



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

"Διερεύνηση της κατακόρυφης διακύμανσης των συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικών ρύπων σε αστικό περιβάλλον".

ΓΙΩΡΓΟΣ ΡΟΥΠΑΚΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Δρ Κωνσταντίνος Μουστρής ,Καθ.ΠΑ.Δ.Α

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Όνοματεπώνυμο	Υπογραφή
Δρ Κωνσταντίνος Μουστρής	
Δρ Κοσμάς Καββαδίας	
Δρ Κωνσταντίνος-Ιωάννης Βασιλόπουλος	

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	13
1.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΡΥΠΩΝ	13
1.2	Η ΡΟΗ ΣΤΟ ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ ΚΑΙ Η ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΗΣ	16
1.3	ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΡΥΠΩΝ ΣΕ ΔΟΜΗΜΕΝΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	22
1.4	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΡΥΠΩΝ.....	34
2	ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΛΥΣΗ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ.....	55
3	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΟΣ	67
4	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ_ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ SENSOR	77
4.1	ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ.....	77
4.2	$1^{H\epsilon}$ ΓΕΝΙΑΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ	82
4.3.....	.....	82
4.3.1.....	.....	82
4.3.2.....	.....	85
4.4.....	.....	93
5	Η ΠΛΑΚΕΤΑ ARDUINO.....	98
5.1	ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΠΑΝΩ ΣΤΗΝ ΠΛΑΚΕΤΑ ARDUINO	98
5.1.1	Γενική απόκριση του ανιχνευτή	101
5.2	Αισθητήρας και μικροελεγκτής για μέτρηση PM αέρα	102
5.3	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	102
	.....	Error! Bookmark not defined.
5.3.1	SENSOR ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΥΓΡΑΣΙΑΣ.....	Error! Bookmark not defined.
5.3.2	SENSOR ΥΨΟΥΣ.....	Error! Bookmark not defined.
5.3.3	ΚΟΥΤΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΑ PM	Error! Bookmark not defined.

5.3.4	ΣΧΟΛΙΟ.....	Error! Bookmark not defined.
5.4	ΕΞΕΛΙΞΗ_ΠΑΡΕΜΒΑΣΗ ΙΔΙΟΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΑΠΟΚΤΗΘΕΙΣΑ ΕΜΠΕΙΡΙΑ.....	110
5.5	ΤΑ ΒΗΜΑΤΑ ΤΕΛΕΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ SENSOR PM.....	111
5.6	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	113
5.6.1	Γενική περιγραφή.....	113
5.6.2	ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΠΕΔΙΟΥ	116
5.6.3	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΠΟΘΕΣΙΩΝ.....	117
5.7	ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΛΥΣΗ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ Green.....	121
5.8	ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ ΣΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ (_ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ) :.....	125
5.9	<u>ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ</u>	129
5.10	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ RAWDATA.....	134
5.10.1	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ 1 ΜΕ 15 ΦΛΕΒΑΡΗ	138
5.11	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ-ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	142
5.11.1	Α .Ανάπτυξη μοντέλου	142
5.11.2	Β ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ	143
5.12	ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	144
5.13	Αποτελέσματα και συζήτηση Κάθετες διακυμάνσεις στις συγκεντρώσεις PM	145
6	ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	Error! Bookmark not defined.
7	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1 (ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ARDUINO UNO _SENSORS).....	176
8	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2 (ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ DRONE)	193
9	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3 (SENSOR OPCN3 ALPHASENSE).....	197
	Particulate Matter / PM Sensor OPC-N3 sensor	198
	Χαρακτηριστικά του Particulate Matter / PM SensorOPC-N3 sensor	198
10	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4_ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	201

11	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5_ ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	217
----	-------------------------------------	-----

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Τρεις κλίμακες μήκους εντός των επιφανειακών υποστρωμάτων Rogi et al 2004	13
Εικόνα 2 Δομή Στροβιλισμού Roth 2000	20
Εικόνα 3 Ροή γύρω από απομονωμένο κτίριο (23).....	25
Εικόνα 4 Πεδίο ροής σε διασταύρωση δρόμου που απεικονίζει τις διαδικασίες ανάμιξης (6)	25
Εικόνα 5 Πεδίο ανέμου και αναταράξεων (6)	27
Εικόνα 6 Σχηματισμός α) καταστροφής β) αναστροφής θερμοκρασίας A.Samad et al 2020.....	35
Εικόνα 7 Συγκέντρωση PM 1 κατά τον σχηματισμό α) αναστροφής και β) καταστροφής A.Samad et al 2020	36
Εικόνα 8 Ωριαία παραλλαγή α)PM1 β)CO γ) BC δ)ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ε)σχετική υγρασία ζ) ταχύτητα ανέμου Kai Fa Lu (2020).....	37
Εικόνα 9 Κάθετο προφίλ παρατηρήσεων για συγκεντρώσεις PM1 Kai Fa Lu (2020)	37
Εικόνα 10 Κατακόρυφη κατανομή ρύπων (Chang et al 2019).....	40
Εικόνα 11 Μετρήσεις UAV στην Κίνα (Lili et al 2020)	50
Εικόνα 12 UAV με σένσορες χαμηλού κόστους και ενδεικτικά αποτελέσματα Fumian et al 2020.....	92
Εικόνα 13 Βασικά στοιχεία ανιχνευτή (Διπλωματική ΕΜΠ .Μαλανδράκης).....	94
Εικόνα 14 Εσωτερική συνδεσμολογία ανιχνευτή (Διπλωματική Μαλανδράκης).....	95
Εικόνα 15 Κύκλωμα εισόδου τάσης -ρεύματος (Διπλωματική ΕΜΠ ΜΑΛΑΝΔΡΑΚΗΣ)	96
Εικόνα 16 Σχέση συγκεντρώσεως ρύπων και τάσης	97
Εικόνα 17 Διάγραμμα απόκρισης πρότυπης ανιχνευτικής συσκευής (Διπλωματική Μαλανδράκης)	102
Εικόνα 18 Ανιχνευτής Sharp (SHARP CO)	103
Εικόνα 19 Sensors LIDAR HEIGHT , HUMIDITY , TEMPERATURE (GARMIN CO).....	104
Εικόνα 20 Σένσορας και οι βελτιώσεις του	105
Εικόνα 21 PM outdoor air quality Monitor Purple Ai8r 2 (PURPLEAIR)	109
Εικόνα 22 UAV και ανάρτηση σένσορων	119

TABLES

<u>ΠΙΝΑΚΑΣ 1 Ενταση αναταράξεων</u>	13
<u>ΠΙΝΑΚΑΣ 2 Απόκλιση ταχύτητας</u>	20
<u>ΠΙΝΑΚΑΣ 3 Ομοιότητες</u>	25
<u>ΠΙΝΑΚΑΣ 5 Απόδοση αισθητήρων</u>	32
<u>ΠΙΝΑΚΑΣ 6 Κτηγοριοποίηση σωματιδίων</u>	73
<u>ΠΙΝΑΚΑΣ 7 Ορια ορατότητας</u>	79
<u>ΠΙΝΑΚΑΣ 8 Χαρακτηριστικά Arduino</u>	84
<u>ΠΙΝΑΚΑΣ 9 LASER PMS 6003 PLANTOWER</u>	104
<u>ΠΙΝΑΚΑΣ 10 LASER PURPLEAIR 2</u>	106
<u>ΠΙΝΑΚΑΣ 11 ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ</u>	202

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ βαθύτατα τον καθ. Δρ. Κώστα Μουστρή (UNIWA) γιατί χωρίς την αποτελεσματική του υποστήριξη, αυτό το έργο δεν θα είχε γίνει ποτέ πραγματοποιηθεί και ολοκληρωθεί.

Επίσης, είμαι ιδιαίτερα ευγνώμων για τους συνεπιβλέποντες της παρούσας εργασίας Καθ. Δρ Κοσμά Καββαδία (UNIWA) και Καθ Δρ Χ.Βασιλοπουλο (UNIWA)

Τέλος ευχαριστώ τους καθηγητές μου

Καθ.Δρ Κώστα Νίκα καθ.Δρ Γιάννη Σαρρή καθ.Δρ Αντρέα Θεοδορακάκο (UNIWA) για το κίνητρο που μου έδωσαν προσφέροντας απλόχερα τις γνώσεις τους και ανανεώνοντας το ενδιαφέρον μου γι' αυτό το απαιτητικό μεταπτυχιακό με τις τόσο εργώδεις προσπάθειες που κατέβαλαν για αυτό.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η έκθεση σε σωματίδια (PM) σχετίζεται με ασθένειες του αναπνευστικού . Μια μελέτη σε 23 ευρωπαϊκές πόλεις έδειξε ότι 16.926 ετήσιοι πρόωροι θάνατοι λόγω έκθεσης στα PM_{2,5} μπορούν να αποφευχθούν εάν η μακροχρόνια έκθεση στα PM_{2,5} μειωθεί κατά 15 μgm^{-3} (Boldo et al. 2006). Ένα επιδημιολογικό μοντέλο προέβλεψε ότι μια αύξηση 10 μgm^{-3} στη συγκέντρωση PM_{2,5} έχει σαν αποτέλεσμα αύξηση 4,3% στη θνησιμότητα (Xue et al. 2019). Οι περισσότερες από τις προηγούμενες μελέτες που σχετίζονται με την έρευνα και την παρακολούθηση των (PM) έχουν πραγματοποιηθεί κοντά στο επίπεδο του εδάφους. Αυτές οι μελέτες έχουν δώσει μια ερμηνεία σχετικά με την οριζόντια χωρική κατανομή των σωματιδίων (PM) και άλλων αέριων ρύπων στο έδαφος.

Προκειμένου όμως να κατανοήσουμε καλύτερα τη διασπορά της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε την κατανομή της συγκέντρωσης ρύπων στην κατακόρυφη κατεύθυνση κατανοώντας την επιρροή των συνθηκών που επικρατούν σε πραγματικό χρόνο ,όπως

- ➡ η αναστροφή θερμοκρασίας (Largeron 2016;),
- ➡ οι αστικές θερμικές νησίδες (Fallmann et al. 2016;)
- ➡ και οι μετεωρολογικές παράμετροι όπως η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία

στη συγκέντρωση ρύπων σε κατακόρυφη κατεύθυνση βοηθούν στην καλύτερη αξιολόγηση της διασποράς των PM, βελτιώνοντας τις προβλέψεις ανάπτυξης μοντέλων και ποιότητας αέρα (Tao et al. 2016). Αυτό βοηθά στη βελτίωση των στρατηγικών ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης που πρέπει να υιοθετηθούν.

Τα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης των εσωτερικών χώρων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα επίπεδα ρύπανσης των εξωτερικών χώρων .). Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να κατανοήσουμε τη συμπεριφορά και τη συγκέντρωση των ρύπων σε κάθετη κατεύθυνση σε χώρους κοντά σε πολυώροφα κτίρια.

Επίσης το κατακόρυφο προφίλ συγκέντρωσης PM **βοηθά στον εντοπισμό της βέλτιστης θέσης για την τοποθέτηση σε κτίρια συστημάτων μηχανικού αερισμού**

και έτσι ελαχιστοποιεί την έκθεση σε PM των ενοίκων . Άρα , η κάθετη μελέτη προφίλ της συγκέντρωσης PM είναι πολύ σημαντική για τη βελτίωση

- της έρευνας,
- της μοντελοποίησης
- και των μέτρων περιορισμού της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Οι μέθοδοι που υιοθετούνται για τη μέτρηση του κατακόρυφου προφίλ των PM περιλαμβάνουν

- την ανάπτυξη ενός συνόλου οργάνων σε διαφορετικά ύψη σε έναν μετεωρολογικό πύργο/πολυώροφο κτίριο,
- τη χρήση τεχνικών τηλεπισκόπησης,
- την ανάπτυξη ενός συνόλου οργάνων σε μπαλόνια
- αεροσκαφών
- και κάπως διστακτικά την χρήση UAV (Unmanned Aerial Vehicles) όπου οι αισθητήρες PM αναρτώνται σε αυτά.

Ο κύριος στόχος της εργασίας είναι να μετρήσει PM μέσω της δυνατότητας εφαρμογής της τελευταίας τεχνικής μέσω UAV .

. Το UAV έχει τέσσερα κύρια πλεονεκτήματα σε σχέση με την τηλεπισκόπηση:

- σχετικά χαμηλό κόστος,
- ευελιξία στη συχνότητα και το χρόνο απόκτησης δεδομένων

Τέλος το βασικό ερώτημα της ακριβούς μέτρησης του ύψους λύνεται με τον Optical Distance Measurement Sensor LIDAR GPS Lite v3 της GARMIN (SENSOR OF POSITION) .

ABSTRACT

Exposure to particulate matter (PM) is associated with respiratory diseases. A study in 23 European cities showed that 16,926 annual premature deaths due to exposure to PM_{2.5} can be avoided if long-term exposure to PM_{2.5} is reduced by 15 $\mu\text{g m}^{-3}$ (Boldo et al. 2006). An epidemiological model predicted that a 10 $\mu\text{g m}^{-3}$ increase in PM_{2.5} concentration results in a 4.3% increase in mortality (Xue et al. 2019). Most of the previous studies related to (PM) research and monitoring have been conducted near ground level. These studies have provided an interpretation of the horizontal spatial distribution of particulate matter (PM) and other air pollutants in soil.

But in order to better understand the dispersion of air pollution, it is important to understand the distribution of pollutant concentration in the vertical direction by understanding the influence of real-time conditions such as

- the temperature inversion ,
- urban heat islands and
- meteorological parameters such as temperature and relative humidity

in the vertical concentration of pollutants help to better assess PM dispersion, improving model development and air quality predictions. This helps in improving air pollution control strategies to be adopted.

Indoor air pollution levels are highly dependent on outdoor pollution levels. Therefore, it is necessary to understand the behavior and concentration of pollutants in the vertical direction in areas near high-rise buildings. Also the vertical PM concentration profile helps to identify the optimal location for the placement of mechanical ventilation systems in buildings and thus minimizes the PM exposure of the occupants. So, vertical profile study of PM concentration is very important for improvement of research, of modeling and air pollution control measures. The methods adopted to measure the vertical profile of PM include;

- the deployment of a set of instruments at different heights in a meteorological tower/high-rise building,
- the use of remote sensing techniques,
- the deployment of a suite of instruments in balloons aircraft and
- somewhat hesitantly the use of UAVs (Unmanned Aerial Vehicles)

where PM sensors are mounted on them. The main objective of the work is to measure PM through the possibility of applying the latest technique via UAV.

UAV has four main advantages over remote sensing:

- relatively low cost,
- flexibility in frequency and time of data acquisition

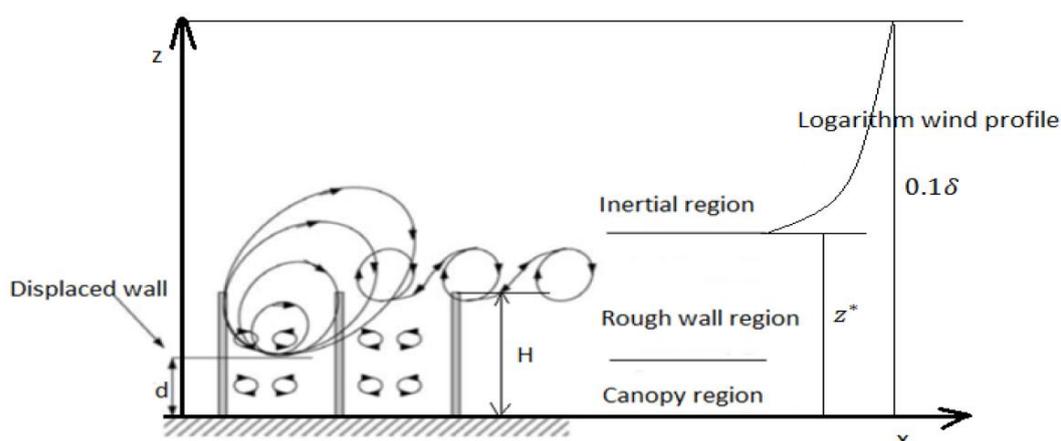
Finally, the basic question of accurate height measurement is solved with the Optical Distance Measurement Sensor LIDAR GPS Lite v3 from GARMIN (SENSOR OF POSITION).

1 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΡΥΠΩΝ

Την πεντηκονταετία 1950–2020, το ποσοστό των ανθρώπων που ζουν στις πόλεις αυξήθηκε κατά ένα παράγοντα 4 και ο αριθμός των αυτοκινήτων παγκοσμίως και η βιομηχανική παραγωγή αυξήθηκε κατά ένα παράγοντα 10 με αποτέλεσμα τα μέσα μεταφοράς να εξακολουθούν να είναι η κύρια πηγή ρύπων στις πόλεις σε μονοξείδιο του άνθρακα (CO), οξείδια το αζώτου (NO_x) και άκαυστους υδρογονάνθρακες (HC). Η διασπορά ρύπων εξαρτάται από το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα.

Το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα επηρεάζεται άμεσα από την επιφανειακή τριβή και ταξινομείται σε τρία υποστρώματα τραχύτητας (Urban Canopy Layer), αδράνειας μικτό.



Εικόνα 1 Τρείς κλίμακες μήκους εντός των επιφανειακών υποστρωμάτων Poggi et al 2004

Ο στροβιλισμός στο υπό-στρώμα τραχύτητας εξαρτάται σημαντικά από τις ιδιότητες της τραχύτητας στην επιφάνεια λόγω επιβράδυνσης από κτίρια και βλάστηση. Σε διαφορετικές κλιματικές συνθήκες, το αδρανειακό υπό στρώμα θα συμπίεσει το στρώμα τραχύτητας [Britter, 2003, 62]. Η ροή στο αδρανειακό υπό -στρώμα εξαρτάται κυρίως από τον ανοιγμένη τιμή τραχύτητας της επιφάνειας που επιβραδύνει τη ροή του ανέμου. Το πεδίο ροής και η διασπορά των ρύπων στο εσωτερικό του στρώματος θα επηρεαστούν άμεσα από την ατμοσφαιρική σταθερότητα, η οποία καθορίζεται από τη θεωρία ομοιότητας **Monin-Obukhov**. Ο στροβιλισμός που δημιουργείται από το

φαινόμενο άνωσης κυριαρχεί στο μικτό στρώμα, ενώ η προκαλούμενη από τον άνεμο διατμητική τάση κυριαρχεί στο στρώμα του αστικού θόλου και στο αδρανειακό υποστρώμα (Rotach, 1993;). Η άμεση επίδραση των κτιρίων στη διαμόρφωση της ροής του αστικού οριακού στρώματος έχει παρατηρηθεί ότι συνεχίζεται και στο υπόστρωμα τραχύτητας που φτάνει μέχρι κι ένα ύψος 1,5 ως 5 φορές το μέσο ύψος κτιρίων [Rotach, M.1999]. Συνολικά στο επιφανειακό (ή εσωτερικό) οριακό στρώμα οι παράγοντες που επιδρούν στη ροή σχετίζονται κυρίως με την τραχύτητα [Bottema, M 1997 , Kastner-Klein,2004] και δεν επηρεάζονται άμεσα από το συνολικό πάχος του αστικού οριακού στρώματος δ που είναι μερικές εκατοντάδες μέτρα. Κατά συνέπεια, η κατακόρυφη διασπορά ρύπων που προκαλείται από το πεδίο ροής και τον άνεμο στην υπό στοιβάδα τραχύτητας είναι σημαντικό θέμα. Η διερεύνηση της ροής και της διασποράς των ρύπων έχει τεκμηριωθεί ευρέως στη βιβλιογραφία. Η διασπορά ρύπων, ταξινομείται σε, λειτουργικά μοντέλα, σε δοκιμές πλήρους κλίμακας ή πειράματα αεροδυναμικής σήραγγας και αριθμητικές προσομοιώσεις CFD.

Τα λειτουργικά μοντέλα αναπτύσσονται από πειραματικές βάσεις δεδομένων, όπως με μοντέλα Gaussian, [Berkowicz et al., 1997]. Η υπολογιστική δυναμική ρευστών (CFD) ως οικονομικά αποδοτικό εργαλείο δεν μπορεί να καλύψει μια ολόκληρη πόλη.

Τα αντικειμενικά και ερευνητικά ερωτήματα της εργασίας είναι 1) πως μπορεί να υλοποιηθεί η πειραματική διαδικασία συλλογής δεδομένων in situ. 2) η συνδυαστική πειραματικών μετρήσεων in situ σε συνδυασμό με την δημιουργία αξιόπιστων μαθηματικών μοντέλων πρόβλεψης της ποιότητας του αέρα και

Να σημειωθεί ότι τα μοντέλα αφορούν κυρίως ουδέτερη κατάσταση ευστάθειας της ατμόσφαιρας, αγνοώντας την άνωση που οφείλεται σε θερμοκρασιακές διαφορές. Αυτό δεν είναι πάντα αληθές, διότι η θέρμανση ή όχι του εδάφους από την ύπαρξη ή όχι του ήλιου δημιουργεί καταστάσεις ευστάθειας, όπου ο αέρας έχει περιορισμένες κατακόρυφες μετακινήσεις, ή αστάθειας, όπου ευνοείται ο αερισμός και υπάρχει μεγαλύτερη κατακόρυφη μεταφορά.

Από την άλλη η ταχύτητα του ανέμου όταν είναι μικρή [DePaul, F.T.1986] ο στρόβιλος μπορεί να είναι ασταθής ή να μην υπάρχει καθόλου. Αυτό συνάγεται από μετρήσεις [Nakamura, Y.1988,], αν και αυτοί δε μπόρεσαν να προσδιορίσουν κάποια τιμή ταχύτητας ανέμου κάτω από την οποία να συμβαίνει με σαφήνεια αυτό το φαινόμενο.

Μια τυπική ταχύτητα μέσα στη χαράδρα είναι τα $2/3$ της ταχύτητας στις πάνω από την πόλη $U_{\text{ο,οη}} = 2/3 U_{\text{λ,η}}$.

Η επίδραση της κυκλοφορίας αυτοκινήτων αλλάζει την τύρβη και επηρεάζει τη ροή και τη διασπορά ρύπων, σε βαθμό που συχνά είναι σημαντικός για χαμηλές τιμές του ανέμου της ελεύθερης ροής μέχρι τα 7 μέτρα ύψος. Οι [Longley, I.D.2004,] αναφέρουν ότι οι διακυμάνσεις ταχυτήτων που μέτρησαν σε δρόμο με κίνηση σε σχέση με δεδομένα δρόμου χωρίς κυκλοφορία μπορούσαν να δικαιολογηθούν μόνο εξαιτίας των οχημάτων. Μάλιστα διαπίστωσαν ότι η επίδραση ήταν σημαντική μέχρι τουλάχιστον 3 μέτρα ύψος.

Τα θερμικά φαινόμενα, και η κατάσταση ευστάθειας της ατμόσφαιρας είναι δυνατόν να επηρεάσουν μερικές φορές σημαντικά τη μορφή της διασποράς [Louka et al.]. Μάλιστα ως πρώτη αρκετά ικανοποιητική ωστόσο, προσέγγιση, ο ρύπος μπορεί να θεωρηθεί αδρανής και ανωστικά ουδέτερος οπότε μπορεί να υπολογιστεί το πεδίο συγκεντρώσεων για έναν ρύπο και θα είναι το ίδιο και για τους άλλους, αλλάζοντας μόνο το μέγεθός του ανάλογα με αυτό της εκπομπής του ρύπου για τον οποίο ενδιαφερόμαστε. Υποσημειώνεται ότι κοντά στους τοίχους των κτιρίων οι συγκεντρώσεις πέφτουν εκθετικά με το ύψος και μάλιστα οι Dabbert και Hoydysh προσδιορίζουν μια εκθετική σχέση. Στην ίδια εργασία έχουν διερευνηθεί πολλές κατευθύνσεις ανέμου και διαπιστώθηκε ότι οι μέγιστες συγκεντρώσεις υπάρχουν για κατευθύνσεις ανέμου κάθετες ή παράλληλες, δηλαδή όταν ο άνεμος σχηματίζει γωνία 90° ή 0° με τον άξονα του δρόμου ενώ σε παράλληλες διευθύνσεις ανέμου έχουμε πολύ μεγάλες συγκεντρώσεις στο επίπεδο του δρόμου.

Γενικά στις συγκεντρώσεις παίζουν ρόλο, κυρίως, 1. οι εκπομπές και 2. δευτερευόντως ο άνεμος. [Jicha et al.], όπου ο διπλασιασμός της κυκλοφορίας αυτοκινήτων προκαλεί πολύ μεγαλύτερη αύξηση στις τελικές συγκεντρώσεις από τον διπλασιασμό της ταχύτητας της ελεύθερης ροής. Αντίθετα, η κατεύθυνση προς την οποία εκπέμπονται οι ρύποι δε φαίνεται να παίζει ρόλο.

Ένας άλλος παράγοντας που αναμένεται να επηρεάζει τη διασπορά των είναι η κατάσταση της ευστάθειας της ατμόσφαιρας. Συγκεκριμένα, σε περιπτώσεις όπως το βράδυ που το έδαφος έχει ψυχθεί λόγω ακτινοβολίας και έχει αποκτήσει χαμηλότερη θερμοκρασία από το υπερκείμενο στρώμα της ατμόσφαιρας, υπάρχει μια θετική

θερμοβαθμίδα όπως λέγεται, δηλαδή αύξηση της θερμοκρασίας με το ύψος. Αυτό αποδεικνύεται ότι αντίκειται στις κατακόρυφες μετακινήσεις αερίων μαζών, λόγω δυνάμεων άνωσης που αναπτύσσονται εξαιτίας της διαφοράς πυκνοτήτων ενός τμήματος ρευστού (που μπορεί για κάποιο τυχαίο λόγο να τείνει να μετακινηθεί) και του περιβάλλοντος αέρα. Πρόκειται για τη λεγόμενη ευσταθή κατάσταση της ατμόσφαιρας, στην οποία οι κατακόρυφες διαταραχές ταχύτητας του αέρα εξασθενούν. Το αποτέλεσμα είναι να μην ευνοείται η διασπορά των ρύπων και η απαγωγή τους προς μεγαλύτερα ύψη, καθώς παγιδεύονται στο κατακόρυφο επίπεδο που παρήχθησαν. Το αντίθετο αναμένεται να συμβαίνει σε περιπτώσεις ασταθούς κατάστασης της ατμόσφαιρας, όπου κάθε κατακόρυφη μετακίνηση του ρευστού ενισχύεται.

Επιδράσεις στη διασπορά ρύπων λόγω των θερμοκρασιακών διαφορών μπορεί να έχουμε και λόγω διαφορετικής θέρμανσης των τοιχωμάτων των κτιρίων ή του δρόμου, η οποία μπορεί να οφείλεται στον ήλιο ή σε άλλους παράγοντες. Πράγματι, από μελέτες που έχουν γίνει έχει φανεί ότι θέρμανση του δρόμου, προκαλεί γενικά καλύτερη διασπορά ρύπων. Στην περίπτωση της προσήνεμης πλευράς, όμως, μπορεί το ανωστικό θερμικό ρεύμα να υπερिशύσει του καθοδικού μηχανικού ρεύματος και να παγιδεύσει τους ρύπους. Σ' αυτή την περίπτωση μπορεί να έχουμε σημαντικά αυξημένες συγκεντρώσεις [Kim και Baik].

1.2 Η ΡΟΗ ΣΤΟ ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ ΚΑΙ Η ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΗΣ .

Αυτό το στρώμα βρίσκεται κοντά στο έδαφος και αντιπροσωπεύει περίπου το 10% του συνολικού ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος (Roth, 2000). Η ταχύτητα στο στρώμα έχει υψηλή κλίση . Συνοδεύεται επίσης από υψηλά επίπεδα αναταράξεων. Τυπικά, το επιφανειακό στρώμα ταξινομείται όπως είπαμε σε τρεις περιοχές: Αδρανειακό, τραχύ τοίχωμα και θόλο (Roggi et al., 2004) .Οι Fisher et al., (2005) πρότειναν μια έννοια που ονομάζεται «k» και «d» τύπου τραχιάς ροής τοιχώματος. Όταν τα κτίρια βρίσκονται πυκνά, η ροή κάτω από το ύψος μετατόπισης d δεν θα διαταραχθεί πλέον από την εξωτερική ροή. Ωστόσο, εάν τα κτίρια είναι αραιά τοποθετημένα στο έδαφος, δεν θα υπάρχει ροή θόλου και το d θα πλησιάσει το μηδέν. Πάνω από το ύψος μετατόπισης, η ροή επηρεάζεται έντονα από τα γύρω κτίρια και τα στοιχεία στέγης στο ύψος του κτιρίου, η οποία ονομάζεται ροή ακατέργαστου τοίχου τύπου «k» (Perry et al., 1969). Ωστόσο, η επίδραση των γύρω κτιρίων στη ροή εξακολουθεί να αποτελεί δυσκολία στις αστικές περιοχές (Kastner-Klein και Rotach, 2004). Οι Raupach et al. (1991) πρότεινε την έννοια του ύψους της τραχύτητας υποστρώματος z^* στην περιοχή των $[2z_H, 5z_H]$ σε μια πραγματική αστική περιοχή. Σε αυτήν την έννοια, το z_H υποδηλώνει το μέσο ύψος των

στοιχείων τραχύτητας (κτίρια). Στο επίπεδο του στρώματος της στέγης του κτιρίου έως το z_* , η ροή προσαρμόζεται συνεχώς στη συνεχώς μεταβαλλόμενη τραχύτητα της επιφάνειας .

Η αδρανειακή περιοχή βρίσκεται πάνω από την περιοχή του τραχιού τοιχώματος. Αυτή η αδρανειακή περιοχή είναι επίσης γνωστή ως στρώμα λογάριθμου ή στρώμα ροής σταθερής τύρβης. Σε αυτή την περιοχή, η επιφανειακή ανομοιογένεια είναι αμελητέα. Το ύψος της αδρανειακής περιοχής κυμαίνεται από το στρώμα z_* έως $0,1 \delta$, όπου δ είναι το ύψος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος (Feddersen, 2005). Η ροή στροβιλισμού στην περιοχή είναι σταθερή στην κατακόρυφη κατεύθυνση. Η αεροδυναμική παράμετρος ή το μήκος τραχύτητας (z_0), εισάγεται για να περιγράψει τα προφίλ ταχύτητας και τύρβης στην κατακόρυφη διεύθυνση. Η ροή μέσα στα φαράγγια των δρόμων και στην περιοχή του επιπέδου ύψους του κτιρίου κυριαρχείται από την κλίμακα μήκους των κτιρίων και την πυκνότητα των γύρω κτιρίων. Οι Perry et al. (1969) απέδειξε ότι μόνο η ροή τύπου «d» έχει ακριβείς αναλυτικές λύσεις από το έδαφος μέχρι την κορυφή της αδρανειακής περιοχής. Αυτό είναι γνωστό ως λογαριθμικός νόμος. Παρόμοια με το ύψος τραχύτητας κόκκων άμμου (ks), δύο αεροδυναμικές παράμετροι, που ονομάζονται μήκος τραχύτητας (z_0) και μηδενική μετατόπιση (d), εισάγονται για να παρουσιάσουν τη ροή κύριας ταχύτητας στην αδρανειακή περιοχή. Στην περιοχή του αδρανειακού τοιχώματος η ροή αναταράξεων διατηρείται σταθερή. Η κλιμάκωση της ταχύτητας που ονομάζεται ταχύτητα τριβής u_* είναι

$$u_* = \sqrt{-u'w'} \quad 1.1$$

Με βάση το μοντέλο μήκους ανάμειξης του Prandtl (Bredberg, 2001), η επερχόμενη ροή κοντά στο επίπεδο του εδάφους στην αδρανειακή περιοχή καθορίζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια από τον νόμο του λογαρίθμου.

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z-d}{z_0} \quad 1.2$$

Από τις αγροτικές περιοχές στις αστικές πόλεις, καθώς το μήκος της τραχύτητας αυξάνεται, η ένταση της αναταράξεων στο κατακόρυφο ύψος αυξήθηκε, καθώς και το ύψος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

Περιγραφή εδάφους	z_0 (m)	α	$Iu(\%)$	δ (m)
1 Ανοιχτή θάλασσα	0,0002	0,1	9,2	215

2 Λάσπη, χιόνι? χωρίς βλάστηση, χωρίς εμπόδια	0,05	0,13	13,2	
3 Άνοιχτό επίπεδο έδαφος. γρασίδι, λίγα μεμονωμένα εμπόδια	0,03	0,15	17,2	275
4 Χαμηλές καλλιέργειες; περιστασιακά μεγάλα εμπόδια	0,10	0,18	21,7	
5 Υψηλές καλλιέργειες. διάσπαρτα εμπόδια, οικιστικά προάστια	0,25	0,22	27,1	370
6 Πάρκο, θάμνοι. πολύριθμα εμπόδια	0,5	0,29	33,4	
7 Κανονική κάλυψη μεγάλων εμποδίων (πυκνή απόσταση χαμηλού κτιρίου, δάσος)	1-2	0,33	43,4	460
8 Κέντρο της πόλης με πολυώροφα και χαμηλά κτίρια	>2	0,40-0.67		

Όπως φαίνεται στον πιο πάνω πίνακα το προφίλ ανέμου και η αντίστοιχη ένταση αναταράξεων είναι σχετικά ακριβείς σε αγροτικές περιοχές ή περιοχές με μικρότερη τραχύτητα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα για μηχανικές εφαρμογές που προκαλούνται από τον άνεμο. Ωστόσο, σε εξαιρετικά τραχιά αστικά κέντρα απαιτείται πιο ακριβής μεθοδολογία για την εκτίμηση της μηδενικής μετατόπισης και του μήκους τραχύτητας.

Γενικά, δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή του κατακόρυφου προφίλ ταχύτητας ανέμου: Μορφομετρικές και μικρομετεωρολογικές μέθοδοι (Grimmond και Oke, 1999).

Η προσέγγιση απαιτεί ψηλούς πύργους, αερόστατα και σχεδόν είναι αδύνατον για την αγροτική περιοχή και βασίζεται σε πειραματικά αποτελέσματα αεροσήραγγας για απλές συστοιχίες στοιχείων τραχύτητας και εν γένει όργανα και μέθοδοι που είναι πολύ ακριβά.

Οι Kastner-Klein και Rotach (2004) πραγματοποίησαν ένα πείραμα αεροδυναμικής σήραγγας σε ένα κλιμακωτό αστικό τοπίο που επικεντρώνεται σε ανομοιογενείς καταστάσεις. Προτάθηκε ένας εμπειρικός μορφομετρικός τύπος για τον υπολογισμό του ύψους μηδενικής μετατόπισης και του μήκους τραχύτητας για μια πόλη. Για περιοχές χαμηλής πυκνότητας, προτάθηκε η

ακόλουθη απλουστευμένη εμπειρική εξίσωση για μια προσέγγιση με βάση το ύψος, δεδομένου ότι μια κορυφή εμφανίστηκε όταν η κάτωψη πυκνότητας περιοχής είναι στην περιοχή από 0,2 έως 0,4 (Grimmond και Oke, 1999):

$$\text{μηδενική μετατόπιση } d = f_d \bar{H} \text{ , μήκος τραχύτητας } z_0 = f_0 \bar{H} \quad 1.3$$

όπου το \bar{H} αντιπροσωπεύει το μέσο ύψος κτιρίου και οι εμπειρικοί συντελεστές f_d και f_0 είναι 0,7 και 0,1. Οι Macdonald et al. (1998) πρότεινε μια άλλη μορφομετρική μέθοδο για την εκτίμηση της μηδενικής μετατόπισης (d) για ένα μέσο προφίλ ανέμου με βάση το μέσο ύψος κτιρίου \bar{H} και το κλάσμα εμβαδού κάτοψης

$$\lambda_p = \frac{A_{plan}}{A_{total}} \quad 1.4$$

$$\frac{d}{H} = 1 + A^{-\lambda_p} (\lambda_p - 1) \quad 1.5$$

Συνεπώς, ένα εμπειρικό μοντέλο για την πρόβλεψη του μήκους τραχύτητας εκφράζεται ως:

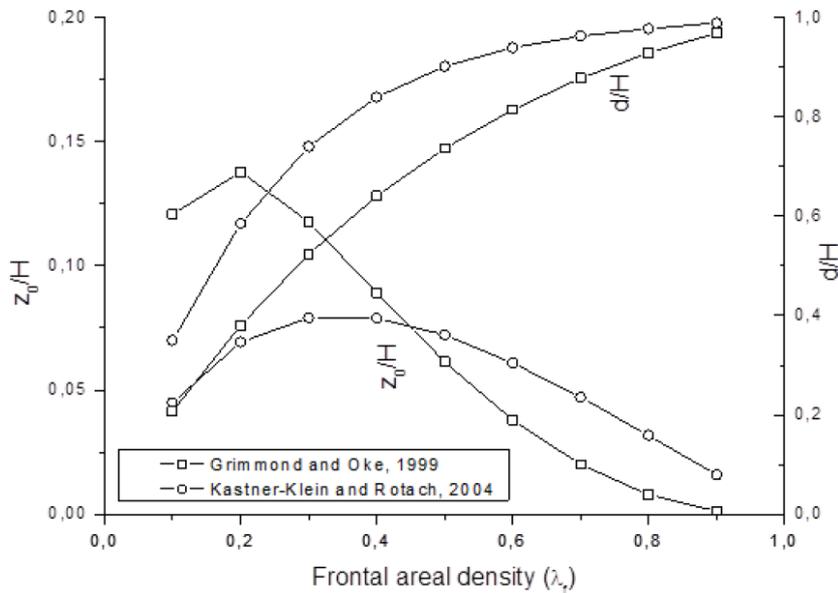
$$\frac{z_0}{H} = \left(1 - \frac{d}{H}\right) \exp\left(-\left(0,5B \frac{C_D}{\kappa} \left(1 - \frac{d}{H}\right) \lambda_f\right)^{-0,5}\right) \quad 1.6$$

όπου το B είναι ένας εμπειρικός συντελεστής (1,0), το C_D είναι ένας συντελεστής οπισθέλκουσας (1,2), το λ_f είναι η μετωπική πυκνότητα της περιοχής που ορίζεται ως $\lambda_p = A_f/A_t$. Ο ακόλουθος εμπειρικός μορφομετρικός τύπος προτάθηκε με βάση πειραματικά δεδομένα για την εξαγωγή του ύψους μηδενικής μετατόπισης και του μήκους τραχύτητας για πραγματικό αστικό τοπίο (Kastner-Klein and Rotach, 2004)

$$\frac{d}{H} = 0,4\lambda_p \exp(-2,2(\lambda_p - 1)) + 0,6\lambda_p \quad 1.7$$

$$\frac{z_0}{H} = 0,072\lambda_p \{ \exp(-2,2(\lambda_p - 1)) - 1 \} \quad 1.8$$

Η αδυναμία του εμπειρικού μοντέλου είναι ότι βασίζεται κυρίως σε επίπεδες και ομοιογενείς επιφάνειες σε κτισμένες περιοχές υψηλής πυκνότητας. Οι ιδιότητες στροβιλισμού μετρώνται στο στρώμα σταθερής ροής. Όσο πιο κοντά στο επίπεδο στέγης των αστικών περιοχών, τόσο μεγαλύτερη είναι η αβεβαιότητα του προτεινόμενου εμπειρικού μοντέλου, το οποίο θα αποδοθεί σε μεγάλο βαθμό στην τρισδιάστατη επίδραση στο επίπεδο της στέγης του κτιρίου. Ως αποτέλεσμα, η επιτυχία αυτών των μεθόδων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πόσο καλά μπορούν να περιγραφούν οι αναταράξεις στο UBL από εμπειρικές σχέσεις που προκύπτουν σε επίπεδες και ομοιογενείς επιφάνειες (Roth, 2000).



Εικόνα 2 Δομή Στροβιλισμού Roth 2000

Η δομή στροβιλισμού σε ουδέτερες στρωματοποιημένες συνθήκες, είναι προφίλ νόμου λογαρίθμου μπορεί να μετασχηματιστεί ως:

$$I_u = \frac{\sqrt{u'^2}}{U(z)} = \frac{\kappa}{\ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right)} * \frac{\sqrt{u'^2}}{u_*} \quad 1.9$$

Η ένταση στροβιλισμού $I_u = \frac{\sqrt{u'^2}}{U(z)}$ είναι μια σημαντική παράμετρος για την αναπαράσταση του επιπέδου στροβιλισμού σε διαφορετικά κατακόρυφα ύψη. Επιπλέον, η τυρβώδης κινητική ενέργεια

$$k = \frac{1}{2} (u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad 1.10$$

τότε μπορεί να είναι προέρχεται ως:

$$k = \frac{1}{2} (u'^2 + v'^2 + w'^2) = \frac{u_*^2}{2} \sum \left(\frac{\sigma_i}{u_*}\right)^2 \quad 1.11$$

Σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις, οι παράμετροι στροβιλισμού, η ταχύτητα τριβής και η τυπική απόκλιση της ταχύτητας παρουσιάζουν το προφίλ αναταράξεων του επερχόμενου ανέμου.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2 Κανονικοποιημένη απόκλιση ταχύτητας για διάφορες τοποθεσίες και πηγές

μελετες	τοποθεσια	$A \left(\frac{\sqrt{u'^2}}{u_*} \right)$	$B \left(\frac{\sqrt{v'^2}}{u_*} \right)$	$C \left(\frac{\sqrt{w'^2}}{u_*} \right)$	$\frac{k}{u_*^2}$
Roth(2000)	αστικη	2,4	1,91	1,27	5,51
Rotah(1995)	Αστικη κοντα σε στεγες	1,69	1,53	0,92	3,09
ESDU(1985)	αγροτικη	2,75	2,14	1,51	7,26
Panofsky Daton(1984)	αναφορες	$2,39 \pm 0,03$	$1,92 \pm 0,05$	$1,25 \pm 0,03$	5,48
Counihan(1975)	αγροτικη	2,5	1,9	1,25	5,71

Ο Counihan (1975) εξέτασε την κανονικοποιημένη τυπική απόκλιση των προφίλ ταχύτητας κυρίως σε αγροτικές ή λιγότερο τραχιές περιοχές σε σχεδόν ουδέτερες συνθήκες από πεδίο ή πειραματική δοκιμή. Το μήκος τραχύτητας z_0 κυμαινόταν από 0,0001 έως 5,0 μέτρα. Ωστόσο, το μεγαλύτερο μήκος τραχύτητας που συλλέγεται είναι κάτω από 0,1. Αυτό σημαίνει ότι οι προτεινόμενες εμπειρικές εξισώσεις είναι πιο πολύτιμες για προαστιακές ή αγροτικές περιοχές. Ο Counihan (1975) κατέληξε Το παρακάτω εμπειρικό μοντέλο προτάθηκε για να παρουσιάσει τη σχέση μεταξύ ταχύτητας τριβής και μήκους τραχύτητας ,

$$\frac{u_*}{U_0} = 2,75 \cdot 10^{-3} + 6 \cdot 10^{-4} \log z_0 \quad \underline{1.12}$$

Σε αντίθεση με τις αγροτικές ή λιγότερο ανώμαλες περιοχές, η δομή αναταράξεων στα αστικά επιφανειακά στρώματα θα επηρεαστεί σημαντικά από την ανομοιογενή φύση των υποκείμενων επιφανειών και τα υψηλά μήκη τραχύτητας. Λόγω της διακύμανσης της κατεύθυνσης του ανέμου μεταξύ των πόλεων, τα μήκη τραχύτητας θα έχουν επίσης μεγάλες διαφορές. Ως αποτέλεσμα, τα κατακόρυφα προφίλ ανέμου και οι δομές αναταράξεων δεν θα επηρεάζονται μόνο από το μεγάλο μήκος τραχύτητας, αλλά και από τη διακύμανση της κατεύθυνσης, ειδικά στην περιοχή της οροφής του κτιρίου. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ταχύτητα τριβής μπορεί να εκτιμηθεί με λογαριθμικό νόμο με συνθήκες δεδομένων υψών αναφοράς και ταχυτήτων αναφοράς. Σε επίπεδο κτιρίου, η μέγιστη ταχύτητα τριβής u_{*max} χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της τοπικής ταχύτητας τριβής u_{*l} . Με βάση πειράματα (Rotach, 2001), το z^* ισούται με $1,5 \sim 2zH$ ταιριάζει καλύτερα στα πειραματικά αποτελέσματα στο αστικό περιβάλλον. Σύμφωνα με τους Fisher et al., 2005, η ακόλουθη εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της τοπικής ταχύτητας τριβής σε αστικές περιοχές ανώμαλου τοίχου:

$$\frac{u_{*l}}{u_{*max}} = \sin\left(\frac{\pi}{2}Z\right)^\alpha, Z \leq 1 \quad 1.13$$

όπου u_{*l} είναι η ταχύτητα τοπικής κλιμάκωσης,

$$u_{*l}^2 = -\overline{u'w(z)'} \text{ and } Z = \frac{z-d}{z^*-d} \quad 1.14$$

Η σταθερά a και b ορίζονται αντίστοιχα ως 1,28 και 3,0. Η σωστή εκτίμηση των ιδιοτήτων στροβιλισμού μέσα στην περιοχή του ανώμαλου τοιχώματος εξακολουθεί να είναι δύσκολη.

Επίσης ο μαζικός αριθμός Richardson (Rb) ορίζει την ατμοσφαιρική σταθερότητα στους αστικούς ιστούς:

$$Rb = gH \frac{(T_H - T_0)}{(T + 273)(U_H)^2} \quad 1.15$$

1.3 ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΡΥΠΩΝ ΣΕ ΔΟΜΗΜΕΝΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Μεγάλη προσοχή έχει δοθεί στη διασπορά της ρύπανσης στις πόλεις, καθώς οι συγκεντρώσεις της ροής επηρεάζουν άμεσα την ποιότητα του αέρα των πόλεων. Πολλά εμπειρικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί για την πρόβλεψη της κατανομής της ρύπανσης. Δύο μέθοδοι έχουν διερευνηθεί για την αξιολόγηση της κατανομής της συγκέντρωσης:

- ➡ ομοιόμορφη συγκέντρωση (που αντιλαμβάνεται ένα αστικό συγκρότημα ως κουτί)
- ➡ και ανομοιόμορφη συγκέντρωση.

Εάν ο όγκος του αστικού ιστού είναι ένα μη ομοιόμορφο πεδίο πηγής, η διακύμανση της συγκέντρωσης σχετίζεται με το χρόνο και εκφράζεται ως (Lee and Park, 1994):

$$V \frac{dC}{dt} = -qC \quad 1.16$$

όπου V είναι ο όγκος του ιστού, C είναι η συγκέντρωση ροής και q είναι η ισχύς εισροής. Σε σταθερή κατάσταση, η λύση της εξίσωσης είναι:

$$C(t) = C_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad 1.17$$

Όπου $\tau = V/q$ αντιπροσωπεύει σταθερά χρόνου. Τη στιγμή $t = \tau$, η συγκέντρωση C της ροής του παραγωγίου θα μειωθεί κατά e^{-1} . Οι Hoydysh και Dabberdt (1988) μελέτησαν την επίδραση της κατεύθυνσης του ανέμου στα χαρακτηριστικά ροής και στη διασπορά των ρύπων. Προτάθηκε μια εμπειρική εκθετική συνάρτηση για την περιγραφή της κατανομής της συγκέντρωσης κατά μήκος του κατακόρυφου ύψους:

$$K = a \exp\left(\frac{bz}{H}\right) \quad 1.18$$

όπου τα a και b είναι εμπειρικοί συντελεστές και τα H και K είναι το ύψος του κτιρίου και η μη διαστατική συγκέντρωση. Δεδομένου ότι η ρύπανση που εκπέμπεται από οχήματα μπορεί να εκληφθεί ως πηγή ρύπων γραμμής, οι Rafailidis and Schatzmann (1997) χρησιμοποίησαν τη μη- διαστατική μορφή

$$K = \frac{cUHL}{Q_e} \quad 1.19$$

να αντιπροσωπεύει την κατανομή ρύπων .

Μελέτες έχουν διερευνήσει τους μηχανισμούς μεταφοράς ρύπων σε αστικούς ιστούς. Οι συγκεντρώσεις των όγκων στους αστικούς ιστούς επηρεάζονται κυρίως από τρεις παράγοντες (;Kastner-Klein et al., 2000): 1) Μέσο ύψος προς πλάτος $A_R=H/W$, 2)αριθμός Reynolds στο μέσο επίπεδο ύψους κτιρίων $PR_r=Re_r.Pr_r$, και 3)αριθμός Pelect που ορίζεται από το $Re_r=Hu/v$ στο επίπεδο της οροφής. Το Pr_r αριθμός Reynolds Re_r σχετίζεται συνήθως με την τοπική ένταση αναταράξεων και Pe_r σχετίζεται με την τοπική θερμική επίδραση. Τρεις μηχανισμοί μεταφοράς προτάθηκαν για τον χαρακτηρισμό της μεταφοράς ρύπων που προκαλείται από τον άνεμο (Salizzoni et al., 2009): διάχυση αναταράξεων μέσα στο φαράγγι του δρόμου (u^*_d), προσαγωγή λόγω μέσης ροής ανακυκλοφορίας (u^*_c), και διασπορά στροβιλισμού κατά μήκος του στρώματος διάτμησης στο επίπεδο της οροφής (u^*_t).

Η συγκέντρωση ρύπων στην προσήνεμη επιφάνεια είναι υψηλότερη από ό,τι στην υπήνεμη επιφάνεια. Οι Chan et al. (2001) διερεύνησαν τις επιδράσεις σχετικού ύψους, από 0,5 έως 2,0, στη συγκέντρωση ρύπων της απομονωμένης ροής τραχύτητας. Υπάρχει μέγιστη τιμή συγκέντρωσης ρύπων όταν το σχετικό ύψος αυξάνεται από 0,5 σε 2,0.

Οι Sini και Anquetin (1995) ερεύνησαν την επίδραση της θερμοκρασίας του τοίχου στη διασπορά των ρύπων στα φαράγγια των δρόμων. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η θέρμανση τοίχου για τον υπήνεμο τοίχο και το έδαφος ενίσχυσε την ανακυκλοφορία της ροής, η οποία βελτίωσε τη διασπορά των ρύπων. Ωστόσο, η ηλιακή θέρμανση κτιρίου για την προσήνεμη πλευρά είχε μικρότερη επίδραση στην ανακύκλωση της ροής και στη διασπορά των ρύπων. Οι Kim και Baik (2001) ερεύνησαν την επίδραση του H/W στη διασπορά των ρύπων μέσω θερμικής επίδρασης. Μόνο 10 βαθμοί διαφοράς θερμοκρασίας έχουν ορατή επίδραση στη διασπορά των ρύπων των δρόμων για θέρμανση στους τοίχους

Η επίδραση των δέντρων στον αερισμό της φύσης και τη διασπορά των ρύπων διερευνήθηκε μέσω πειραμάτων με αεροσήραγγα (Gromke et al., 2007a, 2007b, 2009).

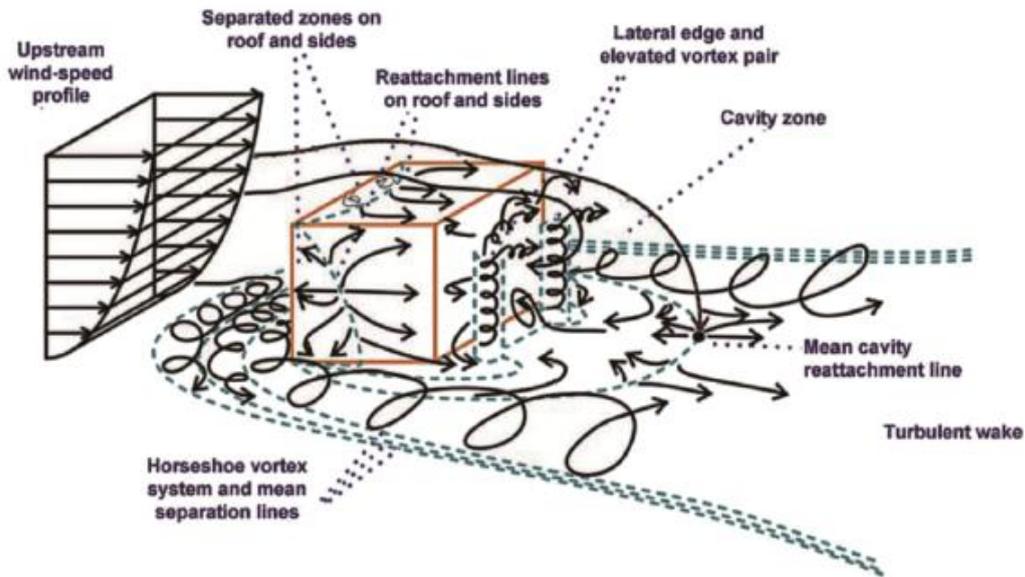
Οι Gromke et al. σημείωσε ότι υπάρχει μια κρίσιμη τιμή του πορώδους των δέντρων. Κάτω από ένα ορισμένο όριο, δεν υπάρχει αλλαγή στη συγκέντρωση ρύπων μέσα στα λόγω της

παρουσίας δέντρων. Όταν η κατεύθυνση του ανέμου αλλάζει, υπάρχει μεγαλύτερη επίδραση παγίδευσης ρύπων που προκαλείται από δέντρα. Ως εκ τούτου, η κυρίαρχη κατεύθυνση του ανέμου θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό της δενδροφύτευσης. Αυτά τα ευρήματα επιβεβαιώνονται επίσης από μια μελέτη που βασίζεται σε πειραματικά δεδομένα και σε μια πραγματική αστική περίπτωση (Buccolieri et al., 2011).

Τα δέντρα στους αστικούς ιστούς παίζουν σπουδαίο ρόλο στην μικρής κλίμακας διασπορά των ρύπων. Οι <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2019.12.026> βρήκαν ότι η παρουσία δέντρων εμποδίζει τη ροή του αέρα. Η μέση ταχύτητα ανέμου με δέντρα είναι περίπου 39,5% χαμηλότερη με ταχύτητα ανέμου εισόδου 1,7 m / s από αυτήν σε χώρο χωρίς δέντρα. Με την αύξηση της ταχύτητας εισροής, η συγκέντρωση του ρύπου αλλάζει συνεχώς, και είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν ελλείψει δέντρων. Με ταχύτητα ανέμου 5,7 m / s, η μέση συγκέντρωση ρύπων είναι 18,6% υψηλότερη σε φαράγγια του δρόμου με δέντρα παρά σε εκείνα χωρίς δέντρα. Οι Z.L. Gu, Y.W. Zhang, et al (2010) απέδειξαν ότι τα δέντρα μειώνουν την κυκλοφορία του ανέμου στα φαράγγια των αστικών δρόμων, αυξάνουν τη συγκέντρωση των ρύπων, ειδικά κοντά στο έδαφος και στην κάτω πλευρά, και ίσως μειώνουν τη συγκέντρωση ρύπων στον δρόμο στην προσήνεμη πλευρά. Περαιτέρω έρευνες έχουν μελετήσει τη μεταφορά και τη διάδοση των ρύπων σε αστικούς χώρους υπό την επίδραση των δέντρων με αριθμητική προσομοίωση οι J. Gallagher, et al (2013) J.H. Amorim, et al (2013) K. Ries, et al (2001), με πειραματικές τεχνικές L. Chen, et al (2016) C. Gromke, et al (2007) και μετρήσεις πεδίου S. Yin, et al (2011), K. Bai, et al (2012) όπου απέδειξαν επίσης ότι η δομή ταχύτητας και στροβιλισμού επηρεάστηκε προφανώς από το μοντέλο του **φράκταλ** δέντρου.

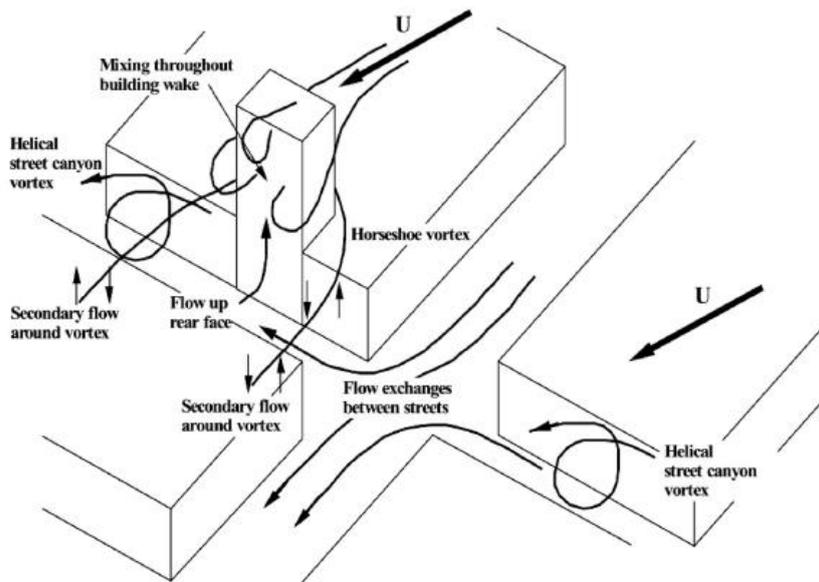
Διασπορά ρύπων κοντά σε δομημένο περιβάλλον χαρακτηρίζεται από την πολύπλοκη αλληλεπίδραση των πλουμίων με πεδία ροής που διαταράσσονται από εμπόδια οικοδόμησης. Το πεδίο διασποράς περιέχει τοπικές πηγές εκπομπών και διασπορά των εκπομπών σε κοντινά κτίρια και στη γύρω γειτονιά. Η ροή του ανέμου στο δομημένο περιβάλλον περιγράφεται από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ της ατμοσφαιρικής ροής και της ροής γύρω από τα κτίρια. Το Σχ. 1 παρουσιάζει μια σχηματική εικόνα του σχεδίου ροής ανέμου γύρω από ένα απομονωμένο κτίριο [23,39,40]. Το πεδίο ροής περιέχει διάφορα μοτίβα ροής, συμπεριλαμβανομένης της ροής οριακού στρώματος, πεταλοειδούς δίνης, ροή στασιμότητας, ροή διαχωρισμού και ροή ανακυκλοφορίας. Ιδιαίτερα, αυτό το σχήμα δείχνει το μέσο μοτίβο ροής

ανέμου, την πραγματική ροή . Το μοτίβο παρουσιάζει έντονα παροδικά χαρακτηριστικά, όπως η συσσώρευση και κατάρρευση των φουσαλίδων διαχωρισμού/ανακυκλοφορίας και περιοδικούς στροβιλισμούς [23].



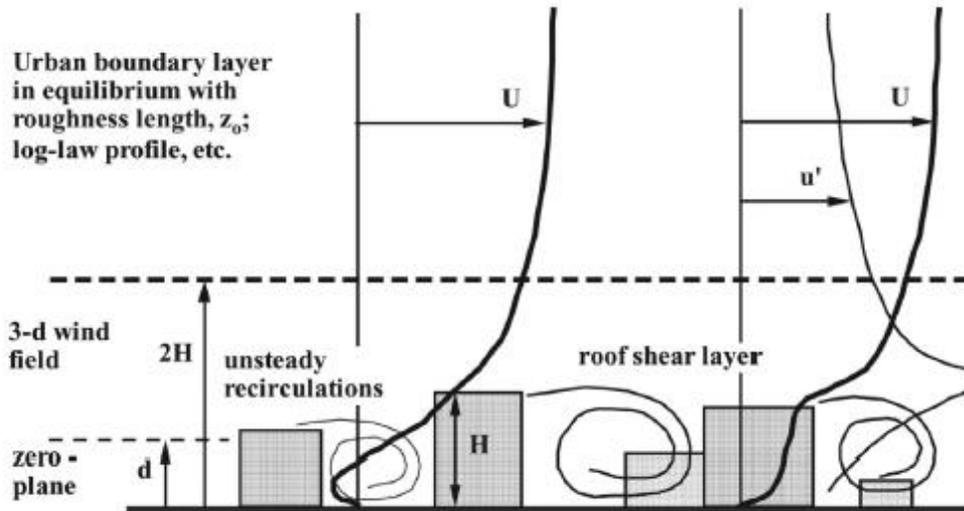
Εικόνα 3 Ροή γύρω από απομονωμένο κτίριο (23)

Το πιο κάτω σχέδιο απεικονίζει τη ροή σε μια διασταύρωση δρόμου όπου βρίσκεται ένα ψηλό κτίριο στην αντίθετη πλευρά ενός δρόμου [6].



Εικόνα 4 Πεδίο ροής σε διασταύρωση δρόμου που απεικονίζει τις διαδικασίες ανάμιξης (6)

Οι πρόσθετες δευτερεύουσες ροές που δημιουργούνται από το ψηλό κτίριο αναμειγνύουν εξωτερικό αέρα στο θόλο και αντλεί αέρα από αυτό, ιδιαίτερα στην πίσω όψη του κτιρίου. Οι κατανομές συγκέντρωσης ρύπων που παράγονται από τέτοια σύνθετα πεδία ροής μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από αυτά που προβλέπονται από συμβατικούς τύπους διάχυσης, όπως Gaussian-based μοντέλα. Τέτοιοι τύποι περιέχουν υποθέσεις ότι το πεδίο ροής έχει ευθείες και παράλληλες γραμμές ροής, μέτρια ταχύτητα και κατανομές τυρβώδους ενέργειας και κλίμακες μήκους που προκύπτουν από χαρακτηριστικά της επιφάνειας που παραμένουν αμετάβλητα για μεγάλο χρονικό διάστημα [3]. Επομένως, η πρόβλεψη τέτοιων πεδίων συγκέντρωσης είναι δύσκολη, καθώς οι συμβατικοί τύποι δεν μπορούν να εφαρμοστούν. Απαιτείται όχι μόνο η βασική γνώση της μετεωρολογίας της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και η διασπορά αλλά και η κατανόηση της αιολικής μηχανικής και η αεροδυναμική των κτιρίων, γιατί ο άνεμος και τα κτίρια μπορούν έντονα να επηρεάζουν τη συμπεριφορά του λοφίου. Σημαντικές παράμετροι για τη διασπορά γύρω από κτίρια περιλαμβάνουν τοπογραφία περιβάλλοντος, [41,42], γεωμετρία κτιρίου, [43,44], ταχύτητα ανέμου, [45,46,98], διεύθυνση ανέμου, [47,48], αναταράξεις, [49,50], ατμοσφαιρική σταθερότητα, [51,52], θερμοκρασία, [53,54], ηλιακή ακτινοβολία, [55,56] δένδροφύτευση, [57,58]. Επιπλέον, ανάλογα με τη ρύπανση, η άνωση, [59,62], χημικές αντιδράσεις, [63,65], σωματίδια, [9,66] εναποθέση του ρύπου, [67,68]. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η διασπορά γύρω από τα κτίρια χαρακτηρίζεται από την αλληλεπίδραση μεταξύ της ατμοσφαιρικής ροής του οριακού στρώματος και της ροής γύρω από τα κτίρια. Επομένως, μοντελοποιώντας με ακρίβεια το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα η ροή είναι επιτακτική προκειμένου να ληφθούν ακριβείς και αξιόπιστες προβλέψεις των πιθανών διεργασιών διασποράς. Το πλησιέστερο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα θα πρέπει να αναπαραχθεί σωστά στη φυσική μοντελοποίηση. Τα κοινά προφίλ που αντιπροσωπεύουν ακολουθούν οι ταχύτητες του ανέμου σε ατμοσφαιρικά οριακά στρώματα λογαριθμικοί νόμοι ή νόμοι ισχύος. Οι παράμετροι σε αυτά τα προφίλ συνδέονται με την ταξινόμηση του ανάντη εδάφους [69,70]. Σε πρακτική, ανοδική τραχύτητα επιφάνειας (μερικές φορές σε συνδυασμό με παρουσία περιφράξεων και κωδωνοστασίων) χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του προφίλ ανέμου η προσέγγιση σε αεροδυναμική σήραγγα [71,73].



Εικόνα 5 Πεδίο ανέμου και αναταράξεων (6)

Η επιλογή των αδιάστατων παραμέτρων εγγυάται την ομοιότητα [8]. Για κλίμακα διασποράς, τα δυναμικά και θερμικά χαρακτηριστικά ενός ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος και ενός καυσαερίου πρέπει να μοντελοποιηθούν με την βοήθεια των ακόλουθων ομοιοτήτων: γεωμετρία μοντέλου, πεδίο ροής και εκπομπή αερίων.

Αναλυτική και σημαντική συζήτηση για αυτά τα θέματα βρίσκεται σε [124-126]. Για τη γεωμετρία του μοντέλου, αν και η συμφωνία ικανοποιείται από την ομοιότητα μοντέλου, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη σχέση μεταξύ της κλίμακας μοντέλου και της κλίμακας οριακού επιπέδου [126-127]. Για ομοιότητα πεδίου ροής, με βάση αδιάστατες μορφές του οι εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή και τη διασπορά με άνωση, όπως ως εξισώσεις ορμής, μεταφοράς-διάχυσης ρύπων και ενέργειας, οι παρακάτω γνωστοί αδιάστατοι αριθμοί που αντιστοιχούν την πραγματική και την μοντελοποιημένη κλίμακα είναι:

ΠΙΝΑΚΑΣ 3 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΟΜΟΙΟΤΗΤΑΣ

Rosby	$R_0 = \frac{U_R}{L\Omega_R}$
Froude	$F_r = \frac{\Delta\rho Lg}{\rho_a U_R^2}$
Reynolds	$R_e = \frac{U_R L}{\nu}$
Peclet thermal	$P_e = \frac{U_R L}{\kappa}$

Peclet mass	$P_{em} = \frac{U_R L}{\alpha}$
Prandtl	$P_r = \frac{U_R L}{\alpha}$
Shmidt	$S_c = \frac{\nu}{\alpha}$

Το Ω_R είναι η γωνιακή ταχύτητα αναφοράς της περιστροφής της γης, το U_R είναι η ταχύτητα αναφοράς, L είναι το μήκος, g είναι η βαρυτική επιτάχυνση, ρ_a είναι η πυκνότητα αέρα, ρ_s είναι η πυκνότητα αερίων εκπομπής και $\Delta\rho = \Delta\rho_s - \Delta\rho_a$. ν είναι το κινηματικό ιξώδες, k είναι η θερμική διάχυση, και α είναι η διάχυση μάζας. Δεδομένου ότι η ταυτόχρονη ικανοποίηση όλων των απαιτήσεων ομοιότητας δεν μπορεί να επιτευχθεί, πρέπει να χρησιμοποιηθεί μερική ή κατά προσέγγιση. Πολλές από τις αδιάστατες παραμέτρους μπορούν να παραμελούνται επειδή είναι χαμηλής σημασίας σε σχέση με άλλες κατά την προσομοίωση μεταφοράς και διασποράς γύρω από κτίρια [8].

Ο αριθμός Rossby (Ro) αντιπροσωπεύει τα αδρανειακά αποτελέσματα της μεταφοράς σε ένα περιστρεφόμενο σύστημα συντεταγμένων, όπως η Γη. Αν και είναι αδύνατο να ικανοποιηθεί αυτή η απαίτηση σε μια συνηθισμένη αεροδυναμική σήραγγα, μπορεί να παραμεληθεί γιατί η αδρανειακή δύναμη είναι μικρή σε σχέση με την δύναμη Coriolis, καθώς η περιοχή στόχος είναι μικρή για την μελέτη διασποράς κοντινού πεδίου.

Ο πυκνομετρικός αριθμός Froude (Fr) δείχνει την αναλογία της δύναμης άνωσης από τη διαφορά πυκνότητας μεταξύ της εξάτμισης αερίου και της αδρανειακής δύναμης του περιβάλλοντος αέρα και είναι ισοδύναμος με τον αριθμό Richardson. Δεδομένου ότι η συμφωνία του Fr οδηγεί συχνά σε πολύ χαμηλές ταχύτητες ανέμου σε αεροσήραγγα, προκαλεί δυσκολίες στις απαιτήσεις για τον αριθμό Reynolds (Re). Όταν το Re είναι αρκετά μεγάλο, οι δομές ροής γύρω από σώματα με αιχμηρές άκρες είναι παρόμοιες ακόμα κι αν το Re δεν είναι ίδιος, ένα φαινόμενο που ονομάζεται «**Ανεξαρτησία Αριθμού Reynolds**» [128]. Σε μοντέλο με τιμές πεδίου του Prandtl (Pr) και αριθμών Schmidt (Sc) για μοντελοποίηση ατμοσφαιρικής αεροσήραγγας οι ροές είναι πολύ όμοιες. Ο θερμικός αριθμός Peclet (Pe) και Ο αριθμός Peclet (Pem) μεταφοράς μάζας μετράει την ικανότητα του ρευστού να μεταφέρει θερμότητα ή μάζα σε σχέση με την ικανότητα διασποράς θερμότητας ή μάζα με μοριακή μεταφορά. Αυτές οι παράμετροι

μπορούν επίσης να είναι εκφράζονται ως **Re·Pr** ή **Re·Sc**. Ως εκ τούτου, οι συμφωνίες Re και Rem ικανοποιούνται όταν τα πεδία ροής είναι αρκετά τυρβώδη. Ωστόσο, όταν οι ταχύτητες του ανέμου είναι πολύ χαμηλές στα πειράματα, αυτές οι παράμετροι μπορεί να είναι προβληματικές [59]. Για την εκπομπή αερίων, οι ακόλουθες παράμετροι ομοιότητας πρέπει να λαμβάνονται υπόψη μεταξύ του πραγματικού πεδίου και του μοντέλου [124,125,129]. Πότε η άνωση του αερίου εκπομπής μπορεί να αγνοηθεί, μόνο η το μέγεθος της στοίβας και ο λόγος ταχύτητας εκπομπών λαμβάνονται υπόψη χρησιμοποιώντας το αέριο ιχνηθέτη που έχει πυκνότητα παρόμοια με αυτή του αέρα (όπως το αιθυλένιο ή αιθάνιο). Ωστόσο, όταν η άνωση του αερίου εκπομπής δεν μπορεί να παραμεληθεί, η κατασταση γίνεται πολύ πιο περίπλοκη. [124,125]. Αυτά τα κριτήρια μπορούν να γίνουν περισσότερο σημαντικά για τη μελέτη της διασποράς ρύπων σε συζευγμένους εσωτερικούς χώρους και εξωτερικά περιβάλλοντα, επειδή το μήκος και η ταχύτητα διαφέρουν σημαντικά μεταξύ αυτών και των περιβαλλόντων. Η περίοδος αξιολόγησης είναι επίσης σημαντική στα φυσικά πειράματα. Γενικά, επειδή εμφανίζονται τυρβώδεις δίνες στην ατμοσφαιρική ροή με διάφορες χρονικές και χωρικές κλίμακες, με μέση χρονική συγκέντρωση αλλάζουν σημαντικά με βάση τους μέσους χρόνους. Κατάλληλες χρονικές κλίμακες αξιολόγησης διαφέρουν ανάλογα με τον επιδιωκόμενο ρύπο. Μια βραχυπρόθεσμη εκπομπή, που αντιπροσωπεύει πολλές τυχαίες εκπομπές, συνήθως μοντελοποιείται ως διακοπτόμενη πηγή [130]. Ωστόσο, μια μακροπρόθεσμη εκπομπή, που αντιπροσωπεύει τις περισσότερες εκπομπές στοίβας καυσαερίων, συνήθως μοντελοποιείται ως **συνεχής πηγή**

Από την άλλη τα μοντέλα Gaussian plume-dispersion υποθέτουν ότι η κατακόρυφη και πλευρική διασπορά του νέφους είναι Gaussian μορφή και περιλαμβάνουν την επίδραση της ανάκλασης του εδάφους. Πλέον πρόσφατα μοντέλα χρησιμοποιούν τη θεωρία ομοιότητας Monin-Obukhov για να εξάγουν τις παραμέτρους του μοντέλου τους. Αυτά τα μοντέλα έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλές μελέτες, γιατί επιτρέπουν τον γρήγορο υπολογισμό πολλών διαφορετικών περιπτώσεων, [32-35]. Επιπλέον, τα μοντέλα Gauss περιλαμβάνουν πολλές πολύπλοκες διαδικασίες διασποράς, όπως η ατμοσφαιρική στρωματοποίηση, άνωση, χημεία, εναπόθεση και συγκέντρωση. Ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα είναι το ADMS, που αναπτύχθηκε στο Αγγλία, και χρησιμοποιείται από τον Οργανισμό Προστασίας Περιβαλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών [32,33]. Αυτό το προηγμένο μοντέλο διασποράς μπορεί να

υπολογίσει τις συγκεντρώσεις λυμάτων που εκπέμπονται είτε συνεχώς από πηγές σημείου, γραμμής, όγκου και περιοχής, ή διακριτά από σημείο πηγη. Το μοντέλο υποθέτει ότι οι κατανομές συγκεντρώσεων είναι Gaussian σε ουδέτερες και σταθερές συνθήκες, αλλά οι κατακόρυφες κατανομές θεωρούνται μη Gaussian σε συναγωγικές συνθήκες, και λαμβάνουν υπόψη τη διαγωνια δομή της κατακόρυφης συνιστώσας των αναταράξεων [131]. Σε μια μελέτη αξιολόγησης της ποιότητας και της δυνατότητας εφαρμογής από διάφορα μοντέλα διασποράς για διασπορά κοντινού πεδίου, το ADMS ήταν το μόνο μοντέλο που παράγει καλές συγκρίσεις με την αεροδυναμική σήραγγα. Άλλα μοντέλα, όπως CALPUFF, SCREEN και AFTOX, δεν παρέχουν σημαντικά αποτελέσματα για διασπορά κοντινού πεδίου [132]. Ωστόσο, οι Hajra et al. [133] διαπίστωσε ότι το ADMS δεν μπορούσε να μοντελοποιήσει τα αποτελέσματα των κατασκευών σε ταράτσα, προκαλώντας υψηλότερες αραιώσεις κοντά στη στοίβα σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της αεροσήραγγας. Τα εμπειρικά Gaussian μοντέλα δεν θα μπορούσαν να αντιμετωπίσουν ρητά τις λεπτομερείς συμπεριφορές λοφίου επηρεάζομενα από κτιριακά εμπόδια λόγω της εξαγωγής μοντελοποίησης. Επομένως, κατά την εφαρμογή αυτών των μοντέλων στη διασπορά κοντινού πεδίου στα αστικά περιβάλλοντα, είναι απαραίτητο να κατανοήσουμε τις θεμελιώδεις έννοιες που χρησιμοποιούνται σε αυτές [134,135]. Η σύνθετη γεωμετρία, η ασταθής διαδικασία και η βραχυχρόνια έκθεση, που δεν μπορεί να καθοριστεί κατά την εφαρμογή μοντέλων λοφίου με βάση την Gaussian, μπορεί να προκαλέσει σημαντικά σφάλματα σε περιοχές-στόχους όπου υπάρχουν αυτές οι επιπτώσεις

Το ASHRAE παρέχει πρακτικές οδηγίες για το σωστό σχεδιασμός των στοίβων εξάτμισης και τη τοποθέτηση των εισαγωγών αέρα προς αποφυγήν αρνητικού επηρεασμού της ποιότητας του αέρα . Το μοντέλο ASHRAE [36e38] αποτελείται από τις δύο μεθόδους γεωμετρικού σχεδιασμού και τις εξισώσεις του πλουμίου Gauss. Η μέθοδος του γεωμετρικού σχεδιασμού είναι μια ποιοτική προσέγγιση, που προέρχεται από τα αποτελέσματα πειράματων σε αεροσηραγγες [114,120] και συνήθως χρησιμοποιείται για το ελάχιστο ύψος στοίβας που μπορεί να αποφύγει την εκ νέου κατάκρημνιση του λοφίου μέσω της οροφής ή του υπήνεμου τοίχου του κτιρίου που εκπέμπει. Η γεωμετρική μέθοδος σχεδίασης προϋποθέτει ότι το λοφίο, όταν απελευθερωθεί από μια στοίβα, ακολουθεί ένα τριγωνικό μονοπάτι με κλίση 5:1 μακριά από η κεντρική γραμμή (Εικ. 6). Οι διαστάσεις της ανακυκλοφορίας της ροής ζώνες που σχηματίζονται στο κτίριο εκφράζονται με όρους L_r , το μήκος

ανακυκλοφορίας που σχηματίζεται στον απόηχο του κτιρίου, το οποίο μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τις διαστάσεις της όψης του κτιρίου κάθετα προς την κατεύθυνση του ανέμου [120]. Το όριο της υψηλής αναταραχής ορίζεται στη περιοχή από μια γραμμή με κλίση 10:1. Η μέθοδος γεωμετρικού σχεδιασμού παρέμεινε αμετάβλητη στο ASHRAE στις Εκδόσεις 2007, 2011 και 2015. Εν τω μεταξύ, η εξίσωση του λοφίου Gauss είναι μια ποσοτική τεχνική που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των αραιώσεων στεγής. Οι αραιώσεις λοφίου εκτιμώνται με τον υπολογισμό ορισμένων παραμέτρων, συμπεριλαμβανομένου του πραγματικού ύψους του λοφίου πάνω από το οροφή, την ταχύτητα της εξάτμισης, την ταχύτητα του ανέμου στο ύψος του κτιρίου και τις τυπικές αποκλίσεις της εξάπλωσης λοφίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα μοντέλα Gaussian plume έχουν αλλάξει κάπως μεταξύ των εκδόσεων ASHRAE 2007 και 2011, ιδιαίτερα στην εκτίμηση αραιώσεως λοφίου. Το ASHRAE 2011 παρουσιάστηκε πρόσφατα επειδή παρατηρήθηκαν αποκλίσεις μεταξύ ASHRAE 2007 και πειραματικών δεδομένων από προηγούμενες μελέτες για περιπτώσεις μεμονωμένων κτιρίων [132,133]. Νέα αποψεις για την εκτίμηση της αύξησης εξάπλωσης του νέφους, παραμέτρους λοφίου και αραιώση για μικρότερες χρονικές περιόδους έχουν προταθεί. Οι Hajra et al. [108] παρουσίασε αποτελέσματα από μελέτη αεροσήραγγας διασποράς ρύπων κοντά στο πεδίο από το εκπομπές στεγής δύο διαμορφώσεων πολλαπλών κτιρίων. Οι αραιώσεις που ελήφθησαν από τα πειράματα της αεροσήραγγας συγκρίθηκαν επίσης με τις προβλέψεις ASHRAE 2007 και 2011. Βρήκαν ότι οι προβλέψεις του ASHRAE 2007 ήταν υπερβολικά συντηρητικές για την απομονωμένο κτίριο, ενώ οι εκτιμήσεις ASHRAE 2011 συγκρίθηκαν καλύτερα με πειραματικά δεδομένα σε ορισμένες περιπτώσεις. Ωστόσο, όπως προτείνεται από τους [117,118], κανένα μοντέλο ASHRAE δεν είναι ικανό να μοντελοποιήσει την επίδραση των παρακείμενων κτιρίων. Περαιτέρω διερεύνηση απαιτείται για αυτά τα μοντέλα. Δεν υπάρχει αλλαγή στα μοντέλα Gaussian plume μεταξύ 2011 και 2015.

Συμπερασματικά τόσο οι μετρήσεις πεδίου πλήρους όσο και οι μειωμένης κλίμακας έχουν παράσχει πολύτιμες πληροφορίες, γιατί χρησιμοποιούν πραγματικά ρευστα με πραγματική ατμοσφαιρική κατάσταση. Ωστόσο, οι οριακές συνθήκες σε τέτοια πειράματα δεν μπορούν να αναπαραχθούν.

Table 4 Validation database for near-field dispersion studies available online

Database	Measurement data	Refs.	URL
COST 732 Model Evaluation Case Studies	Flow and concentration s for MUST and Oklahoma City cases (Wind tunnel)	[161,162]	http://www.mi.zmaw.de/index.php?id!/484 (Valid April 2016)
CODASC	Concentration s around street canyons with avenue-like tree planting (Wind tunnel)	[57,58]	http://www.windforschung.de/CODASC.htm (Valid April 2016)
CEDVAL	Flow and concentration s around isolated obstacles, regular arrays of obstacles, and building complex (Wind tunnel)	[163]	http://www.mi.uni-hamburg.de/cedval/ (Valid April 2016)
DAPPLE Datasets	Flow and concentration s in the complex urban environment in central London (Field measurements and Wind tunnel)	[16]	http://www.dapple.org.uk/ (Valid April 2016)
TPU Database	Flow and concentration s around an	[53]	http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_center/pollution/pollution.html (Valid April 2016)

	isolated building (Wind tunnel)		
--	--	--	--

Επομένως, η δυνατότητα εφαρμογής των συνόλων δεδομένων από το πεδίο είναι περιορισμένες για συστηματικές και παραμετρικές μελέτες. Τα εργαστηριακά πειράματα χρησιμοποιούν επίσης πραγματικά ρευστα. Ωστόσο, οι οριακές συνθήκες πρέπει να διαμορφωθούν προσεκτικά ώστε να μοιάζουν με πραγματικές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Επειδή οι πειραματικές συνθήκες ελέγχονται πιο εύκολα στο εργαστήριο, τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τα εργαστηριακά πειράματα είναι κατάλληλα για παραμετρικές και συστηματικές μελέτες διαφόρων φυσικών διεργασιών ροής και διασποράς. Ωστόσο, τα πειράματα μπορεί να μειονεκτούν από απαιτήσεις ομοιότητας. Σε περιπτώσεις όπου τα φαινόμενα θερμικής και άνωσης είναι μη αμελητέα, η μοντελοποίηση γίνεται πολύ περίπλοκη. Οι εμπειρικές μέθοδοι μοντελοποίησης που βασίζονται στη θεωρία της διασποράς έχουν σχεδιαστεί για να επιτρέπουν τον γρήγορο υπολογισμό πολλών διαφορετικών περιπτώσεων. Οι μέθοδοι είναι σχετικά απλές και εύκολες στην χρήση αλλά έχουν περιορισμένη εφαρμογή και μικρότερη ακρίβεια όταν οι λεπτομέρειες διαμόρφωσης του κτιρίου και το περιβάλλον λαμβάνονται υπόψη.

Το CFD μπορεί να παρέχει δεδομένα για όλα τα πεδία ροής και διασποράς, που εκτελούνται σε πλήρη κλίμακα και έτσι αποφεύγονται περιορισμοί λόγω απαιτήσεων ομοιότητας. Απαιτούνται αξιόπιστα πειραματικά δεδομένα για την επικύρωση της ακρίβειας και την αβεβαιότητα των μοντέλων CFD. Οι υπάρχουσες μέθοδοι μοντελοποίησης είναι οι πλέον κατάλληλες για σταθερές κατανομές ρύπων και σχετικά φτωχές στη μοντελοποίηση ασταθών καταστασεων. Δεδομένου ότι κάθε προσέγγιση μοντελοποίησης έχει ξεχωριστά χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα, κάθε μέθοδος πρέπει να χρησιμοποιείται με τον κατάλληλο τρόπο για το σκοπό της μοντελοποίησης. Επομένως, είναι σημαντικό να χρησιμοποιείτε η προσέγγιση μοντελοποίησης λαμβάνοντας υπόψη την υποκείμενη θεωρία και τους περιορισμούς των μοντέλων. Η τρέχουσα γνώση συμφωνεί ότι και στα δύο οι αριθμητικές προσεγγίσεις είναι χρήσιμες και θα πρέπει να είναι συμπληρωματικά στα πλεονεκτήματα και στους περιορισμούς τους, μειώνοντας έτσι την ανακρίβεια στα αποτελέσματα μιας μεθόδου μεμονωμένης προσέγγισης.

1.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΡΥΠΩΝ

Ο πιο άφθονος ρύπος στην ατμόσφαιρα είναι το υλικό σωματίδιο (PM) και αποτελείται από εξαιρετικά μικρά σωματίδια και υγρά σταγονίδια που περιέχουν οξέα, οργανικές χημικές ουσίες, μέταλλα και χώμα ή σκόνη. Το PM χαρακτηρίζεται από την αεροδυναμική ισοδύναμη διάμετρο του (AED) και ταξινομείται μεταξύ 2,5 και 10 μm (PM_{2,5} – PM₁₀) ως «χονδροειδές» και λιγότερο από 2,5 μm ως «λεπτό» (Anderson et al., 2012). Το PM είναι ένας βασικός δείκτης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και έχει αναγνωριστεί ως κίνδυνος για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Τα σωματίδια Ultrafine (UFP) ορίζονται ως σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 0,1 μm και ενέχουν μεγάλο κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία (Kumar, et al 2014.). Τα σωματίδια μαύρου άνθρακα (BC) είναι πρωτογενή σωματίδια εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα ως αποτέλεσμα της ατελούς καύσης από ανθρακούχα καύσιμα, ντίζελ και βιομάζα (Bond et al, 2004) και θεωρείται η δεύτερη ισχυρότερη συνεισφορά στην υπερθέρμανση του πλανήτη μετά το διοξείδιο του άνθρακα (Ramanathan et al, 2008). Τα αερολύματα BC δεν αλλάζουν άμεσα τον ισορροπία ακτινοβολίας του συστήματος γης-ατμόσφαιρας απορροφώντας ηλιακή ακτινοβολία αλλά επίσης έμμεσα επηρεάζουν το παγκόσμιο ή περιφερειακό κλίμα αλλάζοντας τις ιδιότητες των σταγονιδίων υγρού νέφους και πυρήνων πάγου για την τροποποίηση των μικροφυσικών ιδιοτήτων των νεφών (Ching et al., 2016). Το BC παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στη μείωση της ορατότητας λόγω της απορρόφησής του ιδιότητες και έχει αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία.

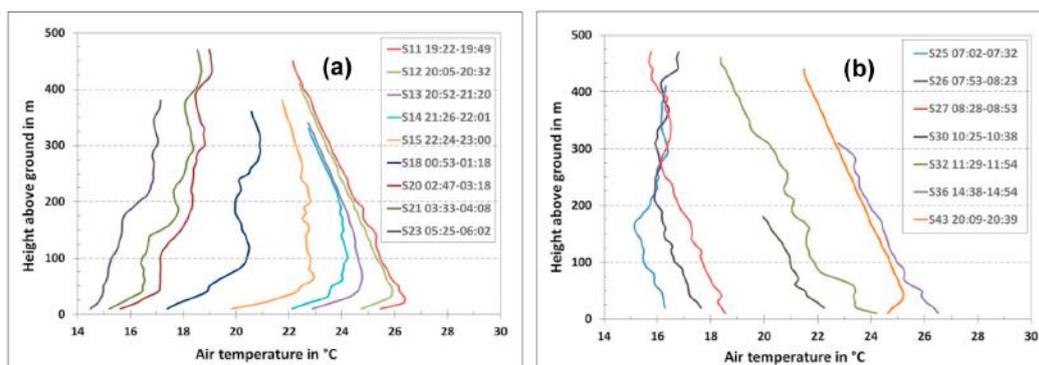
Η σταθερότητα της ατμόσφαιρας παίζει σημαντικό ρόλο στη διασπορά των ρύπων. Οι μετεωρολογικές συνθήκες όταν ευνοούν μια κατάσταση υψηλής πίεσης με αποτέλεσμα το σχηματισμό στρώματος αναστροφής αναστέλλουν τη διασπορά ρύπων. Εάν ληφθούν κατακόρυφα προφίλ μετεωρολογικών παραμέτρων και ατμοσφαιρικών ρύπων προκειμένου να γίνει διερεύνηση της επίδρασης της αντιστροφής στην ποιότητα του αέρα της πανεπιστημιούπολης. Τα κατακόρυφα προφίλ βοηθούν στην κατανόηση της συμπεριφοράς της αντιστροφής θερμοκρασίας, των ρύπων και της σχέσης τους μεταξύ τους.

Για το πρόβλημα για την in-situ μέτρηση σωματιδίων (PM), Black Carbon (BC), Ultra Fine Particles (UFP) NO_x SO_x και O₃ καθώς και μετεωρολογικές παράμετροι όπως θερμοκρασία αέρα, σχετική υγρασία, ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε τις πηγές τους, την επίδραση διαφορετικών μετεωρολογικών παραμέτρων στη διασπορά, καθώς και την τοπογραφία της περιοχής ενδιαφέροντος. Οι περισσότεροι ρύποι εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα από επίγειες πηγές και συνήθως περιορίζονται στη χαμηλότερη περιοχή της ατμόσφαιρας, που είναι το οριακό στρώμα (ABL). Το ABL εκτείνεται συνήθως έως 1-2 km πάνω από την επιφάνεια. Ανάλογα με την ημερήσια εξέλιξη του ABL, η κατακόρυφη κατανομή των αερολυμάτων μπορεί να διαφέρει σημαντικά ανάλογα με το ύψος και ώρα της ημέρας. Η κατακόρυφη κατανομή των αερολυμάτων εξαρτάται από το ένταση της

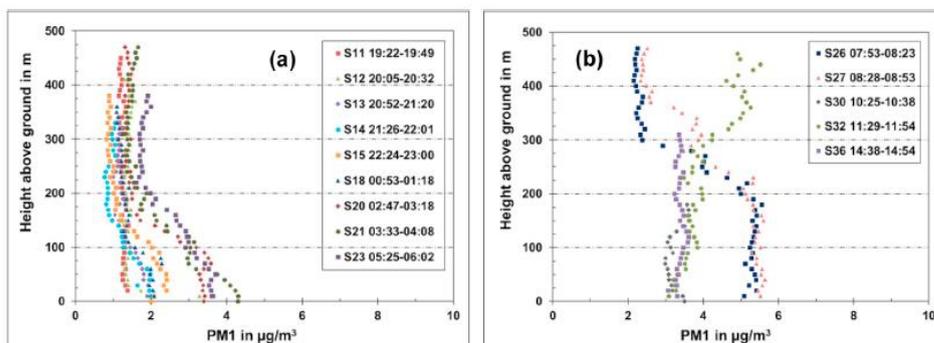
κάθετης ανάμιξης στην κατώτερη ατμόσφαιρα, η οποία ονομάζεται το στρώμα ανάμιξης. Το ύψος αυτού του μικτού στρώματος καθορίζει τον χώρο ανάμιξης για τους εκπεμπόμενους ρύπους από διάφορες πηγές. Η σταθερότητα του ABL μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στη συγκέντρωση σωματιδίων που προκαλείται από μειωμένη ανάμιξη λόγω της σταθερότητας της ατμόσφαιρας. Η σταθερότητα της ατμόσφαιρας έχει αξιολογηθεί χρησιμοποιώντας διάφορες ταξινομήσεις. Αυτή η ταξινόμηση βασίζεται στην ταχύτητα του ανέμου, στην ηλιακή ακτινοβολία και στον αριθμό Richardson κατά μέσο όρο πάνω από το επιφανειακό στρώμα (Kolev et al., 2000).

Κατά τη διάρκεια αναστροφής θερμοκρασίας, ένα στρώμα θερμότερου αέρα βρίσκεται πάνω από την μάζα ψυχρότερου αέρα εμποδίζοντας έτσι την άνοδο της μάζας του αέρα. Μια αντιστροφή θερμοκρασίας, ορίζεται από μια θετική κατακόρυφη κλίση θερμοκρασίας, με την παρουσία ενός ισχυρού σταθερού στρώματος (Faragó et al., 2005). Οι αντιστροφές θερμοκρασίας παρουσιάζουν φυσικό ενδιαφέρον επειδή συγκρατούν το κατακόρυφη ανάπτυξη νεφών και κίνησης μάζας αέρα. Αυτό περιορίζει τους ατμοσφαιρικούς ρύπους σε περιορισμένες μάζες αέρα και περιορίζει τη διασπορά ρύπων και έτσι αυξάνει τη συγκέντρωση ρύπων και επίσης οδηγεί σε μειωμένη ορατότητα.

Ο σχηματισμός και η καταστροφή του στρώματος αναστροφής και των επιπτώσεών του στο αεροζόλ διερευνήθηκαν από τον (A. Samad et al (2020)) που πραγματοποίησαν μετρήσεις κατακόρυφου προφίλ ανυψώνοντας μπαλόνι από το έδαφος σε ύψος 470 m μετρώντας στην άνοδο και στην κάθοδο (8 και 9 Ιουλίου 2018). Βρέθηκε αντιστροφή τη νύχτα, που παγίδευσε τους ρύπους, αυξάνοντας έτσι τη συγκέντρωση των ρύπων κοντά στο έδαφος μέσα στο στρώμα αντιστροφής. Οι συγκεντρώσεις έδειξαν φθίνουσα τάση αυξανόμενου του υψόμετρου, αλλά το μεσημέρι, όταν η ατμόσφαιρα είναι καλά αναμεμιγμένη, οι συγκεντρώσεις ήταν σχετικά σταθερές με αυξανόμενο υψόμετρο.



Εικόνα 6 Σχηματισμός α) καταστροφής β) αναστροφής θερμοκρασίας A.Samad et al 2020

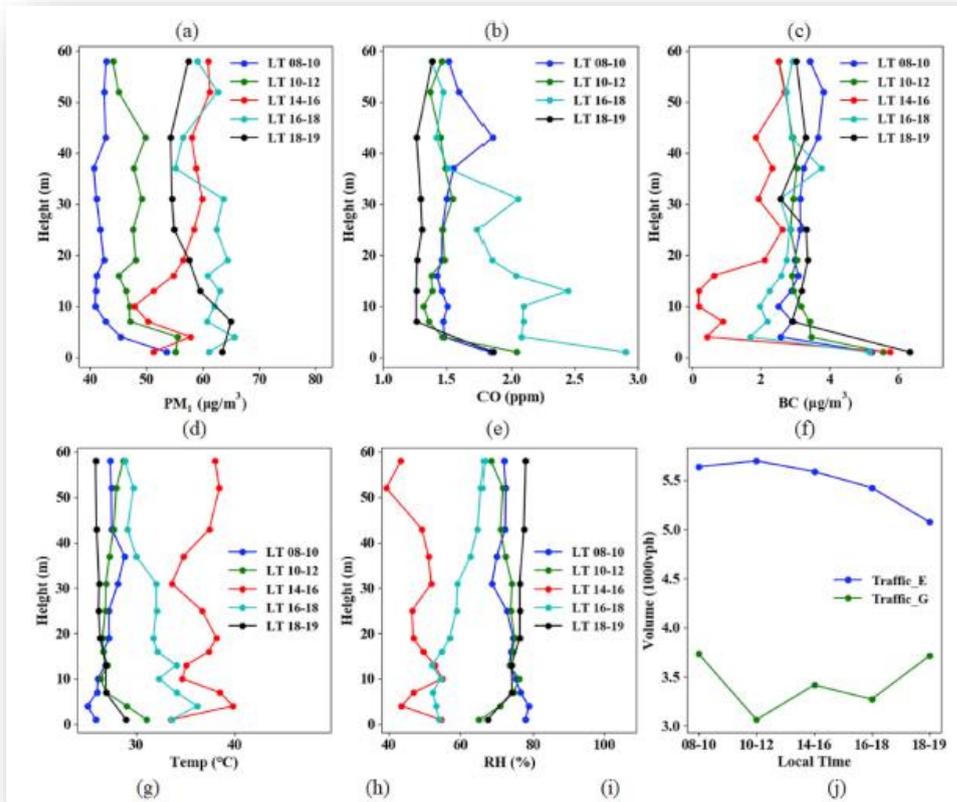


Εικόνα 7 Συγκέντρωση PM 1 κατά τον σχηματισμό α) αναστροφής και β) καταστροφής A.Samad et al 2020

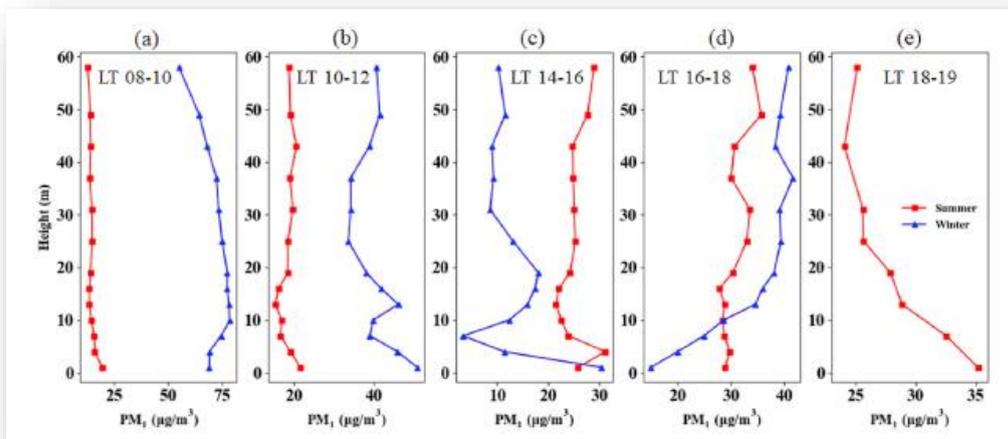
Λίγες μελέτες έχουν ανακοινωθεί την τελευταία δεκαετία για την κατακόρυφη κατανομή ρύπων και ελάχιστες για του μηχανισμούς ανάπτυξης αυτής της κατανομής. Ενδεικτικά αναφέρουμε μελέτες πεδίου: 1) Σε υπερυψωμένο δρόμο λόγω αυξημένης ποσότητας εκπομπών καυσαερίων Rakowska A., etal (2014) Y. Liu, etal 2018. 2) Σε υψηλού όγκου κυκλοφορίας δρόμο, αστικό φαράγγι και εμποδία στην άκρη του δρόμου που είναι δυσμενή για τη διασπορά ρύπων που εκπέμπονται από την κυκλοφορία, όπως σωματιδιακή ύλη (PM) Zhang H., etal, (2015) 3) Με προσδιορισμό εξάρτησης ύψους - συγκεντρώσεων ρύπων που εκπέμπονται από την κυκλοφορία με ή χωρίς την παρουσία οδογέφυρας και ανάλυση μετεωρολογικών παραγόντων όπως η θερμοκρασία, καθώς και συσχέτιση διαμορφώσεων φαραγγίων δρόμου, βλάστησης, φράγματα θορύβου κλπ, Hang J. etal (2018), Boddy J. etal (2005), He L. etal (2017), Huang Y. etal (2012), Li X.-B. etal (2016), Hang J. etal, (2017). 4) Μελέτες εξασθένησης κατανομής ρύπων ως προς την απόσταση που εκπέμπονται από την κυκλοφορία σε αστικές γειτονίες κοντά σε αυτοκινητόδρομους. Sharma A. etal (2018), Joerger V.M etal (2018), Padro-Martinez L.T. etal (1994), Gao Y. etal (2016), Boddy J. etal (2005).

Ωστόσο, οι κάθετες κατανομές των ρύπων που εκπέμπονται από την κυκλοφορία στα αστικά κέντρα δεν έχουν διερευνηθεί επαρκώς και οι μετρήσεις πραγματοποιούνται μόνο σε δύο ή τρία επίπεδα, με εξαιρετικά δύσκολη πλήρη εικόνα για κατακόρυφες κατανομές των ρύπων Micallef A. etal (1998), Weber S. etal (2006)

Οι Lu Kai-Fa *et al* (2020) με σταθερή πειραματική μεθοδολογία (γεγονός που το καθιστά μη εφαρμόσιμο γενικά) και με περισσότερες μετρήσεις καθ' ύψος κατέγραψαν τα πιο κάτω αποτελέσματα:



Εικόνα 8 Ωριαία παραλλαγή α) PM_1 β) CO γ) BC δ) ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ε) σχετική υγρασία ζ) ταχύτητα ανέμου Kai Fa Lu (2020)



Εικόνα 9 Κάθετο προφίλ παρατηρήσεων για συγκεντρώσεις PM_1 Kai Fa Lu (2020)

Οι Solazzo E. et al (2013) στην μελέτη τους για την Μοντελοποίησης Ποιότητας Αέρα (AQMEII) αξιολόγησαν 12 μοντέλα χημικής μεταφοράς περιφερειακής κλίμακας για συγκεντρώσεις όζοντος και CO, μαζί με μετρήσεις ταχύτητας ανέμου (WS) κατεύθυνσης (WD), θερμοκρασίας (T), και σχετικής υγρασίας (RH), συλλέγονται με όργανα σε εμπορικά αεροσκάφη στο πλαίσιο των μετρήσεων του (MOZAIC) γύρω από τέσσερα μεγάλα αεροδρόμια (Πόρτλαντ, Φιλαδέλφεια, Ατλάντα, Ντάλας, Φρανκφούρτη) από την επιφάνεια έως 8,5 χλμ. με ενδεικτικά τα ακόλουθα αποτελέσματα

Για όλα τα δεδομένα, όλα τα μοντέλα παρουσιάζουν σημαντικά σφάλματα στο μοντελοποιημένο WS και κακή συσχέτιση με τις παρατηρούμενες τιμές στα πρώτα 100 μέτρα. Αυτό αποδεικνύεται από τη βελτίωση της απόδοσης των μοντέλων παραπάνω από 500 m. Μικρότερα λάθη παρατηρούνται από 500 μέχρι 1000 m. Η κακή απόδοση του μοντέλου στα πρώτα 100 μέτρα σε όλες τις τοποθεσίες επιβεβαιώνονται επίσης από την ανάλυση του CO, με τιμές πολύ κάτω από τις μετρούμενες επειδή οι άνεμοι κοντά στην επιφάνεια είναι ευαίσθητοι σε πολλούς παράγοντες, όπως η κάλυψη γης και διεργασίες ανταλλαγής ενέργειας, και επιπλέον οι επιφανειακοί άνεμοι δεν χρησιμοποιούνται για την παραγωγή αναλύσεων γεγονός που δείχνει σημαντικό γνωστικό κενό σε ότι αφορά τα μετεωρολογικά μοντέλα ως αδύναμα στην αναπαραγωγή WS στο PBL

Τέλος σε εργασίες αριθμητικής προσομοίωσης όπου αναπαράγεται η διαδικασία διάχυσης των ρύπων από τις πηγές εκπομπών σε θέσεις ενδιαφέροντος, όπως CFD οι W. Lu, et al (1996), W. Lu, (1997) είδαν ότι τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης παρουσιάζουν αποκλίσεις όσον αφορά το κατακόρυφα μοτίβα κατανομής των εκπομπών κίνησης σε αστικά περιβάλλοντα.

Για την κατακόρυφη δομή των συγκεντρώσεων PM_{2,5}, O₃ και SO₂ PM₁₀, και NO_x σε συνδυασμό με τα μετεωρολογικά δεδομένα που συλλέχθηκαν από έως με αποτελέσματα που δείχνουν ότι (**Tower observed vertical distribution of PM_{2.5}, O₃ and NO_x in the Pearl River Delta Atmospheric Environment 220 (2020) 117083T Lei Li et al**): 1) Η συγκέντρωση των PM_{2,5} γενικά μειώθηκε με το ύψος, 2) Η συγκέντρωση του O₃ αυξανόταν με το ύψος ήταν αρκετά παρόμοια με αυτή των PM_{2,5}, 3) ενώ η κλίση της συγκέντρωσης NO_x ήταν πολύ πιο απότομη κάτω από τα 220 μέτρα και ήταν πιο ήπια στα 220 μέτρα.

Ζητούμενο επίσης είναι, ο συνεργικός έλεγχος για τη ρύπανση PM_{2,5} O₃, NO_x και SO₂, είναι απαραίτητη η λεπτομερής εμβάθυνση κατανόηση των χαρακτηριστικών της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε αυτήν την περιοχή.

Η Σπουδαιότητα κατακορυφων κατανομων ειναι δεδομενη, 1)Λόγω του μεγάλου αριθμού πολυώροφων κτίριων πόλεων, οι περιοχές ανθρώπινης δραστηριότητας έχουν επεκταθεί από το έδαφος μέχρι τον αέρα, άρα οι συγκεντρώσεις ρύπων σε μεγάλα υψόμετρα είναι εξίσου σημαντικές με εκείνες στο έδαφος, το οποίο σχετίζεται στενά με την την υγεία των ανθρώπων που ζουν ή εργάζονται σε πολυώροφα κτίρια. 2) Και συμβαίνουν χημικές αντιδράσεις που παράγουν ατμοσφαιρικούς ρύπους στον τρισδιάστατο χώρο, άρα γνώση της κατακόρυφης κατανομής του είναι σημαντική για να κατανοήσουμε τους χημικούς και φυσικούς μηχανισμούς των αντιδράσεων.

Ο έλεγχος της παρακολούθησης κατακόρυφης δομής των ατμοσφαιρικών ρύπων γίνεται με 1)δεμένα μπαλόνια, 2)αεροπλάνα, 3)μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα και 4) μετεωρολογικοί πύργοι (Glaser et al., 2003; Meng et al., 2008; Sangiorgi et al., 2011; Sun et al., 2013; Diaz-Varela et al., 2014; Kaser et al., 2017; Brown et al., 2013; Zhang et al., 2016b; Wang et al., 2017).

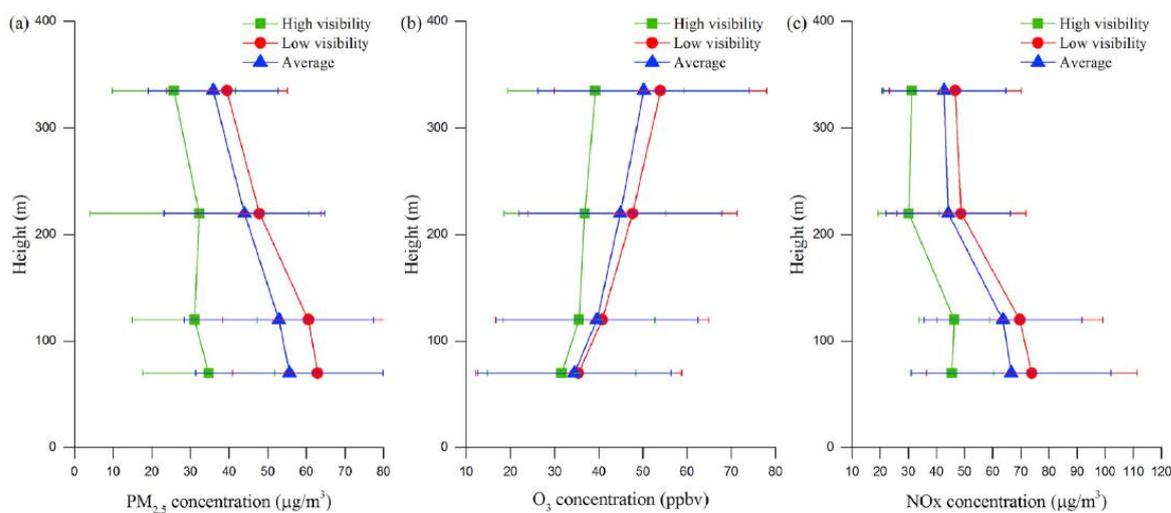
Ωστόσο, επειδή τα προβλήματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης εμφανίζονται κυρίως στην κάτω τροπόσφαιρα, είναι ακόμα πιο πολύτιμη για την κατανόηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης η παρακολούθηση στα πρώτα 100 μέτρα σε διαρκή κινητικότητα και όχι στατικότητα (Mu et al., 2004; Liu et al., 2013; Brown et al., 2013).

Συνήθως η συγκέντρωση έχει δύο μοτίβα στην κατακόρυφη κατεύθυνση: 1)ταχεία μείωση με αυξανόμενο ύψος συνήθως υπό συνθήκες υψηλής ορατότητας, και 2) αργή μείωση με την αύξηση του ύψους γενικά κατά τις περιόδους της σοβαρής ρύπανσης όταν το οριακό στρώμα έχει συνήθως θερμοκρασιακή αναστροφή και περιορίζει τους ρύπους εντός του οριακού στρώματος.

Οι ρύποι ανάλογα με το είδος τους παίζουν καθοριστικό ρόλο διότι τα NOx προς σχηματισμό O₃, είτε με επιτάχυνση είτε με επιβράδυνση, εξαρτάται από τον ανταγωνισμό των NOx για τις ρίζες OH, ένα κύριο οξειδωτικό στην τροπόσφαιρα από τις πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) που εκπέμπονται από βιογενείς και ανθρωπογενείς δραστηριότητες (Seinfeld και Pandis, 2006). Μετρήσεις των κατακόρυφων κατανομών NOx και O₃ παρέχουν μια μοναδική ευκαιρία να κατανοήσουμε την απόδοση παραγωγής O₃ κάτω από διαφορετικά χημικά σενάρια, δηλ. περιορισμένα σε NOx έναντι περιορισμένων πτητικών οργανικών ενώσεων. Ωστόσο υπάρχουν σχετικά λίγες αναφορές για την κατακόρυφη δομή των αυτών των ρύπων .

Οι μετεωρολογικές συνθήκες στο χειμερινό ηλιοστάσιο, το ισχυρό ψυχρό μέτωπο λόγω της συνεχούς διεύδυσης ασθενούς ψυχρού αέρα σε υψηλή πίεση, η θερμοκρασία μειώνεται ελαφρώς και η ταχύτητα του ανέμου είναι πιο αδύναμη επομένως το ύψος του στρώματος

ανάμιξης μειώνεται άρα οι συνθήκες είναι ευνοϊκές για τη συσσώρευση ατμοσφαιρικών ρύπων (Yao et al., 2014). Η διείσδυση ασθενούς ψυχρού αέρα ευνοεί τον σχηματισμό σταθερών στρωματοποιήσεων, και οι ασθενέστερες ταχύτητες ανέμου και η μείωση του ύψους του στρώματος ανάμιξης δεν επιτρέπουν στους ατμοσφαιρικούς ρύπους να διαλυθούν με αντίστοιχη μείωση της ορατότητας. Όταν υπάρχει βραχυπρόθεσμη αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα κοντά στην επιφάνεια πριν περάσει το μεγαλύτερο μέρος του ισχυρού ψυχρού μετώπου η συγκέντρωση των ρύπων μειώνεται. Αυτή τη στιγμή, η σταθερή στρωματοποίηση καταστρέφεται και η μέση ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται επίσης ελαφρώς. Αμέσως όταν το ψυχρό μέτωπο περάσει τη βάση και η μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου αυξηθεί ξαφνικά πάνω από 4 m/s, διασκορπίζονται οι ρύποι που συσσωρεύτηκαν στην προηγούμενη περίοδο εντελώς. Σε περιοχές υψηλής πίεσης οι ρύποι συσσωρεύονται ραγδαία λόγω των δυσμενών καταστάσεων λόγω διάχυσης. Επίσης μεγάλη ποσότητα ανθρωπογενών πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs), που εκπέμπονται από πολυάριθμες μεταποιητικές βιομηχανίες και που σχετίζονται με τις πηγές μεταφοράς (Liu et al., 2008; Zheng et al., 2009) συμβάλλουν σημαντικά στο σχηματισμό λεπτών σωματιδίων, ιδιαίτερα των δευτερογενών οργανικών αεροζόλ (SOA) (Chang et al., 2019).



Εικόνα 10 Κατακόρυφη κατανομή ρύπων (Chang et al 2019)

Η κατακόρυφη κατανομή ρύπων και η αλληλεπίδραση της με το οριακό στρώμα μελετήθηκε από τους Cheng Liu et al και συμπέραναν ότι: 1) Τα κατακόρυφα προφίλ δηλαδή σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο 2,5 mm ή μικρότερη) και μετεωρολογικές μεταβλητές (π.χ. πιθανή θερμοκρασία, ειδική υγρασία) είναι ζωτικής σημασίας για την διαδικασία συσσώρευσης και διασποράς καθώς και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ αεροζόλ ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος (ABL). Τα προφίλ PM_{2.5} χαρακτηρίζονται από μια διαυγή δομή τριών στρωμάτων μια σταθερή

μέσα στο μικτό στρώμα, 2) ένα στρώμα μετάβασης με μεγάλη τοπική κλίση στη ζώνη συμπαρασυρμού 3) και στρώμα με χαμηλή συγκέντρωση και μικρή κλίση στην ελεύθερη ατμόσφαιρα, η οποία παρουσιάζει μεγάλη ομοιότητα με αυτή της ειδικής υγρασίας.

Η συσσώρευση αερολυμάτων βρέθηκε κοντά στην κορυφή του ABL με το μεγαλύτερο ποσοστό αύξησης. Κάθετες κατανομές και η εξέλιξή τους περιορίζονται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοδυναμική ABL κατά τη διάρκεια της ημέρας, αλλά δείχνουν πολύ μικρότερη εξάρτηση από την εξέλιξη του ABL τη νύχτα. Το PM_{2.5} παρέχει μια σημαντική ανατροφοδότηση για το νυκτερινό οριακό στρώμα οδηγεί σε σημαντική τροποποίηση των κατακόρυφων κατανομών δυνητικής θερμοκρασίας και νερού. Επιπλέον, χρειάζεται η μελέτη για το τρέχον σχήμα παραμετροποίησης του οριακού επιπέδου

Αερολύματα εμφανίζονται συνήθως μέσα στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (ABL) αφού είτε εκπέμπονται από την επιφάνεια είτε σχηματίζονται από σύμπλοκα φυσικές διεργασίες (π.χ., μετατροπή αερίου-σωματιδίου, συμπύκνωση, πήξη) και χημικές αντιδράσεις (π.χ. δευτερογενή οργανικά αερολύματα) στην ατμόσφαιρα. Οι κατακόρυφες κατανομές των αερολυμάτων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις πηγές, το σχηματισμό και τις αναταράξεις τους και σταθερότητα του ABL (Stull, 1988; Altstädter et al., 2015).

Οι πηγές είναι το κλειδί για τον προσδιορισμό των κατακόρυφων προφίλ στο ABL. Διαφορετικές μεταβλητές ή βαθμωτές έχουν διαφορετικές πηγές/καταβόθρες. Για παράδειγμα, οι ροές επιφάνειας και συμπαρασύρματος είναι οι δύο κύριες πηγές θερμότητας, προσδιορισμού κατακόρυφων προφίλ δυναμικής θερμοκρασίας (h) εντός του ABL (Stull, 1988; Huang et al., 2009). Τα εκπεμπόμενα σωματίδια μπορούν να μεταφερθούν, διασκορπισμένα και συσσωρευμένα εντός του ABL. Εν τω μεταξύ, δευτερογενή αερολύματα σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα μέσω φυσικών διεργασιών όπως η συμπύκνωση, η οποία λειτουργεί ως δευτερεύουσα σημαντική πηγή στην ατμόσφαιρα. Κατακόρυφη κατανομή του PM_{2.5} εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες διασποράς ABL διότι μπορεί να αναμιχθεί καλά κατακόρυφα μέσα στο ABL λόγω έντονων τυρβωδών κινήσεων που προκύπτουν από την παραγωγή άνωσης αναταράξεων και στροβιλισμού που δημιουργείται από τη διάτμηση υπό συνθήκες συναγωγής κατά τη διάρκεια της ημέρας (Liu et al., 2018a). Κατά τη διάρκεια της νύχτας, οι αναταράξεις γίνονται αδύναμες και η κατακόρυφη ανάμειξη είναι ανεπαρκής, είναι συνήθως ισχυρή αναστροφή αναπτύσσεται κοντά στην επιφάνεια λόγω της ισχυρής ψύξης με ακτινοβολία. Η αναστροφή δρα ως εμπόδιο που περιορίζει τα αερολύματα μέσα στο ρηχό νυκτερινό οριακό στρώμα (NBL) και αποτρέπει την ύπαρξη ατμοσφαιρικών ρύπων μεταφέροντας προς τα πάνω στην ελεύθερη ατμόσφαιρα (Li et al., 2019). Εν τω μεταξύ, άλλες μελέτες παρατηρούν το αεροζόλ Η επίδραση ακτινοβολίας μεγάλου κύματος στο NBL μπορεί

να είναι σημαντική (π.χ. Nair et al., 2011). Σε σύγκριση με την πιθανή θερμοκρασία και τις νερό ατμού (q), η μελέτη για τις κατακόρυφες κατανομές $AS_{2,5}$ και τις αλληλεπιδράσεις με την ABL η εξέλιξη είναι πολύ περιορισμένη, κυρίως λόγω ελλειψης δεδομένων παρατήρησης. Η κατακόρυφη κατανομή του αερολύματος καθορίζεται από πολλούς παράγοντες. Εκτός από την πηγή/καταβόθρες, άλλες συνθήκες όπως μετεωρολογικές συνθήκες (άνεμος, σχετική υγρασία κ.λπ., Li et al., 2018), θερμοδυναμική δομή, ατμοσφαιρικές αναταράξεις (Ding et al., 2005; Harnisch et al., 2009; Bisht et al., 2016; Zhu et al., 2019) και δευτεροβάθμια σχηματισμός αερολύματος όπως υγροσκοπική ανάπτυξη (Liu et al., 2018β; Pan et al., 2009) είναι σημαντικά για τη διαμόρφωση κατακόρυφων προφίλ $PM_{2,5}$. Για παράδειγμα, το $PM_{2,5}$ δείχνει λογαριθμικά τάση μείωσης με αυξανόμενο ύψος (Ding et al., 2005). Κάθετα προφίλ $PM_{2,5}$ μπορούν να είναι τροποποιείται ουσιαστικά από την αλλαγή της κατεύθυνσης του ανέμου και του ανέμου Ταχύτητα. Μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV) τοποθετημένα με φορητά όργανα υποσχονται παροχή υψηλού χρονικού διαστήματος παρατήρησης και χωρική ανάλυση κατακόρυφων προφίλ στο ABL. για τη μέτρηση μετεωρολογικών μεταβλητών και ατμοσφαιρικών ρύπων σε διαφορετικά ύψη στο ABL (Peng et al., 2015; Brady et al., 2016; Zhou et al., 2018; Li et al., 2018), αλλά οι μετρήσεις περιορίζονται στο κάτω μέρος του ABL κυρίως λόγω του υπερβολικού βάρους μεταφοράς και ανεπαρκούς διάρκειας ζωής της μπαταρίας.

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία που έφτασε στην επιφάνεια μειώθηκε σημαντικά, ενισχύεται σημαντικά η στασιμότητα του ABL, οδηγώντας σε μια σταθερή συσσώρευση $PM_{2,5}$. Η σχετική υγρασία (RH) ευνοεί την υγροσκοπική ανάπτυξη των σωματιδίων. Η παρατήρηση επίσης της ταχύτητας τριβής u^* , (δείκτης μηχανικής τύρβης), είναι πολύ σημαντική κατά την εξέλιξη του γεγονότος της ρύπανσης.

Σημαντικά κενά στην βιβλιογραφία παρουσιάζονται στο σχήμα παραμετροποίησης του οριακού επιπέδου οπότε χρειάζεται περαιτέρω τελειοποίηση για τη βελτίωση του ABL και στη συνέχεια οι προβλέψεις για την ποιότητα του αέρα.

Στην μελλοντική κοινωνία (Έξυπνη κοινότητα), η ποιότητα του αέρα και οι ρύποι θα τραβήξουν την προσοχή των ερευνητών και των ηγετών για την ανάπτυξη έξυπνων συστημάτων για την καλύτερη προστασία των αεριανών πολιτών από τους κινδύνους του που μπορεί να λάβει χώρα στην κάθε πόλη [Air quality monitoring by using UAV flight system: A review 1 st M. Benaoumeur Bakhti Yasser BOUZID IBISC 4 th Hamza Kadourbenkada] Επίσης, τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV) λόγω της ευελιξίας τους, της κινητικότητάς τους σε 3d και της ικανότητάς τους να μεταφέρουν μονάδες ανίχνευσης χαμηλού κόστους αέρα έχουν γίνει μια φθηνή εναλλακτική λύση για την παρακολούθηση των τιμών ρύπανσης σε μια δεδομένη περιοχή. Ωστόσο, πρέπει να

μάθουμε ακόμη αρκετά, καθώς αυτού του είδους οι μελέτες αναμένεται να αυξηθούν τα επόμενα χρόνια. Η βιβλιογραφία σχετικά με το θέμα της παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα με βάση τα UAV, είναι σχετικά ελλιπής σε μια προσπάθεια να βελτιώσουμε την κατανόηση των κινήτρων, των προσεγγίσεων και των αποτελεσμάτων των μελετών παρακολούθησης αέρα με UAV. Η ρύπανση ομαδοποιείται σε

- σταθερές πηγές, συμπεριλαμβανομένων για παράδειγμα σταθμών παραγωγής ενέργειας, όπου καίγονται άνθρακας, φυσικό αέριο ή πετρέλαιο.
- κινητές πηγές, συμπεριλαμβανομένων των οχημάτων με βενζίνη και ντίζελ.

Ωστόσο, οι ατμοσφαιρικοί ρύποι έχουν ομοιότητες βάσει των οποίων κατηγοριοποιούνται σε αέριους ρύπους που περικλείονται απευθείας από την καύση ορυκτών καυσίμων όπως μονοξείδιο του άνθρακα CO, οξείδιο του αζώτου NO, όζον O₃, διοξείδιο του αζώτου NO₂, πτητικές οργανικές ενώσεις VOCs, Διοξείδιο του θείου μέταλλα SO₂, κ.λπ. υδραργύρου Hg, μολύβδου Pb, καδμίου Cd και αργύρου Ag, κ.λπ. Μπορούν να μεταφερθούν αεροπορικώς και οι πιο συνηθισμένες πηγές τους είναι τα βιομηχανικά απόβλητα και τα απόβλητα εξόρυξης, οι εκπομπές οχημάτων, τα λιπάσματα και οι μπαταρίες οξέος κ.λπ. Άλλη σημαντική κατηγορία ρύπων είναι τα σωματίδια PM. Οι εγκαταστάσεις αποτέφρωσης απορριμμάτων, η σκόνη, οι πυρκαγιές, τα οχήματα είναι οι κύριες πηγές PM. Το μέγεθος των σωματιδίων κυμαίνεται μεταξύ 2,5 μm (PM_{2,5}) και 10 μm (PM₁₀). Η βιβλιογραφία έχει τεκμηριώσει καλά τη σχέση μεταξύ της μακροχρόνιας έκθεσης στην ατμοσφαιρική ρύπανση και του ποσοστού νοσηρότητας και θνησιμότητας σε διαφορετικές χώρες, όπως αναφέρεται σε [A. Khajavi, et al], Στην πραγματικότητα, η βραχυπρόθεσμη έκθεση σε ατμοσφαιρικούς ρύπους μπορεί να προκαλέσει πνευμονικές και καρδιαγγειακές παθήσεις νευροεκφυλισμό, νευρολογικές διαταραχές κ.λπ. όπως μελετήθηκε στο. Επίσης, τα διάφορα μέρη του αναπνευστικού συστήματος επηρεάζονται από το PM εξαρτάται από το μέγεθος του σωματιδίου. Επιπλέον, μπορεί επίσης να επηρεάσει άτομα με αλλεργικές ασθένειες. Τα παιδιά ειδικότερα περνούν πολύ χρόνο σε εξωτερικούς χώρους και έχουν υψηλό ρυθμό αναπνοής για αυτούς τους λόγους είναι πιο ευάλωτα από τους ενήλικες σε νευροτοξικές βλάβες, όπου η ατμοσφαιρική ρύπανση στα παιδιά μπορεί να είναι ιδιαίτερα σοβαρή ως μεγάλη επίδραση στο νευρικό τους σύστημα.

Τα τελευταία τρία χρόνια, τα UAV προτείνονται από τον ως λύση κινητής ανίχνευσης [T. Villa, etal]. Συνήθως, ονομάζονται από ανίχνευση ποιότητας αέρα με βάση UAV (AQS), σύστημα παρακολούθησης (AQM) ή σύστημα παρακολούθησης 3D χωρικής ποιότητας αέρα. των ατμοσφαιρικών ρύπων. Επίσης, τα UAV επιτρέπουν τη λήψη χωρικής ανάλυσης και κατακόρυφου προφίλ της ατμοσφαιρικής ρύπανσης κοντά στην επιφάνεια λόγω της κινητικότητάς του σε οριζόντιες και κάθετες ανιχνεύσεις.

Η πρώτη ιδέα σε αυτό το θέμα ήταν να χρησιμοποιηθεί το UAV στη διερεύνηση της ρύπανσης του περιβάλλοντος από τους Wenqian Zang και Jiayuan Lin στο [W. Zang, etal] όπου, αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής UAV από τη χρήση δορυφορικής ή επανδρωμένης εναέριας τηλεπισκόπησης, η οποία είναι πολύ ακριβή και απαιτεί χρόνο. Η σταθερή πτέρυγα εφαρμόζεται σε αυτήν την έρευνα για τη διερεύνηση της ρύπανσης του νερού αναλύοντας την ερμηνεία εικόνων στη Νοτιοδυτική Κίνα. Επίσης στην Κίνα, το Σύστημα ανίχνευσης ποιότητας αέρα με βάση UAV Vision αναπτύχθηκε από τον Yuzhe Yang στο [Y. Yang, etal]. Ο εντοπισμός της διαρροής αερίου AQM με βάση τα UAV διερευνήθηκε από τον [M. Rossi, etal] όπου ανέπτυξαν ένα προσαρμοσμένο σύστημα ανίχνευσης αερίου (GSS) που βασίζεται σε MCU 32 bit με αποθήκευση δεδομένων, ασύρματη συνδεσιμότητα για ανάδραση σε πραγματικό χρόνο και ενσωματώνει ένα προσαρμοσμένο σύστημα αισθητήρα MOX (Μεταλλικό Οξείδιο). Αυτό το σύστημα τοποθετήθηκε σε εξάκοπτερο DJI, όπου πειράματα που έγιναν στο πανεπιστήμιο του Trento έδειξαν ότι η απόδοση αίσθησης δεν επηρεάστηκε από τη ροή του αέρα κατά τη διάρκεια της πτήσης. Οι Anatoli Danilov στο [A. Danilov, etal]. με Small UAVS εξοπλισμένο από την GSS αναπτύχθηκε για την κατασκευή τρισδιάστατων μοντέλων της ρύπανσης της ατμόσφαιρας. Αυτή η προσέγγιση εκτελείται σε δύο βήματα,

- στη σπείρα του Αρχιμήδη, ενώ η τροχιά της πτήσης στο δεύτερο στάδιο προτείνεται σε ελικοειδή τροχιά.

Η εφαρμογή σε UAV της παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα τονίζεται από τον Qijun Gu στο [Q. Gu etal].

Από την άλλη οι πολλαπλοί ατμοσφαιρικοί ρύποι, η ενεργειακή απόδοση και ο χρόνος πτήσης, ο συγχρονισμός αισθητήρων παρακολούθησης με δεδομένα GPS η ασφάλεια και οι περιορισμοί στην πόλη αποτελούν προκλήσεις που αντιμετωπίζει το προτεινόμενο σύστημα παρακολούθησης. Οι πειραματικές δοκιμές έχουν επαληθεύσει

την εφικτότητα και την ακρίβεια του συστήματος όπου, διαπίστωσαν ότι οι ενσωματωμένες συσκευές αισθητήρων δεν επηρέασαν σημαντικά την κατανάλωση ισχύος των UAV και τον χρόνο πτήσης. Ωστόσο, το UAV κατά τις πτητικές λειτουργίες παρήγαγαν σημαντικό θόρυβο στους αισθητήρες και στις μονάδες απόκτησης δεδομένων, που είχε ως αποτέλεσμα τη διακύμανση των μετρήσεων των αισθητήρων ειδικότερα στον αισθητήρα NO₂. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, προτείνουν ως λύση τη χρήση ξεχωριστής πηγής ισχύος για το UAV. Ένα άλλο παράδειγμα για το σχεδιασμό του συστήματος παρακολούθησης αέρα είναι σύστημα αισθητήρων αέρα που ελέγχει ένα συγκεκριμένο χώρο στο Κολοράντο, όπου επίγειοι αισθητήρες και δύο UAV εξοπλισμένα με αισθητήρα ταχύτητας ανέμου, θερμοκρασίας υγρασίας πίεσης προτείνονται από Ο Peter J. Nolan στο [P. Nolan, etal] . Τα συλλεχθέντα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό περιοχών (γνωστές και ως συνεκτικές Δομές Lagrangian ή LCS). Οι πειραματικές δοκιμές απέδειξαν την αποτελεσματικότητα της χρήσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο από UAV, για την πρόβλεψη ατμοσφαιρικών μοντέλων που μπορούν να βοηθήσουν στη λήψη αποφάσεων απόκρισης έκτακτης ανάγκης στο μέλλον. Επίσης, σύστημα βασισμένο σε μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα αναπτύχθηκε από τον McKinney στο [K. A. McKinney, etal] για τη μέτρηση των πτητικών οργανικών ενώσεων της ατμόσφαιρας. Ένα άλλο παράδειγμα χρήσης των UAV σε ατμοσφαιρικές εφαρμογές προτείνεται από τους Oscar Black και Jiannan Chen στο [O. Black, J. Chen, A. Scircle, Y. H. Zhou, and J. V. Cizdziel, “Adaption and use of a quadcopter for targeted sampling of gaseous mercury in the atmosphere.” Environmental science and pollution research international, vol. 25 13, pp. 13 195–13 202, 2018.]. όπου ο αέριος υδράργυρος στην ατμόσφαιρα παρακολουθείται με τη χρήση τετρακόπτερου.

Η παρακολούθηση AQM της ατμοσφαιρικής ρύπανσης βασισμένη σε UAV σε αγροτικές περιοχές διερευνήθηκε από τους Oscar Alvear και Carlos T. Calafate. Αρχικά μελετούν αυτό το ζήτημα στις [O. Alvear, etal] υιοθετώντας και αναπτύσσοντας μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα με αισθητήρες ρύπανσης, ως αυτόνομοι σταθμοί παρακολούθησης του αέρα, και στη συνέχεια παρουσιάζουν μια αρχιτεκτονική κινητής ανίχνευσης ικανή να παρακολουθεί διαφορετικούς ρύπους χρησιμοποιώντας αισθητήρες, επίσης μελετούν την βέλτιστη στρατηγική για τη χρήση κινητών αισθητήρων προσδιορίζοντας την επίδραση του προσανατολισμού των αισθητήρων στις τιμές που καταγράφονται και στη συνέχεια αναλύοντας την επίδραση

της δειγματοληψίας χρόνου και χώρου στη διαδικασία παρεμβολής. Στη συνέχεια, πρότειναν έναν αλγόριθμο με το όνομα Pollution-driven UAV Control PdUC που βασίζεται σε μια μεταερευνητική χημειοταξία και μια τοπική στρατηγική PSO βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων για αυτόματα παρακολούθηση και καθοδήγηση των UAV σε μια καθορισμένη περιοχή εστιάζοντας στις πιο μολυσμένες περιοχές. Η θέση όπου θα πρέπει να τοποθετηθούν οι αισθητήρες και η αποτελεσματικότητα και η απόδοση των αισθητήρων υπογραμμίζονται από τη Villa, στο [T. F. Villa, etal]. Όπου παρουσιάστηκε μια μεθοδολογία σχεδιασμού και κατευθυντήριες γραμμές για τον τρόπο ανάπτυξης ενός συστήματος UAV για τη μέτρηση των εκπομπών από πηγές ρύπων. Ξεκινώντας από την αξιολόγηση της ταχύτητας της ροής αέρα που προκαλείται από τους έλικες του χρησιμοποιούμενου εξακόπτερου στο οποίο προκαλούν ένα φαινόμενο διασποράς, προτάθηκε μια λύση με τη μετακίνηση των αισθητήρων μακρύτερα από το κέντρο των UAV μειώνοντας το φαινόμενο διασποράς. Επίσης, μετά από πειραματικές δοκιμές χρησιμοποιώντας μια πηγή ρύπανσης με κινητήρα turbo diesel, ο Villa κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το σύστημα UAV πρέπει να είναι μέσα στο πλούμιο ρύπων και όσο το δυνατόν πιο μακριά από το κέντρο UAV. Ο βέλτιστος σχεδιασμός τροχιάς για το σύστημα AQM που βασίζεται σε UAV διερευνάται από τον Pengyu Zhao στο [P. Zhao, etal]. Επίσης, η κάλυψη UAV και ο σχεδιασμός διαδρομής σε γεωμετρικά πολύπλοκα περιβάλλοντα διερευνάται από τον Rui Dai στο [etal] Οι δύο εφαρμογές έχουν αποδειχθεί μέσω πειράματος, όπου εγγυάται καλύτερη απόδοση ακριβείας AQI με βέλτιστη κατανάλωση ενέργειας.

Σμήνη drone χρησιμοποιούνται από την Bolla στο [etal.] για την παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. (έργο ARIA.) Λόγω των απροσδόκητων αλλαγών της ατμοσφαιρικής ρύπανσης ορίζοντια και κάθετα, το σμήνος των UAV έχει επιδείξει μεγάλη αποτελεσματικότητα αντί του Ασύρματου Δικτύου Αισθητηρίων.

Προκειμένου να διαμορφωθούν χάρτες ποιότητας αέρα (AQI) χρησιμοποιώντας σύστημα ανίχνευσης UAV, ο Yuzhe Yang στο [Y. Yang, etal] προτείνει ένα μοντέλο διασποράς, συγκεκριμένα το Adaptive Gaussian Plume Model (AGPM) για την πρόβλεψη της κατανομής του AQI και στο [Y. Yang, etal.] το μοντέλο AQI τροποποιείται με βάση νευρωνικό δίκτυο (GPM-NN) και προτείνεται ένας αλγόριθμος παρακολούθησης για την ενημέρωση σε πραγματικό χρόνο των χαρτών AQI. Σύμφωνα με τα πειραματικά τους αποτελέσματα, το GPM-NN δίνει μεγαλύτερη ακρίβεια και ο αλγόριθμος παρακολούθησης δημιουργεί την τροχιά ενώ παράλληλα καταναλώνει λίγη

ενέργεια της μπαταρίας UAV. Στο [Y. Yang, etal], ένα μοντέλο ημι-εποπτευόμενης μάθησης (ESSL) με βάση την εντροπία προτείνεται για την εκτίμηση με υψηλή ακρίβεια της κατανομής AQI, παρέχοντας υψηλότερη ακρίβεια εκτίμησης με βάση ένα λεπτομερές σύνολο δεδομένων παρακολούθησης AQI. Αυτό το μοντέλο αποδίδει καλύτερα από άλλες μεθόδους μάθησης. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος ελαχιστοποίησης εντροπίας (EMR) για τη σύσταση ενός τέτοιου συνόλου θέσεων για ανάπτυξη αισθητήρων, για να επιτευχθεί καλύτερη ακρίβεια εκτίμησης από τις υπάρχουσες προσεγγίσεις. Μια βάση UAV και ένα δίκτυο ασύρματων αισθητήρων συνδυάζονται στο [Y. Yang, etal] για την υλοποίηση υβριδικού συστήματος παρακολούθησης. Αυτό το σύστημα ονομάζεται AQNet, όπου περιέχει 200 αισθητήρες PM 2,5 σε ένα σύστημα ασύρματου δικτύου (WSN) για παρακολούθηση 2D και ένα UAV με τον ίδιο αισθητήρα για τη διαμόρφωση της ποιότητας του αέρα σε διαφορετικά υψόμετρα. Ένας κεντρικός διακομιστής για τη χρησιμοποιείται για τη λήψη και καταγραφή σε πραγματικό χρόνο των δεδομένων PM 2.5. Τα δεδομένα που συλλέγονται χρησιμοποιούνται από το μοντέλο εκμάθησης που αναπτύχθηκε για την εκτίμηση του PM 2,5 σε μη μετρημένες τοποθεσίες και την πρόγνωση της κατανομής της ποιότητας του αέρα. Επίσης, χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας παρακολούθησης του UAV. Ένα άλλο απλούστερο παράδειγμα για το προφίλ ατμοσφαιρικής ρύπανσης με βάση UAV προτείνεται από τον Qijun Gu στο [Q. Gu, etal].

Όπου, περιλαμβάνει πέντε μονάδες:

- UAV εξακοπτέρο DJI F550,
- πλακέτα NanoPI Neo Air
- μονάδα λήψης δεδομένων,
- αισθητήρες ρύπων PM και NO₂,
- επίγειο σταθμό.

όπου ο έλεγχος πτήσης και η λήψη δεδομένων είναι με λογισμικό ανοιχτού κώδικα. Το σύστημα συλλέγει ταυτόχρονα δεδομένα X-Y-Z για την ποιότητα του αέρα και τα οπτικοποιεί σε πραγματικό χρόνο.

Ένα σύστημα ανίχνευσης 3D ποιότητας αέρα που βασίζεται στο IoT αναπτύχθηκε από τον Zhiwen Hu [Z. Hu, etal]. Η αρχιτεκτονική του προτεινόμενου συστήματος ανίχνευσης εναέριου χώρου αποτελείται από τέσσερα στάδια:

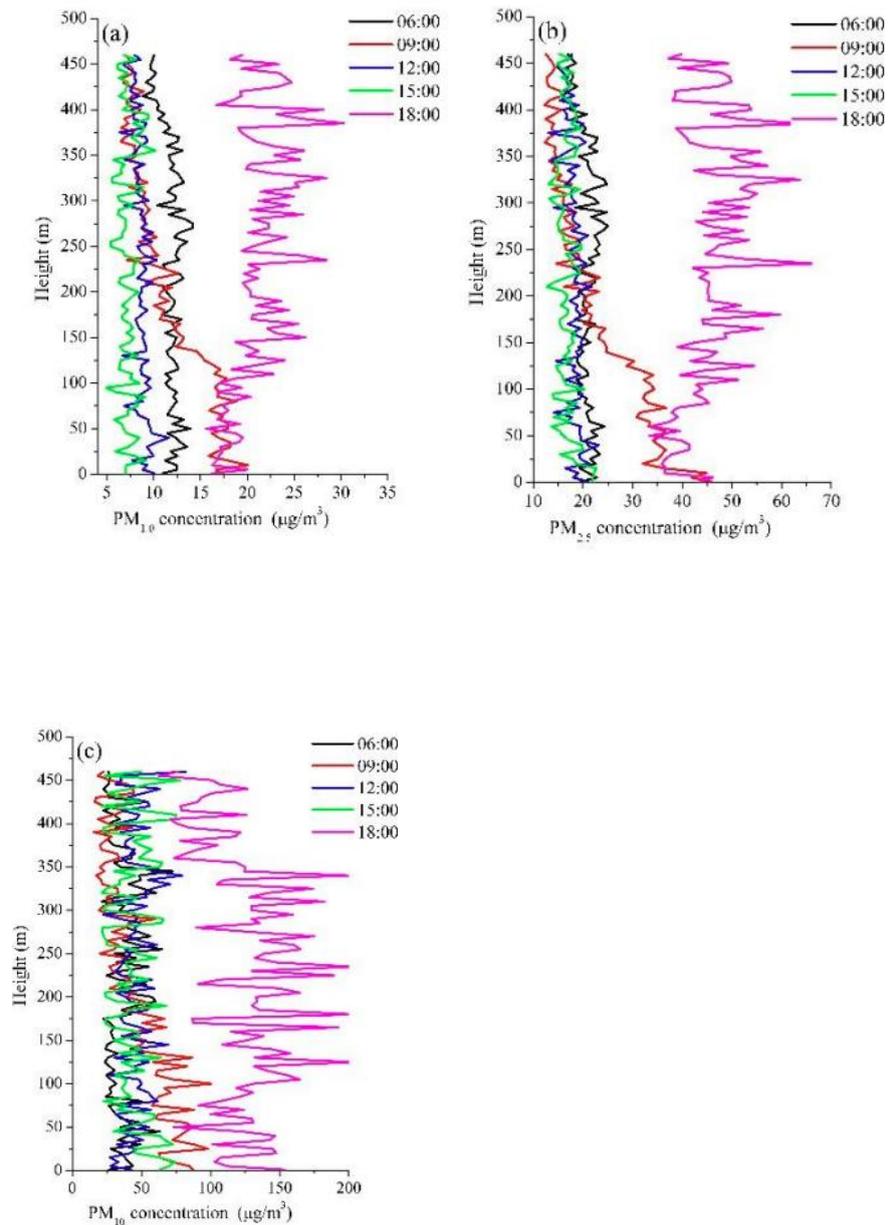
- ανίχνευση και συλλογή δεδομένων,
- μετάδοση για τη δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας,
- επεξεργασία και
- γραφική διεπαφή.

Η επεξεργασία δεδομένων, η στρατηγική ανάπτυξης και ο έλεγχος ισχύος είναι κύριες τεχνικές που διερευνώνται σε αυτήν την εργασία. Όπου επιτυγχάνεται χωρική προσαρμογή και πρόβλεψη για την εξάλειψη των επιρροών της ατελούς μέτρησης. Ένα έξυπνο σύστημα παρακολούθησης αναπτύχθηκε από τον M. Carozzo στο [M. Carozzo, Setal] [M. Carozzo, etal.] για αυτοσχέδιες αξιολογήσεις ποιότητας αέρα. Ο αισθητήρας συνδέθηκε με smartphone χρησιμοποιώντας την εφαρμογή MONICADAndroid c, για παροχή γεωγραφικού εντοπισμού και συνδεσιμότητας μέσω δικτύων 4G. Το προτεινόμενο σύστημα επαληθεύτηκε με πειραματικές δοκιμές. μέτρηση ενός νέφους ρύπων που προκαλούνται με μια ελεγχόμενη πυρκαγιά από θαμνούς Τέλος, η πιο ολοκληρωμένη ανάλυση συστήματος, και αρχιτεκτονικής για συστήματα παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους που βασίζονται σε IoT διερευνήθηκε από τον Zeba Idrees στο [Z. Idrees, etal].

Το AQM που βασίζεται σε UAV δοκιμάστηκε επίσης και εφαρμόστηκε σε πραγματικό πεδίο από τον Khalid Al Hajjaji στο [K. Al-Hajjaji, etal], όπου σχεδίασε ένα σύστημα UAV για την αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα στο Κατάρ. Τα αποτελέσματα του πειράματος έχουν αποδείξει την αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου συστήματος. Η μελέτη περίπτωσης του νέφους ρύπανσης που προκαλείται από την κυκλοφορία γύρω από μια γέφυρα ποταμού στο Ντίσελντορφ διερευνήθηκε από τον Konradin Weber στο [K. Weber, etal], όπου χρησιμοποιήθηκε ένα UAV οκτακόπτερο για τον προσδιορισμό των ατμοσφαιρικών ρύπων. Άλλες μελέτες περιπτώσεων ανιχνευτής ρύπων που βασίζεται σε UAV διερευνήθηκαν από τον Shudao Zhou στο [S. Zhou, etal], από τον Mostafa Rizk στο [M. Rizk, etal], από τους Liu, Siwen στο [S. Liu, “etal] και από τον Levi Golston στο [L. Golston, etal]. Όλες οι μελέτες περιπτώσεων έχουν αποδείξει την αποτελεσματικότητα της χρήσης UAV στο AQM. Λόγω της κινητικότητάς τους στον τρισδιάστατο χώρο και των χαμηλού κόστους τα UAV έχουν καλύψει ένα κενό στο σύγχρονο κινητό ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Οι εφαρμογές και οι ερευνητικές εργασίες σε αυτό το θέμα έχουν αυξάνονται τα τελευταία χρόνια.

Από την άλλη κατεύθυνση η εφαρμογή μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV) Atmosphere 2020, 11, 980; doi:10.3390/atmos11090980Article Unmanned Aerial Vehicle Observations of the Vertical Distribution of Particulate Matter in the Surface Layer of the Taklimakan Desert in China Lili Jin 1,2, Qing He 1,*, Hong Jiang 3, Junan Xiao 3, Quanwei Zhao 1, Sasa Zhou 1, Zhenjie Li 4 and Jiawei Zhao 1 1 Taklimakan μπορεί να καλύψει αποτελεσματικά την έλλειψη ακρίβειας των δεδομένων της δορυφορικής παρατήρησης και να δοκιμάσει περαιτέρω τα αποτελέσματα τους. Τα drones είναι επίσης χρήσιμα για την παρατήρηση συγκεκριμένων καιρικών συνθηκών, όπως η ομίχλη, το χαλάζι και η σκόνη. Τα χαρακτηριστικά κατακόρυφης δομής των συγκεντρώσεων των PM_{1.0}, PM_{2.5} και PM₁₀ συλλέχθηκαν τον Νοέμβριο του 2019 από παρατηρήσεις UAV. Τα συμπεράσματα αυτής της μελέτης δείχνουν: (1) Τα εύρη διακύμανσης των PM_{1.0}, PM_{2.5} και PM₁₀ ήταν 0,8–91,1, 1,0–200,7 και 1,0–763,7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια της παρατήρησης. Οι συγκεντρώσεις PM στο κέντρο ήταν υψηλότερες από των προαστίων. (2) Τα λεπτά σωματίδια κυριαρχούσαν στη σύνθεση PM του οριακού στρώματος (3) Οι συγκεντρώσεις κατακόρυφου προφίλ PM επηρεάστηκαν σημαντικά από το ύψος του οριακού στρώματος και τους θεωρούμενους μετεωρολογικούς παράγοντες. Όταν το ύψος του οριακού στρώματος ήταν υψηλότερο στις 12:00 LST (τοπική τυπική ώρα) και στις 15:00, η συγκέντρωση PM ήταν η χαμηλότερη. Επιπλέον, στις 12:00 και στις 15:00, στο PM κυριαρχούσαν χαμηλές συγκεντρώσεις ($\leq 20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), ενώ στις 18:00 κυριαρχούσαν υψηλές συγκεντρώσεις ($> 35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). Όταν το ύψος του οριακού στρώματος ήταν χαμηλότερο στις 06:00 και στις 09:00, οι τιμές των PM_{1.0}/PM_{2.5} και PM_{2.5}/PM₁₀ ήταν μεγαλύτερες. (4) Οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις PM ($\leq 20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) απαιτούσαν θερμοκρασία αέρα 8–16 °C και σχετική υγρασία < 30%. Υψηλότερες συγκεντρώσεις PM ($> 35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) απαιτούσαν θερμοκρασία αέρα 12–16 °C και σχετική υγρασία 10–30%.

Στις πιο κάτω εικόνες φαίνεται η ωριαία κατανομή ρύπων στις 4 ημέρες παρατήρησης :



Εικόνα 11 Μετρήσεις UAV στην Κίνα (Lili et al 2020)

Ένα επιπλέον θεωρητικό κενό είναι η κατανόηση των μοτίβων κατακόρυφης κατανομής της ατμοσφαιρικής ρύπανσης ως ζωτικής σημασίας για την αποσαφήνιση του μηχανισμού σχηματισμού ακραίων γεγονότων ατμοσφαιρικής ρύπανσης για να διερευνήσουμε τους κινδύνους έκθεσης των κατοίκων στην ατμοσφαιρική ρύπανση. Yuanman Hu et al Οι συγκεντρώσεις (SO_2 , NO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ και PM_{10}) κατά μήκος μιας ζώνης δειγματοληψίας δυτικής ανατολής ύψους 0–120 m ήταν διερευνήθηκε με

χρήση ενός μη επανδρωμένου εναέριου οχήματος (UAV) εξοπλισμένο με κινητούς αισθητήρες σε 4 ημέρες. **Τα πρότυπα κατακόρυφης κατανομής διερευνήθηκαν με συνήθη παλινδρόμηση ελαχίστων τετραγώνων και συσχέτιση συντελεστή Pearson.** Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η συγκέντρωση των σωματιδίων μειώθηκε σταδιακά από δυτικά προς τα ανατολικά (S1 έως S8) στις Ημέρες παρακολούθησης 2 και 3. Οι αθροιστικές επιδράσεις του εδάφους των σωματιδίων της ατμόσφαιρας (PM1, PM2.5, PM10) ήταν σημαντικά υψηλότερες από αυτές των αέριων ρύπων (SO₂, NO₂). Η κάθετη παραλλαγή σε εύρος ρύπων από μεγάλο έως μικρό ήταν PM10 ($k = 0,18$), PM2,5 ($k = 0,16$), PM1 ($k = 0,07$), NO₂ ($k = 0,06$) και SO₂ ($k = 0,01$). Τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας τείνουν να αλλάζουν σημαντικά με το κατακόρυφο ύψος, και η συγκέντρωση μειώνεται σταδιακά με την αύξηση του ύψους. Η προτεινόμενη παρακολούθηση κλίσης με βάση τα UAV και η μέθοδος ανάλυσης της τάσης της κάθετης αλλαγής ρύπων θα μπορούσαν να προωθήσουν τις έρευνες για την αστική ατμοσφαιρική ρύπανση και την αστική βιώσιμη ανάπτυξη. (Guan et al., 2022; Wang et al., 2019).

Οι κάθετες μετρήσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων εντός και πάνω από το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα έχουν πραγματοποιηθεί με διάφορες προσεγγίσεις, όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία, όπως πύργοι, lidar, δεμένα μπαλόνια και μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV) (Huige, Siwen, Yun, Dengxin & jianyu, 2021; Lei et al., 2021; Li et al., 2018b; Xin et al., 2021). Σε σύγκριση με το άλλες πλατφόρμες, τα ελαφριά UAV με μικροσκοπικούς αισθητήρες έχουν μεγαλύτερη ευελιξία και λειτουργικότητα και έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία σε διερευνήση πιθανής εφαρμογής τους στην παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα (Li et al., 2017). Villa, Jayaratne, Gonzalez and Morawska (2017) ποσοτικά αξιολόγησε το κατακόρυφο προφίλ του αριθμού σωματιδίων που σχετίζεται με την κυκλοφορία) με χρήση UAV και έδειξε ότι το PNC μειώθηκε απότομα από 20.000 p/m³ σε 4000 p/m³ καθώς το ύψος αυξήθηκε από το έδαφος στα 40 m. Xin et al. (2021) διερευνήσε το μοτίβο κατακόρυφης κατανομής του PM_{2,5} πάνω σε 3 τύπους αστικών επιφανειών κοντά στο έδαφος με UAV και έδειξε ότι η υψηλότερη καμπή συγκέντρωσης PM_{2,5} πάνω από υδάτινη επιφάνεια (23,7 m) και είναι υψηλότερο από τον χώρο πρασίνου (14,3 m) (Xin et al., 2021). Οι Liu et al. (2020) πραγματοποίησε **46 πτήσεις** για να διερευνήσει την κατακόρυφο προφίλ PM_{2,5} και μαύρου άνθρακα από την επιφάνεια έως τα 500 μέτρα ύψος σε μια πόλη και διαπίστωσε ότι οι συγκεντρώσεις ρύπων μειώθηκαν με αυξανόμενο ύψος (Liu et al.,

2020). Ωστόσο, οι περισσότερες μελέτες για κάθετη παρακολούθηση έχουν επικεντρωθεί σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία παρακολούθησης για ανάλυση σε αλλαγές στις συγκεντρώσεις ρύπων με το ύψος, αλλά πολύ λίγες έρευνες έχουν παρακολουθήσει και εξηγήσει την ποικιλομορφία της κάθετης διακύμανσης σε διάφορες τοποθεσίες της πόλης. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα ενός χώρου παρακολούθησης δεν μπορεί να αποκαλύψει το μοτίβο κλίσης σε αστική κατακόρυφη συγκεντρωση ρύπων. Συνοπτικά, η ποικιλομορφία των χαρακτηριστικών κατακόρυφης κατανομής του αστικών ατμοσφαιρικών ρύπων σε διαφορετικές τοποθεσίες δεν είναι επαρκώς επαληθευμένη. Υπάρχει έλλειψη συστηματικών μεθόδων παρακολούθησης και ολοκληρωμένη ανάλυση του σχεδίου κατακόρυφης κατανομής της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε αστική περιοχή. Εδώ το UAV εξοπλισμένο με κινητό χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες για τη διερεύνηση των συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικών ρύπων από 0 m έως 120 m κατά μήκος μιας ζώνης κλίσης δειγματοληψίας δυτικά-ανατολικά στην οικιστική περιοχή του Shenyang σε 4 ημέρες παρακολούθησης. Τα κατακόρυφα προφίλ 5 ατμοσφαιρικών ρύπων (SO₂, NO₂, PM₁, PM_{2.5} και PM₁₀) εντοπίστηκαν για την αξιολόγηση της κατακόρυφης τάσεις διαφοροποίησης διαφορετικών τοποθεσιών. Μέσα από αυτή τη μελέτη αναμένεται ότι η προτεινόμενη προσέγγιση παρακολούθησης κλίσης με βάση UAV και κάθετη Η μέθοδος ανάλυσης τάσης αλλαγής ρύπων θα μπορούσε να παρέχει επιστημονική αναφορά για τις έρευνες του σχεδίου κατακόρυφης κατανομής του αστικού αέρα ρύπανσης και περαιτέρω προώθηση της βελτίωσης της αστικής ατμόσφαιρας περιβάλλοντος και αστικής βιώσιμης ανάπτυξης.

Η διακύμανση συγκέντρωσης είναι $SC_{ij} = C_{ij} \times U_{ij} / SU_{ij}$ όπου SC_{ij} είναι η τυπική συγκέντρωση του ρύπου i την Ημέρα j . C_{ij} είναι η συγκέντρωση που μετρήθηκε από κινητούς αισθητήρες του ρύπου i την Ημέρα j . Το U_{ij} είναι η συγκέντρωση που μετρήθηκε από τον αστικό σταθμό ποιότητας αέρα του ρύπου i την Ημέρα j ; και SU_{ij} είναι η συγκέντρωση που μετράται στις 12 το μεσημέρι του ρύπου i στην Ημέρα j . Δεδομένου ότι ο εθνικός αστικός σταθμός ποιότητας του αέρα δεν παρακολουθούσε τα PM₁, το U_{ij} και SU_{ij} του PM_{2,5} χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του τυπικού PM₁. Στη συνέχεια, τα τυπικά δεδομένα κάθε τοποθεσίας υποβλήθηκαν σε προεπεξεργασία λόγω σφάλματος. Οι μη συμβατές τιμές μεγαλύτερες από το τριπλάσιο της τυπικής απόκλισης των υπολειμμάτων αφαιρέθηκε στο στάδιο της προεπεξεργασίας. Τα έγκυρα δεδομένα στρωματοποιήθηκαν κάθε 2 m και στη

συνέχεια ο μέσος ατμοσφαιρικός ρύπος υπολογίστηκε για κάθε ύψος 2 m. Η συνήθης παλινδρόμηση ελαχίστων τετραγώνων χρησιμοποιείται ευρέως στην ανάλυση τάσεων (Guo et al., 2017; Li et al., 2018a). Η κάθετη τάση διακύμανσης πέντε συγκεντρώσεων ρύπων με ύψος σε κάθε τοποθεσία διερευνήθηκε με τη συνήθη μέθοδο παλινδρόμησης ελαχίστων τετραγώνων,

$y = kH + b + \varepsilon$, $k = \frac{\sum_1^6 (H_i - \bar{H})(y_i - \bar{y})}{\sum_1^6 (H_i - \bar{H})^2}$ όπου H ύψος και y συγκέντρωση. Στην συνέχεια γίνεται ανάλυση ευαισθησίας συσχέτισης συγκέντρωσης και ύψους Pearson.

Από την έρευνα της βιβλιογραφίας δεν προέκυψε συσχέτιση περισσότερων της μιας μεταβλητών όπως αυτή που επιχειρήθηκε στην δική μας εργασία

2 ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΛΥΣΗ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ

2.1.ΕΞΙΣΩΣΗ ΔΙΑΧΥΣΗΣ-ΔΙΑΧΥΣΗ ΚΑΙ RANDOM WALK

Ορίζοντας τις κατάλληλες φυσικές ποσότητες,

τ ο μέσος χρόνος που περνά για ένα μόριο πριν συγκρουστεί με άλλο

$N = \frac{t}{\tau}$ αριθμός των συγκρούσεων σε ένα χρόνο t

$l = \bar{u}\tau$ μέση ελεύθερη διαδρομή μεταξύ συγκρούσεων

\bar{u} η μέση μοριακή ταχύτητα, $\bar{u} =$

$\langle |u| \rangle$, και ρίζα μέσης τετραγωνικής τιμής $u_{rms} = \sqrt{\langle u^2 \rangle}$

n, ρ πυκνότητα μορίων και πυκνότητα μάζας

$l = \frac{1}{n\sigma}$ με σ standart deviation που προκύπτει ξεκινώντας από την διωνυμική κατανομή

και λαμβάνοντας την διάχυση ως τυχαίο περίπατο με κρούσεις έχουμε:

Εστω $P(x)$ η πιθανότητα κατανομής της θέσης ενός μορίου μετά από χρόνο t . Η rms μετατόπιση είναι

$$x_{rms} = \sqrt{N}l = \sqrt{\frac{t}{\tau}}l = \sqrt{l\bar{u}t} \quad 2.1$$

Η συνάρτηση πιθανότητας είναι

$$P(x,t) = \sqrt{\frac{1}{2\pi l\bar{u}t}} \exp\left(-\frac{x^2}{2l\bar{u}t}\right) \quad 2.2$$

Η οποία ικανοποιεί την διαφορική εξίσωση ,

$$\frac{\partial P(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 P(x,t)}{\partial x^2} \quad 2.3$$

$$\text{Όπου } D = \frac{1}{2}l\bar{u}$$

Επειδή το N είναι της τάξης των 10^{24} ισχύει

$$n_x(x,t) = NP(x,t) \quad 2.4$$

Οπότε προκύπτει η εξίσωση διάχυσης,

$$\frac{\partial n_x(x,t)}{\partial t} = D\nabla^2 n_x(x,t) \quad 2.5$$

Όπου

$$D = \frac{1}{2}l\bar{u} = \frac{1}{2}\frac{l^2}{\tau} \text{ η εξίσωση Einstein-Smoluchwsky}$$

Εάν προσεγγίσουμε τη διάχυση με την τεχνική του συνεχούς μέσου τότε,

$$\frac{d}{dt} \int_{x_1}^{x_2} dx n(x, t) = n(x_1, t) u_x(x_1, t) - n(x_2, t) u_x(x_2, t) = - \int_{x_1}^{x_2} dx \partial_x (n(x, t) u_x(x, t)), \quad 2.6$$

Απ' όπου προκύπτει η εξίσωση συνέχειας,

$$\frac{\partial n(x, t)}{\partial t} = -\partial_x n_x(x, t) u_x(x, t) \rightarrow \frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \mathbf{J} = 0 \quad 2.7$$

Επομένως με σταθερή πυκνότητα η ροή είναι ανάλογη της συγκέντρωσης θα έχουμε τον 1^ο νόμο του Fick,

$$\mathbf{J} = -D \nabla \mathbf{n} \quad 2.8$$

Εάν αντικαταστήσουμε την εξίσωση συνέχειας στον 1^ο νόμο παίρνουμε τον 2^ο νόμο του Fick

$$\frac{\partial n_x(x, t)}{\partial t} = D \nabla^2 n_x(x, t) \quad 2.9$$

Η μεταφορά συμβαίνει όταν το σύστημα δεν βρίσκεται σε ισορροπία μπορεί να υπάρχουν συνεκτικά ρεύματα μεταφοράς, όπως άνεμος, που κινούν πολύ πιο γρήγορα τα χημικά είδη από ό, τι ο τυχαίος περίπατος. Εάν υπάρχει κάποια εξωτερική επίδραση που προκαλεί τη ροή του μέσου με ταχύτητα $u(x, t)$ τότε η συναγωγική ροή είναι $J_{conv} = u_{conv}(x, t) n(x, t)$ Και η γενικευμένη εξίσωση διάχυσης γίνεται,

$$\frac{\partial n_x(x, t)}{\partial t} = D \nabla^2 n_x(x, t) + u_{conv}(x, t) n(x, t) \quad 2.10$$

2.2 . ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΛΥΣΗ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΜΕ ΜΕΘΟΛΟ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ Green

A. ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΕΣ ΛΥΣΕΙΣ

Υπό την υπόθεση ασυμπίεστης ροής ($S = 0$), σταθερή κατάσταση, η κατακόρυφη ταχύτητα είναι μικρότερη από την οριζόντια και ο άξονας προς την κατεύθυνση του μέσου ανέμου ($w = v = 0$) έχει γίνει:

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad 2.11$$

$$\text{Με } \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \text{ } z = 0, H, C(x, y, z) = 0, x, y, z \rightarrow \infty$$

Λαμβάνοντας την ταχύτητα του ανέμου και τη διάχυση των δινών στους νόμους ισχύει ,

$$u = \alpha z^p, z \neq 0 \text{ και } u = u_0, z = 0, k_x = \chi u, k_y = \frac{\beta}{\alpha} \chi u, k_z = \gamma \chi z^{n-1} a$$

όπου α, η και p είναι σταθερές που εξαρτώνται από τη σταθερότητα, τα β και γ είναι οι τυρβώδεις εντάσεις.

Αντικαθιστώντας στην (2.11), παίρνουμε:

$$\alpha z^p \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \beta z^p \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \gamma \eta z^{n-1} \frac{\partial C}{\partial z} + \gamma z^n \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} = 0 \quad 2.12$$

Η εξίσωση (2.12) αντιπροσώπευει μια μερική διαφορική εξίσωση σε τρεις διαστάσεις, τότε μπορούμε να την λύσουμε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο συνάρτησης του Green ως εξής:

Εάν το L είναι διαφορικός τελεστής, τότε,

$$LG = \delta(x - x_0) \delta(z - z_0) \quad 2.13$$

όπου δ είναι η συνάρτηση δέλτα και G είναι η συνάρτηση Green που ορίζεται ως

$$G = G_z \otimes G_y \quad 2.14$$

όπου G_z, G_y είναι οι συναρτήσεις sub-Green κατακόρυφου και πλευρικού ανέμου αντίστοιχα. Τότε η εξίσωση (2.12) έχει τη μορφή:

$$\alpha z_0^p \frac{\partial^2 G_z}{\partial x_0^2} + \gamma n z_0^{n-1} \frac{\partial G_z}{\partial z_0} + \gamma z_0^n \frac{\partial^2 G_z}{\partial z_0^2} = \delta(x_0 - x) \delta(z_0 - z)$$

υπό την συνθήκη

$$\lim_{x_0 \rightarrow x} \alpha z_0^p G_z(x_0 z_0, x, z) = \delta(z_0 - z) \quad \text{έχουμε}$$

$$\alpha z_0^p \frac{\partial^2 G_y}{\partial x_0^2} + \beta z_0^p \frac{\partial^2 G_y}{\partial y_0^2} = \delta(x_0 - x) \delta(y_0 - y) \quad 2.15$$

$$\lim_{x_0 \rightarrow x} G_y(x_0 y_0, x, y) = \delta(y_0 - y)$$

η ομογενής εξίσωση από την Εξ. (2.15) είναι:

$$\alpha z_0^p \frac{\partial^2 G_z}{\partial x_0^2} + \gamma n z_0^{n-1} \frac{\partial G_z}{\partial z_0} + \gamma z_0^n \frac{\partial^2 G_z}{\partial z_0^2} = 0 \quad 2.16$$

με διαίρεση z_0^p

$$\alpha \frac{\partial^2 G_z}{\partial x_0^2} + \gamma n z_0^{n-p-1} \frac{\partial G_z}{\partial z_0} + \gamma z_0^{n-p} \frac{\partial^2 G_z}{\partial z_0^2} = 0 \quad 2.17$$

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο διαχωρισμού μεταβλητών,

$$G_z = M(z_0)N(x_0)$$

με αντικατάσταση στην Εξ. (2.17), λαμβάνουμε:

$$\frac{d^2 M}{dz_0^2} - \frac{\lambda^2}{\alpha} N = 0 \quad 2.18$$

όπου λ^2 είναι η παράμετρος διαχωρισμού και

$$\frac{d^2 M}{dz_0^2} + \frac{n}{z_0} \frac{dM}{dz_0} + \frac{\lambda^2}{\gamma} z_0^{n-p} M = 0 \quad 2.19$$

Η εξίσωση (2.19) μπορεί να μετατραπεί σε εξίσωση του Bessel βάζοντας:

$$M(z_0) = z_0^{\frac{1-n}{2}} m(z_0)$$

$$\frac{dM}{dz_0} = \frac{1-n}{2} z_0^{\frac{1-n}{2}-1} m + z_0^{\frac{1-n}{2}} \frac{dm}{dz}$$

$$\frac{d^2 M}{dz_0^2} = z_0^{\frac{1-n}{2}} \frac{d^2 m}{dz_0^2} + (1-n) z_0^{\frac{1-n}{2}-1} \frac{dm}{dz_0} - \frac{(1-n)^2}{4} z_0^{\frac{1-n}{2}-2} m$$

τότε αντικαθιστώντας στην Εξ.(2.19) παίρνουμε:

$$\frac{d^2m}{dz_0^2} + \frac{1}{z_0} \frac{dm}{dz_0} + m \left(\frac{\lambda^2}{\gamma} z_0^{p-n} - \frac{(1-n)^2}{4} z_0^{-2} \right) = 0 \quad 2.20$$

Πολλαπλασιάζοντας σε z_0^2 , λαμβάνουμε:

$$z_0^2 \frac{d^2m}{dz_0^2} + z_0 \frac{dm}{dz_0} + m \left(\frac{\lambda^2}{\gamma} z_0^{p-n+2} - \frac{(1-n)^2}{4} \right) = 0 \quad 2.21$$

Εάν

$$t = z_0^{\frac{p-n+2}{2}}$$

Στην εξ. (2.21) και χρησιμοποιώντας τον κανόνα της αλυσίδας, ανάγεται σε εξίσωση Bessel,

$$t^2 \frac{d^2m}{dz_0^2} + t \frac{dm}{dz_0} + m \left(\frac{\lambda^2 t^2 - \frac{(1-n)^2}{4}}{\left(\frac{p-n+2}{2}\right)^2} \right) = 0 \quad 2.22$$

που έχει λύση της μορφής:

$$m(t) = c_1 J_\mu(\omega t) + c_2 J_{-\mu}(\omega t) \quad 2.23$$

όπου c_1, c_2 είναι σταθερές που λαμβάνονται από συνοριακές συνθήκες (2.2) και (2.3), όπου

$$\mu = \frac{1-n}{p-n+2}, \omega = \frac{2\lambda}{\sqrt{\gamma}(p-n+2)}$$

από την εξ. (2.23) :

$$M(z_0) = z_0^{\frac{1-n}{2}} \left(c_1 J_\mu \left(\omega z_0^{\frac{p-n+2}{2}} \right) + c_2 J_{-\mu} \left(\omega z_0^{\frac{p-n+2}{2}} \right) \right) \quad 2.24$$

Η εξίσωση (2.22) είναι μια δεύτερη συνηθισμένη διαφορική εξίσωση με σταθερούς συντελεστές που έχει τη λύση με τη μορφή:

$$N(\chi_0) = c_3 e^{\frac{\lambda}{\sqrt{\alpha}} \chi_0} + c_4 e^{-\frac{\lambda}{\sqrt{\alpha}} \chi_0}$$

από οριακή συνθήκη, $N(x_0) = 0$ στο $x_0 \rightarrow \infty \Rightarrow C_3 = 0$, έτσι ώστε

$$N(\chi_0) = c_4 e^{-\frac{\lambda}{\sqrt{\alpha}} \chi_0} \quad 2.25$$

από οριακή συνθήκη βρίσκουμε στο $x = x_0, N(x_0) = 1$, έτσι ώστε:

$$N(\chi_0) = c_4 e^{-\frac{\lambda}{\sqrt{a}}(x_0-x)} \quad 2.26$$

από την , $\lambda = \frac{\sqrt{\gamma}(p-n+2)\omega}{2}$, οπότε η εξίσωση (2.26) παίρνει τη μορφή:

$$N(\chi_0) = c_4 e^{-\frac{\sqrt{\gamma}(p-n+2)\omega}{2}(x_0-x)}$$

Και η λύση γίνεται

$$G_z = z_0^{\frac{1-n}{2}} \left(c_1 J_\mu \left(\omega z_0^{\frac{p-n+2}{2}} \right) + c_2 J_{-\mu} \left(\omega z_0^{\frac{p-n+2}{2}} \right) \right) e^{-\frac{\sqrt{\gamma}(p-n+2)\omega}{2}(x_0-x)}$$

2.27

με διαφορίση w. r. έως z_0 , παίρνοντας:

$$\begin{aligned} \frac{\partial G_z}{\partial z_0} &= \frac{1-n}{2} z_0^{\frac{1-n}{2}-1} \left(c_1 J_\mu \left(\omega z_0^{\frac{p-n+2}{2}} \right) + \right. \\ &c_2 J_{-\mu} \left(\omega z_0^{\frac{p-n+2}{2}} \right) \left. \right) + \frac{\omega(p-n+2)}{2} z_0^{\frac{1-n}{2}+\frac{p-n+2}{2}-1} \left(c_1 J'_\mu \left(\omega z_0^{\frac{p-n+2}{2}} \right) + \right. \\ &c_2 J'_{-\mu} \left(\omega z_0^{\frac{p-n+2}{2}} \right) \left. \right) e^{-\frac{\sqrt{\gamma}(p-n+2)\omega}{2}(x_0-x)} \end{aligned}$$

Από οριακή συνθήκη , $\frac{\partial G_z}{\partial z_0} = 0$ στο $z_0 = 0$ με αντικατάσταση σε Εξ. (2.27), λαμβάνουμε

$c_1 = 0$, μετά την εξίσωση. (2.19) γίνεται:

$$\begin{aligned} \frac{\partial G_z}{\partial z_0} &= c_2 z_0^{\frac{1-n}{2}-1} \left[\frac{1-n}{2} c_2 J_{-\mu} \left(\omega z_0^{\frac{p-n+2}{2}} \right) + \right. \\ &\left. \frac{\omega(p-n+2)}{2} z_0^{\frac{p-n+2}{2}} J'_{-\mu} \left(\omega z_0^{\frac{p-n+2}{2}} \right) \right] e^{-\frac{\sqrt{\gamma}(p-n+2)\omega}{2}(x_0-x)} \quad 2.28 \end{aligned}$$

από την οριακή συνθήκη $\frac{\partial G_z}{\partial z_0} = 0$, $z = H$ παίρνοντας:

$$\frac{1-n}{2} H^{\frac{1-n}{2}-1} J_{-\mu} \left(\omega H^{\frac{p-n+2}{2}} \right) + H^{\frac{1-n}{2}} \frac{\omega(p-n+2)}{2} H^{\frac{p-n+2}{2}-1} J'_{-\mu} \left(\omega H^{\frac{p-n+2}{2}} \right) = 0 \quad 2.29$$

με διαίρεση $H^{\frac{1-n}{2}-1} \frac{(p-n+2)}{2}$ εχουμε,

$$\frac{1-n}{p-n+2} J_{-\mu} \left(\omega H^{\frac{p-n+2}{2}} \right) + \omega H^{\frac{p-n+2}{2}} J'_{-\mu} \left(\omega H^{\frac{p-n+2}{2}} \right) = 0 \quad 2.30$$

αλλά από Arfken ,

$$\tau J_{\nu+1}(\tau) = \nu J_{\nu}(\tau) - \tau J'_{\nu}(\tau)$$

Τότε

$$-\omega H^{\frac{p-n+2}{2}} J_{-\mu+1} \left(\omega H^{\frac{p-n+2}{2}} \right) = 0 \rightarrow J_{-\mu+1} \left(\omega H^{\frac{p-n+2}{2}} \right) = 0 \quad 2.31$$

Η γενική λύση του $G_z(x_0, z_0)$ της Εξ. (2.27) μπορεί να επεκταθεί ως Σειρά Fourier-Bessel δεύτερου ειδους [Arfken] χρησιμοποιώντας ιδιοσυναρτήσεις $J_{-\mu}$ με συντελεστές W_0 και W_j να πρέπει να καθοριστούν,

$$G_z(x_0, z_0) = W_0 + z_0^{\frac{1-n}{2}} \sum_{j=1}^{\infty} W_j J_{-\mu} \left(\omega_j z_0^{\frac{p-n+2}{2}} \right) e^{-\sqrt{\lambda} \left(\frac{(p-n+2)\lambda}{2H^{\frac{p-n+2}{2}}} \right)} \quad 2.32$$

Αρα παίρνουμε:

$$\lim_{x_0 \rightarrow x} G_z(x_0, z_0, x, z) = a z_0^p W_0 + a z_0^{p+\frac{1-n}{2}} \sum_{j=1}^{\infty} W_j J_{-\mu} \left(\omega_j z_0^{\frac{p-n+2}{2}} \right) = \delta(z_0 - z)$$

Για να βρούμε τους συντελεστές W_0 και W_j της σειράς Bessel Fourier, πολλαπλασιάζουμε την εξίσωση (2.24) με $(p-n+2)/2$ και ολοκληρώνουμε από 0 έως H ,

$$a \left(\frac{p-n+2}{2} \right)^{\frac{H^{p+1}}{p+1}} W_0 + a W_j \int_0^H z_0^{p+\frac{1-n}{2}} J_{-\mu} \left(\omega_j z_0^{\frac{p-n+2}{2}} \right) dz = \frac{p-n+2}{2}$$

$$\text{Με } \tau = z_0^{\frac{p-n+2}{2}}$$

$$\int_0^H z_0^{p+\frac{1-n}{2}} J_{-\mu} \left(\omega_j z_0^{\frac{p-n+2}{2}} \right) dz = \frac{2}{p-n+2} \int_0^{H^{\frac{p-n+2}{2}}} \tau^{\frac{p+1}{p-n+2}} J_{-\mu}(\omega_j \tau) d\tau$$

$$-\mu + 1 = \frac{n-1}{p-n+2} + 1 = \frac{p+1}{p-n+2}$$

Αρα

$$\int_0^H z_0^{p+\frac{1-n}{2}} J_{-\mu} \left(\omega_j z_0^{\frac{p-n+2}{2}} \right) dz = \frac{2}{p-n+2} \int_0^{H^{\frac{p-n+2}{2}}} \tau^{-\mu+1} J_{-\mu}(\omega_j \tau) d\tau$$

και χρησιμοποιώντας την ταυτότητα [Arfken]:

$$\int_0^c \tau^{\nu+1} J_\nu(\sigma_i \tau) d\tau = \frac{J_{\nu+1}(\sigma_i c)}{\sigma_i c}$$

Τότε γίνεται

$$\alpha \left(\frac{p-n+2}{2} \right) \frac{H^{p+1}}{p+1} W_0 + \alpha W_j J_{-\mu+1} \left(\omega_j H^{\frac{p-n+2}{2}} \right) = \frac{p-n+2}{2}$$

Από την Εξ. (2.32) έχουμε τους όρους του W_j να τείνει στο μηδέν, οπότε

$$W_0 = \frac{p+1}{aH^{p+1}}$$

με την ίδια μέθοδο για να ληφθεί το W_j πολλαπλασιάζοντας την εξίσωση με

$$\left(\frac{p-n+2}{2} \right) z_0^{\frac{1-n}{2}} J_{-\mu} \left(\omega_i z_0^{\frac{p-n+2}{2}} \right)$$

και ολοκληρώνοντας από το 0 έως H, παίρνουμε:

$$\begin{aligned} & \alpha \left(\frac{p-n+2}{2} \right) W_0 \int_0^H z_0^{p+\frac{1-n}{2}} J_{-\mu} \left(\omega_i z_0^{\frac{p-n+2}{2}} \right) dz_0 + \\ & \alpha \left(\frac{p-n+2}{2} \right) W_j \int_0^H z_0^{p+1-n} J_{-\mu} \left(\omega_i z_0^{\frac{p-n+2}{2}} \right) J_{-\mu} \left(\omega_j z_0^{\frac{p-n+2}{2}} \right) dz_0 = \\ & \left(\frac{p-n+2}{2} \right) \tau z_0^{\frac{1-n}{2}} J_{-\mu} \left(\omega_i z_0^{\frac{p-n+2}{2}} \right) \end{aligned}$$

$$\text{Εάν } \tau = z_0^{\frac{p-n+2}{2}} \rightarrow \tau d\tau = \frac{p-n+2}{2} z_0^{p-n+1} dz_0$$

με αντικατάσταση παίρνουμε

$$\begin{aligned} & \alpha W_0 \int_0^H \frac{p-n+2}{2} \tau^{-\mu+1} J_{-\mu}(\omega_i \tau) d\tau + \alpha W_j \int_0^H \frac{p-n+2}{2} \tau J_{-\mu}(\omega_j \tau) d\tau = \\ & \left(\frac{p-n+2}{2} \right) \tau^{\frac{1-n}{2}} J_{-\mu}(\omega_i \tau) \end{aligned}$$

αφού από [[Arfken]]:

$$\alpha W_0 \int_0^c \tau J_\nu(\omega_i \tau) J_\nu(\omega_j \tau) d\tau = \begin{cases} 0, i \neq j \\ \frac{1}{2\sigma_j^2} \left((c^2 h^2 + c^2 \sigma_j^2 - \nu^2) J_\nu^2(\omega_i) \right), i = j \end{cases} \quad 2.34$$

παίρνουμε:

$$W_j = \frac{p-n+2}{aH^{p-n+2}} Z_0^{\frac{1-n}{2}} \frac{J_{-\mu} \left(\omega_j z_0^{p-n+2/2} \right)}{J_{-\mu}^2 \left(\omega_j z_0^{p-n+2/2} \right)} \quad 2.35$$

αντικαθιστώντας τα W_0 και W_j στην Εξ. (2.27), παίρνουμε:

$$G_z = \frac{p+1}{aH^{p+1}} \left[\mathbf{1} + \frac{p-n+2}{a(p+1)H^{-n+1}} (ZZ_0)^{1-n/2} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{J_{-\mu} \left(\omega_j z^{p-n+2/2} \right) J_{-\mu} \left(\omega_j z_0^{p-n+2/2} \right)}{J_{-\mu}^2 \left(\omega_j H_0^{p-n+2/2} \right)} e^{-\sqrt{\frac{\gamma}{\alpha}} \frac{(p-n+2)\omega_j(x-x_0)}{2}} \right]$$

2.36

Η Συνάρτηση Crosswind Sub-Green (G_y)

$$\alpha \frac{\partial^2 G_y}{\partial x_0^2} + \beta \frac{\partial^2 G_y}{\partial y_0^2} = 0 \quad 2.37$$

$$\lim_{x_0 \rightarrow x} G_y = \delta(y_0 - y)$$

παίρνοντας μετασχηματισμό συνημιτονου Fourier για την Εξ. (2.37):

$$\alpha \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{\infty} \cos(sy_0) \frac{\partial^2 G_y}{\partial x_0^2} dy_0 + \beta \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{\infty} \cos(sy_0) \frac{\partial^2 G_y}{\partial y_0^2} dy_0 = 0 \rightarrow \alpha \frac{d^2 \widehat{G}_y}{dx_0^2} + \beta I_2 = 0$$

$$I_2 = \int_0^{\infty} \cos(sy_0) \frac{\partial^2 G_y}{\partial y_0^2} dy_0$$

Χρησιμοποιώντας ολοκλήρωση κατά παραγοντες, παίρνουμε:

$$I_2 = -s^2 \widehat{G}_y$$

με αντικατάσταση στην Εξ. (2.37), παίρνουμε:

$$\alpha \frac{d^2 \widehat{G}_y}{dx_0^2} - \beta s^2 \widehat{G}_y = 0 \quad 2.38$$

Αυτή είναι μια συνηθισμένη διαφορική εξίσωση δεύτερης τάξης με σταθερούς συντελεστές που έχει λύση:

$$\widehat{G}_y = A_1 e^{\sqrt{\frac{\beta}{\alpha}}sx_0} + A_2 e^{-\sqrt{\frac{\beta}{\alpha}}sx_0} \quad 2.39$$

από οριακές συνθήκες (2.3) $G_y = 0$, στο x_0 ; $y_0 \rightarrow \infty \Rightarrow \widehat{G}_y = 0$, άρα $A_1 = 0$,

$$\widehat{G}_y = A_2 e^{-\sqrt{\frac{\beta}{\alpha}}sx_0} \quad 2.40$$

παίρνοντας τον μετασχηματισμό συνημιτόνου Fourier για την Εξ. (240), λαμβάνουμε:

$$\lim_{x_0 \rightarrow x} \widehat{G}_y = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cos(sy)$$

Και παίρνουμε:

$$A_2 = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cos(sy) e^{-\sqrt{\frac{\beta}{\alpha}}sx}$$

Αντικαθιστώντας το A_2 στην Εξ. (2.40), λαμβάνουμε:

$$\widehat{G}_y = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cos(sy) e^{-\sqrt{\frac{\beta}{\alpha}}s(x-x_0)} \quad 2.41$$

Παίρνοντας τον μετασχηματισμό Φουριέ αντίστροφου συνημιτόνου, παίρνουμε:

$$G_y = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \cos(sy_0) \cos(sy) e^{\sqrt{\frac{\beta}{\alpha}}s(x-x_0)} ds = \frac{1}{\pi} \left[\int_0^\infty \cos s(y+y_0) e^{-\sqrt{\frac{\beta}{\alpha}}s(x-x_0)} ds + \int_0^\infty \cos s(y-y_0) e^{-\sqrt{\frac{\beta}{\alpha}}s(x-x_0)} ds \right] \quad 2.42$$

Με ολοκλήρωση κατά παραγοντες, λαμβάνουμε:

$$G_y = \frac{\sqrt{\frac{\beta}{\alpha}}(x_0-x)}{\pi} \left[\frac{1}{(y_0+y)(x_0-x+y+y_0)} + \frac{1}{(y_0+y)(x_0-x+y-y_0)} \right] \quad 2.43$$

αφού η συγκέντρωση ορίζεται ως:

$$C(x, y, z) = q \otimes G_y \otimes G_z$$

όπου q είναι ο ρυθμός εκπομπής της ρύπανσης, αντικαθιστώντας, λαμβάνουμε:

$$C(x, y, z) = \frac{\sqrt{\frac{\beta}{\alpha}}(x_0 - x)(p+1)}{\pi \alpha H^{p+1}} \left[\frac{1}{(y_0 + y)(x_0 - x + y + y_0)} + \frac{1}{(y_0 + y)(x_0 - x + y - y_0)} \right] \left[1 + \frac{p-n+2}{\alpha(p+1)H^{-n+1}} (zz_0)^{1-n/2} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{J_{-\mu}(\omega_j z^{p-n+2/2}) J_{-\mu}(\omega_j z^{p-n+2/2})}{J_{-\mu}^2(\omega_j z^{p-n+2/2})} \right] e^{-\sqrt{\frac{\gamma}{\alpha}} \frac{(p-n+2)(x-x_0)\omega_j}{2}}$$

2.44

Μπορούμε να βρούμε μια λύση για την εξίσωση ατμοσφαιρικής διάχυσης βρίσκοντας αντικαθιστώντας όλες τις μεταβλητές από τη δική μας εφαρμογή .

B. ΜΗ ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΕΣ ΛΥΣΕΙΣ

Απεριόριστη περιοχή σημαίνει ότι δεν υπάρχει στρώμα αντιστροφής ($H \rightarrow \infty$), το άθροισμα πάνω από j στην Εξ. Το (2.27) γίνεται ολοκληρωμα

$$\int_0^{\infty} J_{-\mu}(\omega_j Z_0^{p-n+2/2}) J_{-\mu}(\omega_j z^{p-n+2/2}) e^{-\sqrt{\frac{\gamma}{\alpha}} \frac{(p-n+2)(x-x_0)\omega_j}{2}} dH =$$

$$\int_0^{\infty} J_{-\mu}\left(\lambda_j \left(\frac{z_0}{H}\right)^{p-n+2/2}\right) J_{-\mu}\left(\lambda_j \left(\frac{z}{H}\right)^{p-n+2/2}\right) e^{-\sqrt{\frac{\gamma}{\alpha}} \frac{(p-n+2)(x-x_0)\omega_j}{2H^{p-n+2/2}}} dH$$

όπου

$$\omega = \frac{\lambda}{H^{p-n+2/2}}$$

$$t = \frac{\lambda}{H^{p-n+2/2}}$$

Και χρησιμοποιώντας την ταυτότητα

$$\int_0^{\infty} e^{-ct} J_{\nu}(at) J_{\nu}(bt) dt = \frac{1}{\pi \sqrt{ab}} Q_{-1/2} \left(\frac{a^2 + b^2 + c^2}{2ab} \right) \nu > \frac{-1}{2}$$

αποκτούμε

$$\int_0^{\infty} J_{-\mu}(\omega_j Z_0^{p-n+2/2}) J_{-\mu}(\omega_j z^{p-n+2/2}) e^{-\sqrt{\frac{\gamma}{\alpha}} \frac{(p-n+2)(x-x_0)\omega_j}{2}} dH =$$

$$\frac{1}{\pi \sqrt{(zz_0)^{\frac{(p-n+2)}{2}}}} Q_{-\mu-1/2} \left(\frac{z^{p-n+2} + z_0^{p-n+2} + \frac{\gamma}{\alpha} \left(\frac{p-n+2}{2}\right)^2 (x-x_2)^2}{2(zz_0)^{\frac{p-n+2}{2}}} \right) \quad 2.45$$

όπου Q είναι η συνάρτηση Legendre του δεύτερου είδους και βαθμού (Q είναι στην πραγματικότητα απλώς μια απλοποίηση για το Q₀ ; ο σχετική Legendre συνάρτηση δεύτερου είδους, βαθμός και τάξης 0). Αρα

$$C(x, y, z) = \frac{2q \sqrt{\frac{\beta}{\alpha}} \pi \left(\frac{x-1}{x^2-2x} \right)}{\pi \sqrt{(zz_0)^{p-n+2/2}}} Q_{-\mu-1/2} \left(\frac{z^{p-n+2} + z_0^{p-n+2} + \frac{\gamma}{\alpha} \left(\frac{p-n+2}{2} \right)^2 (x-x_0)^2}{2(zz_0)^{p-n+2/2}} \right) \quad 2.46$$

όπου μ είναι μη ακέραιος στις εφαρμογές μας, επομένως, θα πρέπει να πάρουμε το Q από το [[Arfken]] που παίρνει τον τύπο:

$$Q_{\mu}^m = 2^{-\mu-1} Q_{-\mu-1/2} \frac{(-1)^m \Gamma(\mu+m+1)}{\Gamma(\mu+\frac{3}{2})} x^{-\mu-m-1} (x^2 - 1)^{m/2} \cdot F \left(\frac{\mu+m+2}{2}, \frac{\mu+m+2}{2}, \mu + \frac{3}{2}, \frac{1}{x^2} \right), x > 1$$

όπου F είναι η υπεργεωμετρική συνάρτηση που υπολογίζεται από πίνακες.

3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΟΣ

3. ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΟΣ

Η κατανόηση των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων των αερολυμάτων είναι ζωτικής σημασίας ωστόσο, οι ιδιότητες και οι συγκεντρώσεις πολλών ατμοσφαιρικών ειδών, ιδιαίτερα των οργανικών, είναι ακόμα άγνωστες. Για τον χαρακτηρισμό της χημικής σύστασης της ατμόσφαιρας, χρησιμοποιούνται διαφορετικές αναλυτικές μεθοδολογίες. **Στην ιδανική περίπτωση**, η τεχνική θα πρέπει να είναι αρκετά γρήγορη για να παρακολουθεί τις αλλαγές στη συγκέντρωση, τη σύνθεση ή και τα δύο καθώς συμβαίνουν, αρκετά ευαίσθητα για την ανίχνευση των ειδών που μας ενδιαφέρουν και χωρίς παρεμβολές από άλλα είδη που υπάρχουν την ίδια μάζα αέρα. [Chow, 1995; Spurny, 1999; McMurry, 2000].

3.1 . Μετρήσεις συγκεντρώσεων μάζας και αριθμού σωματιδίων αερολύματος

Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική για τη μέτρηση των συγκεντρώσεων μάζας σωματιδίων περιλαμβάνει την **δύθηση** [Chow, 1995; Spurny, 1999; McMurry, 2000]. Τα φίλτρα ζυγίζονται υπό ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας πριν και μετά τη δειγματοληψία και οι συγκεντρώσεις μάζας προσδιορίζονται από την αύξηση της μάζας του φίλτρου και τον όγκο του αέρα που λήφθηκε

Η Μετρηση της εξασθένησης της β-ακτινοβολίας μέσω ενός γεμάτου με σωματίδια φίλτρου, το οποίο προκύπτει από τα εναποτιθέμενα σωματίδια. Ο βαθμός εξασθένησης είναι ανάλογος του συνολικού αριθμού ατομικών ηλεκτρονίων στο δείγμα, ο οποίος σε στενή προσέγγιση είναι ανάλογος με τη συνολική μάζα του δείγματος.

Ένας άλλος τρόπος που χρησιμοποιείται είναι ένα φίλτρο στο στενό άκρο σωλήνα, ο οποίος ταλαντώνεται. Ο σωλήνας δονείται με συχνότητα που εξαρτάται από τη μάζα του φίλτρου. Οι αλλαγές στη συχνότητα ταλάντωσης σχετίζονται με τη μάζα του δείγματος.

Διαφορικοί αναλυτές κινητικότητας (DMA, ηλεκτροστατικοί ταξινομητές) [Knutson και Whitby, 1975; Winklmayr et al., 1991; Flagan, 1998] ταξινομούν τα σωματίδια σύμφωνα με την ηλεκτρική τους κινητικότητα, η οποία εξαρτάται από το φορτίο σωματιδίων και το γεωμετρικό μέγεθος

Αυτά τα όργανα χρησιμοποιούνται ευρέως για τη μέτρηση των κατανομών μεγέθους στην περιοχή **διαμέτρου 3 – 1000 nm σε πολύ υψηλή ανάλυση μεγέθους.**

Οι μετρητές σωματιδίων με οπτικές μέθοδες (OPC) είναι η πιο κοινή μέθοδος μέτρησης και ταξινόμησης μεγέθους σωματιδίων διαμέτρου έως και αρκετών δεκάδων μικρών. Η βασική αρχή των OPC είναι η μέτρηση της ποσότητας του φωτός που σκεδάζεται από μεμονωμένα σωματίδια καθώς ακτινοβολούνται από εστιασμένη δέσμη. Ένα κλάσμα του σκεδαζόμενου φωτός συλλέγεται και κατευθύνεται στον φωτοανιχνευτή, όπου μετατρέπεται σε παλμό τάσης. Το μέγεθος των σωματιδίων προσδιορίζεται από το μέγεθος αυτού του παλμού τάσης χρησιμοποιώντας μια καμπύλη βαθμονόμησης που λαμβάνεται συνήθως από μετρήσεις χρησιμοποιώντας σφαιρικά σωματίδια γνωστών μεγεθών και δείκτη διάθλασης. Τυπικά σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 0,2 μm δεν είναι αρκετά μεγάλα για να παράγουν σήματα πάνω από το επίπεδο θορύβου. Οι τεχνικές σκέδασης φωτός έχουν το πλεονέκτημα ότι διαταράσσουν ελάχιστα το αεροζόλ και παρέχουν στιγμιαίες πληροφορίες που είναι συχνά κατάλληλες για συνεχή παρακολούθηση. Ένα μειονέκτημα των οργάνων σκέδασης φωτός όταν χρησιμοποιούνται για ατμοσφαιρικές μετρήσεις είναι ότι οι ιδιότητες των σωματιδίων (σχήμα, δείκτης διάθλασης και μορφολογία) που απαιτούνται για τον προσδιορισμό του μεγέθους από τα δεδομένα του παλμού είναι συνήθως άγνωστα. Ακόμη και για την ιδανική περίπτωση ομοιογενών σφαιρών, αβεβαιότητες στη γνώση του σωματιδίου, η χημική του σύνθεση κ.λ.π μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικές αβεβαιότητες στις εκτιμήσεις του δείκτη διάθλασης.

Οι αεροδυναμικοί μετρητές σωματιδίων (APS) είναι μια άλλη μέθοδος με ταυτόχρονη μέτρηση και ταξινόμηση σωματιδίων. Καθώς ένα αεροζόλ επιταχύνεται γρήγορα μέσω ενός ακροφυσίου σε

έναν μερικώς εκκενωμένο θάλαμο, τα σωματίδια τείνουν να υστερούν πίσω από το φέρον αέριο λόγω **αδράνειας** [Wilson and Liu, 1980].

Σε αντίθεση με τους οπτικούς μετρητές, οι οποίοι καθορίζουν το μέγεθος των σωματιδίων από την ένταση του σκεδαζόμενου φωτός, οι αεροδυναμικοί μετρητές σωματιδίων χρησιμοποιούν απλώς το σκεδαζόμενο φως για να ανιχνεύσουν σωματίδια και στα δύο άκρα της απόστασης πτήσης και εμφανίζουν σφάλματα λόγω παραμορφώσεων στα σχήματα των σταγονιδίων υγρού και **σφάλματα σημαντικά, λόγω υψηλής υγρασίας** [McMurry, 2000].

Μετρήσεις χημικής σύστασης αερολύματος

Ο προσδιορισμός της χημικής σύστασης των αερολυμάτων περιβάλλοντος είναι πολύ πιο περίπλοκος. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό επειδή τα ατμοσφαιρικά αερολύματα (ιδιαίτερα τα οργανικά) μπορεί να περιέχουν έως και εκατοντάδες ενώσεις που εκτείνονται σε ευρύ φάσμα χημικών και θερμοδυναμικών ιδιοτήτων [Saxena and Hildemann, 1996]. **Συμβατικά, οι μετρήσεις της χημικής σύστασης αερολύματος αφορούν εκτός πεδίου εργαστηριακή χημική ανάλυση των εναποτιθέμενων σωματιδίων λίγο καιρό μετά τη συλλογή του δείγματος.**

3.2 Μέθοδοι εκτός πεδίου

Διατίθενται αρκετές off-line αναλυτικές τεχνικές για την ανάλυση της σύνθεσης των συλλεγμένων σωματιδίων όπως [Chow, 1995; Spurny, 1999; McMurry, 2000]

- ατομική απορρόφηση,
- ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM),
- υγρή χρωματογραφία υψηλής απόδοσης (HPLC),
- αέρια χρωματογραφία (GC),
- ιοντική χρωματογραφία (IC),
- πυρηνικός μαγνητικός συντονισμός πρωτονίων (HNMR),
- φασματομετρία μάζας δευτερογενούς ιόντος (SIMS),

- επαγωγικά συζευγμένη φασματομετρία μάζας πλάσματος (ICPMS)
- και φασματομετρία μάζας μικροανιχνευτή λέιζερ.

Η πιο κοινή προσέγγιση για τον προσδιορισμό της σύνθεσης των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων περιλαμβάνει την ανάλυση της απόθεσης δείγματος που συλλέγεται σε υποστρώματα φίλτρων.

3.2.1 Μέθοδοι εντός πεδίου

Οι μέθοδοι επιτόπιας παρακολούθησης για την ανάλυση της χημικής σύνθεσης του αερολύματος αυξάνουν την συχνότητα δειγματοληψίας και μειώνουν το λειτουργικό κόστος.

Το αιθαλόμετρο είναι μια οθόνη αιθάλης που μετρά τη συγκέντρωση του μαύρου άνθρακα (BC) στον αέρα του περιβάλλοντος με βάση την απορρόφηση φωτός σε δείγματα φίλτρων [Hansen et al., 1984]. Η διαφορά στην εξασθένηση μεταξύ των εκτεθειμένων και των κενών φίλτρων είναι ανάλογη της ποσότητας του φωτοαπορροφητικού ανθρακούχου αερολύματος ένωσης από το μετρημένη περιεκτικότητα σε οργανικό άνθρακα [Gray et al., 1986].

Αρκετές ομάδες έχουν αναπτύξει τεχνικές για επιτόπιες μετρήσεις σωματιδίων συγκεντρώσεις θεικών με χρήση φωτομετρικών ανιχνευτών φλόγας (FPD) [Huntzicker et al., 1978; Kittelson et al., 1978]. Το FPD ανιχνεύει φως ~ 394 nm που εκπέμπεται από τη διεγερμένη κατάσταση Τα μόρια S₂ σχηματίζονται όταν οι ενώσεις θείου καίγονται σε φλόγα πλούσια σε υδρογόνο. Αυτή η μέθοδος δεν κάνει διάκριση μεταξύ αερίου και σωματιδιακού θείου.

Το επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα (ICP) είναι η πιο καλά ανεπτυγμένη τεχνική επί του παρόντος σε πραγματικό χρόνο για μετρήσεις συγκεντρώσεων σωματιδίων μετάλλου στον ατμοσφαιρικό αέρα [Sprunty, 1999].

Πρόσφατα, έχουν αναφερθεί συστήματα για τη μέτρηση πολλαπλών συστατικών αεροζόλ. Αυτά τα νέα συστήματα χρησιμοποιούν κυρίως χρωματογραφία ιόντων (IC) τεχνικές για χημική ανάλυση και χρήση συστημάτων συλλογής σωματιδίων, κυρίως αποπυρηνωτών, για την απομάκρυνση των αερίων

Η Φασματομετρία μάζας αερολύματος μετρά τις φυσικές ιδιοότητες των αερολυμάτων, αρα είναι πλέον κατανοητό ότι η μελλοντική πρόοδος κατανόησης των ιδιοτήτων, των διεργασιών και των επιπτώσεων του αερολύματος θα απαιτήσει την ανάπτυξη νέων τεχνικών χημικής ανάλυσης σωματιδίων, οι οποίες είναι επίσης ικανές να προσδιορίσουν την μέγεθος, σχήμα, οπτικές ιδιότητες και στοιχειακή και μοριακή σύνθεση κάθε σωματιδίου σε πραγματικό χρόνο. Τελευταία , η φασματομετρία μάζας αερολυμάτων έχει κερδίσει σημαντικό ενδιαφέρον ως μέσο συσχέτισης του μεγέθους και της χημικής σύστασης μεμονωμένων σωματιδίων σε πραγματικό χρόνο. [Suess and Prather, 1999; Johnston, 2000; ευγενής and Prather, 2000; Sipin et al., 2003].

Η τεχνολογία δειγματοληψίας δεν πρέπει να διαταράσσει τη δυναμική του δείγματος αερολύματος . Η μόλυνση και η αλλοίωση, όπως η εξάτμιση ή η κρυστάλλωση, ουσιών είναι δυνατό να οδηγήσει σε ψευδή συμπεράσματα σχετικά με τα αρχικά σωματίδια. [Spurny, 1999; Suess και Prather, 1999; Johnston, 2000]. Ποικιλία εισόδων έχει χρησιμοποιηθεί για την έλξη σωματιδίων από την ατμοσφαιρική πίεση στο θάλαμο κενού των φασματόμετρων μάζας αερολύματος, συμπεριλαμβανομένου του ακροφυσίου [Reilly et al., 2000; Trimborn et al., 2000], τριχοειδή [Reents and Schabel, 2001] και αεροδυναμική συστήματα φακών [Jayne et al., 2000; Tobias et al., 2000].

3.2.2 Μετρητές οπτικών ιδιοτήτων

Οι μετρήσεις σωματιδίων με χρήση οπτικών οργάνων βασίζονται στο γεγονός ότι όταν ένα σωματίδιο διέρχεται από μια δέσμη φωτός, ένα μέρος του φωτός σκεδάζεται. Η ανίχνευση αυτού του φωτός είναι η βάση όλων αυτών των οργάνων. Ο αριθμός των σωματιδίων μπορεί να προσδιοριστεί απλά μετρώντας τους παλμούς του φωτός που φθάνουν στον ανιχνευτή. Η ένταση του σκεδαζόμενου φωτός σχετίζεται με το μέγεθος του σκεδαζόμενου σωματιδίου και αυτή η σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να γίνουν μετρήσεις του μεγέθους των σωματιδίων. Επιπλέον, το σχέδιο χωρικής σκέδασης εξαρτάται από το σχήμα των σωματιδίων, επομένως αυτή είναι μια άλλη παράμετρος που μπορεί να μετρηθεί με οπτικά όργανα. Εξαρτώμενη από το μέγεθος σκέδαση από σφαιρικά σωματίδια η σχέση μεταξύ του μεγέθους των σωματιδίων και της σκεδαζόμενης έντασης σε οποιαδήποτε δεδομένη γωνία σκέδασης είναι πολύπλοκη και ορίζεται πλήρως για

σφαιρικά σωματίδια οποιουδήποτε μεγέθους από τη **Θεωρία Mie**. Ανάλογα με το μέγεθος του σωματιδίου σε σχέση με το μήκος κύματος του προσπίπτοντος φωτός, υπάρχουν απλοποιήσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να συσχετίσουν το μέγεθος των σωματιδίων με τη σκεδαζόμενη ένταση. Η παράμετρος μεγέθους ορίζεται από:

$$\alpha = \frac{\pi D_p}{\lambda}$$

Όπου α είναι η παράμετρος μεγέθους, D_p είναι η διάμετρος του σωματιδίου σκέδασης και λ το μήκος κύματος του φωτός.

Υπάρχουν τρία διαφορετικά καθεστώτα διασποράς:

$\alpha \ll \lambda$ Rayleigh Scattering

$$I = I_0 \frac{1 + \cos^2 \theta}{2R^2} \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2}\right) \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^6$$

Όπου I είναι η ένταση σκέδασης, I_0 είναι η ένταση πρόσπτωσης, θ είναι η γωνία σκέδασης, R είναι η απόσταση από το σωματίδιο, λ είναι το μήκος κύματος του φωτός, n είναι ο δείκτης διάθλασης του σωματιδίου και d είναι η διάμετρος του σωματιδίου. Για οποιοδήποτε δεδομένο σύστημα ανιχνευτή και δείκτη διάθλασης, η σκεδαζόμενη ένταση ποικίλλει.

$\alpha \sim \lambda$ Mie Scattering

Η σχέση μεταξύ της διαμέτρου των σωματιδίων και της σκεδαζόμενης έντασης στο καθεστώς σκέδασης Mie είναι πολύ πιο περίπλοκη από ό,τι σε οποιοδήποτε από τα άλλα καθεστώτα. **$\alpha \gg \lambda$**

Simplified Geometric Scattering

$$I = I_0 K_{(n,\theta)} d^2$$

όπου I είναι η ένταση σκέδασης, I_0 είναι η ένταση πρόσπτωσης, το K είναι συνάρτηση του δείκτη διάθλασης (n) και της γωνίας σκέδασης (θ), και d είναι η διάμετρος των σωματιδίων. Μια πλήρης ανάλυση της γεωμετρικής σκέδασης είναι επίσης ικανή να αναπαράγει στενά τα αποτελέσματα του Mie Scattering για μικρότερα σωματίδια με σημαντική εξοικονόμηση υπολογισμού (Glantschnig και Chen 1981). Οι περισσότεροι μετρητές οπτικών σωματιδίων λειτουργούν με ορατά ή σχεδόν υπέρυθρα μήκη κύματος (συνήθως 500-1100 nm), θέτοντας το μεγαλύτερο μέρος του εύρους μεγεθών αερολύματος στο καθεστώς Mie Scattering. Για ορισμένα όργανα που μετρούν

μεγαλύτερα νέφη και πτώσεις βροχόπτωσης ισχύει η απλοποιημένη γεωμετρική σχέση και για όργανα που μετρούν το μικρότερο αεροζόλ, ισχύει η σκέδαση Rayleigh.

Η χρήση UAV απαιτεί αισθητήρες μικρού βάρους και χαμηλού κόστους ώστε να μειωθεί το κόστος της αγοράς του drone. Άρα κρίνουμε σκόπιμο να κάνουμε μια συλλογή κριτικών των αισθητήρων αυτών.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5 Αισθητήρες και απόδοση αυτών

paper	sensors	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Ardon-Dryer et al., 2020 P	Purpleair PA-II (Plantower PMS 5003)	<p>Οι διπλές, μετρήσεις όπως του Purpleair, συχνά συσχετίζονται καλά μεταξύ τους ($R^2 > 0,9$) Barkjohn et al., 2020</p> <p>Χαμηλότερες εκπομπές κυκλοφορίας σχετίζονται με καλύτερη συμφωνία μετρήσεων.</p> <p>Οι βαρυμετρικές και οπτικές μέθοδοι αναφοράς επηρεάζουν την τελική βαθμονόμηση.</p> <p>RH > 85% επηρεάζει σημαντικά τους αισθητήρες. ~20% μεταβλητότητα στην ακρίβεια μεταξύ των μονάδων για 14 αισθητήρες. Demanega et al. (2021)</p> <p>AirVisual, Awair, Clarity, Foobot, Kaiterra, uHoo X X X X</p> <p>Για δύο διαφορετικές υγρασίες και πολλές διαφορετικές πηγές, οι αισθητήρες αναφέρουν χαμηλότερες συγκεντρώσεις PM</p>
Barkjohn et al., 2020	Plantower PMS5003	
Castell et al. (2017)	AQMesh	
Crilley et al. (2018)	Alphasense OPC-N2	
Demanega et al. (2021)	AirVisual, Awair, Clarity, Foobot, Kaiterra, uHoo	
Di Antonio et al. (2018)	AlphaSense OPC-N2	
Gao et al. (2015)	PUWP (Shinyei PPD42NS)	
Hagan and Kroll (2020)	Theoretical, Idealized Sensors	
Han et al. (2017)	Dylos DC1700	
He et al. (2020)	Plantower PMS5003 X	

Holder et al. (2020)	Plantower PMS5003 (in RAMPS and PurpleAirs), Aeroqual micro AQ station	έως και 50% Di Antonio et al. (2018) AlphaSense OPC-
Jiao et al. (2016)	Shinyei PMS-SYS-1, Dylos DC1100, Shinyei PPD60PV, Metone Aercet 831, Shinyei PPD42	<u>διόρθωση RH με βάση τη θεωρία μειώνει σημαντικά την υπερεκτίμηση των PM1 και PM2,5 τουλάχιστον κατά μια τάξη μεγέθους</u>
Kelly et al. (2017)	Plantower PMS 1003/3003	Υψηλά PM2,5 (παραπάνω 100 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) απαιτούν μη γραμμική διόρθωση .
Kuula et al., 2020	Plantower PMS5003, Nova SDS011, Sensirion SPS30, Sharp GP2Y1010AU0F, Shinyei PPD42NS, and Omron B5WLD0101	Η θεωρία Mie μπορεί να χρησιμοποιηθεί για RH >60% αιτίες υπερεκτίμηση(>70%) Γραμμική απόκριση αισθητήρα μεταξύ 200 και 850 $\mu\text{g}\text{m}^{-3}$ PM2,5 _ δοκιμές στο εργαστήριο και δοκιμές περιβάλλοντος → υπερεκτίμηση σε ορισμένες περιόδους.
Li et al. (2020)	AirVisual, Alphasense, APT, Awair, Dylos, Foobot, PurpleAir, Wynd, and Xiaomi	Υψηλή συσχέτιση (R2> 0,8) με σκέδαση φωτός,εξασθένηση, και βαρυμετρική μεθοδος.
Liu et al. (2017)	4 Sharp, Shinyei, Samyoung and Oneair sensors	<u>Βαρυμετρικές μέθοδοι ως μέθοδοι αναφοράς</u>
Liu et al. (2019)	Nova SDS011	<u>για αισθητήρες χαμηλού κόστους</u>
Magi et al. (2020)	Plantower PMS5003 (PurpleAir PA-II-SD	Δεδομένα μέτρησης σωματιδίων Το PMS5003 <u>δεν είναι αξιόπιστο για διάφορους τύπους αεροζόλ PM2,5.</u>
Malings et al. (2020)	Met-One NPM and PurpleAir PA-II	
Masic et al. (2020)	Alphasense OPC-N2, Plantower PMS5003 X	Μερικοί αισθητήρες υπόκεινται σε

	Plantower PMS5003	σφάλματα που προκαλούνται από έκθεση σε υψηλή συγκέντρωση σκόνης.
McFarlane et al. (2021) Poynter, & Blake (2018)	AlphaSense OPC-N2	Περιοδικές διορθώσεις με βαρυμετρικά φίλτρα μειώνει το λάθος.
Eilenberg et al., 2020	Plantower PMS5003	Διαφορετικά συνθέσεις μπορούν προκαλούν έως και 10× διάφορες σε συγκεντρώσεις.
Liu et al. (2019)		
Salimifard et al. (2020) Subramanian et al. (2020) MetOne NPM	OPC-N2, IC Sentinel, Speck, and Dylos X X non-linearities.	Όλοι οι αισθητήρες πολύ ευαίσθητοι σε υγρασία
Sousan et al. (2016)	Dylos DC1700, Sharp GP2Y1010AU0F and DN7C3CA006 X	Οι Zheng et al. (2018) Plantower PMS3003 Απόδοση αισθητήρα αυξάνεται με τα PM _{2,5} RH : Μη γραμμικές διορθώσεις των επιδράσεων RH απέδωσαν κακή απόδοση του μοντέλου σε σύγκριση με τη γραμμική.
Salimifard et al. (2020) Subramanian et al. (2020) MetOne NPM	OPC-N2, IC Sentinel, Speck, and Dylos X X Linearity of sensors sensitive to particle concentration:	
Sousan et al. (2016) Dylos	DC1700, Sharp GP2Y1010AU0F and DN7C3CA006 X	
Salimifard et al. (2020) Subramanian et al. (2020) MetOne NPM	OPC-N2, IC Sentinel, Speck, and Dylos.	
Zikova et al. (2017) X	Speck monitors (Syhitech DSM501A)	

Zikova et al. (2017) X Separating data periods into combustion and noncombustion	Speck monitors (Syhitech DSM501A)	
Zikova et al. (2017) Separating data periods into combustion and noncombustion	Speck monitors (Syhitech DSM501A) X	
Zikova et al. (2017)	Speck monitors (Syhitech DSM501A) X	
Zikova et al. (2017)		
Zikova et al. (2017)	Speck monitors (Syhitech DSM501A) X	
Zikova et al. (2017)	Speck monitors (Syhitech DSM501A) X	
Zikova et al. (2017)	Speck monitors (Syhitech DSM501A) X	

4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ_ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ SENSOR

4.1 ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

Η πρώτη δεκαετία του 21ου αιώνα έχει δηλωθεί από ορισμένους ως η **Sensor Decade** (Landrigan et al. [6]) αφού σύγχρονα κτίρια, βιομηχανίες, ινστιτούτα είναι καλά εξοπλισμένα με αποτελεσματικούς και ακριβείς αισθητήρες τοξικών αερίων και η έρευνα έχει προχωρήσει σε αισθητήρες αερίων που βασίζονται σε νανοδομές.

Η πηγή ρύπων είναι τα στερεά σωματίδια, από σόμπες, καπνό, μηχανοκίνητα οχήματα, βιομηχανικές εγκαταστάσεις, ανοιχτές κατασκευές και δασο/αγροτικές πυρκαγιές. Υπάρχουν δύο τύποι ρύπων,

- οι πρωτογενείς
- και οι δευτερογενείς [13].

Η εκπομπή τοξικών αερίων όπως NOx και CO από τα καυσαέρια των οχημάτων και η απελευθέρωση SOx από βιομηχανικά εργοστάσια υπόκεινται στην κατηγορία των πρωτογενών ρύπων. Ωστόσο, οι δευτερογενείς ρύποι δεν εκπέμπονται απευθείας αλλά παράγονται στον αέρα όταν οι πρωτογενείς ρύποι αντιδρούν/αλληλεπιδρούν. Το όζον είναι δευτερογενής ρύπος [13]. **Η ατμοσφαιρική ρύπανση θεωρείται ως ο μεγαλύτερος περιβαλλοντικός κίνδυνος για την υγεία [13].**

Οι πηγές εκπομπής που ευθύνονται για την ατμοσφαιρική ρύπανση μπορεί να είναι ταξινομούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες,

- ανθρωπογενείς
- φυσικές πηγές [13].

Οι σταθερές πηγές περιλαμβάνουν σπίτια, χώρους εργασίας, θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, εργοστάσια παραγωγής, καπνό από σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, χρήση πυρηνικών όπλων, αναθυμιάσεις από μοτοκίνητα, σπρέι μαλλιών, βερνίκι, σπρέι αεροζόλ, γεωργικές/δασικές πυρκαγιές και ούτω καθεξής είναι κυρίως υπεύθυνες για την ατμοσφαιρική ρύπανση [16–18].

- Οι κινητές πηγές περιλαμβάνουν την εξάτμιση των οχημάτων, τα πλοία.

Οι φυσικές πηγές περιλαμβάνουν τις ακόλουθες πηγές:

- Εκπομπή αερίου μεθανίου (CH₄) από την πέψη των τροφών των ζώων.
- Αέριο ραδόνιο από ραδιενεργό διάσπαση εντός του φλοιού της Γης.
- Η ανίχνευση του ραδονίου είναι πολύ δύσκολη γιατί είναι άχρωμο και άοσμο στη φύση. Παράγεται φυσικά λόγω της διάσπασης του ραδονίου και συγκεντρώνεται σε υπόγεια. Είναι η κύρια αιτία των καρκίνων των πνευμόνων [20].
- Καπνός και CO από πυρκαγιές.
- Ηφαιστειακή δραστηριότητα που είναι η κύρια αιτία για την εκπομπή θείου, χλωρίου και σωματίδια τέφρας [20].
- Με την πρόοδο της τεχνολογίας, η χρήση αυτοκινήτων και η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων αυξάνει μέρα με τη μέρα σημαντικά την επιδείνωση του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος. Ως εκ τούτου, η ανάπτυξη αισθητήρων για την ανίχνευση πηγών ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι απαραίτητης.

Τα αιωρούμενα σωματίδια (σωματιδιακή ύλη ή αερολύματα) στην ατμόσφαιρα αν και έχουν διαφορετική προέλευση, εμφανίζουν ως κοινό σημείο το γεγονός ότι αποτελούνται από λεπτώς διαχωρισμένα σωματίδια. Το μέγεθος των σωματιδίων διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος του και την διεργασία που έχει υποστεί. Τα αερολύματα διατηρούν τις φυσικές και χημικές ιδιότητες της ύλης αλλά παρουσιάζουν διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες και συνολική επιφάνεια ανάλογα με το μέγεθος και το πορώδες τους. Ως σωματίδιο θεωρείται οτιδήποτε υγρό ή στερεό υπάρχει σε μία αέρια φάση με μέγεθος από 10⁷ μm έως 10² μm

Επιγραμματικά, η προέλευση των σωματιδίων μπορεί να είναι η εξής:

- Αιωρήματα εδαφικής προέλευσης που προέρχονται από τις ακάλυπτες από βλάστηση περιοχές.
- Μικροκρυσταλλικές μορφές αλάτων της θάλασσας που προέρχονται από την εξάτμιση του θαλασσίου νερού. Το μέγεθος τους κυμαίνεται από 1~10 μm και συναντώνται μέχρι και σε ύψος 500 m από την επιφάνεια της θάλασσας.
- Οργανικά αιωρήματα όπως γύρη, μικρόβια κλπ.
- Καπνοί και στάχτη (τέφρα) προέρχονται από φυσικές καύσεις δέντρων, θάμνων κ.α. οι οποίες γίνονται τυχαία ή προγραμματισμένα στη φύση. Τα σωματίδια αυτά έχουν διάμετρο 0,75 10² mm περίπου, περιέχουν στο μεγαλύτερο μέρος, υδρογονοάνθρακες και ρητίνες και, λόγω του μικρού μεγέθους τους, παρουσιάζουν υψηλή διαπερατότητα. Η διαφορά τους με τα αέρια είναι ότι τα σωματίδια του καπνού έχουν μεγάλη κολλητική δύναμη και εναποτίθενται σε

επιφάνειες. Το στερεό υλικό που παραμένει όταν ένα καύσιμο οξειδώνεται πλήρως ονομάζεται τέφρα.

- Σωματίδια από ανθρώπινες δραστηριότητες. Τα σωματίδια αυτής της κατηγορίας αποτελούν προϊόντα από τεχνικές καύσεις και συγκρίνονται ποσοτικά με τον όγκο όλων των παραπάνω κατηγοριών.

Από γεωγραφική θεώρηση τα σωματίδια κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες.

- Σωματίδια από ηπειρωτικές μάζες
- Σωματίδια από ωκεανούς
- Σωματίδια από ανθρώπινες δραστηριότητες

Από χημική σκοπιά τα σωματίδια ταξινομούνται σε :

- Σωματίδια χημικώς ενεργά
- Σωματίδια χημικώς αδρανή

Το μέγεθος των σωματιδίων που εκλύονται από βιομηχανικές εκπομπές καμινάδων εξαρτάται από την ταχύτητα των καυσαερίων και από την κατασκευή της καμινάδας. Τυπικές ταχύτητες εξόδου καυσαερίων από καμινάδες είναι από 12-20 m/sec. Αυτές οι ταχύτητες είναι ικανές να μεταφέρουν τα σωματίδια μακριά . Τα λεπτά υγρά σωματίδια ονομάζονται "νέφος", ενώ τα στερεά σωματίδια "σκόνη ή καπνός". Η ομίχλη αποτελείται από μεγάλη συγκέντρωση μικρών σταγόνων ύδατος, ενώ ο συνδυασμός καπνού και ομίχλης σχηματίζει την "καπνόμίχλη".

Το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων (αεροζόλ) ρυθμίζεται από φυσικές διεργασίες. Το άνω όριο προσδιορίζεται από τις δυνάμεις της βαρύτητας ενώ το κάτω όριο ελέγχεται από μεθόδους "θρομβώσεως". Με την βοήθεια της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας διαπιστώθηκε ότι το σχήμα των σωματιδίων δεν είναι πάντα σφαιρικό αλλά παρουσιάζει ποικίλες μορφές. Για παράδειγμα το σχήμα του τυπικού σωματιδίου καπνού είναι απολύτως σφαιρικό ενώ τα σωματίδια σκόνης έχουν ακανόνιστο σχήμα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6 .Κατηγοριοποίηση σωματιδίων.

Σωματιδια Aitken	$R < 0,1 \mu\text{m}$
Μεγαλασωματιδια	$0,1 - 1 \mu\text{m}$
Γιγαντιαια σωματιδια	$> 1 \mu\text{m}$
Σκονη	Στερεα σωματιδια αποκομενα από στερεα σωματα και διασκορπισμενα από αερια ρευματα

Ατμος	Στερεα η υγρα σωματιδια από συμπυκνωση στην αερια φαση
καπνος	Ατμος ως αποτελεσμα καυσης

Η συμβατική μέθοδος προσομοίωσης του μεγέθους σωματιδίου είναι μέθοδος της διαμέτρου Stokes. Η διάμετρος Stokes ορίζεται ως η ισοδύναμη διάμετρος σφαίρας που έχει την ίδια ταχύτητα πτώσης και πυκνότητα με το υπό μελέτη σωματίδιο. Η διάμετρος Stokes ενός απομονωμένου σωματιδίου ατμού της ατμόσφαιρας είναι ίδια με την γεωμετρική του διάμετρο, αλλά η διάμετρος Stokes ενός σωματιδίου σκόνης που σχηματίζεται από θρόμβωση ορισμένων άλλων σωματιδίων είναι πολύ μικρότερη από την μετρούμενη γεωμετρική.

Το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων επιδρά στην συμπεριφορά της ατμόσφαιρας ή ορισμένων παραμέτρων της ως εξής:

- **Όσο μικρότερη είναι η διάμετρος του σωματιδίου τόσο μεγαλύτερη είναι η ειδική επιφάνεια του.** Αυτό έχει ως συνέπεια να καταλύονται καλύτερα χημικές αντιδράσεις, διότι διάφορα αέρια ή υγρά απορροφούνται από τις μεγάλες επιφάνειες των σωματιδίων. Αυτή η διεργασία σχετίζεται με την σχηματισμό φωτοχημικής καπνομίχλης. Η μεγάλη επιφάνεια των σωματιδίων οφείλεται σε μικροπόρους, που στην συντριπτική τους πλειονότητα έχουν διάμετρο μικρότερη ή ίση με 20 nm. Στο εσωτερικό των πόρων απορροφούνται και συμπυκνώνονται ατμοσφαιρικά αέρια, όπως CO₂ (150-300 pgr/gr), CO (10-30 pgr/gr), CH₄ (15-60 pgr/gr) και NH₃ (30-100 pgr/gr).
- **Φαινόμενα ανακλάσεως:** Το μέγεθος των σωματιδίων είναι σημαντικός παράγοντας στην ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα μεγαλύτερα ποσοστά (περίπου 10%) ανακλάσεως προκαλούνται από τα σωματίδια μεγέθους 0,1-1 μm, γιατί η διάμετρος τους είναι συγκρίσιμη με τα μήκη κύματος της ορατής ακτινοβολίας.

ΠΙΝΑΚΑΣ 7. Ανάκλαση και όρια ορατότητας

Συγκεντρωση μg/m ³	Ορατοτητα Km	περιοχη
30	40	Εκτος κατοικημενης περιοχης
100	10	Σε κατοικημενη περιοχη
200	5	Σε κατοικημενη περιοχη
750	1,5	Σε κατοικημενη περιοχη

Γενικά τα σωματίδια μειώνουν την ορατότητα καθώς και την ηλιακή ακτινοβολία μέχρι αυτή να φθάσει στην επιφάνεια της Γης. Η αύξηση της θολερότητας συντελεί στην πτώση της επιφανειακής θερμοκρασίας και στην αναστολή της επέκτασης του φαινομένου Το απορροφούμενο SO₂ στα αιωρούμενα σωματίδια γρήγορα οξειδώνεται σε θειικό οξύ. Η παρουσία οξέος στα σωματίδια είναι συχνότατη σε περιοχές με υψηλές εκπομπές SO₂. Η οξύτητα αυτών των σωματιδίων αποδίδεται στο H₂SO₄ που σχηματίζεται από την οξείδωση του SO₂. Φυσικά, αν τα σωματίδια περιέχουν μέταλλα των αλκαλίων ή αλκαλικών γαιών, τότε η οξύτητα εξουδετερώνεται και σχηματίζονται θειικά άλατα. του θερμοκηπίου. Ο Πίνακας εμφανίζει κατά προσέγγιση τα όρια ορατότητας σε διάφορες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων που είναι τυπικές για κατοικημένες και μη περιοχές.

Σωματίδια με τάξη μεγέθους 0,1—1 μm αποτελούν πυρήνες για το σχηματισμό σταγόνων βροχής, την αύξηση των σύννεφων και τη βροχόπτωση. Μ' αυτόν τον τρόπο τα σωματίδια επηρεάζουν το κλίμα ενός αστικού κέντρου, αυξάνοντας τις βροχοπτώσεις, τις χαλαζοπτώσεις και τις καταιγίδες. Αν τα σωματίδια είναι μικρότερου μεγέθους τότε οι σταγόνες της βροχής είναι και αυτές μικρότερες και δεν πέφτουν με αποτέλεσμα την μείωση των βροχοπτώσεων και την αύξηση της συννεφιάς.

Όταν τα σωματίδια επικάθονται στα φυτά εμποδίζουν την κυκλοφορία του CO₂ και του O₂ που εμπλέκονται στον μηχανισμό της φωτοσύνθεσης. Στην περίπτωση των ζώων, τα σωματίδια προκαλούν προβλήματα στο αναπνευστικό τους σύστημα. Τα σωματίδια με μέγεθος μεγαλύτερο των 10 μm παγιδεύονται στη μύτη ή το φάρυγγα και στη συνέχεια απομακρύνονται ή καταπίνονται χωρίς να παρουσιάζουν ιδιαίτερα προβλήματα. Σωματίδια όμως, με μέγεθος μικρότερο από 0,1 μm εναποτίθενται στους πνεύμονες και προκαλούν βλάβες, γιατί είναι δύσκολη η απομάκρυνση τους.

Η σωματιδιακή ύλη αποτελείται από αιρούμενα στερεά σωματίδια, με διαμέτρους που κυμαίνονται από μερικά mm έως μερικά nm. Ο χρόνος παραμονής των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα καθορίζεται από το μέγεθος και το ειδικό βάρος τους. Η ταχύτητα πτώσης τους στο έδαφος καθορίζεται από το νόμο του Stokes:

$$V_0 = \frac{gd^2(\rho_1 - \rho_2)}{18\mu}$$

όπου,

- v_0 οριακή ταχύτητα σφαιρικού σωματιδίου
- ρ_1 πυκνότητα σωματιδίου

- d διάμετρος σωματιδίου
- ρ_2 πυκνότητα περιβάλλοντος και
- μ το ιξώδες περιβάλλοντος αέρα

Οι αποκλίσεις που εμφανίζει ο νόμος του Stokes οφείλονται στα μη κανονικά σχήματα των σωματιδίων, της τυρβώδους ροής γύρω από τα μεγάλα σωματίδια, των κινήσεων Brown των πολύ μικρών σωματιδίων και των καιρικών επιδράσεων (άνεμος βροχοπτώσεις, κλπ.). Τα σωματίδια μικρής διαμέτρου για να καθιζάνουν πρέπει να συσσωματώνονται, σε μεγαλύτερα και να απομακρύνονται από τον αέρα. Η παραπάνω διαδικασία είναι ενδεικτική για τον καθαρισμό της ατμόσφαιρας.

4.2 1^η ΓΕΝΙΑΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Το 1985, ο M. J. Leck πρότεινε ένα ηλεκτροχημικό στοιχείο για ανίχνευση αερίων σε σύστημα διασποράς βαρέων αερίων που παρέχει απευθείας σήμα ανάλογο με τη μερική πίεση του αερίου στην ατμόσφαιρα [22]. Η λιγότερη κατανάλωση ενέργειας είναι το κύριο πλεονέκτημα των ηλεκτροχημικών αισθητήρων πάνω από άλλους διαθέσιμους αισθητήρες αερίου [23]. Η συνήθης διάρκεια ζωής ενός ηλεκτροχημικού αισθητήρα υπό τυπική λειτουργία συνθήκες (25° C και εντός 20% της πίεσης περιβάλλοντος) είναι περίπου ένα έτος που είναι πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

Οι αισθητήρες αερίων με χημική αντίσταση είναι ελκυστικοί λόγω ευκολίας κατασκευής, χαμηλού κόστους, χαμηλού όριου ανίχνευσης (<επίπεδο ppm) [27-29]. Επίσης, απαιτεί μόνο μια μικρή ποσότητα ω και ως εκ τούτου είναι συγκριτικά πιο οικονομικά [30]. Οι αισθητήρες αερίων με χημική αντίσταση βασίζονται στη μέτρηση της αλλαγής της ηλεκτρικής αντίστασης όταν εκτίθενται σε ρυπογόνα περιβάλλοντα. Αυτή η συνέπεια διερευνήθηκε για πρώτη φορά από τους Brattein και Bardeen [26] για τον Ge και ZnO από τον Seiyama [27]. Ο χρόνος ζωής του αισθητήρα αερίου που βασίζεται σε οξειδία μετάλλων ημιαγωγών (SMO) είναι μεγάλος. Ο μηχανισμός ανίχνευσης είναι πολυσχιδής και ακόμα δεν είναι πλήρως κατανοητός. Διάφορες παράμετροι που επηρεάζουν κυρίως την λειτουργία του αισθητήρα αερίου εξαρτάται από τις ιδιότητες προσρόφησης/εκρόφησης της επιφάνειας του υλικού, την καταλυτική δραστηριότητα και τη θερμοδυναμική σταθερότητα [34].

4.3. Ο ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ UAV-SENSORS

4.3.1 Συστήματα UAV

Ένα μη επανδρωμένο εναέριο όχημα (UAV), κοινώς γνωστό ως drone, είναι ένα αεροσκάφος χωρίς άνθρωπο πιλότο. Τα UAV αποτελούν συστατικό ενός συστήματος μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAS), που περιλαμβάνουν ένα UAV, έναν ελεγκτή εδάφους και ένα σύστημα επικοινωνίας μεταξύ των δύο. Στην πράξη, οι όροι UAV και UAS χρησιμοποιούνται συχνά εναλλακτικά. Η πτήση των UAV μπορεί να λειτουργεί με διάφορους βαθμούς αυτονομίας: είτε υπό τηλεχειρισμό από ανθρώπινο χειριστή είτε αυτόνομα από υπολογιστές επί του σκάφους (Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας, 2016). Η παρακολούθηση που βασίζεται σε UAV είναι εξαιρετικά δημοφιλής τα τελευταία χρόνια λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης της τεχνολογίας στα drones. Στην εργασία «Συστήματα μη επανδρωμένων αεροσκαφών στην τηλεπισκόπηση και επιστημονική έρευνα: Ταξινόμηση και θεωρήσεις χρήσης», ο Adam Watts και οι συνεργάτες του εξήγησαν πώς είναι δυνατή η αερομεταφερόμενη παρακολούθηση με UAV και τα πλεονεκτήματα τέτοιων συστημάτων. Η αερομεταφερόμενη παρακολούθηση αναφέρεται σε τεχνικές αναγνώρισης που χρησιμοποιούν αεροσκάφη, UAV ή άλλες πλατφόρμες. Το UAV έχει τέσσερα κύρια πλεονεκτήματα σε σχέση με την τηλεπισκόπηση:

- σχετικά χαμηλό κόστος,
- ευελιξία στη συχνότητα και το χρόνο απόκτησης δεδομένων
- και τη δυνατότητα καταγραφής λεπτότερων χωρικών λεπτομερειών από
- την τρέχουσα δορυφορική τεχνολογία.

Το σύστημα παρακολούθησης UAV βασίζεται σε UAV που έχει τόσο τα κοινά χαρακτηριστικά της εναέριας παρακολούθησης όσο και τα δικά του μοναδικά χαρακτηριστικά. Σε σύγκριση με τα επανδρωμένα εναέρια οχήματα, τα συστήματα παρακολούθησης με την πλατφόρμα UAV μπορούν να λειτουργούν όλη την ημέρα και όλες τις καιρικές συνθήκες και να εκτελούν πτητικές εργασίες σε περιοχές υψηλού κινδύνου. Επιπλέον, τα UAV είναι σε θέση να λειτουργούν αρκετά κοντά στο αντικείμενο και να λαμβάνουν εικόνες με ανάλυση λίγων εκατοστών, παρέχοντας επαρκείς λεπτομέρειες. Με την ανάπτυξη αισθητήρων και τεχνικών επικοινωνίας, η αερομεταφερόμενη παρακολούθηση υψηλής ανάλυσης έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε μεγάλης κλίμακας τοπογραφική χαρτογράφηση και αποτύπωση για λεπτομερείς πληροφορίες εδάφους. Αν και η υπάρχουσα αερομεταφερόμενη παρακολούθηση έχει ορισμένα μειονεκτήματα, όπως υψόμετρο, αντοχή, έλεγχος στάσης, λειτουργίες παντός καιρού και παρακολούθηση της δυναμικής, εξακολουθεί να είναι μια

σημαντική τεχνική μελέτης και εξερεύνησης των πόρων και του περιβάλλοντος της Γης (Watts, Ambrosia, & Hinkley, 2012). Η μεγαλύτερη πρόκληση για τα συστήματα παρακολούθησης που βασίζονται σε UAV είναι η επικοινωνία με τον επίγειο σταθμό. Στην εργασία «A UAV Remote Sensing System: Design and Tests» που γράφτηκε από τους Yan et al. (2009), αυτό το πρόβλημα έχει εξηγηθεί και αντιμετωπιστεί. Οι συγγραφείς πιστεύουν ότι παρόλο που το UAV μπορεί να πετάει αυτόματα υπό τον έλεγχο του προκαθορισμένου προγράμματος, θα πρέπει κατά προτίμηση να ελέγχεται και να παρακολουθείται πάντα από τον Σταθμό Ελέγχου εδάφους, επομένως χρειάζεται αξιόπιστη επικοινωνία που συνδέεται προς και από το αεροσκάφος. Ο Σταθμός Ελέγχου εδάφους παρέχει χώρο εργασίας για πιλότο, πλοηγό, χειριστή οργάνων και συνήθως διοικητή αποστολής. Οι ενσωματωμένοι αισθητήρες ελέγχονται από το αερομεταφερόμενο σύστημα ελέγχου για τη λήψη εικόνων ή για άλλες μετρήσεις της περιοχής εργασίας. Μετά από βασική και σε πραγματικό χρόνο επεξεργασία επί του σκάφους, τα δεδομένα μπορούν να ληφθούν στον Σταθμό Ελέγχου εδάφους για επιτόπια επεξεργασία ή να προωθηθούν σε ένα κέντρο επεξεργασίας. Το κέντρο επεξεργασίας δεδομένων ή ο επίγειος σταθμός λήψης θα γεμίσει στη συνέχεια επεξεργάζονται, αρχειοθετούν, διαχειρίζονται και διανέμουν τα δεδομένα για έμπειρους χρήστες. Η προηγμένη επεξεργασία μπορεί να περιλαμβάνει εξαγωγή και εφαρμογή πληροφοριών. Με αυτόν τον τρόπο, ολοκληρώνεται η λειτουργία του συστήματος παρακολούθησης UAV και μπορεί να πραγματοποιηθεί ένα πλήρες σύνολο πρωτοκόλλων και προτύπων (Yan, Gou, & Duan, 2009).

2 Αυτό το κεφάλαιο περιγράφει τις προσπάθειές μας να σχεδιάσουμε, να κατασκευάσουμε και να δοκιμάσουμε ένα σύστημα παρακολούθησης αέρα που βασίζεται σε UAV και να εφαρμόσουμε αυτό το σύστημα σε μερικές δοκιμές πεδίου. Η χρήση μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV) για την αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς. Η ευκολία ανάπτυξής τους και η υψηλή ευελιξία τους επιτρέπουν να κάνουν δειγματοληψία περιοχών που διαφορετικά δεν είναι προσβάσιμες με συμβατικές πλατφόρμες. Για παράδειγμα, υποτροχιακά ερευνητικά αεροσκάφη με πιλότους δεν πετούν πάνω από κατοικημένες περιοχές σε χαμηλά υψόμετρα, ηφαίστεια ή σε κακές καιρικές συνθήκες για λόγους ασφαλείας (Khan, et al., 2012). Τα δεμένα μπαλόνια και οι χαρταετοί μπορούν να παρέχουν μετρήσεις κατακόρυφης ανάλυσης αλλά μόνο σε μία τοποθεσία και η ανάπτυξή τους περιορίζεται σε συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες. Οι πλατφόρμες UAV έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για μελέτες πεδίου ατμοσφαιρικής χημείας. Σημαντικά ωφέλιμα

φορτία πλέον ανυψώνονται τακτικά από μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα, ιδιαίτερα για παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο. Αυτή η μελέτη στοχεύει στην κατασκευή ενός λειτουργικού συστήματος που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση των εκπομπών PM καθώς και άλλων εκπομπών. Οι ειδικοί στόχοι αυτού του έργου είναι:

- Σχεδιασμός και κατασκευή συστήματος παρακολούθησης αέρα βασισμένο σε UAV.
- Εκτέλεση επιτήρηση αέρα πεδίου χρησιμοποιώντας το κατασκευασμένο σύστημα που
- βασίζεται σε UAV.

Οι κύριοι ατμοσφαιρικοί ρύποι που ερευνήθηκαν ήταν το PM 1,2,5,10

4.3.2 Αερομεταφερόμενη πλατφόρμα αισθητήρα

Σε αυτό το PROJECT , ένας μικροελεγκτής Arduino χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο αισθητήρων και τη συλλογή δεδομένων, την καταγραφή δεδομένων και την επικοινωνία, λειτουργώντας ως «κεντρικός node » του αερομεταφερόμενου κόμβου αισθητήρων. Ο μικροελεγκτής κωδικοποιήθηκε για την επίτευξη της επιθυμητής λειτουργικότητας χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού Arduino (η οποία βασίζεται σε C/C++). Το Arduino είναι μια πλατφόρμα υλικού και λογισμικού υπολογιστή ανοιχτού κώδικα. Αποτελείται τόσο από μια φυσική προγραμματιζόμενη πλακέτα (γνωστή ως μικροελεγκτής) όσο και από ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (IDE) που τρέχει σε έναν προσωπικό υπολογιστή. Το Arduino δεν απαιτεί πρόσθετο υλικό για τη φόρτωση κωδικών στην πλακέτα και η απλή σύνταξη προγραμματισμού του το καθιστά πολύ εύκολο στη χρήση (B_E_N, 2018). Το Arduino είναι μια πλακέτα μικροελεγκτή που βασίζεται στο τσιπ ATmega1280. Με τις δυνατότητές του, η πλακέτα Arduino χρησιμοποιείται ευρέως για την ανάπτυξη πρωτοτύπων προϊόντων. Στόχος μας είναι να παράσχουμε ένα νέο εργαλείο για τη μελέτη της ποιότητας του αέρα σε διαφορετικά ύψη που θα μπορούσαν να αντέξουν λόγω χαμηλού κόστους εύκολα οι οργανισμοί τοπικής αυτοδιοίκησης και δευτερευόντως ακόμη και οι ιδιώτες πολίτες. Οι συνήθεις τρόποι προσδιορισμού της ποιότητας του αέρα είναι η μέτρηση με τη βοήθεια σταθερών οργάνων. Ωστόσο, τα καθιερωμένα δίκτυα παρατήρησης στερούνται κινητικότητας περιορίζοντας τις

δυνατότητες χαρτογράφησης της χωρικής κατανομής ατμοσφαιρικών ρύπων και κατανόησης της συμπεριφοράς που σχετίζεται με την τοπική τοπογραφία και το κλίμα.

Οι πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις των UAV (drones) αποτελούν ευκαιρία για μια διερεύνηση της κατακόρυφης κατανομής των χαρακτηριστικών των ατμοσφαιρικών ρύπων και της διασποράς τους. Αρα η χρήση των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV), είναι **ένα ανοιχτό ερευνητικό πεδίο** για την παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μέσω αισθητήρων χαμηλού κόστους. (Miffre Aet al (2010) Bolla G., et al 2018).

Τα συμβατικά συστήματα παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης έχουν χαμηλή χωρική και χρονική ανάλυση. Η χαμηλή χωρική ανάλυση σημαίνει ότι υπάρχουν λίγα μόνο στοιχεία μέτρησης που έχουν αναπτυχθεί με μικρή κάλυψη. Αυτό οφείλεται στο απαγορευτικό κόστος των συσκευών. Η χαμηλή χρονική ανάλυση σημαίνει ότι η ανάλυση και η διάδοση των δεδομένων είναι αργή. Αυτό οφείλεται στην πολυπλοκότητα και το κόστος που σχετίζεται με την απαιτούμενη ακρίβεια. Τα συμβατικά συστήματα παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι κατάλληλα για μακρόχρονη παρακολούθηση του περιβάλλοντος.

Σε ότι αφορά τους αισθητήρες χαμηλού κόστους αυτοί μπορούν να αναπτυχθούν πιο διασκορπισμένα με υψηλή χωρική και χρονική ανάλυση, **αναπληρώνοντας την ατέλεια της ακρίβειας τους**. Είναι ένα εξαιρετικό εργαλείο για τη μέτρηση της προσωπικής έκθεσης στην ατμοσφαιρική ρύπανση. **Τα δεδομένα τους πρέπει να αξιολογούνται κριτικά διότι επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από πολλούς παράγοντες, ιδίως από τη θερμοκρασία, την υγρασία, τον άνεμο και την παρουσία άλλων αερίων στον αέρα**. Οι Yi Wei et al. σε μια λεπτομερή έρευνα σχετικά με την παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, από ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χαμηλού κόστους περιγράφει τεχνικές ανίχνευσης αξιολογώντας ταυτόχρονα τους αισθητήρες με τις πιο σημαντικές παραμέτρους. Συνήθως τα δεδομένα που συλλέγονται από αισθητήρες χαμηλού κόστους είναι διαθέσιμα στο κοινό μέσω του διαδικτύου. Λόγω του ελαφρού βάρους τους, μόνο αισθητήρες χαμηλού κόστους μπορούν να τοποθετηθούν σε drone οπότε μαζί με τους προαναφερθέντες παράγοντες θα πρέπει να προστεθεί και ο αεολικός παράγοντας από τους ρότορες του drone(Σχ.4).Σε ότι αφορά την πρόσφατη βιβλιογραφία οι αισθητήρες χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της κάθετης μεταβλητότητας των ρύπων (Schuyler et al., 2019) Του ατμοσφαιρικού αεροζόλ (Liu et al., 2020), των μετεωρολογικών

παράμετρων (Kimball et al., 2020).

Τα UAV μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε περιοχές που συνήθως είναι δύσκολο να προσεγγιστούν με παραδοσιακές μεθόδους λόγω της εύκολης ευελιξίας τους (Villa et al., 2016).

Σε ότι αφορά την ακρίβεια των αισθητήρων υπάρχουν μερικές εργασίες έρευνας της απόδοσής τους όπου ενδεικτικά αναφέρουμε τους Jiayu Li , et al 2020 .

Οι Fumian F. et al 2020 επίσης χρησιμοποίησαν ένα σύστημα UAV , με sensors χαμηλού κόστους σε συνδυασμό με ένα LIDAR εδάφους με ενδεικτικά αποτελέσματα κατακόρυφης κατανομής ρύπων.(Σχ.5)

Στην καταπληκτική εργασία τους οι Bolla G et al 2018 δίνουν ένα σημαντικό δρόμο εργασίας με τα σημεία προσοχής για την σωστή καταγραφή των δεδομένων:

- Ο συντονισμός της συλλογής δεδομένων και των κινήσεων είναι αρκετά δύσκολος, λαμβάνοντας υπόψη τη χαμηλή υπολογιστική ισχύ των UAV, την ακρίβεια του GPS και τα γενικά ασύρματα προβλήματα επικοινωνίας.
- Ο ενεργειακός περιορισμός επηρεάζει πραγματικά τις μεγάλες αποστολές και θέτει σημαντικό περιορισμό στη διάδοση της τεχνολογίας drone.
- Ένα UAV είναι πολύ περιορισμένο στην απόδοσή του λόγω της μικρής κάλυψης, της ενεργειακής αυτονομίας και της μικρής επιλογής αισθητήρων και προτείνουν σμήνη για πλήρη κάλυψη μιας περιοχής,
- Η πιο hot δραστηριότητα είναι η δημιουργία ενός κατακόρυφου προφίλ συγκεντρώσεων ρύπων για διάφορες χρονικές περιόδους.
- Μοντέλο drone: Το μοντέλο drone είναι καθοριστικός παράγοντας για την επιτυχία του έργου . Πολλές από τις φυσικές παραμέτρους του θα επηρεάσουν την ανίχνευση, την ευελιξία και την κατανάλωση μπαταρίας. Η σταθερότητα κατά τη μέτρηση του αέρα είναι απολύτως ζωτικής σημασίας. Εάν η επίδραση του ανέμου είναι πολύ υψηλή σε κάθε πλευρά του drone, απαιτείται η κατασκευή μιας επέκτασης (έως 20cm) που θα προσαρτηθεί με προσοχή για κατάλληλη εξισορρόπηση
- Αισθητήρες: Σε αστικό περιβάλλον, η συντριπτική πλειονότητα των ρύπων αποτελείται από τα ακόλουθα:
- Μονοξείδιο του άνθρακα (CO); ➤ Διοξείδιο του αζώτου (NO₂); ➤ Όζον (O₃);

- ➡ Διοξείδιο του θείου (SO₂);
- ➡ Σωματιδιακή ύλη (PM_{2.5} και PM₁₀)
- ➡ Μόλυβδος (Pb). Κάθε ένα από αυτά μπορεί να μετρηθεί από έναν αισθητήρα χαμηλού κόστους,
(Measuring air pollution with low-cost sensors Thoughts on the quality of data measured by sensors ,Further technical information about performance of sensors, :<http://dbairmontech.jrc.ec.europa.eu/search.aspx><http://www.aqmd.gov/aqspecht> <http://aqicn.org/sensorEU> Science Hub eu.europa.eu/jrc)
- ➡ Οι μετρήσεις του ρύπου πρέπει να γίνονται με τον τρόπο απομόνωσης του drone (σε στατική κατάσταση) ανα 5 m.(Σχ.6)

Με βάση τις αρχές σχεδιασμού των Xiaobing et al 2020 τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φασματομέτρου (MSRTF_UNIWA) είναι ένα κουτί βάρους (400g), (L × W × H, 22 × 15 × 10 cm) και μπαταρίας 9V. Το σύστημα αισθητήρων αποτελείται από ηλεκτροχημικούς αισθητήρες μέτρησης O₃, NO₂, SO₂, CO, έναν αισθητήρα σωματιδίων PM_{1.0}, PM_{2.5} και PM₁₀, αισθητήρες για θερμοκρασία αέρα, σχετική υγρασία (RH) , πίεση του αέρα και ταχύτητα αέρα και το GP2Y1010 της εταιρίας Sharp που αποτελείται από υπέρυθρη πηγή φωτός τύπου LED και φωτοδίοδο. Λόγω της ώθησης των ελίκων, κατά τη διάρκεια της κίνησης η μείωση της επίδρασης των περίπλοκων ροών αέρα πρέπει να εξισοροποιηθούν από ένα σωλήνα μήκους 10 cm στην είσοδο δείγματος αέρα κατά προτίμηση αφυγραντικός για να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση αέρα .Για την τροφοδοσία έχει επιλεγεί μια πλακέτα Arduino Uno, η οποία βασίζεται πάνω στον μικροελεγκτή ATmega328P της Atmel. Υποστηρίζει συνολικά 14 pins για είσοδο και έξοδο ψηφιακού σήματος, και 6 pins εισόδου αναλογικού σήματος, επιπλέον χρησιμοποιεί ένα κρύσταλλο χαλαζία με συχνότητα λειτουργίας στα 16 MHz, μία θύρα USB, τροφοδοσία jack, μια κεφαλή ICSP και ένα διακόπτη επανεκκίνησης.

Η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι ένα δυναμικό φαινόμενο που καθιστά δύσκολη την ανίχνευση και τον έλεγχο. Η δυσκολία εκφράζεται φυσικά από τη διάχυση και τη μεταφορά των εκπεμπόμενων ρύπων στην ατμόσφαιρα. Τα ατμοσφαιρικά αερολύματα είναι μια από τις μεγαλύτερες πηγές αβεβαιότητας στη μοντελοποίηση της κλιματικής αλλαγής, υπεύθυνη για την άμεση και έμμεση ακτινοβολήση . Παίζουν σημαντικό ρόλο

στις πολύπλοκες φυσικές και χημικές διεργασίες που εμπλέκονται στις φωτοχημικές αντιδράσεις που επηρεάζουν την ποιότητα του αέρα σε μολυσμένες περιοχές. Πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι οι διαδικασίες συσσωμάτωσης και πυρηνοποίησης μπορούν να συμβούν παντού (Kulmala, et al .2008) και ειδικά σε αστικές περιοχές, όπου συμβάλλουν στο σχηματισμό πρωτογενών και δευτερογενών οργανικών αερολυμάτων και στους τρόπους συμπύκνωσης και συσσώρευσης (Imhof, Det al 2005). Για όλους αυτούς τους λόγους, η μελέτη για την εκπομπή, τη μεταφορά και τον μετασχηματισμό αερολυμάτων στην τροπόσφαιρα και ιδιαίτερα στο Planetary Boundary Layer (PBL) έχει καταστεί βασικό ζήτημα για την ατμοσφαιρική χημεία, τις ατμοσφαιρικές έρευνες και για τη μοντελοποίηση της αλλαγής του κλίματος. Αποδεικνύεται ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση αλλάζει απότομα ακόμη και σε σχετικά μικρές αποστάσεις, τόσο οριζόντια όσο και κάθετα. Στόχος μας είναι να παράσχουμε ένα νέο εργαλείο για τη μελέτη της ποιότητας του αέρα σε διαφορετικά ύψη που θα μπορούσαν να αντέξουν λόγω χαμηλού κόστους εύκολα οι οργανισμοί τοπικής αυτοδιοίκησης και δευτερευόντως ακόμη και οι ιδιώτες πολίτες.

Οι συνήθεις τρόποι προσδιορισμού της ποιότητας του αέρα είναι η μέτρηση με τη βοήθεια σταθερών οργάνων. Ωστόσο, τα καθιερωμένα δίκτυα παρατήρησης στερούνται κινητικότητας περιορίζοντας τις δυνατότητες χαρτογράφησης της χωρικής κατανομής ατμοσφαιρικών ρύπων και κατανόησης της συμπεριφοράς που σχετίζεται με την τοπική τοπογραφία και το κλίμα.

Οι συνήθεις τρόποι είναι :

- προσδεδεμένο σύστημα μπαλονιών που δεν απαιτεί ελάχιστο υψόμετρο πτήσης και δίνει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να μετρηθεί το κατακόρυφο προφίλ ακριβώς πάνω από το έδαφος καθώς είναι πολύ ενδιαφέρον να μετράμε κοντά στο έδαφος επειδή ένα μεγάλο μέρος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης απελευθερώνεται κοντά στο έδαφος και δίνει τις μεγαλύτερες κατακόρυφες κλίσεις στη συγκέντρωση ρύπων.
- Αεροσκάφη που χρησιμοποιούνται κυρίως για τη διεξαγωγή μετρήσεων στο μεσαίο και στο μεγάλο υψόμετρο εύρους περίπου 1-10 km (Ding et al , 2009 , A. Samad et al 2020)
- Σταθεροί πύργοι καταγραφής όπου χρειάζεται ήδη οικοδομικό συγκρότημα κατοικιών ή γραφείων.

- Συστήματα λέιζερ (LIDAR) παρέχουν μια αναλυτική μέθοδο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τηλεπισκόπηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Το LIDAR βασίζεται στη φασματοσκοπία λέιζερ και επιτρέπει τη μέτρηση τόσο της χωρικής όσο και της χρονικής κατανομής ή της συγκέντρωσης επιλεγμένων μολυσματικών ενώσεων και του χαρακτηρισμού των εκπομπών ρύπων. Σε αυτό το πλαίσιο, η τηλεπισκόπηση Lidar μπορεί να παρέχει πολύτιμες πληροφορίες.

Τα κατακόρυφα προφίλ της ατμόσφαιρας με υψηλή χρονική και χωρική ανάλυση παρέχουν δυναμική οπτική απεικόνιση σε πραγματικό χρόνο του ύψους PBL και κατακόρυφα προφίλ αλλαγών στην πυκνότητα αερολύματος, τα οποία μπορούν να συγκριθούν με τις προβλέψεις μοντέλου. Ωστόσο, για να είναι χρήσιμη για την παρακολούθηση της ρύπανσης και για την παροχή των δεδομένων που απαιτούνται για την ανάπτυξη στρατηγικών μείωσης των εκπομπών, είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν μέθοδοι για την πραγματοποίηση ποσοτικών εκτιμήσεων της συγκέντρωσης αερολύματος στον αστικό θόλο και με αυτό το σκεπτικό οι A. Miffre , M. Abou Chacra , S. Geffroy , P. Rairoux , L. Soulhac , R.J. Perkins , E. Frejafon : Aerosol load study in urban area by Lidar and numerical model Atmospheric Environment 44 (2010) συσχέτισαν μετρήσεις UV-Lidar που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια ενός επεισοδίου χειμερινής αιθαλομίχλης με μετρήσεις συμβατικών οργάνων από ένα επίγειο δείγμα κοντά στο Lidar.

Οι πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις των UAV (drones) αποτελούν ευκαιρία για μια διερεύνηση της κατακόρυφης κατανομής των χαρακτηριστικών των ατμοσφαιρικών ρύπων και της διασποράς τους. Αρα η χρήση των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV), είναι ένα ανοιχτό ερευνητικό πεδίο για την παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μέσω αισθητήρων χαμηλού κόστους. (Miffre Aet al (2010) , Lange R et al 2016 , Bolla G., et al 2018).

Το προτεινόμενο σύστημα παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης αποτελείται από χαμηλού κόστους μετεωρολογικό εξοπλισμό και αισθητήρες ρύπων, καθώς και ένα LED Laser . Όλο το σύστημα περιέχει μια ψηφιακή κάρτα μνήμης (SD) για την αποθήκευση των δεδομένων εγγραφής. Τέλος, το προτεινόμενο σύστημα χαμηλού κόστους παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης επιτρέπει τη διερεύνηση και τη χαρτογράφηση του κατακόρυφου προφίλ συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικών ρύπων τουλάχιστον 120 μέτρων πάνω από το επίπεδο του εδάφους.

Τα συμβατικά συστήματα παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης έχουν χαμηλή χωρική και χρονική ανάλυση. Η χαμηλή χωρική ανάλυση σημαίνει ότι

υπάρχουν λίγα μόνο στοιχεία μέτρησης που έχουν αναπτυχθεί με μικρή κάλυψη. Αυτό οφείλεται στο απαγορευτικό κόστος των συσκευών. Η χαμηλή χρονική ανάλυση σημαίνει ότι η ανάλυση και η διάδοση των δεδομένων είναι αργή. Αυτό οφείλεται στην πολυπλοκότητα και το κόστος που σχετίζεται με την απαιτούμενη ακρίβεια. Τα συμβατικά συστήματα παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι κατάλληλα για μακρόχρονη παρακολούθηση του περιβάλλοντος.

Σε ότι αφορά τους αισθητήρες χαμηλού κόστους αυτοί μπορούν να αναπτυχθούν πιο διασκορπισμένα με υψηλή χωρική και χρονική ανάλυση, αναπληρώνοντας την ατέλεια της ακρίβειας τους. Είναι ένα εξαιρετικό εργαλείο για τη μέτρηση της έκθεσης στην ατμοσφαιρική ρύπανση. Τα δεδομένα τους πρέπει να αξιολογούνται κριτικά διότι επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από πολλούς παράγοντες, ιδίως από τη θερμοκρασία, την υγρασία, τον άνεμο και την παρουσία άλλων αερίων στον αέρα. Συνήθως τα δεδομένα που συλλέγονται από αισθητήρες χαμηλού κόστους είναι διαθέσιμα στο κοινό μέσω του διαδικτύου. Λόγω του ελαφρού βάρους τους, μόνο αισθητήρες χαμηλού κόστους μπορούν να τοποθετηθούν σε drone οπότε μαζί με τους προαναφερθέντες παράγοντες θα πρέπει να προστεθεί και ο αιολικός παράγοντας από τους ρότορες του drone(Εικ..). Οι Yi Wei et al. σε μια λεπτομερή έρευνα σχετικά με την παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, από ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χαμηλού κόστους περιγράφει τεχνικές ανίχνευσης αξιολογώντας ταυτόχρονα τους αισθητήρες με τις πιο σημαντικές παραμέτρους.

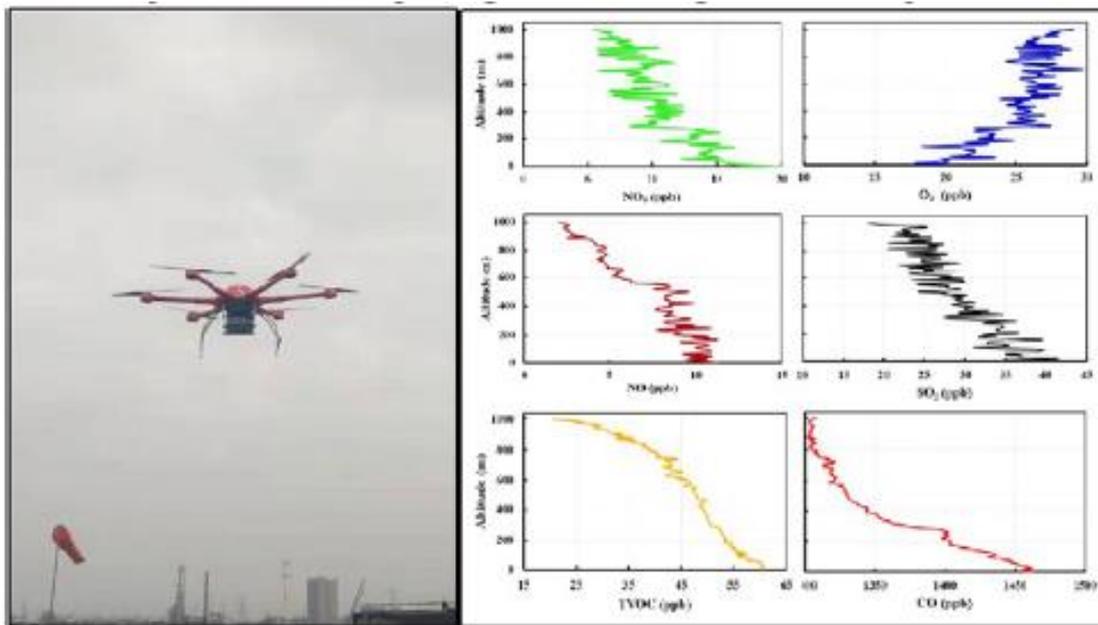
Σε ότι αφορά την πρόσφατη βιβλιογραφία οι αισθητήρες χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη

- της κάθετης μεταβλητότητας των ρύπων (Schuyler et al., 2019); (Villa et al., 2016),
- Του ατμοσφαιρικού αεροζόλ (Chiliński et al., 2018); (Liu et al., 2020),
- των μετεωρολογικών παραμέτρων (Kimball et al., 2020).

Τα UAV μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε περιοχές που συνήθως είναι δύσκολο να προσεγγιστούν με παραδοσιακές μεθόδους λόγω της εύκολης ευελιξίας τους (Villa et al., 2016).

Σε ότι αφορά την ακρίβεια των αισθητήρων υπάρχουν μερικές εργασίες έρευνας της απόδοσής τους όπου ενδεικτικά αναφέρουμε τους Jiayu Li , et al 2020 .

Οι Fumian F. et al 2020 επίσης χρησιμοποίησαν ένα σύστημα UAV , με sensors χαμηλού κόστους σε συνδυασμό με ένα LIDAR εδάφους με ενδεικτικά αποτελέσματα κατακόρυφης κατανομής ρύπων.



Εικόνα 12 UAV με σένσορες χαμηλού κόστους και ενδεικτικά αποτελέσματα Fumian et al 2020

Στην αξιολόγηση εργασία τους οι Bolla G et al 2018 δίνουν σημαντικές αρχές εργασίας για την σωστή καταγραφή των δεδομένων:

- Ο συντονισμός της συλλογής δεδομένων και των κινήσεων είναι αρκετά δύσκολος, λαμβάνοντας υπόψη τη χαμηλή υπολογιστική ισχύ των UAV, την ανακρίβεια του GPS και τα γενικά ασύρματα προβλήματα επικοινωνίας.
- Ο ενεργειακός περιορισμός επηρεάζει πραγματικά τις μεγάλες αποστολές και θέτει σημαντικό περιορισμό στη διάδοση της τεχνολογίας drone.
- Ένα UAV είναι πολύ περιορισμένο στην απόδοσή του λόγω της μικρής κάλυψης, της ενεργειακής αυτονομίας και της μικρής επιλογής αισθητήρων και προτείνουν σμήνη για πλήρη κάλυψη μιας περιοχής,
- Η πιο hot δραστηριότητα είναι η δημιουργία ενός κατακόρυφου προφίλ συγκεντρώσεων ρύπων για διάφορες χρονικές περιόδους.
- Το μοντέλο drone είναι καθοριστικός παράγοντας για την επιτυχία του έργου. Πολλές από τις φυσικές παραμέτρους του θα επηρεάσουν την ανίχνευση, την ευελιξία και την κατανάλωση μπαταρίας. Η σταθερότητα κατά τη μέτρηση του αέρα είναι απολύτως ζωτικής σημασίας. Εάν η επίδραση του ανέμου είναι πολύ υψηλή σε κάθε πλευρά του drone, απαιτείται η κατασκευή μιας επέκτασης (έως 20cm) που θα προσαρτηθεί με προσοχή για κατάλληλη εξισορρόπηση
- Αισθητήρες: Σε αστικό περιβάλλον, η συντριπτική πλειονότητα των ρύπων αποτελείται από τα ακόλουθα: Μονοξείδιο του άνθρακα (CO); Διοξείδιο του

αζώτου (NO₂); Όζον (O₃); Διοξείδιο του θείου (SO₂); Σωματιδιακή ύλη (PM_{2.5} και PM₁₀) Μόλυβδος (Pb). Κάθε ένα από αυτά μπορεί να μετρηθεί από έναν αισθητήρα χαμηλού κόστους, (Measuring air pollution with low-cost sensors Thoughts on the quality of data measured by sensors ,Further technical information about performance of sensors,;http://dbairmontech.jrc.ec.europa.eu/search.aspxhttp://www.aqmd.gov/aqspechhttp://aqicn.org/sensorEU Science Hubeu.europa.eu/jrc)

- ➡ Οι μετρήσεις του ρύπου πρέπει να γίνονται με τον τρόπο απομόνωσης του drone (σε στατική κατάσταση).

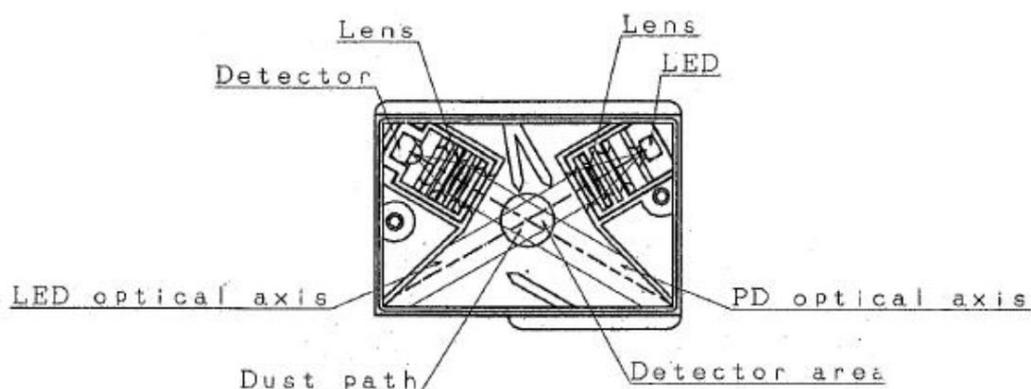
Εμείς με βάση τις αρχές σχεδιασμού των Xiaobing et al 2020 σχεδιάσαμε ένα κουτί βάρος (0,5 kg), (L × W × H, 22 × 10 × 5 cm). Το σύστημα αισθητήρων αποτελείται από έναν αισθητήρα σωματιδίων PM_{1.0}, PM_{2.5} και PM₁₀, αισθητήρες για θερμοκρασία αέρα, σχετική υγρασία (RH) , και το GP2Y1010 της εταιρίας Sharp που αποτελείται από υπέρυθρη πηγή φωτός τύπου LED και φωτοδίοδο. Λόγω της ώθησης των ελίκων, κατά τη διάρκεια της κίνησης η μείωση της επίδρασης των περίπλοκων ροών αέρα πρέπει να εξισοροπηθούν θέτοντας το κουτί στο κέντρο του κάτω μέρους του UAV . Για την τροφοδοσία και την επικοινωνία – οδήγηση έχει επιλεγεί μια πλακέτα **Arduino Uno**, η οποία βασίζεται πάνω στον **μικροελεγκτή ATmega328P της Atmel**. Υποστηρίζει συνολικά 14 pins για είσοδο και έξοδο ψηφιακού σήματος, και 6 pins εισόδου αναλογικού σήματος, επιπλέον χρησιμοποιεί ένα κρύσταλλο χαλαζία με συχνότητα λειτουργίας στα 16MHz, μία θύρα USB, τροφοδοσία jack, μια κεφαλή ICSP και ένα διακόπτη επανεκκίνησης. Η συνολική διάταξη περιλαμβάνει την πλακέτα η οποία παίρνει τροφοδοσία 5V από powerbank.

4.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Αρχικά ο ανιχνευτής που χρησιμοποιήσαμε για τις μετρήσεις είναι το μοντέλο GP2Y1010 της εταιρίας Sharp και αποτελείται από δύο βασικά στοιχεία. **Μια υπέρυθρη πηγή φωτός τύπου LED και μια φωτοδίοδο**. Καθώς η πηγή παράγει φως το οποίο εστιάζεται κατάλληλα με τη χρήση φακών, σκεδάζεται πάνω στα αιωρούμενα σωματίδια και στη συνέχεια προσπίπτει πάνω σε μια φωτοδίοδο αφότου περάσει μέσα από διαδοχικούς φακούς ώστε να επαναεστιαστεί. Η φωτοδίοδος παράγει ένα ρεύμα του οποίου η διαφορά δυναμικού είναι ανάλογη του προσπίπτοντος φωτός, συνεπώς

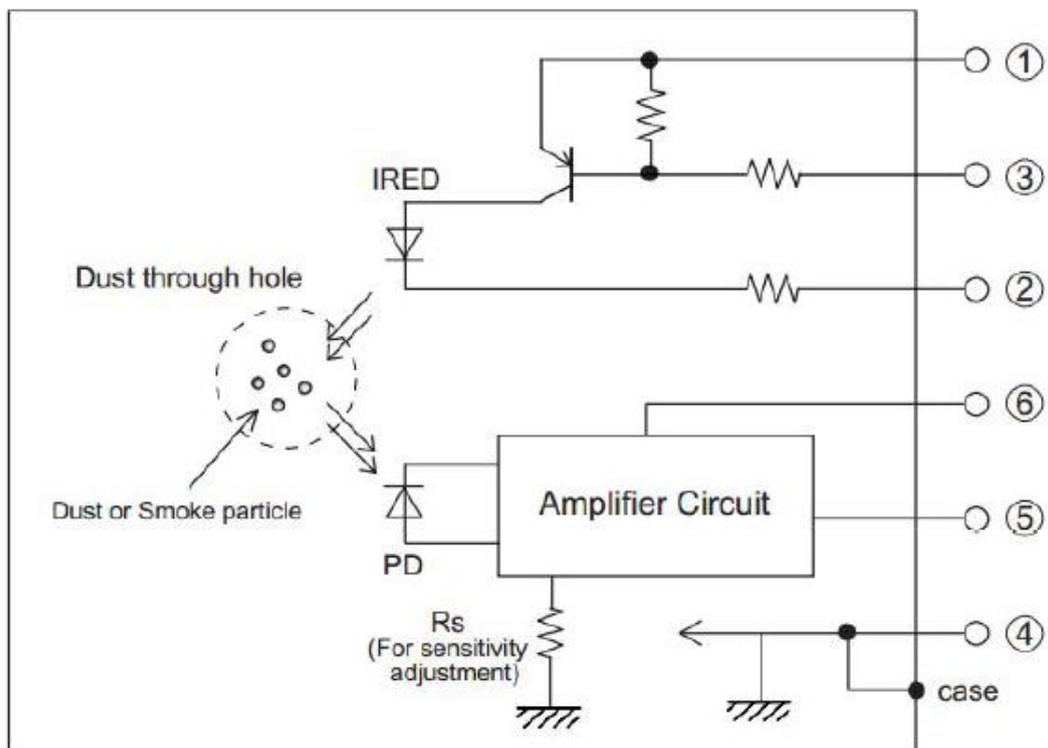
της πυκνότητας των αιωρούμενων σωματιδίων. Τέλος, το σήμα που επιστρέφει ο ανιχνευτής μετατρέπεται σε τάση Volt.

Ο ανιχνευτής που θα χρησιμοποιήσουμε για τις μετρήσεις είναι το μοντέλο GP2Y1010 της εταιρίας Sharp και αποτελείται από δύο βασικά στοιχεία. Μια υπέρυθρη πηγή φωτός τύπου LED και μια φωτοδίοδο. Καθώς η πηγή παράγει φως το οποίο εστιάζεται κατάλληλα με τη χρήση φακών, σκεδάζεται πάνω στα αιωρούμενα σωματίδια και στη συνέχεια προσπίπτει πάνω σε μια φωτοδίοδο αφού περάσει μέσα από διαδοχικούς φακούς ώστε να επαναεστιαστεί. Η φωτοδίοδος παράγει ένα ρεύμα του οποίου η διαφορά δυναμικού είναι ανάλογη του προσπίπτοντος φωτός, συνεπώς της πυκνότητας των αιωρούμενων σωματιδίων. Τέλος, το σήμα που επιστρέφει ο ανιχνευτής αποτελείται από το ρεύμα που παράγει η φωτοδίοδος, αφού πρώτα ενισχυθεί από έναν ενισχυτή τάσης.



Εικόνα 13 Βασικά στοιχεία ανιχνευτή (Διπλωματική ΕΜΠ .Μαλανδράκης)

ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ

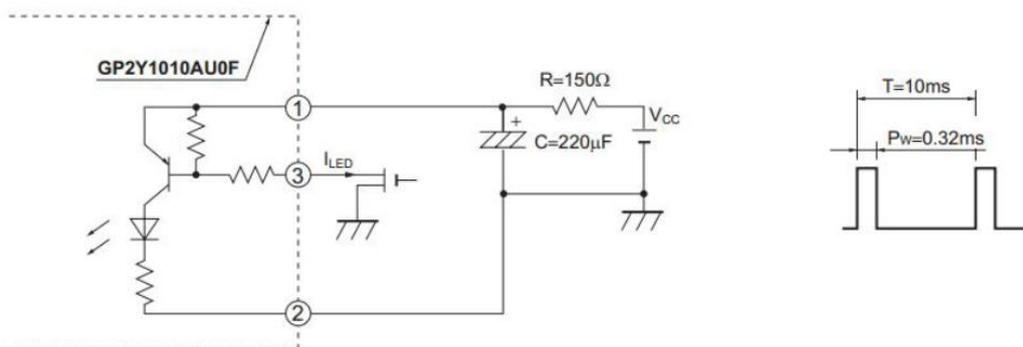


Εικόνα 14 Εσωτερική συνδεσμολογία ανιχνευτή (Διπλωματική Μαλανδράκης)

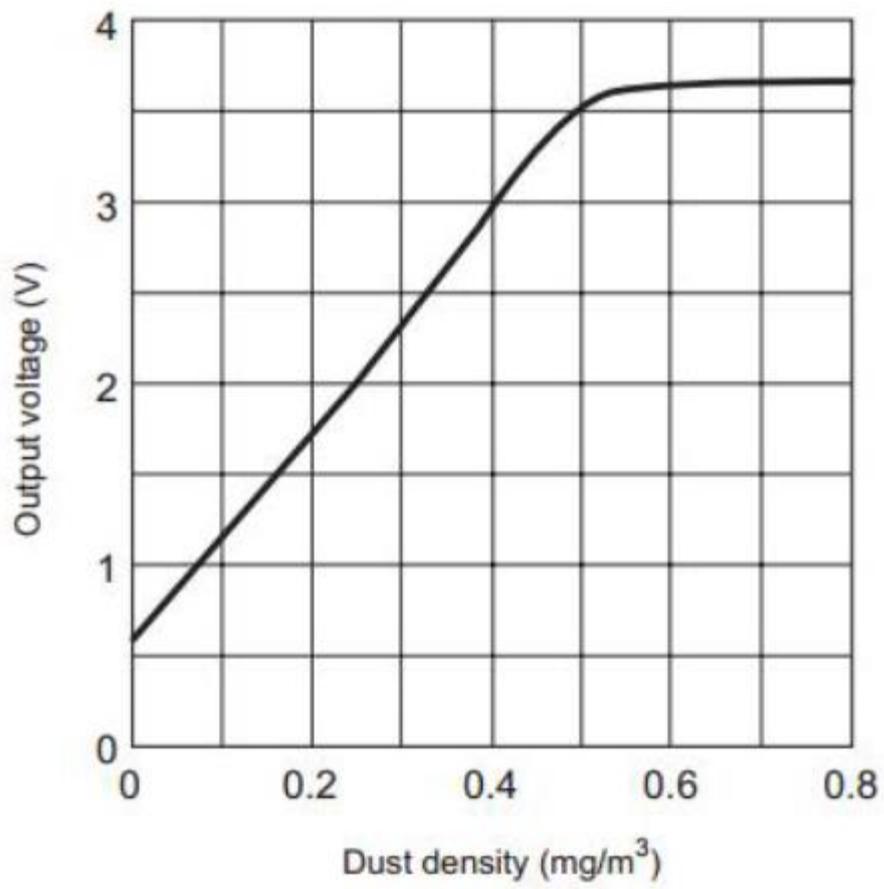
1-V LED
2-LED GND
3-LED
4-S GND
5-V0
6-VCC

ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	46X30X18mm
ΜΕΓΕΘΟΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΙΜΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	< 10μm
VOLT ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	5V
ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ	<20mA
ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΙΜΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ	6mg/m ³
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	-10 ⁰ C<T<65 ⁰ C
ΥΓΡΑΣΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	<95%
ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ	0,35-0,65V(100μg/m ³)
ΕΞΕΡΧΟΜΕΝΟ ΣΗΜΑ	Αναλογικό
ΚΟΣΤΟΣ	30-40 ΕΥΡΩ

Πίνακας 4-1: Τεχνικές προδιαγραφές ανιχνευτή



Εικόνα 15 Κύκλωμα εισόδου τάσης -ρεύματος (Διπλωματική ΕΜΠ ΜΑΛΑΝΔΡΑΚΗΣ)



Εικόνα 16 Σχέση συγκέντρωσης ρύπων και τάσης

5 Η ΠΛΑΚΕΤΑ ARDUINO

Για τη συνδεσμολογία του ανιχνευτή με μια σταθερή διαφορά δυναμικού και την καταγραφή των δεδομένων του χρησιμοποιήθηκε ένας μικροελεγκτής Arduino. Το Arduino είναι μια απλή μητρική πλακέτα ανοικτού κώδικα με ενσωματωμένο μικροελεγκτή και εισόδους/εξόδους, η οποία μπορεί να προγραμματιστεί με τη γλώσσα Wiring, που ουσιαστικά πρόκειται για τη γλώσσα προγραμματισμού C++ και ένα σύνολο από βιβλιοθήκες, υλοποιημένες επίσης στην C++. Το Arduino μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη ανεξάρτητων διαδραστικών αντικειμένων αλλά και να συνδεθεί με υπολογιστή.

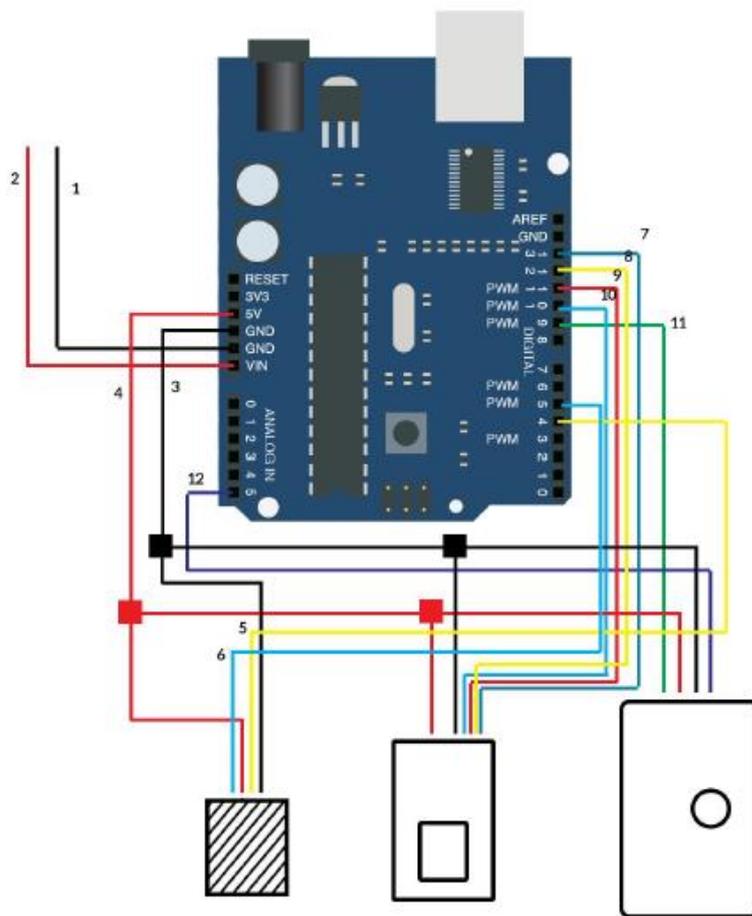
Για τις ανάγκες του συγκεκριμένου πειράματος χρησιμοποιήθηκε η πλακέτα Arduino Uno, η οποία βασίζεται πάνω στον μικροελεγκτή ATmega328P της Atmel. Υποστηρίζει συνολικά 14 pins για είσοδο και έξοδο ψηφιακού σήματος, και 6 pins εισόδου αναλογικού σήματος, επιπλέον χρησιμοποιεί ένα κρύσταλλο χαλαζία με συχνότητα λειτουργίας στα 16MHz, μία θύρα USB, τροφοδοσία jack, μια κεφαλή ICSP και ένα διακόπτη επανεκκίνησης. Στον πίνακα 4-2 αναφέρουμε επιγραμματικά τα χαρακτηριστικά της πλακέτας.

5.1 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΠΑΝΩ ΣΤΗΝ ΠΛΑΚΕΤΑ ARDUINO

Η συνολική διάταξη περιλαμβάνει την πλακέτα η οποία παίρνει τροφοδοσία 5V από το UAV, με τη σειρά της αυτή δίνει τροφοδοσία 5V στον ανιχνευτή ο οποίος επιστρέφει ένα ενισχυμένο αναλογικό σήμα εξόδου. Αυτό το αναλογικό σήμα το εισάγουμε στον μικροελεγκτή ο οποίος το επεξεργάζεται, το μετατρέπει σε ψηφιακή έξοδο και το καταγράφει σε μία κάρτα SD, όπου είναι συνδεδεμένη πάνω στην πλακέτα μαζί με τα δεδομένα θερμοκρασίας και υγρασίας που παίρνει από δύο ανιχνευτές που είναι επίσης συνδεδεμένοι πάνω στην πλακέτα. Στο σχήμα φαίνονται τα βασικά σημεία αυτής της συνδεσμολογίας.

1. Καλώδια ψηφιακού σήματος από τους αισθητήρες υγρασίας και θερμοκρασίας προς το μικροελεγκτή
2. Τροφοδοσία και αναλογικό σήμα εξόδου του σένσορα
3. Υποδοχή εισόδου αέρα μέσα στο σένσορα
4. Υποδοχή κάρτας SD για την καταγραφή των δεδομένων

5. Καλώδια τροφοδοσίας της διάταξης από εξωτερική πηγή
6. Τροφοδοσία τάσης 5V από την πλακέτα για τους αισθητήρες, την υποδοχή της κάρτας μνήμης και το σένσορα
7. Υποδοχή καλωδίου USB-B για σύνδεση με υπολογιστή
8. Κουμπί επανεκκίνησης πλακέτας
9. Μικροελεγκτής
10. Σύνδεση υποδοχής της κάρτας SD με το μικροελεγκτή
11 Digital input
12 Analog output



H/T	SD	SENSOR
-----	----	--------

Η διαδικασία βαθμονόμησης είναι σημαντική και αποτελείται από τρία βασικά στάδια. Αρχικά είναι η συλλογή των δεδομένων. Αυτό που κάνουμε σε αυτό το στάδιο είναι

παράλληλες μετρήσεις της ανιχνευτικής μας διάταξης μαζί με κάποιο άλλο όργανο αναφοράς, ώστε να μπορέσουμε να κάνουμε στη συνέχεια τη σύγκριση μεταξύ των δύο οργάνων. Για να το πετύχουμε αυτό, τα χαρακτηριστικά που χρειαζόμαστε κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης είναι:

1. Τα δύο όργανα μετράνε τις ίδιες συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών ρύπων, το οποίο συνεπάγεται μια ομοιόμορφη κατανομή τους μέσα στο χώρο και τα δύο όργανα να είναι κοντά μεταξύ τους.
2. Οι μετρήσεις να περιλαμβάνουν συγκεντρώσεις που καλύπτουν μεγάλο εύρος τιμών (δηλ. από πολύ μικρές έως πολύ μεγάλες συγκεντρώσεις σωματιδίων).
3. Οι συγκεντρώσεις να διατηρούνται σε όσο γίνεται πιο χαμηλά επίπεδα κοντά σε αυτά των καθημερινών (μέσος όρος συγκεντρώσεων PM10 στην Αθήνα $\approx 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Στο δεύτερο στάδιο κάναμε την ανάλυση και τμηματοποίηση των δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά αντιστοιχούν στο χρόνο, στη θερμοκρασία, στην υγρασία και τα δεδομένα τάσης εξόδου (volt) του ανιχνευτή και τα συγκρίνουμε με τα δεδομένα του οργάνου αναφοράς για το αντίστοιχο χρονικό διάστημα της κάθε μέτρησης. Ο μικροελεγκτής του κυκλώματος καταγράφει δεδομένα ανά δευτερόλεπτο, επομένως ο σκοπός ήταν να πάρουμε το μέσο όρο των μετρήσεων και να τα τμηματοποιήσουμε τόσο ,όσο χρειάζεται το όργανο αναφοράς ώστε τα δεδομένα να μπορούν να είναι συγκρίσιμα. Με αυτό τον τρόπο αυξάνουμε την ακρίβεια των μετρήσεων ως προς τη συγκέντρωση μάζας, αλλά χάνουμε πληροφορία ως προς τη χρονική τους ακρίβεια. Σε αυτό το στάδιο συμπεριλαμβάνεται και η απομάκρυνση των δεδομένων τα οποία απέχουν αρκετά από τις αναμενόμενες μετρήσεις..

Στο τρίτο και τελευταίο βήμα συγκεντρώνουμε μαζί όλα τα δεδομένα μάζας από το όργανο αναφοράς και τάσης από την ανιχνευτική μας διάταξη που αντιστοιχούν σε ένα συγκεκριμένο και κοινό χρονικά διάστημα και βρίσκουμε μια βέλτιστη καμπύλη που να περνάει από αυτά τα σημεία με τα ελάχιστα σφάλματα. Στην περίπτωσή μας προσεγγιστικά αυτή η καμπύλη αντιστοιχεί σε μια πολυωνυμική εξίσωση πρώτου βαθμού.

Για τον υπολογισμό της ακρίβειας των παρακάτω μετρήσεων και για τις βέλτιστες καμπύλες που προκύπτουν από αυτά χρησιμοποιήσαμε δύο βασικούς στατιστικούς δείκτες.

Ο πρώτος προκύπτει από το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων (SSE) ως:

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2$$

Όπου το y_i αντιστοιχεί στα δεδομένα της κάθε μέτρησης, ενώ το \hat{y} στα προβλέψιμα δεδομένα που προκύπτουν από τη βέλτιστη καμπύλη που υπολογίζουμε σε κάθε μέτρηση (30).

Ένας δεύτερος στατιστικός δείκτης που θα χρησιμοποιήσουμε είναι ο *R-square*. Για το δείκτη αυτό αρχικά θα ορίσουμε μια επιπλέον στατιστική έννοια, το συνολικό άθροισμα τετραγώνων, το οποίο ορίζεται από τη σχέση:

$$SStot = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

Με \bar{y} τη μέση τιμή των μετρήσιμων τιμών:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

Ο δείκτης *R-square* προκύπτει από τα παραπάνω ως:

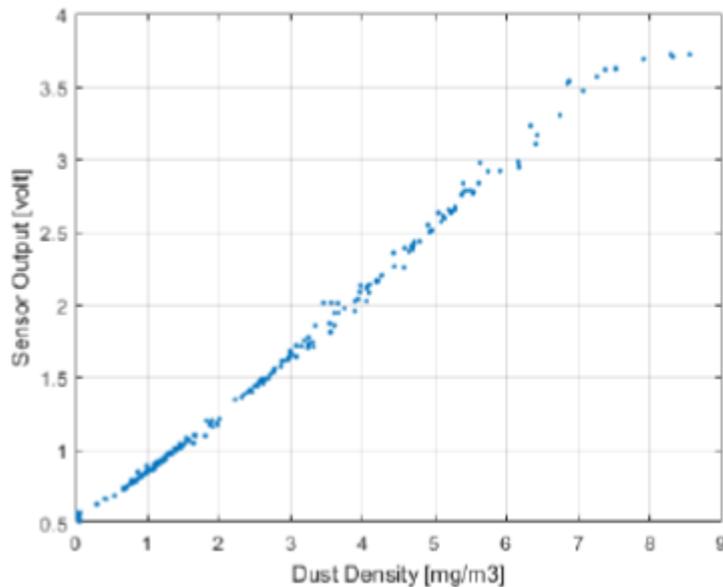
$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SStot}$$

Ο δείκτης αυτός χρησιμοποιείται για να καθορίσουμε πόσο καλά ταιριάζει μια προβλέψιμη καμπύλη στα πειραματικά δεδομένα. Αντιπροσωπεύει το ποσοστό διακύμανσης μίας εξαρτημένης μεταβλητής η οποία προκύπτει ως συνάρτηση κάποιων άλλων ανεξάρτητων μεταξύ τους μεταβλητών (31).

5.1.1 Γενική απόκριση του ανιχνευτή

Στην εικόνα φαίνεται η συνολική συμπεριφορά του. Τα στοιχεία που μας ενδιαφέρουν για τη συνέχεια της βαθμονόμησης είναι:

1. Το εύρος λειτουργίας του είναι περίπου από 0,5 μέχρι 4 volt
2. Για μικρές συγκεντρώσεις η απόκριση του είναι γραμμική
3. Μετά τα 7 mg/m³ φτάνει σε σημείο κορεσμού



Εικόνα 17 Διάγραμμα απόκρισης πρότυπης ανιχνευτικής συσκευής (Διπλωματική Μαλανδράκης)

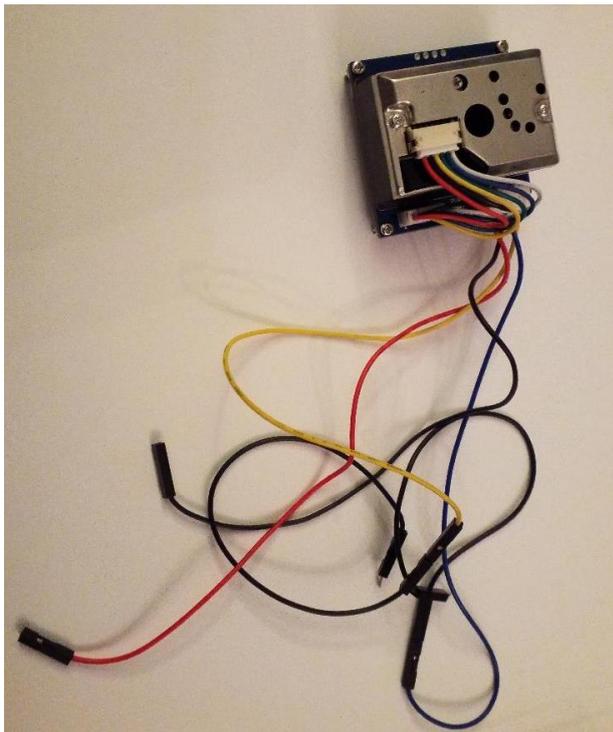
5.2 Αισθητήρας και μικροελεγκτής για μέτρηση PM αέρα

Η χρήση μικροελεγκτών στα συστήματα παρακολούθησης αέρα έχει αυξηθεί σημαντικά. Η άμεση διαθεσιμότητα φθηνών, απαιτητικών και μικροσκοπικών ενσωματωμένων επεξεργαστών, που συχνά ενσωματώνονται σε ένα μόνο τσιπ, οδηγεί στην ταχεία ανάπτυξη φορητών οθονών αέρα και κατανεμημένων δικτύων παρακολούθησης. Εκτός από αισθητήρες ποιότητας αέρα, άλλοι αισθητήρες που είναι χρήσιμοι (δίκτυα παρακολούθησης) περιλαμβάνουν σεισμικούς, μαγνητικούς, θερμικούς, οπτικούς, υπέρυθρους, ακουστικούς και ραντάρ αισθητήρες. Σήμερα, ακόμη και ένα απλό σύστημα παρακολούθησης αέρα μπορεί να απαιτεί ενσωμάτωση διαφόρων ηλεκτρονικών και πνευματικών στοιχείων: μικροελεγκτή, αισθητήρες αερίου, μονάδα GPS/GPRS, πομποδέκτης δεδομένων, κύκλωμα ρυθμιστή ρεύματος, ADC (αναλογικός σε ψηφιακός μετατροπέας) LED (Al -Haija, Al-Qadeeb, & Al Lwaimi, 2013).

5.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Ο ανιχνευτής που θα χρησιμοποιήσουμε για τις μετρήσεις είναι το μοντέλο GP2Y1010 της εταιρίας Sharp και αποτελείται από δύο βασικά στοιχεία. Μια υπέρυθη πηγή φωτός τύπου LED και μια φωτοδίοδο. Καθώς η πηγή παράγει φως το οποίο εστιάζεται κατάλληλα με τη χρήση φακών, σκεδάζεται πάνω στα αιωρούμενα σωματίδια και στη

συνέχεια προσπίπτει πάνω σε μια φωτοδίοδο αφότου περάσει μέσα από διαδοχικούς φακούς ώστε να επαναεστιαστεί. Η φωτοδίοδος παράγει ένα ρεύμα του οποίου η διαφορά δυναμικού είναι ανάλογη του προσπίπτοντος φωτός, συνεπώς της πυκνότητας των αιωρούμενων σωματιδίων. Τέλος, το σήμα που επιστρέφει ο ανιχνευτής αποτελείται από το ρεύμα που παράγει η φωτοδίοδος, αφού πρώτα ενισχυθεί από έναν ενισχυτή τάσης.



Εικόνα 18 Ανιχνευτής Sharp (SHARP CO)

Για τη συνδεσμολογία του ανιχνευτή με μια σταθερή διαφορά δυναμικού και την καταγραφή των δεδομένων του χρησιμοποιήθηκε ένας μικροελεγκτής Arduino. Το Arduino είναι μια απλή μητρική πλακέτα ανοικτού κώδικα με ενσωματωμένο μικροελεγκτή και εισόδους/εξόδους, η οποία μπορεί να προγραμματιστεί με τη γλώσσα Wiring, που ουσιαστικά πρόκειται για τη γλώσσα προγραμματισμού C++ και ένα σύνολο από βιβλιοθήκες, υλοποιημένες επίσης στην C++. Το Arduino μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη ανεξάρτητων διαδραστικών αντικειμένων αλλά και να συνδεθεί με υπολογιστή. Για τις ανάγκες του συγκεκριμένου πειράματος

χρησιμοποιήθηκε η πλακέτα Arduino Uno, η οποία βασίζεται πάνω στον μικροελεγκτή ATmega328P της Atmel. Υποστηρίζει συνολικά 14 pins για είσοδο και έξοδο ψηφιακού σήματος, και 6 pins εισόδου αναλογικού σήματος, επιπλέον χρησιμοποιεί ένα κρύσταλλο χαλαζία με συχνότητα λειτουργίας στα 16 MHz, μία θύρα USB, τροφοδοσία jack, μια κεφαλή ICSP και ένα διακόπτη επανεκκίνησης. Στον πίνακα 4-2 αναφέρουμε επιγραμματικά τα χαρακτηριστικά της πλακέτας

ΠΙΝΑΚΑΣ 8 Χαρακτηριστικά ελεγκτή

MICROCONTROLLER	ATMEGA328P
OPERATING VOLTAGE	5V
INPUT VOLTAGE	7-12VOLT
DIGITAL PINS	14
PWM DIGITAL PINS	6
ANALOG INPUT PINS	6
DC CURRENT PIN	20-50mA
FLASH MEMORY	32KB
SRAM	2KB
EPROM	1KB
CLOCK	16MHz
LENGTH	68,6mm



Εικόνα 19 Sensors LIDAR HEIGHT , HUMIDITY , TEMPERATURE (GARMIN CO)



Εικόνα 20 Σένσορας και οι βελτιώσεις του

Σχόλιο:

Οι μετρήσεις με τον σένσορα της SHARP παρουσίασαν αρκετά ελαττώματα με κύρια την κακή απόκριση σε αλλαγές ρύπανσης και την προβληματικότητα στις ενδείξεις οι οποίες δεν ξεπερνούσαν το 1, δηλ φαινοταν να θέλει συνεχώς στο πρόγραμμα έναν πολλαπλασιαστικό παράγοντα ανάλογο με την ένταση της ρύπανσης. Δευτερευόντως παρουσίασε προβληματικότητα στην συνδυαστικότητα με το ύψος.

Ως εκ τούτου μια ενδιαμέση λύση θα μπορούσε να αποτελέσει σύμφωνα με την βιβλιογραφία μια βιντεοκάμερα που δείχνει την ορατότητα σε κάθε ύψος, που εμείς την βελτιώσαμε εγκαθιστώντας μαζί με την βιντεοκάμερα και ένα sensor της PLANTOWER.



ΕΙΚ 4.14 .ΕΞΕΛΙΞΗ
 ΙΔΙΟΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ. συσκευή της
 plantower με οθόνη ,
 και POWERBANK
 action camera για καταγραφή
 video και μεταφορά
 πληροφορίας απο την οθόνη

Τα χαρακτηριστικά του PMS6003 sensor PM της PLANTOWER φαίνονται στον πιο κάτω πίνακα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 9 . PMS6003 sensor PM της PLANTOWER

Parameter	Index	Unit
Particle Range of measurement	0.3~1.0; 1.0~2.5; 2.5~10	Micrometer (μm)
Particle Counting Efficiency	50%@0.3μm 98%@≥0.5μm	
Particle Effective Range (PM2.5 standard)	0~500	μg/m ³
Particle Maximum Range (PM2.5 standard) *	≥1000	μg/m ³
Particle Resolution	1	μg/m ³
Particle Maximum Consistency Error (PM2.5 standard data)*	±10%@100~ 500μg/m ³ ±10μg/m ³ @0~100μg/m ³	
Particle Standard Volume	0.1	Litre (L)
Single Response Time	<1	Second (s)

Total Response Time	<10	Second (s)
DC Power Supply	Typ : 5.0 Min:4.5 Max:5.5	Volt (V)
Active Current	≤100	Milliampere (mA)
Standby Current	≤200	Milliampere (mA)
Interface Level	L<0.8 @3.3 H>2.7@3.3	Volt (V)
Working Temperature Range	-10~+60	°C
Working Humidity Range	0~95% (No condensation)	
Storage Temperature Range	-40~+85	°C
MTTF	≥10	Year
Physical Size	50mm×38mm×21mm	mm

Η μέτρηση του ύψους γίνεται με το σύστημα του GPS λόγω της καταγραφής της εικόνας με τρόπο χειροκίνητο , συνεπώς δεν είναι υψηλής ακρίβειας.

Στην συνέχεια μου εδόθησαν από το ΠΑΔΑ δύο sensors της PurpleAir PA-II με τα κατωτέρω χαρακτηριστικά.

ΠΙΝΑΚΑΣ 10. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ sensor της PurpleAir PA-II

Classic PurpleAir dual laser particulate sensor	
Dimensions	3.5 in x 3.5 in x 5 in (85 mm x 85 mm x 125 mm)
Color	White
Power requirements	5V USB Micro, 0.18A continuous, 600mA peak
Intended Use	Outdoor and indoor use
WiFi	Yes
Expansion Port	No
Internal Storage	No
Laser Particle Counters	
Class 1 Laser. A Class 1 laser is safe under all conditions of normal use.	
Manufacturer	Plantower
This device contains two particle detectors to provide redundancy and help determine sensor health.	
Type	PMS-5003 (2)
Range of measurement	0.3, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0, & 10 μm
Counting efficiency	50% at 0.3μm & 98% at ≥0.5μm
Effective range (PM2.5 standard)*	0 to 500 μg/m ³

Maximum range (PM2.5 standard)*	≥1000 µg/m ³
Maximum consistency error (PM2.5 standard)	±10% at 100 to 500µg/m ³ & ±10µg/m ³ at 0 to 100µg/m ³
Standard Volume	0.1 liter
Single response time	≤1 second
Total response time	≤10 seconds

Pressure, Temperature, & Humidity Sensor	
---	--

Manufacturer	BOSCH
Model Number	BME280
Temperature range	-40°F to 185°F (-40°C to 85°C)
Pressure range	300 to 1100 hPa
Humidity	Response time (τ63%): 1s Accuracy tolerance: ±3% RH Hysteresis: ≤2% RH

Outdoor Power Supply	
-----------------------------	--

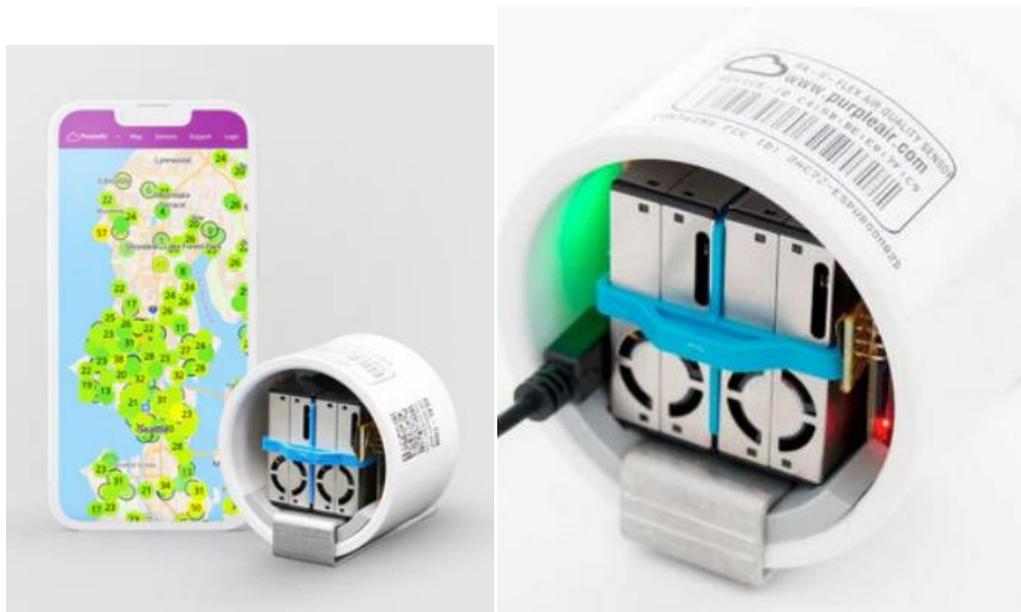
Manufacturer	GlobTek, Inc
Model Number	GTM91120-1507.5-2.5-P2
Weight	12.6oz (357g)
AC Input	100-240V AC, 50/60Hz, 1.5A
DC Output	5V USB Micro, 3A (15W)
Power supply length	AC side: 12 feet, DC side: 5 feet
Weather resistance	IP68
Plug type	2 Pins, Type A (USA)

Wireless	
-----------------	--

Contains Transmitter Module FCC ID: 2AC7Z-ESPWROOM02D	
---	--

Wireless Networks	802.11b/g/n @ 2.4GHz (WPA2 pre-shared key or open networks)
Certificates	FCC/CE/TELEC/SRRC
Tx Power	802.11 b: +20 dBm 802.11 g: +17 dBm 802.11 n: +14 dBm
Rx Sensitivity	802.11 b: -91 dbm (11 Mbps) 802.11 g: -75 dbm (54 Mbps) 802.11 n: -72 dbm (MCS7)
Antenna Type	2 dBi on-board PCB antenna

Τονίζουμε ότι και στο εμπορικό Outdoor Air Quality Monitor / PurpleAir PA-II το laser και η κατασκευή του sensor είναι της PLANTOWER.



Εικόνα 21 PM outdoor air quality Monitor Purple Aiδr 2 (PURPLEAIR)

Το εμπορικό κομμάτι Purple Air PA-II της Purple Air έχει δυο PMS6003 sensor PM της PLANTOWER

Και το δικό της σύστημα καταγραφής με κάρτα sd και δυνατότητα καταγραφής σε real time mode με προϋπόθεση ότι το σύστημα είναι σταθερό και δεν κινείται προς τα πάνω όπως συμβαίνει στο δικό μας πείραμα. Έχει επιπλέον και sensor πίεσης πλην όμως υστερεί λόγω μη καταγραφής του ύψους αφού έχει στηθεί μόνο για σταθερή καταγραφή. Συνεπώς το ύψος καταγράφεται πάλι έμμεσα με την βοήθεια χρονομέτρων με συντονισμό του χρονομέτρου του UAV και του χρονομέτρου ενός κινητού τηλεφώνου και του χρονομέτρου του PurpleAir PA-II επειδή και τα τρία ξεκινούν ταυτόχρονα και το ύψος φαίνεται στην οθόνη οδήγησης του UAV. Προφανώς η καταγραφή του ύψους είναι αβέβαια ακριβής.

Επιπλέον η έλλειψη μέτρησης ύψους συνοδεύεται σε όλες τις εμπορικές εφαρμογές με έλλειψη μέτρησης ταχύτητας. Άρα ένας τέλειος συνδυασμός θα ήταν η ταυτόχρονη μέτρηση των πιο κάτω μεγεθών.

ΧΡΟΝΟΣ	s
ΥΨΟΣ	m
ΠΙΕΣΗ	mbar
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	C
ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ	%
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ	m/S
PM 1, 2,5 , 10	μg/m ³

5.4 ΕΞΕΛΙΞΗ ΠΑΡΕΜΒΑΣΗ ΙΔΙΟΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΑΠΟΚΤΗΘΕΙΣΑ ΕΜΠΕΙΡΙΑ

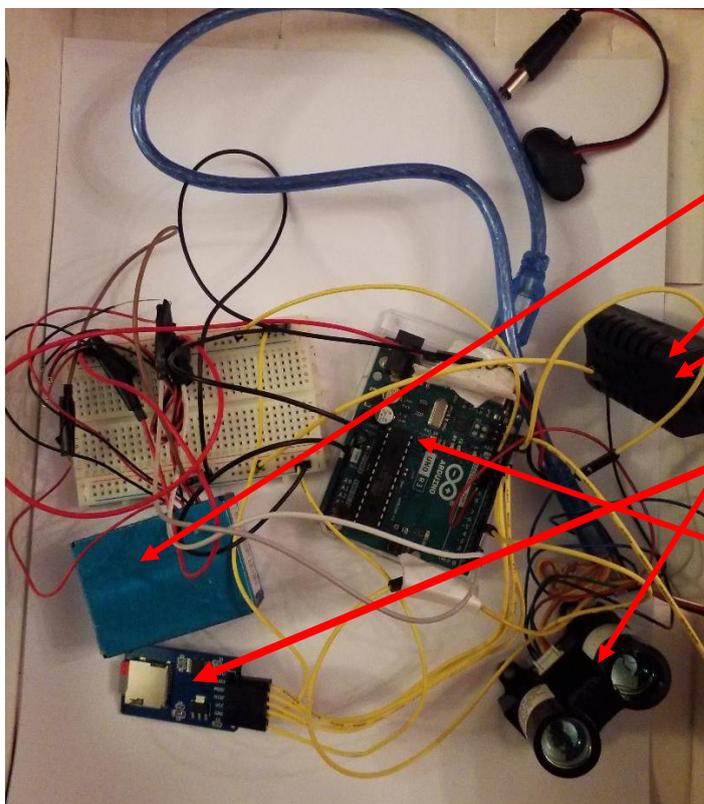
Το βασικό έλλειμα στις προηγούμενες μετρήσεις είναι και διεθνώς (βιβλιογραφικά) η ταυτόχρονη καταγραφή του ύψους και η αλλαγή στον χρόνο καταγραφής ανάλογα με τα δεδομένα.

ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΙΔΙΟΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Ο ανιχνευτής που θα χρησιμοποιήσουμε για τις μετρήσεις είναι το μοντέλο PMS6003 sensor PM της PLANTOWER και αποτελείται από δύο βασικά στοιχεία. Καθώς η πηγή παράγει φως το οποίο εστιάζεται κατάλληλα με τη χρήση φακών, σκεδάζεται πάνω στα αιωρούμενα σωματίδια και στη συνέχεια προσπίπτει πάνω σε μια φωτοδίοδο αφότου περάσει μέσα από διαδοχικούς φακούς ώστε να επαναεστιαστεί. Η φωτοδίοδος παράγει ένα ρεύμα του οποίου η διαφορά δυναμικού είναι ανάλογη του προσπίπτοντος φωτός, συνεπώς της πυκνότητας των αιωρούμενων σωματιδίων. Τέλος, το σήμα που επιστρέφει ο ανιχνευτής αποτελείται από το ρεύμα που παράγει η φωτοδίοδος, αφού πρώτα ενισχυθεί από έναν ενισχυτή τάσης.

ΠΛΑΚΕΤΑ ARDUINO . Για τη συνδεσμολογία του ανιχνευτή με μια σταθερή διαφορά δυναμικού και την καταγραφή των δεδομένων του χρησιμοποιήθηκε ένας μικροελεγκτής Arduino. Το Arduino είναι μια απλή μητρική πλακέτα ανοικτού κώδικα με ενσωματωμένο μικροελεγκτή και εισόδους/εξόδους, η οποία μπορεί να

προγραμματίζεται με τη γλώσσα Wiring, που ουσιαστικά πρόκειται για τη γλώσσα προγραμματισμού C++ και ένα σύνολο από βιβλιοθήκες, σε C++. Το Arduino μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη ανεξάρτητων διαδραστικών αντικειμένων αλλά και να συνδεθεί με υπολογιστή. Για τις ανάγκες του συγκεκριμένου πειράματος χρησιμοποιήθηκε η πλακέτα Arduino Uno, η οποία βασίζεται πάνω στον μικροελεγκτή ATmega328P της Atmel. Υποστηρίζει συνολικά 14 pins για είσοδο και έξοδο ψηφιακού σήματος, και 6 pins εισόδου αναλογικού σήματος, επιπλέον χρησιμοποιεί ένα κρύσταλλο χαλαζία με συχνότητα λειτουργίας στα 16 MHz, μία θύρα USB, τροφοδοσία jack, μια κεφαλή ICSP και ένα διακόπτη επανεκκίνησης.



ΕΙΚ 4.17 .SENSOR PMS6003
sensor PM της PLANTOWER
με laser.

Sensor υγρασίας

Sensor θερμοκρασίας

LIDAR καταγραφής ύψους

Καρτα SD

PLAKETA Arduino uno

5.5 ΤΑ ΒΗΜΑΤΑ ΤΕΛΕΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ SENSOR PM

Με την αρκετά έντονη ενασχόληση μου με τους SENSORS PM και ιδιαίτερα της purple air και της plantower και με έλεγχο της βιβλιογραφίας (π.χ. Low-cost sensors as an alternative for long-term air quality monitoring Xiaoting Liua etal , Environmental Research 185 (2020)) , αποφάσισα να τελειοποιήσω ένα δικό μου προϊόν .

Προς τούτο πήρα τον SENSOR PMS6003 sensor PM της PLANTOWER με laser το εμπορικό προϊόν της plantower που χρησιμοποιεί και η purpleair και αρχισα να τον

μετατρέπω για να συμβαδίσει με τις απαιτήσεις της καθ' ύψος μέτρησης. Τα υλικά και η μεθοδολογία για την ολοκλήρωση του έργου είναι:

- 1.Mega Arduino uno
- 2.Sensor plantower
- 3.Sd card
- 4.C++
- 5.Java
- 6.ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΡΟΛΟΓΙΟΥ για καταγραφή ανα δευτερολεπτο ωστε σε πρώτο επίπεδο ωστε να συγχρονίζεται καλύτερα το ύψος καταγραφής.
- 7.ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΑΝΑΓΝΩΣΗ ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΤΗΣ PLANTOWER (ΟΠΩΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙ ΚΑΙ Η PURPLEAIR)
- 8.ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΕΓΓΡΑΦΗ ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΤΗΣ PLANTOWER (ΟΠΩΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙ ΚΑΙ Η PURPLEAIR)

Στις επόμενες σελίδες δίνονται τα προγράμματα οδήγησης της συσκευής όπως έχουν εγγραφεί στον μικροεπεξεργαστή του Arduino

Πιο κάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από το txt file κατεγράφησαν στην sd card

	Standard: PM_1 | PM_2.5 | PM_10			Enviromental: PM_1 | PM_2.5 | PM_10			Particles: 0.3 | 0.5 | 1 | 2.5 | 5 | 10					
00:00:01	11	20	23	11	20	23	900	695	93	0	0	0
00:00:02	11	20	23	11	20	23	903	695	93	0	0	0
00:00:03	10	20	22	10	20	22	906	696	94	0	0	0
00:00:04	10	20	22	10	20	22	909	698	96	0	0	0
00:00:05	10	20	22	10	20	22	913	702	98	0	0	0
00:00:06	10	20	22	10	20	22	914	705	99	0	0	0
00:00:07	10	20	23	10	20	23	915	707	101	0	0	0
00:00:08	10	20	23	10	20	23	914	708	103	0	0	0
00:00:09	9	20	22	9	20	22	912	708	104	0	0	0

5.6 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Με την ταχεία ανάπτυξη της οικονομίας και τη διαδικασία αστικοποίησης, έχει αυξηθεί κύριες πηγές ρύπανσης από σωματίδια του περιβάλλοντος, ειδικά για τα λεπτότερα σωματίδια. Επομένως οι μετρήσεις ατμοσφαιρικής ρύπανσης κοντά σε δρόμους σε μια πόλη είναι πρωτίστης σημασίας. Οι συγκεντρώσεις των PM_{10} , $PM_{2,5}$ και $PM_{1,0}$ μετρήθηκαν σε διαφορετικά σημεία εντός του ΠΑΔΑ. Σε αυτή τη μελέτη διεξήχθησαν **10 σειρές μετρήσεων**. Τα αποτελέσματα έδειξαν μια σταδιακή μείωση των συγκεντρώσεων των σωματιδίων με το ύψος από την άκρη του δρόμου. Αυτή η εργασία αφορά την έρευνα ,σχεδιασμένη για τον προσδιορισμό της κάθετης (και οριζόντιας) κατανομής των σωματιδίων κοντά σε δρόμους. Μια τέτοιας μορφής έρευνα διευκολύνει στη μελέτη ατμοσφαιρικών ρύπων στο σύνολό τους για τον προσδιορισμό του αντίκτυπου των διεργασιών όπως η διασπορά και η εναπόθεση ρύπων. Η ικανότητα γενίκευσης των αποτελεσμάτων εν γένει περιορίζεται από την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας του εκάστοτε σημείου συλλογής μετρήσεων και από τα ειδικά χαρακτηριστικά των εκπομπών ρύπων και του μετεωρολογικών συνθηκών . Ωστόσο, είναι σημαντική στην ανάπτυξη της κατανόησης των επιπτώσεων των σωματιδίων της κυκλοφορίας στην τοπική ποιότητα του αέρα σε ένα τέτοιο περιβάλλον.

5.6.1 Γενική περιγραφή

Στόχος μας είναι να παράσχουμε ένα νέο εργαλείο για τη μελέτη της ποιότητας του αέρα σε διαφορετικά ύψη που θα μπορούσαν να αντέξουν λόγω χαμηλού κόστους εύκολα οι οργανισμοί τοπικής αυτοδιοίκησης και **δευτερευόντως ακόμη και οι ιδιώτες πολίτες**. Οι συνήθεις τρόποι προσδιορισμού της ποιότητας του αέρα είναι η μέτρηση με τη βοήθεια σταθερών οργάνων. Ωστόσο, τα καθιερωμένα δίκτυα παρατήρησης στερούνται κινητικότητας περιορίζοντας τις δυνατότητες χαρτογράφησης της χωρικής κατανομής ατμοσφαιρικών ρύπων και κατανόησης της συμπεριφοράς που σχετίζεται με την τοπική τοπογραφία και το κλίμα.

Οι τρόποι είναι : 1.προσδεδεμένο σύστημα μπαλονιών που δεν απαιτεί ελάχιστο υψόμετρο πτήσης και δίνει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να μετρηθεί το κατακόρυφο προφίλ ακριβώς πάνω από το έδαφος καθώς είναι πολύ ενδιαφέρον να μετράμε πλησιον του εδαφους επειδή ένα μεγάλο μέρος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης απελευθερώνεται κοντά στο έδαφος και δίνει τις μεγαλύτερες κατακόρυφες κλίσεις στη συγκέντρωση ρύπων 2.Αεροσκάφη επίσης χρησιμοποιούνται κυρίως για τη διεξαγωγή μετρήσεων στο μεσαίο και στο μεγάλο υψόμετρο εύρους περίπου 1-10 km (A. Samad et al) 3. Σταθεροί πύργοι καταγραφής όπου χρειάζεται ήδη οικοδομικό συγκρότημα κατοικιών η γραφείων. 4.Συστήματα λέιζερ (LIDAR) που παρέχουν μια αναλυτική μέθοδο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τηλεπισκόπηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Το LIDAR βασίζεται στη φασματοσκοπία λέιζερ και επιτρέπει τη μέτρηση τόσο της χωρικής όσο και της χρονικής κατανομής ή της συγκέντρωσης επιλεγμένων χημικών ενώσεων και του χαρακτηρισμού των εκπομπών ρύπων. Τα κατακόρυφα προφίλ της ατμόσφαιρας με υψηλή χρονική και χωρική ανάλυση παρέχουν δυναμική οπτική απεικόνιση σε πραγματικό χρόνο του ύψους PBL και κατακόρυφα προφίλ αλλαγών στην πυκνότητα αερολύματος, τα οποία μπορούν να συγκριθούν με τις προβλέψεις μοντέλου. Ωστόσο, για να είναι χρήσιμη για την παρακολούθηση της ρύπανσης και για την παροχή των δεδομένων που απαιτούνται για την ανάπτυξη στρατηγικών μείωσης των εκπομπών, είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν μέθοδοι για την πραγματοποίηση ποσοτικών εκτιμήσεων της συγκέντρωσης αερολύματος στον αστικό θόλο . 5.Μη επανδρωμένα εναέρια οχημάτα UAV που διερευνουν την κατακόρυφη κατανομή των χαρακτηριστικών των ατμοσφαιρικών ρύπων και της διασποράς τους μέσω αισθητήρων χαμηλού κόστους.

Το προτεινόμενο σύστημα παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης αποτελείται από χαμηλού κόστους μετεωρολογικό εξοπλισμό και αισθητήρες ρύπων, καθώς και ένα LED Laser που δίνει τη δυνατότητα για εφαρμογές τεχνικής σκέδασης Mie in situ (και ιδανικά συνδυασμο επίγειου LIDAR αν υπάρχει) . Όλο το σύστημα περιέχει μια ψηφιακή κάρτα μνήμης (SD) για την αποθήκευση των δεδομένων εγγραφής. Τέλος, το προτεινόμενο σύστημα χαμηλού κόστους παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης επιτρέπει τη διερεύνηση και τη χαρτογράφηση του κατακόρυφου προφίλ συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικών ρύπων το πολύ 120 μέτρων πάνω από το επίπεδο του εδάφους. Τα συμβατικά συστήματα παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης έχουν χαμηλή χωρική και χρονική

ανάλυση. Η χαμηλή χωρική ανάλυση σημαίνει ότι υπάρχουν λίγα μόνο στοιχεία μέτρησης που έχουν αναπτυχθεί με μικρή κάλυψη. Αυτό οφείλεται κυρίως στο απαγορευτικό κόστος των συσκευών. Η χαμηλή χρονική ανάλυση σημαίνει ότι η ανάλυση και η διάδοση των δεδομένων είναι αργή. Αυτό οφείλεται στην πολυπλοκότητα και το κόστος που σχετίζεται με την απαιτούμενη ακρίβεια. Τα συμβατικά συστήματα παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι κατάλληλα για μακρόχρονη παρακολούθηση του περιβάλλοντος. Σε ότι αφορά τους αισθητήρες χαμηλού κόστους αυτοί μπορούν να αναπτυχθούν πιο διασκορπισμένα με υψηλή χωρική και χρονική ανάλυση, αναπληρώνοντας την ατέλεια της ακρίβειας μετρησης. Είναι ένα εξαιρετικό εργαλείο για τη μέτρηση της προσωπικής έκθεσης στην ατμοσφαιρική ρύπανση. Τα δεδομένα τους πρέπει να αξιολογούνται κριτικά διότι επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από πολλούς παράγοντες, ιδίως από τη θερμοκρασία, **την υγρασία** κατά την διάρκεια της μέτρησης, τον άνεμο και την παρουσία άλλων αερίων στον αέρα.

Λόγω του ελαφρού βάρους τους, μόνο αισθητήρες χαμηλού κόστους μπορούν να τοποθετηθούν σε χαμηλού κόστους drone (μεχρι 6000 euros) οπότε μαζί με τους προαναφερθέντες παράγοντες θα πρέπει να προστεθεί και ο αιολικός παράγοντας από τους **ρότορες** του drone.

Τα UAV μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε περιοχές που συνήθως είναι δύσκολο να προσεγγιστούν με παραδοσιακές μεθόδους λόγω της εύκολης ευελιξίας τους.

Ο ενεργειακός περιορισμός επηρεάζει πραγματικά τις μεγάλες αποστολές και θέτει σημαντικό περιορισμό στη διάδοση της τεχνολογίας drone. Ένα UAV είναι πολύ περιορισμένο στην απόδοσή του λόγω της μικρής κάλυψης, της ενεργειακής αυτονομίας και της μικρής επιλογής αισθητήρων οποτε το ιδανικό θα ηταν ενα σμήνος για πλήρη κάλυψη μιας περιοχής,

Το μοντέλο drone είναι καθοριστικός παράγοντας για την επιτυχία του έργου . Πολλές από τις φυσικές παραμέτρους του θα επηρεάσουν την ανίχνευση, την ευελιξία και την κατανάλωση μπαταρίας. Η σταθερότητα κατά τη μέτρηση του αέρα είναι απολύτως ζωτικής σημασίας δεδομένου οτι είναι ευαίσθητο στις συχνές ριπές του ανέμου.

Για την τροφοδοσία έχει επιλεγεί μια πλακέτα Arduino Uno, η οποία βασίζεται πάνω στον μικροελεγκτή ATmega328P της Atmel. Υποστηρίζει συνολικά 14 pins για είσοδο και έξοδο ψηφιακού σήματος, και 6 pins εισόδου αναλογικού σήματος, επιπλέον

χρησιμοποιεί ένα κρύσταλλο χαλαζία με συχνότητα λειτουργίας στα 16 MHz, μία θύρα USB, τροφοδοσία jack, μια κεφαλή ICSP και ένα διακόπτη επανεκκίνησης.

5.6.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΠΕΔΙΟΥ

Σε αυτή τη μελέτη, η πλατφόρμα UAV αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας το UAV SAS (Ελληνικής κατασκευής) που είναι ένα τετρακόπτερο με μέγιστο ωφέλιμο φορτίο 1 κιλό. Ο αποτελεσματικός χρόνος πτήσης είναι περίπου 25 λεπτά. Στο UAV τοποθετήθηκαν οι sensors που αναφέρθηκαν πιο πάνω

Η συγκέντρωση μάζας των σωματιδίων σε τρία διαφορετικά εύρη μεγεθών, τα οποία είναι PM1, PM2,5, PM10, (<15 μm), TOTAL (συνολικά εισπνεόμενα σωματίδια) αναφέρεται σε σωματίδια που είναι διαθέσιμα για εναπόθεση στην ανθρώπινη αναπνευστική οδό. Όπως αναφέρεται από G.T. Poyi et al η ροή αέρα που δημιουργείται από τους ρότορες UAV είναι πολύ μικρή (κοντά στο 0) στον κεντρικό άξονα του UAV όπου και τοποθετήθηκε κάθε φορά το όργανο καταγραφής, οφείλεται στη συμμετρική ρύθμιση των δρομέων, και συνίσταται για την σωστή πτητική δυνατότητα του UAV. Επιπλέον, τα όργανα ήταν σταθερά τοποθετημένα στο UAV κατά τη διάρκεια της μελέτης πεδίου για την αποφυγή τυχαίας πτώσης.

Τα πειράματα πεδίου διεξήχθησαν σε 10 ημέρες, οι οποίες ήταν ήταν με συνεφιά με βροχή η ηλιόλουστες ημέρες, με εμφανή πρωινή και βραδινή κίνηση σε ώρα αιχμής. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η μελέτη επικεντρώθηκε στα πρότυπα κατανομής ρύπων που σχετίζονται με την κυκλοφορία, ως εκ τούτου, τα 0–120 m προσδιορίστηκαν ως το εύρος κάθετων πτήσεων, που κάλυπταν βασικά το εύρος της ανθρώπινης δραστηριότητας. Το εύρος ικανοποιεί επίσης τον κανονισμό των πτήσεων UAV εντός πόλεων (Για επιπλέον υψος απαιτείται ειδική άδεια).

Γενικά, υπάρχουν δύο τρόποι για κάθετες πτήσεις UAV 1.αιώρηση σε διαφορετικά ύψη (το οποίο επιλέξαμε) από D. Wang et al στην ανοδο, 2.καθοδος με σταθερή ταχύτητα (που απαιτεί τελειότερα οργανα καταγραφής αρα και μεγαλύτερο ωφέλιμο βάρος) (T.F. Villa, et al)

Οι συσκευές παρακολούθησης ρύπων χρειάζονται γενικά κάποιο χρόνο προσωρινής αποθήκευσης για να αποκτήσουν αξιόπιστη λειτουργία μετρήσεων, επομένως, ο πρώτος τρόπος πτήσης (αιώρηση) είναι υποχρεωτικός. Συνολικά,

επιλέχθηκαν οκτώ ύψη που ήταν 0 m, 10 m, 20 m, 40 m, 60 m, 80 m, 100 m και 120 m. Σε κάθε ύψος το UAV αιωρήθηκε για 2 λεπτά (μαζί με τον χρόνο πτήσης).

Καθώς το ύψος έρευνας είναι 0–120 m σχετικά μικρό ύψος στην ατμόσφαιρα. Ως εκ τούτου, οι κάθετες παραλλαγές (χωρικές διακυμάνσεις) σε RH και T δεν ήταν πολύ έντονες. Η θερμοκρασία γενικά παρουσίασε μια μικρή πτώση με ύψος και RH παρουσίασαν ελαφρά αύξηση (η μείωση) με το ύψος ανάλογα με πρωινές η βραδυνές ώρες. Επιπλέον, η ταχύτητα του ανέμου κυμαινόταν γενικά σε 0–4 m/s, υποδεικνύοντας ότι τα πειράματα πεδίου υλοποιήθηκαν με ήπιο αερα. **Το ιδανικό θα ήταν πλήρης απνοια η οποία είναι και σωστότερη από πλευράς καταγραφής οργάνων.**

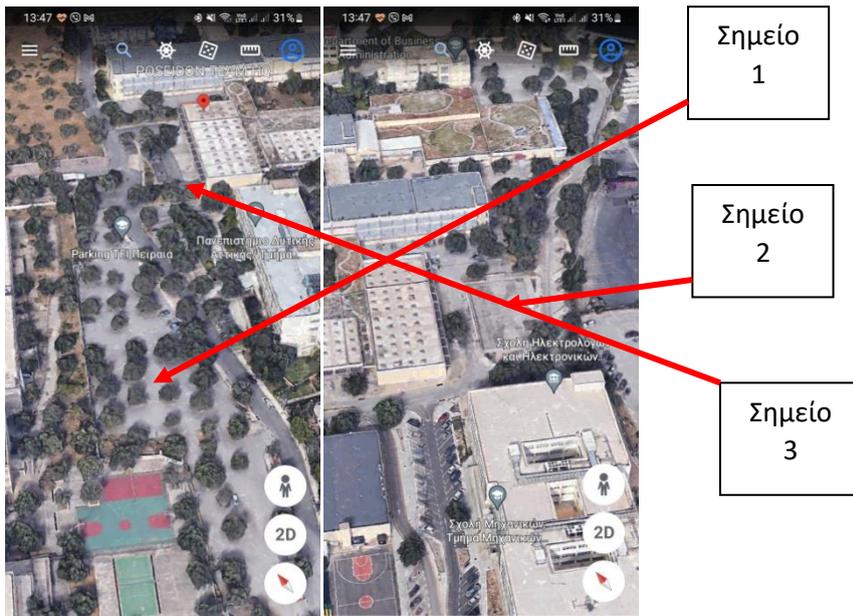
5.6.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΠΟΘΕΣΙΩΝ

Η Αθήνα είναι μια πόλη με εύκρατο ηπειρωτικό κλίμα. Ο άνεμος έχει εμφανείς εποχιακές διακυμάνσεις, τον χειμώνα πνέει κυρίως βόρειος και βορειοδυτικός άνεμος, ενώ το καλοκαίρι στρέφεται σε νότιο και νοτιοανατολικό και **νοτιοδυτικό**.

Οι Πτήσεις UAV πραγματοποιήθηκαν σε 3 σημεία στο campus του ελαιώνα (όπου υπάρχει και μετεωρολογικός σταθμός παρατήρησης.) και πιο συγκεκριμένα στο

- ➡ Παρκινγκ
- ➡ Εργαστήριο θερμορευστομηχανικής
- ➡ Γήπεδο Beach Volley

Στην καθετη κατανομή επιλέχθηκαν οι ανωτερω περιοχές, σε ανοικτό πεδίο αλλά πίσω και μπροστά απο το κτίριο.



Οι μετρήσεις έγιναν τον Απρίλιο εως Αυγουστο του 2022 .Η περίοδος δοκιμής για κάθε σημείο είναι 8:00 π.μ.-5:00 μ.μ., και οι μετρήσεις κατεγράφησαν ανα δυο λεπτα.



Εικόνα 22 UAV και ανάρτηση σένσορων

Η πλατφόρμα μέτρησης αναρτάται στην κάτω πλευρά του UAV και στο κέντρο για να επηρεασθεί η μέτρηση ελάχιστα.

Η εκκίνηση του UAV στο έδαφος διαρκεί 6 λεπτά καθώς παρακολουθούμε την ενδειξη πριν να ξεκινήσει το UAV και αφότου εκκινήσουν οι ηλεκτρομηχανές του. Η αιώρηση σε κάθε ύψος μέτρησης διαρκεί δυο λεπτά συμπεριλαμβανομένου του χρόνου ανοδου απο το ενα σημείο στο άλλο(περίπου 10 δευτερόλεπτα).Ολά αυτά καθώς και το ύψος παρακολουθούνται και καταγράφονται με την βοήθεια του GPS του UAV και της συσκευής χειρισμού του που έχει οθόνη.

Ο τρόπος ανάρτησης της πλατφορμας μέτρησης επιλέχθηκε ωστε η είσοδος αέρα στον σένσορα να είναι κάθετη στην ωθηση των πτερυγίων του τετρακόπτερου και η θέση τοποθέτησης να είναι στο κεντρικό σημείο του UAV

Στην πλατφόρμα μέτρησης της purpleair το μόνο που χρειάζεται επιπλέον είναι ο χρονισμός της μέτρησης στο αντίστοιχο υψος δεδομένου ότι γίνεται καταγραφή ανα δυο λεπτά και πρέπει να σιγουρευτούμε ότι έχουμε σωστή καταγραφή στο σωστό υψος στον σωστό χρόνο . Επομένως η εκκίνηση του PurpleAir γίνεται ταυτόχρονα με την εκκίνηση ενός εξωτερικού χρονομέτρου το οποίο παρακολουθείται απο τον

παρατηρητή στο έδαφος.Επομένως η αιώρηση χρονομετρείται και η μετάβαση απο σημείο σε σημείο γίνεται σε ακριβή χρόνο παλλαπλάσιο των 2 λεπτων (για την ακρίβεια η ανοδος απο κάθε ύψος γινόταν σε χρόνο 2 λεπτα και 05 δευτερόλεπτα για επιπλέον αποφυγή αστοχίας)

Επομένως ανακεφαλαιωνοντας

Το UAV αφήνεται στο έδαφος για 4 λεπτά χωρίς λειτουργία και εν συνεχεία τίθεται σε λειτουργία για 4 λεπτά ώστε να συγκριθούν οι επιπτώσεις των πτερυγίων στην καταγραφή , κατόπιν απογειώνεται και καταγράφονται οι μετρήσεις κάθε 2 λεπτά λειτουργίας με τον τρόπο που προαναφέραμε μέχρι τα 120 μέτρα οπότε και οριακά λειτουργεί η μπαταρία .Η καταγραφή των μετρήσεων δείχνει μια ισοροπία στην μέτρηση μετά τα 4 λεπτά.

4.10 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

5.7 ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΛΥΣΗ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ Green

Με την βοήθεια των δεδομένων του πίνακα 11 και με την μεθοδολογία του κεφαλαίου 2 <<Υπο την προϋπόθεση ασυμπίεστης ροής ($S = 0$), σταθερής κατάστασης, και κατακόρυφης ταχύτητας μικρότερης από την οριζόντια και ο άξονας προς την κατεύθυνση του μέσου ανέμου ($w = v = 0$) παίρνουμε:

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial C}{\partial z} \right)$$

Λαμβάνοντας την ταχύτητα του ανέμου και τη διάχυση των δινών στους νόμους ισχύει ως:

$$u = az^p, k_x = xu, k_y = \frac{\beta}{\alpha} xu, k_z = \gamma xz^n$$

όπου α , n και p είναι σταθερές που εξαρτώνται από τη σταθερότητα, τα β και γ είναι οι τυρβώδεις εντάσεις.

ΜΗ ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΕΣ ΛΥΣΕΙΣ (ΧΩΡΙΣ ΥΨΟΣ ΑΝΑΣΤΡΟΦΗΣ)

$$C(x, y, z) =$$

$$= \left(\frac{2q \sqrt{\frac{\beta}{\alpha}} \pi \frac{x-1}{x^2-x}}{\pi \sqrt{(zz_0)^{(p-n+2)/2}}} \right) Q_{-\mu-1/2} \left(\frac{z^{p-n+2} + z_0^{p-n+2} + \frac{\gamma}{\alpha} ((p-n+2)/2)^2 (x-x_0)^2}{2(zz_0)^{(p-n+2)/2}} \right)$$

όπου μ είναι μη ακέραιος, και Q από :

$$Q_n(x) = \frac{\Gamma(n+1)\Gamma(1/2)}{2^{n+1}\Gamma(n+3/2)} x^{-n-1} F \left(\frac{n+2}{2}, \frac{n+1}{2}; \frac{2n+3}{2}; \frac{1}{x^2} \right)$$

Με F την υπεργεωμετρική συνάρτηση και για $Q_n(x)$ ισχύει και για μη ακέραιους n .

α	β	γ
3	$0,31 \left(\frac{w^*}{u} \right)^2 = 0,05$	$0,16 \left(\frac{w^*}{u} \right)^2 = 0,026$
Wind velocity	w^*	classes

4	2,77	A
4	3,05	A
4	1,61	B
4	1,23	C
4	0,458	A
4	1,3	D
4	1,5	E
4	1,64	E
4	2,1	A

Για $q=10,32 \mu\text{g}/\text{m}^3$

$$\frac{4,723 * \frac{x-1}{x^2-x}}{7,58} * Q_{-1}(x) \frac{5,66+0,02*x^2}{5,66}$$

$$Q_{-1}(x) = \frac{1}{2x} \ln \left(\frac{1+\frac{1}{x}}{1-\frac{1}{x}} \right)$$

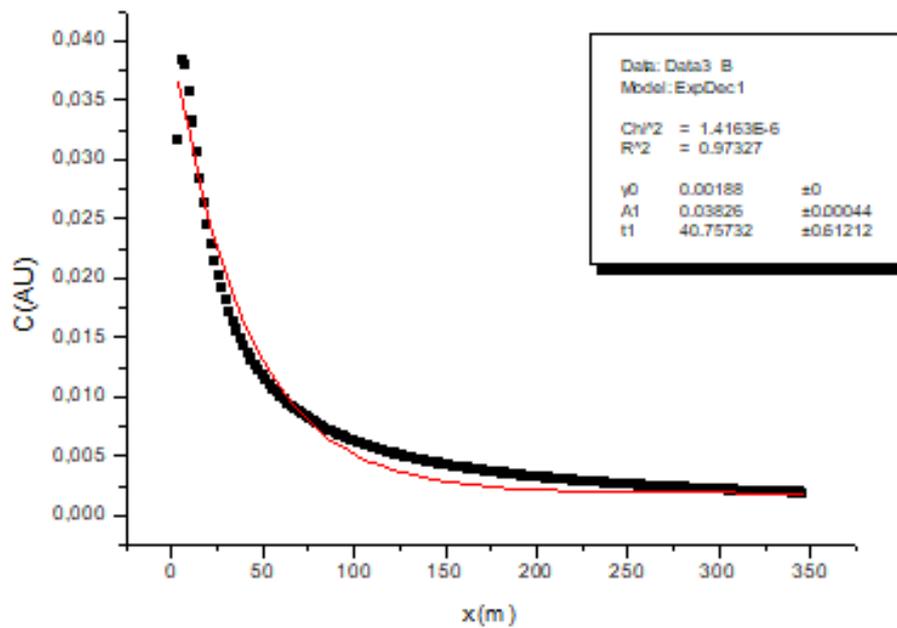
$$C = \left(1,46 * \frac{x-1}{x^2-x} \right) \left(\frac{1}{2x} \right) \left(\ln \left(\frac{1+\frac{1}{x}}{1-\frac{1}{x}} \right) \right) (0,214 + 0,454 * (x - 2)^2)$$

Για την κατακόρυφη χωρική κατανομή με πηγή στην θηβών και σημείο υπολογισμού το γήπεδο beach volley είναι:

$$C(z) = 15,6 + \frac{554,91}{z^{3/2}}$$

[Με ένα παράγοντα $2 * 10^{-6}$]

Με βάση τις εξισώσεις παράγονται πίνακες και προκύπτει το πιο κάτω γράφημα



Από το διάγραμμα φαίνεται ότι υπάρχει μερική συμφωνία ανάμεσα στην αναλυτική λύση και στο πείραμα.

Πιο κάτω είναι ο μέσος πειραματικός όρος και οι εκθέτη συντελεστή απόσβεσης

ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	0,04
ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΛΥΣΗ I	0,7
ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΛΥΣΗ II	0,025

Τέλος διορθώνουμε τους εκθέτες κατά Pasquill έχοντας ως δεδομένο ότι αυτό απαιτεί χωρό χρονικές μετρήσεις πολύ μεγάλης διάρκειας .

height	Pm average
2	24,83333

20	22,06667
40	20,7
60	19,73333
80	18,76667
100	17,3
120	15,77333

Με βάση τις ανωτέρω μετρήσεις που δίνουν σχεδόν ίδιο εκθέτη απόσβεσης υπολογίζουμε τους συντελεστές από την αναλυτική λύση

$$C(z) = A + \frac{B}{z^{3/2}}$$

$$A=17,65, B=769,23$$

5.8 ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ ΣΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ (ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ) :

Οι πρόσφατες εξελίξεις στις τεχνολογίες αισθητήρων σωματιδίων επιτρέπουν ένα ευκολο χαρακτηρισμό της χωροχρονικής μεταβλητότητας PM.

Η αξιοπιστία των μετρήσεων είναι προϋπόθεση, που απαιτεί αυστηρή αξιολόγηση απόδοσης και βαθμονόμησης σε σύγκριση με όργανα αναφοράς. Η αξιολόγηση των συσκευών Purple Air PA-II (αισθητήρες PM χαμηλού κόστους) έχει πραγματοποιηθεί σε πολλές εργασίες και πρόσφατα και στην Ελλάδα.

Οι μετρήσεις του αισθητήρα για τα PM_{2,5} συσχετίζονται με μετρήσεις αναφοράς ($R^2 = 0,87$ έναντι μιας συσκευής εξασθένησης βήτα με $R^2 = 0,98$ έναντι συσκευών σκέδασης οπτικής ποιότητας αναφοράς).

Οι αποκλίσεις με τον αισθητήρα αναφοράς σχετίζονται κυρίως με υψηλές συγκεντρώσεις χονδροειδών σωματιδίων και υψηλή σχετική υγρασία περιβάλλοντος.

Στην πλειοψηφία τους αυτές οι εργασίες δοκιμάζουν απλά και πολλαπλά μοντέλα παλινδρόμησης για να βελτιώσουν την απόκριση του αισθητήρα

Στόχος των εργασιών είναι , ένα ελεγχόμενο σε ποιότητα και αξιόπιστο δίκτυο χαμηλού κόστους που θα μπορεί να αποτελέσει δίκτυο παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα σε μια έξυπνη πόλη.

Στην εργασία χρησιμοποιείται ένα σύστημα τριών συσκευών

- **PA-II**
- **OPC N3**
- **HMPT**

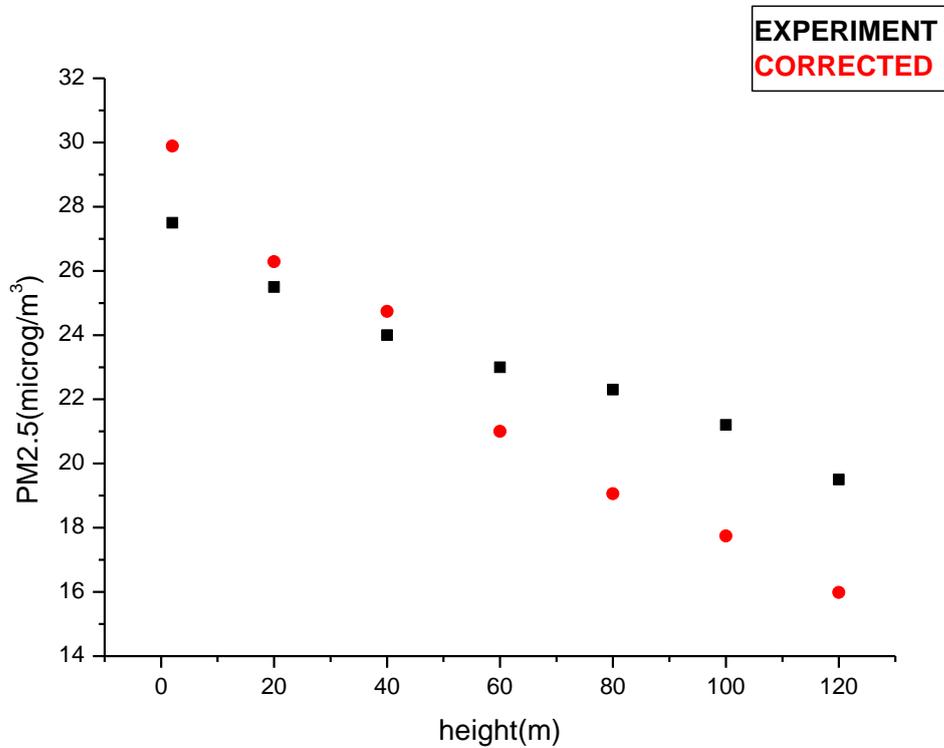
για την παρακολούθηση της υποβάθμισης της ποιότητας του αέρα σε σταθερό σημείο και καθύψος

Είναι δεδομένο ότι ανάλογα με την εποχή η μέτρηση είναι πολύ μεγαλύτερη της κανονικής.Γι αυτό τον λόγο διάφορες ερευνητικές ομάδες έχουν κάνει εκτεταμένες έρευνες και έχουν παραξει εξισώσεις διόρθωσης.Αυτές εφαρμόζουμε και στην δική μας εργασία και στην χρονοσειρά μετρήσεων του φλεβάρη.

Είναι γνωστό απο την βιβλιογραφία ότι η σχετική υγρασία ενισχύει στην σκέδαση μια υπερεκτίμηση επομένως επιχειρούμε μια διόρθωση μέσω της εξίσωσης για την ιδιοκατασκευή και τον PURPLE AIR

$$PM_{RHcorrected} = \frac{Raw\ Sensor}{0,025 * RH\% + 0,17}$$

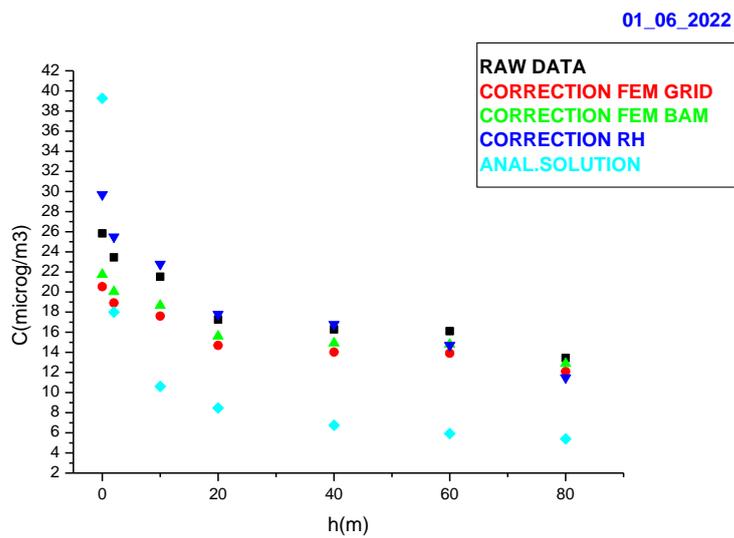
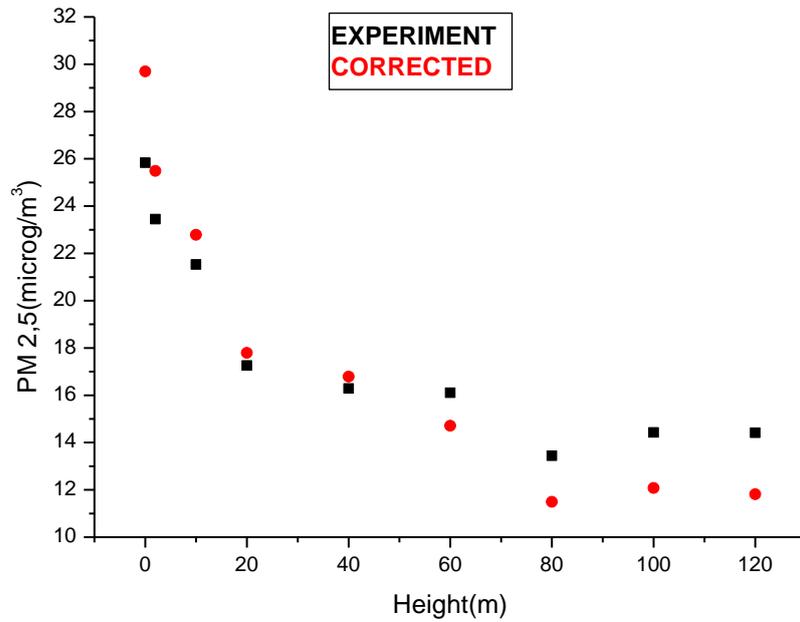
Α:ΙΔΙΟΚΑΤΑΣΚΕΥΗ 01_04_2022

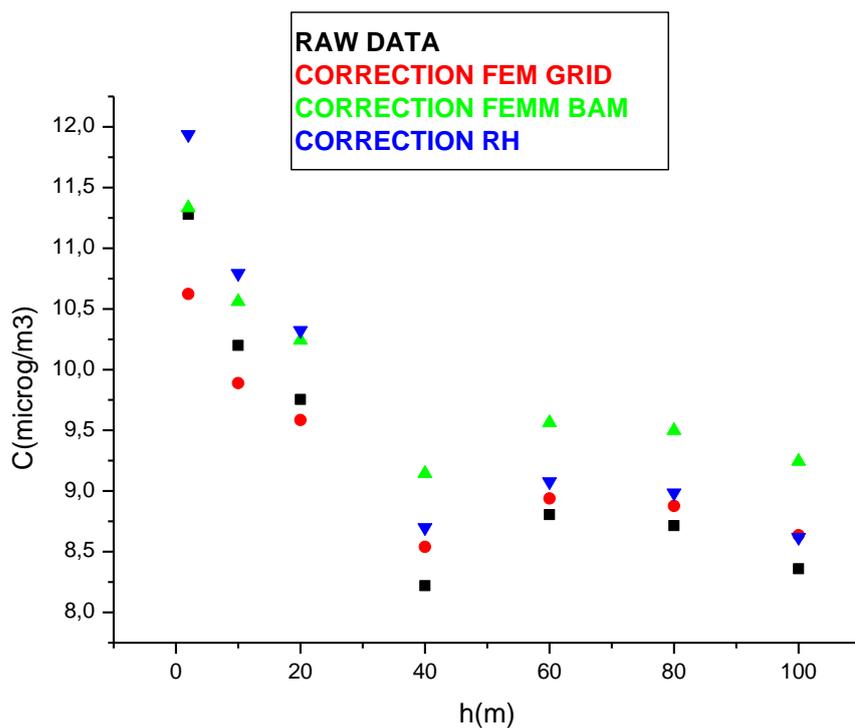


Με αποτελέσματα $C = 11,764 + 15,619 * e^{-\frac{h}{184,22}}$ EXPERIMENT : $C = 7,119 + 23,050 * e^{-\frac{h}{121,730}}$ CORRECTED

Απο την γραφική παράσταση βλέπουμε οτι συμφωνα με την διόρθωση στις υψηλές συγκεντρωσεις μετράει χαμηλά και στις χαμηλότερες μετράει υψηλά.

B.PURPLEAIR 01_06_2022





$$C = 11,964 + 10,880 * e^{-\frac{h}{24,924}} \text{(corrected)}$$

$$e^{-\frac{h}{19,143}} \text{(experiment)}$$

$$C = 14,414 + 10,880 *$$

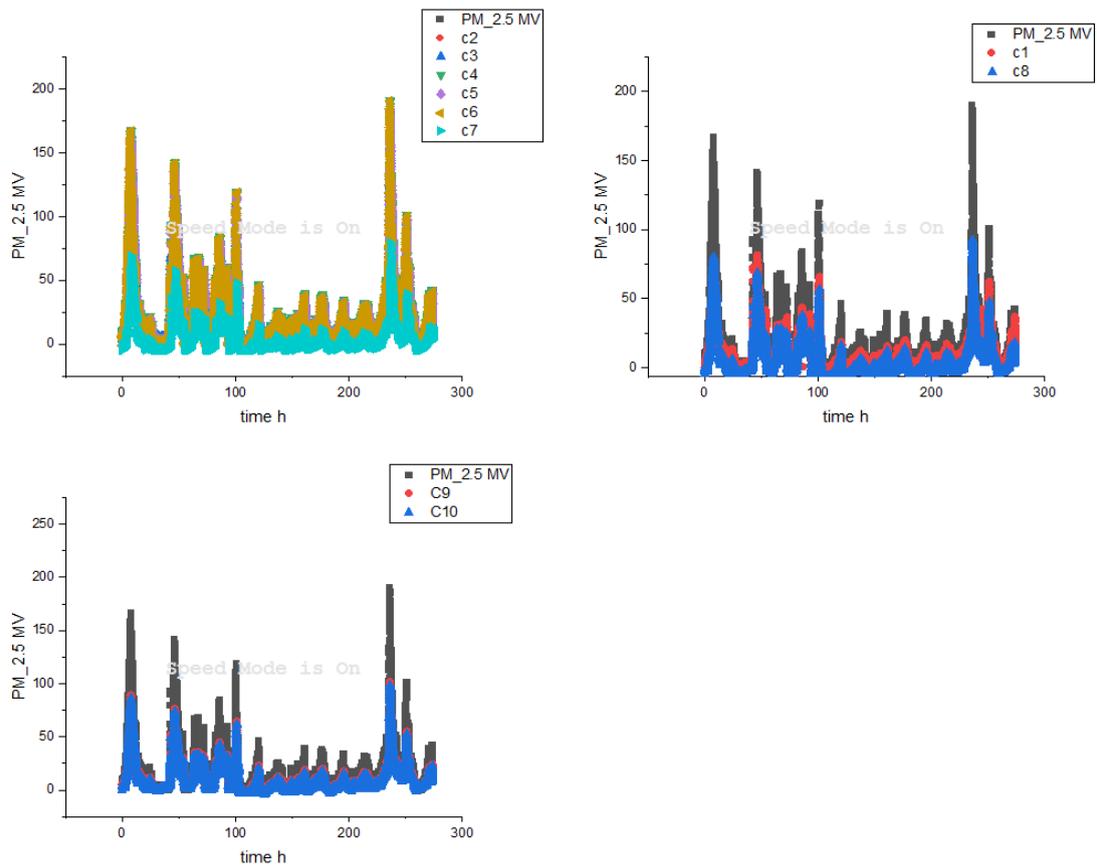
Από τα διαγράμματα βλέπουμε υποεκτίμηση στις υψηλές συγκεντρώσεις και υπερεκτίμηση στις χαμηλές συγκεντρώσεις. Η σταθερά εξασθένησης είναι για το πείραμα 0,005 και για την διόρθωση 0,008

5.9 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ

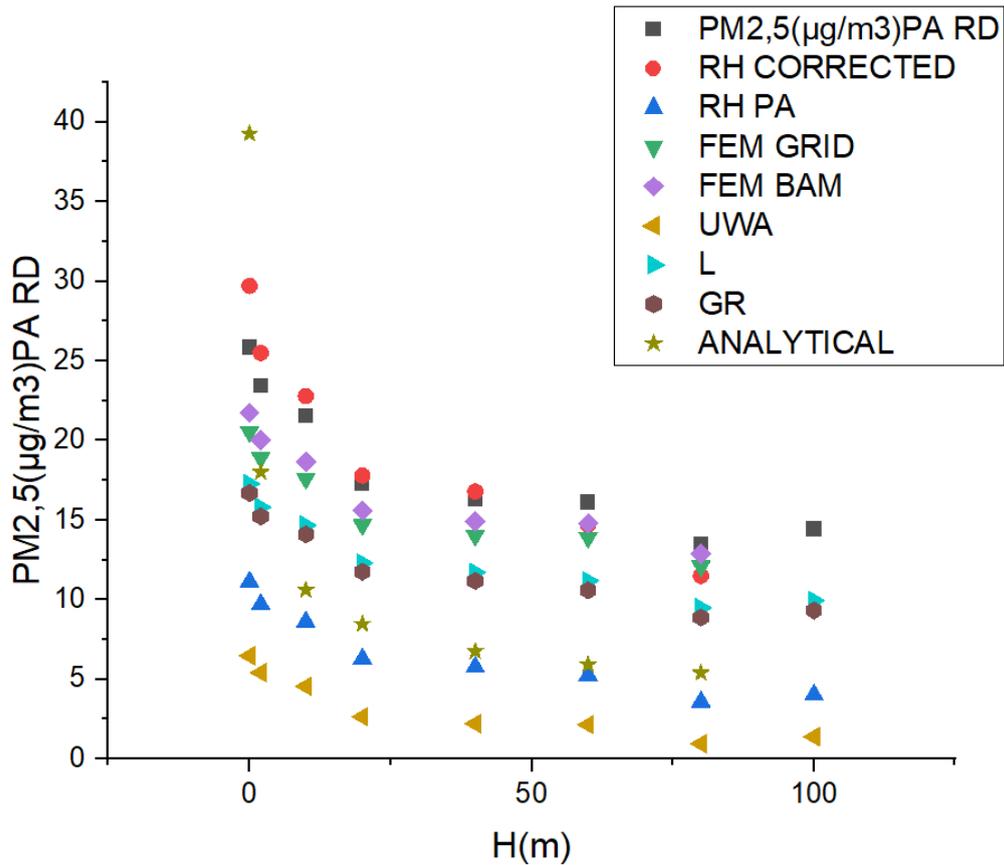
Ακολουθεί μια επισκόπηση των εξισώσεων διόρθωσης με βάση τα όργανα αναφοράς του AQ SPEC του site της purple air ,της δικής μας μοντελοποίησης και τέλος της πολύ καλής μοντελοποίησης από την ομάδα του ΠΑΔΑ.

$C1 = 0,524PM - 0,0862RH$	PURPLE AIR διόρθωση σχετικής υγρασίας
$C2 = PM_{2,5}/(0,025RH + 0,017)$	AQM διόρθωση σχετικής υγρασίας
$C3 = 0,681PM + 2,942$	AQM διόρθωση με αναφορά στο GRIDD
$C4 = 0,715PM + 3,267$	AQM διόρθωση με αναφορά στο GRIDD
$C5 = 1,001PM + 0,7176$ $C6 = 0,9728PM - 0,4907$ $C7 = 1,013PM - 1,437$ $C8 = 0,4455PM - 5,038$	UWA διόρθωση από την ομάδα στο ΠΑΔΑ με αναφορά σε σταθμό παρακολούθησης από το θησείο
$C9 = 0,541PM - 0,0618RH + 0,0534T + 3,191$	GR(MULTIVARIANT REGRESSION με αναφορά στην διόρθωση σχετικής υγρασίας από PURPLE AIR στις μετρήσεις
$C10 = 0,53225PM - 0,074RH + 0,0534T + 3,191$	GR_MULTIVARIANT REGRESSION με αναφορά στο OPC N3 ALPHA SENSE

Στό διάγραμμα φαίνεται η χρονοσειρά 300 ωρών σε ύψος 7 μέτρων και οι αναφερόμενες διορθώσεις επ' αυτής.



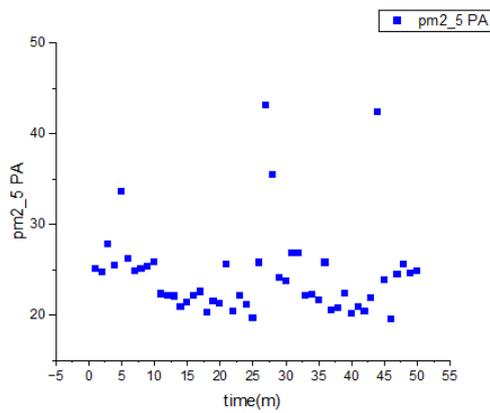
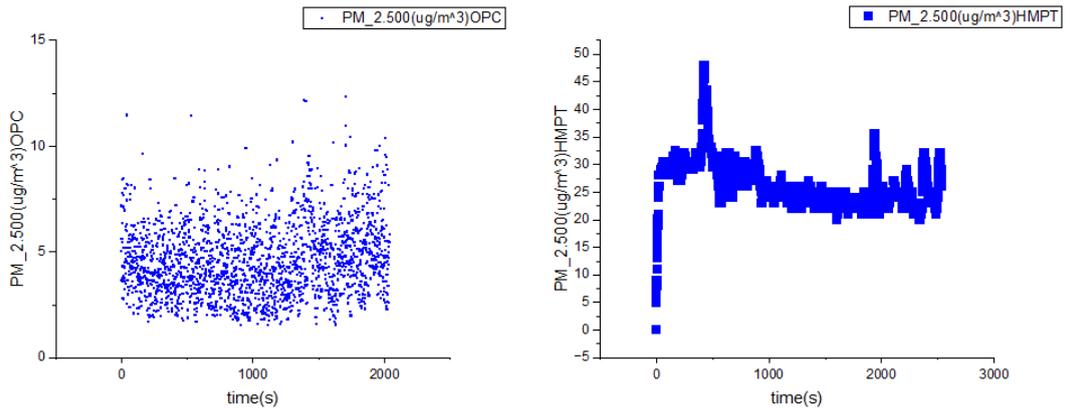
Επίσης στο πιο κάτω διάγραμμα φαίνεται η εφαρμογή των διορθώσεων στην μέτρηση της 01_06_2022



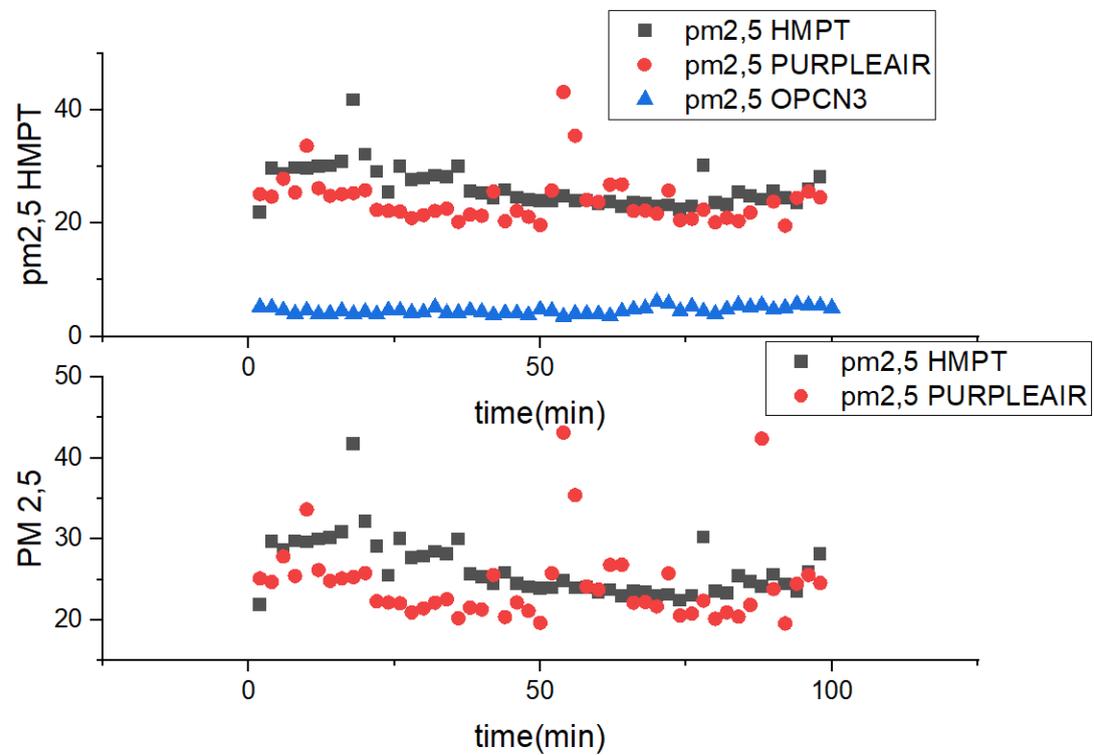
Από το γράφημα φαίνεται ότι η αναλυτική λύση βρίσκεται ανάμεσα στο δικό μας μοντέλο και στο μοντέλο της ομάδας του ΠΑΔΑ που φαίνεται το πιο σωστό σε σύγκριση με το OPC N3 ALPHA SENSE.

Και τέλος για την δική μας διόρθωση με βάση δεδομένο όργανο ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

- ➡ Εν πρώτοις σε ένα συγκοινωνιακό κόμβο με πάρα πολύ φορτίο (Μεταμόρφωση) και στην κορύφωση της κίνησης (17 μμ) κατεγράφησαν PM 1_2,5_10 στην πλατεία Σωτήρος με τους τρεις σένσορες HAND MADE PLAN TOWER _ PURPLE AIR_OPN3 ALPHA SENSE



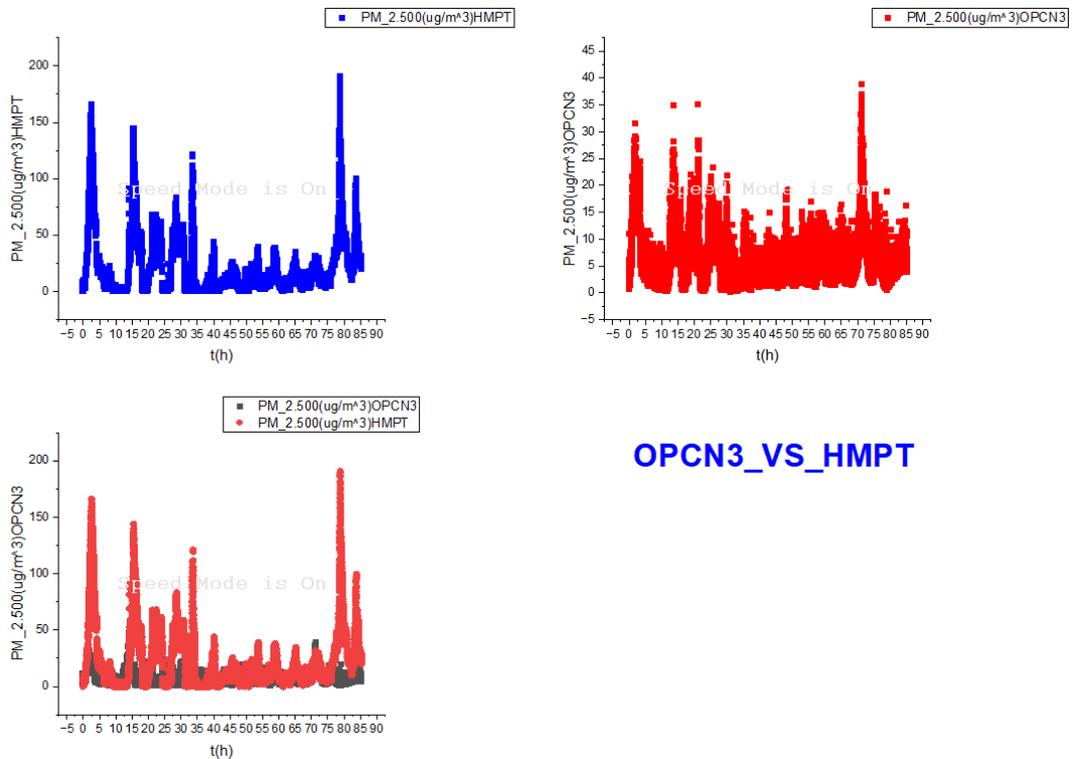
OPC_HMPT_PA



➡ Από την καταγραφή φαίνεται ικανοποιητική συμφωνία ανάμεσα στον PURPLE AIR και στον HAND MADE PLAN TOWER γεγονός που επαληθεύει την

αρκετά καλή προσέγγιση της ιδιοκατασκευής. Η εφαρμογή της διόρθωσης ΠΑΔΑ εφερε τα δεδομένα σε καλή συμφωνία με τον OPC N3 ALPHA SENSE.]

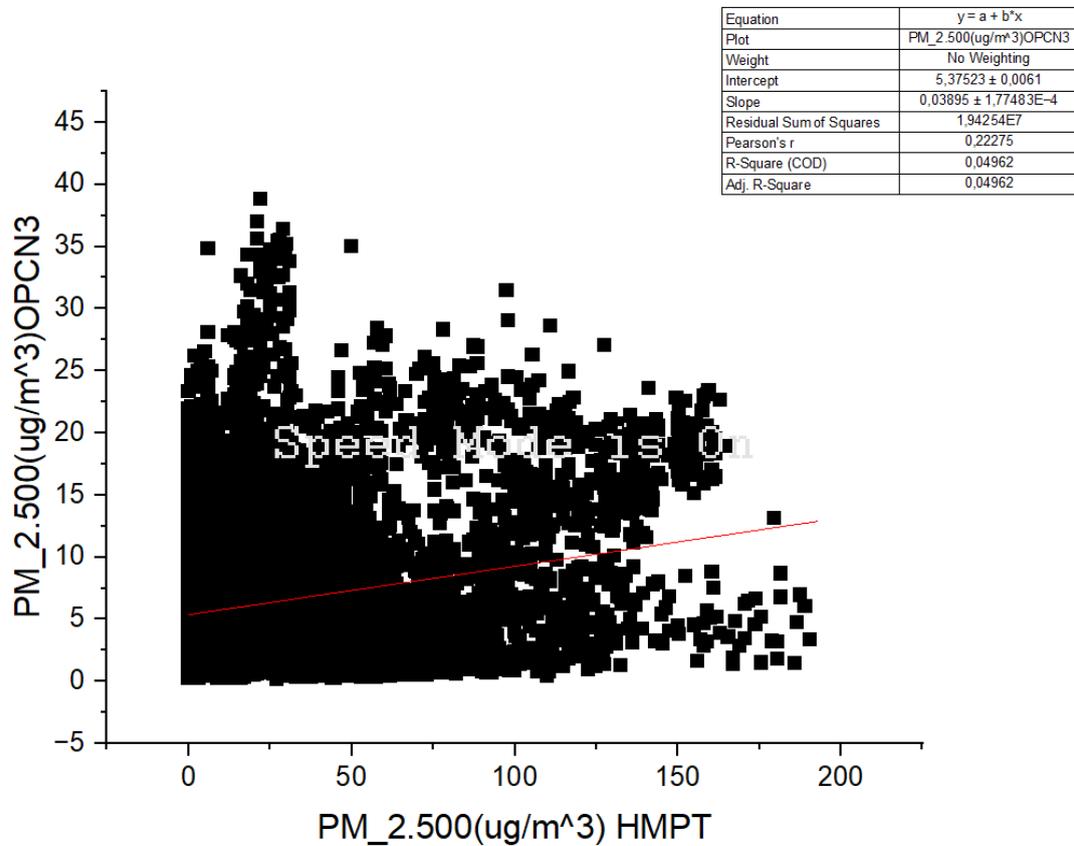
➡ Στην συνέχεια τοποθετήθηκαν για 14 ημέρες οι σενσορες ALPHA SENSE και ιδιοκατασκευής. Μέρος αυτής της μέτρησης φαίνεται στο επόμενο γράφημα .



Αυτό μας δείχνει ότι με μεγαλύτερης διάρκειας μέτρηση μπορεί να υλοποιηθεί μια ικανοποιητική εξίσωση διόρθωσης.

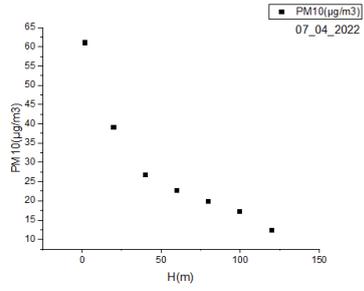
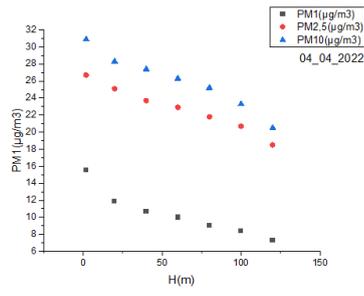
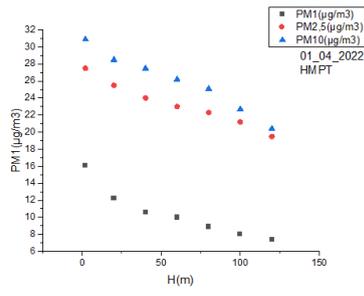
Κατόπιν τούτου για μέτρηση 14 ημερών προέκυψαν τα δεδομένα που φαίνονται στο επόμενο γράφημα και έδωσαν την εξίσωση διόρθωσης .

$$Y=0,03895 *PM +5,37623$$

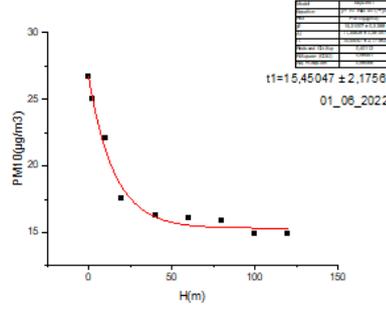
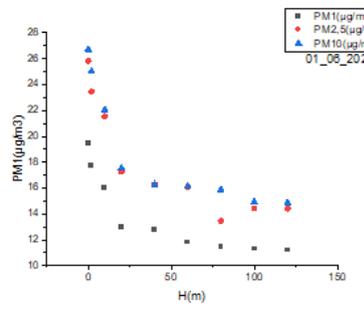
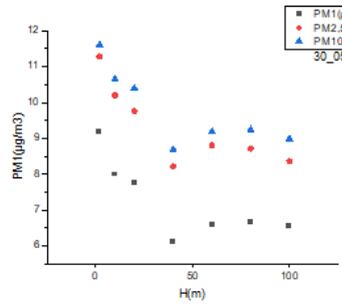
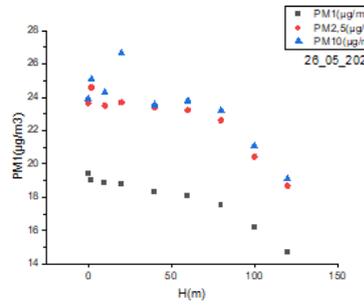


5.10 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ RAWDATA

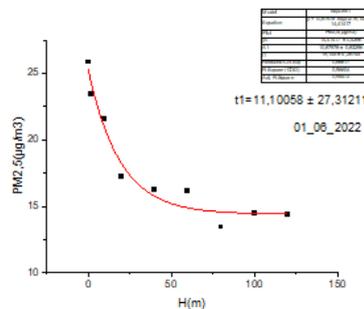
Τον ΑΠΡΙΛΗ ΜΑΙΟ ΚΑΙ ΙΟΥΝΙΟ ΤΟΥ 2022 Πραγματοποιήθηκαν 10 κατακόρυφες πτήσεις οι οποίες φαίνονται στις επόμενες εικόνες και οι οποίες δείχνουν μια επαναλαμβανόμενη εκθετική μείωση καθ' ύψος..



HMPT



PA



Από τις προσαρμογές των καταγραφών προήλθε ο επόμενος πίνακας που καταγράφει τους συντελεστές απόσβεσης σε σχέση με την θερμοκρασία

ΠΙΝΑΚΑΣ: ΕΚΘΕΤΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ Ως προς ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ T

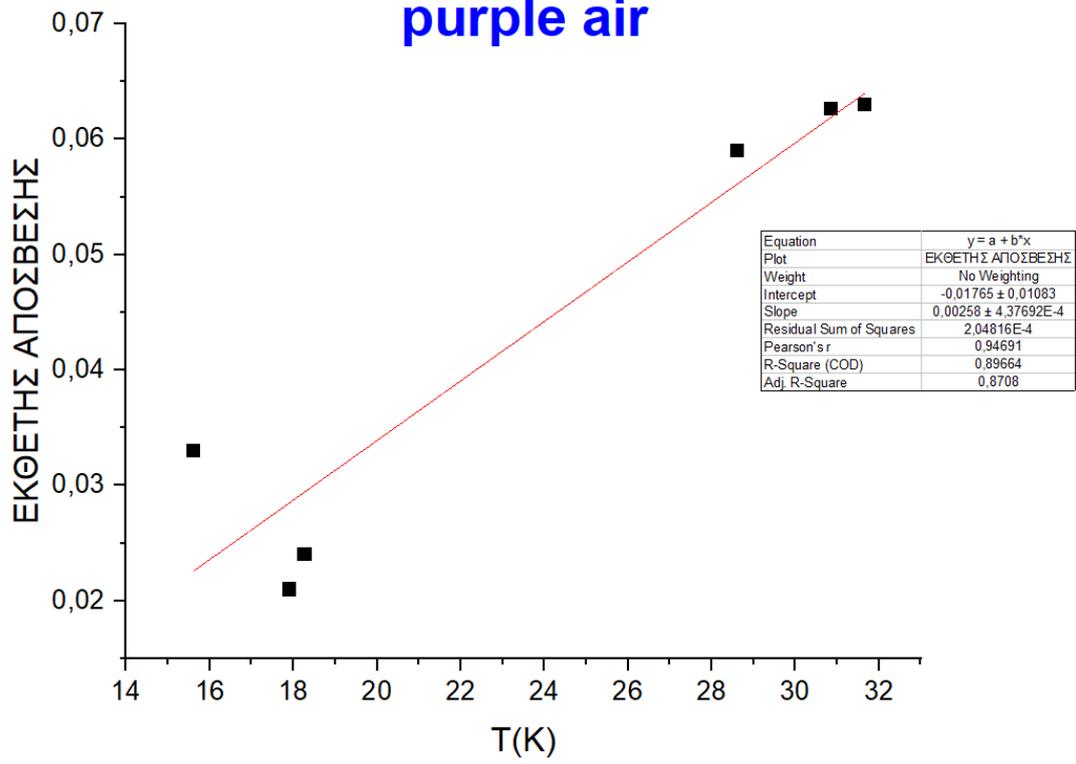
T(C)	ΕΚΘΕΤΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ
30,8642	0,0626
18,27143	0,024
17,91429	0,021
15,60595	0,033
28,61111	0,007
31,66667	0,063
28,61111	0,059

Η γραμμική προσαρμογή αποκαλύπτει μια ευθεία με αρκετά υψηλό R² για τον συντελεστή απόσβεσης πλὴν ὅμως χρειάζεται για την επαλήθευση της αποκάλυψης αυτής αρκετά δεδομένα.

Κατόπιν τούτων η προκύπτουσα γραμμική εξίσωση είναι

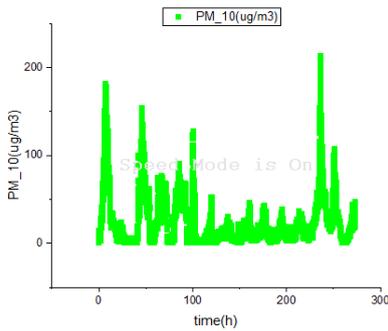
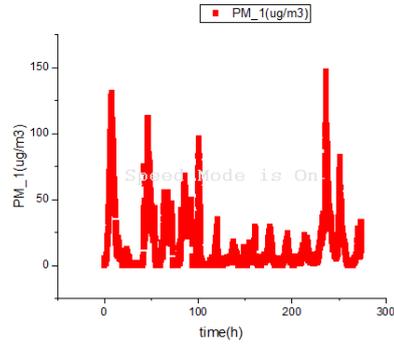
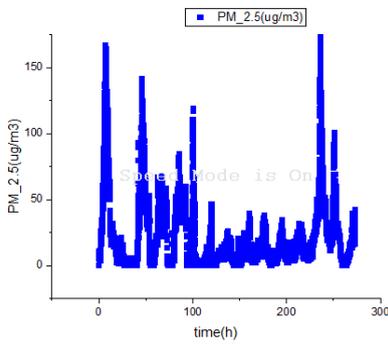
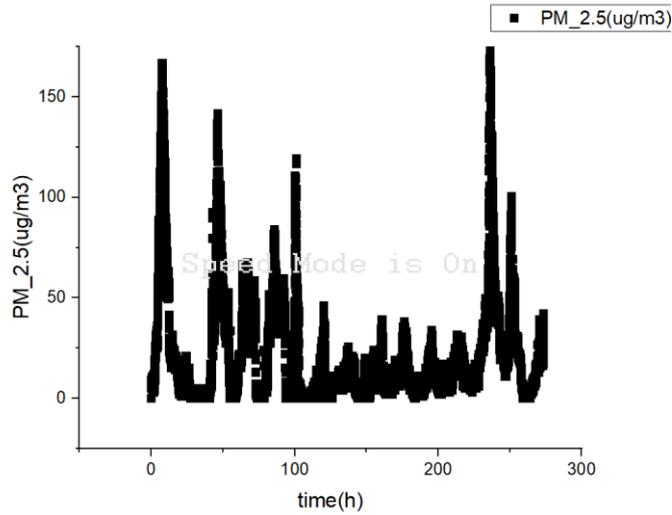
$$Y = 0,0058 * T + (- 0,00765)$$

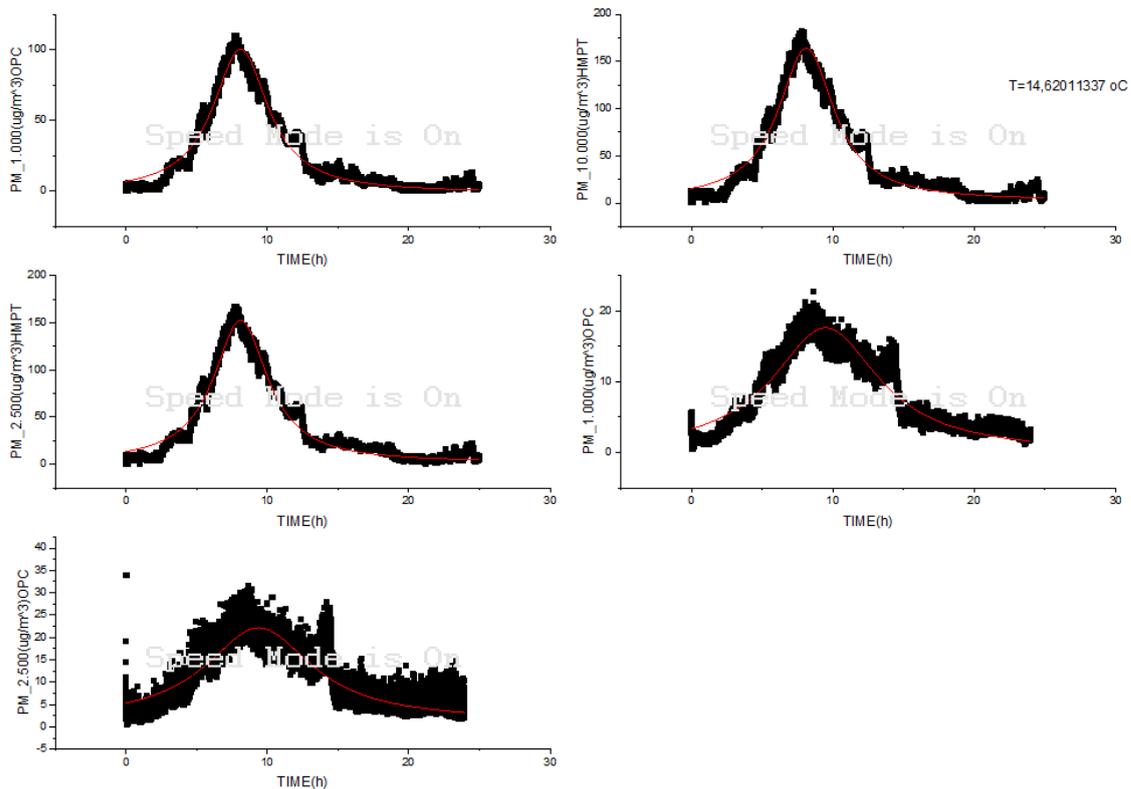
purple air



5.10.1 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ 1 ΜΕ 15 ΦΛΕΒΑΡΗ

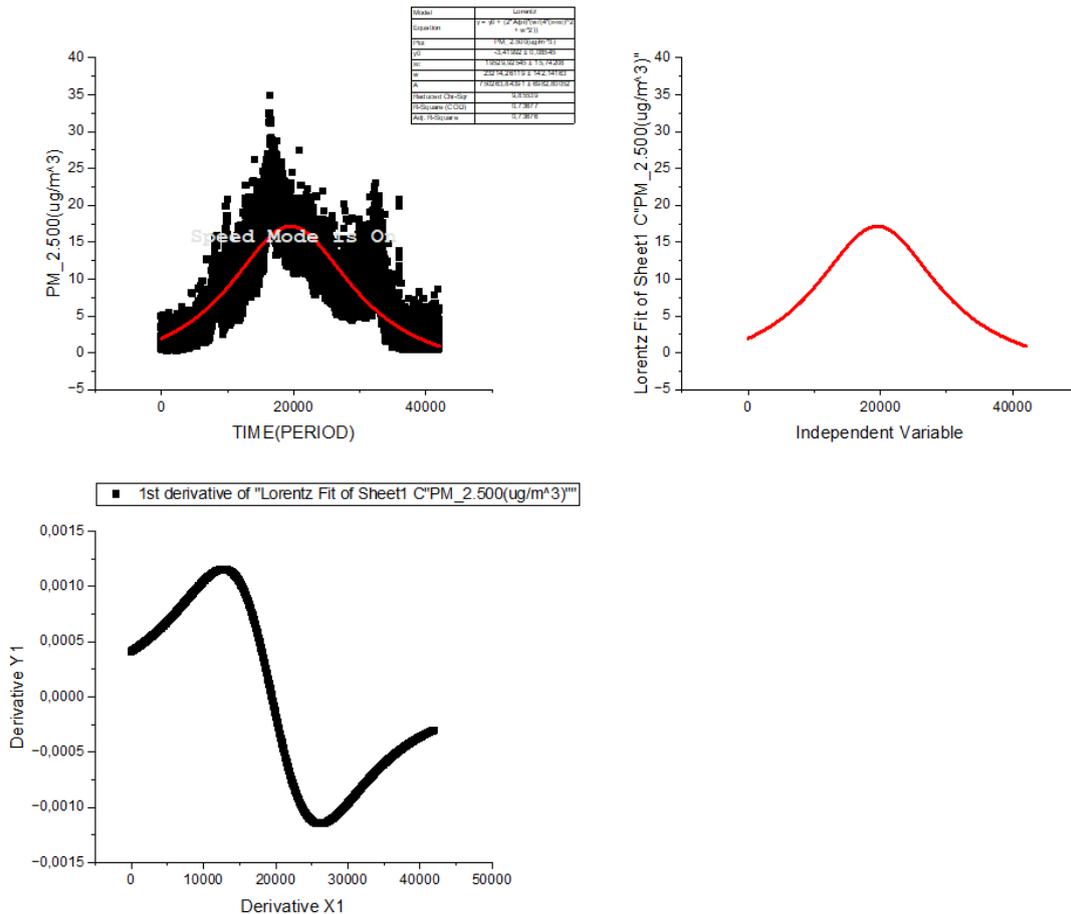
Η προκύπτουσα χρονοσειρά αναλυθείσα κατά ημέρα έδειξε ότι όλες οι κατανομές αποδέχονται μια προσαρμογή πολύ καλής Λορεντζιανής συνάρτησης γεγονός που φαίνεται στα πιο κάτω γραφήματα.





Πέραν της καταγραφής και του μέγιστου σημαντική πληροφορία δίνει
 και το εύρος στο μέσον γνωστό ως FULL WIDTH HALF
 MAXIMOUUM (FWHM) που μας αποκαλύπτει το εύρος του κάθε
 επεισοδίου και τον ανθρωπογενή φόρτο σε διάρκεια. Η τεχνική για
 αυτό τον υπολογισμό είναι η ακόλουθη.

Μετά την προσαρμογή ακολουθεί η παραγωγή (1st derivative process) της συνάρτησης για να βρεθεί με ακρίβεια το FWHM και αυτό φαίνεται στην επόμενη εικόνα



Ακολουθώντας αυτή την τεχνική συγκεντρώνονται τα δεδομένα για τα περισσότερα ημερήσια επεισόδια για να φτιαχτεί ένα μοντέλο **FWHM με θερμοκρασία T και σχετική υγρασία RH.**

FWHM(AU)	T C	RH%
5,61	14,61	45,17
2,98	14,61	45,17
4,1	14,59	34,83
3	14,97	34,94
5,349	14,2	34,94
0,971	13,88	50,46
1	13,88	50,46

Με εφαρμογή του multi linear regression έχουμε το ακόλουθο μοντέλο με συσχέτιση θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας

$$(FWHM) = -27,7871 + 1,3978 * T + 0,4753 * RH - 0,0021 * T * RH$$

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι καθ' ύψος και σε σταθερό σημείο μετρήσεις

5.11 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ-ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

5.11.1 Α. Ανάπτυξη μοντέλου

Σε ένα αριθμό εργασιών η συσχέτιση ελέγχεται με τη δοκιμή Durbin-Watson . Το Durbin-Watson είναι ένα στατιστικό τεστ που ανιχνεύει την αυτοσυσχέτιση στα υπολείμματα από μια ανάλυση παλινδρόμησης.

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα των πτήσεων έχουμε υψηλές τιμές R-square, υποδεικνύοντας μια σχετικά καλή προσαρμογή του μοντέλου στα παρατηρούμενα δεδομένα, με τις περισσότερες πτήσεις .

Η επίδραση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας στις κατακόρυφες κατανομές της συγκέντρωσης PM

Αυτά τα αποτελέσματα μοντελοποίησης δείχνουν ότι η θερμοκρασία έχει στενή σχέση με τη σχετική συγκέντρωση PM (F/G). Η επίδραση της θερμοκρασίας στη συγκέντρωση PM μειώνεται με την πάροδο του χρόνου κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα αντανακλά τη σταθερότητα της ατμοσφαιρικής δομής που επηρεάζει την ένταση της δραστηριότητας των αναταράξεων και διέπει την εξάπλωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Μέσα από την παραπάνω συζήτηση, συνάγεται το συμπέρασμα ότι η ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα έχει σημαντική επίδραση στην κατακόρυφη κατανομή συγκέντρωσης PM . Ομοίως, η επίδραση της σχετικής υγρασίας στη συγκέντρωση PM_{2,5} είναι σημαντική κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ωστόσο, ο συντελεστής RH στο μοντέλο παλινδρόμησης είναι υψηλότερος το πρωί από εκείνον το απόγευμα. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην υψηλότερη σχετική υγρασία το πρωί από το απόγευμα .

Η επίδραση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας στις κατακόρυφες κατανομές της συγκέντρωσης PM.

Αυτά τα αποτελέσματα μοντελοποίησης δείχνουν ότι η θερμοκρασία έχει στενή σχέση με τη σχετική συγκέντρωση PM (F/G). Η κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα αντανακλά τη σταθερότητα της ατμοσφαιρικής δομής που επηρεάζει την ένταση της δραστηριότητας των αναταράξεων και διέπει την εξάπλωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Μέσα από την παραπάνω συζήτηση, συνάγεται το

συμπέρασμα ότι η ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα έχει σημαντική επίδραση στην κατακόρυφη κατανομή συγκέντρωσης PM .

Το μοντέλλο

$$\frac{F}{G} = \{a1 * T + b1 * RH + c1 * ALTITUDE + d1 * PRESSURE\} + \{a2 * T + b2 * RH + c2 * ALTITUDE + d2 * PRESSURE\} + \{a3 * T + b3 * RH + c3 * ALTITUDE + d3 * PRESSURE\} + \dots \quad (2)$$

Οι συγκεντρώσεις PM αλλάζουν επίσης κατά τη διάρκεια της ημέρας και παρουσιάζουν αυξητική τάση από το πρωί έως το απόγευμα. Το κατακόρυφο προφίλ των συγκεντρώσεων PM επηρεάζεται επίσης από μετεωρολογικές παραμέτρους. Η θερμοκρασία του αέρα έχει τη σημαντικότερη επίδραση στην κατακόρυφη διακύμανση των συγκεντρώσεων PM. Επιπλέον, η σχετική υγρασία επηρεάζει σημαντικά το κατακόρυφο προφίλ των συγκεντρώσεων PM .

Η θερμοκρασία του αέρα και η σχετική υγρασία έχουν πιο σημαντικές επιπτώσεις στο κατακόρυφο μοτίβο των συγκεντρώσεων PM το πρωί από ότι το απόγευμα

- Το υψόμετρο είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας .
- Αλλά εάν υπάρχει στρώμα θερμικής αναστροφής, η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία είναι πιο σημαντικά.

5.11.2 Β ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

Οι συντελεστές συσχέτισης χρησιμοποιούνται για να μετρηθεί πόσο ισχυρή είναι μια σχέση μεταξύ δύο μεταβλητών. Υπάρχουν διάφοροι τύποι συντελεστή συσχέτισης, αλλά ο πλέον αποδεκτός είναι ο συντελεστής Pearson. Το πλήρες όνομα είναι το Pearson Product Moment Association (PPMC).

$$R = \frac{n(\sum xy) - \sum x \sum y}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (1)$$

Η συσχέτιση του Pearson (που ονομάζεται επίσης Pearson's R) είναι ένας συντελεστής συσχέτισης που χρησιμοποιείται συνήθως στη γραμμική παλινδρόμηση .

Οι τύποι του συντελεστή συσχέτισης χρησιμοποιούνται για να βρεθεί πόσο ισχυρή είναι μια σχέση μεταξύ των δεδομένων. Οι τύποι επιστρέφουν μια τιμή μεταξύ -1 και 1, όπου:

- 1 υποδεικνύει μια ισχυρή θετική σχέση. -1 υποδεικνύει μια ισχυρή αρνητική σχέση
- Ένας συντελεστής συσχέτισης 1 σημαίνει ότι για κάθε θετική αύξηση σε μια μεταβλητή, υπάρχει μια θετική αύξηση ενός σταθερού ποσοστού σε μια άλλη.
- Ένας συντελεστής συσχέτισης -1 σημαίνει ότι για κάθε θετική αύξηση σε μια μεταβλητή, υπάρχει μια αρνητική μείωση μιας σταθερής αναλογίας στην άλλη.
- Το μηδέν σημαίνει ότι για κάθε αύξηση δεν υπάρχει θετική ή αρνητική αύξηση. Τα δύο απλά δεν έχουν καμία σχέση.

MAY/JUNE	T	RH	PRESSURE	HEIGHT
F1/G1	0,918	0,88	0,8232	-0,184
F2/G2	0,988	0,96	0,845	-0,48
F3/G3	0,862	-0,62	0,84	-0,742
F4/G4	0,84	-0,53	0,789	-0,834

ΠΙΝΑΚΑΣ 4 ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ (T RH PRESSURE HEIGHT) ΚΑΙ ΜΙΑΣ ΕΞΑΡΤΗΜΕΝΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ (ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ PM) ΚΑΙ ΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ R

X(T ΣΕ C)	Y(PM2,5μg/m ³)	X*Y	X ²	Y ²
34,44444	25,835	889,8721	1186,419	667,4472
33,33333	23,45	781,6666	1111,111	549,9025
32,77778	21,53	705,7056	1074,383	463,5409
32,77778	17,26	565,7445	1074,383	297,9076
31,66667	16,285	515,6917	1002,778	265,2012
29,44444	16,105	474,2027	866,975	259,371
28,11111	14,415	405,2217	790,2345	207,7922
27,88889	14,43	402,4367	777,7902	208,2249
27,33333	14,415	394,01	747,1109	207,7922
27,77778	163,725	5134,551	8631,185	3127,18

ΠΙΝΑΚΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ R ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ (T) ΚΑΙ ΕΞΑΡΤΗΜΕΝΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ (ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ PM)

R= 0,917634

5.12 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Είναι γνωστό ότι οι μετρήσεις της κατακόρυφης κατανομής των συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικών ρύπων παρέχουν βασικές πληροφορίες για ακριβείς εκτιμήσεις του **μηχανισμού διασποράς** των τοπικών ρύπων μεταξύ του οριακού στρώματος και της τροπόσφαιρας για σωματίδια (PM). Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι, οι συγκεντρώσεις PM μειώνονται όσο αυξάνεται το ύψος, (με εξαίρεση όταν εμφανίζεται **στρώμα αναστροφής της θερμοκρασίας** του αέρα) και ο ρυθμός μείωσης των συγκεντρώσεων PM είναι μεγαλύτερος τις πρωινές από τις απογευματινές πτήσεις. Από τα μοντέλα πολλαπλής παλινδρόμησης, η κατανομή των σχετικών

συγκεντρώσεων PM 1, 2,5, 10 μεταξύ κατακόρυφων και επίγειων παρατηρήσεων είναι καλά χαρακτηρισμένη και οι συντελεστές **παλινδρόμησης** τεσσάρων μετρούμενων παραγόντων (δηλαδή θερμοκρασία αέρα, σχετική υγρασία, πίεση αέρα και ύψος) εξηγούν αποτελεσματικά τις επιπτώσεις τους στα κατακόρυφα μοτίβα κατανομής. **Η θερμοκρασία του αέρα και η σχετική υγρασία είναι οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την κατακόρυφη κατανομή των συγκεντρώσεων .**

Η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι μια διαδικασία ανταλλαγής μάζας επιφάνειας-αέρα και η μεταφορά, η συσσώρευση και η διάχυση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης καθορίζεται από τη δυναμική δομή του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος .

Καταγράφει θερμοκρασία με ανάλυση 0,03 C και καταγράφει σχετική υγρασία με ανάλυση 0,03% κάθε δεκα δευτερόλεπτα. Το πολυλειτουργικό καταγραφικό GPS καταγράφει τα τρισδιάστατα δεδομένα τοποθεσίας του UAV κάθε δευτερόλεπτο. Το UAV πετάει από άνθρωπο πιλότο. Η ταχύτητα του ανέμου ήταν μεταξύ 0,5 m/s και 4 m/s κοντά στο έδαφος. Οι συγκεντρώσεις υποβάθρου των PM_{2,5} εξήχθησαν από δεδομένα παρακολούθησης. Για τα PM, το όργανο μέτρησης που βασίζεται στην αρχή της σκέδασης φωτός μπορεί να επηρεαστεί από τη σχετική υγρασία , και καλο θα είναι να χρησιμοποιηθεί ένας συντελεστής διόρθωσης .

Προφανώς , απροσδόκητες συνθήκες όπως ο αστοχία εξοπλισμού και περιστασιακή τοπική ρύπανση (π.χ. κάπνισμα, κοντινές εκπομπές απο λεωφορεία (σύνηθες στον περιβάλλοντα χώρο του ΠΑΔΑ κ.λπ.) κατά τη διάρκεια πειραμάτων πεδίου μπορούν να μειώσουν την αξιοπιστία των συλλεγόμενων δεδομένων. Επομένως, όλες οι παρατηρήσεις υποβάλλονται σε εκκαθάριση δεδομένων . Τα μη έγκυρα δεδομένα καταργούνται από το σύνολο δεδομένων.

5.13 Αποτελέσματα και συζήτηση Κάθετες διακυμάνσεις στις συγκεντρώσεις PM

Λόγω της μικρής διαφοράς στο εύρος μεγέθους σωματιδίων, οι κατακόρυφες διακυμάνσεις στα PM₁, PM_{2.5} ήταν παρόμοιες για όλα τα προφίλ. **Το φαινόμενο αποδίδεται κυρίως σε καλύτερη ομογενοποίηση των λεπτών σωματιδίων που ομογενοποιούνται γρήγορα αφού έχει δημιουργηθεί ενώ υπάρχει μεγαλύτερη ετερογένεια χονδροειδών σωματιδίων . Ως εκ τούτου, τα χονδροειδή σωματίδια έχουν υψηλότερη συγκέντρωση κοντά στην πηγή εκπομπής. Η επιρροή των RH ,**

Τις συγκεντρώσεις των σωματιδίων είναι διαφορετικές για τα σωματίδια σε διαφορετικά εύρη μεγεθών. Ωστόσο, στο εύρος 0–120 m, η κυρίαρχη κατεύθυνση του ανέμου είναι οριζόντια υποδηλώνοντας ότι θα μπορούσε να είναι ευκολότερο για τους ατμοσφαιρικούς ρύπους να μεταφερθούν προς την οριζόντια κατεύθυνση. Επιπλέον, η βαρύτητα θα μπορούσε να εμποδίσει την κατακόρυφη προς τα πάνω μεταφορά των ατμοσφαιρικών ρύπων στην άκρη του δρόμου. Ως εκ τούτου, οι συνδυασμένες επιδράσεις των παραγόντων ανέμου και βαρύτητας θα μπορούσαν να είναι ο κύριος συντελεστής.

Παροτι η θέση των κάθετων πτήσεων ήταν κοντά σε δρόμο, η συγκέντρωση των λεπτών σωματιδίων (PM₁) επηρεάστηκε λιγότερο από την κυκλοφορία, αλλά επηρεάστηκε κυρίως από τη συγκέντρωση υποβάθρου (συγκέντρωση πάνω από 40 m). Η συγκέντρωση των χονδροειδών σωματιδίων είναι σημαντικά διαφορετική από αυτή των λεπτών σωματιδίων (PM₁). Προφανώς, η συγκέντρωση του συνόλου άνω των 40 m αποτελείται κυρίως από PM₁. Αυτό είναι λογικό καθώς τα χονδρότερα σωματίδια εναποτίθενται ευκολότερα και έχουν υψηλότερη ετερογένεια στον αέρα. Ως εκ τούτου, τα χονδροειδή PM, έχουν υψηλότερη συγκέντρωση στο σημείο του εδάφους (0 m) το πρωί όταν η κίνηση είναι υψηλότερη. Η συγκέντρωση των χονδροειδών PM είναι χαμηλότερη το βράδυ όταν ο όγκος της κυκλοφορίας είναι χαμηλότερος. Για τα χονδροειδή PM, η υψηλότερη συγκέντρωση εμφανίζεται τις πρωινές ώρες αιχμής. Οι περιορισμοί της μελέτης οφείλονται στις περιορισμένες ημέρες δειγματοληψίας. Δεδομένου ότι οι ημερήσιες και εποχιακές διακυμάνσεις στην κίνηση και η μετεωρολογία είναι σημαντικές και τα δεδομένα συλλέχθηκαν 10 ημέρες κυρίως την άνοιξη, ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα δεν είναι αντιπροσωπευτικά για τα πρότυπα κατανομής των ρύπων σε άλλες εποχές. Επιπλέον, οι ατμοσφαιρικοί ρύποι που ερευνήθηκαν ήταν τα PM. Χρειάζονται και άλλοι ρύποι που σχετίζονται με την κυκλοφορία, όπως CO, BC, NOX, και δεν συμπεριλήφθηκαν σε αυτή την μελέτη. Η αύξηση του αριθμού των ημερών δειγματοληψίας και των τύπων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης θα μπορούσε να βοηθήσει τους ερευνητές και τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής να αποκτήσουν πιο ακριβή αποτελέσματα και βαθύτερες γνώσεις, κάτι που είναι ζωτικής σημασίας για την αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Επίσης είναι σημαντικό να γίνει καταγραφή όγκων κυκλοφορίας

Γενικά, η συγκέντρωση PM μειώνεται όσο αυξάνεται το ύψος και η συγκέντρωση των PM αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου μέχρι να φτάσει το απόγευμα. **Η συγκέντρωση των PM φτάνει στο μέγιστο με την ισχυρότερη ηλιακή ακτινοβολία** . Το απόγευμα, μειώνεται η συγκέντρωση των PM . Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι μπορούν να μεταφερθούν στο έδαφος κατά τη διάρκεια της προηγούμενης νύχτας, γεγονός που αυξάνει τη συσσώρευση ρύπων στο έδαφος

Η επίδραση των μετεωρολογικών συνθηκών στην αραίωση, τη διάχυση και τη συσσώρευση ρύπων είναι επομένως δεδομένη. Χρησιμοποιούμε τον συντελεστή συσχέτισης για να αναλύσουμε τη σχέση, καθώς ο συντελεστής συσχέτισης Pearson μπορεί να αντικατοπτρίζει τη γραμμική συσχέτιση μεταξύ δύο μεταβλητών. Μέσω της ανάλυσης συσχέτισης Pearson των δεδομένων, μπορεί να προσδιοριστεί η ισχύς της συσχέτισης μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών και των εξαρτημένων μεταβλητών. Η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, η πίεση του αέρα και το ύψος είναι ανεξάρτητες μεταβλητές, και η συγκέντρωση PM σε διαφορετικό υψόμετρο πάνω από το έδαφος και κοντά στην επιφάνεια (F/G) είναι εξαρτημένη μεταβλητή. Η ταχύτητα του ανέμου είναι δύσκολο να μετρηθεί λόγω των αναταράξεων που προκαλούνται από την κίνηση του UAV. Όμως ο άνεμος κατά τις ημέρες του πειράματος δεν ήταν τόσο δυνατός .

Η ανάλυση συσχέτισης Pearson δείχνει ότι οι ανεξάρτητες μεταβλητές θερμοκρασία, σχετική υγρασία, πίεση αέρα και ύψος έχουν υψηλή συσχέτιση με την εξαρτημένη μεταβλητή F/G. Επιπλέον, όπως μπορούμε να δούμε, οι μεταβλητές θερμοκρασίας και πίεσης αέρα παραμένουν πάντα θετικές και το μεταβλητό ύψος συσχετίζεται αρνητικά με την εξαρτημένη μεταβλητή. Ενώ η μεταβλητή RH παραμένει θετική η συσχέτιση

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

A.A. Karner, D.S. Eisinger, D.A. Niemeier, Near-roadway air quality: synthesizing the findings from real-world data, *Environ. Sci. Technol.* 44 (14) (2010) 5334–5344.

A.A. Karner, D.S. Eisinger, D.A. Niemeier. Near-roadway air quality: synthesizing the findings from real-world data. *Environ Sci Technol* Vol.44(2010), p.5334–44.

B. Beckerman, M. Jerrett, J.R. Brook, D.K. Verma, M.A. Arain, M.M. Finkelstein, Correlation of nitrogen dioxide with other traffic pollutants near a major expressway, *Atmos. Environ.* 42 (2) (2008) 275–290

Blocken B, Stathopoulos T, Saathoff P and Wang X 2008 Numerical evaluation of pollutant dispersion in the built environment: comparisons between models and experiments *J. Wind. Eng. Ind. Aerod.* 96 1817-31

Chowdhury, Z.; Campanella, L.; Gray, C.; Al Masud, A.; Marter-Kenyon, J.; Pennise, D.; Charron, D.; Zuzhang, X. Measurement and modeling of indoor air pollution in rural households with multiple stove interventions in Yunnan, China. *Atmos. Environ.* 2013, 67, 161–169.

Christof Gromke* , Nabaraj Jamarkattel, Bodo RuckH Influence of roadside hedgerows on air quality in urban street canyons *Atmospheric Environment* [Volume 139](#), August 2016, Pages 75-8

Costa, M.A.M.; Carvalho, J.A.; Neto, T.G.S.; Anselmo, E.; Lima, B.A.; Kura, L.T.U.; Santos, J.C. Real-time sampling of particulate matter smaller than 2.5 µm from Amazon forest biomass combustion. *Atmos. Environ.* 2012, 54, 480–489.

D. Wang, Z. Wang, Z.-R. Peng, Using unmanned aerial vehicle to investigate the vertical distribution of fine particulate matter, *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 17 (1) (2020) 219–230.

D.S. Eisinger, D.A. Niemeier, Near-roadway air quality: synthesizing the findings from real-world data, *Environ. Sci. Technol.* 44 (14) (2010) 5334–5344

D.W. Dockery, Epidemiologic evidence of cardiovascular effects of particulate air pollution. *Environmental Health Perspectives* Vol.109(2001), P.483-486.

Dongho Shin^{1,2}, Younghun Kim^{1,2}, Kee-Jung Hong¹, Gunhee Lee¹, Inyong Park¹, Hak-Joon Y-1, Jin Kim¹, Bangwoo Han^{1*}, Jungho Hwang^{2*} ¹ Department of Environment Machinery, Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon 34103, Korea ² Mechanical engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Korea Aerosol and air quality research [2020 - Volume 20](#)

F. Amato, N. Perez, M. Lopez, A. Ripoll, A. Alastuey, M. Pandolfi, A. Karanasiou, A. Salmatouidis, E. Padoan, D. Frasca, M. Marcoccia, M. Viana, T. Moreno, C. Reche, V. Martins, M. Brines, M.C. Minguillon, M. Ealo, I. Rivas, B. van Drooge, J. Benavides, J.M. Craviotto, X. Querol, Vertical and horizontal fall-off of black carbon and NO₂ within urban blocks, *Sci. Total Environ.* 686 (2019) 236–245

Fierz, M.; Houle, C.; Steigmeier, P.; Burtscher, H. Design, Calibration, and Field Performance of a Miniature Diffusion Size Classifier. *Aerosol Sci. Technol.* 2011, 45, 1–10.

G.T. Poyi, A. Bousbaine, M.H. Wu, Computational fluid dynamics model of a quadrotor helicopter for dynamic analysis, *Int. J. Res. Eng. Adv. Technol.* 4 (3) (2016) 32–41. T. Zheng et al. *Building and Environment* 187 (2021) 107401 11 [41] P. Haas, C. Balistreri, P. Pontelandolfo, G. Triscone, H. Pekoz, A. Pignatiello, Development of an unmanned aerial vehicle UAV for air quality measurements in urban areas, 32nd AIAA Applied Aerodynamics Conference, 2014, p. 2272.

Giechaskiel, B.; Maricq, M.; Ntziachristos, L.; Dardiotis, C.; Wang, X.; Axmann, H.; Bergmann, A.; Schindler, W. Review of motor vehicle particulate emissions sampling and measurement: From smoke and filter mass to particle number. *J. Aerosol Sci.* 2014, 67, 48–86.

Gong, W.; Zhang, M.; Han, G.; Ma, X.; Zhu, Z. An Investigation of Aerosol Scattering and Absorption Properties in Wuhan, Central China. *Atmosphere* 2015, 6, 503–520.

Goran Tmušić 1 , Salvatore Manfreda 2*, Helge Aasen 3 , Mike R. James 4 , Gil Gonçalves 5 , Eyal Ben-Dor 6 , Anna Brook 7 , Maria Polinova 7 , Jose Juan Arranz 8 , János Mészáros 9 , Ruodan Zhuang 10, Kasper Johansen 11, Yoann Malbeteau 11,12, Isabel P. de Lima 13, Corine Davids 14, Sorin Herban 15 and Matthew F. McCabe 11 Current Practices in UAS-based Environmental Monitoring *Remote Sens.* 2020, 12, 1001 doi: 10.3390/rs12061001

Hanna S R, Briggs GA and Hosker RP 1982 Handbook on Atmospheric Diffusion. DOE/TIC11223 (U. S. Department of Energy, Oak Ridge, TN)

HEI. Traffic-related air pollution: a critical review of the literature on emissions, exposure, and health effects. HEI special report 17. Health Effects Institute, Boston MA.

Hinds, W.C. *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, 2nd ed.; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 1999.

Hosseini, S.; Li, Q.; Cocker, D.; Weise, D.; Miller, A.; Shrivastava, M.; Miller, J.W.; Mahalingam, S.; Princevac, M.; Jung, H. Particle size distributions from laboratory-scale biomass fires using fast response instruments. *Atmos. Chem. Phys.* 2010, 10, 8065–8076.

J. B. Babaan 1 , J. P. Ballori 1 , A. M. Tamondong 1 , R. V. Ramos 1 , P. M. Ostrea 2 ESTIMATION OF PM 2.5 VERTICAL DISTRIBUTION USING CUSTOMIZED UAV AND MOBILE SENSORS IN BRGY. UP CAMPUS, DILIMAN, QUEZON CITY The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-4/W9, 2018 International Conference on

Geomatics and Geospatial Technology (GGT 2018), 3–5 September 2018, Kuala Lumpur, Malaysia

J. Gulliver, D.J. Briggs, Personal exposure to particulate air pollution in transport microenvironments. *Atmos Environ* Vol.38(2004), p.1–8.

J.A. Pickrell, L.E. Erickson, K.J. Klabunde, Toxicity of inhaled nanomaterials. In *Nanoscale Materials in Chemistry*, 2nd ed. Klabunde, K. J., Richards, R. M., Eds.; John Wiley & Sons, Inc., 2009; Chapter 22, pp 729–769.

Jiang, R.; Bell, M.L. A Comparison of Particulate Matter from Biomass-Burning Rural and Non-Biomass-Burning Urban Households in Northeastern China. *Environ. Health Perspect.* 2008, 116, 907–914.

Joel Kuula et al Applicability of Optical and Diffusion Charging-Based Particulate Matter Sensors to Urban Air Quality Measurements *Aerosol and Air Quality Research*, 19: 1024–1039, 2019 Copyright doi: 10.4209/aaqr.2018.04.0143

Johnson, T.J.; Symonds, J.P.R.; Olfert, J.S. Mass–Mobility Measurements Using a Centrifugal Particle Mass Analyzer and Differential Mobility Spectrometer. *Aerosol Sci. Technol.* 2013, 47, 1215–1225.

K. Weber, G. Heweling, C. Fischer, M. Lange, The use of an octocopter UAV for the determination of air pollutants—a case study of the traffic induced pollution plume around a river bridge in Duesseldorf, Germany, *Int. J. Educ. Literacy Stud.* 2 (2017) 63–66.

K. Weber, G. Heweling, C. Fischer, M. Lange, The use of an octocopter UAV for the determination of air pollutants—a case study of the traffic induced pollution plume around a river bridge in Duesseldorf, Germany, *Int. J. Educ. Literacy Stud.* 2 (2017) 63–66.

K.-F. Lu, H.-D. He, H.-W. Wang, X.-B. Li, Z.-R. Peng, Characterizing temporal and vertical distribution patterns of traffic-emitted pollutants near an elevated expressway in urban residential areas, *Build. Environ.* 172 (2020) 106678 .

Kontogiannis, S.G.; Ekaterinaris, J.A. Design, performance evaluation and optimization of a UAV. *Aerosp. Sci. Technol.* 2013, 29, 339–350

Krecl, P.; Ström, J.; Johansson, C. Carbon content of atmospheric aerosols in a residential area during the wood combustion season in Sweden. *Atmos. Environ.* 2007, 41, 6974–6985.

Lack, D.A.; Lovejoy, E.R.; Baynard, T.; Pettersson, A.; Ravishankara, A.R. Aerosol Absorption Measurement Using Photoacoustic Spectroscopy: Sensitivity, Calibration, and Uncertainty Developments. *Aerosol Sci. Technol.* 2006, 40, 697–708.

Leskinen, J.; Tissari, J.; Uski, O.; Virén, A.; Torvela, T.; Kaivosoja, T.; Lamberg, H.; Nuutinen, I.; Kettunen, T.; Joutsensaari, J.; et al. Fine particle emissions in three different combustion conditions of a wood chip-fired appliance—Particulate physico-chemical properties and induced cell death. *Atmos. Environ.* 2014, 86, 129–139.

Liu et al. *Geosci. Lett.* (2018) 5:24 <https://doi.org/10.1186/s40562-018-0123-x>
RESEARCH LETTER Parameterization of vertical dispersion coefficient over idealized rough surfaces in isothermal conditions Chun-Ho Liu*†, Ziwei Mo† and Zhangquan Wu†

M Mehdi^{1,2}, M P Panin¹ and B Mohammedi² Modelling of distribution of aerosol emission with account of buildings and structures of NPPs *Materials Science and Engineering* 487 (2019) 012011 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/487/1/012011

M. Jamriska, L. Morawska, K. Mergersen, The effect of temperature and humidity on size segregated traffic exhaust particle emissions, *Atmos. Environ.* 42 (10) (2008) 2369–2382

Manfreda, S.; McCabe, M.; Miller, P.; Lucas, R.; Pajuelo Madrigal, V.; Mallinis, G.; Ben Dor, E.; Helman, D.; Estes, L.; Ciralo, G.; et al. On the Use of Unmanned Aerial Systems for Environmental Monitoring. *Remote Sens.* 2018, 10, 641

Merone R N 2004 Wind tunnel and numerical simulation of pollution dispersion: a hybrid approach. Working paper, Croucher Advanced Study Institute on Wind Tunnel Modeling, (Hong Kong University of Science and Technology)

Meroney R N, Leitl B M, Rafailidis S and Schatzmann M 1999. Wind-tunnel and numerical modeling of flow and dispersion about several building shapes *J. Wind. Eng. Ind. Aerod.* 81 333-45

Michael R. Giordano a,b,**, Carl Malings c, Spyros N. Pandis d,e, Albert A. Presto f, V. F. McNeill g, Daniel M. Westervelt h,i, Matthias Beekmann a,j, R. Subramanian a,b,f From low-cost sensors to high-quality data: A summary of challenges and best practices for effectively calibrating low-cost particulate matter mass sensors *Journal of Aerosol Science* 158 (2021) 105833

Misti Levy Zamora, † Fulizi Xiong,‡ Drew Gentner*,‡ Branko Kerkez,§ Joseph Kohrman-Glaser,‡ and Kirsten Koehler*,† Field and Laboratory Evaluations of the Low-Cost Plantower Particulate Matter Sensor Cite This: *Environ. Sci. Technol.* 2019, 53, 838–849

Murakami S and Mochida A 1988 3-D numerical simulation of airflow around a cubic model by means of the k-ε model *J. Wind. Eng. Ind. Aerod.* 31 283–303

Nussbaumer, T.; Czasch, C.; Klippel, N.; Johansson, L.; Tullin, C. Particulate emissions from biomass combustion in IEA countries. In *Proceeding of the 16th European Biomass Conference and Exhibition, Zurich, Switzerland, 2–6 June 2008*; p. 40.

Obaidullah, M.; Bram, S.; Verma, V.; de Ruyck, J. A review on particle emissions from small scale biomass combustion. *Int. J. Renew. Eergy Res.* 2012, 2, 147–159.

P.E. Schwarze, J. Øvrevik, M. Låg, M. Refsnes, P. Nafstad, R.B. Hetland, E. Dybing, Particulate matter properties and health effects: Consistency of epidemiological and toxicological studies. *Hum. Exp. Toxicol.* Vol. 25(2006), p.559–579.

Pettersson, A.; Lovejoy, E.R.; Brock, C.A.; Brown, S.S.; Ravishankara, A.R. Measurement of aerosol optical extinction at with pulsed cavity ring down spectroscopy. *J. Aerosol Sci.* 2004, 35, 995–1011. in Augsburg, Germany. *Atmos. Chem. Phys.* 2012, 6113–6128.

Prado, G.F.; Zanetta, D.M.T.; Arbex, M.A.; Braga, A.L.; Pereira, L.A.A.; de Marchi, M.R.R.; de Melo Loureiro, A.P.; Marcourakis, T.; Sugauara, L.E.; Gattás, G.J.F.; et al. Burnt sugarcane harvesting: particulate matter exposure and the effects on lung function, oxidative stress, and urinary 1-hydroxypyrene. *Sci. Total Environ.* 2012, 437, 200–208.

R. McConnell, K. Berhane, L. Yao, M. Jerrett, F. Lurmann, F. Gilliland, N. Kunzli, J. Gauderman, E. Avol, D. Thomas, J. Peters, Traffic, susceptibility, and childhood asthma. *Environmental Health Perspectives* Vol. 114 (5)(2006), p.766-772.

Saathoff P, Gupta A, Stathopoulos T and Lazure L 2009 Contamination of fresh air intakes due to downwash from a rooftop structure *J. Air. Waste. Manag. Assoc.* 59 343–53

Santoro, R.; Shaddix, C. Laser-induced incandescence. In *Applied Combustion Diagnostics*; Kohse-Höinghaus, K., Jeffries, J., Eds.; Taylor and Francis: New York, NY, USA, 2002; pp. 252–286.

Shi, Y.; Thomasson, J.A.; Murray, S.C.; Pugh, N.A.; Rooney, W.L.; Shafian, S.; Rajan, N.; Rouze, G.; Morgan, C.L.S.; Neely, H.L.; et al. Unmanned Aerial Vehicles for High-Throughput Phenotyping and Agronomic Research. *PLoS ONE* 2016, 11, e0159781

Simone Simões Amaral et al An Overview of Particulate Matter Measurement Instruments *Atmosphere* 2015, 6, 1327-1345; doi:10.3390/atmos6091327

Snyder W 1981 Guidelines for Fluid Modelling of Atmospheric Diffusion. EPA office of Air quality, planning and standards, Research triangle park, NC, EPA-600/8-81-009

T.F. Villa, E. Jayaratne, L. Gonzalez, L. Morawska, Determination of the vertical profile of particle number concentration adjacent to a motorway using an unmanned aerial vehicle, *Environ. Pollut.* 230 (2017) 134–142.

T.F. Villa, E. Jayaratne, L. Gonzalez, L. Morawska, Determination of the vertical profile of particle number concentration adjacent to a motorway using an unmanned aerial vehicle, *Environ. Pollut.* 230 (2017) 134–142.

Tziavou, O.; Pytharouli, S.; Souter, J. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based mapping in engineering geological surveys: Considerations for optimum results. *Eng. Geol.* 2018, 232, 12–21.

Vincent, J.H. *Aerosol Sampling: Science, Standards, Instrumentation and Applications*; JohnWiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2007.

Weixun Lv, et al Vertical and Horizontal Profiles of Particulate Matter and Black Carbon Near Elevated Highways Based on Unmanned Aerial Vehicle Monitoring *Sustainability* 2020, 12, 1204

Weixun Lv, et al A Review on the Dispersion and Distribution Characteristics of Pollutants in Street Canyons and Improvement Measures *Energies* 2021, 14, 6155.
<https://doi.org/10.3390/en14196155>

Wentzel, M.; Gorzawski, H.; Naumann, K.-H.; Saathoff, H.; Weinbruch, S. Transmission electron microscopical and aerosol dynamical characterization of soot aerosols. *J. Aerosol Sci.* 2003, 34, 1347–1370.

Wilson, W.E.; Chow, J.C.; Claiborn, C.; Fusheng, W.; Engelbrecht, J.; Watson, J.G. Monitoring of particulate matter outdoors. *Chemosphere* 2002, 49, 1009–1043.

X.-B. Li, D. Wang, J. Zhao, Z.-R. Peng, Regional prediction of groundlevel ozone using a hybrid sequence-to-sequence deep learning approach, *J. Clean. Prod.* 253 (2020) 119841.

X.-B. Li, Z.-R. Peng, Q.-C. Lu, D. Wang, X.-M. Hu, D. Wang, B. Li, Q. Fu, G. Xiu, H. He, Evaluation of unmanned aerial system in measuring lower tropospheric ozone and fine aerosol particles using portable monitors, *Atmos. Environ.* 222 (2020) 117134.

X.-B. Li, Z.-R. Peng, Q.-C. Lu, D. Wang, X.-M. Hu, D. Wang, B. Li, Q. Fu, G. Xiu, H. He, Evaluation of unmanned aerial system in measuring lower tropospheric ozone and fine aerosol particles using portable monitors, *Atmos. Environ.* 222 (2020) 117134.

J. A.Salmond, D.E. Williams, G. Laing, The influence of vegetation on the horizontal and vertical distribution of pollutants in a street canyon. *Sci Total Environ* Vol. 443(2013), p. 297-298.

Liu, X.C.; Zhong, Y.T.; He, Q.; Yang, X.H.; Ali, M.M.T.M. Vertical distribution of dust aerosol mass concentration in Hinterland of the Taklimakan Desert. *J. Desert Res.* 2012, 32, 1045–1052. (In Chinese)

Charlson, R.J.; Heintzenberg, J. *Aerosol Forcing of Climate*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 1995.

Houghton, J.T.; Ding, Y.; Griggs, D.J.; Noguera, M.; van der Linden, P.J.; Dai, X.; Maskell, K.; Johnson, C.A. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2001.

Zender, C.S.; Miller, R.L.; Tegen, I. Quantifying mineral dust mass budgets: Terminology, constraints, and current estimates. *Eos* 2004, 85, 509–512

5. Mahowald, N.M.; Engelstaedter, S.; Luo, C.; Sealy, A.M.; Artaxo, P.; Benitez-Nelson, C.R.; Bonnet, S.; Chen, Y.; Chuang, P.Y.; Cohen, D.D.; et al. Atmospheric Iron Deposition: Global Distribution, Variability, and Human Perturbations. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 2009, 1, 245–278.

Cheng, T.T.; Shen, Z.B. A Numerical Simulation of Optical Characteristics for Atmospheric Dust Aerosols in Northwest China. *Plateau Meteorol.* 2001, 20, 291–297.

Tegen, I.; Lacis, A.A.; Fung, I. The influence on climate forcing of mineral aerosols from disturbed soils. *Nature* 1996, 380, 419–422. [CrossRef] 8. Creamean, J.; Suski, K.J.; Rosenfeld, D.; Cazorla, A.; DeMott, P.; Sullivan, R.; White, A.B.; Ralph, F.M.; Minnis, P.; Comstock, J.; et al. Dust and Biological Aerosols from the Sahara and Asia Influence Precipitation in the Western U.S. *Science* 2013, 339, 1572–1578. [CrossRef]

Carslaw, K.; Boucher, O.; Spracklen, D.V.; Mann, G.; Rae, J.G.L.; Woodward, S.; Kulmala, M. A review of natural aerosol interactions and feedbacks within the Earth system. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2010, 10, 1701–1737.

Qiu, J.H.; Sun, J.H. Optically remote sensing of the dust storm and result analysis. *Sci. Atmos. Sin.* 1994, 18, 1–9. (In Chinese) 11. Liu, C.; Zhao, T.L.; Xiong, J.; Liu, Y.; Han, Y.X.; Liu, F. A simulated climatology of dust aerosol emissions over 1991–2010 and the influencing factors of atmospheric circulation over the major deserts in the world. *J. Desert Res.* 2015, 35, 959–970. (In Chinese)

Yue, P.; Niu, S.J.; Shen, J.G.; Ge, Z.P. Observation and analysis of micro meteorology parameters and PM10 for an ultra strong dust-storm. *J. Nat. Disasters* 2009, 18, 118–123. (In Chinese)

He, Q.; Jin, L.L.; Yang, X.H.; Liu, X.C.; Li, Z.J.; Liu, Q. Analysis on O₃ Concentration and Affecting Factors for Boundary-Layer in Hinterland of Taklimakan Desert in Autumn. *Plateau Meteorol.* 2010, 29, 214–221. (In Chinese)

He, Q.; Liu, Q.; Yang, X.H.; Ali, M.; Huo, W.; Liang, Y. Profiles of atmosphere boundary layer ozone in winter over Hinterland of Taklimakan Desert. *J. Desert Res.* 2010, 30, 909–916. (In Chinese)

Zhang, X.Y.; Arimoto, R.; An, Z.S. Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation. *J. Geophys. Res.* 1997, 102, 28041–28047. [CrossRef]

Perry, K.D.; Cliff, S.; Jimenez-Cruz, M.P. Evidence for hygroscopic mineral dust particles from the Intercontinental Transport and Chemical Transformation Experiment. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2004, 109. [CrossRef]

Yan, H.; Jiao, M.Y.; Bi, B.G.; Zhang, C.C. Observation on sand-dust aerosol in center of Taklimakan Desert. *J. Desert Res.* 2006, 26, 389–393. (In Chinese)

Li, X. Effects of meteorological factors on optical properties of aerosol in Urumqi. *Arid Zone Res.* 2006, 23, 484–488. (In Chinese) 19. Chan, C.K.; Yao, X. Air pollution in mega cities in China. *Atmos. Environ.*

Chunlin Investigating the vertical distribution patterns of urban air pollution based on unmanned aerial vehicle gradient monitoring *Sustainable Cities and Society* 86 (2022)

Li a, Miao Liu a,* , Yuanman Hu a, Hao Wang b, Zaiping Xiong a, Wen Wu c, Chong Liu a,d, Z. Idrees, Z. Zou, and L. Zheng, “Edge computing based iot architecture for low cost air pollution monitoring systems: A comprehensive system analysis, design considerations & development,” *Sensors*, vol. 18, no. 9, p. 3021, 2018M.

Carrozzo, S. De Vito, E. Esposito, M. Salvato, F. Formisano, E. Massera, G. Di Francia, P. D. Veneri, M. Iadaresta, and A. Mennella, “Uav intelligent chemical multisensor payload for networked and impromptu gas monitoring tasks,” in 2018 5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), June 2018, pp. 112–116M. Carrozzo, S. De Vito, E. Esposito, F. Formisano, M. Salvato, E. Massera, G. Di Francia, P. Delli Veneri, M. Iadaresta, and A. Mennella, “An uav mounted intelligent monitoring system for impromptu air quality assessments,” in *Sensors*, B. Andò, F. Baldini, C. Di Natale, V. Ferrari, V. Marletta, G. Marrazza, V. Militello, G. Miolo, M. Rossi, L. Scalise, and P. Siciliano, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 497–506.

Z. Hu, Z. Bai, Y. Yang, Z. Zheng, K. Bian, and L. Song, “Uav aided aerial-ground iot for air quality sensing in smart city: Architecture, technologies, and implementation,” *IEEE Network*, vol. 33, no. 2, pp. 14–22, 2019.

Z. Idrees, Z. Zou, and L. Zheng, “Edge computing based iot architecture for low cost air pollution monitoring systems: A comprehensive system analysis, design considerations & development,” *Sensors*, vol. 18, no. 9, p. 3021, 2018.

M. Carrozzo, S. De Vito, E. Esposito, M. Salvato, F. Formisano, E. Massera, G. Di Francia, P. D. Veneri, M. Iadaresta, and A. Mennella, “Uav intelligent chemical multisensor payload for networked and impromptu gas monitoring tasks,” in 2018 5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), June 2018, pp. 112–116.

- M. Carrozzo, S. De Vito, E. Esposito, F. Formisano, M. Salvato, E. Massera, G. Di Francia, P. Delli Veneri, M. Iadaresta, and A. Mennella, “An uav mounted intelligent monitoring system for impromptu air quality assessments,” in *Sensors*,
- B. Andò, F. Baldini, C. Di Natale, V. Ferrari, V. Marletta, G. Marrazza, V. Militello, G. Miolo, M. Rossi, L. Scalise, and P. Siciliano, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 497–506.
- Z. Hu, Z. Bai, Y. Yang, Z. Zheng, K. Bian, and L. Song, “Uav aided aerial-ground iot for air quality sensing in smart city: Architecture, technologies, and implementation,” *IEEE Network*, vol. 33, no. 2, pp. 14–22, 2019.
- Q. Gu, D. R Michanowicz, and C. Jia, “Developing a modular unmanned aerial vehicle (uav) platform for air pollution profiling,” *Sensors*, vol. 18, no. 12, p. 4363, 2018.
- Y. Yang, Z. Bai, Z. Hu, Z. Zheng, K. Bian, and L. Song, “Aqnet: Fine-grained 3d spatio-temporal air quality monitoring by aerialground wsn,” in *IEEE INFOCOM 2018-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*. IEEE, 2018, pp. 1–2.
- Y. Yang, Z. Zheng, K. Bian, L. Song, and Z. Han, “Sensor deployment recommendation for 3d fine-grained air quality monitoring using semi-supervised learning,” in *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, 2018, pp. 1–6.
- Y. Yang, Z. Zheng, K. Bian, L. Song, and Z. Han, “Real-time profiling of fine-grained air quality index distribution using uav sensing,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 186–198, Feb 2018.
- Y. Yang, Z. Zheng, K. Bian, Y. Jiang, L. Song, and Z. Han, “Arms: A fine-grained 3d aqi realtime monitoring system by uav,” in *GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference*. IEEE, 2017, pp. 1–6.
- G. M. Bolla, M. Casagrande, A. Comazzetto, R. Dal Moro, M. Destro, E. Fantin, G. Colombatti, A. Aboudan, and E. C. Lorenzini, “Aria: Air pollutants monitoring using uavs,” in *2018 5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*. IEEE, 2018, pp. 225–229.

R. Dai, S. Fotedar, M. Radmanesh, and M. Kumar, "Quality-aware uav coverage and path planning in geometrically complex environments," *Ad Hoc Networks*, vol. 73, pp. 95–105, 2018P.

Zhao, Y. Yang, Y. Zhang, K. Bian, L. Song, P. Qiao, and Z. Li, "Optimal trajectory planning of drones for 3d mobile sensing," in *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. IEEE, 2018, pp. 1–6.].

K. Al-Hajjaji, M. Ezzin, H. Khamdan, A. E. Hassani, and N. Zorba, "Design, development and evaluation of a uav to study air quality in qatar," *CoRR*, vol. abs/1709.05628, 2017.

G. Heweling, C. H. Fischer, and M. Lange, "The use of an octocopter uav for the determination of air pollutants – a case study of the traffic induced pollution plume around a river bridge in duesseldorf , germany," 2017.

L. Golston, N. Aubut, M. Frish, S. Yang, R. Talbot, C. Gretencord, J. McSpirtt, and M. Zondlo, "Natural gas fugitive leak detection using an unmanned aerial vehicle: Localization and quantification of emission rate," *Atmosphere*, vol. 9, no. 9, p. 333, 2018.S. Liu, "Development of a uav-based system to monitor air quality over an oil field," Ph.D. dissertation, Montana Tech of The University of Montana, 2018.

M. Rizk, T. N. Al-Deen, H. Diab, A. M. Ahmad, and Z. El-Bazzal, "Proposition of online uav-based pollutant detector and tracker for narrow-basin rivers: A case study on litani river," *2018 International Conference on Computer and Applications (ICCA)*, pp. 189–195, 2018.

S. Zhou, S. Peng, M. Wang, A. Shen, and Z. Liu, "The characteristics and contributing factors of air pollution in nanjing: A case study based on an unmanned aerial vehicle experiment and multiple datasets," *Atmosphere*, vol. 9, no. 9, p. 343, 2018.].

M. Rizk, T. N. Al-Deen, H. Diab, A. M. Ahmad, and Z. El-Bazzal, "Proposition of online uav-based pollutant detector and tracker for narrow-basin rivers: A case study on litani river," *2018 International Conference on Computer and Applications (ICCA)*, pp. 189–195, 2018.].

S. Liu, "Development of a uav-based system to monitor air quality over an oil field," Ph.D. dissertation, Montana Tech of The University of Montana, 2018.

L. Golston, N. Aubut, M. Frish, S. Yang, R. Talbot, C. Gretencord, J. McSpirtt, and M. Zondlo, "Natural gas fugitive leak detection using an unmanned aerial vehicle: Localization and quantification of emission rate," *Atmosphere*, vol. 9, no. 9, p. 333, 2018.

P. Nolan, J. Pinto, J. González-Rocha, A. Jensen, C. Vezzi, S. Bailey, G. de Boer, C. Diehl, R. Laurence, C. Powers et al., "Coordinated unmanned aircraft system (uas) and ground-based weather measurements to predict lagrangian coherent structures (lcss)," *Sensors*, vol. 18, no. 12, p. 4448, 2018. Q. Gu and C. Jia, "A consumer uav-based air quality monitoring system for smart cities," in *2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, Jan 2019, pp. 1–6. A. Danilov, U. D. Smirnov, and M. A. Pashkevich, "The system of the ecological monitoring of environment which is based on the usage of uav," *Russian Journal of Ecology*, vol. 46, pp. 14–19, 2015. M. Rossi, D. Brunelli, A. Adami, L. Lorenzelli, F. Menna, and F. Remondino, "Gas-drone: Portable gas sensing system on uavs for gas leakage localization," *IEEE SENSORS 2014 Proceedings*, pp. 1431–1434, 2014. Y. Yang, Z. Hu, K. Bian, and L. Song, "Imgsensingnet: Uav vision guided aerial-ground air quality sensing system," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*. IEEE, 2019, pp. 1–9. W. Zang, J. Lin, Y. Wang, and H. Tao, "Investigating small-scale water pollution with uav remote sensing technology," *World Automation Congress 2012*, pp. 1–4, 2012. T. Villa, F. Gonzalez, B. Miljievic, Z. Ristovski, and L. Morawska, "An overview of small unmanned aerial vehicles for air quality measurements: Present applications and future perspectives," *Sensors*, vol. 16, no. 7, p. 1072, 2016.

[A. Khajavi, D. Khalili, F. Azizi, and F. Hadaegh, "Impact of temperature and air pollution on cardiovascular disease and death in iran: A 15-year follow-up of tehran lipid and glucose study," *Science of The Total Environment*, vol. 661, pp. 243 – 250, 2019. [Online]. Available:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719302013>], A.

Commodore, S. Wilson, O. Muhammad, E. Svendsen, and J. Pearce, "Community-based participatory research for the study of air pollution: A review of motivations,

approaches, and outcomes,” *Environmental monitoring and assessment*, vol. 189, no. 8, p. 378, 2017. [15] B. N. Mohapatra and P. P. Panda, “Machine learning applications to smart city,” 2019.

T. Villa, F. Gonzalez, B. Miljievic, Z. Ristovski, and L. Morawska, “An overview of small unmanned aerial vehicles for air quality measurements: Present applications and future prospectives,” *Sensors*, vol. 16, no. 7, p. 1072, 2016.

W. Zang, J. Lin, Y. Wang, and H. Tao, “Investigating small-scale water pollution with uav remote sensing technology,” *World Automation Congress 2012*, pp. 1–4, 2012.

Y. Yang, Z. Hu, K. Bian, and L. Song, “Imgsensingnet: Uav vision guided aerial-ground air quality sensing system,” in *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*. IEEE, 2019, pp. 1–9.

M. Rossi, D. Brunelli, A. Adami, L. Lorenzelli, F. Menna, and F. Remondino, “Gas-drone: Portable gas sensing system on uavs for gas leakage localization,” *IEEE SENSORS 2014 Proceedings*, pp. 1431–1434, 2014. [20] A. Danilov, U. D. Smirnov, and M. A. Pashkevich, “The system of the ecological monitoring of environment which is based on the usage of uav,” *Russian Journal of Ecology*, vol. 46, pp. 14–19, 2015.

Q. Gu and C. Jia, “A consumer uav-based air quality monitoring system for smart cities,” in *2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, Jan 2019, pp. 1–6.

G. P. Mayuga, C. Favila, C. Oppus, E. Macatulad, and L. H. Lim, “Airborne particulate matter monitoring using uavs for smart cities and urban areas,” in *TENCON 2018-2018 IEEE Region 10 Conference*. IEEE, 2018, pp. 1398–1402.

J. Chen, A. Scircle, O. Black, J. V. Cizdziel, N. Watson, D. Wevill, and Y. Zhou, “On the use of multicopters for sampling and analysis of volatile organic compounds in the air by adsorption/thermal desorption gc-ms,” *Air Quality, Atmosphere & Health*, vol. 11, no. 7, pp. 835–842, 2018.

N. M. Yungaicela-Naula, Y. Zhang, L. E. Garza-Castañon, and L. I. Minchala, “Uav-based air pollutant source localization using gradient and probabilistic methods,” in *2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. IEEE, 2018, pp. 702–707.

P. Nolan, J. Pinto, J. González-Rocha, A. Jensen, C. Vezzi, S. Bailey, G. de Boer, C. Diehl, R. Laurence, C. Powers et al., “Coordinated unmanned aircraft system (uas) and ground-based weather measurements to predict lagrangian coherent structures (lcss),” *Sensors*, vol. 18, no. 12, p. 4448, 2018.

K. A. McKinney, D. Wang, J. Ye, J.-B. de Fouchier, P. C. Guimaraes, C. E. Batista, R. A. Souza, E. G. Alves, D. Gu, A. B. Guenther et al., “A sampler for atmospheric volatile organic compounds by copter unmanned aerial vehicles,” *Atmospheric Measurement Techniques Discussions, Copernicus (2018)*, 2018.

O. Black, J. Chen, A. Scircle, Y. H. Zhou, and J. V. Cizdziel, “Adaption and use of a quadcopter for targeted sampling of gaseous mercury in the atmosphere.” *Environmental science and pollution research international*, vol. 25 13, pp. 13 195–13 202, 2018.

O. Alvear, C. T. Calafate, E. Hernández, J.-C. Cano, and P. Manzoni, “Mobile pollution data sensing using uavs,” in *Proceedings of the 13th International Conference on Advances in Mobile Computing and Multimedia*. ACM, 2015, pp. 393–397.

O. Alvear, W. Zamora, C. Calafate, J.-C. Cano, and P. Manzoni, “An architecture offering mobile pollution sensing with high spatial resolution,” *Journal of Sensors*, vol. 2016, 2016.

O. A. Alvear, N. R. Zema, E. Natalizio, and C. T. Calafate, “A chemotactic pollution-homing uav guidance system,” in *2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*. IEEE, 2017, pp. 2115–2120.

O. Alvear, C. T. Calafate, N. R. Zema, E. Natalizio, E. HernándezOrallo, J.-C. Cano, and P. Manzoni, “Pduc-d: A discretized uav guidance system for air pollution monitoring tasks,” in *International Conference on Smart Objects and Technologies for Social Good*. Springer, 2017, pp. 385–394.

“A discretized approach to air pollution monitoring using uavbased sensing,” *Mobile Networks and Applications*, vol. 23, no. 6, pp. 1693–1702, 2018. [33] T. F. Villa, F. Salimi, K. Morton, L. Morawska, and L. F. Gonzalez, “Development and validation of a uav based system for air pollution measurements,” in *Sensors*, 2016.

P. Zhao, Y. Yang, Y. Zhang, K. Bian, L. Song, P. Qiao, and Z. Li, "Optimal trajectory planning of drones for 3d mobile sensing," in 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). IEEE, 2018, pp. 1–6.

R. Dai, S. Fotedar, M. Radmanesh, and M. Kumar, "Quality-aware uav coverage and path planning in geometrically complex environments," *Ad Hoc Networks*, vol. 73, pp. 95–105, 2018.

G. M. Bolla, M. Casagrande, A. Comazzetto, R. Dal Moro, M. Destro, E. Fantin, G. Colombatti, A. Aboudan, and E. C. Lorenzini, "Aria: Air pollutants monitoring using uavs," in 2018 5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace). IEEE, 2018, pp. 225–229.

Y. Yang, Z. Zheng, K. Bian, Y. Jiang, L. Song, and Z. Han, "Arms: A fine-grained 3d aqi realtime monitoring system by uav," in GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2017, pp. 1–6.

Y. Yang, Z. Zheng, K. Bian, L. Song, and Z. Han, "Real-time profiling of fine-grained air quality index distribution using uav sensing," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 186–198, Feb 2018

Y. Yang, Z. Zheng, K. Bian, L. Song, and Z. Han, "Sensor deployment recommendation for 3d fine-grained air quality monitoring using semi-supervised learning," in 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2018, pp. 1–6.

Y. Yang, Z. Bai, Z. Hu, Z. Zheng, K. Bian, and L. Song, "Aqnet: Fine-grained 3d spatio-temporal air quality monitoring by aerialground wsn," in IEEE INFOCOM 2018-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). IEEE, 2018, pp. 1–2. [41] Q. Gu, D. R Michanowicz, and C. Jia, "Developing a modular unmanned aerial vehicle (uav) platform for air pollution profiling," *Sensors*, vol. 18, no. 12, p. 4363, 2018.

Z. Hu, Z. Bai, Y. Yang, Z. Zheng, K. Bian, and L. Song, "Uav aided aerial-ground iot for air quality sensing in smart city: Architecture, technologies, and implementation," *IEEE Network*, vol. 33, no. 2, pp. 14–22, 2019.

M. Carrozzo, S. De Vito, E. Esposito, F. Formisano, M. Salvato, E. Massera, G. Di Francia, P. Delli Veneri, M. Iadaresta, and A. Mennella, "An uav mounted intelligent

monitoring system for impromptu air quality assessments,” in *Sensors*, B. Andò, F. Baldini, C. Di Natale, V. Ferrari, V. Marletta, G. Marrazza, V. Militello, G. Miolo, M. Rossi, L. Scalise, and P. Siciliano, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 497–506.

M. Carrozzo, S. De Vito, E. Esposito, M. Salvato, F. Formisano, E. Massera, G. Di Francia, P. D. Veneri, M. Iadaresta, and A. Mennella, “Uav intelligent chemical multisensor payload for networked and impromptu gas monitoring tasks,” in *2018 5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*, June 2018, pp. 112–116.

S. Zhi, Y. Wei, and Z. Yu, “Air quality monitoring platform based on remote unmanned aerial vehicle with wireless communication,” in *Proceedings of the International Conference on Future Networks and Distributed Systems*. ACM, 2017, p. 35.

Z. Idrees, Z. Zou, and L. Zheng, “Edge computing based iot architecture for low cost air pollution monitoring systems: A comprehensive system analysis, design considerations & development,” *Sensors*, vol. 18, no. 9, p. 3021, 2018.

K. Al-Hajjaji, M. Ezzin, H. Khamdan, A. E. Hassani, and N. Zorba, “Design, development and evaluation of a uav to study air quality in qatar,” *CoRR*, vol. abs/1709.05628, 2017.

K. Weber, G. Heweling, C. H. Fischer, and M. Lange, “The use of an octocopter uav for the determination of air pollutants – A case study of the traffic induced pollution plume around a river bridge in duesseldorf , germany,” 2017.

S. Zhou, S. Peng, M. Wang, A. Shen, and Z. Liu, “The characteristics and contributing factors of air pollution in nanjing: A case study based on an unmanned aerial vehicle experiment and multiple datasets,” *Atmosphere*, vol. 9, no. 9, p. 343, 2018.

M. Rizk, T. N. Al-Deen, H. Diab, A. M. Ahmad, and Z. El-Bazzal, “Proposition of online uav-based pollutant detector and tracker for narrow-basin rivers: A case study on litani river,” *2018 International Conference on Computer and Applications (ICCA)*, pp. 189–195, 2018.

S. Liu, “Development of a uav-based system to monitor air quality over an oil field,” Ph.D. dissertation, Montana Tech of The University of Montana, 2018

L. Golston, N. Aubut, M. Frish, S. Yang, R. Talbot, C. Gretencord, J. McSpirtt, and M. Zondlo, “Natural gas fugitive leak detection using an unmanned aerial vehicle: Localization and quantification of emission rate,” *Atmosphere*, vol. 9, no. 9, p. 333, 2018.

A. Einstein, “Zur Elektrodynamik bewegter Körper. (German) [On the electrodynamics of moving bodies],” *Annalen der Physik*, vol. 322, no. 10, pp. 891–921, 1905.

P. Alonso-Magdalena, E. TudurÃ , L. MarroquÃ , I. Quesada, R. M. Sargis, and A. Nadal, “Toxic effects of common environmental pollutants in pancreatic Îš-cells and the onset of diabetes mellitus,” in *Encyclopedia of Endocrine Diseases (Second Edition)*, second edition ed., I. Huhtaniemi and L. Martini, Eds. Oxford: Academic Press, 2019, pp. 764 – 775. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128012383643258>

A. B. Lumb, “Chapter 19 - smoking and air pollution,” in *Nunn’s Applied Respiratory Physiology (Eighth Edition)*, eighth edition ed., A. B. Lumb, Ed. Elsevier, 2017, pp. 281 – 290.e1. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780702062940000198>

R. Ladji, N. Yassaa, C. Balducci, and A. Cecinato, “Organic components of algerian desert dusts,” *Chemosphere*, vol. 81, no. 7, pp. 925 – 931, 2010. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653510008532>

S. Zhang, H. Zhang, B. Di, and L. Song, “Cellular uav-to-x communications: Design and optimization for multi-uav networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, no. 2, pp. 1346– 1359, Feb 2019.

O. Alvear, C. T. Calafate, N. R. Zema, E. Natalizio, E. HernándezOrallo, J.-C. Cano, and P. Manzoni, “A discretized approach to air pollution monitoring using uav-based sensing,” *Mobile Networks and Applications*, vol. 23, no. 6, pp. 1693–1702, Dec 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11036-018-1065-4>

O. Alvear, N. R. Zema, E. Natalizio, and C. T. Calafate, “Using uavbased systems to monitor air pollution in areas with poor accessibility,” *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2017, 2017

Z. Hu, Z. Bai, Y. Yang, Z. Zheng, K. Bian, and L. Song, "Uav aided aerial-ground iot for air quality sensing in smart city: Architecture, technologies, and implementation," *IEEE Network*, vol. 33, no. 2, pp. 14–22, 2019.

Y. Yang, Z. Zheng, K. Bian, L. Song, and Z. Han, "Real-time profiling of fine-grained air quality index distribution using uav sensing," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 186–198, 2018.

W. Yi, K. Lo, T. Mak, K. Leung, Y. Leung, and M. Meng, "A survey of wireless sensor network based air pollution monitoring systems," *Sensors*, vol. 15, no. 12, pp. 31 392–31 427, 2015.

O. Ogundile and A. Alfa, "A survey on an energy-efficient and energybalanced routing protocol for wireless sensor networks," *Sensors*, vol. 17, no. 5, p. 1084, 2017.

L. Morawska, P. K. Thai, X. Liu, A. Asumadu-Sakyi, G. Ayoko, A. Bartonova, A. Bedini, F. Chai, B. Christensen, M. Dunbabin et al., "Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone?" *Environment international*, vol. 116, pp. 286–299, 2018.

L. Sun, K. Wong, P. Wei, S. Ye, H. Huang, F. Yang, D. Westerdahl, P. Louie, C. Luk, and Z. Ning, "Development and application of a next generation air sensor network for the hong kong marathon 2015 air quality monitoring," *Sensors*, vol. 16, no. 2, p. 211, 2016.

J. E. Thompson, "Crowd-sourced air quality studies: A review of the literature & portable sensors," *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, vol. 11, pp. 23–34, 2016.

O. A. Popoola, D. Carruthers, C. Lad, V. B. Bright, M. I. Mead, M. E. Stettler, J. R. Saffell, and R. L. Jones, "Use of networks of low cost air quality sensors to quantify air quality in urban settings," *Atmospheric environment*, vol. 194, pp. 58–70, 2018.

B. Maag, Z. Zhou, and L. Thiele, "A survey on sensor calibration in air pollution monitoring deployments," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 6, pp. 4857–4870, 2018.

G. S. Hagler, R. Williams, V. Papapostolou, and A. Polidori, "Air quality sensors and data adjustment algorithms: When is it no longer a measurement?" 2018.

A. Bigi, M. Mueller, S. K. Grange, G. Ghermandi, and C. Hueglin, “Performance of no, no 2 low cost sensors and three calibration approaches within a real world application,” *ATMOSPHERIC MEASUREMENT TECHNIQUES DISCUSSIONS*, pp. 1–29, 2018.

A. Ripoll, M. Viana, M. Padrosa, X. Querol, A. Minutolo, K. M. Hou, J. M. Barcelo-Ordinas, and J. García-Vidal, “Testing the performance of sensors for ozone pollution monitoring in a citizen science approach,” *Science of the Total Environment*, vol. 651, pp. 1166–1179, 2019.

P. K. Saha, N. Zimmerman, C. Malings, A. Haurlyuk, Z. Li, L. Snell, R. Subramanian, E. Lipsky, J. S. Apte, A. L. Robinson et al., “Quantifying high-resolution spatial variations and local source impacts of urban ultrafine particle concentrations,” *Science of the Total Environment*, vol. 655, pp. 473–481, 2019.

J. M. Barcelo-Ordinas, M. Doudou, J. Garcia-Vidal, and N. Badache, “Self-calibration methods for uncontrolled environments in sensor networks: A reference survey,” *Ad Hoc Networks*, vol. 88, pp. 142–159, 2019.

T.-B. Ottosen and P. Kumar, “Outlier detection and gap filling methodologies for low-cost air quality measurements,” *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2019.

S. Takahama, A. M. Dillner, A. T. Weakley, M. Reggente, C. Bürki, M. Lbadaoui-Darvas, B. Debus, A. Kuzmiakova, and A. S. Wexler, “Atmospheric particulate matter characterization by fourier transform infrared spectroscopy: a review of statistical calibration strategies for carbonaceous aerosol quantification in us measurement networks,” *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 12, no. 1, pp. 525–567, 2019.

K. Isiugo, N. Newman, R. Jandarov, S. A. Grinshpun, and T. Reponen, “Assessing the accuracy of commercially available gas sensors for the measurement of ambient ozone and nitrogen dioxide,” *Journal of occupational and environmental hygiene*, vol. 15, no. 11, pp. 782–791, 2018.

K. Chastko and M. Adams, “Assessing the accuracy of long-term air pollution estimates produced with temporally adjusted short-term observations from unstructured sampling,” *Journal of Environmental Management*, vol. 240, pp. 249–258, 2019

A. Al-Ali, I. Zualkernan, and F. Aloul, "A mobile gprs-sensors array for air pollution monitoring," *IEEE Sensors Journal*, vol. 10, no. 10, pp. 1666–1671, 2010.

K. N. Genikomsakis, N.-F. Galatoulas, P. I. Dallas, L. M. Candanedo Ibarra, D. Margaritis, and C. S. Ioakimidis, "Development and on-field testing of low-cost portable system for monitoring pm2.5 concentrations," *Sensors*, vol. 18, no. 4, 2018. [Online]. Available: <http://www.mdpi.com/1424-8220/18/4/1056>

L. Luo, Y. Zhang, B. Pearson, Z. Ling, H. Yu, and X. Fu, "On the security and data integrity of low-cost sensor networks for air quality monitoring," in *Sensors*, 2018.

J. Valente, S. Munniks, I. de Man, and L. Kooistra, "Validation of a small flying e-nose system for air pollutants control: A plume detection case study from an agricultural machine," 2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), pp. 1993–1998, 2018.

R. Kazahaya, H. Shinohara, T. Ohminato, and T. Kaneko, "Airborne measurements of volcanic gas composition during unrest at kuchinoerabujima volcano, japan," *Bulletin of Volcanology*, vol. 81, no. 2, p. 7, Jan 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00445-018-1262-9>

Werner J. Glantschnig and Sow-Hsin Chen. Light scattering from water droplets in the geometrical optics approximation. *Applied Optics*, Vol. 20, Issue 14, pp. 2499-2509. 1981. Principles of fluorescence spectroscopy, 3rd Edition (J. R. Lakowicz 2006) *Optics of Biological Particles*, p63-164 (Pan, Eversole et al. 2007)

Single particle multichannel bio-aerosol fluorescence sensor (Kaye et al. 2005) Size-resolved data measured in Manchester (updated version of Allan et al., *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 108, 4091, 2003).

Jayne et al. (2000), Development of an aerosol mass spectrometer for size and composition analysis of submicron particles, *Aerosol Sci. Technol.*, 33, 49-70.

Allan et al. (2003), Quantitative sampling using an Aerodyne aerosol mass spectrometer - 1. Techniques of data interpretation and error analysis, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 108, 4090.

Drewnick et al. (2005), A New Time-of-Flight Aerosol Mass Spectrometer (TOF-AMS)-Instrument Description and First Field Deployment, *Aerosol Sci. Technol.*, 39, 637-658.

DeCarlo et al. (2006), Field-deployable, high-resolution, time-of-flight aerosol mass spectrometer, *Anal. Chem.*, 78, 8281-8289.

Coe and Allan (2006), Mass Spectrometric Methods for Aerosol Composition Measurements, in *Analytical Techniques for Atmospheric Measurement*, edited by D. E. Heard, pp. 265-310, Blackwell Publishing Ltd.

Canagaratna et al. (2007), Chemical and microphysical characterization of ambient aerosols with the Aerodyne aerosol mass spectrometer, *Mass Spectrom. Rev.*, 26, 185-222.

Lance, S., Medina, J., Smith, J.N., Nenes, A. Mapping the Operation of the DMT Continuous Flow CCN Counter, *Aeros.Sci.Tech.*, 40, 242-254, 2006.

Roberts, G., and Nenes, A. A Continuous-Flow Streamwise Thermal-Gradient CCN Chamber for Atmospheric Measurements, *Aerosol Science and Technology*, 39, 206–221, 2005.

A.A. Karner, D.S. Eisinger, D.A. Niemeier, Near-roadway air quality: synthesizing the findings from real-world data, *Environ. Sci. Technol.* 44 (14) (2010) 5334–5344..

A.A. Karner, D.S. Eisinger, D.A. Niemeier. Near-roadway air quality: synthesizing the findings from real-world data. *Environ Sci Technol* Vol.44(2010), p.5334–44.

B. Beckerman, M. Jerrett, J.R. Brook, D.K. Verma, M.A. Arain, M.M. Finkelstein, Correlation of nitrogen dioxide with other traffic pollutants near a major expressway, *Atmos. Environ.* 42 (2) (2008) 275–290

Blocken B, Stathopoulos T, Saathoff P and Wang X 2008 Numerical evaluation of pollutant dispersion in the built environment: comparisons between models and experiments *J. Wind. Eng. Ind. Aerod.* 96 1817-31

Chowdhury, Z.; Campanella, L.; Gray, C.; Al Masud, A.; Marter-Kenyon, J.; Pennise, D.; Charron, D.; Zuzhang, X. Measurement and modeling of indoor air pollution in

rural households with multiple stove interventions in Yunnan, China. *Atmos. Environ.* 2013, 67, 161–169.

Christof Gromke* , Nabaraj Jamarkattel, Bodo Ruck Influence of roadside hedgerows on air quality in urban street canyons *Atmospheric Environment* [Volume 139](#), August 2016, Pages 75-8

Costa, M.A.M.; Carvalho, J.A.; Neto, T.G.S.; Anselmo, E.; Lima, B.A.; Kura, L.T.U.; Santos, J.C. Real-time sampling of particulate matter smaller than 2.5 μm from Amazon forest biomass combustion. *Atmos. Environ.* 2012, 54, 480–489.

D. Wang, Z. Wang, Z.-R. Peng, Using unmanned aerial vehicle to investigate the vertical distribution of fine particulate matter, *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 17 (1) (2020) 219–230.

D.S. Eisinger, D.A. Niemeier, Near-roadway air quality: synthesizing the findings from real-world data, *Environ. Sci. Technol.* 44 (14) (2010) 5334–5344

D.W. Dockery, Epidemiologic evidence of cardiovascular effects of particulate air pollution. *Environmental Health Perspectives* Vol.109(2001), P.483-486.

Dongho Shin^{1,2}, Younghun Kim^{1,2}, Kee-Jung Hong¹, Gunhee Lee¹, Inyong Park¹, Hak-Joon Y-1, Jin Kim¹ , Bangwoo Han^{1*}, Jungho Hwang^{2*} ¹ Department of Environment Machinery, Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon 34103, Korea ² Mechanical engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Korea Aerosol and air quality research [2020 - Volume 20](#)

F. Amato, N. Perez, M. Lopez, A. Ripoll, A. Alastuey, M. Pandolfi, A. Karanasiou, A. Salmatonidis, E. Padoan, D. Frasca, M. Marcoccia, M. Viana, T. Moreno, C. Reche, V. Martins, M. Brines, M.C. Minguillon, M. Ealo, I. Rivas, B. van Drooge, J. Benavides, J.M. Cravotto, X. Querol, Vertical and horizontal fall-off of black carbon and NO₂ within urban blocks, *Sci. Total Environ.* 686 (2019) 236–245

Fierz, M.; Houle, C.; Steigmeier, P.; Burtscher, H. Design, Calibration, and Field Performance of a Miniature Diffusion Size Classifier. *Aerosol Sci. Technol.* 2011, 45, 1–10.

G.T. Poyi, A. Bousbaine, M.H. Wu, Computational fluid dynamics model of a quadrotor helicopter for dynamic analysis, *Int. J. Res. Eng. Adv. Technol.* 4 (3) (2016) 32–41. T. Zheng et al. *Building and Environment* 187 (2021) 107401 [41] P. Haas, C. Balistreri, P. Pontelandolfo, G. Triscone, H. Pekoz, A. Pignatiello, Development of an unmanned aerial vehicle UAV for air quality measurements in urban areas, 32nd AIAA Applied Aerodynamics Conference, 2014, p. 2272.

Giechaskiel, B.; Maricq, M.; Ntziachristos, L.; Dardiotis, C.; Wang, X.; Axmann, H.; Bergmann, A.; Schindler, W. Review of motor vehicle particulate emissions sampling and measurement: From smoke and filter mass to particle number. *J. Aerosol Sci.* 2014, 67, 48–86.

Gong, W.; Zhang, M.; Han, G.; Ma, X.; Zhu, Z. An Investigation of Aerosol Scattering and Absorption Properties in Wuhan, Central China. *Atmosphere* 2015, 6, 503–520.

Goran Tmušić 1 , Salvatore Manfreda 2*, Helge Aasen 3 , Mike R. James 4 , Gil Gonçalves 5 , Eyal Ben-Dor 6 , Anna Brook 7 , Maria Polinova 7 , Jose Juan Arranz 8 , János Mészáros 9 , Ruodan Zhuang 10, Kasper Johansen 11, Yoann Malbeteau 11,12, Isabel P. de Lima 13, Corine Davids 14, Sorin Herban 15 and Matthew F. McCabe 11 Current Practices in UAS-based Environmental Monitoring *Remote Sens.* 2020, 12, 1001 doi: 10.3390/rs12061001

Hanna S R, Briggs GA and Hosker RP 1982 Handbook on Atmospheric Diffusion. DOE/TIC11223 (U. S. Department of Energy, Oak Ridge, TN)

HEI. Traffic-related air pollution: a critical review of the literature on emissions, exposure, and health effects. HEI special report 17. Health Effects Institute, Boston MA.

Hinds, W.C. *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, 2nd ed.; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 1999.

Hosseini, S.; Li, Q.; Cocker, D.; Weise, D.; Miller, A.; Shrivastava, M.; Miller, J.W.; Mahalingam, S.; Princevac, M.; Jung, H. Particle size distributions from laboratory-scale biomass fires using fast response instruments. *Atmos. Chem. Phys.* 2010, 10, 8065–8076.

J. B. Babaan¹, J. P. Ballori¹, A. M. Tamondong¹, R. V. Ramos¹, P. M. Ostrea
ESTIMATION OF PM_{2.5} VERTICAL DISTRIBUTION USING CUSTOMIZED
UAV AND MOBILE SENSORS IN BRGY. UP CAMPUS, DILIMAN, QUEZON
CITY The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial
Information Sciences, Volume XLII-4/W9, 2018 International Conference on
Geomatics and Geospatial Technology (GGT 2018), 3–5 September 2018, Kuala
Lumpur, Malaysia

J. Gulliver, D.J. Briggs, Personal exposure to particulate air pollution in transport
microenvironments. *Atmos Environ* Vol.38(2004), p.1–8.

J.A. Pickrell, L.E. Erickson, K.J. Klabunde, Toxicity of inhaled nanomaterials. In
Nanoscale Materials in Chemistry, 2nd ed. Klabunde, K. J., Richards, R. M., Eds.; John
Wiley & Sons, Inc., 2009; Chapter 22, pp 729–769.

Jiang, R.; Bell, M.L. A Comparison of Particulate Matter from Biomass-Burning Rural
and Non-Biomass-Burning Urban Households in Northeastern China. *Environ. Health
Perspect.* 2008, 116, 907–914.

Joel Kuula et al Applicability of Optical and Diffusion Charging-Based Particulate
Matter Sensors to Urban Air Quality Measurements *Aerosol and Air Quality Research*,
19: 1024–1039, 2019 Copyright doi: 10.4209/aaqr.2018.04.0143

Johnson, T.J.; Symonds, J.P.R.; Olfert, J.S. Mass–Mobility Measurements Using a
Centrifugal Particle Mass Analyzer and Differential Mobility Spectrometer. *Aerosol
Sci. Technol.* 2013, 47, 1215–1225.

K. Weber, G. Heweling, C. Fischer, M. Lange, The use of an octocopter UAV for the
determination of air pollutants—a case study of the traffic induced pollution plume
around a river bridge in Duesseldorf, Germany, *Int. J. Educ. Literacy Stud.* 2 (2017)
63–66.

K. Weber, G. Heweling, C. Fischer, M. Lange, The use of an octocopter UAV for the
determination of air pollutants—a case study of the traffic induced pollution plume
around a river bridge in Duesseldorf, Germany, *Int. J. Educ. Literacy Stud.* 2 (2017)
63–66.

K.-F. Lu, H.-D. He, H.-W. Wang, X.-B. Li, Z.-R. Peng, Characterizing temporal and vertical distribution patterns of traffic-emitted pollutants near an elevated expressway in urban residential areas, *Build. Environ.* 172 (2020) 106678 .

Kontogiannis, S.G.; Ekaterinaris, J.A. Design, performance evaluation and optimization of a UAV. *Aerosp. Sci. Technol.* 2013, 29, 339–350

Krecl, P.; Ström, J.; Johansson, C. Carbon content of atmospheric aerosols in a residential area during the wood combustion season in Sweden. *Atmos. Environ.* 2007, 41, 6974–6985.

Lack, D.A.; Lovejoy, E.R.; Baynard, T.; Pettersson, A.; Ravishankara, A.R. Aerosol Absorption Measurement Using Photoacoustic Spectroscopy: Sensitivity, Calibration, and Uncertainty Developments. *Aerosol Sci. Technol.* 2006, 40, 697–708.

Leskinen, J.; Tissari, J.; Uski, O.; Virén, A.; Torvela, T.; Kaivosoja, T.; Lamberg, H.; Nuutinen, I.; Kettunen, T.; Joutsensaari, J.; et al. Fine particle emissions in three different combustion conditions of a wood chip-fired appliance—Particulate physico-chemical properties and induced cell death. *Atmos. Environ.* 2014, 86, 129–139.

Liu et al. *Geosci. Lett.* (2018) 5:24 <https://doi.org/10.1186/s40562-018-0123-x>
RESEARCH LETTER Parameterization of vertical dispersion coefficient over idealized rough surfaces in isothermal conditions Chun-Ho Liu*† , Ziwei Mo† and Zhangquan Wu†

M Mehdi^{1,2}, M P Panin¹ and B Mohammedi² Modelling of distribution of aerosol emission with account of buildings and structures of NPPs *Materials Science and Engineering* 487 (2019) 012011 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/487/1/012011

M. Jamriska, L. Morawska, K. Mergersen, The effect of temperature and humidity on size segregated traffic exhaust particle emissions, *Atmos. Environ.* 42 (10) (2008) 2369–2382

Manfreda, S.; McCabe, M.; Miller, P.; Lucas, R.; Pajuelo Madrigal, V.; Mallinis, G.; Ben Dor, E.; Helman, D.; Estes, L.; Ciraolo, G.; et al. On the Use of Unmanned Aerial Systems for Environmental Monitoring. *Remote Sens.* 2018, 10, 641

Merone R N 2004 Wind tunnel and numerical simulation of pollution dispersion: a hybrid approach. Working paper, Croucher Advanced Study Institute on Wind Tunnel Modeling, (Hong Kong University of Science and Technology)

Meroney R N, Leidl B M, Rafailidis S and Schatzmann M 1999. Wind-tunnel and numerical modeling of flow and dispersion about several building shapes J. Wind. Eng. Ind. Aerod. 81 333-45

Michael R. Giordano a,b,**, Carl Malings c , Spyros N. Pandis d,e , Albert A. Presto f , V. F. McNeill g , Daniel M. Westervelt h,i , Matthias Beekmann a,j , R. Subramanian a,b,f From low-cost sensors to high-quality data: A summary of challenges and best practices for effectively calibrating low-cost particulate matter mass sensors Journal of Aerosol Science 158 (2021) 105833

Misti Levy Zamora, † Fulizi Xiong,‡ Drew Gentner*,‡ Branko Kerkez,§ Joseph Kohrman-Glaser,‡ and Kirsten Koehler*,† Field and Laboratory Evaluations of the Low-Cost Plantower Particulate Matter Sensor Cite This: Environ. Sci. Technol. 2019, 53, 838–849

Murakami S and Mochida A 1988 3-D numerical simulation of airflow around a cubic model by means of the k-ε model J. Wind. Eng. Ind. Aerod. 31 283–303

Nussbaumer, T.; Czasch, C.; Klippel, N.; Johansson, L.; Tullin, C. Particulate emissions from biomass combustion in IEA countries. In Proceeding of the 16th European Biomass Conference and Exhibition, Zurich, Switzerland, 2–6 June 2008; p. 40.

Obaidullah, M.; Bram, S.; Verma, V.; de Ruyck, J. A review on particle emissions from small scale biomass combustion. Int. J. Renew. Eergy Res. 2012, 2, 147–159.

P.E. Schwarze, J. Øvrevik, M. Låg, M. Refsnes, P. Nafstad, R.B. Hetland, E. Dybing, Particulate matter properties and health effects: Consistency of epidemiological and toxicological studies. Hum. Exp. Toxicol. Vol. 25(2006), p.559–579.

Pettersson, A.; Lovejoy, E.R.; Brock, C.A.; Brown, S.S.; Ravishankara, A.R. Measurement of aerosol optical extinction at with pulsed cavity ring down

spectroscopy. *J. Aerosol Sci.* 2004, 35, 995–1011. in Augsburg, Germany. *Atmos. Chem. Phys.* 2012, 6113–6128.

Prado, G.F.; Zanetta, D.M.T.; Arbex, M.A.; Braga, A.L.; Pereira, L.A.A.; de Marchi, M.R.R.; de Melo Loureiro, A.P.; Marcourakis, T.; Sugauara, L.E.; Gattás, G.J.F.; et al. Burnt sugarcane harvesting: particulate matter exposure and the effects on lung function, oxidative stress, and urinary 1-hydroxypyrene. *Sci. Total Environ.* 2012, 437, 200–208.

R. McConnell, K. Berhane, L. Yao, M. Jerrett, F. Lurmann, F. Gilliland, N. Kunzli, J. Gauderman, E. Avol, D. Thomas, J. Peters, Traffic, susceptibility, and childhood asthma. *Environmental Health Perspectives* Vol. 114 (5)(2006), p.766-772.

Saathoff P, Gupta A, Stathopoulos T and Lazure L 2009 Contamination of fresh air intakes due to downwash from a rooftop structure *J. Air. Waste. Manag. Assoc.* 59 343–53

Santoro, R.; Shaddix, C. Laser-induced incandescence. In *Applied Combustion Diagnostics*; Kohse-Höinghaus, K., Jeffries, J., Eds.; Taylor and Francis: New York, NY, USA, 2002; pp. 252–286.

Shi, Y.; Thomasson, J.A.; Murray, S.C.; Pugh, N.A.; Rooney, W.L.; Shafian, S.; Rajan, N.; Rouze, G.; Morgan, C.L.S.; Neely, H.L.; et al. Unmanned Aerial Vehicles for High-Throughput Phenotyping and Agronomic Research. *PLoS ONE* 2016, 11, e0159781

Simone Simões Amaral et al An Overview of Particulate Matter Measurement Instruments *Atmosphere* 2015, 6, 1327-1345; doi:10.3390/atmos6091327

Snyder W 1981 Guidelines for Fluid Modelling of Atmospheric Diffusion. EPA office of Air quality, planning and standards, Research triangle park, NC, EPA-600/8-81-009

T.F. Villa, E. Jayaratne, L. Gonzalez, L. Morawska, Determination of the vertical profile of particle number concentration adjacent to a motorway using an unmanned aerial vehicle, *Environ. Pollut.* 230 (2017) 134–142.

T.F. Villa, E. Jayaratne, L. Gonzalez, L. Morawska, Determination of the vertical profile of particle number concentration adjacent to a motorway using an unmanned aerial vehicle, *Environ. Pollut.* 230 (2017) 134–142.

Tziavou, O.; Pytharouli, S.; Souter, J. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based mapping in engineering geological surveys: Considerations for optimum results. *Eng. Geol.* 2018, 232, 12–21.

Vincent, J.H. *Aerosol Sampling: Science, Standards, Instrumentation and Applications*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2007.

Weixun Lv, et al Vertical and Horizontal Profiles of Particulate Matter and Black Carbon Near Elevated Highways Based on Unmanned Aerial Vehicle Monitoring *Sustainability* 2020, 12, 1204

Weixun Lv, et al A Review on the Dispersion and Distribution Characteristics of Pollutants in Street Canyons and Improvement Measures *Energies* 2021, 14, 6155.
<https://doi.org/10.3390/en14196155>

Wentzel, M.; Gorzawski, H.; Naumann, K.-H.; Saathoff, H.; Weinbruch, S. Transmission electron microscopical and aerosol dynamical characterization of soot aerosols. *J. Aerosol Sci.* 2003, 34, 1347–1370.

Wilson, W.E.; Chow, J.C.; Claiborn, C.; Fusheng, W.; Engelbrecht, J.; Watson, J.G. Monitoring of particulate matter outdoors. *Chemosphere* 2002, 49, 1009–1043.

X.-B. Li, D. Wang, J. Zhao, Z.-R. Peng, Regional prediction of groundlevel ozone using a hybrid sequence-to-sequence deep learning approach, *J. Clean. Prod.* 253 (2020) 119841.

X.-B. Li, Z.-R. Peng, Q.-C. Lu, D. Wang, X.-M. Hu, D. Wang, B. Li, Q. Fu, G. Xiu, H. He, Evaluation of unmanned aerial system in measuring lower tropospheric ozone and fine aerosol particles using portable monitors, *Atmos. Environ.* 222 (2020) 117134.

X.-B. Li, Z.-R. Peng, Q.-C. Lu, D. Wang, X.-M. Hu, D. Wang, B. Li, Q. Fu, G. Xiu, H. He, Evaluation of unmanned aerial system in measuring lower tropospheric ozone and fine aerosol particles using portable monitors, *Atmos. Environ.* 222 (2020) 117134.

J. A.Salmond, D.E. Williams, G. Laing, The influence of vegetation on the horizontal and vertical distribution of pollutants in a street canyon. *Sci Total Environ* Vol. 443(2013), p. 297-298.

7 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1 (ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ARDUINO UNO _SENSORS)

```
#include <SoftwareSerial.h>
#include <SD.h>
#include <SPI.h>

int8_t seconds=0, minutes=0, hours=0;

File storageSD;

SoftwareSerial pmsSerial(2, 3);

void setup() {

    // our debugging output
    Serial.begin(115200);

    // sensor baud rate is 9600
    pmsSerial.begin(9600);

    if(!SD.begin(10)){
```

```

Serial.println("initialization failed");
while(1);
}

Serial.println("initialization done");
;
storageSD= SD.open("dustData.txt", FILE_WRITE);
if(storageSD){
  Serial.println("SD opened");

  storageSD.println("Made by Filippos Minopetros");
  storageSD.println("Standard: PM_1 | PM_2.5 | PM_10 || Enviromental: PM_1 | PM_2.5 | PM_10 |
Particles: 0.3 | 0.5 | 1 | 2.5 | 5 | 10");
}else{
  while(1);
}

storageSD.close();
}

struct pms5003data {
  uint16_t framelen;

  uint16_t pm10_standard, pm25_standard, pm100_standard;

  uint16_t pm10_env, pm25_env, pm100_env;

  uint16_t particles_03um, particles_05um, particles_10um, particles_25um, particles_50um,
particles_100um;

  uint16_t unused;
}

```

```

uint16_t checksum;
};

struct pms5003data data;

void printPadded(int timeValue){
  if(timeValue<10){
    storageSD.print("0");
  }
  storageSD.print(timeValue);
}

void loop() {
  //
  // Serial.println(filename.c_str());
  // Serial.println("HEHEHEHE");
  storageSD= SD.open("dustData.txt", FILE_WRITE);
  storageSD.seek(EOF);

  //DATA IN SERIAL-----
  if (readPMSdata(&pmsSerial)) {

```

```
//CLOCK-----  
{  
seconds++;  
if(seconds==60){  
seconds=0;  
minutes++;  
}  
  
if(minutes==60){  
minutes=0;  
hours++;  
}  
  
printPadded(hours);  
storageSD.print(":");  
printPadded(minutes);  
storageSD.print(":");  
printPadded(seconds);  
storageSD.print("\t");  
  
}
```

```

// reading data was successful!
Serial.println();
Serial.println("-----");
Serial.println("Concentration Units (standard)");
Serial.print("PM 1.0: "); Serial.print(data.pm10_standard);
Serial.print("\t\tPM 2.5: "); Serial.print(data.pm25_standard);
Serial.print("\t\tPM 10: "); Serial.println(data.pm100_standard);
Serial.println("-----");
Serial.println("Concentration Units (environmental)");
Serial.print("PM 1.0: "); Serial.print(data.pm10_env);
Serial.print("\t\tPM 2.5: "); Serial.print(data.pm25_env);
Serial.print("\t\tPM 10: "); Serial.println(data.pm100_env);
Serial.println("-----");
Serial.print("Particles > 0.3um / 0.1L air:"); Serial.println(data.particles_03um);
Serial.print("Particles > 0.5um / 0.1L air:"); Serial.println(data.particles_05um);
Serial.print("Particles > 1.0um / 0.1L air:"); Serial.println(data.particles_10um);
Serial.print("Particles > 2.5um / 0.1L air:"); Serial.println(data.particles_25um);
Serial.print("Particles > 5.0um / 0.1L air:"); Serial.println(data.particles_50um);
Serial.print("Particles > 10.0 um / 0.1L air:"); Serial.println(data.particles_100um);
Serial.println("-----");

//STORE DATA-----

storageSD.print(data.pm10_standard);
storageSD.print("\t");

```

```
storageSD.print(data.pm25_standard);
storageSD.print("\t");
storageSD.print(data.pm100_standard);
storageSD.print("\t");
storageSD.print(data.pm10_env);
storageSD.print("\t");
storageSD.print(data.pm25_env);
storageSD.print("\t");
storageSD.print(data.pm100_env);
storageSD.print("\t");
storageSD.print(data.particles_03um);
storageSD.print("\t");
storageSD.print(data.particles_05um);
storageSD.print("\t");
storageSD.print(data.particles_10um);
storageSD.print("\t");
storageSD.print(data.particles_25um);
storageSD.print("\t");
storageSD.print(data.particles_50um);
storageSD.print("\t");
storageSD.print(data.particles_100um);
storageSD.println();

storageSD.flush();
storageSD.close();

delay(1000);
}
}
```

```

boolean readPMSdata(Stream *s) {
    if (!s->available()) {
        return false;
    }

    // Read a byte at a time until we get to the special '0x42' start-byte
    if (s->peek() != 0x42) {
        s->read();
        return false;
    }

    // Now read all 32 bytes
    if (s->available() < 32) {
        return false;
    }

    uint8_t buffer[32];
    uint16_t sum = 0;
    s->readBytes(buffer, 32);

    // get checksum ready
    for (uint8_t i=0; i<30; i++) {
        sum += buffer[i];
    }

    /* debugging
    for (uint8_t i=2; i<32; i++) {

```

```

    Serial.print("0x"); Serial.print(buffer[i], HEX); Serial.print(" ");
}
Serial.println();
*/

// The data comes in endian'd, this solves it so it works on all platforms
uint16_t buffer_u16[15];
for (uint8_t i=0; i<15; i++) {
    buffer_u16[i] = buffer[2 + i*2 + 1];
    buffer_u16[i] += (buffer[2 + i*2] << 8);
}

memcpy((void *)&data, (void *)buffer_u16, 30);

if (sum != data.checksum) {
    Serial.println("Checksum failure");
    return false;
}

return true;

}

```

```
#include <SoftwareSerial.h>
#include <SD.h>
#include <SPI.h>

int8_t seconds=0, minutes=0, hours=0;
int8_t counter=1;
String filename=String("dustData_1.txt");
char *filenamearray=new char[filename.length()];
File storageSD;

SoftwareSerial pmsSerial(2, 3);

void setup() {
  Serial.begin(115200);

  // our debugging output

  // sensor baud rate is 9600
  pmsSerial.begin(9600);

  if(!SD.begin(10)){
    Serial.println("initialization failed");
```

```

    while(1);
}

strcpy(filenamearray, filename.c_str());
while(SD.exists(filename.c_str())){
    counter++;
    filename="dustData_";
    filename+=counter;
    filename+="txt";
    strcpy(filenamearray, filename.c_str());
}

filename.toCharArray(filenamearray, filename.length());

//FILE NAME -----

Serial.println("initialization done");
//Serial.println(filename.c_str());
storageSD= SD.open(filenamearray, FILE_WRITE);
if(storageSD){
    Serial.println("SD opened");

    storageSD.println(sizeof(filename));
}

```

```

storageSD.println(sizeof(filenamearray));
storageSD.println(filenamearray);
storageSD.println(filename);

storageSD.println("Made by Filippos Minopetros");
storageSD.println("Standard: PM_1 | PM_2.5 | PM_10 || Enviromental: PM_1 | PM_2.5 | PM_10 |
Particles: 0.3 | 0.5 | 1 | 2.5 | 5 | 10");
}else{
while(1);
}

storageSD.close();
}

struct pms5003data {
uint16_t framelen;
uint16_t pm10_standard, pm25_standard, pm100_standard;
uint16_t pm10_env, pm25_env, pm100_env;
uint16_t particles_03um, particles_05um, particles_10um, particles_25um, particles_50um,
particles_100um;
uint16_t unused;
uint16_t checksum;
};

struct pms5003data data;

void printPadded(int timeValue){

```

```

if(timeValue<10){
  storageSD.print("0");
}
storageSD.print(timeValue);
}

void loop() {
  //
  // Serial.println(filename.c_str());
  // Serial.println("HEHEHEHE");
  storageSD= SD.open(filenamearray, FILE_WRITE);
  storageSD.seek(EOF);

  //DATA IN SERIAL-----
  if (readPMSdata(&pmsSerial)) {

    //CLOCK-----
    {
      seconds++;
      if(seconds==60){
        seconds=0;
        minutes++;
      }
    }
  }
}

```

```
if(minutes==60){
  minutes=0;
  hours++;
}

printPadded(hours);
storageSD.print(":");
printPadded(minutes);
storageSD.print(":");
printPadded(seconds);
storageSD.print("\t");

}
```

```
// reading data was successful
Serial.println();
Serial.println("-----");
Serial.println("Concentration Units (standard)");
Serial.print("PM 1.0: "); Serial.print(data.pm10_standard);
Serial.print("\t\tPM 2.5: "); Serial.print(data.pm25_standard);
```

```

Serial.print("\t\tPM 10: "); Serial.println(data.pm100_standard);
Serial.println("-----");
Serial.println("Concentration Units (environmental)");
Serial.print("PM 1.0: "); Serial.print(data.pm10_env);
Serial.print("\t\tPM 2.5: "); Serial.print(data.pm25_env);
Serial.print("\t\tPM 10: "); Serial.println(data.pm100_env);
Serial.println("-----");
Serial.print("Particles > 0.3um / 0.1L air:"); Serial.println(data.particles_03um);
Serial.print("Particles > 0.5um / 0.1L air:"); Serial.println(data.particles_05um);
Serial.print("Particles > 1.0um / 0.1L air:"); Serial.println(data.particles_10um);
Serial.print("Particles > 2.5um / 0.1L air:"); Serial.println(data.particles_25um);
Serial.print("Particles > 5.0um / 0.1L air:"); Serial.println(data.particles_50um);
Serial.print("Particles > 10.0 um / 0.1L air:"); Serial.println(data.particles_100um);
Serial.println("-----");

//STORE DATA-----

storageSD.print(data.pm10_standard);
storageSD.print("\t");
storageSD.print(data.pm25_standard);
storageSD.print("\t");
storageSD.print(data.pm100_standard);
storageSD.print("\t");
storageSD.print(data.pm10_env);
storageSD.print("\t");
storageSD.print(data.pm25_env);
storageSD.print("\t");

```

```

storageSD.print(data.pm100_env);
storageSD.print("\t");
storageSD.print(data.particles_03um);
storageSD.print("\t");
storageSD.print(data.particles_05um);
storageSD.print("\t");
storageSD.print(data.particles_10um);
storageSD.print("\t");
storageSD.print(data.particles_25um);
storageSD.print("\t");
storageSD.print(data.particles_50um);
storageSD.print("\t");
storageSD.print(data.particles_100um);
storageSD.println();

storageSD.flush();
storageSD.close();

delay(1000);
}
}

boolean readPMSdata(Stream *s) {
  if (!s->available()) {
    return false;
  }

  // Read a byte at a time until we get to the special '0x42' start-byte

```

```

if (s->peek() != 0x42) {
    s->read();
    return false;
}

// Now read all 32 bytes
if (s->available() < 32) {
    return false;
}

uint8_t buffer[32];
uint16_t sum = 0;
s->readBytes(buffer, 32);

// get checksum ready
for (uint8_t i=0; i<30; i++) {
    sum += buffer[i];
}

/* debugging
for (uint8_t i=2; i<32; i++) {
    Serial.print("0x"); Serial.print(buffer[i], HEX); Serial.print(" ");
}
Serial.println();
*/

// The data comes in endian'd, this solves it so it works on all platforms
uint16_t buffer_u16[15];
for (uint8_t i=0; i<15; i++) {

```

```
    buffer_u16[i] = buffer[2 + i*2 + 1];  
    buffer_u16[i] += (buffer[2 + i*2] << 8);  
}  
  
memcpy((void *)&data, (void *)buffer_u16, 30);  
  
if (sum != data.checksum) {  
    Serial.println("Checksum failure");  
    return false;  
}  
  
return true;  
  
}
```

8 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2 (ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ DRONE)

UAV_ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ- ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

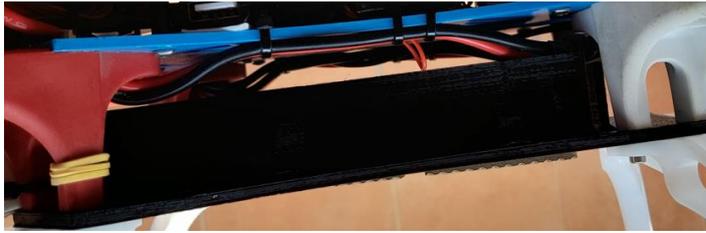
Τα υλικά για την κατασκευή του HM UAV είναι τα πιο κάτω.

- 4X Speed Controller 30A
- 4X Brushless motor 920KV
- Transmitter Receiver 2,4GHZ
- Transmitter 200mW 5,8GHZ
- PowerBoard 5V 12V
- Telemetry Transmitter Board
- Telemetry Receiver 5,8GHZ
- DJI NAZA Flight Controller with GPS
- 4x Propellers 10in 2xCW 2xCCW
- Battery Lipo 5000mAh 14.8V (4S) 60C

Ο σκελετός με βάση τις ανάγκες ανάρτησης των sensors και την αποκτηθείσα εμπειρία σχεδιάστηκε και τυπώθηκε σε 3D printing, διότι τα εμπορικά διατιθέμενα δεν λαμβάνουν υπόψιν τις ανάγκες του πειράματος.



Δόθηκε μεγάλη προσοχή στον σχεδιασμό και στην κατασκευή για το σημείο του κέντρου βάρους που πρέπει να τοποθετηθεί ο sensor (sensors) και για αυτό τον λόγο η μπαταρία σχεδιάστηκε να είναι αποσπώμενη και συρταρωτή ώστε να βοηθάει η μεταβολή της θέσης της στο επιθυμητό σημείο του κέντρου βάρους.



Αυτό το τελευταίο είναι αναγκαίο αφενός,

- στην πτητική ικανότητα και αφετέρου
- **στην ελαχιστοποίηση της διαταραχής από τους έλικες κατά την διάρκεια της μέτρησης**

Τοποθετήθηκε επίσης θύρα USB για τροφοδοσία των sensors απ' ευθείας από την μπαταρία του UAV για ελαχιστοποίηση του βάρους δεδομένου ότι ένα POWER BANK ζυγίζει επιπλέον 200 με 300 g.



Και τέλος έγινε επέμβαση στο firmware ώστε το UAV να προσγειώνεται μόνο του λίγο πριν τελειώσει η μπαταρία



9 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3 (SENSOR OPCN3 ALPHASENSE)

Το OPC-N3 ταξινομεί κάθε μέγεθος σωματιδίου, έως ~10.000 σωματίδια ανά δευτερόλεπτο, καταγράφοντας το μέγεθος σωματιδίων σε έναν από τις 24 θέσεις που καλύπτουν εύρος μεγέθους από 0,35 έως 40 μm . Το OPC-N3 θα ανιχνεύσει ~100% των σωματιδίων στα 0,35 μm και ~50% στα 0,3 μm . Τα σωματίδια ανά δευτερόλεπτο και η μέγιστη ανιχνεύσιμη μάζα βασίζονται στην απόδοση των ηλεκτρονικών και προς τούτο αλλάζει προγραμματιστικά λειτουργία υψηλής και χαμηλής απολαβής και συνδυάζεται δεδομένα, με περίοδο δειγματοληψίας το ήμισυ του διαστήματος επαναλήψεων. Το εύρος έχει σχεδιαστεί για να επιτρέπει τη μέτρηση της γύρης και άλλων βιοσωματιδίων.

Η αποτελεσματικότητα στα μεγάλα σωματίδια ορυκτής σκόνης είναι πιθανό να είναι χαμηλότερη λόγω της ταχείας διάδοσης στο περιβάλλον. Τα προκύπτοντα ιστογράμματα μεγέθους σωματιδίων μπορούν να αξιολογηθούν **με χρόνους δειγματοληψίας που καθορίζονται από το χρήστη από 1 έως Διάρκεια 30 δευτερόλεπτα.** Εάν απαιτούνται μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, συνιστάται η λήψη του μέσου όρου σε μικρότερες περιόδους μέτρησης. Το OPC-N3 έχει σχεδιαστεί για λειτουργία χωρίς επιτήρηση σε περιβάλλοντα με σκόνη. **Η διαδρομή ροής έχει τροποποιηθεί για μείωση του στροβιλισμού και ο ανεμιστήρας μπορεί να λειτουργεί σε μειωμένες ταχύτητες για περαιτέρω μείωση των αναταράξεων και πιθανή εναπόθεση σωματιδίων όταν τα επίπεδα σωματιδίων του περιβάλλοντος είναι υψηλά.**

Θεωρητικά όλα τα σωματίδια, ανεξαρτήτως σχήματος θεωρούνται σφαιρικά και επομένως τους αποδίδεται ένα «σφαιρικό ισοδύναμο μέγεθος». Αυτό το μέγεθος σχετίζεται με τη μέτρηση του φωτός που σκεδάζεται από το σωματίδιο όπως ορίζεται από τη θεωρία Mie, (θεωρία για πρόβλεψη της σκέδασης με σφαίρες γνωστού μεγέθους και δείκτη διάθλασης (RI)). **Το OPC-N3 είναι βαθμονομημένο με την χρήση σωματιδίων σφαιρικού λατέξ από πολυστυρένιο (PSLs) γνωστής διαμέτρου και γνωστού RI. Οι συντελεστές διόρθωσης μπορούν να εφαρμοστούν για σφάλματα που προκύπτουν από σωματίδια διαφορετικής πυκνότητας ή δείκτη διάθλασης.**



Particulate Matter / PM Sensor
OPC-N3 sensor

Χαρακτηριστικά του Particulate Matter / PM Sensor OPC-N3 sensor

Measurement	Particle range*	µm spherical equivalent size (based on RI of 1.5)	0.35 to 40
	Size categorisation	Number of software bins	24
	Sampling interval	Histogram period (seconds)	1 to 30
	Total flow rate (typical)	L/min	5.5
	Sample flow rate (typical)	mL/min	280
	Max particle count rate	Particles/second	10,000
	Max coincidence probability	%concentration at 10 ⁴ particles/L	0.84
		%concentration at 500 particles/L	0.24
	*Based on 100% detection efficiency at 0.35µm, 50% at 0.3µm		
Power	Measurement mode	mA (typical)	180
	Standby mode	mA (typical)	< 45
	Voltage range	VDC	4.8 to 5.2
	Switch-on transient	mW for 1ms	< 5000
Data	Digital interface/connections	SPI (real-time data and communications) Micro USB (firmware updates and standalone mode)	
	Data storage	micro-SD (.CSV format) (GB)	16
Key specifications	Digital interface	SPI (Mode 1), USB	
	Laser classification	as enclosed housing	Class 1
	Temperature range	°C	-10 to 50
	Humidity range	% rh (continuous)	0 to 95 (non-condensing)
	Warranty	Months	24
	Weight	g	< 105

Τα δεδομένα ιστογράμματος μεγέθους σωματιδίων που καταγράφονται από τον αισθητήρα OPC-N3 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της μάζας αερομεταφερόμενων σωματιδίων ανά μονάδα όγκου αέρα, εκφρασμένα σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Οι αποδεκτοί διεθνείς τυποποιημένοι ορισμοί των φορτίων μάζας σωματιδίων στον αέρα είναι PM_{2,5} και PM₁₀; **Τα PM₁ δεν είναι ακόμη διεθνές πρότυπο.**

Αυτοί οι ορισμοί σχετίζονται με τη μάζα και το μέγεθος των σωματιδίων που θα εισέπνεε ένας τυπικός ενήλικας. Το OPC-N3 υπολογίζει τις αντίστοιχες τιμές PM σύμφωνα με τη μέθοδο που ορίζεται από το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 481. Η μετατροπή από το «οπτικό μέγεθος» κάθε σωματιδίου όπως καταγράφεται από το OPC-N3 και η μάζα αυτού του σωματιδίου **απαιτεί γνώση** τόσο της πυκνότητας των σωματιδίων όσο και της RI και το μήκος κύματος με λέιζερ, 658 nm.

Το OPC-N3 επιτρέπει τον ορισμό μιας διαφορετικής τιμής για κάθε δοχείο μεγέθους για τη διόρθωση της διακύμανσης της πυκνότητας των σωματιδίων και του μεγέθους σωματιδίων. Το OPC-N3 έχει 10 δείκτες στάθμισης θέσεων, ο ένας είναι ρυθμιζόμενος από τον τελικό χρήστη και τα 9 είναι ρυθμισμένα εργοστασιακά. Ο δείκτης στάθμισης θέσης 2 λαμβάνει μια τιμή πυκνότητας σωματιδίων 1,65 g/ml, αριθμός που ισοδυναμεί με τυπική τιμή που βρίσκεται σε πολλά περιβάλλοντα.

Δειγματοληψία περιβάλλοντος

Ο ρυθμός ροής αέρα δείγματος μέσω της μονάδας καθορίζεται τόσο από την ταχύτητα του ανεμιστήρα όσο και από τυχόν εμπόδια που επηρεάζει την είσοδο ή την εκροή του OPC. Οι κατανομές σωματιδίων μπορεί επίσης να επηρεαστούν με απότομες στροφές και στενούς σωλήνες δείγματος. Η μέγιστη πτώση πίεσης σε ολόκληρο το σύστημα ροής πρέπει να είναι μικρότερη από 40 Pa. Ωστόσο, επειδή η ταχύτητα του ανεμιστήρα μπορεί να ποικίλλει, ο ρυθμός ροής δείγματος μέσω του OPC μπορεί επίσης να **ποικίλλει.**

Τέτοιες διακυμάνσεις παρακολουθούνται και διορθώνονται από το OPC έτσι ώστε οι συγκεντρώσεις των σωματιδίων και οι προκύπτουσες τιμές PM να μην επηρεάζονται από μέτριες διακυμάνσεις ροής (εκκρεμεί δίπλωμα ευρεσιτεχνίας).

Το OPC-N3 μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιονδήποτε προσανατολισμό αλλά για να μετριάσουν οι επιπτώσεις της διεύθυνσης του ανέμου στη δειγματοληψία, είναι καλύτερο η είσοδος να είναι στραμμένη προς τα πάνω. Όταν τοποθετείται στραμμένο προς τα

πάνω, θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα ώστε να αποφεύγονται πολύ μεγάλα σταγονίδια ή αιθάλη και κόκκοι από την είσοδο στη μονάδα λόγω βαρύτητας. Συνιστάτε μια «ομπρέλα» για την προστασία της εισόδου χωρίς να παρεμβαίνει στη ροή των σωματιδίων. **Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν φίλτρα χοντρής γάζας**

• Όλα ηλεκτρικά Οι συνδέσεις πρέπει να προστατεύονται από υγρασία και θερμοκρασίες εκτός του εύρους λειτουργίας.

10 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4_ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΕΛΙΟΥ

TABLE1:ΣΕΝΑΡΙΟ 01_04_2022_ΙΔΙΟΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

T(K)	RH	P(mbar)	PM1($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2,5($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	H(m)
20,7	30		16,1	27,5	30,9	2
19,2	32		12,2	25,5	28,5	20
18,7	32		10,6	24	27,5	40
17,7	37		10	23	26,2	60
17,3	40		8,9	22,3	25,1	80
17,2	41		8	21,2	22,7	100
17,1	42		7,42	19,5	20,4	120

ΩΡΑ ΛΗΨΗΣ: 08:30, ΘΕΣΗ ΛΗΨΗΣ: PARKING

TABLE2:ΣΕΝΑΡΙΟ 04_04_2022_ΙΔΙΟΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

T(K)	RH	P(mbar)	PM1($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2,5($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	H(m)
18,8	65		15,5	26,7	30,9	2
18,3	70		11,9	25,1	28,3	20
18,2	71		10,7	23,7	27,4	40
17,8	72		10	22,9	26,3	60
17,6	73		9	21,8	25,2	80
17,4	73		8,4	20,7	23,3	100
17,3	42		7,3	18,5	20,5	120

ΩΡΑ ΛΗΨΗΣ: 08:30, ΘΕΣΗ ΛΗΨΗΣ: PARKING

TABLE3:ΣΕΝΑΡΙΟ 07_04_2022_ΙΔΙΟΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

T(K)	RH	P(mbar)	PM1($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2,5($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	H(m)
16,8	70,86		9,22	14,64	60,98	2
16,325	72,66		11,68	18,24	38,98	20
15,9	73,4		10,52	16,38	26,58	40
15,76667	74,42		13,8	22,16	22,58	60
15,5	76,12		31,14	49,04	19,72	80
14,6	76,96		19,42	32,1	17,14	100
14,35	78,6715		6,41	11	12,3494	120

ΩΡΑ ΛΗΨΗΣ:08:30,ΘΕΣΗ ΛΗΨΗΣ:PARKING ,ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ:3m/s

TABLE4:ΣΕΝΑΠΙΟ 10_04_2022_PURPLEAIR

T(K)	RH	P(mbar)	PM1($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2,5($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	H(m)
30,55556	22	994,05071	16,67	27,335	37,38	2
30	24	989,5238	13,055	26,93	34,785	10
29,4444	25	986,4075	12,535	23,13	30,43	20
28,88889	26	986,214	11,615	16,41	23,585	40
28,33333	28	986,0632	10,905	15,23	19,8	60
27,77778	30	985,84045	10,295	13,77	18,87	80
27,22222	32	984,696	9,95	12,895	15,705	100
26,66667	33	984,56	9,795	10,85	13,98	120

ΩΡΑ ΛΗΨΗΣ: 08:30, ΘΕΣΗ ΛΗΨΗΣ: PARKING

TABLE5:ΣΕΝΑΠΙΟ 12_04_2022_PURPLEAIR

T(K)	RH	P(mbar)	PM1($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2,5($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	H(m)
21,66667	27	1021,35	14,965	18,215	18,57	0
21,11111	28	1021,35	13,63	16,525	16,79	2
21,11111	28	1021,23	14,1	15,53	16,2	10
20,55556	29	1021,21	13,585	17,38	16,49	20
20,55556	29	1021,08	12,605	16,875	17,545	40
19,44444	30	1020,06	13,11	15,88	15,785	60
18,33333	30	1018,6	11,905	15,775	15,745	80
17,77778	31	1017,66	12,28	14,585	15,885	100
16,66667	32	1016,28	11,125	13,79	14,11	120

ΩΡΑ ΛΗΨΗΣ: 15:00, ΘΕΣΗ ΛΗΨΗΣ: ΓΗΠΕΔΟ BEACH VOLLEY

TABLE6:ΣΕΝΑΠΙΟ 24_05_2022_PURPLEAIR

T(K)	RH	P(mbar)	PM1($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2,5($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	H(m)
32,77778	37	1010,34	21,45	28,895	30,235	2
31,66667	39	1010,33	20,89	27,255	27,755	10
30	44	1010,06	19,08	25,765	26,545	20

ΩΡΑ ΛΗΨΗΣ:15:30, ΘΕΣΗ ΛΗΨΗΣ:BEACHVOLLEY

TABLE 7:ΣΕΝΑΠΙΟ 25_05_2022_PURPLEAIR

T(K)	RH	P(mbar)	PM1($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2,5($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	H(m)
31,66667	31	1014,32	32,435	44,61	53,9	0
31,66667	32	1014,29	32,015	44,305	53,57	2
30,55556	34	1014,21	29,22	40,635	48,17	10
29,44444	38	1014,07	27,805	38,41	44,995	20
28,33333	41	1013,07	26,97	36,55	42,155	40
27,77778	41	1011,94	26,585	36,965	43,1	60
27,22222	41	1008,89	25,985	35,575	39,98	80
27,22222	42	1007,16	24,36	33,015	36,005	100
26,66667	42	1001,73	22,615	30,315	31,9	120

ΩΡΑ ΛΗΨΗΣ:	15:30	ΘΕΣΗ ΛΗΨΗΣ:	BEACH VOLLEY
------------	-------	-------------	--------------

TABLE 8:ΣΕΝΑΡΙΟ 26_05_2022 PURPLEAIR

T(K)	RH	P(mbar)	PM1($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2,5($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	H(m)
32,7778	31	1015,81	19,38	23,67	23,915	0
32,22222	31	1015,77	19,005	24,6	25,08	2
31,66667	32	1004,45	18,87	23,5	24,285	10
31,1111	32	1006,86	18,79	23,695	26,64	20
31,1111	33	1011,04	18,335	23,405	23,565	40
31,1111	34	1014,64	18,09	23,22	23,79	60
30,55556	34	1015,49	17,53	22,615	23,205	80
30,55556	34	1015,83	16,215	20,435	21,075	100
30,55556	34	1015,69	14,655	18,685	19,095	120

ΩΡΑ ΛΗΨΗΣ: 15:30, ΘΕΣΗ ΛΗΨΗΣ: BEACH VOLLEY

TABLE 9:ΣΕΝΑΠΙΟ 30_05_2022 PURPLEAIR

T(K)	RH	P(mbar)	PM1($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2,5($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	H(m)
32,22222	31	1010,4	9,165	11,28	11,61	2
31,66667	31	1010,34	7,99	10,2	10,66	10
31,66667	31	1010,33	7,76	9,755	10,395	20
31,66667	31	1010,31	6,12	8,22	8,695	40
31,66667	32	1010,27	6,6	8,805	9,185	60
31,66667	32	1009,42	6,65	8,715	9,245	80
31,11111	32	1007,84	6,55	8,36	8,98	100

ΩΡΑ ΛΗΨΗΣ:15:30, ΘΕΣΗ ΛΗΨΗΣ:BEACH VOLLEY

TABLE 10:ΣΕΝΑΠΙΟ 01_06_2022_PURPLEAIR

T(K)	RH	P(mbar)	PM1($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2,5($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	H(m)
34,44444	28	1011,04	19,48	25,835	26,715	0
33,33333	30	1010,96	17,69	23,45	25,015	2
32,77778	31	1010,9	16,02	21,53	22,045	10
32,77778	32	1010,83	12,945	17,26	17,545	20
31,66667	32	1008,74	12,735	16,285	16,275	40
29,44444	37	1003,69	11,815	16,105	16,1	60
28,11111	40	1002,02	11,42	13,445	15,875	80
27,88889	41	1001,02	11,3	14,43	14,915	100
27,33333	42	999,65	11,2	14,415	14,875	120

ΩΡΑ ΛΗΨΗΣ: 15:00, ΘΕΣΗ ΛΗΨΗΣ: ΓΗΠΕΔΟ BEACH VOLLEY

TABLE 11: ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΛΥΣΗ(ΔΕΛΟΜΕΝΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ)

Pasquill classes	u	w	β	γ	γ	α	n	c
A-B	0,89408	2,77	2,975558	1,535772	0,0005	0,112	1,54	1,46
B	0,44704	3,05	14,43008	7,447781	0,000652	0,13	1,54	1,46
B	0,89408	1,61	1,005219	0,518823	0,000652	0,13	1,54	1,46
B	0,2	1,23	11,72498	6,0516	0,000652	0,13	1,54	1,46
A	0,44704	0,458	0,325387	0,167942	0,0005	0,112	1,54	1,46
A	1,34112	1,3	0,291282	0,150339	0,0005	0,112	1,54	1,46
B	3,57632	1,5	0,054535	0,028147	0,000652	0,13	1,54	1,46
B	3,12928	1,64	0,085145	0,043946	0,000652	0,13	1,54	1,46
C	4,02336	2,1	0,084454	0,043589	0,000905	0,112	1,17	1,52
C	4,02336	2,1	0,084454	0,043589	0,000905	0,112	1,17	1,52
C	6,7056	2,4	0,039711	0,020496	0,000905	0,112	1,17	1,52

m	d	q	p	$2\sqrt{\frac{\beta}{\alpha}}$	$2\nu(\beta/\alpha)$ π	p-n+2	$\frac{\nu}{\alpha}((p-n+2)/2)^2$
0,71	0,01	-1,918	0,189	10,30873131	32,36942	0,649	1,4439
0,71	0,01	-0,101	0,162	21,07136264	66,16408	0,622	5,54121
0,71	0,01	-0,101	0,162	5,561458007	17,46298	0,622	0,38601
0,71	0,01	-0,101	0,162	18,99390591	59,64086	0,622	4,50244
0,71	0,01	-1,918	0,189	3,408952303	10,70411	0,649	0,1579
0,71	0,01	-1,918	0,189	3,225355163	10,12762	0,649	0,14135
0,71	0,01	-0,101	0,162	1,295370654	4,067464	0,622	0,02094
0,71	0,01	-0,101	0,162	1,618596474	5,082393	0,622	0,0327
0,69	0,04	0,102	0,134	1,736729703	5,453331	0,964	0,09042
0,69	0,04	0,102	0,134	1,736729703	5,453331	0,964	0,09042
0,69	0,04	0,102	0,134	1,190900368	3,739427	0,964	0,04252

pasquill classes	A	B	C	D	E	F
$\sigma\theta(0C)$	25	20	15	10	5	2,5
a(km)	0,927	0,37	0,283	0,707	1,07	1,17
s(m/km)	102	96,2	72,2	47,5	33,5	22
q	-1,918	-0,101	0,102	0,465	0,624	0,7
r(m/km)	250	202	134	78,7	56,6	37
p	0,189	0,162	0,134	0,135	0,137	0,134

pasquil classes	c	m	d	n
A-B	1,46	0,71	0,01	1,54
C	1,52	0,69	0,04	1,17
D	1,36	0,67	0,09	0,95
E-F	0,79	0,7	0,4	0,67

pasquil classes	α	β	γ	δ
A	0,112	1,06	$5 \cdot 10^{-4}$	0,815
B	0,13	0,95	$6,52 \cdot 10^{-4}$	0,75
C	0,112	0,92	$9,05 \cdot 10^{-4}$	0,718
D	0,098	0,889	$1,35 \cdot 10^{-3}$	0,688
E	0,0609	0,895	$1,96 \cdot 10^{-3}$	0,684
F	0,0638	0,783	$1,36 \cdot 10^{-3}$	0,672

ΠΙΝΑΚΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΕΩΝ

TABLE 12:ΣΕΝΑΠΙΟ 01_06_2022_PURPLEAIR

H(m)	RH	PM2,5(μg/m ³)	FEM GRID	FEM BAM	RH CORRECTED	ANALYTICAL
0	28	25,835				39,264193
			20,53564	21,73903	29,6954023	
2	30	23,45				18,004315
			18,91145	20,03375	25,4891304	
10	31	21,53				10,6135652
			17,60393	18,66095	22,7830688	
20	32	17,26				8,46533514
			14,69606	15,6079	17,7938144	
40	32	16,285				6,75491265
			14,03209	14,91078	16,7886598	
60	37	16,105				5,92024248
			13,90951	14,78208	14,7077626	
80	40	13,445				5,39160938
			12,09805	12,88018	11,491453	

TABLE 13:ΣΕΝΑΠΙΟ 30_05_2022_PURPLEAIRΩΠΑ ΛΗΨΗΣ:15:30ΘΕΣΗ

ΛΗΨΗΣ:BEACH VOLLEY

H(m)	RH	PM2,5(μg/m ³)	FEM GRID	FEM BAD	RH CORRECTED
2	31	11,28	10,62368	11,3322	11,93651
10	31	10,2	9,8882	10,56	10,79365
20	31	9,755	9,585155	10,24183	10,32275
40	31	8,22	8,53982	9,1443	8,698413
60	32	8,805	8,938205	9,562575	9,07732
80	32	8,715	8,876915	9,498225	8,984536
100	32	8,36	8,63516	9,2444	8,618557

TABLE 14:ΣΕΝΑΠΙΟ 26_05_2022_PURPLEAIRΩΡΑ ΔΗΨΗΣ:15:30ΘΕΣΗ**ΔΗΨΗΣ:BEACH VOLLEY**

H(m)	RH	PM2,5($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	FEM GRID	FEM BAM	RH CORRECTED
0	31	23,67	19,06127	20,19105	25,04762
2	31	24,6	19,6946	20,856	26,03175
10	32	23,5	18,9455	20,0695	24,2268
20	32	23,695	19,0783	20,20893	24,42784
40	33	23,405	18,88081	20,00158	23,52261
60	34	23,22	18,75482	19,8693	22,76471
80	34	22,615	18,34282	19,43673	22,17157
100	34	20,435	16,85824	17,87803	20,03431
120	34	18,685	15,66649	16,62678	18,31863

TABLE 15:ΣΕΝΑΠΙΟ 25_05_2022_PURPLEAIRΩΡΑ ΔΗΨΗΣ:15:30ΘΕΣΗ**ΔΗΨΗΣ:BEACH VOLLEY**

H(m)	RH	PM2,5($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	FEM GRID	FEM BAM	RH CORRECTED
0	31	44,61	33,32141	35,16315	47,20635
2	32	44,305	33,11371	34,94508	45,67526
10	34	40,635	30,61444	32,32103	39,83824
20	38	38,41	29,09921	30,73015	34,29464
40	41	36,55	27,83255	29,40025	30,58577
60	41	36,965	28,11517	29,69698	30,93305
80	41	35,575	27,16858	28,70313	29,76987
100	42	33,015	25,42522	26,87273	27,06148
120	42	30,315	23,58652	24,94223	24,84836

TABLE 16:ΣΕΝΑΠΙΟ 24_05_2022_PURPLEAIRΩΠΑ ΛΗΨΗΣ:15:30ΘΕΣΗ**ΛΗΨΗΣ:BEACHVOLLEY**

H(m)	RH	PM2,5($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	FEM GRID	FEM BAD	RH CORRECTED
2	37	28,895	22,6195	23,92693	26,38813
10	39	27,255	21,50266	22,75433	23,80349
20	44	25,765	20,48797	21,68898	20,2874

TABLE 17:ΣΕΝΑΠΙΟ 12_04_2022_PURPLEAIRΩΠΑ ΛΗΨΗΣ:15:00ΘΕΣΗ ΛΗΨΗΣ:ΓΗΠΕΔΟ**BEACH VOLLEY**

H(m)	RH	PM2,5($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	FEM GRID	FEM BAM	RH CORRECTED
0	27	18,215	15,34642	16,29073	21,55621302
2	28	16,525	14,19553	15,08238	18,99425287
10	28	15,53	13,51793	14,37095	17,85057471
20	29	17,38	14,77778	15,6937	19,41899441
40	29	16,875	14,43388	15,33263	18,8547486
60	30	15,88	13,75628	14,6212	17,26086957
80	30	15,775	13,68478	14,54613	17,14673913
100	31	14,585	12,87439	13,69528	15,43386243
120	32	13,79	12,33299	13,12685	14,21649485

TABLE 18:ΣΕΝΑΠΙΟ 10_04_2022_PURPLEAIRΩΠΑ ΛΗΨΗΣ:08:30ΘΕΣΗ ΛΗΨΗΣ:PARKING

H	PA	FEM GRID	FEM BAM	RH	RH CORRECTED
2	27,335	21,55714	22,81153	22	37,9652778
10	26,93	21,28133	22,52195	24	34,974026
20	23,13	18,69353	19,80495	25	29,0943396
40	16,41	14,11721	15,00015	26	20,0121951
60	15,23	13,31363	14,15645	28	17,5057471
80	13,77	12,31937	13,11255	30	14,9673913
100	12,895	11,7235	12,48693	32	13,2938144
120	10,85	10,33085	11,02475	33	10,9045226

TABLE 19:ΣΕΝΑΡΙΟ 01_06_2022_PURPLEAIRΩΡΑ ΛΗΨΗΣ:08:30ΘΕΣΗ ΛΗΨΗΣ:PARKING

H(m)	RH	RD	FGC	FBC	RHC	AS
0	28	25,835	20,53564	21,73903	29,6954	39,26419
2	30	23,45	18,91145	20,03375	25,48913	18,00431
10	31	21,53	17,60393	18,66095	22,78307	10,61357
20	32	17,26	14,69606	15,6079	17,79381	8,46534
40	32	16,285	14,03209	14,91078	16,78866	6,75491
60	37	16,105	13,90951	14,78208	14,70776	5,92024
80	40	13,445	12,09805	12,88018	11,49145	5,39161

TABLE 19:ΣΕΝΑΡΙΟ 01_06_2022_PURPLEAIRΩΡΑ ΛΗΨΗΣ:08:30ΘΕΣΗ ΛΗΨΗΣ:PARKING

FWHM	T	RH
5,61	14,61	45,166
2,98	14,61	45,166
4,1	14,587	34,828
3	14,97	34,944
5,349	14,197	34,944
0,971	13,882	50,46
1	13,882	50,46

11 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5_ ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΕΛΙΟΥ

Στο παράρτημα 5 παρουσιάζονται οι μετρήσεις και τα γραφήματα των 4 έως 14 ημερών φλεβάρη καθ' ύψος και σε σταθερή μέτρηση 7 μέτρων

4^Η ΗΜΕΡΑ ΦΛΕΒΑΡΗ

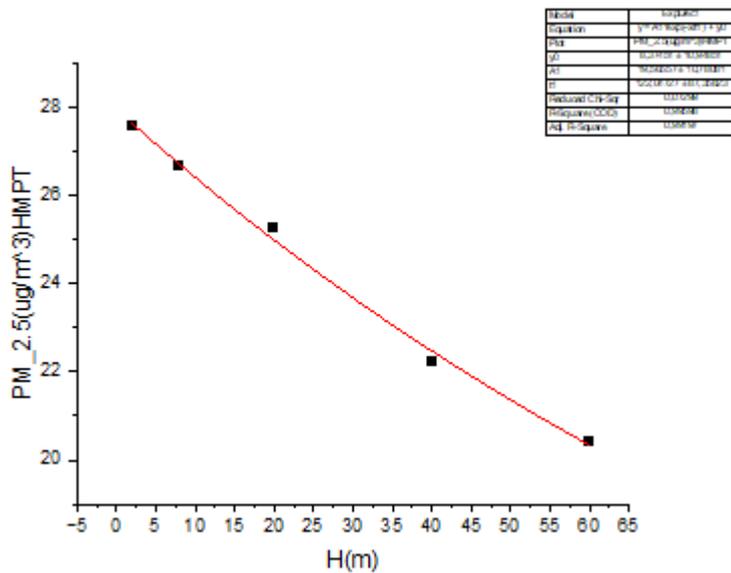
➡ ΚΑΘΥΨΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗ(ΠΥΛΗ ΠΕΤΡΟΥ ΡΑΛΛΗ)

Σε αυτές τις μετρήσεις την μέτρηση χρησιμοποιείται το ίδιο-κατασκευασμένο drone το οποίο έχει περιορισμένη ενεργειακή δυνατότητα δηλ. μικρής χωρητικότητας μπαταρία ,αλλά επειδή με την παρακολούθηση επιπλέον μεταβλητών μπορεί να μην είναι στην βέλτιστη προσοχή μας η πτήση υπάρχει μια καινοτομία προγραμματισμένη στο firmware :

Αρχίζει η προσγείωση αυτόματα όταν η τάση πέφτει κάτω από τα 13,99 Volt

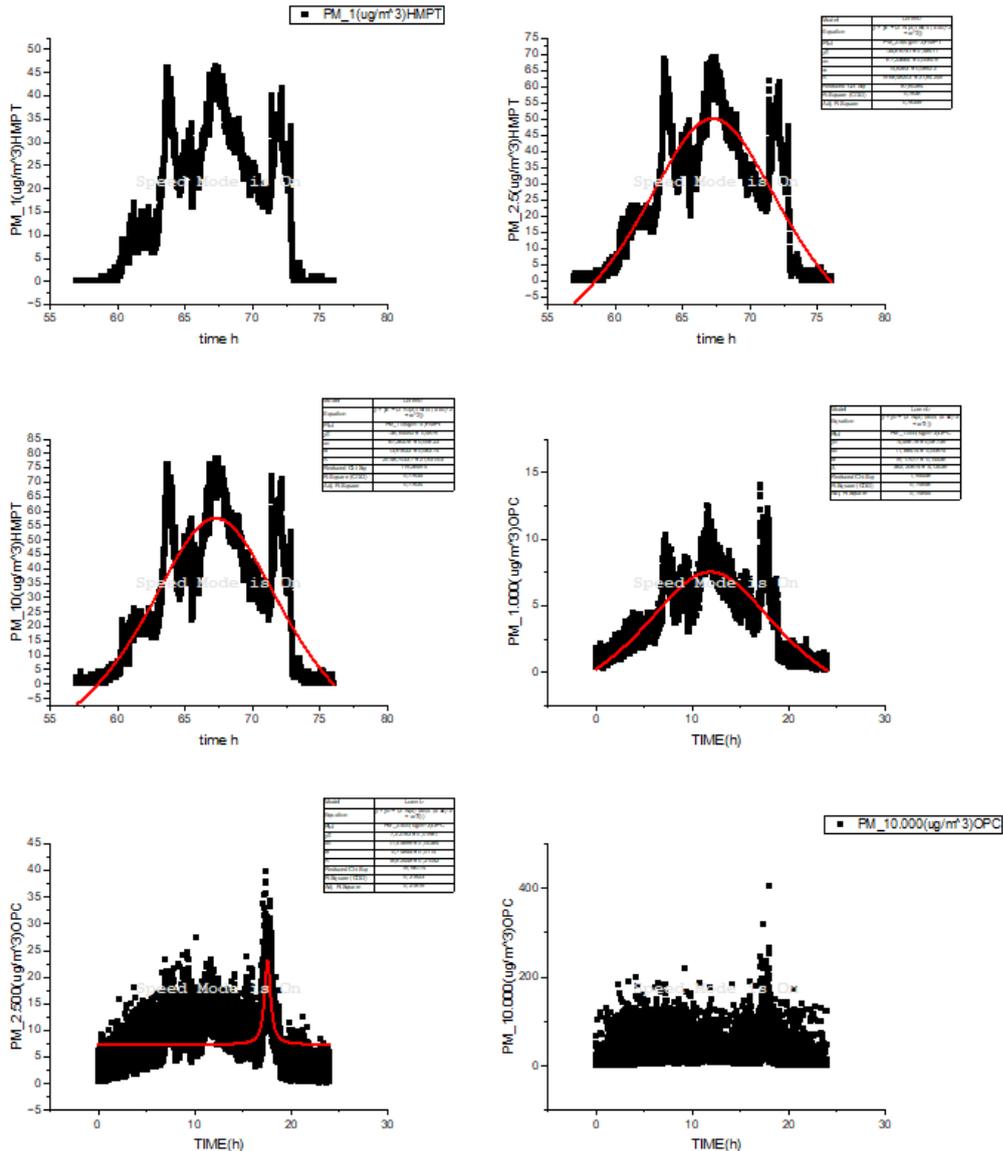
H(m)	PM_2.5(μg/m ³)HMPT
2	27,576675
8	26,642285
20	25,246645
40	22,22119
60	20,430805

➡ **Οι μετρήσεις γίνονται νωρίς το απόγευμα**



ΣΤΑΘΕΡΗ ΜΕΤΡΗΣΗ

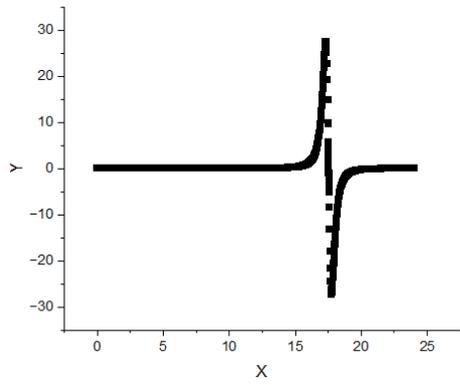
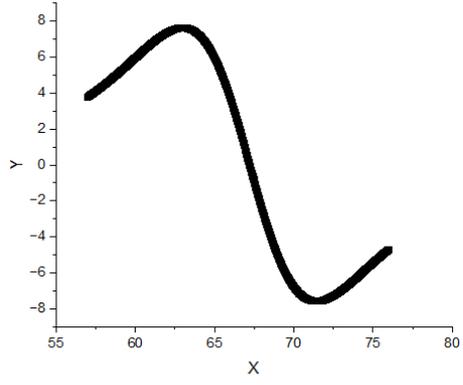
Με τον SENSOR σταθερό στα 7 μέτρα (ταράτσα κτιρίου) γίνονται ημερήσιες μετρήσεις οι οποίες αποτελούν χρόνο σειρά. Σε κάθε μία από αυτές τις σταθερές μετρήσεις παρουσιάζονται δυο μετρήσεις από τους SENSORS (Ιδιο κατασκευής προγραμματισμένο ARDUINO +PLANTOWER ,HMPT και εμπορικός της ALPHASENSE OPC) οι οποίοι μετρούν ταυτόχρονα PM / 1/ 2,5 και 10.



Μετά την επεξεργασία φαίνεται ότι οι χρόνο σειρές έχουν Λορεντζιανή συμπεριφορά και προσομοιώνονται με συνάρτηση Λόρεντζ όπου το πεδίο ενδιαφέροντος μας είναι τα PM 2,5. Σε αυτήν την συνάρτηση η πληροφορία του συστήματος βρίσκεται στο FULL WIDTH HALF MAXIMUM (FWHM) και στο PEAK. Εμείς θα ασχοληθούμε με το FWHM γιατί το PEAK ακολουθεί την λογική της τυχαιότητας και θα χρειαζόταν μια προσεκτική ανάλυση της εποχής της ώρας του φόρτου κυκλοφορίας κ.λ.π.

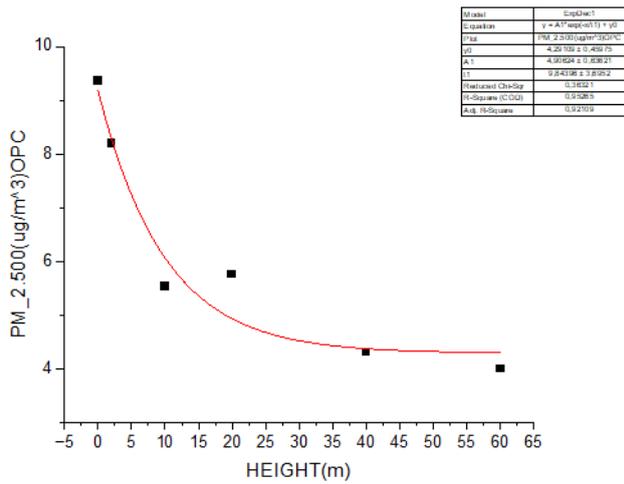
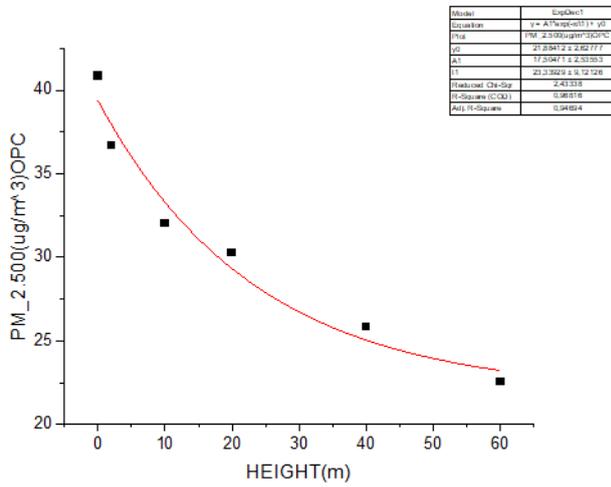
➡ Η ΠΡΩΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΟΣ

Επίσης η Λορεντζιανή μπορεί να μας δώσει πληροφορία από το πλάτος της έναρξης της και του κλεισίματος της και το FWHM οπότε αυτό τεχνικά γίνεται με την παραγωγή της συνάρτησης όπως φαίνεται στο επόμενο γράφημα..

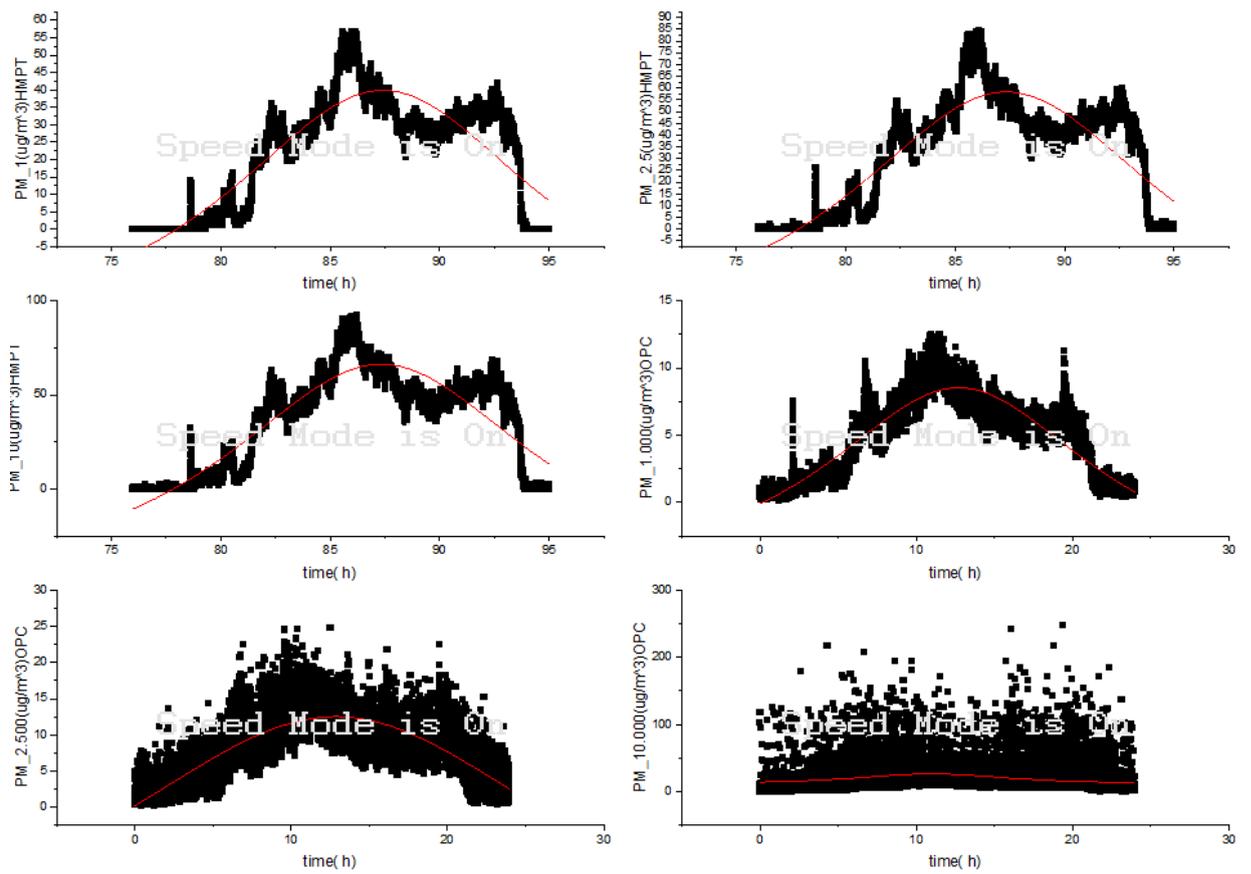


5^H ΗΜΕΡΑ ΦΛΕΒΑΡΗ

➔ ΚΑΘΥΨΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗ(ΠΥΛΗ ΠΕΤΡΟΥ ΡΑΔΛΗ)

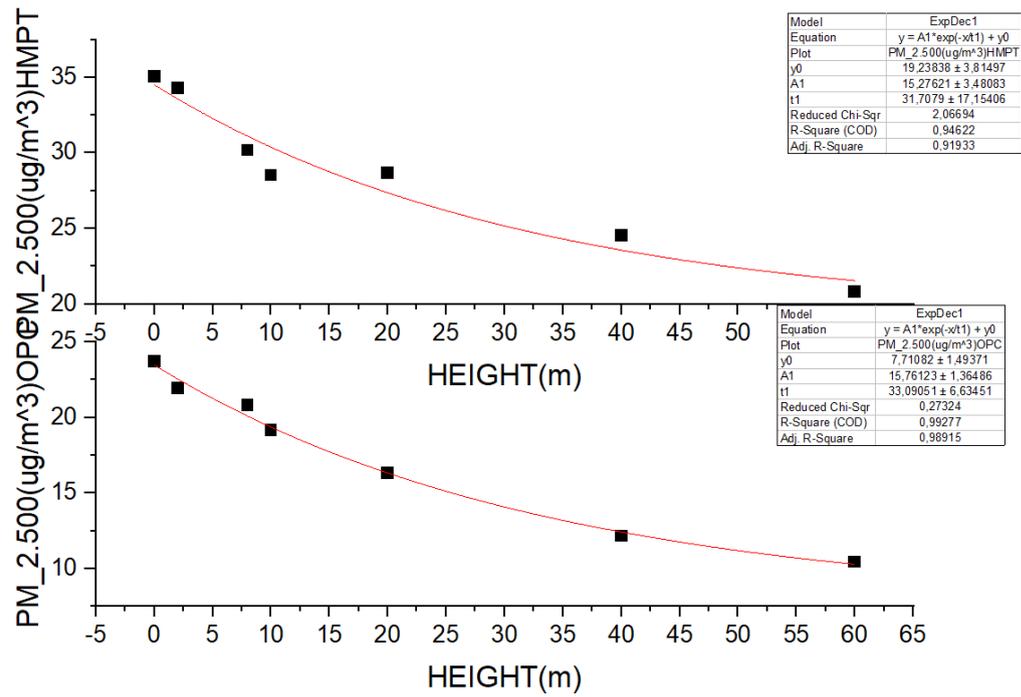


➔ ΣΤΑΘΕΡΗ ΜΕΤΡΗΣΗ

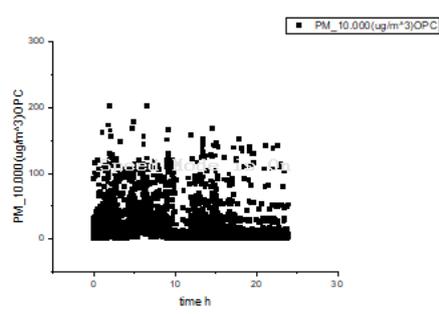
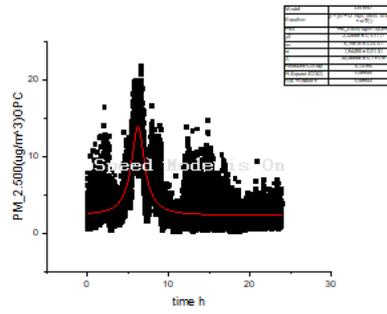
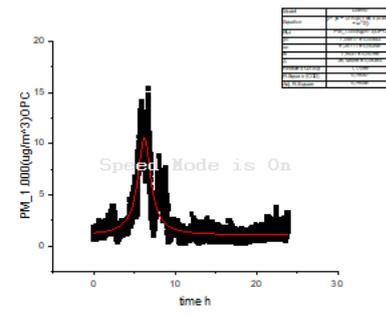
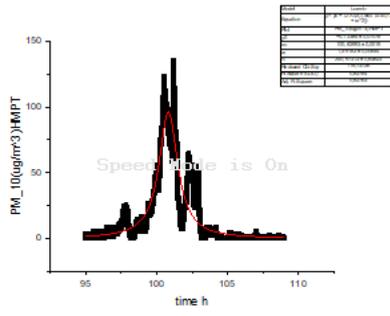
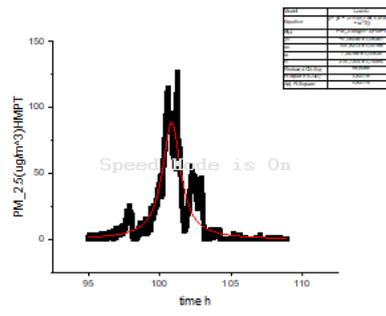
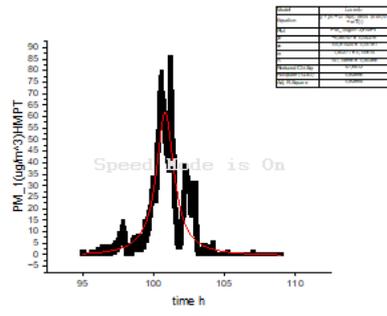


6^Η ΗΜΕΡΑ ΦΛΕΒΑΡΗ

ΚΑΘΥΨΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗ(ΠΥΛΗ ΠΕΤΡΟΥ ΡΑΛΛΗ)

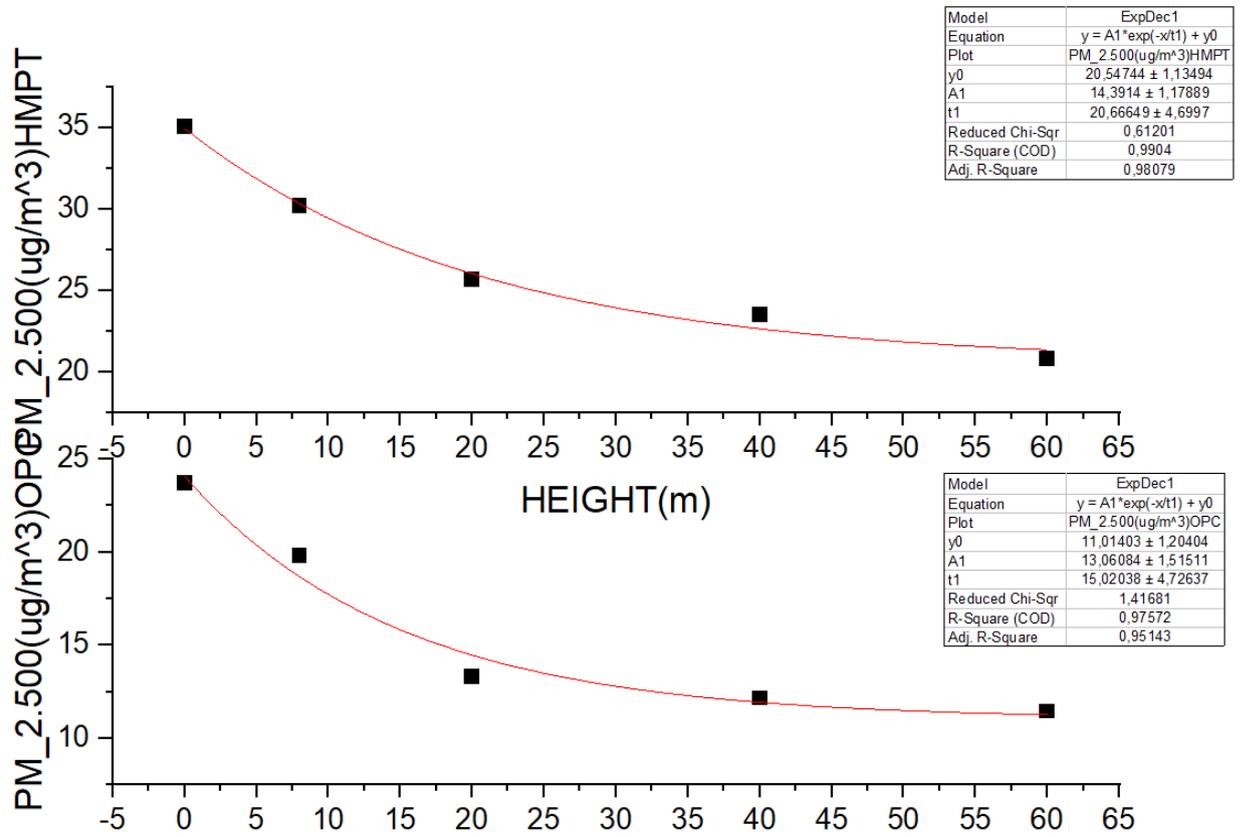


ΣΤΑΘΕΡΗ ΜΕΤΡΗΣΗ

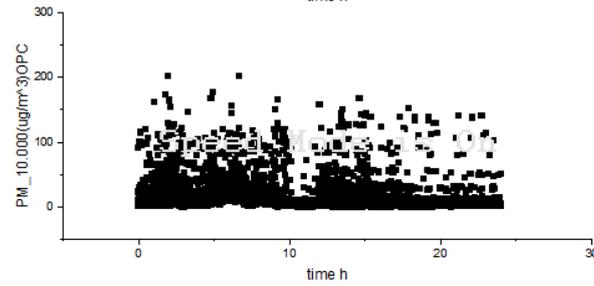
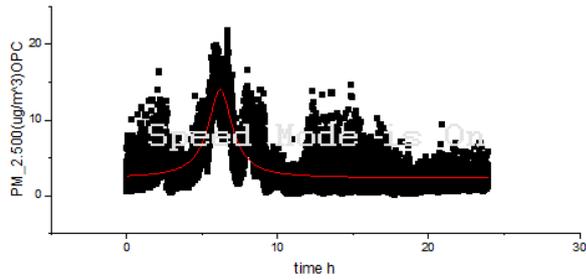
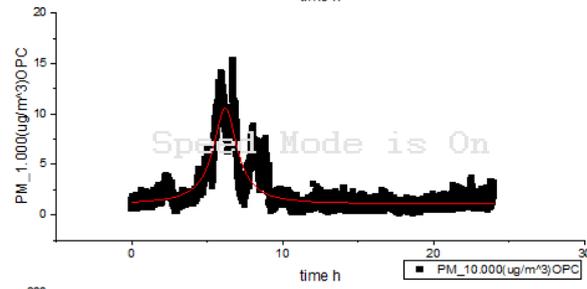
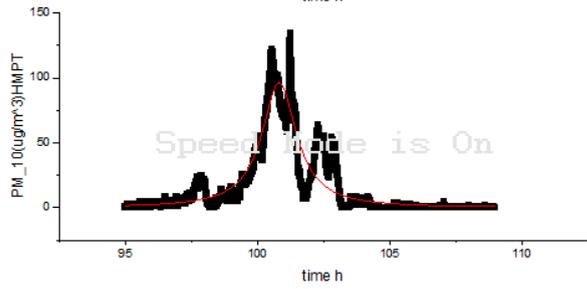
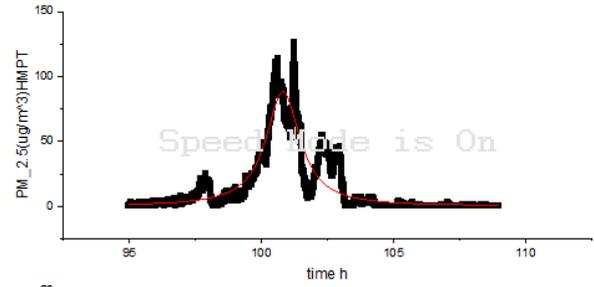
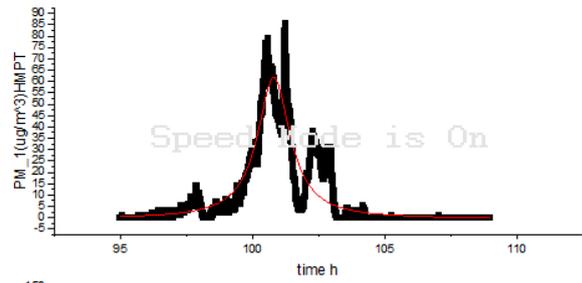


8^Η ΗΜΕΡΑ ΦΛΕΒΑΡΗ

ΚΑΘΥΨΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗ(ΠΥΛΗ ΠΕΤΡΟΥ ΡΑΛΛΗ)

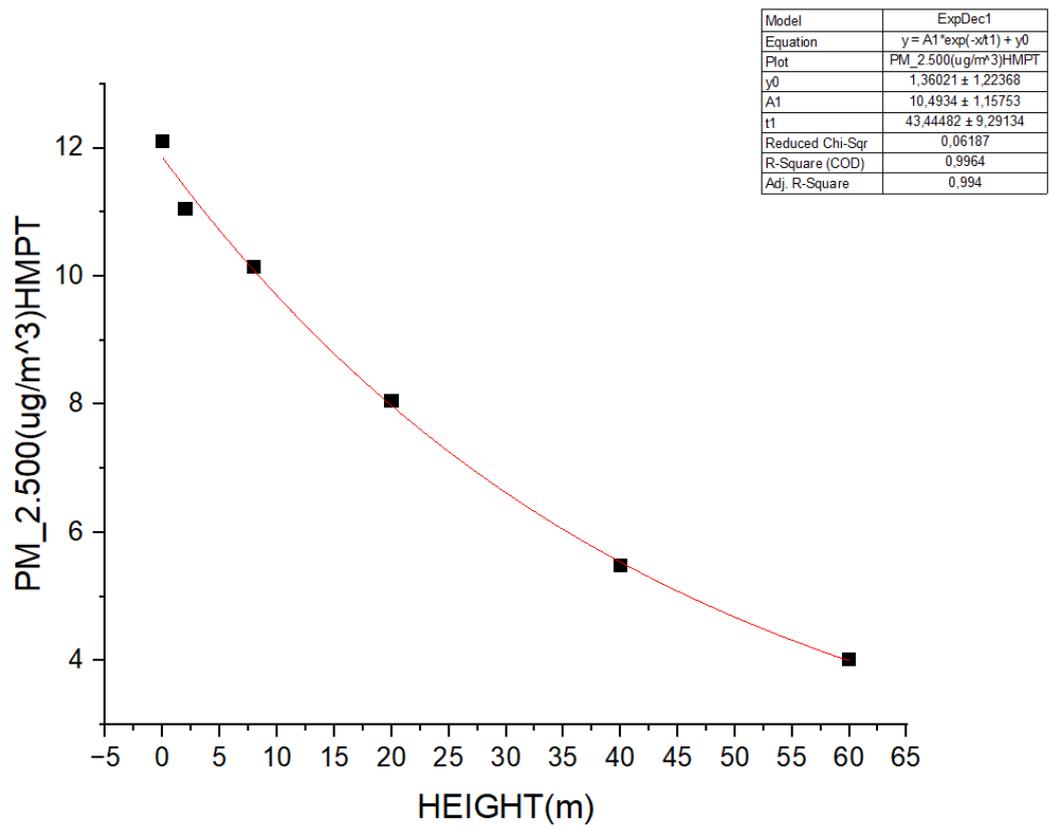


ΣΤΑΘΕΡΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ 8 m



9^Η ΗΜΕΡΑ ΦΛΕΒΑΡΗ

ΚΑΘΥ ΨΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗ(ΠΥΛΗ ΠΕΤΡΟΥ ΡΑΛΛΗ)



ΣΤΑΘΕΡΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ 8 m

10^H 11^H 12^H 13^H 14^H ΗΜΕΡΑ ΦΛΕΒΑΡΗ

ΣΤΑΘΕΡΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ 8 m

