng/m³ ως μέση ετήσια συγκέντρωση

Πηγές

Στη φύση εκπέμπεται κατά τις ηφαιστειακές δραστηριότητες

Κυριότερες ανθρωπογενείς πηγές αποτελούν η εξόρυξη, η τήξη και ο καθαρισμός μη σιδηρούχων μετάλλων, η καύση ορυκτών καυσίμων, η αποτέφρωση των αστικών αποβλήτων (ιδίως μπαταρίες και πλαστικά που περιέχουν κάδμιο).

2.3.10 Νικέλιο (Ni)

Σε υψηλές συγκεντρώσεις μπορεί να προκαλέσει σοβαρά αναπνευστικά προβλήματα, ακόμα και καρκίνο των πνευμόνων.[2,3]

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει το εξής όριο για την συγκέντρωση Νικελίου

- 20 ng/m³ ως μέση ετήσια συγκέντρωση

Πηγές: Κυριότερες ανθρωπογενείς πηγές αποτελούν η καύση ορυκτών καυσίμων και η βιομηχανία. Στη φύση εκπέμπεται κατά τις ηφαιστειακές δραστηριότητες και τις δασικές πυρκαγιές.

2.3.11 Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs)

Ορισμένοι από τους Πολυκυκλικούς Αρωματικούς Υδρογονάνθρακες και κυρίως το βενζο(α)πυρενίο έχουν χαρακτηριστεί ως καρκινογόνες ενώσεις.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει το εξής όριο για την συγκέντρωση βενζο(α)πυρενίου.

- 1 ng/m³ ως μέση ετήσια συγκέντρωση

Πηγές:

Στη φύση εκπέμπεται κατά τις ηφαιστειακές δραστηριότητες και τις δασικές πυρκαγιές.

Κυριότερες ανθρωπογενείς πηγές αποτελούν η βιομηχανία (παραγωγής κωκ, αλουμινίου και επεξεργασίας ξύλου), η θέρμανση στις οικίες όταν χρησιμοποιούνται ξύλα και κάρβουνο, και τα οχήματα, κυρίως δε αυτά που χρησιμοποιούν πετρέλαιο ως καύσιμο.

3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ

Γενικά όταν αναφερόμαστε στην μέτρηση ατμοσφαιρικών ρύπων μπορούμε να διαχωρίσουμε τέσσερις βασικές λειτουργίες:[5]

- Διαδικασία Δειγματοληψίας
- Μέτρηση αιωρούμενων σωματιδίων
- Μέτρηση αερίων ρύπων
- Άμεση μέτρηση των ρύπων ή συλλογή και ανάλυση δειγμάτων σε ύστερο χρόνο.

3.1 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ

Το πρώτο βήμα για την παρακολούθηση των αερίων ρύπων είναι η λήψη αντιπροσωπευτικού δείγματος. Μια διάταξη που χρησιμοποιείται για τη συλλογή ατμοσφαιρικού δείγματος και την ανάλυση των ρύπων που υπάρχουν σε αυτό αναφέρεται γενικά ως **συρμός** δειγματοληψίας.

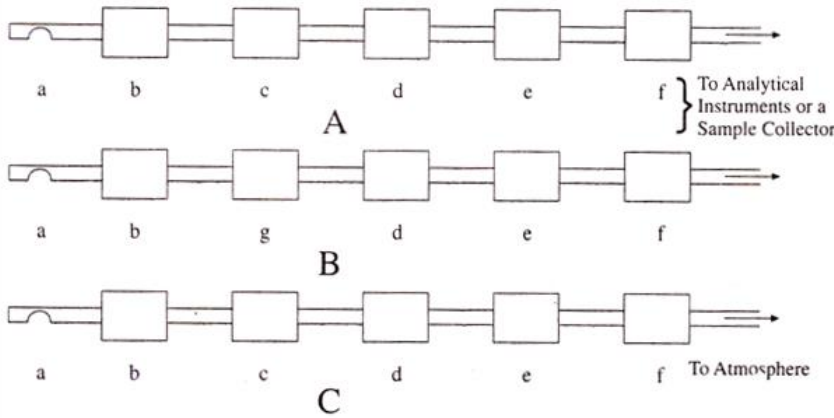
Μια τυπική διάταξη περιέχει διάφορα εξαρτήματα ανάλογα με την πηγή του δείγματος και τις απαιτήσεις των μετρήσεων. Για παράδειγμα:

- Εάν η μέτρηση γίνεται στην ελεύθερη ατμόσφαιρα ή σε κάποιον συγκεκριμένο αγωγό όπως μια καπνοδόχος.
- Εάν είναι επιθυμητή η παρακολούθηση μόνο των αιωρούμενων σωματιδίων ή και των αερίων ρύπων.
- Εάν απαιτείται η άμεσος υπολογισμός των αερίων ρύπων στον τόπο τη μέτρησης ή αν μπορεί να γίνει η συλλογή και στην συνέχεια να γίνει η ανάλυση με κάποια επιπλέον επεξεργασία. Για την μέτρηση των αιωρούμενων σωματιδίων απαιτείται συνήθως μια επιπλέον επεξεργασία για τον ακριβή υπολογισμό των συγκεντρώσεων τους.

Μια μετρητική διάταξη μπορεί να αποτελείται από κάποια από τα παρακάτω στοιχεία:

- Πολλαπλή δειγματοληψίας,
- Συλλέκτη σωματιδίων,
- Θερμαντήρα/Ψύκτη/Συμπυκνωτή,
- Αντλία αναρρόφησης (τύπος ρυθμιζόμενου όγκου),
- Ροόμετρο,
- On-line όργανα παρακολούθησης αερίων ρύπων ή συλλέκτης δειγμάτων.

Ενδεικτικές διατάξεις για διαφορετικούς τύπους μετρήσεων παρουσιάζονται στην Εικόνα 1:



Εικόνα 1. Σχηματικό διάγραμμα συστήματος Δειγματοληψίας.

(α) Πολλαπλή, (β) Ψύκτης / Θερμαντήρας, (γ) Συλλέκτης σωματιδίων, (δ) Συμπυκνωτής, (ε) Αντλία, (στ) Ροόμετρο, (ζ) Φίλτρο.

A. Διάταξη για παρακολούθηση Σωματιδίων και Αερίων ρύπων.

B. Διάταξη για παρακολούθηση Μόνο Αερίων ρύπων.

C. Διάταξη για παρακολούθηση μόνο Σωματιδίων.

Κατά τη συλλογή ενός αέριου δείγματος θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι ο ρυθμός ροής ενός ρεύματος εκροής και η σύνθεσή του μπορεί να μεταβάλλονται και στιγμιαία και μακροπρόθεσμα και οι αλλαγές αυτές μπορεί να εξαρτώνται από τη θέση του σημείου δειγματοληψίας. Για το λόγο αυτό έχουν προταθεί τυποποιημένες διαδικασίες για τη δειγματοληψία, έτσι ώστε το δείγμα που συλλέγεται να είναι ομαλοποιημένο για το χρονικό διάστημα της δειγματοληψίας. Σε on-line αναλυτές, οι τιμές του δείγματος είναι στιγμιαίες.

3.1.1 Δομή διάταξης δειγματοληψίας.

Όταν η δειγματοληψία πρόκειται να πραγματοποιηθεί από καπνοδόχο ή πηγή διαφορετική από την ατμόσφαιρα του περιβάλλοντος, χρησιμοποιείται ένας ειδικός αγωγός (πολλαπλή) στην αρχή της διάταξης δειγματοληψίας. Θα πρέπει να είναι κατασκευασμένη από μη δραστικό και μη προσροφητικό υλικό, όπως τεφλόν ή γυαλί ή κάποιο κράμα ανθεκτικό στη θερμότητα και τη διάβρωση. Θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν συντομότερη και δεν πρέπει να περιστρέφεται, διαφορετικά μπορεί να υπάρχει συσσώρευση σωματιδίων μέσα σε αυτή. Για να αποφευχθεί η θερμική βλάβη της πολλαπλής μπορεί να ψυχθεί, αλλά πρέπει να ληφθεί μέριμνα ώστε η θερμοκρασία του δείγματος να μην πέσει κάτω από το σημείο δρόσου του.

Ένας συλλέκτης σκόνης χρησιμοποιείται όταν είναι επιθυμητή η ανάλυση των αιωρούμενων σωματιδίων (SPM). Διαφορετικά, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας απαγωγέας σκόνης.

Μια μηχανική αντλία ή μια κατάλληλη συσκευή χρησιμοποιείται για την αναρρόφηση του δείγματος.

Το ροόμετρο χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του συνολικού όγκου του δείγματος που διέρχεται από την διάταξη.

Ενδέχεται να απαιτείται ψύκτης ως μέρος της διάταξης, εάν η θερμοκρασία του αερίου είναι τέτοια ώστε τα μπορεί να προκαλέσει θερμική βλάβη στα στοιχεία της διάταξης.

Ένας θερμαντήρας μπορεί να είναι απαραίτητος εάν η θερμοκρασία του δείγματος είναι τέτοια ώστε να μπορούν να συμπυκνωθούν οι ατμοί στους συνδεδετικούς σωλήνες πριν από τη συλλογή σωματιδίων σκόνης από ένα δείγμα.

Όταν υπάρχει συμπυκνώσιμος ατμός σε ένα δείγμα σε υψηλή συγκέντρωση, θα πρέπει να χρησιμοποιείται συμπυκνωτής για τη μείωση της συγκέντρωσής του πριν από την ανάλυση των αερίων συστατικών του δείγματος ή τη συλλογή του δείγματος σε δέκτη.

3.1.2 Δειγματοληψία ατμοσφαιρικού αέρα

Για τη δειγματοληψία του ατμοσφαιρικού αέρα, η βασική μονάδα που χρησιμοποιείται συνήθως είναι γνωστή ως «δειγματολήπτης μεγάλου όγκου», ιδίως όταν είναι επιθυμητή η ανάλυση των σωματιδίων.

Τα κύρια συστατικά μιας τέτοιας μονάδας είναι:

- Φίλτρο,
- Ένας ανεμιστήρας
- Ένα ροόμετρο.

Όταν είναι επιθυμητό να εκτιμηθούν οι αέριοι ρύποι, χρησιμοποιούνται επίσης είτε όργανα on-line είτε ένας συλλέκτης δειγμάτων ή μια διάταξη φυσσαλιδωτων (bubblers) σε συνδυασμό με τις παραπάνω μονάδες..

3.1.3 Δειγματοληψία από καπνοδόχο

Η δειγματοληψία σε μια καπνοδόχο γίνεται εισάγοντας μια πολλαπλή σε αυτήν μέσω ενός αγωγού. Γενικά, ο αγωγός είναι ένας τυπικός σωλήνας διαμέτρου 75 mm τοποθετημένος στο εσωτερικό της καπνοδόχου και εκτείνεται 50 έως 200 mm στο εξωτερικό. Όταν δεν γίνεται δειγματοληψία κλείνει με καπάκι. Για καπνοδόχους μεγαλύτερης διαμέτρου, η διάμετρος της θύρας μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 75 mm. Ανάλογα με το μέγεθος της καπνοδόχου απαιτείται και η χρήση περισσοτέρων αγωγών διατεταγμένων κατάλληλα ώστε να γίνεται σωστή λήψη δειγμάτων από την καπνοδόχο.

3.2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

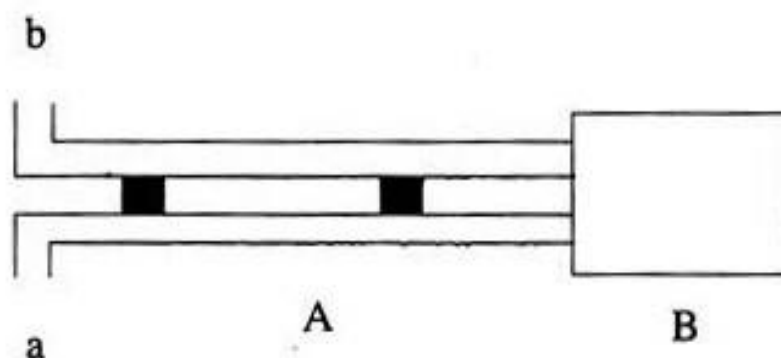
Σκοπός της μέτρησης σωματιδίων μπορεί να είναι η εκτίμηση της συγκέντρωσης μάζας σωματιδίων, της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων και της χημικής σύνθεσης των σωματιδίων.

Όταν είναι επιθυμητό απλά να εκτιμηθεί η συγκέντρωση της μάζας σωματιδίων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο ένα κατάλληλο φίλτρο. Το μέσο διήθησης μπορεί να είναι κατασκευασμένο από ίνες κυτταρίνης ή πολυμερείς ίνες ή ίνες γυαλιού ή συνθετική μεμβράνη. Η επιλογή εξαρτάται από τη θερμοκρασία του αερίου. Η μάζα των σωματιδίων που έχουν συλληφθεί σε ένα φίλτρο εκτιμάται από τη διαφορά στο βάρος του φίλτρου πριν και μετά τη διήθηση. Το φίλτρο θα πρέπει να ξηραίνεται σε κλίβανο πριν από τη ζύγιση, ώστε να αποφεύγεται κάθε σφάλμα λόγω απορρόφησης υγρασίας ή οποιουδήποτε άλλου ατμού, κατά τη διάρκεια ή πριν από τη διήθηση.

Ένα φίλτρο δεν είναι κατάλληλη συσκευή όταν πρόκειται για την εκτίμηση της κατανομής μεγέθους σωματιδίων ή/και τη χημική ανάλυση των σωματιδίων, καθώς η ποσοτική ανάκτηση των σωματιδίων που έχουν συλληφθεί από ένα φίλτρο είναι σχεδόν αδύνατη.

Για τον προσδιορισμό της κατανομής μεγέθους και τη χημική ανάλυση των αερίων σωματιδίων χρησιμοποιείται προεξοχή ή σειρά προσκρουστών. Τα σωματίδια που συλλέγονται στην πρόσκρουση μαζί με τους συμπυκνωμένους ατμούς, εάν υπάρχουν, ανακτώνται ποσοτικά και αναλύονται μετά την ξήρανση. Για την παρακολούθηση των σωματιδίων από καπνοδόχο, η δειγματοληψία πρέπει να πραγματοποιείται υπό ισοκινητική κατάσταση, δηλαδή η ταχύτητα του αερίου μέσω της πολλαπλής δειγματοληψίας πρέπει να είναι η ίδια με εκείνη μέσω της καπνοδόχου στο σημείο δειγματοληψίας. Εάν η δειγματοληψία γίνει υπό υπερ-ισοκινητική κατάσταση, τότε τα συλλεγόμενα σωματίδια θα έχουν μεγαλύτερο ποσοστό λεπτότερων και ελαφρύτερων σωματιδίων από τα πραγματικά. Ενώ όταν λαμβάνονται δείγματα υπό υπο-ισοκινητική κατάσταση, τα συλλεγόμενα σωματίδια θα περιέχουν περισσότερα από τα μεγαλύτερα και βαρύτερα σωματίδια. Δεδομένου ότι στην πράξη είναι δύσκολο να διατηρηθεί αυστηρά ισοκινητική κατάσταση, η απόκλιση από την ισοκινητική κατάσταση δεν πρέπει να υπερβαίνει το $\pm 10\%$.

Για να διατηρηθεί η ισοκινητική κατάσταση δειγματοληψίας, είναι απαραίτητο να μετρηθεί η ταχύτητα του αερίου καπνοδόχου στο σημείο δειγματοληψίας. Η ταχύτητα μετράται με ένα συγκρότημα τύπου S (Stauscheibe ή αντίστροφου τύπου) pitot σωλήνα-μανόμετρο.



Εικόνα 2. Σύστημα Stauscheibe

A. Σωλήνας Pitot

α) Άνοιγμα προς το άνω μέρος της ροής

β) Άνοιγμα προς το κάτω μέρος της ροής

B. Μέτρηση Διαφορικής Πίεσης/Εμφάνιση Ταχύτητας Ροής.

3.3 ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ

Οι αέριοι ρύποι μπορούν να μετρώνται είτε επιτόπου είτε ετεροχρονισμένα μετά τη συλλογή ενός δείγματος. Πριν από την ανάλυση ενός δείγματος, πρέπει να απομακρύνονται τα σωματίδια και οι συμπυκνώσιμοι ατμοί.

Προτιμάται η επιτόπια ανάλυση καθώς αποδίδει δεδομένα γρήγορα. Ωστόσο, όταν ένα σημείο δειγματοληψίας βρίσκεται σε απομακρυσμένη τοποθεσία ή όταν δεν απαιτούνται αμέσως δεδομένα, μπορεί να συλλέγεται δείγμα και η συγκέντρωση των ρύπων στο δείγμα μπορεί να εκτιμάται σε κάποια άλλη στιγμή.

3.3.1 Επιτόπια ανάλυση (in-situ analysis)

Όταν απαιτείται η μέτρηση ενός δείγματος αμέσως μετά τη συλλογή του, πραγματοποιείται επιτόπια ανάλυση με τη βοήθεια αναλυτικών οργάνων/ οργάνων τοποθετημένων στην διάταξη δειγματοληψίας. Η διάταξη αυτή μπορεί να χρησιμοποιείται για τη συνεχή παρακολούθηση των εκπομπών. Πολύ συχνά αυτό απαιτεί την παροχή κατάλληλου περιβλήματος για τα όργανα, καθώς αυτά είναι ευαίσθητα στη σκόνη, την υγρασία και τη θερμοκρασία. Για την online ανάλυση ενός αερίου εισάγεται ένας μετρούμενος όγκος του (απαλλαγμένος από σκόνη) σε ένα όργανο το οποίο μετρά, εμφανίζει ή καταγράφει τη συγκέντρωση ενός ή περισσότερων συστατικών του δείγματος.

3.3.2 Ενόργανες μέθοδοι (Instrumental Methods)

Ειδικά όργανα (αναλυτές CEM) είναι διαθέσιμα για την παρακολούθηση αερίων ρύπων όπως SO₂, NO, NO₂, O₃, CO και υδρογονάνθρακες. Τα όργανα αυτά χρησιμοποιούν διάφορες τεχνικές και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση των απαερίων μιας καπνοδόχου ή και του ατμοσφαιρικού αέρα. Από τις διάφορες τεχνικές, η αέρια χρωματογραφία (GC) είναι ευέλικτη, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση διαφόρων ρύπων, όπως SO₂, NO_x, CO και υδρογονάνθρακες. Το ζωτικό συστατικό μιας αέριας χρωματογραφίας είναι ο ανιχνευτής της, ο οποίος αναγνωρίζει και ανιχνεύει τη συγκέντρωση των διαφόρων συστατικών ενός δείγματος. Ένας ανιχνευτής μπορεί να είναι ειδικός για τα συστατικά.

Παρακάτω παρατίθενται ορισμένοι ανιχνευτές συγκεκριμένων ρύπων.

SO ₂	Φωτομετρικός Ανιχνευτής Φλόγας (FPD)
NO ₂	Ανιχνευτής σύλληψης ηλεκτρονίων (ECD)
CO	Ανιχνευτής ιονισμού φλόγας (FID)
Υδρογονάνθρακες	Ανιχνευτής ιονισμού φλόγας (FID)

Πίνακας 1. Τυπικοί ανιχνευτές ρύπων

Διατίθενται επίσης όργανα που χρησιμοποιούν ειδικές τεχνικές για την παρακολούθηση μόνο ενός συγκεκριμένου ρύπου. Ορισμένες από αυτές τις τεχνικές παρατίθενται παρακάτω:

CO	Non-dispersive Infrared Photometry (NDIR)
O3	Chemiluminescence, Coulometry
NOX	Chemiluminescence
SO2	Conductometry, Coulometry, NDIR, Spectrometry, Electrochemical Method.

Πίνακας 2. Μέθοδοι για ανίχνευση συγκεκριμένου ρύπου

Οι βασικές αρχές των παραπάνω τεχνικών αναλύονται εν συντομία παρακάτω.

3.3.2.1 Αέρια χρωματογραφία

Τα βασικά συστατικά ενός αέριου χρωματογράφου είναι:

- Μια συσκευασμένη στήλη (ένας περιτυλιγμένος σωλήνας) που περιέχει μερικά κοκκώδη σωματίδια (μερικές φορές εμποτισμένα με υγρό). Η στήλη χρησιμεύει ως κλίνη απορρόφησης/προσρόφησης,
- περίβλημα στήλης με έλεγχο θερμοκρασίας,
- Κατάλληλες διατάξεις για την εισαγωγή δείγματος αερίου και φέροντος αερίου στη βάση της στήλης (είσοδος) και
- Ανιχνευτής τοποθετημένος αμέσως μετά τη στήλη

Η διαδικασία ανάλυσης είναι η έγχυση προκαθορισμένου όγκου δείγματος αερίου στη βάση της στήλης. Η στήλη περιέχει ένα προεπιλεγμένο προσροφητικό, το οποίο εξαρτάται από τα συστατικά που υπάρχουν στο δείγμα που πρόκειται να αναλυθεί. Τα συστατικά προσροφώνται στην προσροφητική κλίση και εκροφώνται από ένα ρεύμα προεπιλεγμένου φέροντος αερίου που ρέει μέσω της στήλης. Ο διαχωρισμός των συστατικών του δείγματος μεταξύ της κλίσης και του φέροντος αερίου πραγματοποιείται επανειλημμένα καθώς τα συστατικά μεταφέρονται προς την έξοδο της στήλης από το φέρον αέριο. Κάθε συστατικό θα ταξιδέψει με τη δική του ταχύτητα μέσα από τη στήλη και τελικά θα βγει από τη στήλη και θα φτάσει στον ανιχνευτή με τη μορφή μιας ζώνης. Το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο ζωνών και το πλάτος κάθε ζώνης εξαρτώνται από το λόγο του συντελεστή κατανομής των συστατικών κάτω από τις δεδομένες παραμέτρους του συστήματος. Ο ανιχνευτής δίνει ένα σήμα που δείχνει το χρόνο εμφάνισης μιας ζώνης.

Το σήμα παρατείνεται όσο ένα συγκεκριμένο συστατικό συνεχίζει να βγαίνει από τη στήλη. Το μέγεθος του σήματος θα εξαρτηθεί από τη συγκέντρωση του συστατικού στο φέρον αέριο, το οποίο με τη σειρά του θα εξαρτηθεί από τη συγκέντρωσή του στο δείγμα. Τα δεδομένα καταγράφονται ως γραφική παράσταση του χρόνου έναντι της συγκέντρωσης των συγκεκριμένων συστατικών στο φέρον αέριο. Με βάση την έκταση στην γραφική παράσταση εκτιμάται η συγκέντρωση του συγκεκριμένου συστατικού στο δείγμα.

3.3.2.2 Μη διασκορπιστική υπέρυθη φωτομετρία (NDIR)

Η αρχή στην οποία βασίζεται αυτή η μέθοδος είναι η επιλεκτική απορρόφηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας από ένα συστατικό, για παράδειγμα, μονοξείδιο του άνθρακα (CO) που υπάρχει σε ένα δείγμα αερίου.

Μια μονάδα NDIR έχει τα ακόλουθα συστατικά:

- Μια υπέρυθρη πηγή,
- Ένα διάφραγμα αποκοπής,
- Ένα κύτταρο δείγματος (τύπος ροής)
- Ένας ανιχνευτής υπέρυθρων και
- Ένα κύτταρο αναφοράς (γεμάτο με ένα αέριο που δεν απορροφά υπέρυθρη ακτινοβολία).

Μια μονάδα «υπέρυθρης ακτινοβολίας χωρίς διασπορά» λειτουργεί όπως περιγράφεται παρακάτω: Ένα διάφραγμα εκθέτει κατά διαστήματα το κύτταρο δείγματος και το κύτταρο αναφοράς σε υπέρυθρη ακτινοβολία. Η προσπίπτουσα ακτινοβολία περνάει μέσα από το κύτταρο αναφοράς ουσιαστικά χωρίς καμία απορρόφηση και φτάνει στον ανιχνευτή. Η ένταση της ακτινοβολίας που μεταδίδεται μέσω του κυττάρου του δείγματος μειώνεται λόγω της απορρόφησης από το CO που υπάρχει στο δείγμα. Η διαφορά μεταξύ των ποσοτήτων ενέργειας που φθάνουν στον ανιχνευτή μέσω του κυττάρου αναφοράς και εκείνης μέσω του κυττάρου δείγματος είναι ανάλογη με τη συγκέντρωση CO στο δείγμα. Ορισμένα συστατικά, όπως οι υδρατμοί που υπάρχουν σε ένα δείγμα, μπορούν να επηρεάσουν τη ακριβή ποσοτική εκτίμηση του CO.

3.3.2.3 Τεχνική χημειοφωταύγειας (Chemiluminescence)

Αυτή η τεχνική βασίζεται στο γεγονός ότι όταν ένας ρύπος αντιδρά με ένα συγκεκριμένο αντιδρών (σε μεγάλη περίσσεια) τα μόρια του προϊόντος που σχηματίζονται θα βρίσκονται σε υψηλότερη κατάσταση διέγερσης. Καθώς τα μόρια του προϊόντος επανέρχονται από την υψηλότερη κατάσταση διέγερσης στην κανονική τους (βασική) κατάσταση, η ενέργεια απελευθερώνεται με τη μορφή φωτός. Η ένταση του εκπεμπόμενου φωτός είναι ευθέως ανάλογη με τη συγκέντρωση του ρύπου που υπάρχει σε ένα δείγμα. Η εκπεμπόμενη ένταση φωτός μετράται συνήθως με τη βοήθεια ενός φωτο-πολλαπλασιαστή. Για την εκτίμηση της συγκέντρωσης του όζοντος (O₃) σε ένα δείγμα, το αντιδρών συστατικό που χρησιμοποιείται είναι το αιθυλένιο. Στην περίπτωση μονοξειδίου του αζώτου (NO) το αντιδρών συστατικό είναι το όζον (O₃). Για την εκτίμηση του NO₂ αρχικά μειώνεται ποσοτικά σε NO και στη συνέχεια εκτιμάται ως NO.

3.3.2.4 Αγωγιμώδης τεχνική (Conductometric)

Η βασική ιδέα πίσω από αυτή την τεχνική είναι το γεγονός ότι όταν ένας συγκεκριμένος ρύπος απορροφάται σε ένα κατάλληλο υγρό, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του προκύπτοντος διαλύματος θα ήταν διαφορετική από αυτή του απορροφητικού. Η μεταβολή της αγωγιμότητας θα είναι ανάλογη με τη συγκέντρωση του ρύπου που υπάρχει σε ένα δείγμα. Το απορροφητικό υγρό πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε να απορροφά μόνο έναν από τους ρύπους που υπάρχουν σε ένα δείγμα. Γενικά, το αποσταγμένο νερό ή ένα υδατικό διάλυμα χρησιμοποιείται ως απορροφητικό.

3.3.2.5 Κουλομετρική Τεχνική (Coulometric Technique)

Η κουλομετρική ανάλυση πραγματοποιείται με αντίδραση ενός συγκεκριμένου ρύπου που υπάρχει σε ένα αέριο δείγμα με ένα υδατικό διάλυμα KI ή KBr σε ένα ηλεκτρολυτικό κύτταρο όπου απελευθερώνεται ιώδιο ή βρώμιο. Το απελευθερωμένο αλογονίδιο συλλέγεται στην κάθοδο του κυττάρου. Το ρεύμα μέσω του κουλόμετρου είναι ανάλογο με την ποσότητα του απελευθερωμένου αλογονιδίου, το οποίο με τη σειρά του θα είναι ανάλογο με τη συγκέντρωση του συγκεκριμένου ρύπου που υπάρχει στο δείγμα. Η μέθοδος αυτή δεν είναι ειδική για το όζον, διότι μετρά τα συνολικά οξειδωτικά που υπάρχουν σε ένα δείγμα.

3.3.2.6 Φασματομετρική τεχνική (Spectrometric Technique)

Αυτή η τεχνική είναι κάπως παρόμοια με την NDIR. Το φως (IR/UV) από μια πηγή φιλτράρεται για να απομακρυνθεί το φως όλων των μηκών κύματος εκτός από μια στενή ζώνη που απορροφάται από έναν συγκεκριμένο ρύπο που υπάρχει σε ένα αέριο δείγμα. Στη συνέχεια, οι ακτίνες της επιλεγμένης ζώνης του φάσματος διέρχονται από ένα κύτταρο, στο οποίο ρέει ένα φιλτραρισμένο, συμπυκνώσιμο ελεύθερο δείγμα αερίου. Η ένταση της μεταδιδόμενης ακτινοβολίας σε σχέση με εκείνη της μη εξασθενημένης δέσμης είναι ανάλογη με τη συγκέντρωση του ρύπου που υπάρχει στο δείγμα.

3.3.2.7 Ηλεκτροχημική τεχνική (Electrochemical Technique)

Ένας ηλεκτροχημικός αναλυτής μπορεί να αποτελείται από μια ημι-διαπερατή μεμβράνη, ένα φιλμ ηλεκτρολύτη, ένα ηλεκτρόδιο ανίχνευσης και ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς βυθισμένο στον ηλεκτρολύτη. Ρεύμα αερίου που περιέχει τον ρύπο του οποίου η συγκέντρωση πρόκειται να εκτιμηθεί διέρχεται πάνω από την ημι-διαπερατή μεμβράνη. Ο ρύπος μπορεί να μεταναστεύσει επιλεκτικά κατά μήκος της μεμβράνης και να παράγει σήμα (τάση) στο φιλμ ηλεκτρολύτη. Το σήμα (τάση) θα ληφθεί από το ηλεκτρόδιο ανίχνευσης. Η διαφορά τάσης μεταξύ του ηλεκτροδίου ανίχνευσης και του ηλεκτροδίου αναφοράς είναι ανάλογη με τη συγκέντρωση ρύπων στο δείγμα.

3.3.3 Χημικές Μέθοδοι

Για την μέτρηση ρύπων εφαρμόζονται δύο χημικές μέθοδοι: Γρήγορη μέθοδος και η κλασσική μέθοδος.

3.3.3.1 Γρήγορη μέθοδος

Η γρήγορη μέθοδος αποδίδει πληροφορίες σε σύντομο χρονικό διάστημα. Δεν απαιτεί εξειδικευμένο χειριστή. Για κάθε ρύπο χρησιμοποιείται ειδικός ανιχνευτής. Οι συγκεντρώσεις ορισμένων ρύπων μπορεί να κυμαίνονται από χαμηλές έως μάλλον υψηλές. Για έναν τέτοιο ρύπο πρέπει να επιλέγεται ανιχνευτής με το κατάλληλο εύρος ανάλογα με την περίπτωση. Μια διάταξη για γρήγορη ανάλυση αποτελείται από έναν σφραγισμένο γυάλινο σωλήνα (ανιχνευτή) γεμάτο με ένα ειδικό ρύπο αντιδραστήριο που προσροφάται σε ορισμένους αδρανείς κόκκους ή το ίδιο το αντιδραστήριο σε κοκκώδη μορφή και μια χειροκίνητη αντλία θετικού εκτοπίσματος. Ο σωλήνας είναι εφοδιασμένος με βύσματα σε κάθε άκρο, τα οποία λειτουργούν ως φίλτρα. Αυτά συγκρατούν επίσης τα κοκκώδη σωματίδια ως συσκευασμένο κρεβάτι. Μια κλίμακα άμεσης

ανάγνωσης (γενικά σε μονάδα ppmv) εκτυπώνεται στην εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα κατά μήκος του. Η σήμανση ξεκινά αμέσως μετά το βύσμα φίλτρου στο μπροστινό άκρο. Η μέθοδος είναι κατάλληλη για την παρακολούθηση των ρύπων που υπάρχουν στον ατμοσφαιρικό αέρα.

Η διαδικασία λειτουργίας μιας τέτοιας μονάδας είναι η θραύση των σφραγισμένων άκρων ενός σωλήνα ανιχνευτή (ειδικού για συγκεκριμένο ρύπο) και η προσάρτησή τους σε μια αντλία με τέτοιο τρόπο ώστε ένα δείγμα αερίου να λαμβάνεται μέσω του πρόσθιου άκρου του σωλήνα. Με τη λειτουργία της αντλίας, ένας γνωστός όγκος δείγματος (όπως καθορίζεται από τον κατασκευαστή του ανιχνευτή) αναρροφάται μέσω του σωλήνα. Θα λάβει χώρα στιγμιαία αντίδραση μεταξύ του αντιδραστήριου και του ρύπου με αποτέλεσμα την απότομη αλλαγή του χρώματος της κοκκώδους κλίνης στο σωλήνα. Το μήκος του χρωματισμένου τμήματος της κοκκώδους κλίνης εξαρτάται από τη συγκέντρωση του ρύπου που υπάρχει σε ένα δείγμα, το οποίο μπορεί να διαβαστεί από την τυπωμένη κλίμακα στο σωλήνα. Ένας σωλήνας μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο μία φορά. Διατίθενται σωλήνες επιλογής για την παρακολούθηση κοινών ανόργανων αερίων ρύπων καθώς και μιας ευρείας ποικιλίας οργανικών ρύπων.

3.3.3.2 Κλασική Μέθοδος

Η κλασική μέθοδος αναφέρεται επίσης ως μέθοδος υγρής χημείας. Αυτή η μέθοδος είναι σχετικά χρονοβόρα και η ακρίβειά της εξαρτάται από την ικανότητα ενός αναλυτή. Στη μέθοδο αυτή, ένας γνωστός όγκος δείγματος αερίου χωρίς σκόνη αφήνεται να ρέει με μέτριο ρυθμό μέσω μιας σειράς φυσαλίδων, καθεμία από τις οποίες περιέχει διαλύτη με ή χωρίς ορισμένα διαλυμένα αντιδραστήρια. Κάθε φυσαλίδα θα παγιδεύει μόνο έναν συγκεκριμένο ρύπο ανάλογα με τον διαλύτη / αντιδραστήριο που υπάρχει. Οι φυσαλίδες πρέπει να αλληλουχούνται σωστά. Μόλις επιτραπεί σε ένα δείγμα να διέλθει από το συρμό των φυσαλίδων, αυτές πρέπει να αποσπαστούν και το περιεχόμενό τους πρέπει να αναλυθεί ποσοτικά για την εκτίμηση των παγιδευμένων ρύπων.

3.4 ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΤΕΡΟΧΡΟΝΙΣΜΕΝΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

Μερικές φορές προτιμάται η συλλογή ενός δείγματος αερίου και στη συνέχεια η ανάλυσή του σε εργαστήριο σε μια κατάλληλη στιγμή. Για να πραγματοποιηθεί ανάλυση με αυτόν τον τρόπο είναι απαραίτητο να διατηρηθεί ένα δείγμα ως έχει ή να διαχωριστεί ποσοτικά κάθε συστατικό (ρύπος) και στη συνέχεια να διατηρηθεί. Για την επίτευξη αυτού του στόχου μπορεί να υιοθετηθεί οποιοδήποτε από τα ακόλουθα βήματα:

3.4.1 Συλλογή δείγματος σε εκκενωμένο δέκτη

Ένα δείγμα αερίου χωρίς σκόνη συλλέγεται είτε σε εκκενωμένο άκαμπτο μεταλλικό δοχείο είτε σε εύκαμπτο σάκο κατασκευασμένο από πολυμερές φιλμ. Το υλικό κατασκευής του περιέκτη θα πρέπει να επιλέγεται κατά τρόπο ώστε οι ρύποι να μην αλληλεπιδρούν φυσικά ή χημικά με τον περιέκτη κατά την αποθήκευση και, ως εκ τούτου, να προκαλούν μεταβολή στη σύνθεση του συλλεγόμενου δείγματος. Ένα δείγμα πρέπει να ψύχεται σε θερμοκρασία δωματίου και να απελευθερώνεται από στερεά σωματίδια και συμπυκνώσιμους ατμούς πριν από τη συλλογή του σε δοχείο. Ο περιέκτης που είναι γεμάτος με δείγμα πρέπει στη συνέχεια να μεταφέρεται σε εργαστήριο για ανάλυση. Στο εργαστήριο, το δείγμα μπορεί να ανασυρθεί από τον περιέκτη είτε με συμπίεση του σάκου πολυμερούς είτε με αντλία από τον άκαμπτο περιέκτη. Η ανάλυση του ανακτηθέντος δείγματος μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με τη βοήθεια κατάλληλων οργάνων είτε με κατάλληλες χημικές μεθόδους.

3.4.2 Συλλογή σε μέσο

Υγρό ή στερεό υπόστρωμα συλλογής μπορεί να χρησιμοποιείται για την ποσοτική συγκράτηση των ρύπων που υπάρχουν σε δείγμα αερίου είτε ως έχει είτε σε διαχωρισμένη μορφή για την επακόλουθη εκτίμησή τους.

3.4.2.1 Υγρό μέσο

Όταν χρησιμοποιείται υγρό μέσο, η μονάδα αναφέρεται ως «σύστημα φυσαλίδων». Το σύστημα μπορεί να έχει αρκετές φυσαλίδες σε σειρά, καθεμία από τις οποίες περιέχει ένα υγρό στο οποίο ένας συγκεκριμένος ρύπος είτε θα απορροφηθεί φυσικά είτε θα αντιδράσει χημικά. Μέσω κάθε φυσαλίδας δημιουργείται ένας γνωστός όγκος του δείγματος σε φυσαλίδες και στη συνέχεια η ποσότητα του παγιδευμένου ρύπου εκτιμάται με κατάλληλη χημική αναλυτική μέθοδο. Στον πίνακα 3 παρατίθενται η χημική σύνθεση των υγρών φυσαλίδων και οι αναλυτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση ορισμένων κοινών ρύπων.

Ρυπογόνο	Σύνθεση υγρού του φυσσαλιδωτή bubbler	αναλυτική προσέγγιση
Αμμωνία (NH ₃)	0,1 N σουλφουρικό οξύ	χρωματομετρία αντιδραστήριο Nessler
Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)	0,1 N Υδροξείδιο του βαρίου	Τιτλοδότηση με υδροξείδιο του οξαλικού οξέος
Υδρόθειο (H ₂ S)	5% Διάλυμα θειούχου καδμίου	Ιωδομετρική τιτλοδότηση
Οξείδιο του αζώτου (NO _x)	Αντιδραστήριο Salzman	Χρωματομετρία
Όζον (O ₃)	1% Ιωδιούχο κάλιο σε 1 N υδροξείδιο του καλίου	Χρωματομετρική εκτίμηση της απελευθερωμένης ιοδεΐνης
Διοξείδιο του Θείου (SO ₂)	Τετραχλωρομερκουτρικού νατρίου	Χρώμα που αναπτύχθηκε με την προσθήκη λευκασμένης παροσαλνιλίνης και φορμαλδεΐδης

Πίνακας 3. Χημική σύνθεση των υγρών φυσαλίδων και οι αναλυτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση ορισμένων κοινών ρύπων.

3.4.2.2 Στερεό μέσο

Αυτή η μέθοδος συλλογής βασίζεται στο γεγονός ότι όταν ένα δείγμα αερίου χωρίς σκόνη και συμπυκνώσιμους ατμούς διέρχεται πάνω από μια κλίνη προσροφητικού μέσου, όπως ο ενεργός άνθρακας/η ενεργοποιημένη πυριτική πηκτή, οι ρύποι που υπάρχουν στο δείγμα προσροφώνται ποσοτικά. Η διαδικασία που ακολουθείται για τη συλλογή και τη διατήρηση των ρύπων σε δείγμα αερίου είναι η διέλευση γνωστού όγκου ρυπαντικού αερίου μέσω περιέκτη που περιέχει προσροφητική κλίνη, όπου οι ρύποι συγκρατούνται στους προσροφητικούς κόκκους και το μεγαλύτερο μέρος του φέροντος αερίου ρέει έξω. Μετά τη συλλογή το δοχείο σφραγίζεται και μεταφέρεται σε εργαστήριο για ανάλυση. Το πρώτο βήμα προς την ανάλυση των προσροφημένων συστατικών είναι η ποσοτική εκρόφησή τους με θέρμανση του δοχείου, ενώ ένα ρεύμα αδρανούς αερίου ρέει μέσω του δοχείου με μέτριο ρυθμό. Τα εκροφημένα συστατικά μεταφέρονται σε ένα σύστημα μέτρησης από το ρεύμα αδρανούς αερίου.

4. ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ

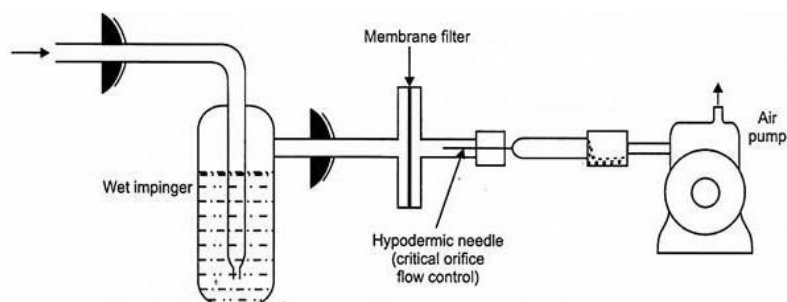
Ένας πολύ μεγάλος αριθμός διαφορετικών αναλυτικών τεχνικών χρησιμοποιείται για την ανάλυση ατμοσφαιρικών ρύπων.[5] Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ορισμένες από τις κύριες μεθόδους παρακολούθησης αέριων ατμοσφαιρικών ρύπων.

<i>Pollutant</i>	<i>Method</i>	<i>Potential interferences</i>
SO ₂ (total S)	Flame photometric (FPD)	H ₂ S, CO
SO ₂	Gas chromatography (FPD)	H ₂ S, CO
SO ₂	Spectrophotometric (pararosaniline)	H ₂ S, HCl, NH ₃ , NO ₂ , O ₃ wet chemical)
SO ₂	Electrochemical	H ₂ S, HCl, NH ₃ , NO, NO ₂ , O ₃ , C ₂ H ₄
SO ₂	Conductivity	HCl, NH ₃ , NO ₂
SO ₂	Gas-phase spectrophotometric	NO, NO ₂ , O ₃ ,
O ₃	Chemiluminescent	H ₂ S
O ₃	Electrochemical	NH ₃ , NO ₂ , SO ₂
O ₃	Spectrophotometric (potassium iodide)	NH ₃ , NO ₂ , NO, SO ₂ reaction, wet chemical)
O ₃	Gas-phase spectrophotometric	NO ₂ , NO, SO ₂
CO	Infrared	CO ₂ (at high levels)
CO	Gas chromatography	-
CO	Electrochemical	NO, C ₂ H ₄
CO	Catalytic combustion-thermal detection	NH ₃
CO	Infrared fluorescence	-
CO	Mercury replacement ultraviolet	C ₂ H ₄ photometric
NO ₂	Chemiluminescent	NH ₃ , NO, NO ₂ , SO ₂
NO ₂	Spectrophotometric (azo-dye reaction)	NO, SO ₂ , NO ₂ , O ₃ wet chemical)
NO ₂	Electrochemical	HCl, NH ₃ , NO, NO ₂ , SO ₂ , O ₃ , CO
NO ₂	Gas-phase spectrophotometric	NH ₃ , NO, NO ₂ , SO ₂ , CO
NO ₂	Conductivity	HCl, NH ₃ , NO, NO ₂ , SO ₂

Πίνακας 3. Κύριες μέθοδοι για την ανάλυση αερίων ρύπων

4.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΘΕΙΟΥ (SO₂)

Η μέθοδος αναφοράς για την ανάλυση του διοξειδίου του θείου είναι η μέθοδος της **φασματοφωτομετρικής παραροζανιλίνης** που περιγράφηκε αρχικά από τους West και Gaeke και στη συνέχεια βελτιστοποιήθηκε. Εφαρμόζεται σε συγκεντρώσεις 0,005-5 ppm SO₂ στον ατμοσφαιρικό αέρα. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται τα διάφορα στοιχεία που απαρτίζουν την διάταξη που χρησιμοποιείται για τη δειγματοληψία της ατμόσφαιρας για διοξείδιο του θείου σύμφωνα με την μέθοδο West-Gaeke.



Εικόνα 3. Διάταξη δειγματοληψίας για ανάλυση διοξειδίου του θείου με τη μέθοδο West-Gaeke

Η μέθοδος χρησιμοποιεί ένα διάλυμα συλλογής 0,04 M τετραχλωρομερυγικού καλίου για τη συλλογή διοξειδίου του θείου σύμφωνα με την ακόλουθη αντίδραση:



Συνήθως, αυτό περιλαμβάνει τον καθαρισμό 30 λίτρων αέρα μέσω 10 ml διαλύματος καθαρισμού με απόδοση συλλογής περίπου 95 τοις εκατό. Το διοξείδιο του θείου στο μέσο καθαρισμού αντιδρά με φορμαλδεΐδη:



Το πρόσθετο που σχηματίζεται στη συνέχεια αντιδρά με άχρωμη οργανική υδροχλωρική παραροζανιλίνη για να παράγει μια κόκκινη-ιώδη βαφή. Η μέτρηση μπορεί να επηρεαστεί από την παρουσία NO₂ αλλά η παρεμβολή μπορεί να εξαλειφθεί μετατρέποντας το αέριο NO₂ σε N₂ με σουλφαμικό οξύ, H₂NSO₃H.

Εκτελούμενη χειροκίνητα, η μέθοδος West-Gaeke είναι σύνθετη και δύσκολη. Ωστόσο, η μέθοδος έχει βελτιωθεί σε σημείο που να μπορεί να γίνει αυτόματα για συνεχείς μετρήσεις.

Γενικά, το διοξείδιο του θείου συλλέγεται σε διάλυμα υπεροξειδίου του υδρογόνου και μετράται η αυξημένη αγωγιμότητα του διαλύματος θειικού οξέος.

Άλλοι τύποι μετρητών διοξειδίου του θείου βασίζονται σε **αμπερομετρία**, στην οποία μετράται ένα ηλεκτρικό ρεύμα που είναι ανάλογο με το SO₂ σε ένα διάλυμα συλλογής. Το διοξείδιο του θείου μπορεί να προσδιοριστεί με χρωματογραφία ιόντων, με διοχέτευση SO₂ μέσω διαλύματος

υπεροξειδίου του υδρογόνου για την παραγωγή SO₄²⁻, ακολουθούμενη από ανάλυση του θειικού άλατος με χρωματογραφία ιόντων, μια μέθοδο που διαχωρίζει τα ιόντα σε μια στήλη χρωματογραφίας και τα ανιχνεύει με μεγάλη ευαισθησία μετρώντας την αγωγιμότητα.

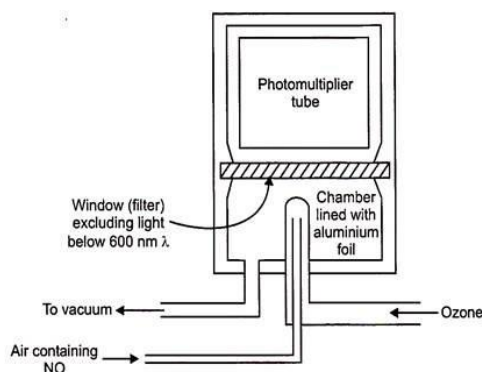
Για την ανίχνευση διοξειδίου του θείου και άλλων αερίων θειούχων ενώσεων, χρησιμοποιείται επίσης η **φωτομετρία φλόγας**, μερικές φορές σε συνδυασμό με αέρια χρωματογραφία. Το αέριο καίγεται σε φλόγα υδρογόνου και μετράται η γραμμή εκπομπής θείου στα 394 nm.

Διάφορες άμεσες **φασματοφωτομετρικές** μέθοδοι χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του διοξειδίου του θείου, συμπεριλαμβανομένης της μη διασκορπιζόμενης υπέρυθρης απορρόφησης, της υπέρυθρης ανάλυσης μετασχηματισμού Fourier (FTIR), της απορρόφησης υπεριώδους ακτινοβολίας, του φθορισμού μοριακού συντονισμού και της φασματοφωτομετρίας δεύτερου παραγώγου.

Το διοξείδιο του θείου (SO₂) επίσης μετράται συνεχώς με όργανα χρησιμοποιώντας τη θεμελιώδη αρχή του **φθορισμού**. Οι αναλυτές φθορισμού ακτινοβολούν δείγμα αέρα περιβάλλοντος με υπεριώδες φως στα 213,8 nm. Τα μόρια αερίου διοξειδίου του θείου απορροφούν ένα μέρος αυτής της ενέργειας και στη συνέχεια εκπέμπουν εκ νέου την ενέργεια σε ένα χαρακτηριστικό μήκος κύματος φωτός. Αυτή η φωτεινή ενέργεια που εκπέμπεται από μόρια SO₂ ανιχνεύεται από ένα σωλήνα φωτοπολλαπλασιασμού και μετατρέπεται σε ηλεκτρονικό σήμα ανάλογο με τη συγκέντρωση του υπάρχοντος SO₂.

4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΞΕΙΔΙΩΝ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ (NO, NO₂)

Αν και έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες μέθοδοι για τον προσδιορισμό των οξειδίων του αζώτου, η χημειοφωταύγεια αέριας φάσης είναι η προτιμώμενη μέθοδος ανάλυσης NO_x. Προκύπτει από την εκπομπή φωτός από ηλεκτρονικά διεγερμένα είδη που σχηματίζονται από μια χημική αντίδραση. Στην περίπτωση του NO, το όζον αντιδρά με το NO για να παράγει NO₂, το οποίο χάνει ενέργεια και επιστρέφει στην βασική κατάσταση μέσω εκπομπής φωτός στην περιοχή 600-3000 nm. Το εκπεμπόμενο φως μετράται με φωτοπολλαπλασιαστή. Η έντασή του είναι ανάλογη με τη συγκέντρωση του NO. Ένα σχηματικό διάγραμμα της χρησιμοποιούμενης συσκευής φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Εικόνα 4. Ανιχνευτής Διοξειδίου του Αζώτου με χημειοφωταυγεια.

Δεδομένου ότι το σύστημα ανίχνευσης χημειοφωταύγειας βασίζεται στην αντίδραση του O₃ με το NO, είναι απαραίτητο να μετατραπεί το NO₂ σε NO στο δείγμα πριν από την ανάλυση. Αυτό επιτυγχάνεται με τη διέλευση του δείγματος αέρα πάνω από έναν θερμικό μετατροπέα. Η ανάλυση του επεξεργασμένου δείγματος δίνει NO_x, το άθροισμα των NO και NO₂. Η ανάλυση χημειοφωταύγειας του δείγματος που δεν έχει περάσει πάνω από τον θερμικό μετατροπέα δίνει NO. Η διαφορά μεταξύ αυτών των δύο αποτελεσμάτων είναι NO₂.

Εκτός από το NO και το NO₂ και άλλες ενώσεις του Αζώτου υφίστανται χημειοφωταύγεια αντιδρώντας με O₃, και αυτές μπορεί να επηρεάσουν την ανάλυση εάν περιέχονται σε υψηλες ποσότητες. Επίσης παρεμβολές μπορούν να προκληθούν από σωματίδια τα οποία όμως είναι δυνατόν να απομακρυνθούν με τη χρήση φίλτρου μεμβράνης στην είσοδο αέρα.

Η χημειοφωταύγεια είναι μια εγγενώς επιθυμητή τεχνική για την ανάλυση των ατμοσφαιρικών ρύπων, επειδή αποφεύγει την υγρή χημεία, είναι βασικά απλή και προσφέρεται για συνεχή παρακολούθηση και ενόργανες μεθόδους.

4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΞΕΙΔΩΤΙΚΩΝ (OXIDANTS)

Τα ατμοσφαιρικά οξειδωτικά που αναλύονται συνήθως περιλαμβάνουν το όζον, το υπεροξείδιο του υδρογόνου, τα οργανικά υπεροξείδια και το χλώριο. Η κλασική χειροκίνητη μέθοδος για την ανάλυση των οξειδωτικών βασίζεται στην οξείδωση του ιόντος I και ακολουθεί φασματοφωτομετρική μέτρηση του προϊόντος. Το δείγμα συλλέγεται σε 1 τοις εκατό KI ρυθμισμένο σε pH 6,8. Τα οξειδωτικά αντιδρούν με ιόντα ιωδιούχου όπως φαίνεται από την ακόλουθη αντίδραση του όζοντος



Η απορρόφηση του έγχρωμου παράγωγου I_3 μετράται φασματοφωτομετρικά στα 352 nm. Γενικά, το επίπεδο των οξειδωτικών εκφράζει την συγκεντρωση του όζοντος, αν και πρέπει να σημειωθεί ότι δεν αντιδρούν όλα τα οξειδωτικά (PAN, για παράδειγμα) με την ίδια αποτελεσματικότητα με το O_3 . Η οξείδωση του I^- μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των οξειδωτικών σε ένα εύρος συγκεντρώσεων από αρκετές εκατοντάδες ppm έως περίπου 10 ppm.

Η παρουσία διοξειδίου του αζώτου και αναγωγικές ουσίες μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τις μετρήσεις με την μέθοδο αυτή.

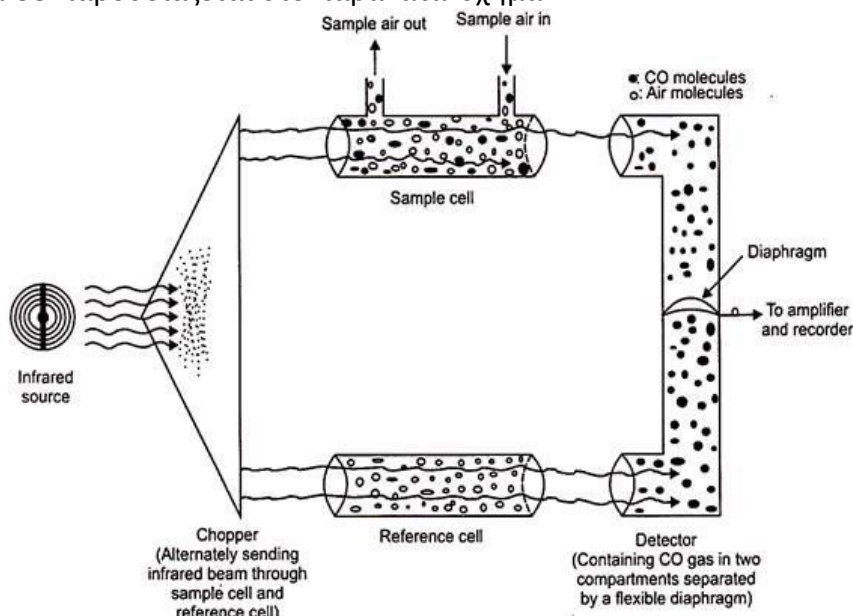
Τώρα η προτιμώμενη μέθοδος για την μέτρηση οξειδωτικών χρησιμοποιεί χημειοφωταύγεια. Η αντίδραση χημειοφωταύγειας είναι αυτή μεταξύ όζοντος και αιθυλενίου. Η χημειοφωταύγεια από αυτή την αντίδραση εμφανίζεται σε ένα εύρος 300-6000 nm, με μέγιστο στα 435 nm. Η ένταση του εκπεμπόμενου φωτός είναι ευθέως ανάλογη με το επίπεδο του όζοντος. Μπορούν να μετρηθούν συγκεντρώσεις όζοντος που κυμαίνονται από 0,003 έως 30 ppm. Το όζον για τη βαθμονόμηση του οργάνου παράγεται φωτοχημικά από την απορρόφηση της υπεριώδους ακτινοβολίας από το οξυγόνο.

Το όζον μετράται συνεχώς από αναλυτές που λειτουργούν χρησιμοποιώντας την αρχή της μονοχρωματικής φασματοφωτομετρίας απορρόφησης υπεριώδους ακτινοβολίας. Καθώς το υπεριώδες φως στα 253,7 nm διέρχεται από την οπτική συσκευή, μια σταθερή ποσότητα αέρα αναφοράς χωρίς όζον και του υπό μέτρηση ατμοσφαιρικού αέρα εισέρχεται στην συσκευή. Η ένταση της υπεριώδους ακτινοβολίας που διασχίζει την οπτική συσκευή μετριάζεται από το όζον που υπάρχει στο δείγμα περιβάλλοντος. Αυτό το εξασθενημένο σήμα ανιχνεύεται και συγκρίνεται με το μη εξασθενημένο σήμα από τον κύκλο αέρα αναφοράς. Αυτή η διαφορά έντασης μεταφράζεται ηλεκτρονικά σε μια ανάγνωση του όζοντος που υπάρχει στον ατμοσφαιρικό αέρα.

4.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

Το μονοξείδιο του άνθρακα αναλύεται στην ατμόσφαιρα με υπέρυθη φασματομετρία χωρίς διασπορά. Αυτή η τεχνική βασίζεται στο γεγονός ότι το μονοξείδιο του άνθρακα απορροφά έντονα την υπέρυθη ακτινοβολία σε ορισμένα μήκη κύματος. Επομένως, όταν μια τέτοια ακτινοβολία διέρχεται από ένα μακρύ (συνήθως 100 cm) κύτταρο που περιέχει μονοξείδιο του άνθρακα, απορροφάται περισσότερη υπέρυθη ακτινοβολούμενη ενέργεια.

Ένα μη διασκορπιστικό υπέρυθρο φασματόμετρο διαφέρει από τα τυπικά υπέρυθρα φασματόμετρα στο ότι η υπέρυθρη ακτινοβολία από την πηγή δεν διασκορπίζεται ανάλογα με το μήκος κύματος από ένα πρίσμα ή πλέγμα. Το μη διασκορπιστικό υπέρυθρο φασματόμετρο γίνεται πολύ συγκεκριμένο για μια δεδομένη ένωση, ή τύπο ένωσης, είτε χρησιμοποιώντας το αναζητούμενο στοιχείο ως μέρος του ανιχνευτή, είτε τοποθετώντας το σε ένα κελί φίλτρου στην οπτική διαδρομή. Ένα διάγραμμα ενός μη διασκορπιστικού υπέρυθρου φασματόμετρου επιλεκτικού για CO παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 5. Μη διασκορπιστικό υπέρυθρο φασματόμετρο για την μετρηση μονοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.

Η ακτινοβολία από υπέρυθρη πηγή κατευθύνεται από μια περιστρεφόμενη διάταξη, έτσι ώστε να διέρχεται εναλλάξ από ένα κύτταρο δείγματος και ένα κύτταρο αναφοράς. Στο συγκεκριμένο όργανο, και οι δύο δέσμες φωτός πέφτουν σε έναν ανιχνευτή ο οποίος είναι γεμάτος με αέριο CO και χωρίζεται σε δύο διαμερίσματα με ένα εύκαμπτο διάφραγμα. Οι σχετικές ποσότητες υπέρυθρης ακτινοβολίας που απορροφάται από το CO στα δύο τμήματα εξαρτώνται από το επίπεδο του δείγματος. Η διαφορά στην ποσότητα της υπέρυθρης ακτινοβολίας που απορροφάται στα δύο διαμερίσματα προκαλεί μικρές διαφορές στη θέρμανση, έτσι ώστε το διάφραγμα να διογκώνεται ελαφρώς προς τη μία πλευρά. Πολύ μικρή κίνηση του διαφράγματος μπορεί να ανιχνευθεί και να καταγραφεί. Μέσω αυτής της συσκευής, το μονοξείδιο του άνθρακα μπορεί να μετρηθεί από 0 έως 150 ppm, με σχετική ακρίβεια ± 5 τοις εκατό στο βέλτιστο εύρος συγκέντρωσης.

Η αεριοχρωματογραφία ιονισμού φλόγας μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση του μονοξειδίου του άνθρακα. Απαιτείται μετατροπή του CO σε μεθάνιο στο δείγμα. Αυτό επιτυγχάνεται με αντίδραση με υδρογόνο πάνω από έναν καταλύτη νικελίου στους 360 °C. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι τα ίδια βασικά όργανα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση υδρογονανθράκων.

Το μονοξείδιο του άνθρακα μπορεί επίσης να αναλυθεί με τη μέτρηση της θερμότητας που παράγεται από την καταλυτική οξείδωση του σε CO₂ σε καταλύτη αποτελούμενο από μείγμα MnO₂ και CuO. Οι διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ ενός κυττάρου στο οποίο συμβαίνει η οξείδωση και ενός κυττάρου αναφοράς μέσω του οποίου ρέει μέρος του δείγματος μετρώνται με

θερμίστορ. Ένας καταλύτης οξειδίου του βαναδίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την οξείδωση υδρογονανθράκων, επιτρέποντας την ταυτόχρονη ανάλυσή τους.

4.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

Η παρακολούθηση των υδρογονανθράκων σε ατμοσφαιρικά δείγματα εκμεταλλεύεται την πολύ υψηλή ευαισθησία του ανιχνευτή ιονισμού φλόγας υδρογόνου για τη μέτρηση αυτής της κατηγορίας ενώσεων. Γνωστές ποσότητες αέρα διέρχονται από τον ανιχνευτή ιονισμού φλόγας 4 έως 12 φορές την ώρα για να παρέχουν ένα μέτρο της συνολικής περιεκτικότητας σε υδρογονάνθρακες. Ένα ξεχωριστό τμήμα κάθε δείγματος εισέρχεται σε μια ειδική στήλη (stripper) για την απομάκρυνση του νερού, του διοξειδίου του άνθρακα και των υδρογονανθράκων εκτός μεθανίου. Το μεθάνιο και το μονοξείδιο του άνθρακα, τα οποία δεν συγκρατούνται από τη στήλη, διαχωρίζονται με χρωματογραφική στήλη, διοχετεύονται μέσω σωλήνα καταλυτικής αναγωγής και στη συνέχεια σε ανιχνευτή ιονισμού φλόγας. Εκλούοντας πρώτα, το μεθάνιο δεν μεταβάλλεται από το σωλήνα αναγωγής και ανιχνεύεται ως τέτοιο από τον ανιχνευτή. Το μονοξείδιο του άνθρακα ανάγεται σε μεθάνιο και στη συνέχεια ανιχνεύεται ως προϊόν μεθανίου από τον ανιχνευτή ιονισμού φλόγας. Οι συγκεντρώσεις υδρογονανθράκων πλην μεθανίου δίνονται αφαιρώντας τις συγκεντρώσεις μεθανίου από τους συνολικούς υδρογονάνθρακες.

4.6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΛΥΒΔΟΥ (Pb)

Οι συγκεντρώσεις μολύβδου (Pb) στον ατμοσφαιρικό αέρα προσδιορίζονται με τη μέθοδο αναφοράς που έχει δημοσιευθεί από την ΥΠΠ των ΗΠΑ. Το δείγμα Pb συλλέγεται σε φίλτρο με τη χρήση δειγματολήπτη αέρα μεγάλου όγκου και της μεθόδου TSP. Σε αυτή τη μέθοδο τα φίλτρα συλλογής πλένονται με ζεστό, αραιωμένο νιτρικό οξύ. Οι ενώσεις Pb διαλύονται στα όξινα διαλύματα. Το διάλυμα στη συνέχεια αναλύεται με την τεχνική ατομικής απορρόφησης για να προσδιοριστεί η ποσότητα μολύβδου.

4.7 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ (PM)

Η συντομογραφία PM₁₀ ορίζεται ως σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη ή ίση με 10 μικρόμετρα. Η μέθοδος αναφοράς για τη μέτρηση των ατμοσφαιρικών σωματιδίων ως PM₁₀ βασίζεται στην επιλογή των PM₁₀ σωματιδίων με εσωτερικό διαχωρισμό, ακολουθούμενη από διήθηση και σταθμικό προσδιορισμό της μάζας των PM₁₀ σε υπόστρωμα φίλτρου. Η επιλογή των σωματιδίων PM₁₀ επιτυγχάνεται με μια κεφαλή επιλογής μεγέθους που είναι συμμετρική και περιέχει εννέα ακροφύσια κυκλικής επιτάχυνσης. Λόγω της μεγαλύτερης ορμής τους, σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μεγαλύτερη από 10 μm προσκρούουν σε μια λιπαρή επιφάνεια. Τα σωματίδια μικρότερα από 10 μm μεταφέρονται κάθετα προς τα πάνω από τη ροή του αέρα και με 16 σωλήνες εξαερισμού οδηγούνται σε ένα φίλτρο χαλαζιακών ινών 8 επί 10 ιντσών, όπου συλλέγονται.

5. ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ

5.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ

Η συνεχής αύξηση των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων που επιδρούν στην ποιότητα της ατμόσφαιρας έχει ωθήσει τη επιστημονική κοινότητα στην εύρεση τρόπων για την συνεχή παρακολούθηση και των ατμοσφαιρικών ρύπων με μεγαλύτερη χωρική και χρονική ακρίβεια. [6]

Παλαιότερα η καταγραφή της αέριας ρύπανσης πραγματοποιούταν μόνο μέσω σταθερών σταθμών παρακολούθησης με όργανα (αναλυτές) τα οποία περιγράφονται σε προηγούμενες ενότητες και τα οποία είναι εξειδικευμένα για τη μέτρηση ρύπων όπως μονοξείδιο του άνθρακα (CO), οξείδια του αζώτου (NOx), διοξείδιο του θείου (SO₂), όζον (O₃) και σωματίδια (PM). Οι αναλυτές αυτοί είναι κατά κανόνα αρκετά περίπλοκοι, ογκώδεις και ακριβοί, και κάθε όργανο έχει κόστος αγοράς μερικές δεκάδες χιλιάδες ευρώ και απαιτεί τακτική συντήρηση και βαθμονόμησή ο οποία έχει επίσης υψηλό κόστος.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι οι σταθεροί σταθμοί παρακολούθησης βρίσκονται συνήθως σε σημεία μακριά περιοχές μεγάλης κυκλοφορίας στις οποίες μπορούν να δημιουργηθούν τοπικά αυξημένες εκπομπές και κατά συνέπεια συγκεντρώσεις ρύπων. Καθώς είναι τοποθετημένοι σε αραιές διατάξεις οι σταθεροί σταθμοί μπορεί να παρέχουν λεπτομερή δεδομένα χρονοσειρών μεγάλης διάρκειας αλλά με μικρή χωρική ανάλυση. Έτσι αναγκαστικά χρησιμοποιούνται προσεγγίσεις με μαθηματικά μοντέλα τα οποία όμως μπορεί να εισάγουν αβεβαιότητες. Ένα δίκτυο από αισθητήρες χαμηλού κόστους τοποθετημένους σε πιο πυκνές διατάξεις θα μπορούσε να παρέχει ακριβέστερα δεδομένα στα μοντέλα που οδηγούν σε πιο αξιόπιστα συμπεράσματα σχετικά με τα επίπεδα ποιότητας του αέρα.

Επιπλέον, για την λήψη κανονιστικών αποφάσεων από τις διάφορες αρχές που αφορούν την διαχείριση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης απαιτούνται δεδομένα χρονοσειρών μεγάλης διάρκειας, τα οποία και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση γενικότερων τάσεων και στατιστικών. Για την συλλογή των κατάλληλων δεδομένων, την τελευταία δεκαετία έχουν τεθεί σε εφαρμογή κινητές μονάδες μέτρησης για τη συλλογή δεδομένων με σκοπό την αναλυτικότερη καταγραφή της χωρικής και χρονικής μεταβλητότητας της ποιότητας του αέρα. Έτσι η απαίτηση για πιο οικονομικά και εύχρηστα συστήματα καταγραφής της χρονικής και χωρικής συγκέντρωσης των ρύπων αυξάνεται. Επίσης αυξάνεται η ανάγκη για ενημέρωση των πολιτών σχετικά με τη ποιότητα του αέρα στη περιοχή τους. Όλα αυτά σε συνδυασμό με τις οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την αξιολόγηση και διαχείριση της ποιότητας του αέρα, οδηγούν προς την ανάπτυξη μεθόδων για την ευκρινέστερη καταγραφή της αέριας ρύπανσης.

Η ανάπτυξη συσκευών μέτρησης ρύπων χαμηλού κόστους (εκατοντάδες ευρώ) και μικρού όγκου και βάρους έχει αρχίσει να δημιουργεί μια νέα δυναμική στη παρακολούθηση της αέριας ρύπανσης. Ταυτόχρονα η συνεχώς αυξανόμενες υπολογιστικές και τηλεπικοινωνιακές δυνατότητες έχουν συμβάλει στην ανάπτυξη τέτοιων συσκευών. Προς το παρόν, η ακρίβεια των δεδομένων που παρέχουν αυτές οι συσκευές χαμηλού κόστους δεν είναι στα επίπεδα των εξειδικευμένων αναλυτών, αλλά με την κατάλληλη βαθμονόμηση είναι αρκετά ικανοποιητική για εξαγωγή γενικών τάσεων και στατιστικών [39-43].

5.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ

Γενικότερα, οι συσκευές χαμηλού κόστους αποτελούνται από αισθητήρες οι οποίοι σε συνδυασμό με μικροεπεξεργαστές που ελέγχουν τη συσκευή μετατρέπουν το σήμα των αισθητήρων σε μια έξοδο που δίνει στο χρήστη τη πληροφορία για τους ρύπους που υπάρχουν στον περιβάλλοντα αέρα. Οι αισθητήρες λειτουργούν με διαφορετικές αρχές λειτουργίας και παρουσιάζουν εύρος ευαισθησίας και χρόνους απόκρισης.

Πιο συγκεκριμένα, οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται ευρέως σε φορητές συσκευές ανίχνευσης αερίων ρύπων. Μπορούν να μετρήσουν τη συγκέντρωση ενός αερίου βασιζόμενοι στην ικανότητα των μορίων του αερίου στόχου να οξειδώνονται ή να μειώνονται στην επιφάνεια ενός

ηλεκτροδίου. Αυτή η αντίδραση δημιουργεί ένα μικρό ηλεκτρικό ρεύμα που μπορεί να ανιχνευθεί και να μετρηθεί.

Ας σημειώσουμε επιπλέον ότι η διαδικασία βαθμονόμησης των αισθητήρων αερίου πραγματοποιείται σε δύο βήματα:

- Το πρώτο βήμα είναι ο μηδενικός έλεγχος δηλαδή ο καθορισμός της απόκρισης του αισθητήρα όταν η συγκέντρωση του προς μέτρηση αερίου είναι μηδέν.
- Το δεύτερο βήμα είναι ο έλεγχος span ο οποίος καθορίζει την απόκριση του αισθητήρα όταν εκτίθεται στο αέριο γνωστής συγκέντρωσης [7].

Οι συσκευές αισθητήρων χαμηλού κόστους περιέχουν έναν αριθμό κοινών συστατικών εκτός από το βασικό αισθητήριο στοιχείο που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση. Τα πρόσθετα συστατικά μέσα σε ένα σύστημα αισθητήρων μπορεί να περιλαμβάνουν υλικό για ενίσχυση σήματος, για επεξεργασία και μετατροπή σήματος (αναλογικό σε ψηφιακό), για τον χειρισμό τάσης και ισχύος, καθώς επίσης περιέχουν μπαταρία και στοιχεία λογισμικού για την επεξεργασία, αποθήκευση δεδομένων και την τηλεμεταφορά τους (π.χ. μέσω WiFi). Επίσης πολλά από τα εμπορικά συστήματα αισθητήρων συνδυάζουν πολλούς αισθητήρες ατμοσφαιρικών ρύπων σε ένα σύστημα και ταυτόχρονα περιλαμβάνουν αισθητήρες παραμέτρων όπως υγρασία ή θερμοκρασία. Η δειγματοληψία συμβαίνει είτε μέσω αντλίας (ενεργητική δειγματοληψία) είτε με παθητική είσοδο (παθητική δειγματοληψία). Όλα τα παραπάνω στοιχεία εμπεριέχονται σε ένα στεγανό κάλυμμα για την προφύλαξη τους από τα καιρικά φαινόμενα. Συχνά στο προστατευτικό αυτό κάλυμμα είναι τοποθετημένη και μια συσκευή gprs για την ακρίβεια θέσης του οργάνου [8].

5.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ

Η πρόοδος στην υποδομή τη ασύρματης επικοινωνίας καθιστά αυτούς τους αισθητήρες ικανούς για τη καταγραφή δεδομένων υψηλής χωρικής ανάλυσης σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Επιπλέον σε αντίθεση με τα συμβατικά, ογκώδη και δαπανηρά αναλυτικά όργανα, αυτές οι συσκευές ανίχνευσης χαμηλού κόστους είναι γενικά συμπαγείς και έχουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Επίσης οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες, παρουσιάζουν γραμμική απόκριση και μεγάλη ακρίβεια στη μέτρηση συγκεντρώσεων σε μέρη το εκατομμύριο ppm εάν είναι προσεκτικά βαθμονομημένοι [9]. Όλα τα προηγούμενα σε συνδυασμό με την προηγμένη υπολογιστική ισχύ για το χειρισμό δεδομένων και την ευρεία επιλογή των πακέτων λογισμικού για την οπτικοποίηση τους, έχουν κάνει την ανάπτυξη και την εξέλιξη των αισθητήρων ακόμα πιο συναρπαστική [7].

5.4 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ

Τα μειονεκτήματα και τα αδύνατα σημεία των αισθητήρων είναι αρκετά, αλλά με τις κατάλληλες βαθμονομήσεις και διορθώσεις των μετρούμενων τιμών μπορούμε να επιτύχουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα [11]. Μολονότι στα εργαστηριακά περιβάλλοντα οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες χαμηλού κόστους παρουσιάζουν μεγάλη συσχέτιση στις μετρούμενες τιμές γνωστών συγκεντρώσεων ρύπων, όταν μεταφερθούν στο πραγματικό εξωτερικό περιβάλλον η κατάσταση είναι διαφορετική. Αυτό συμβαίνει διότι κατά τη διάρκεια της ημέρας λαμβάνουν χώρα πάρα πολλές χημικές αντιδράσεις και μεταβολές στις μετεωρολογικές συνθήκες [12]. Ξεκινώντας να απαριθμήσουμε τα αδύναμα σημεία πρέπει να τονίσουμε αρχικά, ότι το προσδόκιμο ζωής ενός ηλεκτροχημικού αισθητήρα κυμαίνεται από 1 έως 3 χρόνια. Αυτό βέβαια, μπορεί να είναι και παραπάνω αναλόγως με το αέριο το οποίο ανιχνεύουν και τις συνθήκες του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο λειτουργούν (θερμοκρασία, πίεση και υγρασία). Η υψηλές θερμοκρασίες και οι ξηρασίες μειώνουν περεταίρω το χρόνο ζωής τους [9]. Δυστυχώς, οι αισθητήρες χαμηλού κόστους είναι λιγότερο ακριβής από τον συμβατικό εξοπλισμό (αναλυτές). Επιπλέον, οι χαμηλού κόστους ηλεκτροχημικοί αισθητήρες τείνουν να έχουν διασταυρούμενη ευαισθησία με άλλους περιβαλλοντικούς ρύπους όπως NOx και VOCs. Όσο αφορά το σήμα που στέλνεται από τον αισθητήρα, στις υψηλές συγκεντρώσεις το σήμα από τον ατμοσφαιρικό ρύπο μπορεί να είναι ισχυρό, αλλά όταν τα επίπεδα

ρύπανσης στον αέρα είναι χαμηλά τότε το σήμα είναι ασθενέστερο [7]. Ωστόσο, σε ορισμένες καταστάσεις, η αβεβαιότητα μέτρησης αυτών των συσκευών μπορεί να προσεγγίζει το επίπεδο της "επίσημης" μέτρησης. Επίσης, είναι γνωστό ότι η σταθερότητα και ακρίβεια των ηλεκτροχημικών αισθητήρων χαμηλού κόστους αερίων υποβαθμίζεται με το πέρασμα του καιρού [10]. Οι καιρικές συνθήκες και ιδιαίτερα η σχετική υγρασία και η θερμοκρασία επηρεάζουν σε σχετικά μεγάλο βαθμό την απόδοση των ηλεκτροχημικών αισθητήρων. Πιο συγκεκριμένα με δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στους ηλεκτροχημικούς αισθητήρες (Alphasense B4 series) για τους ρύπους CO,NO,NO₂ και O₃ , σε εργαστηριακό περιβάλλον, τα αποτελέσματα έδειξαν πως ειδικότερα το NO παρουσιάζει ισχυρή γραμμική συσχέτιση με την θερμοκρασία και την σχετική υγρασία [12]. Παράλληλα, μια παρόμοια έρευνα για την απόδοση των αισθητήρων O₃, SO₂, και CO ,έδειξε ότι εκείνοι οι αισθητήρες παρουσιάζουν θετική γραμμική εξάρτηση με το μέγεθος της σχετικής υγρασίας [10]. Ακόμη μια μελέτη σχετική με αισθητήρες χαμηλού κόστους, Alphasense (OX-B431 και NO₂-B43F) που πραγματοποιήθηκε σε εξωτερικό περιβάλλον, απέδειξε ότι η ένταση του ανέμου επηρεάζει σημαντικά την ακρίβειά των αισθητήρων. Αξίζει να σημειώσουμε εδώ ότι για να αντιμετωπιστεί η επίδραση των καιρικών συνθηκών στους αισθητήρες χαμηλού κόστους, είναι σημαντικό να προσαρμόσουμε μια διαδικασία βαθμονόμησης κοντά σε ένα πρότυπο όργανο με σύγκριση αποτελεσμάτων σε πραγματικό χρόνο [11].

5.5 ΧΡΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΜΕ UAV

Η βελτίωση της ποιότητας του αέρα απαιτεί νέες τεχνολογίες για τον καλύτερο εντοπισμό και χαρακτηρισμό των κατανεμημένων πηγών ρύπων και την αξιολόγηση της έκθεσης του ανθρώπου. Για τον σκοπό αυτό δημιουργήθηκαν δίκτυα παρακολούθησης των συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικών ρύπων στον ατμοσφαιρικό αέρα. Ωστόσο, τα υφιστάμενα δίκτυα συχνά θεωρούνται ανεπαρκή για να καλύψουν μεγάλες περιοχές, να λάβουν υπόψη νέες πηγές ή να εφαρμόσουν αποτελεσματικές στρατηγικές ελέγχου της ρύπανσης.

Οι σταθεροί αισθητήρες είναι σε θέση να συλλάβουν δεδομένα μόνο με χαμηλές χωρικές αναλύσεις και δεν μπορούν εύκολα να παρακολουθήσουν την αλλαγή της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στη χωρική διάσταση. Τα ειδικά συστήματα δειγματοληψίας που βασίζονται σε οχήματα έχουν βελτιωμένη χωρική κάλυψη και έχουν επιδείξει βελτιωμένες δυνατότητες. Ωστόσο, αυτές οι εφαρμογές μπορεί να περιορίζονται από την πρόσβαση στην τοποθεσία, τον κατάλληλο προσανατολισμό ως προς την πηγή, την πολύπλοκη τοπογραφία ή τα δημόσια οδικά δίκτυα και απαιτούν εξαιρετικά ευαίσθητα και δαπανηρά όργανα. Επιπλέον, οι κάθετες ατμοσφαιρικές μετρήσεις είναι απολύτως απαραίτητες για την πρόβλεψη και την αξιολόγηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, ιδίως σε μεγαλουπόλεις με πολυώροφα κτίρια. Η καταγραφή της χωρικής και χρονικής μεταβλητότητας των σωματιδίων και των αερίων αερολύματος μεταξύ της επιφάνειας και των 300 m δεν είναι εφικτή από σταθερές πλατφόρμες δειγματοληψίας στο έδαφος.

Ένα μη επανδρωμένο εναέριο όχημα (UAV) αποτελεί μια ελκυστική πειραματική πλατφόρμα για κατακόρυφο προφίλ υψηλής χωρικής ανάλυσης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης κοντά στην επιφάνεια [13]. Οι προηγούμενες τεχνολογίες χρησιμοποιούσαν αερόστατα, αεροσκάφη και δορυφορική τηλεπισκόπηση, τα οποία είναι μη ευέλικτα ή δαπανηρά [14,15]. Οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία των UAV παρουσιάζουν μια λύση χαμηλού κόστους για τη δειγματοληψία της κατώτερης τροπόσφαιρας, εκμεταλλευόμενοι τις ικανότητές τους να κάνουν ελιγμούς τόσο στην οριζόντια όσο και στην κατακόρυφη διάσταση και να διατηρούν σταθερή θέση στον αέρα ακόμη και σε συνθήκες ισχυρού ανέμου [16,17]. Οι κινητοί εμπορικοί μικροαισθητήρες χαμηλού κόστους πραγματικού χρόνου εγκατεστημένοι σε UAV προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα για τη καταγραφή της χωρικής και χρονικής μεταβλητότητας των ατμοσφαιρικών ρύπων και παρέχουν τη δυνατότητα μέτρησης σημαντικών ατμοσφαιρικών ρύπων με υψηλές ευαισθησίες και χρονικές αναλύσεις [18]. Ενώ οι δυνατότητες των UAV για την παρακολούθηση

της ποιότητας του αέρα είναι πολλά υποσχόμενες, η υιοθέτησή τους ήταν περιορισμένη λόγω του μη κατάλληλου σχεδιασμού, μη ικανοποιητικών αισθητήρων και ασαφών κανονιστικών διατάξεων.

Γενικά μια πλατφόρμα παρακολούθησης αέρα που βασίζεται σε UAV θα πρέπει να αντιμετωπίσει αυτές τις προκλήσεις:

- (1) Εμπορικά διαθέσιμα UAV χαμηλού κόστους. Οι προηγούμενες εφαρμογές χρησιμοποιούσαν επαγγελματικά UAV που δεν επιτρέπουν στους χρήστες να τα προσαρμόσουν εύκολα στις ανάγκες τους. Αυτές οι πλατφόρμες UAV είναι ακριβές και απαιτούν εξειδικευμένο σχεδιασμό και συντήρηση.
- (2) Συγχρονισμός δεδομένων αισθητήρων παρακολούθησης και δεδομένων GPS. Για την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και τη μοντελοποίηση γεωχωρικών δεδομένων, τα δεδομένα ατμοσφαιρικών ρύπων και τα δεδομένα GPS πρέπει να συγχρονίζονται, καθώς προέρχονται από δύο ξεχωριστές συνιστώσες.
- (3) Πολλαπλοί ατμοσφαιρικοί ρύποι. Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι υπάρχουν ως μείγματα σε όλα τα ατμοσφαιρικά περιβάλλοντα. Τόσο η επιστημονική κοινότητα όσο και οι ρυθμιστικοί οργανισμοί προσεγγίζουν πλέον την ρύπανση ως ένα σύνολο ρύπων και όχι μεμονωμένων ρύπων. Αυτή η τάση απαιτεί μια πλατφόρμα που μπορεί να ενσωματώσει πολλαπλούς αισθητήρες με διαφορετικές αρχές λειτουργίας [19].
- (4) Ενεργειακή απόδοση και χρόνος πτήσης. Ένα τυπικό UAV καταναλωτή στο εύρος τιμών από 500 έως 2000 ευρώ μπορεί να πετάξει για περίπου 15 έως 30 λεπτά με μία πλήρως φορτισμένη μπαταρία. Η μεταφορά πρόσθετων συσκευών μπορεί να μειώσει τον χρόνο πτήσης UAV, καθώς οι συσκευές επί του αεροσκάφους προσθέτουν βάρη στο UAV και οι ίδιες οι συσκευές καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια.
- (5) Ασφάλεια και περιορισμοί χρήσης. Είναι σημαντικό ότι οι διαδρομές πτήσης του UAV χρειάζονται ασφαλή εναέριο χώρο για να αποφευχθούν πολλά εμπόδια σε ένα περιβάλλον πόλης, όπως κτίρια, φώτα, γραμμές διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, δέντρα, ζώνες απαγόρευσης πτήσεων και ούτω καθεξής. Επίσης, τα UAV δεν μπορούν να αναπτυχθούν χωρίς περιορισμούς. Σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς λειτουργίας για την ασφάλεια της αεροπορίας, επιβάλλονται περιορισμοί στη χρήση τους σε εμπορικές, ερευνητικές και ιδιωτικές εφαρμογές.

5.5.1 Μετρήσεις ποιότητας του αέρα

Η συλλογή δεδομένων σε σχέση με τους αέριους ρύπους, τα PM [21–26] και VOC από την κυκλοφορία οχημάτων, τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, και τον αέρα σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές είναι εκτεταμένη και περιλαμβάνει δειγματοληψία σε επίπεδο εδάφους με τη χρήση τεχνικών on-line και off-line [27–29], καθώς και επανδρωμένων αεροσκαφών [30]. Ωστόσο, οι άμεσες μετρήσεις στην πηγή δεν είναι πάντοτε εφικτές λόγω της πολυπλοκότητας των τοποθεσιών, των κινούμενων πηγών ή των φυσικών φραγμών, όπως οι άμεσες μετρήσεις των εκπομπών από τη ναυτιλία ή η καύση βιομάζας. Είναι κρίσιμο να χαρακτηριστούν οι ιδιότητες των ατμοσφαιρικών ρύπων in-situ, όσον αφορά την προέλευση, την κατάσταση ανάμειξης συγκεντρώσεων, το μέγεθος, τη χημειοφυσική σύνθεση και την αντιδραστικότητα, τόσο για την ποιότητα του αέρα όσο και για την έρευνα για την κλιματική αλλαγή, καθώς και για την ανάπτυξη πολιτικής και τη ρύθμιση των εκπομπών των πηγών καύσης. Ως εκ τούτου, τα UAV μπορεί να αποτελούν βιώσιμη επιλογή για την εν λόγω επιτόπια συλλογή δεδομένων για την ποιότητα του αέρα [20].

5.5.2 Τύποι UAV και απαιτήσεις για μετρήσεις ατμοσφαιρικού αέρα

Τα UAV είναι επιχειρησιακά πιο ευέλικτα και ορατά σε σύγκριση με χερσαίες προσεγγίσεις ή άλλες εναέριες μεθόδους, όπως επανδρωμένα αεροσκάφη και δορυφόροι. Η διεξαγωγή ατμοσφαιρικών μετρήσεων σε απομακρυσμένες τοποθεσίες είναι μια κατάσταση όπου η χρήση μικρών, ελαφρών UAV έχει ιδιαίτερο όφελος [31–32]. Στην πραγματικότητα, οι μειωμένες ανάγκες μεγέθους, βάρους και ισχύος αυτών των ιπτάμενων ρομπότ, μαζί με το μειωμένο κόστος των πλατφορμών και των οργάνων, τα

καθιστούν ιδιαίτερα κατάλληλα για αυτές τις λειτουργίες. Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών πλατφορμών οι οποίες, λόγω του φυσικού μεγέθους και της ισχύος τους, διαφέρουν ως προς την ικανότητα και την απλότητα λειτουργίας τους. Αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν την ικανότητα μεταφοράς ωφέλιμου φορτίου, την ταχύτητα, το υψόμετρο και το εύρος πτήσης, γεγονός που καθορίζει τις διαφορετικές εφαρμογές που μπορούν να εκτελεστούν από κάθε τύπο UAV.

Παρόλο που τα μικρά UAV υπόκεινται σε σημαντικούς περιορισμούς ωφέλιμου φορτίου σε σύγκριση με τα μεγαλύτερα (επανδρωμένα) αεροσκάφη, έχουν ένα ξεχωριστό πλεονέκτημα έναντι των επανδρωμένων ομολόγων τους όσον αφορά το σχετικά χαμηλό κόστος πλατφόρμας, την ικανότητα εκτέλεσης αυτόνομων πτητικών λειτουργιών από την απογείωση έως την προσγείωση και την πτήση πιο κοντά στο έδαφος χωρίς κίνδυνο για το πλήρωμα [33]. Τα προ-προγραμματισμένα σχέδια πτήσης μπορούν να εκδοθούν και να εκτελεστούν αυτόματα από το αεροσκάφος, πράγμα που σημαίνει ότι τα μικρά UAV μπορούν να πετάξουν με μεγαλύτερη ακρίβεια και μικρότερο φόρτο εργασίας από τα αεροσκάφη με ανθρώπινους χειριστές. Ορισμένες πλατφόρμες έχουν ακόμη τη δυνατότητα να λειτουργούν σε περιβάλλοντα χωρίς σήματα GPS ή/και να ακολουθούν τοπικές γραμμικές υποδομές χωρίς τη χρήση GPS [34], και ως εκ τούτου, θα μπορούσαν να παρέχουν αποτελεσματική και ακριβή παρακολούθηση μέσα σε κτίρια, δάση ή φαράγγια [35].

5.5.3 Οι επιδόσεις και η ικανότητα των UAV

Τα UAVs συνδέονται στενά με το μέγεθος του αεροσκάφους και, ως εκ τούτου, τα μικρά αεροσκάφη χαμηλού κόστους έχουν εγγενώς περιορισμούς ωφέλιμου φορτίου, ταχύτητας, ισχύος και αντοχής. Έχουν περιορισμένη ικανότητα να φέρουν αισθητήρες/εξοπλισμό επί του αεροσκάφους και ενδεχομένως σύντομους χρόνους πτήσης. Οι διαστάσεις και το σχήμα του σκελετού του αεροσκάφους, για παράδειγμα, μπορούν να καταστήσουν δύσκολη την τοποθέτηση του εξοπλισμού ανίχνευσης και η ισχύς μπορεί να χρειαστεί να μοιραστεί με τους αισθητήρες, ανάλογα με το σύστημα πρόωσης. Ως εκ τούτου, ενδέχεται να απαιτηθούν μεγάλες ποσότητες ενέργειας, γεγονός που θα μειώσει τόσο τον χρόνο πτήσης όσο και τη χωρική ποικιλομορφία των συλλεγόμενων δεδομένων. Η λειτουργία χαμηλής ταχύτητας, που διέπεται από χαρακτηριστικά χαμηλής ταχύτητας στάσης, είναι συχνά δυνατή με τέτοιες πλατφόρμες, επιτρέποντας τη χωρικά πυκνή συλλογή δεδομένων που συχνά απαιτείται για τοπικές επιθεωρήσεις για συγκεκριμένες τοποθεσίες [36-38].

Γενικεύοντας, τα συνολικά οφέλη και οι υπάρχοντες περιορισμοί στην τη χρήση των μικρών μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων για την έρευνα σχετικά με την ποιότητα του αέρα μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

Οφέλη.

- Κόστος - Οι μικρές ελαφριές πλατφόρμες είναι λιγότερο ακριβές σε σύγκριση με τα επανδρωμένα αεροσκάφη, τα επίγεια όργανα και τους δορυφόρους.
- Ευελιξία — Είναι διαθέσιμο ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών UAV για ατμοσφαιρική έρευνα. Χρόνος — Η ανάπτυξη μιας μικρής πλατφόρμας UAV εξοικονομεί χρόνο σε σχέση με τις μεγάλες επανδρωμένες πλατφόρμες καθώς και τους επίγειους σταθμούς.
- Ασφάλεια — Δεν υπάρχει κίνδυνος για το πλήρωμα όταν ένα UAV πετάει σε επικίνδυνες καταστάσεις όπως κοντά στο έδαφος.
- Επαναληψιμότητα — Είναι δυνατή η εκτέλεση της ίδιας προγραμματισμένης διαδρομής πτήσης κάθε φορά.
- Πτήσεις ρουτίνας — η συλλογή δεδομένων για πτήσεις ρουτίνας μπορεί να είναι κουραστική/αγχωτική για τον άνθρωπο.
- Βρώμικα περιβάλλοντα — Τα UAV μπορούν να πετάξουν σε επικίνδυνα περιβάλλοντα, Ευκολία στην ανάπτυξη - Τα μικρά UAV δεν χρειάζονται διαδρόμους αεροδρομίου. UAV σταθερών πτερύγων που

μπορούν να απογειωθούν σε λιγότερο από 10-30 m ενώ UAV με περιστρεφόμενες πτέρυγες (ελικόπτερα) δεν χρειάζονται καθόλου διάδρομο.

Περιορισμοί

- Περιορισμοί αντοχής — ο χρόνος πτήσης εξακολουθεί να είναι ένας από τους μεγαλύτερους περιορισμούς.
- Χωρητικότητα ωφέλιμου φορτίου.
- Διαθεσιμότητα αισθητήρων— περιορισμένη επιλογή για επαγγελματικούς αισθητήρες κατάλληλους για την τοποθέτηση σε ένα μικρό ελαφρύ UAV.
- Περιορισμοί αισθητήρων— οι μικρότεροι αισθητήρες ενδέχεται να έχουν μικρότερη ευαισθησία, επιλεκτικότητα.
- Αεροδιαστημική ρύθμιση — ένα πλήρες σύνολο κανονισμών λειτουργίας UAV δεν έχει ακόμη καθοριστεί παγκοσμίως.
- Αναγνώριση της Υπηρεσίας Πολιτικής Αεροπορίας — Τα UAV έχουν μοναδικό όφελος για την έρευνα για την ποιότητα του αέρα, πάνω από ηφαίστεια ή μέσα σε λοφία εκρήξεων.
- Ενοποίηση δικτύου συστήματος.
- Αυτόνομη παρακολούθηση λοφίων - αν και λίγοι αλγόριθμοι για αυτόνομη παρακολούθηση λοφίων έχουν αναπτυχθεί και δοκιμαστεί με επιτυχία σε περιβάλλοντα προσομοίωσης, η πραγματική σκοπιμότητα πρέπει ακόμα να αποδειχθεί.

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

6.1 ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ

Οι πειραματικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή του ορυχείου Ποντοκώμης τις πρωινές ώρες. Λόγω του ανοιχτού ορυχείου η περιοχή παρουσιάζει αρκετά υψηλά ποσοστά ρύπων και για το λόγο αυτό επιλέχθηκε. Επιπλέον στο σημείο υπάρχει εγκατεστημένος σταθερός σταθμός παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα ο οποίος και χρησιμεύει ως αναφορά στις μετρήσεις.



Εικόνα 6. Ορυχείο Ποντοκώμης. Τοποθεσία μετρήσεων.

6.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ένα όργανο μετρήσεων χαμηλού κόστους και ένα drone στο οποίο προσαρτήθηκε η συσκευή μέτρησης.

6.2.1 Αισθητήρες

Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις είναι η ECOMZEN της γαλλικής εταιρία ECOMESURE, που είναι εξειδικευμένη στη μέτρηση της ποιότητας του αέρα. Η συσκευή αυτή μετράει με επιμέρους αισθητήρες τη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων (PM10, PM2.5, PM1), το CO₂, τα VOCs, το CO και περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και η ατμοσφαιρική πίεση. Η λειτουργία της συσκευής ECOMZEN βασίζεται στο διαδίκτυο των πραγμάτων (I.o.T) και μπορεί να συνδεθεί αυτόματα στη διαδικτυακή πλατφόρμα της εταιρίας, όπου υπάρχουν πολλές υπηρεσίες όπως άμεσα δεδομένα, προφίλ ποιότητας αέρα, λήψεις, προειδοποιήσεις και αναφορές.



Εικόνα 7. Συσκευή μετρήσεων ρύπων ECOMZEN

Τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης συσκευής είναι τα εξής:

- Είναι μικρών διαστάσεων και ελαφριά
- Μπορεί να καταγράψει πολλές παραμέτρους ταυτόχρονα
- Παρέχει μια συνεχώς εξελισσόμενη ποιότητα των μετρήσεων.
- Είναι απλή στη λειτουργία και ακριβής στις μετρήσεις.

Στον πίνακα 5 παρατίθενται οι μέθοδοι μέτρησης, το εύρος τιμών και το όριο ανίχνευσης για κάθε ρύπο της συσκευής ECOMZEN.

ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ	ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ	ΔΙΑΚΡΙΤΙΚΟ ΟΡΙΟ
NO ₂	Ηλεκτροχημικός	0-20 ppm	< 0.02 ppm
O ₃	Ηλεκτροχημικός	0-20 ppm	< 0.02 ppm
CO	Ηλεκτροχημικός	0-50 ppm	< 0.02 ppm
NO	Ηλεκτροχημικός	0-20 ppm	< 0.08 ppm
SO ₂	Ηλεκτροχημικός	0-50 ppm	< 0.02 ppm
H ₂ S	Ηλεκτροχημικός	0-50 ppm	< 0.01 ppm
NH ₃	Ηλεκτροχημικός	0-100 ppm	< 3 ppm
HCHO	Ηλεκτροχημικός	0-10 ppm	< 0.1 ppm
Cl ₂	Ηλεκτροχημικός	0-20 ppm	< 0.2 ppm
HCl	Ηλεκτροχημικός	0-20 ppm	< 0.5 ppm
VOC ₅₀	Φωτιοιονισμός (PID)	0-50 ppm	1 ppb
VOC ₃₀₀₀	Φωτιοιονισμός (PID)	0-3000 ppm	50 ppb
CO ₂	Μη διασκορπιστική υπέρυθη δέσμη (NDIR)	0-5000 ppm	1 ppm
PM ₁	Οπτικός	0-1000 µg/m ³	1 µg/m ³
PM _{2.5}	Οπτικός	0-1000 µg/m ³	1 µg/m ³
PM ₁₀	Οπτικός	0-1000 µg/m ³	1 µg/m ³

Περιβαλλοντικές Παράμετροι	Τεχνολογία	Εύρος Τιμών	Ακρίβεια
Θερμοκρασία	Αισθητήρας θερμοκρασίας	-20 to +50 °C	0.3 °C
Υγρασία	Αισθητήρας RH	0 to 100% RH	2% HR
Πίεση	Αισθητήρας Πίεσης	950 έως 1050 ηPa	1hPa

Πίνακας 4. Τεχνικά χαρακτηριστικά συσκευής ECOMZEN

Η κάθε συσκευή μπορεί να διαμορφωθεί ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη και για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε μια συσκευή η οποία περιέχει:

1. Ηλεκτροχημικό αισθητήρα για την μέτρηση του CO
2. PID αισθητήρα για την μέτρηση VOC
3. NDIR αισθητήρα για την μέτρηση CO₂
4. Οπτικό Αισθητήρα για την μέτρηση PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀
5. Αισθητήρα θερμοκρασίας
6. Αισθητήρα Υγρασίας
7. GPS για την ακριβή χωρική καταγραφή των μετρήσεων.

6.2.2 Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα

Το drone που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις σε ύψος είναι το Phantom 4 V2.0 από την DJI, με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:



Εικόνα 8. Το Drone Phantom 4 PRO που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις

Βάρος (με μπαταρία και έλικες)	1388 g
Διαγώνιο Μέγεθος (χωρίς έλικες)	350 mm
Μέγιστη ταχύτητα ανόδου	S-mode: 6 m/s P-mode: 5 m/s
Μέγιστη ταχύτητα καθόδου	S-mode: 4 m/s P-mode: 3 m/s
Μέγιστη ταχύτητα	S-mode: 45 mph (72 kph) A-mode: 36 mph (58 kph) P-mode: 31 mph (50 kph)
Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής	S-mode: 250°/s A-mode: 150°/s
Μέγιστο επιχειρησιακό ύψος	19685 feet (6000 m)
Μέγιστη ταχύτητα ανέμου που αντέχει	10 m/s
Μέγιστος χρόνος πτήσης	Περίπου 30 λεπτά
Εύρος θερμοκρασιών	32° to 104°F (0° to 40°C)
Σύστημα Γεωθεσίας	GPS/GLONASS
Ακρίβεια σταθερής θέσης	Vertical: ±0.1 m (with Vision Positioning) ±0.5 m (with GPS Positioning) Horizontal:

	± 0.3 m (with Vision Positioning) ± 1.5 m (with GPS Positioning)
--	---

Πίνακας 5. Τεχνικά χαρακτηριστικά Phantom 4 Pro

Το συγκεκριμένο UAV έχει ικανοποιητικά ισχύ για να μπορεί να σηκώσει την συσκευή μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε και να εκτελέσει μικρό αριθμό μετρήσεων κάτω από διαφορετικές συνθήκες και με μεγάλη χωρική ακρίβεια.

6.3 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ

Για την βαθμονόμηση της συσκευής χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά η πιστοποιημένη συσκευή μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων GRIMM EDM 180, η οποία είναι εγκεκριμένη ως FEM από την EPA και από Ευρωπαϊκές Περιβαλλοντικές Αρχές. Πραγματοποιήθηκαν ταυτόχρονες μετρήσεις στον ίδιο χώρο για ένα χρονικό διάστημα και προέκυψαν τα παρακάτω συγκριτικά αποτελέσματα.



Εικόνα 9. Πιστοποιημένη συσκευή αναφοράς GRIMM EDM 180

Για την αξιολόγηση της συσχέτισης των μετρήσεων του ECOMZEN με τις μετρήσεις του EDM180, χρησιμοποιήθηκε ο Συντελεστής Συσχέτισης Pearson ο οποίος υπολογίζεται από την συνάρτηση:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

όπου X_i και Y_i είναι οι τιμές των δύο οργάνων.

Η βαθμονόμηση έγινε και στις συνολικές ημερήσιες μετρήσεις και στις στιγμιαίες μετρήσεις που καταγράφηκαν κάθε μια ώρα.

Ημερήσιες Μετρήσεις

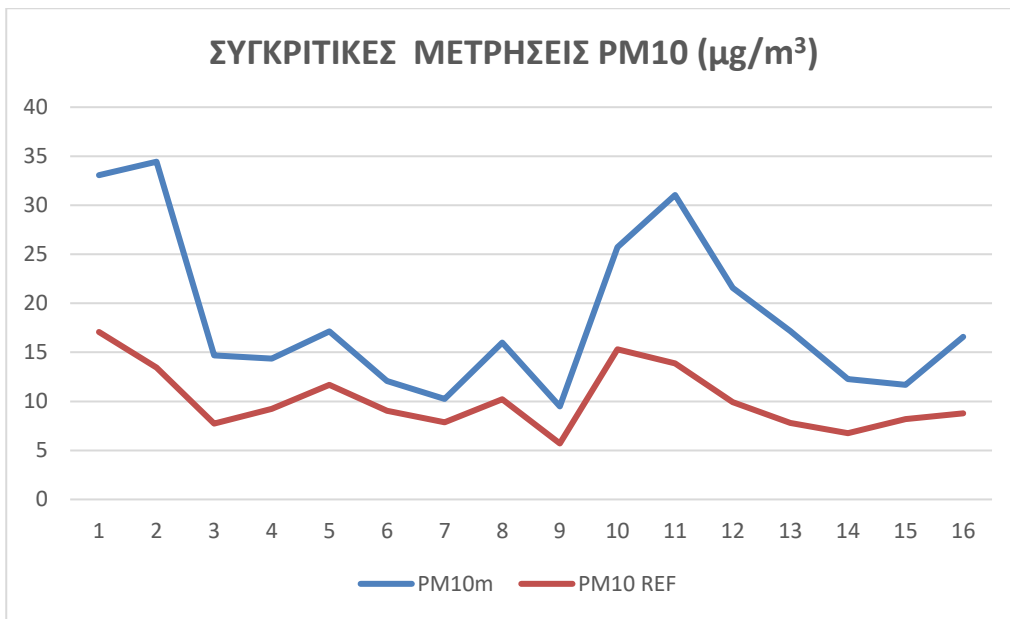
Στον πίνακα 6 παρουσιάζονται οι ημερήσιες τιμές για τα PM και για την σχετική υγρασία και θερμοκρασία όπως καταγράφηκαν από την συσκευή ECOMZEN (m) και την συσκευή αναφοράς EDM 180 (REF)

Month	Day	PM10m	PM2.5m	RHm	Tempm	PM10 REF	PM2.5 REF	RH REF	Temp REF
7	22	33	31	41	28	17	14	39	30
7	23	34	33	41	28	13	11	39	29
7	24	15	14	39	28	8	7	37	29
7	25	14	13	39	29	9	8	37	30
7	26	17	16	39	29	12	10	36	30
7	27	12	11	40	29	9	8	39	31
7	28	10	10	40	30	8	8	37	31
7	29	16	15	37	30	10	10	32	32
7	30	9	9	37	30	6	5	34	32
7	31	26	24	39	30	15	11	36	32
8	1	31	29	38	30	14	13	36	32
8	2	22	21	38	31	10	9	36	33
8	3	17	16	38	32	8	7	35	33
8	4	12	11	35	31	7	6	30	32
8	5	12	11	33	30	8	8	28	32
8	6	17	16	31	30	9	8	27	32

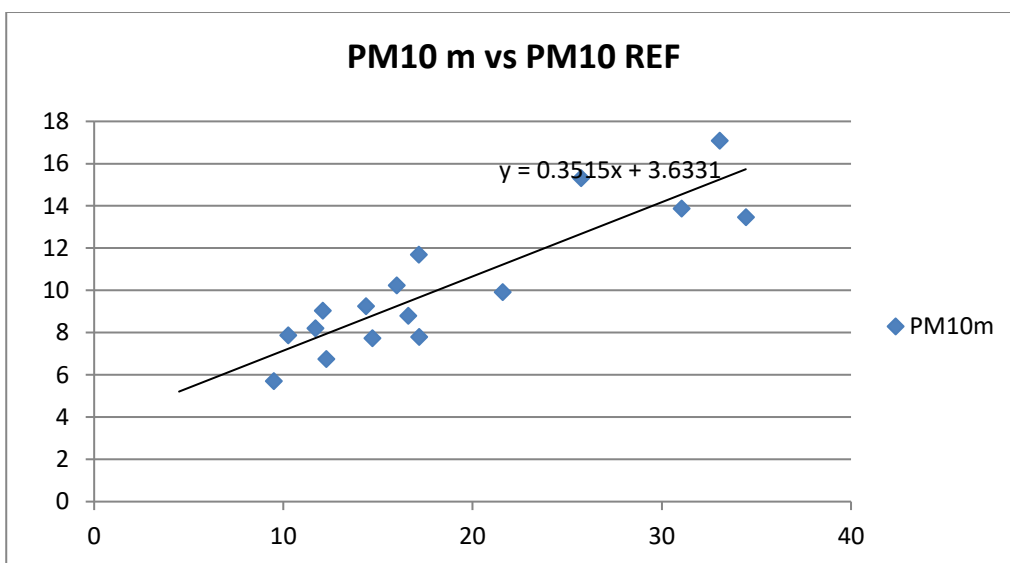
Πίνακας 6. Ημερήσιες μετρήσεις

Στην συνέχεια οι τιμές για κάθε μετρούμενο μέγεθος παρουσιάζονται γραφικά στο ίδιο διάγραμμα για οπτική εποπτεία αλλά και σε διάγραμμα συσχέτισης για να μελετηθεί η αναλογικότητα των μετρήσεων με τα δύο όργανα. Επιπλέον για την μαθηματική επιβεβαίωση της συσχέτισης υπολογίζεται και ο Συντελεστής συσχέτισης Pearson για κάθε μετρούμενη παράμετρο. Όπως προκύπτει υπάρχει καλή γραμμική συσχέτιση μεταξύ των μετρήσεων των δύο συσκευών.

Συγκριτικές Μετρήσεις PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



Συσχέτιση Μετρήσεων PM10.

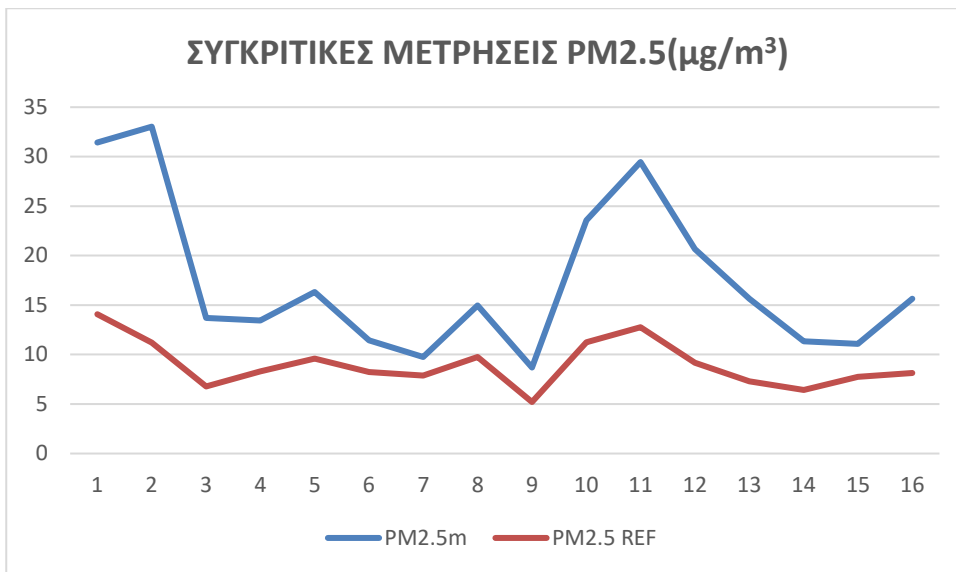


Συντελεστής συσχέτισης Pearson (PM10) = 0,88

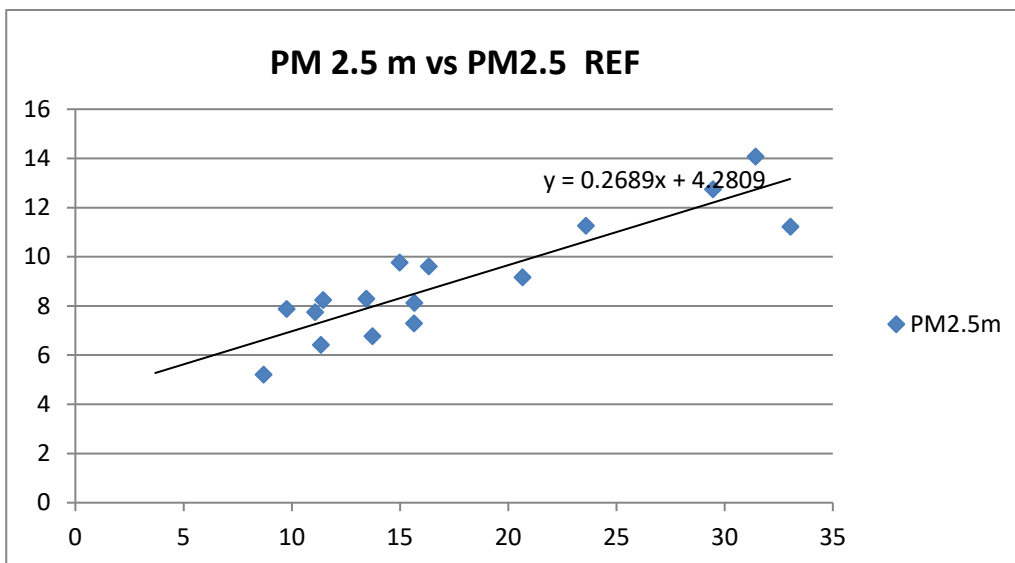
Η γραμμική συνάρτηση μεταξύ μετρήσεων αναφοράς και μετρήσεων οργάνου η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διόρθωση των μετρήσεων των PM10 σωματιδίων είναι:

$$\text{PM10} = 0,3515 \text{ PM10m} + 3,6331$$

Συγκριτικές Μετρήσεις PM2.5



Συσχέτιση Μετρήσεων PM2.5

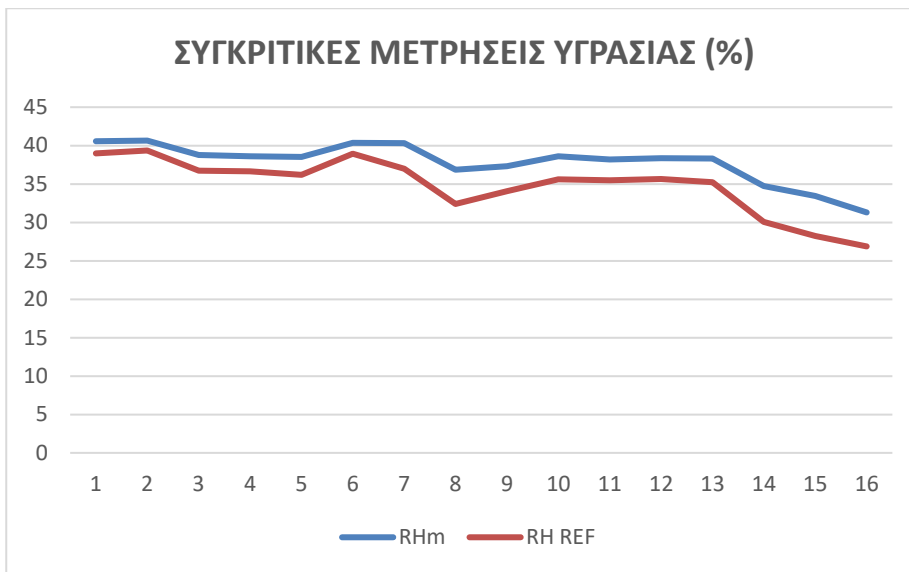


Συντελεστής συσχέτισης Pearson (PM(2.5) = 0,88

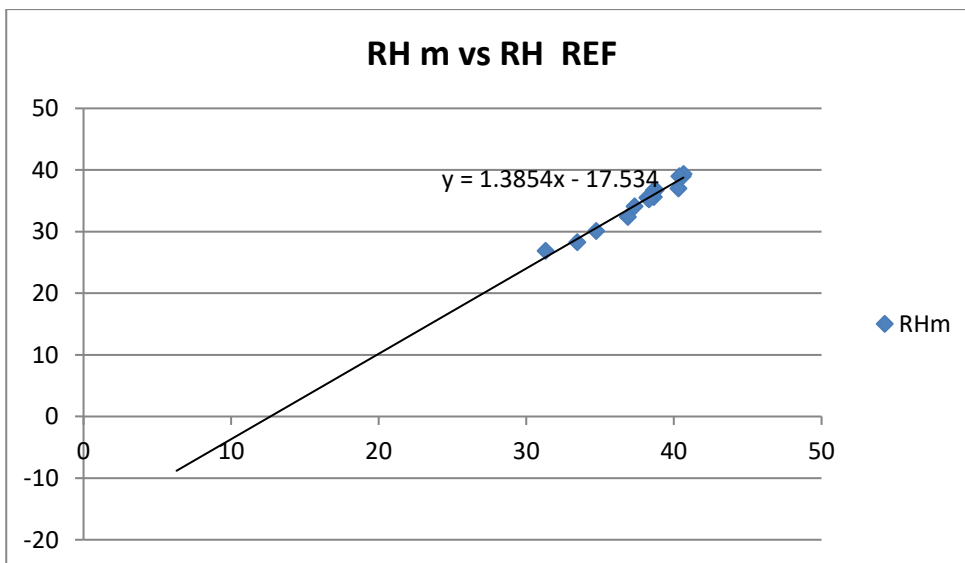
Η γραμμική συνάρτηση μεταξύ μετρήσεων αναφοράς και μετρήσεων οργάνου η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διόρθωση των μετρήσεων των PM2.5 σωματιδίων είναι:

$$PM2.5 = 0,2689 PM2.5m + 4,2809$$

Συγκριτικές Μετρήσεις Υγρασίας



Συσχέτιση Μετρήσεων Υγρασίας.

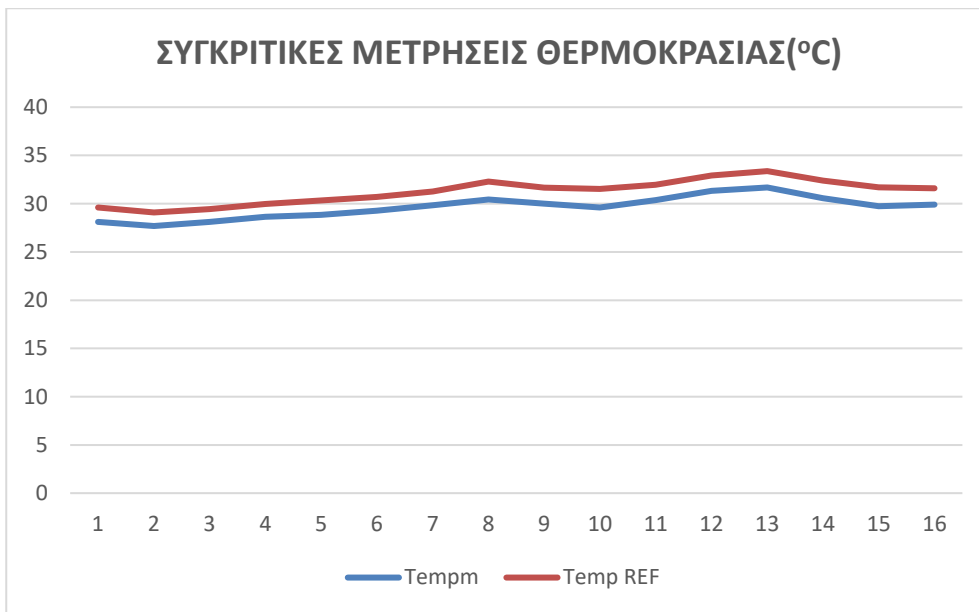


Συντελεστής Συσχέτισης Pearson (RH) = 0,98

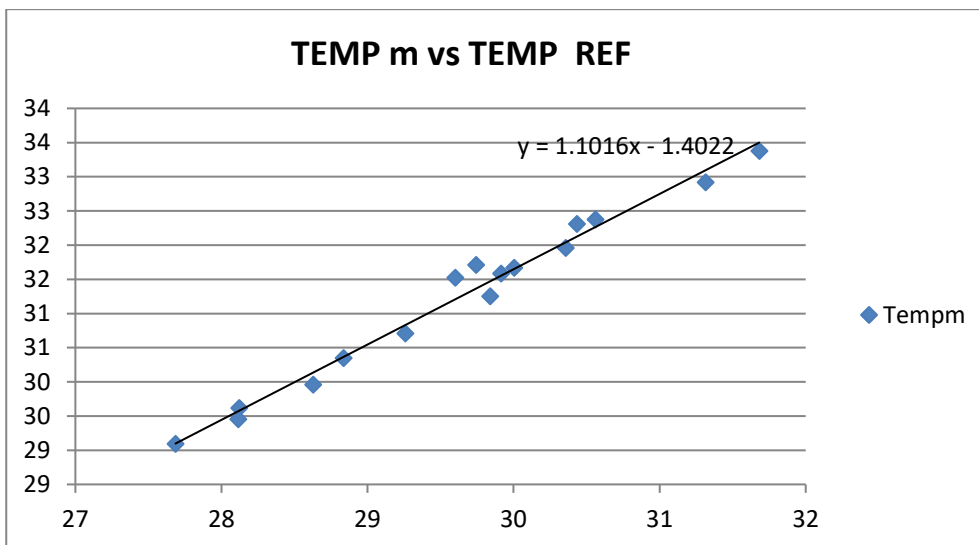
Η γραμμική συνάρτηση μεταξύ μετρήσεων αναφοράς και μετρήσεων οργάνου η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διόρθωση των μετρήσεων της σχετικής υγρασίας είναι:

$$RH = 0,2689 RHm + 4,2809$$

Συγκριτικές Μετρήσεις Θερμοκρασίας



Συσχέτιση Μετρήσεων Θερμοκρασίας



Συντελεστής Συσχέτισης Pearson (TEMP) = 0,99

Η γραμμική συνάρτηση μεταξύ μετρήσεων αναφοράς και μετρήσεων οργάνου η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διόρθωση των μετρήσεων της θερμοκρασίας είναι:

$$\text{TEMP} = 1,1016 \text{ TEMPm} + 1.4022$$

Ωριαίες Μετρήσεις

Εκτός από τις συνολικές ημερήσιες τιμές καταγράφηκαν και οι στιγμιαίες τιμές των μεγεθών ανά ώρα για μια περίοδο 4 ημερών από 1-8 ως και 4-8. Οι τιμές είναι πιο αντιπροσωπευτικές των μετρήσεων που θα γίνουν στα πλαίσια αυτής της μελέτης καθώς οι αισθητήρας θα μετακινούνται με το drone κατά ύψος με σχετικά μεγάλη ταχύτητα (10μ/λεπτό). Ο Πίνακας 7 περιέχει τις τιμές που καταγράφηκαν από τα δύο όργανα.

month	day	hour	PM10	PM2.5		Temp	PM10	PM2.5	RH	Temp
			EDM180	EDM180	RH?EDM180	EDM180	Ecomzen	Ecomzen	Ecomzen	Ecomzen
8	1	1	13,00	12,00	35,00	32,00	30	29	38	30
8	1	2	13,00	12,00	35,00	31,00	32	30	38	30
8	1	3	13,00	12,00	35,00	31,00	31	29	38	30
8	1	4	12,00	12,00	35,00	31,00	29	28	38	30
8	1	5	13,00	12,00	36,00	31,00	28	26	38	29
8	1	6	14,00	12,00	36,00	31,00	27	25	38	29
8	1	7	15,00	13,00	36,00	31,00	32	26	38	29
8	1	8	14,00	12,00	35,00	31,00	29	27	38	29
8	1	9	13,00	11,00	34,00	32,00	27	26	38	30
8	1	10	19,00	14,00	35,00	32,00	30	28	38	31
8	1	11	19,00	16,00	36,00	32,00	39	36	39	31
8	1	12	18,00	17,00	37,00	32,00	39	38	39	30
8	1	13	18,00	17,00	37,00	32,00	40	39	39	30
8	1	14	19,00	18,00	36,00	32,00	42	40	39	31
8	1	15	19,00	18,00	36,00	32,00	51	49	39	31
8	1	16	15,00	15,00	36,00	32,00	40	39	39	31
8	1	17	13,00	12,00	36,00	33,00	31	30	38	31
8	1	18	11,00	11,00	36,00	33,00	28	27	38	31
8	1	19	11,00	10,00	35,00	33,00	24	24	38	31
8	1	20	10,00	10,00	35,00	33,00	24	23	38	31
8	1	21	10,00	10,00	35,00	33,00	23	22	38	31
8	1	22	11,00	10,00	35,00	33,00	23	22	38	31
8	1	23	10,00	10,00	35,00	32,00	23	22	38	31
8	1	24	10,00	10,00	35,00	32,00	23	22	38	31
8	2	1	9,00	9,00	35,00	32,00	22	21	38	31
8	2	2	9,00	9,00	35,00	32,00	20	19	38	31
8	2	3	9,00	8,00	36,00	32,00	20	19	38	31
8	2	4	9,00	8,00	36,00	32,00	19	18	38	30
8	2	5	9,00	9,00	36,00	32,00	19	18	39	30
8	2	6	8,00	8,00	37,00	32,00	18	18	39	30
8	2	7	8,00	8,00	37,00	31,00	18	17	39	30
8	2	8	8,00	8,00	36,00	32,00	18	17	39	30
8	2	9	7,00	7,00	34,00	33,00	17	16	38	31
8	2	10	21,00	15,00	35,00	33,00	25	24	38	31
8	2	11	26,00	20,00	36,00	33,00	51	48	39	31
8	2	12	17,00	15,00	36,00	33,00	41	38	39	31
8	2	13	13,00	12,00	36,00	33,00	31	30	39	31

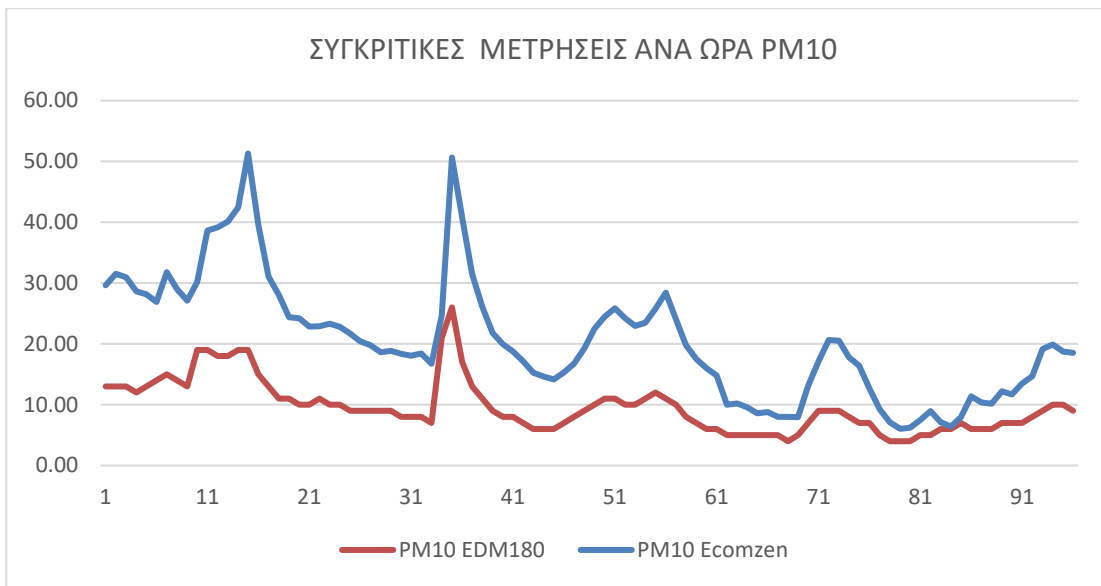
8	2	14	11,00	10,00	35,00	33,00	26	26	39	31
8	2	15	9,00	9,00	36,00	33,00	22	21	39	32
8	2	16	8,00	8,00	36,00	34,00	20	19	39	32
8	2	17	8,00	8,00	35,00	34,00	19	18	38	32
8	2	18	7,00	7,00	35,00	34,00	17	17	38	32
8	2	19	6,00	6,00	35,00	34,00	15	14	38	32
8	2	20	6,00	6,00	34,00	34,00	15	14	37	32
8	2	21	6,00	6,00	35,00	34,00	14	13	38	32
8	2	22	7,00	7,00	36,00	34,00	15	15	38	32
8	2	23	8,00	8,00	37,00	33,00	17	16	39	32
8	2	24	9,00	9,00	37,00	33,00	19	18	39	32
8	3	1	10,00	10,00	38,00	33,00	22	21	40	32
8	3	2	11,00	10,00	38,00	33,00	24	24	40	32
8	3	3	11,00	10,00	38,00	33,00	26	24	40	31
8	3	4	10,00	10,00	38,00	32,00	24	23	40	31
8	3	5	10,00	10,00	38,00	32,00	23	22	40	31
8	3	6	11,00	11,00	39,00	32,00	23	22	40	31
8	3	7	12,00	11,00	39,00	32,00	26	24	40	31
8	3	8	11,00	11,00	38,00	32,00	28	26	40	31
8	3	9	10,00	9,00	37,00	33,00	24	22	40	31
8	3	10	8,00	8,00	36,00	34,00	20	19	39	32
8	3	11	7,00	7,00	36,00	34,00	18	17	39	32
8	3	12	6,00	6,00	36,00	34,00	16	15	39	32
8	3	13	6,00	6,00	35,00	34,00	15	15	39	32
8	3	14	5,00	5,00	34,00	34,00	10	10	38	32
8	3	15	5,00	4,00	34,00	34,00	10	8	38	32
8	3	16	5,00	4,00	34,00	34,00	10	7	38	32
8	3	17	5,00	4,00	33,00	34,00	9	7	37	32
8	3	18	5,00	4,00	32,00	34,00	9	6	37	32
8	3	19	5,00	4,00	32,00	34,00	8	6	36	32
8	3	20	4,00	4,00	32,00	34,00	8	6	36	32
8	3	21	5,00	4,00	32,00	34,00	8	6	36	32
8	3	22	7,00	6,00	32,00	34,00	13	10	36	32
8	3	23	9,00	8,00	33,00	34,00	17	15	36	32
8	3	24	9,00	9,00	32,00	33,00	21	18	36	32
8	4	1	9,00	9,00	32,00	33,00	21	18	36	31
8	4	2	8,00	8,00	32,00	33,00	18	17	36	31
8	4	3	7,00	7,00	33,00	33,00	16	15	36	31
8	4	4	7,00	6,00	33,00	32,00	13	11	36	31
8	4	5	5,00	5,00	33,00	32,00	9	9	36	30
8	4	6	4,00	4,00	33,00	32,00	7	6	36	30
8	4	7	4,00	4,00	33,00	32,00	6	5	36	30
8	4	8	4,00	4,00	32,00	32,00	6	5	36	30
8	4	9	5,00	4,00	30,00	33,00	7	7	35	31
8	4	10	5,00	5,00	29,00	33,00	9	7	35	31
8	4	11	6,00	4,00	29,00	33,00	7	6	34	31

8	4	12	6,00	4,00	29,00	33,00	6	6	34	31
8	4	13	7,00	6,00	30,00	32,00	8	7	35	30
8	4	14	6,00	6,00	29,00	32,00	11	11	35	30
8	4	15	6,00	6,00	29,00	32,00	10	10	34	30
8	4	16	6,00	6,00	29,00	32,00	10	10	34	30
8	4	17	7,00	6,00	28,00	33,00	12	11	34	30
8	4	18	7,00	7,00	28,00	33,00	12	11	33	31
8	4	19	7,00	7,00	28,00	32,00	14	13	33	31
8	4	20	8,00	8,00	28,00	32,00	15	14	33	31
8	4	21	9,00	9,00	29,00	32,00	19	18	33	30
8	4	22	10,00	10,00	28,00	32,00	20	19	33	30
8	4	23	10,00	10,00	29,00	32,00	19	18	33	30
8	4	24	9,00	9,00	29,00	32,00	19	18	34	30

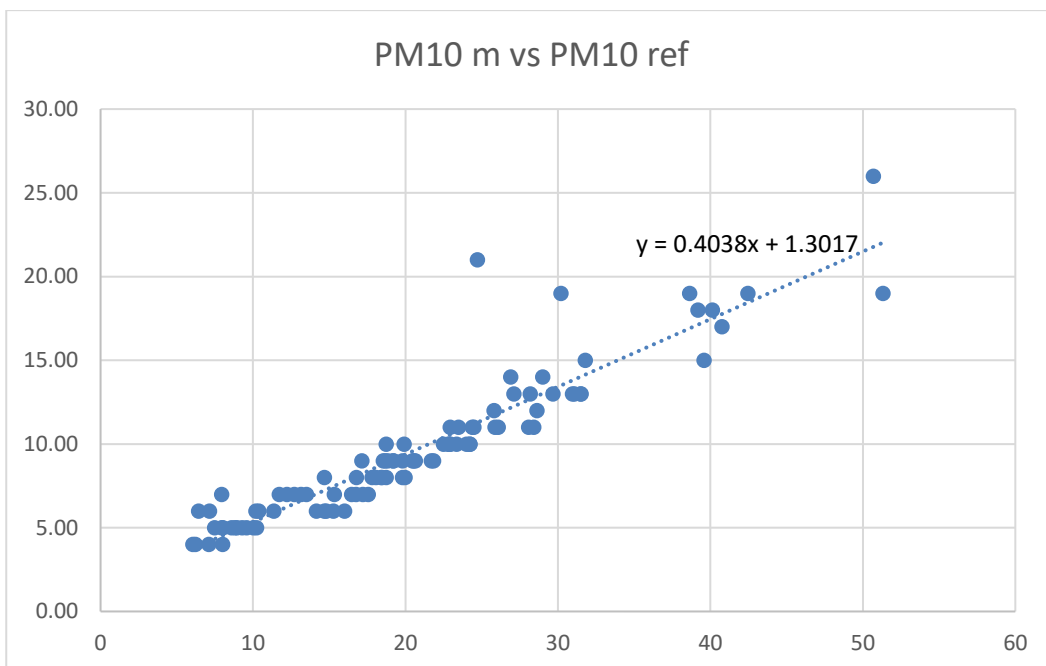
Πίνακας 7. Μετρήσεις ανά ώρα

Και για αυτά τα δεδομένα παρατίθενται τα συγκριτικά διαγράμματα, οι συσχετίσεις και οι συντελεστές συσχέτισης Pearson. Παρατηρείται ότι και εδώ υπάρχει μια ισχυρή συσχέτιση ανάμεσα στις τιμές του οργάνου αναφοράς και οι γραμμικές συναρτήσεις είναι πολύ παρόμοιες με τις συναρτήσεις που προέκυψαν από τις ημερήσιες μετρήσεις.

Συγκριτικές Μετρήσεις PM10 ανά ώρα



Συσχέτιση Μετρήσεων PM10 ανά ώρα

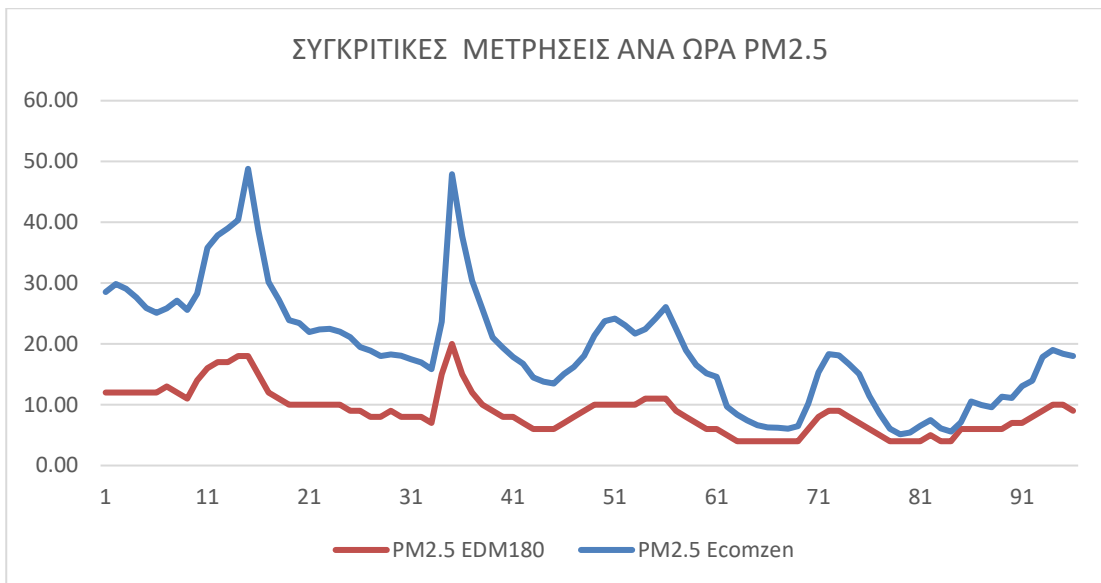


Συντελεστής Συσχέτισης Pearson = 0,93

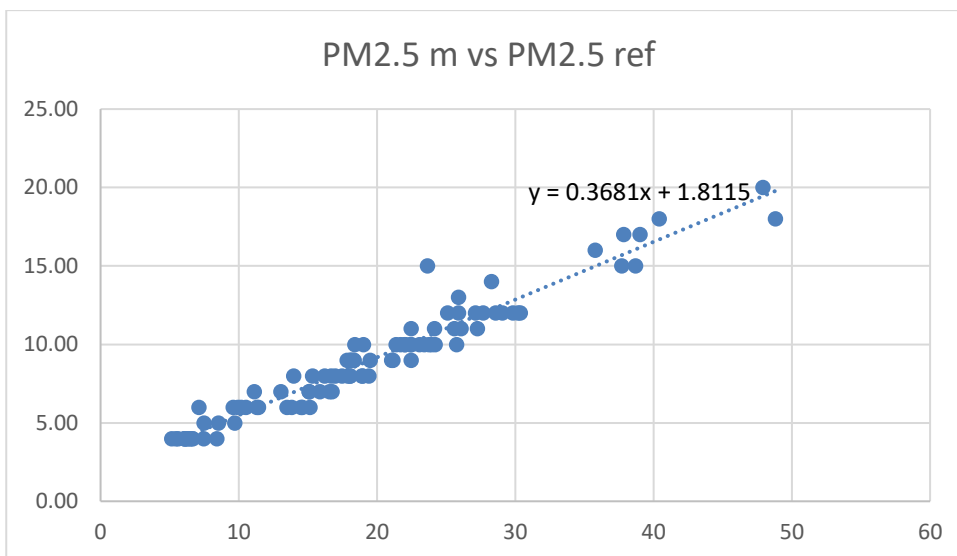
Η γραμμική συνάρτηση μεταξύ μετρήσεων αναφοράς και μετρήσεων οργάνου η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διόρθωση των μετρήσεων των PM10 σωματιδίων είναι:

$$PM10 = 0,4038 PM10m + 1,3017$$

Συγκριτικές Μετρήσεις PM2.5 ανά ώρα



Συσχέτιση Μετρήσεων PM2.5 ανά ώρα.

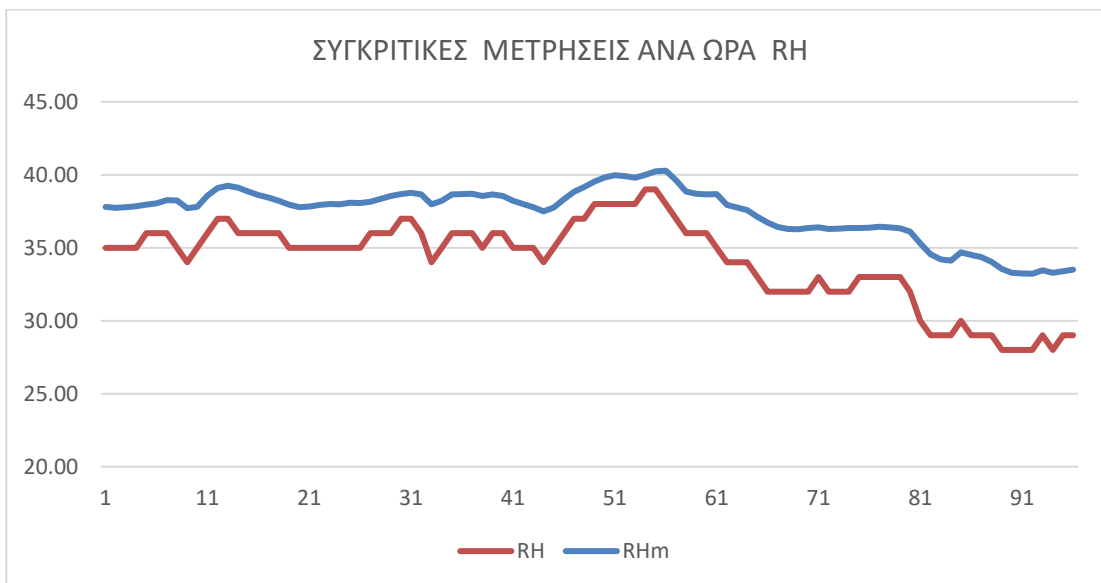


Συντελεστής Συσχέτισης Pearson = 0,97

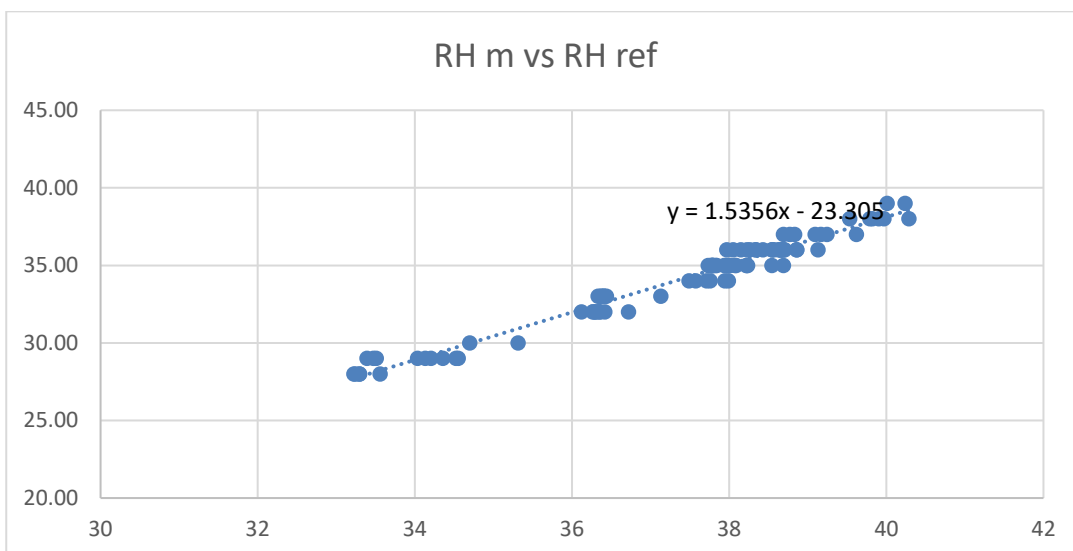
Η γραμμική συνάρτηση μεταξύ μετρήσεων αναφοράς και μετρήσεων οργάνου η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διόρθωση των μετρήσεων των PM2.5 σωματιδίων είναι:

$$PM2.5 = 0,3681 PM2.5m + 1,8115$$

Συγκριτικές Μετρήσεις Υγρασίας ανά ώρα



Συσχέτιση Μετρήσεων Υγρασίας ανά ώρα .



Συντελεστής Συσχέτισης Pearson = 0,98

Η γραμμική συνάρτηση μεταξύ μετρήσεων αναφοράς και μετρήσεων οργάνου η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διόρθωση των μετρήσεων της θερμοκρασίας είναι:

$$RH = 1,525 RHm - 23,305$$

6.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

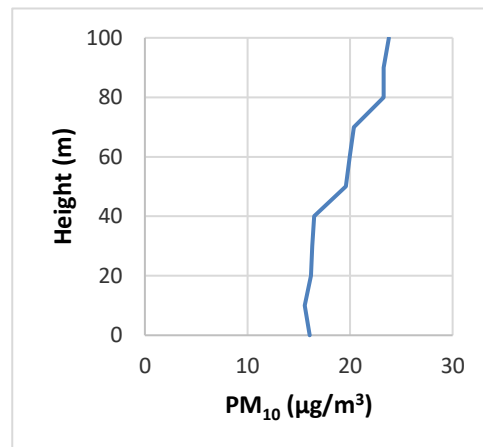
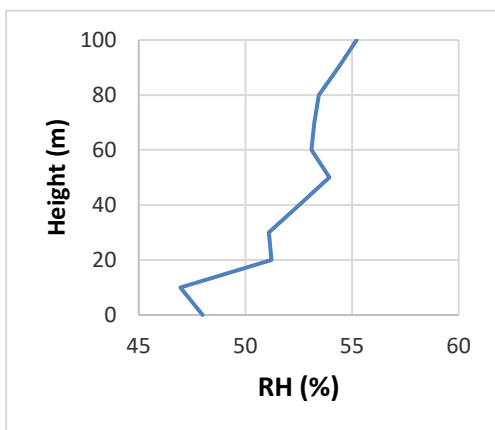
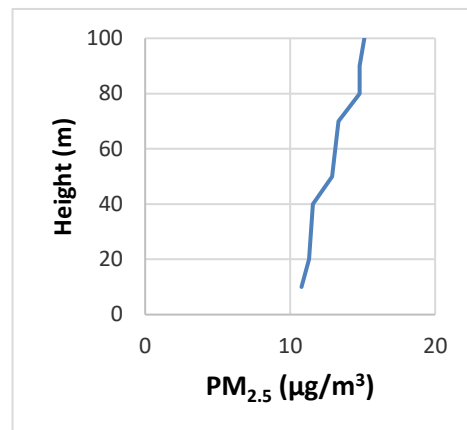
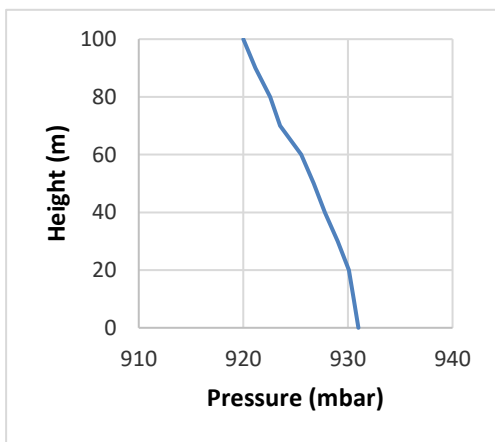
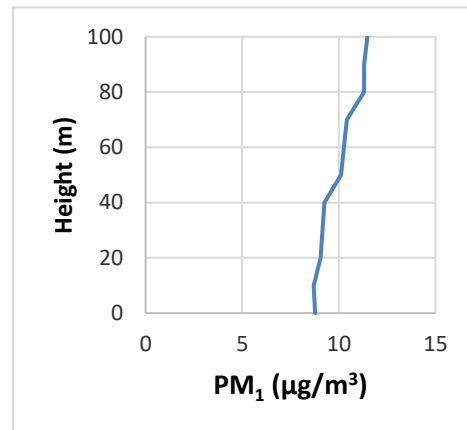
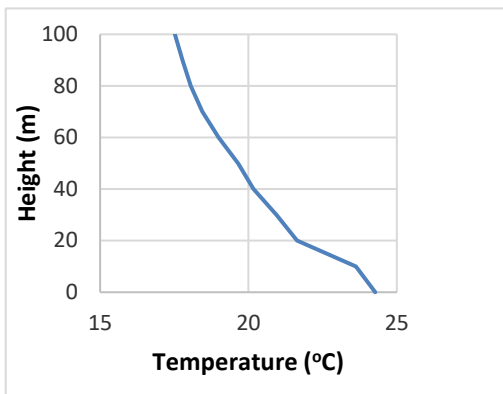
Μετά την βαθμονόμηση των αισθητήρων πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις σε μια περιοχή κοντά σε ορυχείο, για να εκτιμηθεί η δυνατότητα χρήσης του οργάνου για την τρισδιάστατη χωρική καταγραφή των ρύπων σε περιοχές ενδιαφέροντος.

Οι μετρήσεις έγιναν τις πρωινές ώρες σε δύο διαφορετικές ημέρες.

Μετρήσεις 24-5-2022

Date -Time	Temp	RH	Pressure	CO2	PM 1	PM 2.5	PM 10	H
2022-05-24 08:00:00	24	48	931	446	9	11	16	0
2022-05-24 08:01:00	24	47	931	440	9	11	16	10
2022-05-24 08:04:00	22	51	930	466	9	11	16	20
2022-05-24 08:05:00	21	51	929	470	9	11	16	30
2022-05-24 08:06:00	20	53	928	474	9	12	16	40
2022-05-24 08:07:00	20	54	927	468	10	13	20	50
2022-05-24 08:08:00	19	53	926	468	10	13	20	60
2022-05-24 08:09:00	18	53	924	469	10	13	20	70
2022-05-24 08:10:00	18	53	923	446	11	15	23	80
2022-05-24 08:11:00	18	54	921	446	11	15	23	90
2022-05-24 08:12:00	18	55	920	446	11	15	24	100

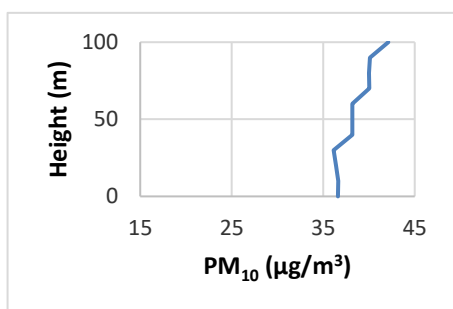
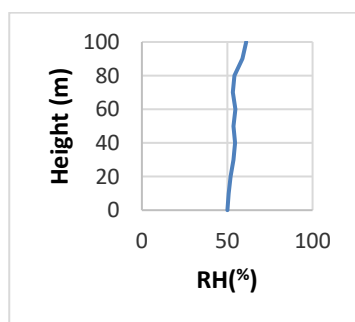
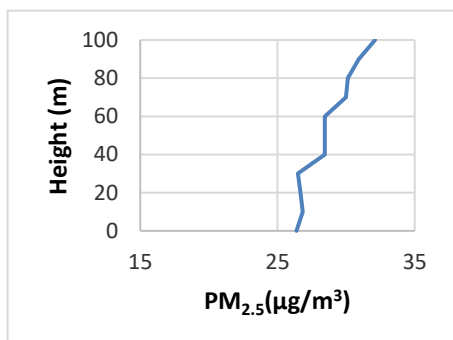
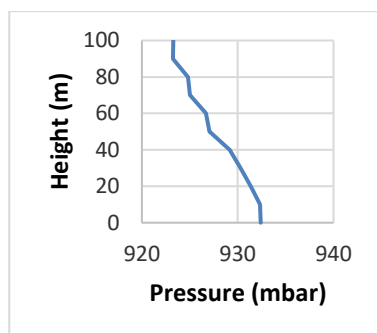
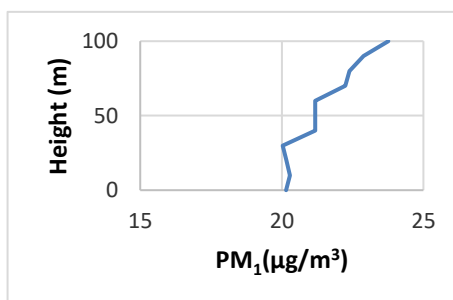
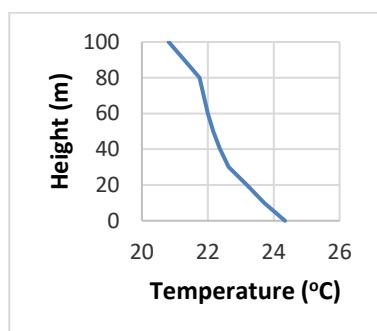
Διαγράμματα μετρήσεων σε συνάρτηση με το ύψος του UAV



Μετρήσεις 25-6-2022 A

Date	Time	Temp	RH	Pressure	CO2	PM 1	PM 2.5	PM 10	H
25/6/2022	7:37:00	24	50	932	501	20	26	37	0
25/6/2022	7:38:00	24	51	932	516	20	27	37	10
25/6/2022	7:39:00	23	52	931	516	20	27	36	20
25/6/2022	7:40:00	23	54	930	512	20	26	36	30
25/6/2022	7:41:00	22	55	929	483	21	28	38	40
25/6/2022	7:42:00	22	54	927	483	21	28	38	50
25/6/2022	7:43:00	22	55	927	483	21	28	38	60
25/6/2022	7:44:00	22	53	925	465	22	30	40	70
25/6/2022	7:45:00	22	54	925	465	22	30	40	80
25/6/2022	7:49:00	21	59	923	473	23	31	40	90
25/6/2022	7:50:00	21	61	923	463	24	32	42	100

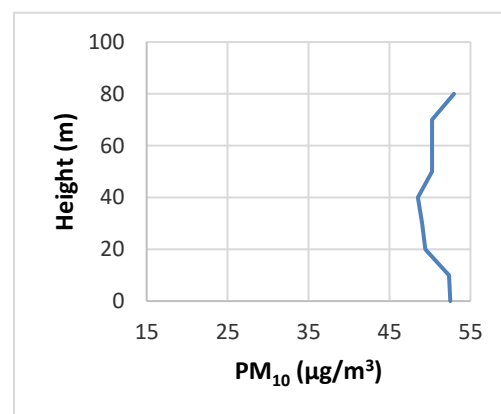
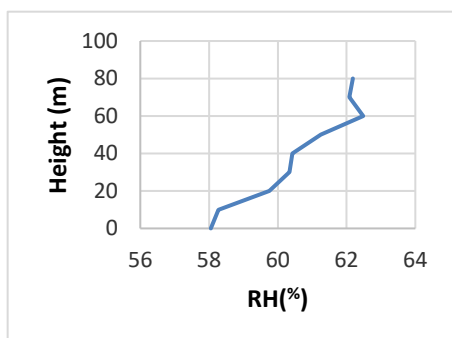
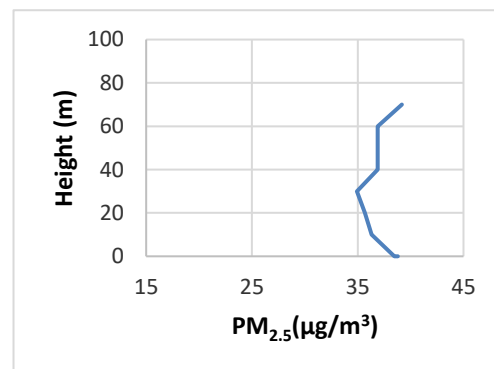
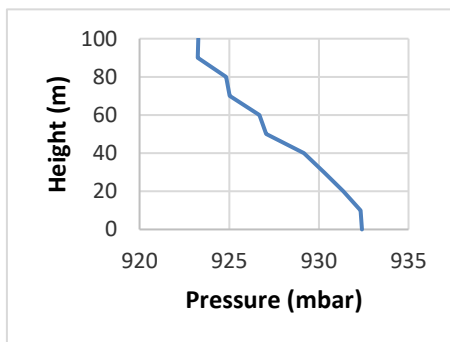
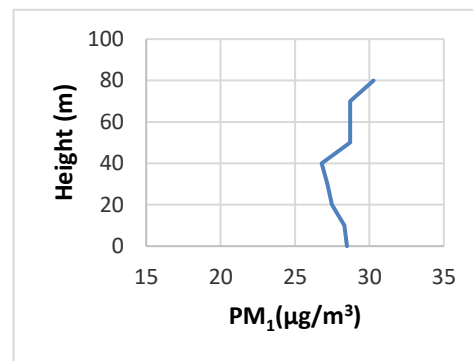
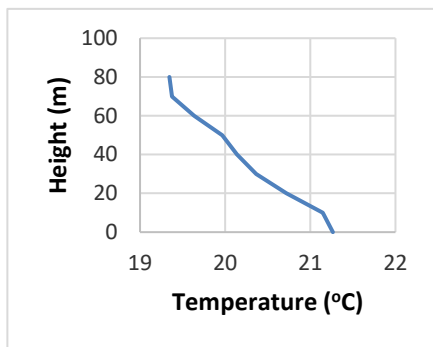
Διαγράμματα μετρήσεων σε συνάρτηση με το ύψος του UAV



Μετρήσεις 25-6-2022 Β

Date	Time	Temp	RH	Pressure	CO2	PM 1	PM 2.5	PM 10	H
25/6/2022	8:11:00	21	58	933	388	28	39	52	0
25/6/2022	8:12:00	21	58	933	397	28	38	52	10
25/6/2022	8:13:00	21	60	931	412	27	36	49	20
25/6/2022	8:14:00	20	60	930	403	27	36	49	30
25/6/2022	8:15:00	20	60	929	395	27	35	49	40
25/6/2022	8:16:00	20	61	928	333	29	37	50	50
25/6/2022	8:17:00	20	62	927	333	29	37	50	60
25/6/2022	8:18:00	19	62	926	333	29	37	50	70
25/6/2022	8:19:00	19	62	925	337	30	39	53	80

Διαγράμματα μετρήσεων σε συνάρτηση με το ύψος του UAV



6.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Βασικός στόχος της μελέτης ήταν να διαπιστωθεί η δυνατότητα του συστήματος να μετρήσει αξιόπιστα τους ρύπους και ειδικότερα τα αιωρούμενα σωματίδια σε διάφορα ύψη και σε διαφορετικές. Όπως παρατηρείται από τα δεδομένα τα οποία συγκεντρώθηκαν, τα μετρώμενα μεγέθη έχουν τα ίδια γενικά χαρακτηριστικά και στις τρεις μετρήσεις και ανταποκρίνονται στις αναμενόμενες τιμές.

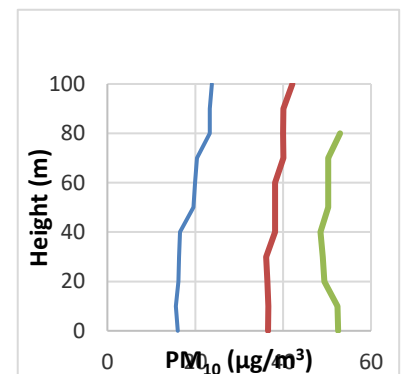
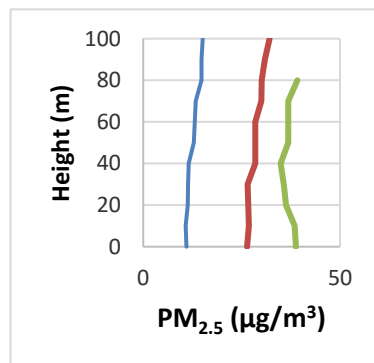
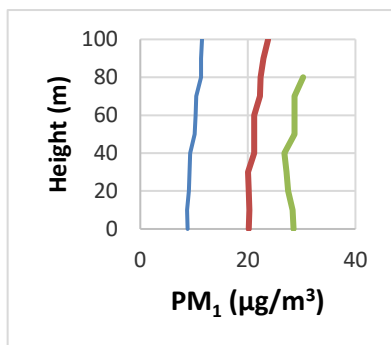
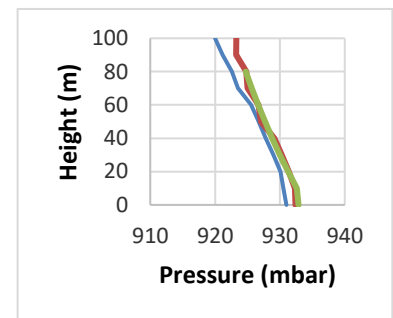
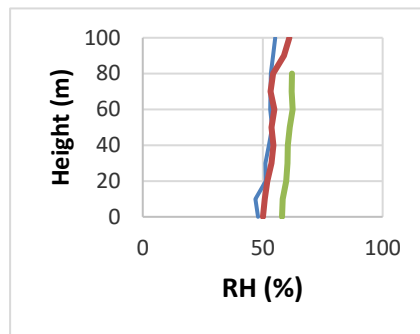
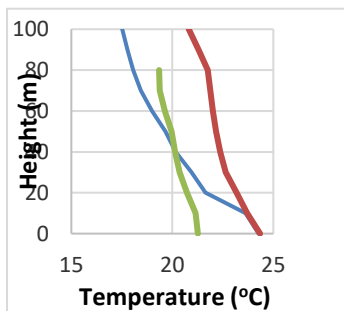
Πιο συγκεκριμένα η θερμοκρασία μειώνεται με το υψόμετρο και μάλιστα στην μέτρηση που πραγματοποιήθηκε σε πιο κρύα εποχή ο ρυθμός μείωσης είναι μεγαλύτερος.

Η πίεση σε όλες τις μετρήσεις μειώνεται κατά 1 mbar ανά 10 μέτρα που είναι και η αναμενόμενη μεταβολή της ατμοσφαιρικής πίεσης.

Η σχετική υγρασία παρουσιάζει μια μικρή αύξηση με το ύψος που μπορεί να εξηγηθεί λόγω της μείωσης της θερμοκρασίας.

Τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν μια αυξητική τάση όσο αυξάνεται το ύψος που μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι οι μετρήσεις έγιναν σε πρωινές ώρες και οι ατμοσφαιρικές συνθήκες δεν συντελούν στην παγίδευσή τους κοντά στο έδαφος. Στην μια μέτρηση που έγινε πιο κοντά στην πηγή ρύπων παρατηρείται μια ελαφρά μείωση των σωματιδίων μέχρι τα 50 μέτρα και στην συνέχεια παρατηρείται πάλι αύξηση.

Για την καλύτερη σύγκριση των αποτελεσμάτων, παρατίθενται σε ενοποιημένα διαγράμματα οι τιμές των τριών μετρήσεων.



7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκαν οι πιστοποιημένες μέθοδοι για την μέτρηση ατμοσφαιρικών ρύπων και στην συνέχεια παρουσιάστηκαν μέθοδοι για γρήγορη και οικονομική αλλά ταυτόχρονα αξιόπιστη μέτρηση με ανιχνευτές χαμηλού κόστους. Απώτερος στόχος ήταν η χρήση χαμηλού κόστους αισθητήρων σε συνδυασμό με μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα για την παρακολούθηση ατμοσφαιρικών ρύπων με υψηλή χωρική ανάλυση τόσο στο έδαφος όσο και κατακόρυφα στην ατμόσφαιρα.

Δοκιμάστηκε η απόδοση ενός συστήματος ECOMZEN το οποίο παρέχει μετρήσεις διαφόρων ρύπων αναρτημένο σε ένα Panther 4 Pro μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα και μετρήθηκαν αιωρούμενα σωματίδια σε διάφορα ύψη από το έδαφος. Ως όργανο αναφοράς χρησιμοποιήθηκε ένα Grimm EDM 180. Οι μετρούμενες συγκεντρώσεις αριθμού σωματιδίων του οργάνου EECOMEN υπό συνθήκες δωματίου βρέθηκαν συγκρίσιμες με εκείνες του οργάνου αναφοράς για σωματίδια PM1, PM2.5 και PM10 παρουσιάζοντας συντελεστές συσχέτισης από 0,88 ως 0,98. Επιπλέον παρατηρήθηκε μια γραμμική συνάρτηση μεταξύ των μετρήσεων των δύο οργάνων, με αποτέλεσμα να θεωρούνται αξιόπιστες οι μετρήσεις του υπό εξέταση οργάνου.

Οι μετρήσεις που προέκυψαν από πειράματα που έγιναν σε περιοχές με σχετικά χαμηλή ποιότητα αέρα (ανοιχτό ορυχείο) στο έδαφος ήταν παρόμοιες με μετρήσεις από επίγειο σταθερό σταθμό μετρήσεων ενώ σε υψόμετρα από 10 ως 100 μέτρα αντιστοιχούν στο αναμενόμενο προφίλ που αντιστοιχεί στις περιβαλλοντικές συνθήκες θερμοκρασίας πίεσης και υγρασίας. Προκαταρκτικά φαίνεται ότι οι έλικες του ελικοπτέρου δεν επηρεάζουν σημαντικά τις μετρήσεις των αισθητήρων, ιδιαίτερα αν αυτοί βρίσκονται σε απόσταση από το ιπτάμενο όχημα (2-3 μέτρα)

Το βασικό πρόβλημα που παρουσιάστηκε κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων είναι η μικρός χρόνος πτήσης του UAV, ο οποίος δεν επιτρέπει την καταγραφή πολλών σημείων με μια συνεχόμενη πτήση. Σε επόμενες προσπάθειες θα μειώσουμε το βάρος του οχήματος έτσι ώστε να αυξηθεί ο χρόνος πτήσης και να μπορέσουμε να καταγράψουμε με ακρίβεια τους ρύπους σε ένα αρκετά μεγάλο πλέγμα (μερικές εκατοντάδες μέτρα) και να μπορέσουμε να συγκρίνουμε τα δεδομένα με αυτά που προκύπτουν από διάφορα μοντέλα προσομοίωσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Tommaso Francesco Villa, Felipe Gonzalez, Branka Miljievic, Zoran D. Ristovski, Lidia Morawska, An Overview of Small Unmanned Aerial Vehicles for Air Quality Measurements: Present Applications and Future Prospectives, *Sensors* 2016, 16, 1072;
- [2] Ε.Τάγαρης, «Ατμοσφαιρικοί Ρύποι», Εκπαιδευτικές Σημειώσεις, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας
- [3] Ε.Τάγαρης, «Πηγές Ρύπων στην Ατμόσφαιρα», Εκπαιδευτικές Σημειώσεις, Τμήμα Χημικών Μηχανικών
- [4] Μπιζίνη Αικατερίνη, ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ ΑΠΟ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΠΗΓΕΣ, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Τεχνολογίας Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου, ΤΕΙ Καβάλας, 2010,
- [5] <https://www.environmentalpollution.in/air-pollutants/how-to-measure-air-pollutants-air-pollution/5171>
- [6] Ζουνης Νικόλαος, Μετρήσεις Ποιότητας Ατμοσφαιρικού Περιβάλλοντος και Βιοκλιματικών Συνθηκών στο Κέντρο της Αθήνας Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής Αθήνα, Οκτώβριος 2020
- [7] Kumar, P., Morawska, L., Martani, C., Biskos, G., Neophytou, M., Sabatino, S.D., Bell, M., Norford, L., Britter, R., 2015. The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. *Environ. Int.* 7.
- [8] Lewis, A.C., n.d. Low-cost sensors for the measurement of atmospheric composition: overview of topic and future applications 68.
- [9] Oletic, D., Bilas, V., 2015. Design of sensor node for air quality crowdsensing, in: 2015 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS). Presented at the 2015 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), IEEE, Zadar, Croatia, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/SAS.2015.7133628>
- [10] Pang, X., 2018. The impacts of water vapour and co-pollutants on the performance of electrochemical gas sensors used for air quality monitoring 11.
- [11] Tian, Y., 2019. Analysis of spatial and seasonal distributions of air pollutants by incorporating urban morphological characteristics 14.
- [12] Wei, P., Ning, Z., Ye, S., Sun, L., Yang, F., Wong, K., Westerdahl, D., Louie, P., 2018. Impact Analysis of Temperature and Humidity Conditions on Electrochemical Sensor Response in Ambient Air Quality Monitoring. *Sensors* 18, 59. <https://doi.org/10.3390/s18020059>
- [13] Jacobson, M.Z.; Kaufman, Y.J. Wind reduction by aerosol particles. *Geophys. Res. Lett.* 2006, 33.
- [14]Ramanathan, V.; Crutzen, P.J.; Lelieveld, J.; Mitra, A.P.; Althausen, D.; Anderson, J.; Andreae, M.O.; Cantrell, W.; Cass, G.R.; Chung, C.E.; et al. Indian ocean experiment: An integrated analysis of the climate forcing and effects of the great Indo-Asian haze. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2001, 106, 28371–28398.
- [15] Kaufman, Y.J.; Tanre, D.; Boucher, O. A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature* 2002, 419, 215–223.

- [16] Podgorny, I.A.; Ramanathan, V. A modeling study of the direct effect of aerosols over the tropical Indian ocean. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2001, 106, 24097–24105.
- [17] Menon, S.; Hansen, J.; Nazarenko, L.; Luo, Y.F. Climate effects of black carbon aerosols in China and India. *Science* 2002, 297, 2250–2253.
- [18] Lelieveld, J.; Berresheim, H.; Borrmann, S.; Crutzen, P.J.; Dentener, F.J.; Fischer, H.; Feichter, J.; Flatau, P.J.; Heland, J.; Holzinger, R.; et al. Global air pollution crossroads over the mediterranean. *Science* 2002, 298, 794–799.
- [19] Brenninkmeijer, C.A.M.; Crutzen, P.J.; Fischer, H.; Gusten, H.; Hans, W.; Heinrich, G.; Heintzenberg, J.; Hermann, M.; Immelmann, T.; Kersting, D.; et al. Caribic-civil aircraft for global measurement of trace gases
- [20] Corrigan, C.E.; Roberts, G.C.; Ramana, M.V.; Kim, D.; Ramanathan, V. Capturing vertical profiles of aerosols and black carbon over the Indian ocean using autonomous unmanned aerial vehicles. *Atmos. Chem. Phys.* 2008, 8, 737–747.
- [21] Hitchins, J.; Morawska, L.; Wolff, R.; Gilbert, D. Concentrations of submicrometre particles from vehicle emissions near a major road. *Atmos. Environ.* 2000, 34, 51–59.
- [22] Gramotnev, G.; Brown, R.; Ristovski, Z.; Hitchins, J.; Morawska, L. Determination of average emission factors for vehicles on a busy road. *Atmos. Environ.* 2003, 37, 465–474.
- [23] Zhu, Y.; Fung, D.C.; Kennedy, N.; Hinds, W.C.; Eiguren-Fernandez, A. Measurements of ultrafine particles and other vehicular pollutants inside a mobile exposure system on los angeles freeways. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 2008, 58, 424–434.
- [24] Nikolova, I.; Janssen, S.; Vrancken, K.; Vos, P.; Mishra, V.; Berghmans, P. Size resolved ultrafine particles emission model—A continues size distribution approach. *Sci. Total Environ.* 2011, 409, 3492–3499.
- [25] Hudda, N.; Cheung, K.; Moore, K.F.; Sioutas, C. Inter-community variability in total particle number concentrations in the eastern los angeles air basin. *Atmos. Chem. Phys.* 2010, 10, 11385–11399.
- [26] Moore, K.; Krudysz, M.; Pakbin, P.; Hudda, N.; Sioutas, C. Intra-community variability in total particle number concentrations in the san pedro harbor area (Los Angeles, California). *Aerosol Sci. Technol.* 2009, 43, 587–603.
- [27] Ras, M.R.; Borrull, F.; Marcé, R.M. Sampling and preconcentration techniques for determination of volatile organic compounds in air samples. *TrAC Trends Anal. Chem.* 2009, 28, 347–361.
- [28] Ras, M.; Marcé, R.; Borrull, F. Volatile organic compounds in air at urban and industrial areas in the tarragona region by thermal desorption and gas chromatography–mass spectrometry. *Environ. Monit. Assess.* 2010, 161, 389–402.
- [29] Bouvier-Brown, N.C.; Goldstein, A.H.; Gilman, J.B.; Kuster, W.C.; de Gouw, J.A. In-situ ambient quantification of monoterpenes, sesquiterpenes, and related oxygenated compounds during bearpex 2007: Implications for gas- and particle-phase chemistry. *Atmos. Chem. Phys.* 2009, 9, 5505–5518.
- [30] Toscano, P.; Gioli, B.; Dugheri, S.; Salvini, A.; Matese, A.; Bonacchi, A.; Zaldei, A.; Cupelli, V.; Miglietta, F. Locating industrial voc sources with aircraft observations. *Environ. Pollut.* 2011, 159, 1174–1182.
- [31] Barnhart, R.K. *Introduction to Unmanned Aircraft Systems*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2012.

[32] Holland, G.; McGeer, T.; Youngren, H. Autonomous aerosondes for economical atmospheric soundings anywhere on the globe. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1992, 73, 1987–1998.

[33] Gatewing. Available online: <http://www.gatewing.com> (accessed on 8 October 2014).

70. [24] (ARCAA), Australian Research Centre for Aerospace Automation. Enhanced Flight Assist System (eFAS) for automated Aerial Survey of Powerline Networks. Available online: <http://www.arcaa.net/research/enhanced-flight-assist-system-efas-for-automated-aerial-survey-of-powerline-networks/>

[35] Bachrach, A.; He, R.; Roy, N. Autonomous flight in unknown indoor environments. *Int. J. Micro Air Veh.* 2009, 1, 217–228.

[36] Fahlstrom, P.G.; Gleason, T.J. Mission planning and control. In *Introduction to UAV Systems*, 4th ed.; John Wiley & Sons, Ltd.: Hoboken, NJ, USA, 2012; p. 99.

[37] Fahlstrom, P.G.; Gleason, T.J. Mission planning and control station. In *Introduction to UAV Systems*, 4th ed.; John Wiley & Sons, Ltd.: Hoboken, NJ, USA, 2012; pp. 101–118.

[38] Fahlstrom, P.G.; Gleason, T.J. Air vehicle and payload control. In *Introduction to UAV Systems*, 4th ed.; John Wiley & Sons, Ltd.: Hoboken, NJ, USA, 2012; pp. 119–130.

[39] Qijun Gu, Drew R. Michanowicz, Chunrong Jia, “Developing a Modular Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Platform for Air Pollution Profiling”, *Sensors* 2018, 18, 4363;

[40] Spyros Bezantakos, Fabian Schmidt-Ott, and George Biskos, Performance evaluation of the cost-effective and lightweight Alphasense optical particle counter for use onboard unmanned aerial vehicle, *AEROSOL SCIENCE AND TECHNOLOGY* 2018, VOL. 52, NO. 4, 385–392

[41] Eben S. Cross, Leah R. Williams, David K. Lewis, Gregory R. Magoon, Timothy B. Onasch, Michael L. Kaminsky, Douglas R. Worsnop, and John T. Jayne, Use of electrochemical sensors for measurement of air pollution: correcting interference response and validating measurements *Atmos. Meas. Tech.*, 10, 3575–3588, 2017

[42] James M. Brady, M. Dale Stokes, Jim Bonnardel, and Timothy H. Bertram, Characterization of a Quadrotor Unmanned Aircraft System for Aerosol-Particle-Concentration Measurements *Environ. Sci. Technol.* 2016, 50, 1376–1383

[43] Xiaochi Zhou, Johanna Aurell, William Mitchell, Dennis Tabor, Brian Gullett, A small, lightweight multipollutant sensor system for ground-mobile and aerial emission sampling from open area sources, / *Atmospheric Environment* 154 (2017) 31e41