Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών

ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

Μέτρηση της κατακόρυφης κατανομής αερολυμάτων PM_{10} με τη χρήση αερομεταφερόμενου αισθητήρα σε UAV και τεχνικής Lidar

Διπλωματική Εργασία:

Μαλανδράκης Ευτύχιος-Άγγελος

Επιβλέπων: Αλέξανδρος Παπαγιάννης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Φεβρουάριος, 2018

Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών

ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

Μέτρηση της κατακόρυφης κατανομής αερολυμάτων PM_{10} με τη χρήση αερομεταφερόμενου αισθητήρα σε UAV και τεχνικής Lidar

Διπλωματική Εργασία:

Μαλανδράκης Ευτύχιος-Άγγελος

Επιβλέπων: Αλέξανδρος Παπαγιάννης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Παπαγιάννης Α.	Κόκκαλης Π.	Ελευθεριάδης Κ.
Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Επίκουρος Καθηγητής Παν. Κουβέιτ	Ερευνητής Α’ ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος

Φεβρουάριος, 2018

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα αρχικώς να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Α. Παπαγιάννη, ο οποίος ήταν παρών σε όλη τη διάρκεια και πάντα διαθέσιμος για να με καθοδηγήσει και να με υποστηρίξει. Η εμπιστοσύνη που μου έδειξε από την αρχή της εργασίας σε συνδυασμό με τη δυνατότητα που μου παρείχε να δοκιμάσω δικές μου ιδέες, ήταν δύο σημαντικοί παράγοντες που καθόρισαν την εμπειρία που αποκόμισα σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επικ. Καθηγητή Δρ. Π. Κόκκαλη, τόσο για την πολύ μεγάλη του συνεισφορά ώστε να ολοκληρωθεί η εργασία αυτή, όσο και για τις πολύ εύστοχες υποδείξεις του για την βελτίωσή της, αλλά και το γεγονός ότι ήταν πάντα ανοιχτός και διαθέσιμος για να συζητήσουμε τους προβληματισμούς μου σχετικά με προβλήματα που προέκυψαν κατά τη διάρκειά της.

Δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω επίσης, τους ερευνητές του Εθνικού Κέντρου Έρευνας Φυσικών Επιστημών Δημόκριτος, κ.κ. Κ. Ελευθεριάδη, Σ. Βράτολη και Π. Φετφατζή για τη σημαντική συνδρομή τους, και την πάντοτε καλή τους διάθεση να συνδράμουν στα πειράματα βαθμονόμησης που χρησιμοποίησα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για τη μόνιμη υποστήριξή τους και το γεγονός ότι δε σταμάτησαν ποτέ τους να με ενθαρρύνουν, αλλά και όλους μου τους φίλους που ήταν δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ

Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της κατακόρυφης κατανομής των ατμοσφαιρικών ρύπων PM_{10}-$PM_{2.5}$ καθ’ ύψος της ατμόσφαιρας με τη χρήση μη επανδρωμένου αεροσκάφους (drone) και η σύγκριση αυτών των δεδομένων με τα δεδομένα της διάταξης Lidar του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύονται τα βασικά στοιχεία της ατμόσφαιρας, τα στρώματα από τα οποία αποτελείται και τα βασικά φαινόμενα που καθορίζουν την κίνηση των αέριων ρύπων σε κάποια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσονται οι έννοιες των ατμοσφαιρικών ρύπων που θα μελετηθούν στην παρούσα διπλωματική εργασία, πώς δημιουργούνται και πώς απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα, πώς αυτές κατατάσσονται, ενώ ακολούθως περιγράφονται οι επιδράσεις τους στον ανθρώπινο οργανισμό και η σημασία της μελέτης τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια εισαγωγική περιγραφή της τεχνικής lidar η οποία χρησιμοποιείται στη μελέτη των οπτικών και μικροφυσικών ιδιοτήτων των αερολυμάτων, αλλά και στη μελέτη των χαρακτηριστικών μεγεθών της ατμόσφαιρας και στην καταγραφή των ατμοσφαιρικών ρύπων σε μεγάλα υψόμετρα. Επίσης, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζουμε αναλυτικά τη διάταξη lidar του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την εκτίμησή της συγκέντρωσης των αερολυμάτων στην κατώτερη ατμόσφαιρα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται ο ανιχνευτής που χρησιμοποιήθηκε, τα επιμέρους τμήματα αυτού, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του, η συνδεσμολογία και η συμπεριφορά του σχετικά με την καταγραφή των αερολυμάτων. Επιπλέον περιγράφεται το μη επανδρωμένο αεροσκάφος (UAV) που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη αυτή με τα χαρακτηριστικά της πλακέτας του και το λογισμικό πλοήγησής του.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένων των πτήσεων της ανιχνευτικής διάταξης καθώς και η σύγκρισή τους με τα δεδομένα από τις μετρήσεις του σταθμού Lidar EOLE στο Ε.Μ.Π.

Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο επίλογος της αυτής της διπλωματικής εργασίας και οι προτάσεις για περαιτέρω βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων με το UAV.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to study the vertical distribution of PM_{10} aerosols in the atmosphere using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and compare them with the results derived by a ground-based lidar station, of the Laser Remote Sensing Unit of the National Technical University of Athens.

Chapter 1 is about an introduction on Earth's atmosphere. It is focused on its' vertical layers, and the effects that take action on aerosol vertical movements of a specific location.

Chapter 2 focuses on the fundamentals about the aerosols that will be analyzed within the framework of this Diploma Thesis. We present the origins/sources of aerosols, their physic-chemical characteristics, their cycle in the atmosphere, as well as their impact on the human body.

In the third chapter we describe the laser remote sensing (lidar) technique used in the atmospheric physics measuring the atmospheric properties, as well as the presence of aerosols in the atmosphere. Apart from the above, this chapter indicates the technical specifications of the NTUA lidar station.

Chapter 4 is focused on aerosol the Sharp sensor used in the frame of this project. We provide an extensive description of its parts, the dust sensor and Arduino microprocessor board, its' properties and behavior as well. Also, we present the hardware of the unmanned aerial vehicle (UAV) that has been used and its hardware and navigation software.

Chapter 5 contains the data from the UAV flights accomplished and the comparison with the data derived by the NTUA lidar station.

The last chapter indicates the conclusions of this Diploma Thesis, along with selected proposals for further improvement about the accuracy of the aerosol sensor used.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1 Η ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΚΑΙ Η ΔΟΜΗ ΤΗΣ

Ατμόσφαιρα καλείται το αεριώδες περίβλημα που περιβάλλει τη Γη, το οποίο συγκρατείται λόγω της βαρύτητας της, και φθάνει σε ύψος $\approx 3.500\ km$. Στην ατμόσφαιρα της Γης οφείλεται η ύπαρξη ζωής, εφόσον σε αυτήν οφείλονται η απορρόφηση μεγάλου τμήματος της υπεριώδους ακτινοβολίας και η μείωση της διαφοράς των ακραίων θερμοκρασιών που θα υπήρχαν μεταξύ ημέρας και νύχτας χωρίς αυτήν. Η ατμόσφαιρα είναι εκείνη η οποία συγκρατεί την υπεριώδη ακτινοβολία, προκαλεί τους χρωματισμούς του ουρανού και των νεφών ενώ συγχρόνως αποτελεί το μέσον στη διάδοση του ήχου αλλά και στη διάχυση του φωτός. Χωρίς αυτή ο ουρανός θα ήταν σκοτεινός, ενώ στη σκιά θα επικρατούσε πλήρες σκοτάδι και οι αστέρες θα έλαμπαν με σταθερό φως νύκτα και μέρα.

Η σύνθεση της από την επιφάνεια της θάλασσας και μέχρι τα $50\ km$ ύψος παραμένει περίπου αμετάβλητη. Αντίθετα η πυκνότητά της ατμόσφαιρας ελαττώνεται πολύ γρήγορα έτσι ώστε η αναπνοή στην κορυφή του Έβερεστ ($8.850\ m$) να είναι πολύ δύσκολη μέχρι αδύνατη, αφού η πυκνότητα της εκεί φθάνει μόλις τα 2/5 της πυκνότητας που παρατηρείται στην επιφάνεια της θάλασσας.

1.1 Η ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ

Ο ατμοσφαιρικός αέρας αποτελεί μείγμα πολλών αερίων με το μεγαλύτερο ποσοστό σε όγκο να κατέχει το άζωτο (78,08%), το οξυγόνο (20,95%) και το Αργό (0,93%). Εκτός αυτών υπάρχει το διοξείδιο του άνθρακα, τα ευγενή αέρια, ίχνη υδρογόνου, όζοντος, κλπ. Στην ατμόσφαιρα επίσης αιωρούνται σχεδόν πάντοτε και μόρια κονιορτού, καπνού, άλατος (από τα σταγονίδια των κυμάτων). Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας (πίνακας 1-1) με τα κυριότερα αέρια που αποτελούν τον ατμοσφαιρικό αέρα καθώς και η ογκομετρική τους σύνθεση (1).

ΑΕΡΙΟ	ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΣΥΝΘΕΣΗ
ΑΖΩΤΟ	$78{,}084$
ΟΞΥΓΟΝΟ	$20{,}848$
ΑΡΓΟ	$0{,}934$
ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ	$0{,}0395$
ΝΕΟΝ	$1{,}8 \cdot 10^{-3}$
ΜΕΘΑΝΙΟ	$1{,}7 \cdot 10^{-4}$
ΥΠΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ	$3{,}1 \cdot 10^{-5}$
ΥΔΡΟΓΟΝΟ	$5 \cdot 10^{-5}$
ΜΟΝΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ	$1{,}2 \cdot 10^{-5}$
ΟΖΟΝ	$0{,}2 - 200 \cdot 10^{-6}$
ΥΔΡΑΤΜΟΙ	Μεταβλητή

Πίνακας 1-1: Τα κυριότερα αέρια που αποτελούν τον ατμοσφαιρικό αέρα

Ένα ακόμα από τα πιο συνηθισμένα αέρια της ατμόσφαιρας είναι οι υδρατμοί, οι οποίοι παρουσιάζουν μεταβλητή συγκέντρωση και μαζί με τη θερμότητα είναι οι δύο βασικοί παράγοντες δημιουργίας των μετεωρολογικών φαινομένων. Για το λόγο αυτό οι υδρατμοί από μετεωρολογικής άποψης αποτελούν το σπουδαιότερο στοιχείο της γήινης ατμόσφαιρας.

Η ογκομετρική σύνθεση ($ΟΣ$) του αέρα ορίζεται ως:

$$ΟΣ = 100v/V$$

όπου V είναι ο όγκος του ξηρού ατμοσφαιρικού αέρα και v ο όγκος που καταλαμβάνει το κάθε αέριο συστατικό σε ίδιες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας με τον ξηρό ατμοσφαιρικό αέρα (1).

1.2 ΣΤΡΩΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ

Η χημική σύνθεση (αναλογία αζώτου / οξυγόνου) της ατμόσφαιρας μέχρι το ύψος των $80 - 100km$ παραμένει αμετάβλητη. Ανάλογα όμως με την κατακόρυφη μεταβολή της θερμοκρασίας διακρίνονται σε αυτήν τα ακόλουθα στρώματα: η τροπόσφαιρα, η στρατόσφαιρα, η μεσόσφαιρα, η θερμόσφαιρα και η εξώσφαιρα.

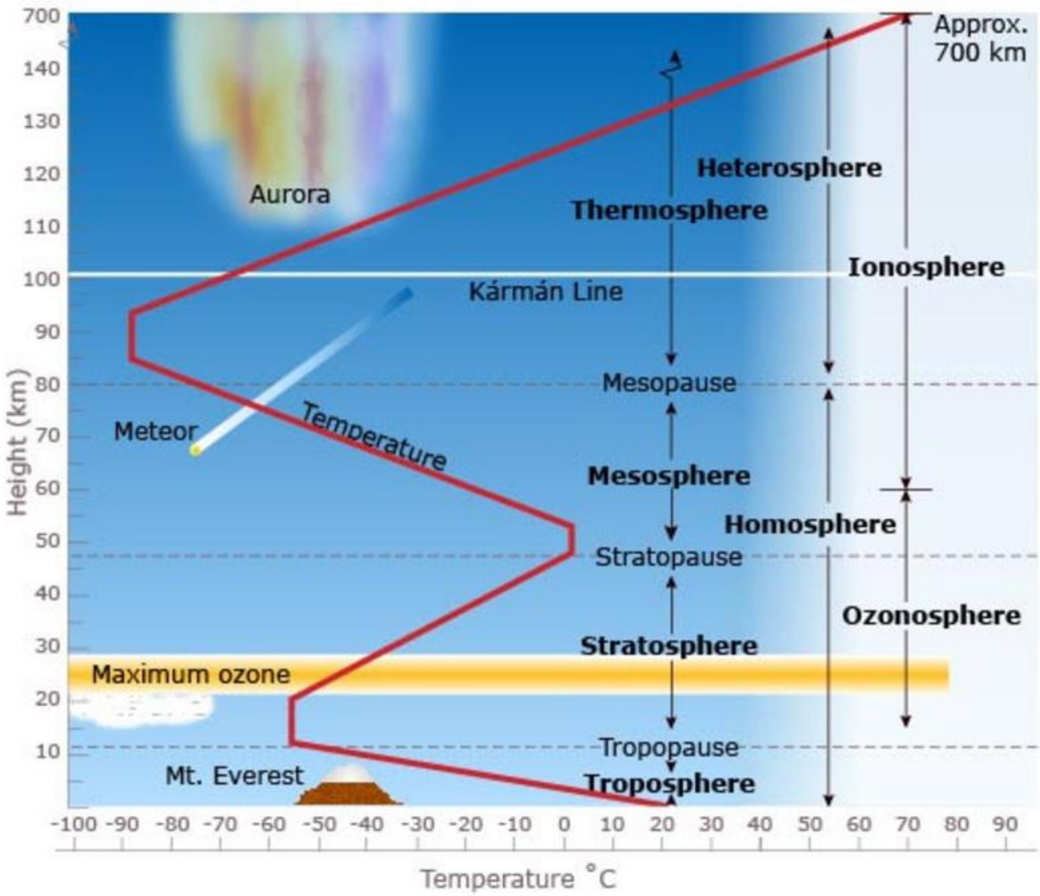
Η **τροπόσφαιρα** είναι το πιο κοντινό ατμοσφαιρικό στρώμα στην επιφάνεια της γης και σ' αυτό εξελίσσονται όλα σχεδόν τα καιρικά φαινόμενα. Ο αέρας βρίσκεται σε συνεχή κίνηση καθώς θερμαίνεται και ψύχεται. Τα νέφη δημιουργούνται καθώς το νερό εξατμίζεται και συμπυκνώνεται. Αυτή η συνεχής μεταφορά αέρα, θερμότητας και νερού, δημιουργεί τον καιρό. Το ύψος της τροπόσφαιρας ποικίλλει στις διάφορες περιοχές της γης. Για παράδειγμα, στον Ισημερινό η τροπόσφαιρα εκτείνεται σε ύψος έως και $20\ km$. Στους πόλους το ύψος της φτάνει τα $8 - 10\ km$, ανάλογα με την εποχή του χρόνου. Η τροπόσφαιρα παρουσιάζει τη μεγαλύτερη πυκνότητα από όλα τα υπόλοιπα ατμοσφαιρικά στρώματα και περιλαμβάνει περίπου το 80% των αερίων της ατμόσφαιρας και σχεδόν όλους τους υδρατμούς (2). Ορισμένα αέρια της τροπόσφαιρας λειτουργούν σαν «θερμοκήπιο» εγκλωβίζοντας ένα μέρος της θερμότητας κοντά στη γήινη επιφάνεια. Έτσι η θερμοκρασία της Γης φτάνει κατά μέσο όρο στους +15°C. Καθώς ανεβαίνουμε σε μεγαλύτερα ύψη ο αέρας γίνεται όλο και πιο αραιός. Μόνο στα κατώτερα στρώματα της τροπόσφαιρας υπάρχει αρκετός αέρας ώστε να μπορούμε να αναπνέουμε. Η θερμοκρασία του αέρα μειώνεται όσο ανεβαίνουμε ψηλότερα και φτάνει στους -80°C στο άνω όριο της τροπόσφαιρας που ονομάζεται τροπόπαυση (3).

Η **στρατόσφαιρα** είναι το ατμοσφαιρικό στρώμα πάνω από την τροπόσφαιρα. Εκτείνεται σε ύψος από 16 μέχρι 50 περίπου km και περιέχει σχεδόν ολόκληρο τον υπολειπόμενο αέρα. Είναι θερμότερη από την ανώτερη τροπόσφαιρα κι αυτός ο ζεστός αέρας λειτουργεί σαν “καπάκι” που παγιδεύει τους υδρατμούς στην τροπόσφαιρα. Η θερμοκρασία στα χαμηλότερα επίπεδα της στρατόσφαιρας είναι γύρω στους -60°C και αυξάνεται με το ύψος μέχρι τους 0°C. Η θερμοκρασία της κυμαίνεται από τους -

80°C μέχρι τους -3°C στο ανώτερο όριο της που είναι η στρατόπαυση. Η αύξηση της θερμοκρασίας μέσα στη στρατόσφαιρα οφείλεται στην απορρόφηση ενός μεγάλου τμήματος της υπεριώδους ακτινοβολίας του Ηλίου από το όζον (O_3), η παρουσία του οποίου αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα της στρατόσφαιρας. Χωρίς το στρώμα του όζοντος η ζωή στη γη θα ήταν αδύνατη (4).

Η **μεσόσφαιρα** εκτείνεται σε ύψος από 50 έως 85 km από την γήινη επιφάνεια. Είναι αρκετά ψυχρή με θερμοκρασίες συχνά χαμηλότερες από τους $-100°C$. Στην μεσόσφαιρα εμφανίζονται τα μετέωρα, που είναι συνήθως θραύσματα διαστημικών πετρωμάτων τα οποία καίγονται κατά την είσοδό τους στην ατμόσφαιρα της γης (5). Στο τελευταίο μέρος της μεσόσφαιρας βρίσκεται η μεσόπαυση που είναι η πιο ψυχρή περιοχή της γήινης ατμόσφαιρας καθότι δεν υπάρχει το όζον (1).

Η **θερμόσφαιρα** είναι το θερμότερο στρώμα της ατμόσφαιρας, καθώς τα λιγοστά μόρια αέρα που περιέχει απορροφούν απευθείας την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία. Στην θερμόσφαιρα ανήκει και η ιονόσφαιρα, ένα στρώμα φορτισμένων σωματιδίων που αντανακλά τα ραδιοκύματα. Εκτείνεται από τα 85 μέχρι τα 110 Km. Το ανώτερο μέρος της ονομάζεται θερμόπαυση. Η θερμοκρασία στη θερμόσφαιρα αρχίζει από -92 °C και φθάνει μέχρι μερικές χιλιάδες (6).



Σχήμα 1-1: Η κατακόρυφη δομή της ατμόσφαιρας. Πηγή: [University of Waikato]

Το όριο ανάμεσα στη γήινη και την ηλιακή ατμόσφαιρα δεν είναι ορισμένο με ακρίβεια. Το εξωτερικό σύνορο της ατμόσφαιρας αντιστοιχεί στην απόσταση στην οποία τα μόρια των ατμοσφαιρικών αερίων δεν υπόκεινται πλέον στην έλξη της γης και την επίδραση του μαγνητικού της πεδίου. Οι συνθήκες αυτές ισχύουν σε ένα υψόμετρο που ποικίλει ανάλογα με το γεωγραφικό μήκος. Επίσης, η πυκνότητα της ατμόσφαιρας, παρουσιάζει σημαντικές αυξομειώσεις. Εξάλλου η ατμόσφαιρα όπως και το νερό των θαλασσών υπόκειται στην επίδραση της τροχιάς του συστήματος Γη-Σελήνη και τις παρεμβολές της βαρύτητας της Σελήνης και του ήλιου.

1.3 ΤΟ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ

Στη μετεωρολογία το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (ΑΟΣ) το οποίο διεθνώς αναφέρεται ως Atmospheric Boundary Layer ή Planetary Boundary layer, είναι το κατώτερο τμήμα της ατμόσφαιρας που επηρεάζεται ευθέως από την παρουσία του εδάφους μέσω της τυρβώδους ροής θερμότητας με χρονική κλίμακα μικρότερη της μίας ώρας (Stull, 1988). Εκτείνεται συνήθως από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι τα 1000 m περίπου. Το πάχος του επηρεάζεται από την κατακόρυφη κίνηση των αερίων μαζών μέσα σε αυτό. Έτσι παράγοντες όπως η ακτινοβολία της επιφάνειας της γης, η μορφολογία του εδάφους και οι μετεωρολογικές συνθήκες επηρεάζουν έντονα τη δυνατότητα κατακόρυφων κινήσεων. Επίσης η ανομοιομορφία της επιφάνειας της γης προκαλεί στροβιλισμούς στις αέριες μάζες που έρχονται σε επαφή με αυτή. Αντίθετα, στις περιοχές πάνω από ωκεανούς το πάχος του ΑΟΣ παρουσιάζει μικρές σχετικά μεταβολές αφού η επιφάνεια τους δεν παρουσιάζει ανομοιομορφίες και η θερμοκρασία τους έχει μικρές μεταβολές λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητας της θάλασσας (1).

Μέσα σε αυτό παρατηρείται συνεχώς ανάμιξη και γρήγορη ανταπόκριση στις αλλαγές που συμβαίνουν στην επιφάνεια του εδάφους συναρτήσει του χώρου ή του χρόνου. Η επίδραση των διαφόρων παραμέτρων, όπως η επιφανειακή τριβή ή η θέρμανση, μεταφέρεται ταχύτατα και σχεδόν ομοιόμορφα σε όλο το ΑΟΣ μέσω του μηχανισμού της τυρβώδους μεταφοράς ή ανάμιξης (7).

Οι μηχανισμοί για τη δημιουργία τυρβώδους κατάστασης επηρεάζονται από την επιφάνεια του εδάφους και συνοψίζονται ως εξής:

- **Μηχανική ανάμιξη**. Αυτή δημιουργείται κατά την κίνηση του αέρα πάνω από επιφάνειες με κάποια τραχύτητα λόγω της δυναμικής αστάθειας των μεγάλων βαθμίδων ταχύτητας του ανέμου στο χαμηλότερο στρώμα.
- **Ανάμιξη οφειλόμενη σε ανωστικές δυνάμεις**, είτε λόγω της διαφοράς πυκνότητας (buoyancy) των διαφόρων αερίων στρωμάτων, είτε λόγω της θέρμανσης του εδάφους και των υπερκείμενων αερίων στρωμάτων κατά τη διάρκεια της ημέρας, ή ακόμα και λόγω της ύπαρξης περισσοτέρων υδρατμών στα χαμηλότερα στρώματα του αέρα απ΄ ότι στα ανώτερα, όπως συμβαίνει πάνω από υδάτινες επιφάνειες (λίμνες- ωκεανούς)

1.3.1 Περιοχές του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος

Το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα πάνω από την ξηρά αποτελείται από τέσσερα μέρη:

1. **Το στρώμα επιφάνειας** (surface layer) είναι το κατώτερο στρώμα του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος που συνήθως κυμαίνεται γύρω στο 10% του συνολικού ύψους του ΑΟΣ. Ανάλογα με τη μεταβολή του ύψους του οριακού στρώματος, το επιφανειακό στρώμα έχει ύψος από 50-100 m. Ορισμένα από τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα αυτού του στρώματος μέσα στο οποίο ζουν και κινούνται οι άνθρωποι είναι (7):

    - παρατηρούνται οι περισσότερες εκπομπές αερίων ρύπων,
    - Αποτελεί το στρώμα για το οποίο υπάρχουν οι περισσότερες πληροφορίες (αφού είναι δυνατόν να γίνουν μετρήσεις μέσα σε αυτό).

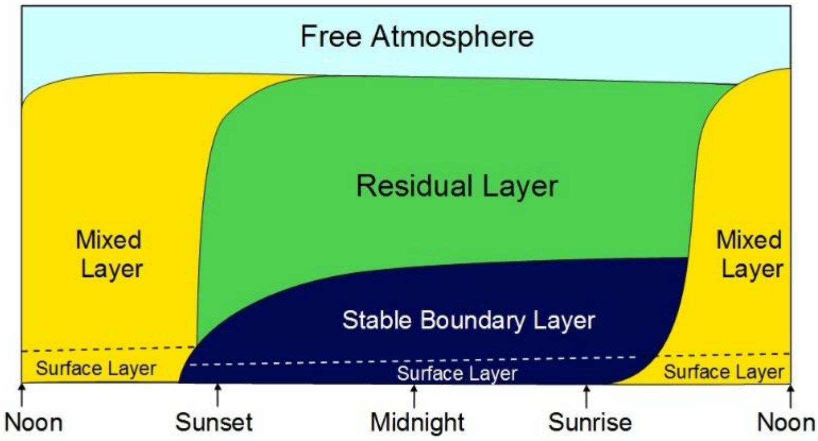
2. **Το στρώμα ανάμιξης**, το οποίο σε πολλές περιπτώσεις θεωρείται ότι ταυτίζεται με το ΑΟΣ. Στην αρχαία ελληνική γλώσσα τύρβη σημαίνει σύγχυση, ταραχή, θόρυβος, οχλαγωγία. Στη λατινική εκφράστηκε ως «turbulentia», με δανεισμό από την Ελληνική, απ’ όπου προήλθε και η λέξη «turbulence». Το ύψος του (mixing layer) ξεκινά από την επιφάνεια της γης και φθάνει μέχρι το ύψος όπου αναμιγνύονται οι αέριοι ρύποι από τις ατμοσφαιρικές αναταράξεις. Ο υπολογισμός του ύψους ανάμιξης μπορεί να γίνει με πολλούς άμεσους ή έμμεσους τρόπους. Επιτόπιος, άμεσος προσδιορισμός μπορεί να γίνει μέσω της μέτρησης των διαταραχών του ανέμου χρησιμοποιώντας κατάλληλα όργανα. Από τον ορισμό του ύψους ανάμιξης προκύπτει ότι το ύψος του φτάνει μέχρι το ύψος στο οποίο τα όργανα θα δείχνουν πολύ μικρή ή καθόλου ανατάραξη. Αυτή η μέθοδος, αν και πολύ ακριβής, δεν είναι πρακτικά εφικτή παρά μόνο κατά την διάρκεια ερευνητικών πειραμάτων. Η παρακολούθηση όμως της αέριας ρύπανσης σε μια περιοχή απαιτεί γνώση του ύψους ανάμιξης σε συνεχή βάση και είναι απαραίτητο να εφαρμοσθούν εναλλακτικές μέθοδοι υπολογισμού του (8).

3. **Το αποκομμένο στρώμα** (Residual Layer). Σχεδόν μισή ώρα πριν τη δύση του ηλίου τα θερμά ανοδικά ρεύματα αέρα (με τη μορφή φυσαλίδων) παύουν να δημιουργούνται (με απουσία κρύου αέρα κατά τη μεταφορά), επιτρέποντας στην τύρβη να παρακμάσει στο διαμορφωμένο και καλά αναμιγμένο στρώμα. Το στρώμα αέρα που προκύπτει καλείται πολλές φορές στρώμα αποκοπής, επειδή οι μεταβολές της συγκέντρωσης των ρύπων με το ύψος είναι οι ίδιες με αυτές του προσφάτως σε κατάπτωση στρώματος ανάμιξης. Για παράδειγμα κατά την απουσία μεταφοράς, παθητικοί ιχνηθέτες διαχέονται κατά τη διάρκεια της ημέρας στο στρώμα ανάμιξης ενώ παραμένουν επάνω στο αποκομμένο στρώμα κατά τη διάρκεια της νύχτας. Το αποκομμένο στρώμα

είναι ουδέτερα στρωματοποιημένο και αυτό έχει ως αποτέλεσμα η τύρβη να είναι σχεδόν ίδιας έντασης σε όλες τις διευθύνσεις. Ως επακόλουθο, οι θύσανοι που εκπέμπονται στο αποκομμένο στρώμα τείνουν να διαλυθούν με ίδιους ρυθμούς στο κατακόρυφο και σε πλευρικές διευθύνσεις, δημιουργώντας ένα θύσανο σε σχήμα κώνου.

4. **Το σταθερό οριακό στρώμα** (stable boundary layer). Αυτό το στρώμα δημιουργείται κατά τη διάρκεια της νύχτας, όταν παύει η θέρμανση του εδάφους και αυτό γίνεται ψυχρότερο από τον αέρα που το περιβάλλει. Μπορεί επίσης α δημιουργηθεί από την οριζόντια μεταφορά θερμότερων αερίων μαζών πάνω από το ψυχρότερο έδαφος. Λόγω της συνεχούς ψύξης της γήινης επιφάνειας το ύψος του μεταβάλλεται συνεχώς κατά τη διάρκεια της νύχτας και παίρνει τη μέγιστη τιμή του τις πρώτες πρωινές ώρες. Το ύψος του επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως η ψύξη της επιφάνειας της γης λόγω ακτινοβολίας, η κατάπτωση και η οριζόντια μεταφορά, η μορφολογία του εδάφους και οι αναταρακτικές κινήσεις, κλπ. Μέσα στην περιοχή του σταθερού οριακού στρώματος εμφανίζονται συχνά και θερμοκρασιακές αναστροφές όπου η θερμοκρασία αυξάνεται με το ύψος (1).

Την ημέρα παρατηρείται μεγαλύτερο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα από ότι τη νύχτα, καθώς την ημέρα το έδαφος δέχεται ενέργεια από τον Ήλιο και θερμαίνεται ούτως ώστε να δημιουργείται μια μεγάλη ανερχόμενη φυσαλίδα αέρα. Με αυτό τον τρόπο διατηρούνται οι τυρβώδεις στρόβιλοι. Η ενέργεια αυτή πριν τη δύση του Ήλιου αρχίζει να ελαττώνεται με αποτέλεσμα να μην μπορεί να συντηρήσει τους στροβίλους. Την ώρα αυτή όλο το κραταιό οικοδόμημα καταρρέει μέσα σε 15-20 λεπτά από πάνω προς τα κάτω (7).



Σχήμα 1-2: Ο δομή του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος (40)

1.4 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗ ΑΝΑΣΤΡΟΦΗ

Θερμοκρασιακή αναστροφή ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο η θερμοκρασία του αέρα αυξάνεται τοπικά με το ύψος αντί να μειώνεται, όπως κανονικά συμβαίνει. Η θερμοκρασιακή αναστροφή παίζει σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια ατμοσφαίρας καθώς και στη μεταφορά και διασπορά των ρύπων της.

Μέσα στην τροπόσφαιρα η αναμενόμενη θερμοβαθμίδα (μεταβολή της θερμοκρασίας ως προς το ύψος) είναι αρνητική και άρα η θερμοκρασία μειώνεται με το ύψος. Ο ρυθμός μείωσης ποικίλει αλλά μια μέση τιμή είναι περίπου $10K/km$.

Σχήμα 1-2: Ανερχόμενος καπνός στο Lochcarron της Σκωτίας, σταματάει από ένα στρώμα θερμότερου αέρα (πηγή: S/V Moonrise)

Οι θερμότερες μάζες αέρα έχοντας μικρότερη πυκνότητα, έχουν την τάση να κινούνται προς μεγαλύτερα υψόμετρα, μέχρι να συναντήσουν αέριες μάζες με περίπου ίδια χαρακτηριστικά θερμοκρασίας και πυκνότητας. Οι θερμές αυτές μάζες κινούνται προς τα υψηλότερα στρώματα όπου και ψύχονται, ενώ αντικαθίστανται από άλλες αέριες μάζες στην επιφάνεια του εδάφους, ώστε να εξασφαλίζεται η «φυσική κυκλοφορία» του αέρα από τα χαμηλά υψόμετρα προς τα μεγαλύτερα. Έτσι, η μείωση της θερμοκρασίας με το υψόμετρο βοηθάει στην καλύτερη ανάμιξη του αέρα και επομένως στη διασπορά και απομάκρυνση των ρύπων από τα χαμηλά στρώματα. Όταν όμως στα χαμηλά υπάρχουν αέριες μάζες ψυχρότερες από αυτές που βρίσκονται υψηλότερα, τότε οι ψυχρότερες όντας «βαρύτερες» παραμένουν ακίνητες. Έτσι, σε περίπτωση που έχουμε κοντά στο έδαφος ψυχρότερο αέρα από ό,τι σε ψηλότερα στρώματα, δεν έχουμε κίνηση των αερίων μαζών και οδηγούμαστε σε μια σταθεροποιημένη κατάσταση. Αυτό είναι μια απόκλιση από την κανονική κατάσταση που καλείται θερμοκρασιακή ή θερμική αναστροφή. Πάνω από το στρώμα της αναστροφής ο αέρας ψύχεται κανονικά αυξανομένου του υψομέτρου (1).

1.4.1 Τύποι αναστροφής

Θερμοκρασιακή αναστροφή μπορεί να υπάρξει με διάφορους τρόπους. Ο πρώτος μπορεί να συμβεί σε μία καθαρή νύχτα όταν το έδαφος ακτινοβολεί θερμότητα με υψηλό ρυθμό. Σε περίπτωση που ο αέρας είναι καθαρός, τότε μπορεί ο αέρας κοντά στο έδαφος να είναι ψυχρότερος απ' ότι σε υψηλότερα στρώματα. Ένας άλλος τύπος αναστροφής προκαλείται μέσω μιας οριζόντιας εισροής ψυχρού αέρα, όπως για παράδειγμα η θαλασσινή αύρα σε μια παράκτια περιοχή. Τέλος, ένας τρίτος τύπος αναστροφής λαμβάνει χώρα τη νύχτα σε κοιλάδες, όταν κρύος αέρας ρέει από τις πλαγιές προς τον πυθμένα της κοιλάδας λόγω βαρύτητας. Ο αέρας εκεί είναι ψυχρότερος από ότι υψηλότερα. Γενικότερα, ανάλογα με τις συνθήκες μπορεί να υπάρξουν και άλλοι τύποι αναστροφής (9).

1.4.2 Θερμοκρασιακή αναστροφή και ατμοσφαιρική ρύπανση

Η θερμοκρασιακή αναστροφή έχει ιδιαίτερη σημασία στην ημερήσια εξέλιξη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης πάνω από πόλεις. Για παράδειγμα, η Καλιφόρνια (όπως και η Αττική), και πιο συγκεκριμένα η περιοχή του Los Angeles σχηματίζει μια λεκάνη. Αυτή η λεκάνη περικλείεται από τα Βραχώδη Όρη στα ανατολικά, ενώ στα δυτικά βρέχεται από τον Ειρηνικό Ωκεανό. Αυτή η γεωμορφολογία ευνοεί πολύ το σχηματισμό θερμοκρασιακών αναστροφών οι οποίες εγκλωβίζουν τους παραγόμενους αέριους ρύπους.

Σχήμα 1-3: Σανγκάη, Κίνα 1993. Ο καπνός από τους ατμοσφαιρικούς ρύπους της πόλης εγκλωβίζεται στα χαμηλότερα στρώματα της τροπόσφαιρας (πηγή: German Wikipedia)

Επεξηγηματικά, η Καλιφόρνια βρίσκεται στην υποτροπική περιοχή υψηλών πιέσεων του Ειρηνικού Ωκεανού που δεν επηρεάζεται από τοπικούς παράγοντες. Λόγω της υψηλής ατμοσφαιρικής πίεσης, ο αέρας της περιοχής κατέρχεται από υψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας με το μηχανισμό των ανέμων πλαγιάς. Κατά την κάθοδο αυτή θερμαίνεται εξαιτίας της πίεσης των άλλων στρωμάτων. Παράλληλα, η αύρα που προέρχεται από τον Ειρηνικό δημιουργεί μια ψυχρή ροή (και ένα ψυχρό στρώμα αέρα) κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Επίσης, η ύπαρξη των ορεινών όγκων στην ενδοχώρα «παγιδεύει» αυτό το κρύο στρώμα στη λεκάνη του Los Angeles στην οριζόντια διεύθυνση όπως η θερμοκρασιακή αναστροφή στην κατακόρυφη. Έτσι, μέσα στο κρύο αυτό στρώμα παγιδεύονται και οι ρύποι στην περιοχή. Παράλληλα, οι διαρκώς εκπεμπόμενοι ρύποι επιτείνουν συνεχώς το πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην περιοχή. Το πρόβλημα υποχωρεί μόνον όταν οι ατμοσφαιρικές συνθήκες επανέρχονται στην κανονική θερμοβαθμίδα (10).

1.5 ΕΙΔΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Η ευστάθεια της ατμόσφαιρας αποτελεί μια πολύ σημαντική παράμετρο, η οποία χαρακτηρίζει τα πεδία ροής των ρευστών. Με τον όρο ευστάθεια ατμόσφαιρας νοούνται οι συνθήκες εκείνες κατά τις οποίες δεν παρατηρούνται φαινόμενα διέγερσης της κανονικής τιμής τόσο της βαροβαθμίδας, όσο και της θερμοβαθμίδας, δηλαδή δεν παρατηρούνται μεταφορές αερίων μαζών και ως εκ τούτου ο καιρός υπόκειται σε υψηλό βαθμό μεταβλητότητας μέσω της απόστασης και του χρόνου. Η ατμοσφαιρική ευστάθεια είναι το μέτρο της τάσης της ατμόσφαιρας για την ενθάρρυνση ή την αποθάρρυνση κατακόρυφων κινήσεων, οι οποίες συσχετίζονται άμεσα με πολλούς τύπους καιρικών συστημάτων και με τη σοβαρότητά τους.

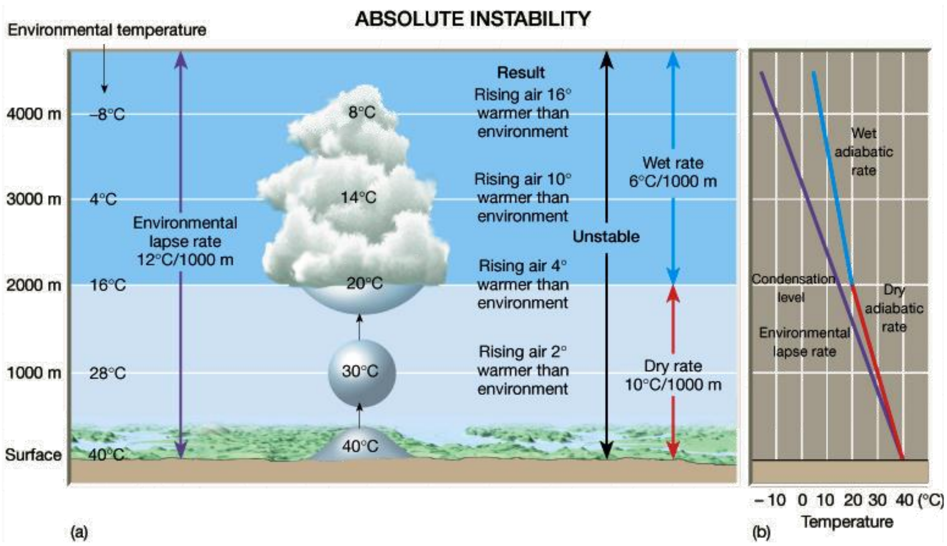
Σε ασταθείς συνθήκες, μια ανυψωμένη μάζα αέρα θα είναι θερμότερη από τον περιβάλλοντα αέρα σε μεγάλο υψόμετρο. Επειδή θα είναι πιο ζεστή, θα είναι λιγότερο πυκνή και επομένως, επιρρεπής σε περαιτέρω άνοδο. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία αναπτύξεων νεφών, τα οποία μπορεί να καταλήξουν τελικά ως καταιγιδοφόρα νέφη, ανάλογα με το μέτρο της ατμοσφαιρικής αστάθειας. Υπάρχουν πολλοί παράγοντες οι οποίοι τείνουν να σταθεροποιήσουν ή να αποσταθεροποιήσουν τις ροές. Εάν η καθαρή επίδραση των παραγόντων που αποσταθεροποιούν τη ροή υπερβαίνει την επίδραση αυτών που τη σταθεροποιούν, τότε η ροή γίνεται τυρβώδης.

Η ευστάθεια διακρίνεται σε στατική (static stability) και δυναμική (dynamic stability). Η στατική ευστάθεια εξετάζει τις ανωστικές τάσεις που αναπτύσσονται στη ροή για την επαναφορά στην κατάσταση ισορροπίας της μετά από μια μετατόπιση ή μεταβολή. Εάν πράγματι υπάρχει τάση επαναφοράς, η ροή χαρακτηρίζεται στατικώς ευσταθής. Εάν υπάρχει τάση αύξησης της μετατόπισης ή μεταβολής της κατάστασης, τότε χαρακτηρίζεται στατικώς ασταθής. Εάν παραμείνει χωρίς αντίδραση στη θέση που βρέθηκε μετά τη διατάραξη της ισορροπίας της ονομάζεται στατικώς ουδέτερη ή αδιάφορη. Ο αέρας είναι στατικά ασταθής όταν ελαφρώς πυκνός αέρας (θερμότερος και/ή υγρότερος) βρίσκεται κάτω από πυκνότερο. Η ροή ανταποκρίνεται σε αυτή την αστάθεια προκαλώντας ανοδικές κινήσεις (thermals) οι οποίες επιτρέπουν στον αραιότερο αέρα να φθάσει στην κορυφή του στρώματος αστάθειας συντελώντας στην ευστάθεια της ροής. Τα ανοδικά ρεύματα χρειάζονται κάποιον μηχανισμό «σκανδάλης» για να ξεκινήσουν. Στο ΑΟΣ το ρόλο αυτό παίζουν οι λόφοι, τα κτίρια, τα δέντρα ή άλλες διαταραχές της μέσης ροής. Η στατική ευστάθεια καθορίζεται από την τοπική θερμοβαθμίδα (11).

Μια αδιαβατική θερμοβαθμίδα μπορεί να είναι στατικά ευσταθής, ουδέτερη ή ασταθής εξαρτώμενη από τις ανοδικές τάσεις και τις ανωστικές δυνάμεις. Η ουδέτερη ευστάθεια 6 χαρακτηρίζεται από αδιαβατική θερμοβαθμίδα και χωρίς ανοδικές κινήσεις. Επομένως, για τον ορισμό της στατικής ευστάθειας δεν είναι αρκετή μόνο η γνώση της τοπικής θερμοβαθμίδας. Απαιτείται είτε η γνώση όλης της κατατομής της μέσης δυνητικής θερμοκρασίας ή η μέτρηση του θερμικού όρου της κινητικής ενέργειας.

Η δυναμική ευστάθεια εξετάζει τις κινήσεις που κάνει το ρεύμα μετά από κάποια διατάραξη της ισορροπίας προκειμένου να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση, ή να αυξήσει προοδευτικά τη μετατόπισή του, ή να την διατηρήσει αμετάβλητη με ταλαντώσεις σταθερού εύρους. Μια ροή χαρακτηρίζεται δυναμικά ευσταθής εάν οι διαταραχές που εισάγονται στη ροή επιβραδύνονται με το χρόνο ή μέσα στο χώρο που σταδιακά αποσβένονται. Αντίστοιχα η ροή είναι δυναμικά ασταθής, εάν οι διαταραχές μεγαλώνουν στο χώρο και αλλάζουν τη φύση της ροής (11).

Και στις δύο κατηγορίες αστάθειας το ρευστό αντιδρά με τέτοιο τρόπο ώστε να καταστρέφει την αιτία της αστάθειας. Στην περίπτωση της στατικής ευστάθειας οι ανοδικές κινήσεις μεταφέρουν μικρότερης πυκνότητας ρευστό προς τα πάνω. Στη δυναμική αστάθεια η τύρβη τείνει να ελαττώσει τη βαθμίδα του ανέμου και έτσι σταθεροποιεί το σύστημα. Παρ' όλα αυτά υπάρχουν εξωτερικές επιδράσεις που τείνουν να αποσταθεροποιήσουν το ΑΟΣ για μεγάλες χρονικές περιόδους. Στη μετεωρολογία η αστάθεια μπορεί να περιγραφεί με διάφορους δείκτες όπως ο αριθμός Richardson, ο Lifted Index, ο K-index, ο CAPE και ο Showalter index. Οι δείκτες αυτοί καθώς και η ατμοσφαιρική αστάθεια η ίδια, συνεπάγονται μεταβολές της θερμοκρασίας μέσα στην τροπόσφαιρα σύμφωνα με το ύψος (7).



Σχήμα 1-4: Συνθήκες ατμοσφαιρικής αστάθειας (πηγή: Πανεπιστήμιο Ιλινόι)

Στην περίπτωση της στατικής ευστάθειας, η εξωτερική επίδραση είναι η θέρμανση του εδάφους από τον ήλιο. Στη δυναμική αστάθεια, οι βαθμίδες της πίεσης που εμφανίζονται με συνοπτικής κλίμακας φαινόμενα οδηγούν τους ανέμους ενάντια στην τάση απορρόφησης της τύρβης. Ο αριθμός Richardson, για τον οποίο γίνεται λόγος στην επόμενη παράγραφο, χαρακτηρίζει πότε η ροή μπορεί να θεωρηθεί δυναμικά ασταθής. Οι επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής αστάθειας σε υγρές ατμόσφαιρες περιλαμβάνουν την ανάπτυξη καταιγίδας, η οποία πάνω από θερμούς ωκεανούς μπορεί να οδηγήσει σε τροπική κυκλογένεση και ταραχή. Σε ξηρές ατμόσφαιρες μπορεί να οδηγήσει σε κατώτερους αντικατοπτρισμούς, διαβόλους της σκόνης, διαβόλους ατμού, και στροβίλους φωτιάς. Σταθερές ατμόσφαιρες μπορεί να συνδέονται με ψιλόβροχο, ομίχλη, αυξημένη ατμοσφαιρική ρύπανση και έλλειψη αναταραχής (7).

2 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΙ ΡΥΠΟΙ

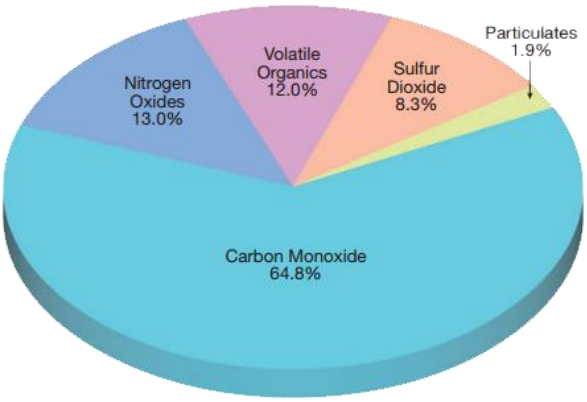
2.1 ΠΗΓΕΣ ΚΑΙ ΕΙΔΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ

Οι ατμοσφαιρικοί ρυπαντές αποτελούνται από σωματίδια και αέρια που μεταφέρονται με τον αέρα, τα οποία θέτουν σε κίνδυνο την υγεία έμβιων οργανισμών και προκαλούν δυσλειτουργίες στο περιβάλλον. Οι ρυπαντές μπορούν να χωριστούν σε δύο σημαντικές κατηγορίες: τους άμεσους και τους έμμεσους. Το χαρακτηριστικό των άμεσων ρυπαντών σε σύγκριση με τους έμμεσους, είναι ότι εκπέμπονται και προκαλούν ατμοσφαιρική ρύπανση με άμεσο τρόπο μόλις δημιουργηθούν. Αντίθετα, οι έμμεσοι ρυπαντές δημιουργούνται στην ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια χημικών αντιδράσεων άμεσων ρυπαντών. Ένα γνωστό παράδειγμα είναι τα χημικά στοιχεία που δημιουργούν καπνό. Μάλιστα, υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι επιπτώσεις των κύριων ρυπαντών στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον είναι λιγότερο επιβλαβείς σε σύγκριση με τις επιπτώσεις των έμμεσων ρυπαντών που δημιουργούν (12).

Η ανθρωπογενής ατμοσφαιρική ρύπανση προκαλείται κυρίως από τρεις ανθρώπινες δραστηριότητες, τη βιομηχανία, τις μεταφορές και τα νοικοκυριά. Σε μια τυπική πόλη η βιομηχανία ευθύνεται για το 50% της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, τα μέσα μεταφοράς για το 35% ενώ τα νοικοκυριά για το 15%. Η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι πιθανό να φτάσει σε επίπεδα που δημιουργούν ανεπιθύμητες συνθήκες διαβίωσης. Για την περιγραφή της κατάστασης αυτής έχει επικρατήσει ο όρος «νέφος».

2.1.1 Πρωτογενείς Ρυπαντές

Στην Εικόνα 1-1 μπορούμε να δούμε τους κυριότερους από τους άμεσους ρυπαντές σε ποσοστά (κατά βάρος). Για κάθε έναν από αυτούς οι πηγές ποικίλουν. Για παράδειγμα, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι μία από τις πιο σημαντικές πηγές διοξειδίου του θείου. Από την άλλη μεριά τα συμβατικά μεταφορικά μέσα είναι η πρώτη πηγή σε μονοξείδιο του άνθρακα και οξείδια του αζώτου, τα οποία βρίσκονται στην πρώτη θέση σε σύγκριση με τις υπόλοιπες πηγές ρύπων (12).



Σχήμα 2-1: Εκτιμήσεις εκπομπών άμεσων ρυπαντών στις Ηνωμένες Πολιτείες το έτος 2009. Τα ποσοστά έχουν υπολογιστεί με βάση το συνολικό βάρος, το οποίο για το έτος 2009 εκτιμάται ότι ήταν 107 εκατομμύρια τόνοι (τα δεδομένα είναι από την υπηρεσία περιβαλλοντικής προστασίας των Ηνωμένων πολιτειών) (12)

2.2 ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

Με τον όρο μικροσωματίδια ή αιωρούμενα σωματίδια αναφερόμαστε στο σύνολο των στερεών σωματιδίων και υγρών σταγονιδίων που μπορούν να εντοπιστούν στον αέρα. Ορισμένα από αυτά είναι μεγάλα και σκοτεινά ώστε να διακρίνονται ως καπνός ή ομίχλη. Κάποια άλλα είναι αρκετά πιο μικρά, οπότε μπορούν να ανιχνευθούν μόνο με τη χρήση ηλεκτρονικών οργάνων.

Τα αιωρούμενα σωματίδια απαντώνται τόσο στην τροπόσφαιρα όσο και στη στρατόσφαιρα, οι πηγές και τα χαρακτηριστικά τους όμως είναι αρκετά διαφορετικά. Τα αιωρούμενα σωματίδια στην τροπόσφαιρα παρουσιάζουν μια μεγαλύτερη διακύμανση αναφορικά με τη χωρική και την χρονική τους κατανομή, αλλά και όσον αφορά τη χημική τους σύσταση. Αυτή η διακύμανση οφείλεται συνήθως στην αλληλεπίδραση των σωματιδίων με τον κύκλο του νερού. Αντίθετα οι πηγές των σωματιδίων στη στρατόσφαιρα είναι λιγότερες από αυτές στην τροπόσφαιρα. Επίσης τα στρατοσφαιρικά σωματίδια παρουσιάζουν μεγαλύτερο χρόνο παραμονής στη στρατόσφαιρα, σε αντίθεση με τα σωματίδια της τροπόσφαιρας που παρουσιάζουν μικρότερους χρόνους παραμονής σε αυτή.

Τα χαρακτηριστικά ενός συνόλου σωματιδίων είναι: ο αριθμός, η μάζα, η διάμετρος, η επιφάνεια και οι αεροδυναμικές - οπτικές ιδιότητες τους. Τα τέσσερα πρώτα από τα οποία συμπεριλαμβάνονται στον τύπο 2.1.

$$D_a = D_g \cdot K \cdot \sqrt{\frac{\rho_\rho}{\rho_0}} \qquad (2.1)$$

Όπου D_a είναι η αεροδυναμική διάμετρος, D_g η γεωμετρική διάμετρος, K ο συντελεστής σχήματος (για τη σφαίρα παίρνει τη τιμή 1), ρ_ρ η πυκνότητα του σωματιδίου και ρ_0 κάποια πυκνότητα αναφοράς (συνήθως ως πυκνότητα αναφοράς χρησιμοποιούμε αυτή του νερού - $10^3 Kg\ /m^3$) (4).

Μια βασική κατηγοριοποίηση των μικροσωματιδίων αυτών γίνεται με βάση το μέγεθός τους.

- Σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη από $2.5\mu m$ ονομάζονται χονδρά (coarse). Προέρχονται κυρίως από μηχανικές διεργασίες και λόγω μεγέθους καθιζάνουν ή ξεπλένονται από τη βροχή, ενώ η χημική τους σύσταση αντανακλά την πηγή προέλευσής τους.

- Τα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από $2.5\mu m$ αποκαλούνται λεπτά (fine). Στη συνέχεια αυτά διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τα σωματίδια συσσωματώματα με διάμετρο από $0.1\mu m$ έως $2\mu m$ και τους πυρήνες συμπύκνωσης, γνωστά και ως σωματίδια Aitken με διάμετρο μικρότερη από $0.1\mu m$.

2.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Οι μηχανισμοί με τους οποίους απομακρύνονται τα αιωρούμενα σωματίδια από την ατμόσφαιρα μπορούν να χωρισθούν σε τέσσερεις βασικές κατηγορίες: την υγρή εναπόθεση και τη ξηρή εναπόθεση, τη χημική καταστροφή εφόσον αυτά αντιδρούν χημικά και τέλος τη ραδιενεργό διάσπαση εάν αυτά είναι ραδιενεργά.

Η ξηρή εναπόθεση αναφέρεται στην άμεση μεταφορά αερίων και σωματιδίων στην επιφάνεια της γης χωρίς την επίδραση της βροχής. Αντίθετα, η υγρή εναπόθεση αναφέρεται σε όλες τις διεργασίες με τις οποίες οι αέριοι ρύποι έρχονται σε επαφή με την επιφάνειας της γης σε υγρή μορφή (ομίχλη, χιόνι, βροχή κλπ.). Αυτές οι διεργασίες είναι:

1) Η διάλυση σωματιδίων που μεταφέρονται με τον αέρα σε σταγονίδια νερού (ομίχλη ή σταγόνες βροχής),
2) Η απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων όταν αυτά εξυπηρετούν ως πυρήνες τη συγκέντρωση υγρασίας γύρω τους στο σχηματισμό νεφών.
3) Η απομάκρυνση όταν τα σωματίδια συσσωματώνονται πάνω σε σταγονίδια νεφών.

2.3.1 Ξηρή εναπόθεση

Όταν ο συγκεκριμένος ρύπος βρίσκεται στο ατμοσφαιρικό στρώμα, οι κατακόρυφες αναταράξεις της ατμόσφαιρας ή/ και ο κατακόρυφοι καθοδικοί άνεμοι βοηθούν στην μεταφορά του στο έδαφος όπου μέρος του επικάθεται σε αυτό. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ξηρά εναπόθεση. Τα σωματίδια παρουσιάζουν μεγαλύτερη ξηρά εναπόθεση απ’ ότι τα αέρια λόγω του βάρους του σωματιδίου ιδιαίτερα για τα μεγάλα σωματίδια. Σαν ξηρά εναπόθεση θεωρούμε λοιπόν την μεταφορά ενός ατμοσφαιρικού ρύπου (αερίου- σωματιδίου) στην επιφάνεια της γης (έδαφος, νερό, βλάστηση), όπου και συγκρατείται. Η ξηρά εναπόθεση περιλαμβάνει τρία στάδια-συνιστώσες.

Η πρώτη συνιστώσα περιλαμβάνει τη μεταφορά του ρύπου από το τυρβώδες επιφανειακό υπόστρωμα στο υπόστρωμα στρωτής ροής. Η μεταφορά αυτή εξαρτάται κύρια από την τυρβώδη διάχυση σε αυτή την περιοχή που καθορίζεται από την ταχύτητα του αέρα, την τραχύτητα του εδάφους και την ατμοσφαιρική ευστάθεια (αεροδυναμική συνιστώσα (aerodynamic component).

Η δεύτερη συνιστώσα περιλαμβάνει τη μεταφορά μέσω του υποστρώματος της στρωτής ροής προς την επιφάνεια εδάφους και καθορίζεται κύρια από την μοριακή διάχυση (επιφανειακή συνιστώσα - surface component). Παρ’ ότι το πάχος αυτού του υποστρώματος είναι πολύ μικρό (έως cm), η διάχυση εδώ παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο μέγεθος της ξηράς εναπόθεσης.

Η τρίτη συνιστώσα που αποτελεί και το τελικό στάδιο εναπόθεσης αφορά την τελική μεταφορά και συγκράτηση στην επιφάνεια του εδάφους (συνιστώσα μεταφοράς - transfer component). Οι φυσικοχημικές και οι ηλεκτροχημικές ιδιότητες του ρύπου (ιδιαίτερα του αερίου) και της γήινης επιφάνειας καθορίζουν τον τελευταίο αυτό μηχανισμό.

Για τα σωματίδια πάντα υπάρχει κάποια ξηρά εναπόθεση, αφού από τη στιγμή που φθάσουν στο έδαφος κατά κανόνα συγκρατούνται. Για τους αέριους ρύπους που δεν αντιδρούν με το έδαφος, όπως τα ευγενή αέρια δεν υπάρχει καθόλου ξηρά εναπόθεση. Για τα σωματίδια, ιδιαίτερα τα μεγάλα (ισοδύναμη διάμετρος 20mm και μεγαλύτερη), σημαντικό ρόλο παίζει η βαρύτητα. Ο συνήθης τρόπος μαθηματικής προσέγγισης της ξηράς εναπόθεσης είναι να ορίσουμε την ταχύτητα ξηράς εναπόθεσης (V_d) για το συγκεκριμένο ρύπο ως εξής:

$$V_d = {}^{F_{g,d}}\!/_{C_g} \tag{2.2}$$

όπου F_d είναι η ροή ξηράς εναπόθεσης του ρύπου στο έδαφος. C_g η συγκέντρωση του ρύπου κοντά στο έδαφος (συνήθως 1μm πάνω από την επιφάνεια του εδάφους). Η ταχύτητα V_d εκτιμάται εμπειρικά με βάση πειραματικές μετρήσεις. Είναι φανερό από τα παραπάνω, ότι η ταχύτητα ξηράς εναπόθεσης δεν είναι σταθερά, αλλά εξαρτάται εκτός από την φύση του ρύπου και από τις μετεωρολογικές συνθήκες και την μορφολογία του εδάφους (4).

2.3.2 Υγρή εναπόθεση

Στην πορεία του ο ρύπος μέσα στην ατμόσφαιρα μπορεί να συναντήσει σταγόνες νερού (ομίχλη, νέφη, βροχή) όπου μέρος του απορροφάται από τις σταγόνες. Όταν βρέξει οι σταγόνες της βροχής πέφτουν στο έδαφος συμπαρασύροντας και το ρύπο που έτσι απομακρύνεται από την ατμόσφαιρα. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται ‘υγρή εναπόθεση’.

Η ποσότητα της υγρής εναπόθεσης, εκτός από τον ίδιο τον ρύπο, εξαρτάται κυρίως και από:

- Τη συγκέντρωσή του
- Την κατάστασή του (σωματιδιακός ή αέριος)
- Το βαθμό υδατοδιαλυτότητας, εάν είναι αέριο
- Το μέγεθός του, εάν είναι σωματίδιο
- Την ένταση της βροχής

Ο ρυθμός δέσμευσης και στη συνέχεια απομάκρυνσης από τις σταγόνες της βροχής προσεγγίζεται μαθηματικά από τη σχέση :

$$\left(\frac{\partial C}{\partial t}\right)_w = -\Lambda C \tag{2.3}$$

όπου Λ είναι ο λεγόμενος συντελεστής απόπλυσης του ρύπου (washout coefficient). Η ροή της υγρής εναπόθεσης θα προέλθει από τη συνολική δέσμευση του ρύπου, από την κάθε σταγόνα που κινείται κατακόρυφα μέχρι να φθάσει στο έδαφος.

Αντίστοιχα με την ξηρή εναπόθεση, μπορούμε να ορίσουμε τη ταχύτητα υγρής εναπόθεσης ως:

$$V_w = \frac{F_{g,w}}{C_g} \quad (2.4)$$

Ο μηχανισμός υγρής εναπόθεσης συνήθως είναι πολύ πιο αποτελεσματικός από το μηχανισμό ξηράς εναπόθεσης. Με άλλα λόγια η ταχύτητα υγρής εναπόθεσης είναι συνήθως κατά πολύ μεγαλύτερη από την ξηρή εναπόθεση (4).

2.3.3 Χημική καταστροφή

Ένας αρκετά αποτελεσματικός τρόπος απομάκρυνσης για ορισμένους χημικά δραστικούς αέριους ρύπους είναι η καταστροφή τους μέσω χημικών αντιδράσεων. Με άλλα λόγια αυτοί οι ρύποι αντιδρούν με χημικές ουσίες που βρίσκονται στο δρόμο τους και καταστρέφονται δημιουργώντας άλλες ουσίες που μπορεί με τη σειρά τους να είναι και αυτές επιβλαβείς. Αυτοί οι ρύποι ονομάζονται δευτερογενείς σε αντίθεση με τους ρύπους που εκπέμπονται κατευθείαν στην ατμόσφαιρα και ονομάζονται πρωτογενείς ρύποι. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι στην ατμόσφαιρα συμβαίνουν αναρίθμητες χημικές αντιδράσεις ιδιαίτερα την ημέρα παρουσία ηλιοφάνειας. Στην περίπτωση αυτή μιλάμε για φωτοχημικές αντιδράσεις που στα αστικά κέντρα οδηγεί στο φωτοχημικό νέφος. Το κύριο χαρακτηριστικό του φωτοχημικού νέφους στις πόλεις είναι η παραγωγή όζοντος από τις πτητικές οργανικές ουσίες και το μονοξείδιο του άνθρακα παρουσία οξειδίων του αζώτου που εκλύονται στην ατμόσφαιρα κυρίως από τα αυτοκίνητα αλλά και από τη βιομηχανία και την κεντρική θέρμανση.

Οι φωτοχημικές αντιδράσεις είναι του τύπου:

$$A + h\nu \rightarrow C + D$$

Το πλήθος των αντιδράσεων εξαρτάται από την ποσότητα του συστατικού A και της ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με το ρυθμό καταστροφής του συστατικού A και αντίστοιχα της δημιουργίας των C και D που προκύπτει από τη σχέση:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = -\frac{\partial C_C}{\partial t} = -\frac{\partial C_D}{\partial t} = k \cdot C_A \quad (2.5)$$

Στην ατμόσφαιρα όμως λαμβάνει χώρα και μία σειρά άλλων αντιδράσεων που δεν εξαρτώνται από την ηλιακή ακτινοβολία. Τέτοιες αντιδράσεις είναι συνήθως της μορφής:

$$A + B \rightarrow C + D$$

Σε αυτή την περίπτωση ο ρυθμός καταστροφής για τα συστατικά A και B είναι:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = \frac{\partial C_B}{\partial t} = -\frac{\partial C_C}{\partial t} = -\frac{\partial C_D}{\partial t} = k \cdot C_A \cdot C_B \quad (2.6)$$

ενώ εδώ η σταθερά αντίδραση k δίνεται από την εξίσωση $Arrhenius$:

$$k = a \cdot \exp\left(-\frac{\beta}{T}\right) \quad (2.7)$$

Όπου T είναι η θερμοκρασία και β η σταθερά του Boltzmann.

2.3.4 Ραδιενεργός διάσπαση:

Εάν ο ρύπος είναι ραδιενεργός τότε καταστρέφεται βαθμιαίως μέσω της ραδιενεργού διάσπασής του. Η ταχύτητα διάσπασης καθορίζεται από τη σταθερά διάσπασης λ η οποία ορίζεται από την σχέση:

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda \cdot N(t) \quad (2.8)$$

$N(t)$ είναι ο αριθμός των ραδιενεργών πυρήνων στη μονάδα του όγκου τη χρονική στιγμή t. Η ραδιενεργός διάσπαση συνοδεύεται συνήθως από α ή β ακτινοβολία μαζί με γ ακτινοβολία και παράγει νέους πυρήνες που μπορεί να είναι ραδιενεργοί ή όχι. Με άλλα λόγια η καταστροφή ενός πυρήνα σημαίνει πηγή κάποιων άλλων και πηγή ραδιενεργών ακτινοβολιών επίσης.

2.4 Χρονοι ζωης

Οι ρύποι που εκλύονται στην ατμόσφαιρα θα χαθούν κάποια στιγμή κυρίως από υγρή ή ξηρά εναπόθεση ή χημική ή ραδιενεργή καταστροφή. Άρα, από τη στιγμή που θα εκλυθούν στην ατμόσφαιρα έχουν ένα πεπερασμένο χρόνο παραμονής σε αυτήν. Ορίζουμε σαν χρόνο ζωής τ_i ενός συστατικού της ατμόσφαιρας την παράμετρο:

$$\tau = \frac{M}{F} \quad (2.8)$$

Όπου M η ποσότητα του συστατικού στην ατμόσφαιρα (kg) και F η ροή απομάκρυνσής του από αυτή (kg/s). Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι πιο βολικό να ορίζουμε το χρόνο ημιζωής (half-life time), $t_{1/2}$ που είναι ο χρόνος που απαιτείται για να μειωθεί η ποσότητα του συστατικού στο ήμισυ. Αυτό γίνεται συνήθως όταν ο ρυθμός μεταβολής της συγκέντρωσής του προκύπτει από τη σχέση:

$$\frac{dC}{dt} = -\lambda \cdot C \quad (2.9)$$

Όπου $\lambda = 1/\tau = \ln(2)/t_{1/2}$

2.5 ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΚΑΙ ΣΚΕΔΑΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Η ακτινοβολία εξασθενεί στον αέρα λόγω της απορρόφησης και της σκέδασής της από τα μόρια του αέρα, τους ατμοσφαιρικούς ρύπους, τα νέφη κ.α. Αν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα συγκρουστεί με ένα σωματίδιο, τότε θα διεγείρει τα ηλεκτρικά φορτία μέσα στο σωματίδιο σε μία υψηλότερη ενεργειακή κατάσταση. Τα διεγερμένα φορτία μπορούν είτε να αναδημιουργήσουν την ακτινοβολία (σκέδαση), είτε η ακτινοβολία να μετατραπεί εν μέρει σε κινητική ενέργεια και να προκαλέσει αύξηση της θερμοκρασίας (απορρόφηση). Η διαδικασία της σκέδασης μπορεί να χωριστεί σε ελαστική και μη ελαστική. Στην περίπτωση της ελαστικής σκέδασης η ακτινοβολία που θα προκύψει από την αποδιέγερση των ηλεκτρικών φορτίων θα είναι ίση με την ακτινοβολία που απορρόφησαν, ενώ αντίθετα στην περίπτωση της μη ελαστικής σκέδασης θα διαφέρουν. Η σκέδαση Raman αναφέρεται ότι είναι μια διαδικασία μη ελαστικής σκέδασης που μπορεί να εξηγηθεί μέσω της κβαντικής μηχανικής. Σε αυτή την παράγραφο θα αναφερθούμε μόνο στην περίπτωση της ελαστικής σκέδασης, επειδή η πλειοψηφία των ακτινοβολιών που σκεδάζονται στην ατμόσφαιρα παραμένουν ανεπηρέαστες.

Η διατομή εξασθένησης (extinction cross section) C_{ext} περιγράφει τη συνολική απώλεια ενέργειας μιας προσπίπτουσας ακτινοβολίας εξαιτίας της σκέδασης και της απορρόφησης.

$$C_{ext} = C_{sca} + C_{abs} \tag{2.10}$$

Διαιρώντας με την επιφάνεια εγκάρσιας διατομής του σωματιδίου A, παίρνουμε την αδιάστατη αποδοτικότητα εξασθένησης (extinction efficiency) ενός σωματιδίου:

$$Q_{ext} = \frac{C_{ext}}{A} \tag{2.11}$$

η οποία προκύπτει ως άθροισμα της απόδοσης απορρόφησης και σκέδασης

$$(Q_{ext} = Q_{sca} + Q_{abs}) \tag{2.12}$$

Η εξασθένηση μιας ακτινοβολίας μέσα σε ένα μέσο διάδοσης μπορεί να περιγραφεί από το νόμο των Beer-Lambert:

$$I_d = I_0 e^{-s \cdot \sigma_{ext}} \tag{2.13}$$

Όπου I_0και I_d είναι οι εντάσεις της εισερχόμενης και της μεταδοθείσας ακτινοβολίας, s είναι το μήκος που έχει διανύσει η ακτινοβολία μέσα στο μέσο και σ_{ext} είναι ο συντελεστής απορρόφησης (με μονάδες m^{-1}) ο οποίος προκύπτει από το άθροισμα των συντελεστών σκέδασης (σ_{scat}) και απορρόφησης (σ_{abs}), που προκύπτουν πειραματικά.

Όσον αφορά στην ατμόσφαιρα, η εξασθένηση μπορεί να χωριστεί στην εξασθένηση που προκαλείται λόγω των μορίων και σε αυτή που προκαλείται λόγω των αιωρού-

(2.14)

μενων σωματιδίων. Οι βασικοί παράμετροι που επηρεάζουν τη σκέδαση και την απορρόφηση της ακτινοβολίας λόγω των αιωρούμενων σωματιδίων είναι το μέγεθος και η μορφολογία τους, η εισερχόμενη ακτινοβολία, και ο μιγαδικός δείκτης διάθλασης των σωματιδίων ο οποίος ορίζεται ως:

$$m = n + ki$$

Το πραγματικό μέρος του δείκτη αναφέρεται στις μη απορροφητικές του ιδιότητες, ενώ το φανταστικό στις απορροφητικές. Το m ορίζεται από τις χημικές ιδιότητες του σωματιδίου. Για την παρούσα μελέτη τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να θεωρηθούν σφαιρικά και οι οπτικές τους ιδιότητες να προσδιοριστούν από τη θεωρία της σκέδασης Mie. Για να συσχετίσουμε το μέγεθος του σωματιδίου με την εισερχόμενη ακτινοβολία θα ορίσουμε τη παράμετρο x η οποία ορίζεται για σφαιρικά σωματίδια ως:

$$x = \frac{\pi D}{\lambda} \tag{2.15}$$

Όπου D είναι η διάμετρος του σωματιδίου και λ το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Αν $x \ll 1$, ώστε το σωματίδιο να είναι αρκετά μικρότερο από το μήκος κύματος, η σκέδαση μπορεί να προσδιοριστεί μέσα από τη θεωρία της σκέδασης Rayleigh. Αν το σωματίδιο είναι πολύ μεγαλύτερο από το μήκος κύματος ($x \gg 1$), τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί η γεωμετρική οπτική για την επίλυση του προβλήματος. Στην περίπτωση που τα δύο μεγέθη είναι συγκρίσιμα ($x \approx 1$), χρησιμοποιούμε τη θεωρία σκέδασης Mie (13).

2.5.1 Σκέδαση Rayleigh

Η θεωρία Rayleigh χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη σκέδαση ακτινοβολίας πάνω σε σφαιρικά σωματίδια τα οποία είναι πολύ μικρότερα από το μήκος κύματός της. Στο ορατό φάσμα αυτή η θεωρία χρησιμοποιείται για να περιγράψει τις ιδιότητες σκέδασης των μορίων του αέρα (η σκέδαση από το φως του ήλιου ονομάζεται σκέδαση Rayleigh). Η θεωρία υποθέτει ότι τα μόρια συμπεριφέρονται ως διεγερμένα δίπολα. Αν η ένταση μιας προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι I_0 και υποθέσουμε ότι δεν είναι πολωμένη, τότε η ένταση της σκεδάσιμης ακτινοβολίας μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$I_s = \frac{I_0}{\lambda^4}\frac{8\pi^4 a^2}{r^2}(1 + cos^2\theta) \quad \text{με} \quad a = \frac{3}{4\pi N}\frac{m^2-1}{m^2+1} \tag{2.16}$$

Όπου θ είναι η γωνία μεταξύ του παρατηρητή και της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, r η απόσταση μεταξύ του σωματιδίου και του παρατηρητή, λ το μήκος κύματος και a είναι η πόλωση, N ο αριθμός των σωματιδίων και m ο δείκτης διάθλασης. Όπως φαίνεται από τις παραπάνω εξισώσεις, η ένταση της σκεδάσιμης ακτινοβολίας είναι αντιστρόφως ανάλογη της τέταρτης δύναμης του μήκους κύματος, που σημαίνει ότι όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος τόσο πιο έντονη είναι η σκέδαση της ακτινοβολίας. Η εξάρτηση της παραπάνω εξίσωσης από τη γωνία μπορεί να γραφεί σε μια πιο συμπαγή μορφή, ορίζοντας την αδιάστατη εξίσωση φάσης σκέδασης $P(\theta)$ (την οποία κανονικοποιούμε στη μονάδα)

$$P(\theta) = \frac{3}{4}(1 + cos^2\theta)$$

Η εξίσωση αυτή μας δείχνει ότι το μη πολωμένο φως σκεδάζεται πολύ πιο έντονα σε γωνίες 0^o και 180^o απ' ότι υπό γωνία (13).

2.5.2 Σκέδαση Mie

Για τα σωματίδια που έχουν συγκρίσιμο μέγεθος με το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, η θεωρία που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της σκέδασης είναι η θεωρία Mie, η οποία διατυπώθηκε από τον Gustav Mie το 1908 και προκύπτει από την επίλυση των ηλεκτρομαγνητικών εξισώσεων του Maxwell. Η θεωρία γενικά ισχύει αυστηρά για σωματίδια με σφαιρικό σχήμα, αλλά παρ' όλα αυτά υπάρχουν αρκετές αριθμητικές προσεγγίσεις και για μη σφαιρικά.

Η βασική ιδέα της σκέδασης Mie είναι ότι η προσπίπτουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία προκαλεί πολλαπλούς πόλους δευτερευόντων κυμάτων τα οποία αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους. Μακροσκοπικά η απορρόφηση και η σκέδαση μπορούν να υπολογιστούν ως συνάρτηση της σκεδάζουσας γωνίας θ, του μιγαδικού συντελεστή του δείκτη m και της παραμέτρου μεγέθους x.

Οι μακροσκοπική λύση συνήθως εκφράζεται ως δύο συναρτήσεις σκέδασης που έχουν τη συμμετρική μορφή:

$$\begin{aligned} S_1(\theta) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(a_n \pi_n(\cos\theta) + b_n \tau_n(\cos\theta)\right) \\ S_2(\theta) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(a_n \tau_n(\cos\theta) + b_n \pi_n(\cos\theta)\right) \end{aligned} \qquad (2.18)$$

Όπου

$$\pi_n(\cos\theta) = \frac{P_n^1(cos\theta)}{sin\theta}, \tau_n(\cos\theta) = \frac{dP_n^1(cos\theta)}{d\theta} \qquad (2.19)$$

και τα οποία προκύπτουν από τα πολυώνυμα *Legendre* σε συσχέτιση με τη γωνία σκέδασης θ. α_n και b_n είναι οι συντελεστές Mie και εξαρτώνται από τα x και m. Μπορούν δε να υπολογιστούν με χρήση των συναρτήσεων $Ricatti - Bessel\ \psi_n$ και ζ_n.

$$a_n = \frac{\psi_n(mx)\psi_n'(x) - \psi_n(x)\psi_n'(mx)}{m\psi_n(mx)\zeta_n'(x) - \zeta_n(x)\psi_n'(mx)} \quad (2.20)$$

$$b_n = \frac{\psi_n(mx)\psi_n'(x) - m\psi_n(x)\psi_n'(mx)}{\psi_n(mx)\zeta_n'(x) - m\zeta_n(x)\psi_n'(mx)} \quad (2.21)$$

Η αποδοτικότητα σκέδασης και εξασθένησης μπορούν να υπολογιστούν ως:

$$Q_{sp} = \frac{2}{x^2}\sum_{n=1}^{\infty}(2n+1)(|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (2.22)$$

$$Q_{ep} = \frac{2}{x^2}\sum_{n=1}^{\infty}(2n+1)Re(a_n + b_n) \quad (2.23)$$

Ενώ η συνάρτηση φάσης

$$P(\theta) = \frac{1}{2}(|S_1(\theta)|^2 + |S_2(\theta)|^2) \quad (2.24)$$

2.6 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗ ΣΚΕΔΑΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Η κυριότερη παράμετρος για την επίδραση της σχετικής υγρασίας στη σκέδαση του φωτός λόγο αέριων ρύπων είναι ο συντελεστής ενίσχυσης σκέδασης

$$f(RH,\lambda) = \frac{\sigma_{sp}(RH,\lambda)}{\sigma_{sp}(RH_{dry},\lambda)} \quad (2.25)$$

Όπου $\sigma_{sp}(RH,\lambda)$ είναι η σταθερά σκέδασης για μια συγκεκριμένη τιμή της σχετικής υγρασίας και τους μήκους κύματος, ενώ $\sigma_{sp}(RH_{dry},\lambda)$ είναι η αντίστοιχη τιμή χωρίς υγρασία. Η παράμετρος $f(RH,\lambda)$ παρουσιάζει αύξηση όσο αυξάνεται η σχετική υγρασία και συχνά θα είναι μεγαλύτερη ή ίση με τη μονάδα. Έχουν υπάρξει αρκετές μελέτες με σκοπό τη μοντελοποίηση του $f(RH,\lambda)$. Γενικά οι αέριοι ρύποι που συναντάμε στη θάλασσα παρουσιάζουν αυξημένες τιμές της παραμέτρου. Σε αστικές περιοχές συναντάμε μέσες τιμές, ενώ τα σωματίδια που προκαλούνται από σκόνη ορυκτών πετρωμάτων ή την καύση βιομάζας χαρακτηρίζονται από χαμηλές τιμές (13).

Η επίδραση της υγρασίας στην ενίσχυση της σκέδασης μπορεί να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας της θεωρία της σκέδασης Mie (Mie, 1908). Στη δική μας περίπτωση θα θεωρήσουμε ότι τα σωματίδια είναι σφαιρικά και ομογενή.

Ο συντελεστής σκέδασης μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση

(2.26)

$$\sigma_{sp} = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 Q_{sp}(x, m)$$

Η μεταβολή στη διάμετρο ενός σωματιδίου λόγω της προσκόλλησης νερού συνήθως περιγράφεται με ένα υγροσκοπικό συντελεστή μεγέθυνσης $g(RH)$ ο οποίος ορίζεται ως:

$$g(RH) = \frac{D_{wet}(RH)}{D_{dry}} \quad (2.27)$$

Όπου D είναι η διάμετρος του σωματιδίου. Η υγροσκοπική μεγέθυνση έχει περιγραφεί από τη θεωρία Kohler (Kohler, 1936). Η εξάρτηση της παραπάνω εξίσωσης από τη σχετική υγρασία μπορεί να παραμετροποιηθεί χρησιμοποιώντας τη συσχέτιση μιας παραμέτρου η οποία παρουσιάστηκε από τους Petters και Kreidenweis το 2007.

$$g(a_w) = \left(1 + k\frac{a_w}{1 - a_w}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.28)$$

όπου

$$a_w = \frac{RH/100\%}{S_{Kelvin}} \quad (2.29)$$

Εδώ το a_w είναι η δράση του νερού, η οποία μπορεί να αντικατασταθεί με την τιμή της σχετικής υγρασίας RH, αν αμελήσουμε τον όρο Kelvin μεταξύ σχετικής υγρασίας και σχετικής υγρασίας σε ισορροπία. Αυτή η απλοποίηση μπορεί να αιτιολογηθεί στη συγκεκριμένη περίπτωση, καθώς για μεγάλα σωματίδια ($D > 80nm$) ο όρος Kelvin μέσα στην εξίσωση $Köhler$ παίρνει πολύ χαμηλές τιμές. Η παράμετρος k, περιέχει τις βασικές ιδιότητες των σωματιδίων (φαινόμενο $Raoult$) και προκύπτει από ένα απλό υπολογισμό του υγροσκοπικού όρου, θεωρώντας ότι τα σωματίδια που μελετάμε είναι σφαιρικά και η σύσταση τους ομογενής (13).

Τέλος η μεταβολή του δείκτη διάθλασης λόγω υγρασίας μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$m_{wet} = \frac{m_{dry} + m_{H_2O}(g(RH)^3 - 1)}{g(RH)^3} \quad (2.30)$$

Για μεγάλες τιμές του συντελεστή μεγέθυνσης και της σχετικής υγρασίας, ο δείκτης διάθλασης των αιωρούμενων σωματιδίων τείνει σε αυτόν του νερού, παρά το γεγονός ότι υπάρχουν αρκετά φαινόμενα που συσχετίζονται με την τελική τιμή του δείκτη διάθλασης (13).

2.7 Στοιχεια των Αιωρουμενων Σωματιδιων στην τροποσφαιρα

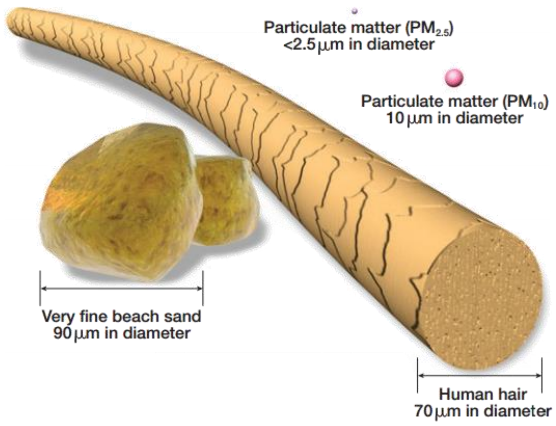
Το μεγαλύτερο μέρος των ατμοσφαιρικών ρύπων στην τροπόσφαιρα είναι ανθρωπογενούς προέλευσης. Οι ρύποι αυτοί συνήθως περιλαμβάνουν θείο, αμμώνιο, νιτρικό άλας, νάτριο, χλώριο, ίχνη μετάλλων, ανθρακικά υλικά, κρυσταλλικά στοιχεία και νερό. Οι ρύποι από ανθρακώδη υλικά αποτελούνται τόσο από στοιχειώδη, όσο και από οργανικό άνθρακα. Τα σωματίδια οργανικού άνθρακα συνήθως παράγονται απευθείας από διάφορες πηγές, αλλά αρκετές φορές μπορούν να προκύψουν και ως αποτέλεσμα πυκνωμάτων της ατμόσφαιρας από οργανικά αέρια χαμηλής μεταβλητότητας (4). Στον πίνακα 2-2 φαίνονται ορισμένες από τις ιδιότητες των κύριων ατμοσφαιρικών ρύπων στην τροπόσφαιρα.

ΡΥΠΟΙ	ΜΕΓΕΘΟΣ	ΠΗΓΕΣ	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ	ΧΡΟΝΟΣ ΖΩΗΣ
ΘΕΙΟ	Κυρίως τύπου Aitken και συσσωματώματα	Κύριες πηγές είναι η θάλασσα και τα ηφαίστεια. Δευτερεύουσες είναι η οξείδωση του διοξειδίου του θείου και άλλων θειϊκών αερίων	Υγρή εναπόθεση Ξηρή εναπόθεση	~ 1 εβδομάδα
ΝΙΤΡΙΚΟ ΑΛΑΣ	Συσσωματώματα και χονδρά σωματίδια	Οξείδωση του οξειδίου του αζώτου	Υγρή εναπόθεση	~ 1 εβδομάδα
ΜΑΥΡΟΣ ΑΝΘΡΑΚΑΣ	Στα πρώτα στάδια της εκπομπής τους είναι μικρότερα από 100nm. Στη συνέχεια γίνονται συσσωματώματα	Καύση ορυκτών καυσίμων, βιοκαυσίμων και βιομάζας	Ξηρή εναπόθεση Υγρή εναπόθεση	7 με 10 μέρες
ΟΡΓΑΝΙΚΟΙ ΑΕΡΙΟΙ ΡΥΠΟΙ	Σωματίδια Aitken και συσσωματώματα.	Καύση ορυκτών καυσίμων, βιοκαυσίμων, βιομάζας και το οικοσύστημα της θάλασσας	Υγρή εναπόθεση Ξηρή εναπόθεση	~ 1 εβδομάδα
ΟΡΥΚΤΗ ΣΚΟΝΗ	Κυρίως χονδρά σωματίδια και λιγότερο συσσωματώματα	Διάβρωση και αιώρηση χώματος εξ αιτίας του αέρα	Υγρή εναπόθεση Ξηρή εναπόθεση	Από 1 ημέρα μέχρι 1 εβδομάδα (εξαρτάται από το μέγεθος)
ΡΥΠΟΙ ΘΑΛΑΣΣΗΣ	Χονδρά σωματίδια και συσσωματώματα	Φυσαλίδες αέρα που δημιουργούνται λόγω της διάβρωσης από το νερό	Υγρή εναπόθεση Ξηρή εναπόθεση	Από 1 ημέρα μέχρι 1 εβδομάδα (εξαρτάται από το μέγεθος)
	Σωματίδια Aitken	Προκαλούνται από βιολογικά ενεργές περιοχές των ωκεανών	Υγρή εναπόθεση Ξηρή εναπόθεση	~1 εβδομάδα

Πίνακας 2-2: Χαρακτηριστικά είδη αέριων ρύπων (4)

2.8 Τα Αιωρουμενα Σωματιδια $PM_{2.5} – PM_{10}$

Τα σωματίδια αυτά τα συναντάμε σε μεγάλο εύρος μεγεθών. Τα πιο μικρά έχουν μέγεθος μικρότερο από $2.5 \mu m$ μικρόμετρα και συχνά αναγράφονται ως $PM_{2.5}$, ενώ τα μεγαλύτερα κυμαίνονται μέχρι $10 \mu m$ και αναγράφονται ως PM_{10}. Τα σωματίδια αυτά προέρχονται από διάφορες πηγές. Οι κυριότερες πηγές σωματιδίων $PM_{2.5}$ είναι οι κινητήρες υγρών καυσίμων και οι εστίες καύσης ξύλων. Αντίστοιχα οι κυριότερες πηγές σωματιδίων PM_{10} είναι τα «εκτός δρόμου» οχήματα, οι διεργασίες επεξεργασίας υλικών, όπως επίσης και η σκόνη που παρασύρει ο άνεμος. Τα σωματίδια είναι συχνά η πιο προφανής μορφή ατμοσφαιρικής ρύπανσης, καθώς μειώνουν την ορατότητα και μαυρίζουν τις επιφάνειες με τις οποίες έρχονται σε επαφή (12).



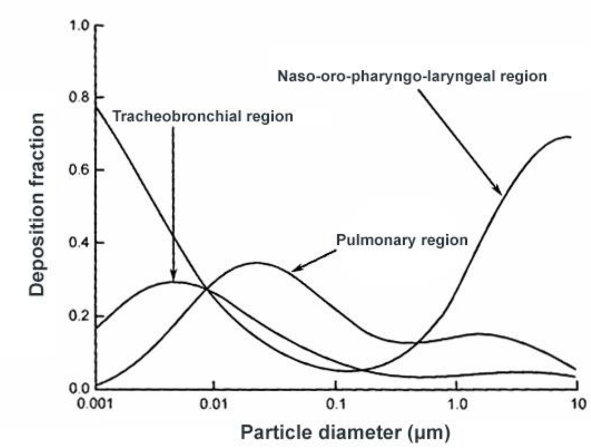
Σχήμα 2-2: Σύγκριση μεγέθους σωματιδίων PM_{10} – $PM_{2.5}$ με άλλα γνωστά μεγέθη (12)

Αρχικά η ορολογία που χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει αυτές τις κατηγορίες σωματιδίων, συμπεριλαμβανομένων όλων των σωματιδίων διαμέτρου μέχρι $45 \mu m$ ήταν “Total Suspended Particulate (TSP). Το 1987 η υπηρεσία προστασίας περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών (EPA), έθεσε νέα πρότυπα τα οποία αναφέρονταν σε σωματίδια μικρότερα από $10 \mu m$ (PM_{10}). Στη συνέχεια αναθεώρησε τα πρότυπά της το 1997 χρησιμοποιώντας επιπλέον τον όρο $PM_{2.5}$ για τα σωματίδια με μικρότερη διάμετρο από $2.5 \mu m$. Αυτές οι αλλαγές ήταν επακόλουθο της πολύ μεγάλης έρευνας που ξεκίνησε πάνω στη μελέτη των επιπτώσεων των μικροσωματιδίων στην ανθρώπινη υγεία (4).

2.9 Επιπτωσεις σωματιδιων $PM_{10} – PM_{2.5}$ στον ανθρωπινο οργανισμο

Τα σωματίδια PM_{10} – $PM_{2.5}$ καθώς αιωρούνται στον αέρα εισέρχονται στον οργανισμό μας μέσω της αναπνοής και συσσωρεύονται στο αναπνευστικό μας σύστημα. Για το λόγο αυτό έχουν συσχετιστεί με αρκετές παθήσεις υγείας. Η έκθεση σε μεγάλα σωματίδια (PM_{10}) έχει συσχετιστεί με επιπλοκές στο αναπνευστικό σύστημα όπως το άσθμα. Αντίστοιχα τα πιο μικρά σωματίδια $PM_{2.5}$ συσχετίζονται περισσότερο με καρδιακές και πνευμονικές παθήσεις (12).

Οι παρατηρήσεις αυτές οφείλονται στο γεγονός ότι τα μικρότερα σωματίδια είναι πιο εύκολο να διεισδύσουν βαθύτερα στον ανθρώπινο οργανισμό και το αίμα. Στο Σχήμα 1-3 φαίνεται η συσσώρευση σωματιδίων σε διάφορες περιοχές του πνεύμονα, σε αναλογία με τη διάμετρο των σωματιδίων. Οι καμπύλες αυτές μπορούν να γίνουν κατανοητές εάν μελετήσουμε τους τρείς βασικούς μηχανισμούς μετακίνησης των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα.



Εικόνα 2-3: Συγκέντρωση μικροσωματιδίων σε σημεία του πνεύμονα, ως προς το μέγεθος τους (14)

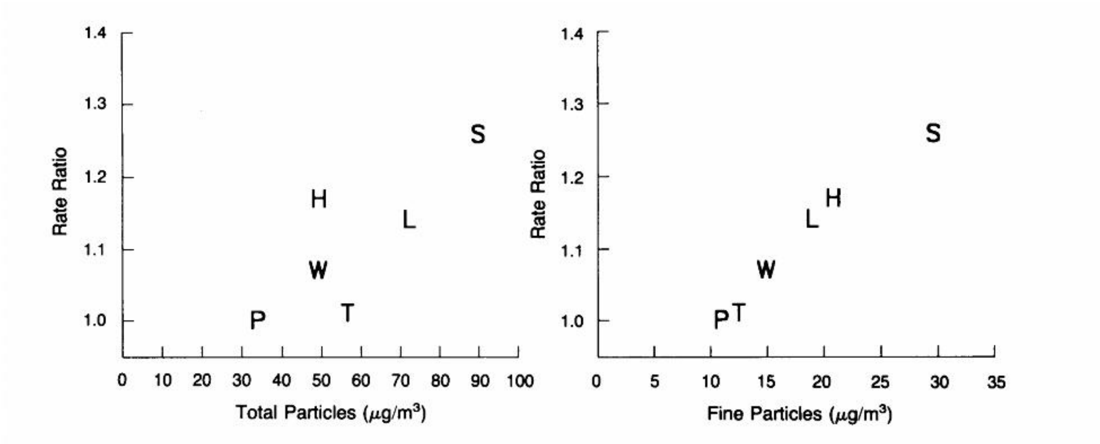
Ο πρώτος μηχανισμός έχει να κάνει με τη διάχυση. Τα μικρότερα σωματίδια υφίστανται διάχυση τύπου Brownian μέσω της οποίας μεταφέρονται στην επιφάνεια του πνεύμονα όπου και συσσωρεύονται. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, η διάχυση εμφανίζεται πιο έντονα σε σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από $0{,}5 \mu m$.

Ένας άλλος μηχανισμός είναι αυτός της προσκόλλησης στα τοιχώματα κυρίως του πνεύμονα και της τραχειοβρογχικής περιοχής καθώς και στις δύο περιπτώσεις οι δίοδοι αέρα έχουν σχετικά μικρή διατομή, με αποτέλεσμα τα σωματίδια να διανύουν μικρές αποστάσεις μέχρι να προσκολλήσουν σε κάποιο σημείο των τοιχωμάτων.

Ο τρίτος μηχανισμός στηρίζεται στη ροή του αέρα η οποία αλλάζει απότομα κατευθύνσεις λόγω των διαφόρων διακλαδώσεων που υπάρχουν στον πνεύμονα. Σε αυτή την περίπτωση, λόγω της αδράνειας, τα σωματίδια παρασύρονται από την αρχική τους ροή και συγκεντρώνονται πάνω στα τοιχώματα (14).

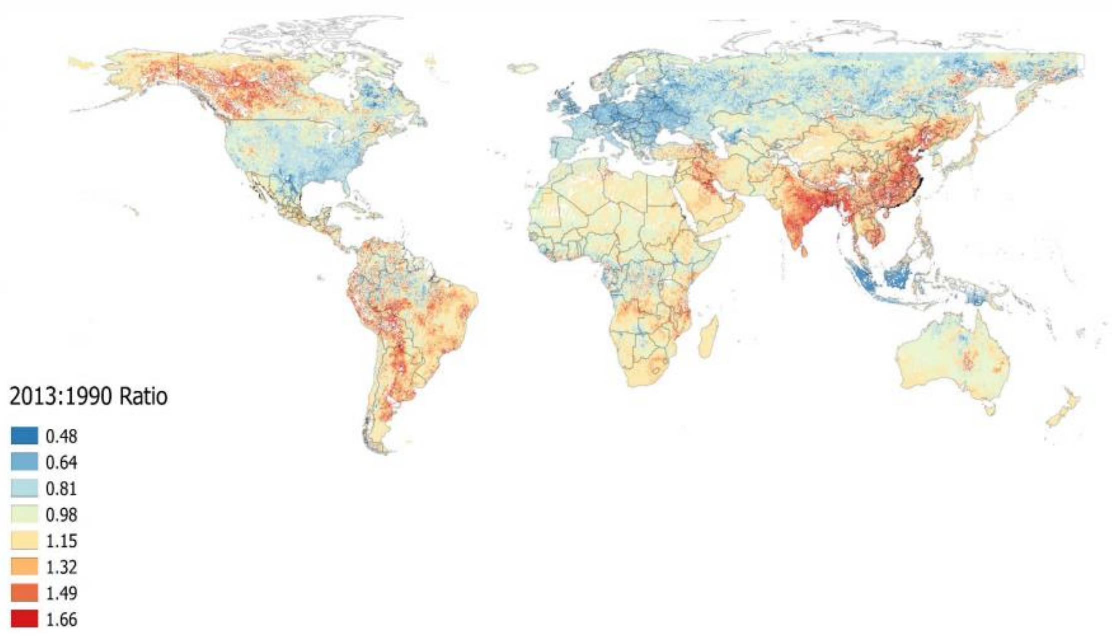
Το ενδιαφέρον για τα αιωρούμενα μικροσωματίδια έχει αυξηθεί έντονα τα τελευταία χρόνια, ύστερα από επιδημιολογικές μελέτες που έδειξαν ότι υπάρχει συσχέτιση αυξημένης πρόωρης θνησιμότητας σε περιοχές με μεγάλη συγκέντρωση μικροσωματιδίων $PM_{2.5}$. Στο Σχήμα 1-4 μπορούμε να παρατηρήσουμε τη συσχέτιση αυτή για 6 περιοχές με διαφορετικές συγκεντρώσεις, που παρουσιάστηκε σε δημοσίευση του Douglas W. Dockery το 1993 στον περιοδικό The New England Journal of Medicine (15).

Επιπλέον, ύστερα από έρευνα των Schwartz και Dockery το 1996, προκύπτει ότι η ημερήσια θνησιμότητα μπορεί να αυξηθεί κατά 1.5% αν η συγκέντρωση των σωματιδίων $PM_{2.5}$ αυξηθεί κατά $10\mu g\ /\ m^3$, 3.3% για άτομα με χρόνιες παθήσεις στον πνεύμονα και 2.1% για άτομα με ισχαιμικές καρδιολογικές παθήσεις (16). Από τότε οι περισσότερες από τις επιδημιολογικές μελέτες που έχουν γίνει μέχρι και σήμερα αναφέρουν πολύ κοντινά αποτελέσματα σε αυτά τα νούμερα.

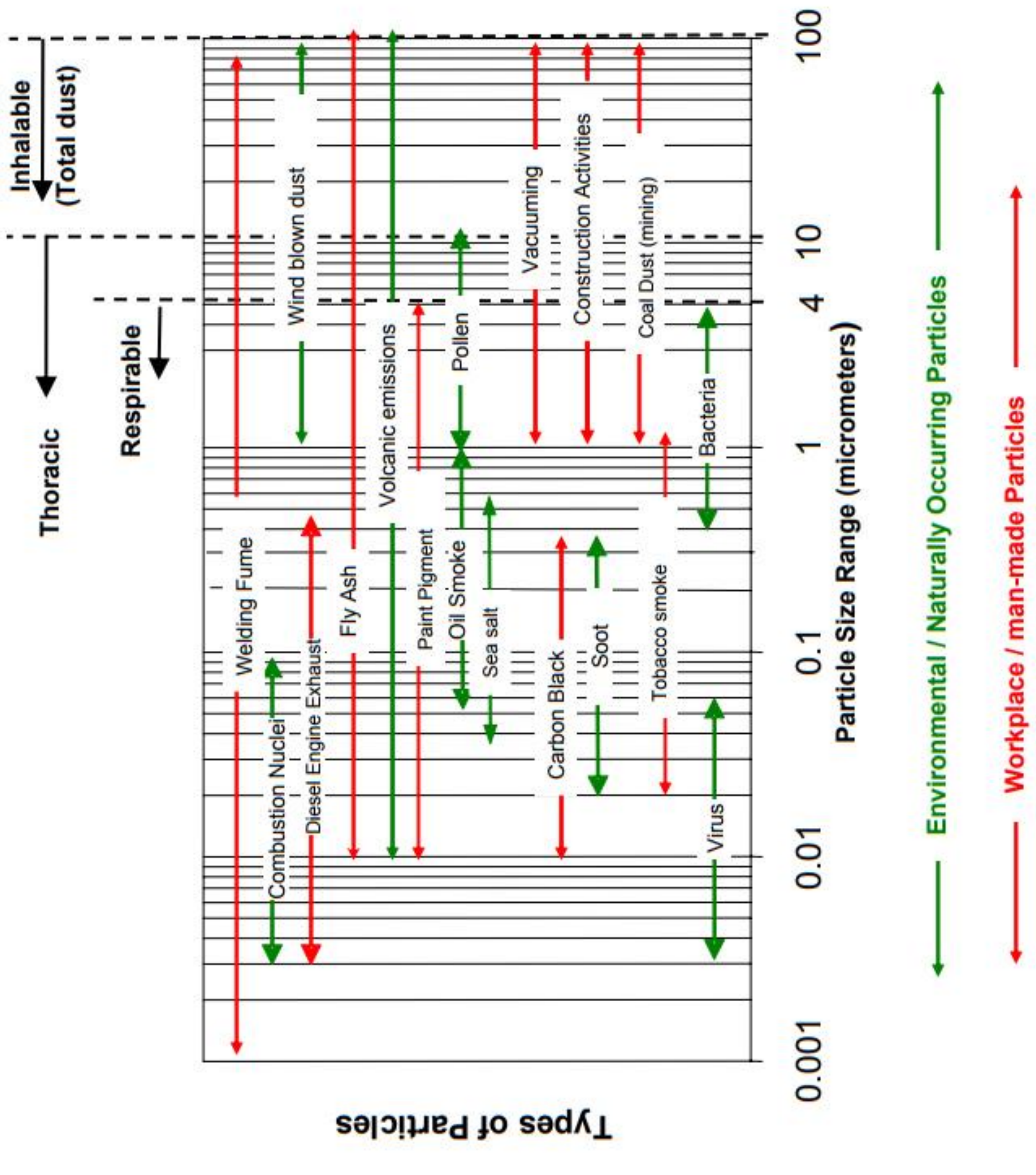


Εικόνα 2-4: Εκτιμώμενη κανονικοποιημένη αναλογία θνησιμότητας, ορίζοντας την πόλη με τη χαμηλότερη ρύπανση το Portage, Wisconsin (P) ως 1.0; T = Topeka, Kansas; W = Watertown, Massachusetts; L = St. Louis, Missouri; H = Harriman, Tennessee; S = Steubenville, Ohio (15)

Σε παγκόσμια κλίμακα σύμφωνα με δεδομένα του Οργανισμού Word Bank Group, η μέση πυκνότητα σωματιδίων $PM_{2.5}$ κυμαίνεται στα $44\ \mu g\ /m^3$ (17), ενώ στην Ελλάδα είναι στα $13\ \mu m/m^3$ (17). Ο αριθμός αυτός υπολογίζεται ότι σε βάθος χρόνου από το 1990 μέχρι το 2040 θα έχει διπλασιαστεί (14).



Εικόνα 2-5: Αναλογία εκπομπών ρύπων PM2.5 σε παγκόσμια κλίμακα από το 1990 μέχρι το 2013 (4)

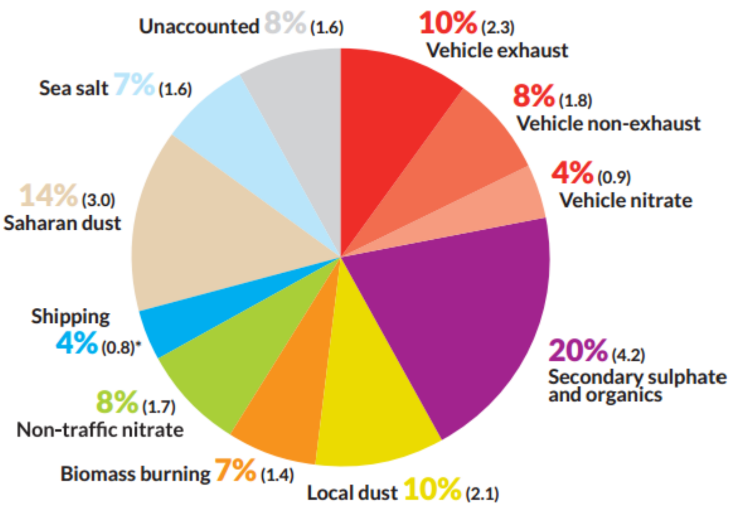


Εικόνα 2-6: Μεγέθη ορισμένων χαρακτηριστικών φυσικών και ανθρωπογενών ρύπων (4)

2.10 Συγκεντρωσεις PM_{10} – $PM_{2.5}$ στην Αθηνα

Το έργο AIRUSE συγκέντρωσε το 2013 τα πρώτα δεδομένα από συγκεντρώσεις σωματιδίων $PM10 - PM2.5$ για 5 ευρωπαϊκές πόλεις συμπεριλαμβανομένης και της Αθήνας για χρονική διάρκεια ενός έτους. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην ομοιογένεια τόσο κατά τη συλλογή όσο και την ανάλυση των δεδομένων μεταξύ των πέντε πόλεων, έτσι ώστε η σύγκριση μεταξύ τους να είναι όσο πιο έγκυρη. Στις εικόνες 2- και 2-8, φαίνονται οι μέσες ποσοστιαίες συγκεντρώσεις ρύπων $PM10$ και $PM2.5$ καθώς και η μάζα τους σε $\mu g/m^3$ για το έτος 2013 (18).

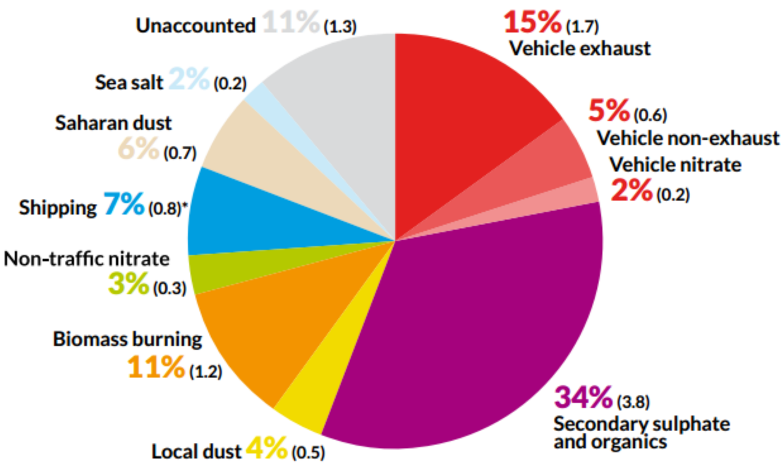
PM_{10}



Εικόνα 2-7: Ποσοστιαίες μέσες συγκεντρώσεις και μάζες σωματιδίων PM10 για το έτος 2013 (18)

$PM_{2.5}$

Εικόνα 2-8: Ποσοστιαίες μέσες συγκεντρώσεις και μάζες σωματιδίων PM2.5 για το έτος 2013 (18)



3 ΤΕΧΝΙΚΗ LIDAR

Η τεχνική LIDAR βασίζεται στην εκπομπή παλμικής ακτινοβολίας λέιζερ στην ατμόσφαιρα και ακολούθως, στην καταγραφή της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας. Η ατμόσφαιρα αποτελούμενη από άτομα, μόρια, αιωρούμενα σωματίδια (αερολύματα), κλπ. προκαλεί εξασθένηση της διερχόμενης ακτινοβολίας λέιζερ. Η σκεδαζόμενη ακτινοβολία συλλέγεται από ένα οπτικό τηλεσκόπιο και οδηγείται στο σύστημα λήψης και καταγραφής των σημάτων LIDAR. Η τεχνική LIDAR, αναλύοντας τα οπισθοσκεδαζόμενα σήματα που προέρχονται από την αλληλεπίδραση των συστατικών της ατμόσφαιρας με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, είναι ικανή να καθορίσει την κατακόρυφη κατανομή των κυριότερων ρύπων και συστατικών της ατμόσφαιρας με μεγάλη χωρική ($\approx 3 - 7m$) και χρονική ακρίβεια (από $10 - 30s$ έως μερικά λεπτά) (19).

Ξεκίνησε να χρησιμοποιείται στις αρχές της δεκαετίας του 60 λίγο μετά την ανακάλυψη των laser όπου συνδύαζε την απεικόνιση δεδομένων και τη μέτρηση αποστάσεων, υπολογίζοντας το χρόνο επιστροφής των εκπεμπόμενων παλμών. Οι πρώτες του εφαρμογές ξεκίνησαν στη μετεωρολογία όπου το Εθνικό Κέντρο Ατμοσφαιρικής έρευνας των Ηνωμένων Πολιτειών τη χρησιμοποίησε για μετρήσεις σύννεφων (20). Παρ' όλο που το ευρύ κοινό άρχισε να την αναγνωρίζει ως τεχνική για τη χρησιμότητα και την ακρίβεια της όταν χρησιμοποιήθηκε στην αποστολή Apollo 15 της NASA για τη χαρτογράφηση της επιφάνειας της γης το 1971.

Η ονομασία LIDAR προέκυψε από τα ακρωνύμια του Light Detection And Ranging, αντίστοιχα του "RADAR" (Radio Detection And Ranging). Τα πλεονεκτήματα της τεχνικής LIDAR έναντι των συμβατικών τεχνικών μέτρησης ατμοσφαιρικών ρύπων (19), αναφέρονται παρακάτω :

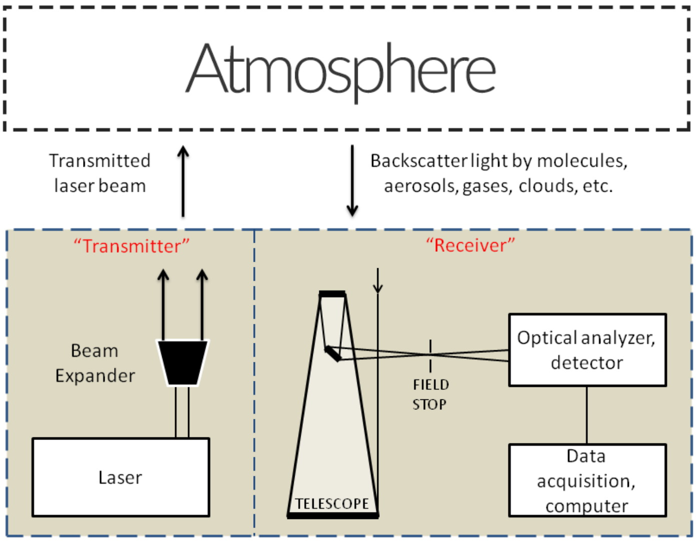
- Έλλειψη επίδρασης στις μετρήσεις αέριων ρύπων και ατμοσφαιρικών παραμέτρων. Καταλληλότητα σε μετρήσεις «εξ' αποστάσεως» στην περίπτωση καταγραφής βιομηχανικών εκπομπών (έλεγχος τήρησης περιβαλλοντικών διατάξεων) και εντοπισμού εστιών ρύπανσης (πχ. εστίες καύσης) σε αστικές και ημιαστικές περιοχές.
- Λήψη μετρήσεων και καταγραφής ατμοσφαιρικής ρύπανσης με πολύ μεγάλη χωρική (5-1000 m) και χρονική ακρίβεια (1-10 s).
- Μέτρηση σε πολύ μεγάλες αποστάσεις (από μερικά μέτρα έως 100-120 χλμ.).
- Μέτρηση σε πραγματικό χρόνο και λήψη μετρήσεων σε 1-2-3 διαστάσεις στο χώρο.
- Ικανότητα μέτρησης πολλαπλών ρυπαντών ταυτόχρονα.

3.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ LIDAR

Σε γενικές γραμμές υπάρχουν δύο είδη συστημάτων ανίχνευσης LIDAR. Τα «incoherent» ή άμεσα ανιχνεύσιμης ενέργειας, τα οποία μετράνε κυρίως τη μεταβολή του πλάτους των ανακλώμενων παλμών και τα «coherent», τα οποία χρησιμοποιούνται περισσότερο για τη μέτρηση μετατοπίσεων Doppler ή αλλαγές της φάσης του ανακλώμενου φωτός. Και στις δύο περιπτώσεις υπάρχουν δύο είδη παλμών : (α) Τα συστήματα LIDAR μικροπαλμών και (β) τα συστήματα υψηλής ενέργειας. (α) Τα συστήματα μικροπαλμών τα οποία εφαρμόζουν παλμούς ενέργειας και έχουν προκύψει ως αποτέλεσμα της συνεχώς αυξανόμενης υπολογιστικής ισχύος και (β) των εξελίξεων στο χώρο της τεχνολογίας των LASER. Συνήθως χρησιμοποιούν αρκετά λιγότερη ενέργεια στο LASER (της τάξης του micro-joule) και είναι ασφαλή για τα μάτια (δεν απαιτούν πρόσθετο εξοπλισμό ασφάλειας). Τα συστήματα υψηλής ενέργειας είναι πιο διαδεδομένα στην έρευνα πάνω στην ατμόσφαιρα όπου χρησιμοποιούνται ευρέως για τη μέτρηση ατμοσφαιρικών παραμέτρων όπως: το ύψος, τα στρώματα και την πυκνότητα των νεφών, ιδιότητες των σωματιδίων στα νέφη, θερμοκρασία, πίεση, ταχύτητα ανέμου και συγκεντρώσεις αερίων (21).

ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ LIDAR ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

Η διάταξη ενός συστήματος lidar ατμοσφαιρικής τηλεπισκόπησης αποτελείται κυρίως από το σύστημα δημιουργίας της εκπεμπόμενης δέσμης (transmitter) και το σύστημα λήψης της οπισθοσκεδάζουσας δέσμης. Το πρώτο αποτελείται από ένα laser και ένα σύνολο από κάτοπτρα, που στέλνουν την παραγόμενη ακτινοβολία σε ένα διαστολέα της δέσμης, ο οποίος τη στέλνει κατακόρυφα στην ατμόσφαιρα αφού πρώτα την ευθυγραμμίσει. Μέρος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας σκεδάζεται στην ατμόσφαιρα (από αέρια, μόρια, αέριους ρύπους, νέφη κ.λπ.) και επιστρέφει στη διάταξη lidar απ'όπου συλονομάζεται μέσω ενός τηλεσκοπίου. Η οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία οδηγείται σε έναν οπτικό αναλυτή ο οποίος με τη σειρά του διαχωρίζει φασματοσκοπικά, την ενισχύει και τη μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα. Τέλος το σήμα ψηφιοποιείται και αποθηκεύεται στη μνήμη του υπολογιστή.



Εικόνα 3-1: Σχηματική απεικόνιση διάταξης lidar

3.2 Τα είδη LIDAR

Ανάλογα με το φυσικό μηχανισμό που εκμεταλλευόμαστε για να πραγματοποιήσουμε μία μέτρηση τα συστήματα lidar είναι δυνατόν να καταταχθούν σε επιμέρους κατηγορίες.

3.2.1 Lidar οπισθοσκέδασης

Αποτελείται ουσιαστικά από δύο μέρη: ένα πομπό και ένα δέκτη ακτινοβολίας. Η πηγή ακτινοβολίας ενός lidar είναι ένα laser παλμικής συνήθως λειτουργίας. Η ενέργεια ανά παλμό πρέπει να είναι ικανή να αντισταθμίσει τυχόν απώλειες λόγω απορρόφησης ή σκέδασης της ακτινοβολίας και να εξασφαλίσει ότι το σήμα που επιστρέφει είναι αρκετά ισχυρό για να ανιχνευθεί. Τυπικές τιμές της απαιτούμενης ενέργειας laser είναι τα $0.1 - 1\ Joule/παλμό$. Το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας εξαρτάται από το είδος των ρυπαντών ή αερίων συστατικών που θέλουμε να μετρήσουμε και κυμαίνεται από το υπεριώδες έως το υπέρυθρο ($0.2 - 10\ pm$). Ορισμένα συστήματα lidar απαιτούν όχι σταθερό, αλλά μεταβλητό μήκος κύματος για την πραγματοποίηση μετρήσεων σε διαφορετικά μήκη κύματος για μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας της λαμβανόμενης μέτρησης. Πρέπει να τονιστεί ότι το φασματικό εύρος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας laser πρέπει να είναι όσο το δυνατό μικρότερο. Αυτό εξασφαλίζει ακτινοβολία υψηλής μονοχρωματικότητας και κατά συνέπεια μεγάλη ακρίβεια και ευαισθησία στις λαμβανόμενες μετρήσεις. Ακολούθως, η εκπεμπόμενη δέσμη του laser κατευθύνεται μέσω ενός οπτικού συστήματος στον υπό εξέταση στόχο. Ένα μικρό μέρος της δέσμης χρησιμοποιείται πριν εγκαταλείψει το σύστημα για το συνεχή έλεγχο της ενέργειας του παλμού, του μήκους κύματος καθώς και για να σηματοδοτήσει την έναρξη της εκπομπής. Το δεύτερο τμήμα του συστήματος λαμβάνει την ακτινοβολία που επιστρέφει από το στόχο μέσω ενός οπτικού τηλεσκοπίου. Η ακτινοβολία οδηγείται ακολούθως σε ένα φασματικό αναλυτή ο οποίος αναλύει το σήμα στα διάφορα μήκη κύματος από τα οποία αποτελείται, με σκοπό να επιλεγεί εκείνο το μήκος κύματος που περιέχει πληροφορίες και να αποκοπεί οποιαδήποτε άλλη ανεπιθύμητη ακτινοβολία. Στη συνέχεια, το επιλεγμένο οπτικό σήμα κατευθύνεται σε ένα φωτοανιχνευτή για να μετατραπεί σε ηλεκτρικό σήμα και να ακολουθήσει η κατάλληλη επεξεργασία του για την εξαγωγή των πληροφοριών που περιέχει. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάπτυξη διαφόρων συστημάτων τηλεπισκόπησης με χρήση laser ανάλογα με το φυσικό μηχανισμό αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας-ύλης (22). Η βασική εξίσωση αυτής της τεχνικής που μας δίνει την ισχύ του οπισθοσκεδάζοντος σήματος είναι:

$$P(z,\lambda) = \frac{E_0\, n_0(\lambda)}{Z^2}\ O(z,\lambda)\, \beta(z,\lambda) \exp\left(-2\int_0^{z'} a(z,\lambda)dz\right) \tag{3.1}$$

Όπου P είναι η ισχύς της ακτινοβολίας laser που ανιχνεύεται από απόσταση z. $\beta(z,\lambda)$ ο χωρικός συντελεστής οπισθοσκέδασης, $\alpha(z,\lambda)$ ο χωρικός συντελεστής εξασθένησης, E_0 η ισχύς του εκπεμπόμενου παλμού. Με τον όρο $n_0(\lambda)$ περιγράφουμε τις παραμέτρους που αφορούν τα οπτικά και ανιχνευτικά στοιχεία της διάταξης και τέλος ο όρος $O(z,\lambda)$ εκφράζει τη συνάρτηση πλήρους επικάλυψης της διάταξης στον οπτικό δρόμο καταγραφής του μήκους κύματος λ.

Θεωρώντας ότι η ατμόσφαιρα αποτελείται από μόρια και αιωρούμενα σωματίδια, μπορούμε να γράψουμε τους συντελεστές ελαστικής οπισθοσκέδασης και εξασθένησης ως αθροίσματα των αντίστοιχων μοριακών και σωματιδιακών συνεισφορών.

$$a(z,\lambda) = \alpha_{mol}(z,\lambda) + \alpha_{par}(z,\lambda) \tag{3.2}$$

$$\beta(z,\lambda) = \beta_{mol}(z,\lambda) + \beta_{par}(z,\lambda) \tag{3.3}$$

Οι συντελεστές εξασθένησης και οπισθοσκέδασης μπορούν να υπολογιστούν με αρκετά ικανοποιητική ακρίβεια για τα μόρια της ατμόσφαιρας. Επομένως για την επίλυσή της έχουμε δύο βασικούς αγνώστους. Το συντελεστή εξασθένησης και τον συντελεστή οπισθοσκέδασης για σωματίδια. Για να ξεπεράσουμε αυτό το πρόβλημα ορίζουμε το λόγο Lidar για τα αιωρούμενα σωματίδια (S_{par}), ο οποίος εκφράζεται ως ο λόγος του συντελεστής εξασθένησης ως προς το συντελεστή οπισθοσκέδασης. Ο λόγος αυτός παραμένει σταθερός με την κατεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας.

$$S_{par}(\lambda) = \frac{a_{par}(z,\lambda)}{\beta_{par}(z,\lambda)} = \sigma\tau\alpha\theta\varepsilon\rho\acute{\alpha} \tag{3.4}$$

Ο λόγος lidar για τα αιωρούμενα σωματίδια εξαρτάται κυρίως από το μήκος κύματος, αλλά η τιμή του γενικά δεν είναι σταθερή με το ύψος. Υπολογίζεται ότι παίρνει ένα μεγάλο εύρος τιμών από 10 μέχρι $100sr$.

Πέρα από την παραδοχή του σταθερού λόγου lidar σωματιδίων ως προς το ύψος, η εξίσωση lidar μπορεί να επιλυθεί ως προς το συντελεστή οπισθοσκέδασης των αιωρούμενων σωματιδίων με μία επιπλέον παραδοχή που αφορά τη σταθερά βαθμονόμησης του συστήματος. Συνήθως θεωρούμε μία περιοχή βαθμονόμησης του συντελεστή οπισθοσκέδασης των αιωρούμενων σωματιδίων στο λεγόμενο ύψος αναφοράς (Z_0) που εξαρτάται από το λόγο του σήματος προς θόρυβο του κάθε συστήματος lidar. Στο ύψος αναφοράς, θεωρούμε ότι η ατμόσφαιρα είναι ελεύθερη από σωματίδια και η οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία προέρχεται μόνο από τη συνεισφορά των ατμοσφαιρικών μορίων (22). Τελικά ο συντελεστής οπισθοσκέδασης μπορεί να προκύψει από τη σχέση:

$$\beta_{par}(\lambda,Z) = \frac{P(\lambda,Z)\,Z^2 \exp[(-2\left(S_{par} - S_{mol}\right)\int_{Z_0}^{Z}\beta_{mol}(\lambda,\zeta)d\zeta]}{\frac{P(\lambda,Z_0)\,Z_0^2}{\beta_{par}(Z_0)+\beta_{mol}(Z_0)} - 2S_{par}\exp[(-2\left(S_{par} - S_{mol}\right)\int_{\zeta_0}^{\zeta}\beta_{mol}(Z')dZ']} - \beta_{mol}(\lambda,Z) \tag{3.5}$$

και από αυτόν προκύπτει ο συντελεστής εξασθένησης ως

$$\alpha_{par}(\lambda,Z) = \beta_{par}(\lambda,Z)\cdot S_{par}(\lambda) \tag{3.6}$$

3.2.2 Lidar Raman

Η δομή και ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος αυτού δεν έχει ουσιαστικές διαφορές με το lidar οπισθοσκέδασης. Στην τεχνική Raman η ακτινοβολία που επιστρέφει είναι αυτή που προκύπτει από τη σκέδαση Raman (μη ελαστική σκέδαση) από τα μοριακά συστατικά της ατμόσφαιρας λόγω των μεταπτώσεων των μορίων. Έτσι, η ανιχνευόμενη ακτινοβολία είναι διαφορετική από την εκπεμπόμενη ακτινοβολία του laser ως προς το μήκος κύματος το οποίο οφείλεται στην ενεργειακή διαφορά μεταξύ της αρχικής και τελικής κατάστασης του συμμετέχοντος μορίου και είναι χαρακτηριστική για κάθε οπισθοσκεδάζον μόριο. Επομένως η μεταβολή αυτή χαρακτηρίζει το είδος των μορίων και η ένταση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας αντιπροσωπεύει τη συγκέντρωσή τους. Η μέθοδος αυτή απαιτεί laser μεγάλης ισχύος σε σχέση με άλλα συστήματα lidar, γιατί το οπτικό σήμα που επιστρέφει είναι εξαιρετικά ασθενές, λόγω της μικρής ενεργούς διατομής της σκέδασης Raman (23).

Για την εφαρμογή της τεχνικής αυτής, απαιτείται το σύστημα lidar να καταγράφει τόσο το επιστρεφόμενο σήμα λόγω της ελαστικής οπισθοσκέδασης από τα μόρια και τα σωματίδια της ατμόσφαιρας (24), όσο και το αντίστοιχο σήμα εξαιτίας της ανελαστικής οπισθοσκέδασης από τα μόρια (25). Τα σήματα αυτά, μπορούν να περιγραφούν αντίστοιχα από τις εξισώσεις 3.7, 3.8 και 3.9:

$$P(z,\lambda) = \frac{E_0\, n_0(\lambda)}{Z^2}\, O(z,\lambda)\, \beta(z,\lambda) \exp\left(-2 \int_0^{z'} a(z,\lambda)\, dz\right) \qquad (3.7)$$

$$P(z,\lambda_{raman}) = \frac{E_0\, n_0(\lambda_{raman})}{Z^2}\, O(z,\lambda_{raman})\, \beta(z,\lambda_{raman}) \exp\left(-2 \int_0^{z'} a(z,\lambda_{raman})\, dz\right) \qquad (3.8)$$

Όπου

$$\beta_{raman}(z,\lambda_{raman}) = N_N(z)\, \frac{d\sigma_N}{d\Omega}(\pi,\lambda) \qquad (3.9)$$

Οι περισσότεροι από τους παραπάνω όρους έχουν περιγραφεί ήδη στην περιγραφή της εξίσωσης lidar σε ένα σύστημα οπισθοσκέδασης, στο μήκος κύματος λ. Οι όροι αυτοί παραμένουν αντίστοιχα οι ίδιοι και για το μήκος κύματος λ_{raman}, το μήκος κύματος δηλαδή στο οποίο παρουσιάζεται φασματική μετατόπιση [από λ σε λ_{raman}], λόγω σκέδασης $Raman$. Ο όρος $N(z)$ εκφράζει την κατακόρυφη κατανομή της αριθμητικής συγκέντρωσης του αζώτου και ο όρος $d\sigma_N/d\Omega$, την ενεργό διατομή της οπισθοσκέδασης $Raman$ της ανιχνευόμενης ακτινοβολίας στα $387nm$ και στα $607nm$, όταν αντίστοιχα εκπέμπονται ακτινοβολίες στα 355 και $532nm$.

Υποθέτοντας μια εκθετική σχέση μεταξύ των συντελεστών εξασθένησης των σωματιδίων για τα μήκη κύματος των 355 και $387nm$ και μια για τα μήκη κύματος 532 και

(3.10)

607nm, μέσω του εκθέτη $\AA ngstr\ddot{o}m$ στη θέση z (Εξίσωση 3.10), τότε η διαφορική εξίσωση μπορεί να λυθεί ως προς το συντελεστή εξασθένησης των σωματιδίων στο εκπεμπόμενο μήκος κύματος σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση (26):

$$\frac{a_{par}(z,\lambda)}{\alpha_{par}(z,\lambda_{raman})} = \left(\frac{\lambda_{raman}}{\lambda}\right)^{\dot{A}(z)}$$

$$a_{particle}(z,\lambda) = \frac{\frac{dy}{dx}\left(\ln\left(\frac{N_N(z)}{P(z,\lambda_{raman})\, z^2}\right)\right) - a_{mol}(r,\lambda) - a_{mol}(r,\lambda_{raman})}{1+\left(\frac{\lambda}{\lambda_{raman}}\right)^{Angstrom(z)}} \quad (3.11)$$

Όπως αναφέραμε προηγουμένως, για τον υπολογισμό του συντελεστή εξασθένησης των σωματιδίων πρέπει να θεωρήσουμε γνωστή την τιμή του εκθέτη $\AA ngstr\ddot{o}m$, ο οποίος για τα τόσο κοντινά μήκη κύματος όπως τα 355 και $387nm$, αλλά και 532 και 607 nm, και για σωματίδια διαμέτρου συγκρίσιμης των μηκών κύματος, μπορεί να θεωρηθεί ίσος με την μονάδα. Το σφάλμα που εισάγεται από μια λάθος εκτίμηση του εκθέτη $\AA ngstr\ddot{o}m$, μπορεί να οδηγήσει σε αβεβαιότητα στον υπολογισμό του συντελεστή εξασθένησης μικρότερη του 10% (27).

Ο συντελεστής οπισθοσκέδασης για τα αιωρούμενα σωματίδια, μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση των ελαστικά και ανελαστικά οπισθοσκεδαζόμενων σημάτων lidar στα $355-532nm$ και $387-607nm$, αντίστοιχα. Εάν θεωρήσουμε το λόγο του ελαστικά οπισθοσκεδαζόμενου σήματος από τα σωματίδια [355 και 532 nm] προς το ανελαστικά οπισθοσκεδαζόμενο σήμα από το άζωτο [387 και 607 nm], σύμφωνα με τις διαφορικές εξισώσεις lidar σε σύστημα ελαστικής οπισθοσκέδασης και Raman lidar για το ύψος z αλλά και για ένα ύψος αναφοράς z_0 στην ατμόσφαιρα, μπορούμε να υπολογίσουμε το συντελεστή οπισθοσκέδασης στο μήκος κύματος εκπομπής σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση (26):

$$\beta_{par}(\lambda,z) = -\beta_{mol}(\lambda,z) + \left(\beta_{par}(\lambda,z_0) + \beta_{mol}(\lambda,z_0)\right)$$
$$\frac{P(\lambda_{raman},z_0)\, P(\lambda,z)\, N_N(z)}{P(\lambda,z_0)\, P(\lambda_{raman},z)\, N_N(z_0)} \frac{\exp(-\int_z^{z_0}\left(a_{par}(\lambda_{raman},z) + a_{mol}(\lambda_{raman},z)\right)dz)}{\exp(-\int_z^{z_0}\left(a_{par}(\lambda,z) + a_{mol}(\lambda,z)\right)dz)} \quad (3.12)$$

Για την επίλυση της προηγούμενης σχέσης, απαιτείται να θεωρήσουμε το συντελεστή οπισθοσκέδασης για τα σωματίδια σε ένα ύψος αναφοράς z_0. Αυτό γίνεται με τον ίδιο τρόπο όπως και στην περίπτωση επίλυσης της εξίσωσης lidar ελαστικής οπισθοσκέδασης, όπου θεωρούμε το συντελεστή οπισθοσκέδασης αερολυμάτων σε μια περιοχή στην ελεύθερη τροπόσφαιρα τέτοια ώστε $\beta_{mol} \gg \beta_{par}$. Στην ίδια χωρική περιοχή αντίστοιχα, υπολογίζονται οι μέσοι όροι των λόγων των σημάτων lidar που χρησιμοποιούνται στη Σχέση 3.11, $[P(\lambda_{raman},z_0)\ /\ P(\lambda,z_0)]$, για την αποφυγή του θορύβου που εισάγεται όταν το ύψος αναφοράς ορίζεται σε ένα μόνο σημείο.

3.3 Ο Αλγοριθμος LIRIC

Ο αλγόριθμος LIRIC (Lidar Radiometer Inversion Code) είναι ένας αριθμητικός αλγόριθμος που μας επιτρέπει να ανακτήσουμε κατακόρυφες κατανομές συγκέντρωσης αερολυμάτων που αποτελούνται από λεπτά και χονδρά σωματίδια. Στην πιο απλή του μορφή αυτό κατορθώνεται συνδυάζοντας τις μετρήσεις από ένα σταθμό Lidar και ένα ηλιακό φωτόμετρο. Η ιδέα για το συνδυασμό αυτό (LRS - Lidar and Radiometric Sounding) προτάθηκε για πρώτη φορά από τον A. Chaikovsky το 2002 και αποτέλεσε την αρχή για τη δημιουργία του αλγορίθμου που περιγράφουμε (28).

Ο αλγόριθμος αναπτύχθηκε μέσα στο πλαίσιο του προγράμματος ACTRIS από το Ινστιτούτο Φυσικής του Minsk (Λευκορωσία) σε συνεργασία με το Εργαστήριο Ατμοσφαιρικής Οπτικής της Lille (Γαλλία). Το λογισμικό δοκιμάστηκε από έναν αριθμό σταθμών του δικτύου EARLINET για παρατηρήσεις από 7 διαφορετικούς σταθμούς, στο Leipzig, της Γερμανίας στις 25 Μαΐου 2009 και η συμφωνία που προέκυψε μεταξύ των χαρακτηριστικών των αερολυμάτων ήταν πολύ καλή.

3.3.1 Περιγραφή του λογισμικού

Για να ανακτήσουμε τη συγκέντρωση κατά όγκο των αερολυμάτων απαιτείται μια διαδικασία από τρία βήματα.

Βήμα 1^{ο}: Συνθετητής (Synthesizer)

Συνήθως τα σήματα Lidar έχουν αρκετά υψηλή χωρική και χρονική ανάλυση. Στο συνθετητή κάθε καταγραφή υπολογίζεται κατά μέσο όρο και παρεμβάλλεται σε ένα πλέγμα με ανάλυση ύψους ανά $15m$. Σε αυτό το βήμα τα κανάλια καταμέτρησης φωτονίων και αναλογικού σήματος συνδυάζονται μαζί, ενώ συνήθως χρειάζεται να εφαρμόσουμε μια χρονική διόρθωση στον πρώτο. Επίσης, εδώ μπορούν να ληφθούν υπόψη οι διαφορετικές ζενίθιες γωνίες και το οπτικό πεδίο. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι τρία σήματα που έχουν υπολογιστεί κατά μέσο όρο μαζί με το θόρυβο υποβάθρου τους.

Βήμα 2^{ο}: Tropoexport

Αυτό το στάδιο έχει επίσης σχέση με τη διαχείριση των σημάτων από το lidar. Γενικά, σε ένα σήμα Lidar παρεμβάλλονται πολλαπλές πηγές θορύβου. Σε αυτό το βήμα εφαρμόζονται μη γραμμικές, μη-σύγχρονες και σύγχρονες διορθώσεις. Οι διορθώσεις αυτές αναφέρονται στην εξάρτηση του σήματος από την ένταση της ακτινοβολίας, τα τεχνικά χαρακτηριστικά της διάταξης Lidar και το «λευκό θόρυβο» αντίστοιχα.

Βήμα 3^{ο}: Ανάκτηση

Στο τελευταίο βήμα συνδυάζονται οι δύο διαφορετικές μετρήσεις της διάταξης lidar και του ηλιακού φωτόμετρου ώστε να υπολογιστεί τελικά η κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης των σωματιδίων.

Επομένως, ο αλγόριθμος LIRIC υπολογίζει την κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης λεπτών (fine) και αδρών (coarse) σωματιδίων, από τα οπισθοσκεδαζόμενα σήματα lidar που προκύπτουν μέσω της ελαστικής σκέδασης στα μήκη κύματος 355,

532 και $1064nm$, όπως και τις ιδιότητες των σωματιδίων σε ολόκληρη την ατμοσφαιρική κολώνα, ως καταγράφονται από το ηλιακό φωτόμετρο CIMEL.

Μια βασική προϋπόθεση στην οποία στηρίζεται ο αλγόριθμος, είναι ότι, όλες οι άλλες ιδιότητες των σωματιδίων είναι σταθερές σε ολόκληρη την ατμοσφαιρική στήλη (εκτός από τη συγκέντρωση) και είναι ίσες με τις αντίστοιχες μέσες τιμές στήλης, που υπολογίζονται από το ηλιακό φωτόμετρο.

Η εκτίμηση των κατακόρυφων κατανομών συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων, βασίζεται στην τεχνική μέγιστης πιθανοφάνειας, έτσι ώστε τα σήματα Lidar να αναπαράγονται μέσα στην αβεβαιότητα της μέτρησης και το ολοκλήρωμα της συγκέντρωσης των σωματιδίων να ταιριάζει με το συνολικό όγκο κατανομής συγκέντρωσης των λεπτών και αδρών σωματιδίων, που εξήχθησαν από τις μετρήσεις του ηλιακού φωτόμετρου. Επιπλέον, για να αποφευχθεί οποιαδήποτε τιμή που δεν έχει φυσικό νόημα, χρησιμοποιούνται περιορισμοί της ομαλότητας των συναρτήσεων των κατανομών (29).

Οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων (λεπτών και αδρών), όπως υπολογίζονται από τον αλγόριθμο LIRIC, εκφράζονται σε αναλογία ανάμειξης όγκου (μέρη ανά δισεκατομμύριο ατμοσφαιρικού όγκου, $ppbv$), ή αντίστοιχα με τον όγκο των σωματιδίων που εμπεριέχονται σε ένα όγκο ατμοσφαιρικού αέρα (σε 1000 $\mu m^3 cm^{-3}$).

Για τη σύγκριση των δεδομένων με τα δεδομένα της πρότυπης ανιχνευτικής διάταξης που δημιουργήθηκε, γίνεται η μετατροπή της συγκέντρωσης κατ' όγκο σε συγκέντρωση κατά μάζα ($\mu g/m^3$), χρησιμοποιώντας την εξίσωση 3.12:

$$m_{f/c}(z) = p_{f/c} \cdot C_{f/c}(z) \qquad (3.13)$$

Ο όρος p εκφράζει την πυκνότητα των σωματιδίων. Οι δείκτες f/c δηλώνουν τα λεπτά και αδρά σωματίδια αντίστοιχα. Στην περίπτωσή μας μπορούμε να υποθέσουμε ότι τα λεπτά σωματίδια αποτελούνται κυρίως από θειϊκές ενώσεις, ενώ τα αδρά από ηφαιστειακή τέφρα. Από αυτή την υπόθεση προκύπτει ότι η πυκνότητα των σωματιδίων προσεγγιστικά θα είναι $1{,}5 g/cm^3$ και $2{,}6 g/cm^3$ αντίστοιχα.

Από το γινόμενο της κατακόρυφης συγκέντρωσης των σωματιδίων, όπως υπολογίζεται από το LIRIC ($C_{f/c}$), με τη μέση τιμή του συντελεστή εξασθένησης και οπισθοσκέδασης των σωματιδίων [$\alpha_{f/c}(\lambda)$, $\beta_{f/c}(\lambda)$] στην ατμοσφαιρική κολώνα, όπως υπολογίζεται από το CIMEL, προκύπτει η κατακόρυφη κατανομή των οπτικών ιδιοτήτων των σωματιδίων [$\alpha_{aer}(z)$ και $\beta_{aer}(z)$]:

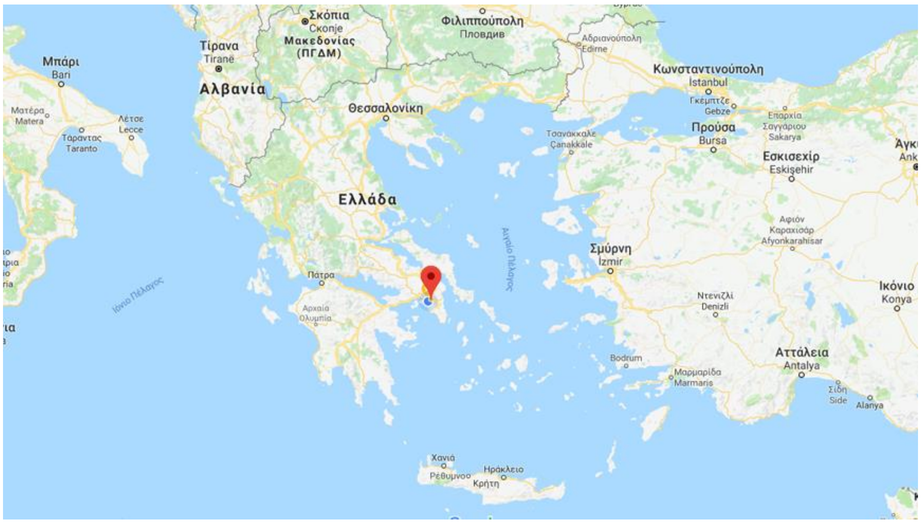
$$a_{aer}(\lambda, z) = a_f(\lambda) \cdot C_f(z) + a_c(\lambda) \cdot C_c(z) \qquad (3.14)$$

$$\beta_{aer}(\lambda, z) = \beta_f(\lambda) \cdot C_f(z) + \beta_c(\lambda) \cdot C_c(z) \qquad (3.15)$$

3.4 Πειραματική Διάταξη Συστήματος Lidar Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

Σε αυτή την ενότητα γίνεται μια περιγραφή της διάταξης lidar που είναι εγκατεστημένη στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και με την οποία θα γίνει η σύγκριση των δεδομένων μέτρησης.

Η διάταξη αυτή λειτουργεί ως ένα σύστημα καταγραφής 6 μηκών κύματος ελαστικής οπισθοσκέδασης και σκέδασης Raman, εκπέμποντας 3 μήκη κύματος στις συχνότητες $355nm$, $532nm$ και $1064nm$ αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα, η διάταξη καταγράφει την ελαστική οπισθοσκεδάζουσα ακτινοβολία καθενός από τα παραπάνω μήκη κύματος και επιπλέον καταγράφει τις οπισθοσκεδάζουσες ακτινοβολίες από τα μήκη κύματος στα $355nm$ και $532nm$ οι οποίες λόγω σκέδασης Raman από το ατμοσφαιρικό άζωτο διαμορφώνονται στα $387nm$ και $607nm$ αντίστοιχα. Επίσης καταγράφει την οπισθοσκεδάζουσα ακτινοβολία από τη δέσμη στα $355nm$ η οποία επιστρέφει στα $407nm$ λόγω σκέδασης Raman σε υδρατμούς της ατμόσφαιρας.



Εικόνα 3-2: Τοποθεσία διάταξης Lidar EOLE (37.977071, 23.782489)

Συνοπτικά ως πηγή ακτινοβολίας χρησιμοποιείται ένα παλμικό σύστημα laser, του οποίου το μήκος κύματος εξαρτάται από το είδος του στόχου που θέλουμε να μελετήσουμε. Μέσω μιας οπτικής διάταξης κατόπτρων η εκπεμπόμενη δέσμη laser κατευθύνεται στον υπό μελέτη ατμοσφαιρικό όγκο. Παράλληλα, ένα μικρό μέρος της δέσμης χρησιμοποιείται για την καταγραφή της ενέργειας του εκπεμπόμενου παλμού, του μήκους κύματος, καθώς και για να σηματοδοτήσει τη χρονική έναρξη της καταγραφής του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος lidar (trigger).

Στη συνέχεια το σύστημα λήψης συλλέγει την ακτινοβολία laser που οπισθοσκεδάζεται από τον ατμοσφαιρικό όγκο με τη χρήση ενός οπτικού τηλεσκοπίου. Η ακτινοβολία αυτή οδηγείται σε ένα φασματικό αναλυτή ο οποίος την αναλύει στα διάφορα μήκη κύματος από τα οποία αποτελείται, με τελικό σκοπό να επιλεγούν τα μήκη κύματος που περιέχουν χρήσιμες πληροφορίες και να αποκοπούν οι υπόλοιπες ανεπιθύμητες ακτινοβολίες.

Έπειτα, τα οπτικά σήματα που απομονώθηκαν οδηγούνται με τη βοήθεια ενός συστήματος φακών σε φωτοανιχνευτές για να μετατραπούν σε ηλεκτρικά σήματα και ακολούθως να ψηφιοποιηθούν. Στο τελικό στάδιο γίνεται η επεξεργασία των παραπάνω δεδομένων με τη χρήση ειδικού λογισμικού ώστε να εξαχθούν οι κατακόρυφες κατανομές των οπτικών ιδιοτήτων τους.

Εικόνα 3-3: Τοποθεσίες της διάταξης Lidar EOLE (A) και του σημείου πτήσης του UAV που φέρει την πρότυπη ανιχνευτική διάταξη (B)

Παρακάτω ακολουθεί μια πιο λεπτομερής τεχνική ανάλυση των στοιχείων που αποτελούν τη διάταξη Lidar EOLE, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΗΓΗ LASER

Στη διάταξη Raman-lidar του ΕΜΠ, ως πηγή laser χρησιμοποιείται ένα παλμικό laser στερεάς κατάστασης Nd:YAG [Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet] της Spectra-Physics, το οποίο εκπέμπει ακτινοβολία στα $1064nm$ με ενέργεια $850mJ$ ανά παλμό και επαναληψιμότητα $10Hz$ (22). Παρεμβάλλοντας στην αρχική δέσμη δύο μη γραμμικούς κρυστάλλους $\mathrm{KD^{*}P}$, δημιουργούνται δύο επιπλέον δέσμες, η δεύτερη και η τρίτη αρμονική οι οποίες είναι στα $532nm$ και $355nm$ αντίστοιχα.

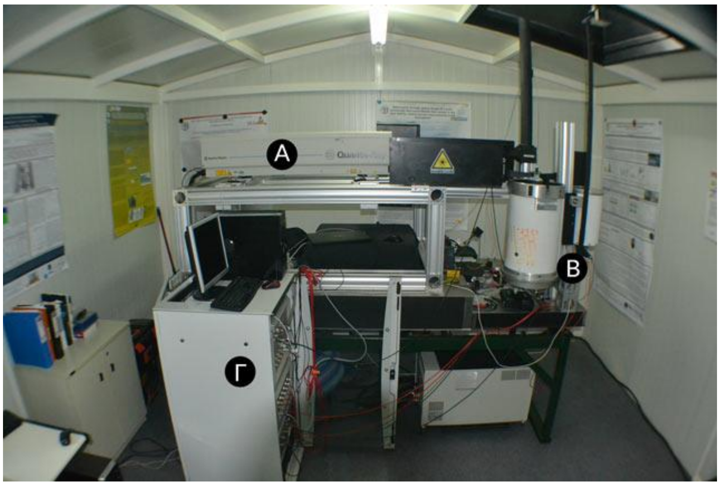
ΟΠΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ:

Κάτοπτρο εκπομπής της ακτινοβολίας: Η εξερχόμενη δέσμη εκπέμπεται παράλληλα με τον οπτικό άξονα του τηλεσκοπίου λήψης, ο οποίος μπορεί να σχηματίσει γωνία μέχρι $0.98\ mrad$ με τον κατακόρυφο οπτικό άξονα του τηλεσκοπίου. Η ευθυγράμμιση της εκπεμπόμενης δέσμης σε σχέση με τον οπτικό άξονα του τηλεσκοπίου λήψης γίνεται με τη βοήθεια ενός διχρωϊκού κάτοπτρου με μέγιστη ανακλαστικότητα στο μήκος κύματος του laser. Το διχρωϊκό κάτοπτρο προέρχεται από την εταιρεία Laseroptik και παρέχει μέγιστη ανακλαστικότητα [$\approx 100\%$] ταυτόχρονα στα 355, 532 και $1064\ nm$, σε πρόπτωση 45^o (22).

Τηλεσκόπιο λήψης: Για τη συλλογή της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας χρησιμοποιείται ένα τηλεσκόπιο τύπου Cassegrain, κατασκευασμένο στο Service d'Aéronomie du CNRS [Γαλλία]. Ο οπτικός δέκτης είναι ένα κοίλο παραβολικό κάτοπτρο [με μειωμένα οπτικά σφάλματα στο εστιακό επίπεδό του] διαμέτρου 300 mm και εστιακής απόστασης $600mm$. Επομένως, το γωνιακό άνοιγμα του τηλεσκοπίου είναι 14.036°. Το παραβολικό κάτοπτρο έχει επιστρωθεί με φθοριούχο μαγνήσιο ώστε να παρουσιάζει αυξημένη ανακλαστικότητα ($> 85\%$) στη φασματική περιοχή $355 - 1064\ nm$ (22).

ΦΩΤΟΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑΣΤΕΣ

Για την ανίχνευση του σήματος χρησιμοποιείται μία φωτοδίοδος χιονοστιβάδας πυριτίου ($Si - APD$) διαμέτρου $1.5\ mm$, της εταιρείας Hamamatsu με μέγιστη δυνατή τάση λειτουργίας ίση με $255V$. Στην πράξη η τάση λειτουργίας του APD είναι της τάξης των $220 - 240V$ (22).

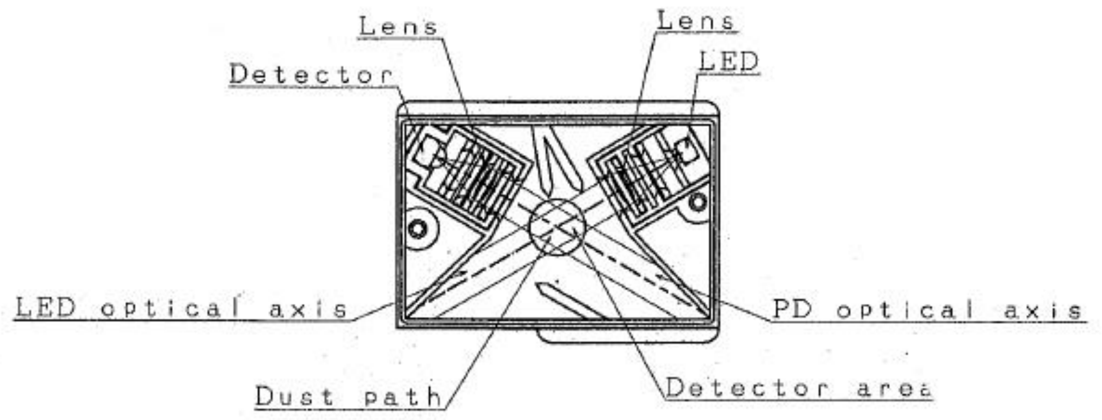


Εικόνα 3-4: Διάταξη EOLE Lidar του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Στην εικόνα φαίνονται, η παλμική πηγή Laser ND:YAG της διάταξης (A), το τηλεσκόπιο λήψης (B) και το σύστημα καταγραφής του εξερχόμενου σήματος (Γ).

4 ΠΡΟΤΥΠΗ ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ $PM_{2.5}$-PM_{10}

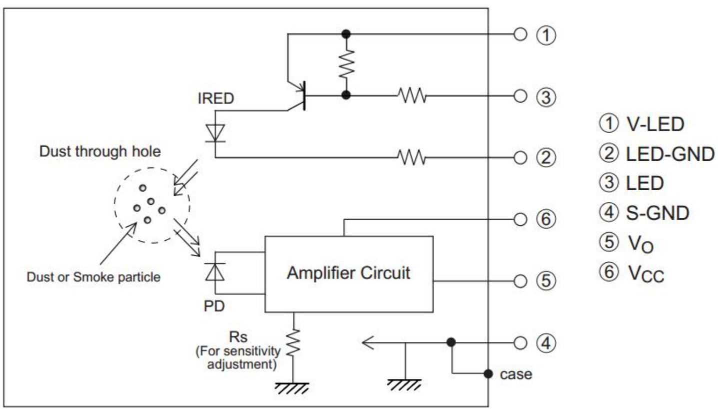
4.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Ο ανιχνευτής που θα χρησιμοποιήσουμε για τις μετρήσεις είναι το μοντέλο GP2Y1010 της εταιρίας Sharp και αποτελείται από δύο βασικά στοιχεία. Μια 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 αποτελείται από το ρεύμα που παράγει η φωτοδίοδος, αφού πρώτα ενισχυθεί από έναν ενισχυτή τάσης.



Εικόνα 4-1: Τα βασικά στοιχεία του ανιχνευτή. Στα δύο επάνω άκρα είναι τοποθετημένα η πηγή φωτός και η φωτοδίοδος, ενώ στο κέντρο είναι η υποδοχή αέρα (περιοχή ανίχνευσης). Με διακεκομμένες γραμμές φαίνονται οι άξονες της φωτοδιόδου και της πηγής LED (34).

ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ

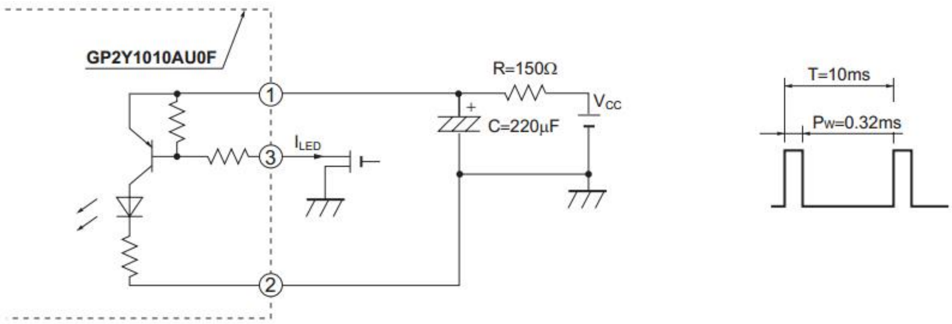


Εικόνα 4-2: Σχεδιάγραμμα της εσωτερικής συνδεσμολογίας του ανιχνευτή (34).

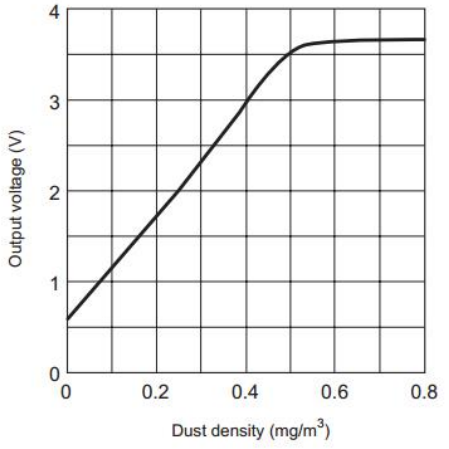
ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ

ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	$46\ x\ 30\ x\ 18\ (mm)$
ΜΕΓΕΘΟΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΙΜΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	$<\ 10\mu m$
VOLT ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	$5\ \pm\ 0{,}5\ V$
ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ	$<\ 20\ mA$
ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΙΜΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ	$\approx\ 6mg\ /\ m^3$
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	$-10℃ < T < 65\ ℃$
ΥΓΡΑΣΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	$< 95\%$
ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ	$0{,}35 - 0{,}65V/(100\mu g/m^3)$
ΕΞΕΡΧΟΜΕΝΟ ΣΗΜΑ	Αναλογικό
ΚΟΣΤΟΣ	$\approx\ 10€$

Πίνακας 4-1: Τεχνικές προδιαγραφές ανιχνευτή



Εικόνα 4-3: Στα αριστερά φαίνεται το κύκλωμα εισόδου τάσης ρεύματος στην πηγή LED. Στα δεξιά είναι μια απεικόνιση των παλμών που δημιουργεί η πηγή, με περίοδο $T = 10ms$ και εύρος παλμού $P_w = 0.32ms$ (34).



Εικόνα 4-4: Ενδεικτικό διάγραμμα του κατασκευαστή για τη σχέση της πυκνότητας των ρύπων με τη τάση του σήματος. Το σήμα δεν ξεκινάει από το 0, το οποίο είναι αναμενόμενο καθώς ενισχύεται στην έξοδο του (34).

4.2 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.

Εικόνα 4-4: Πλακέτα μικροελεγκτή ARDUINO UNO

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.

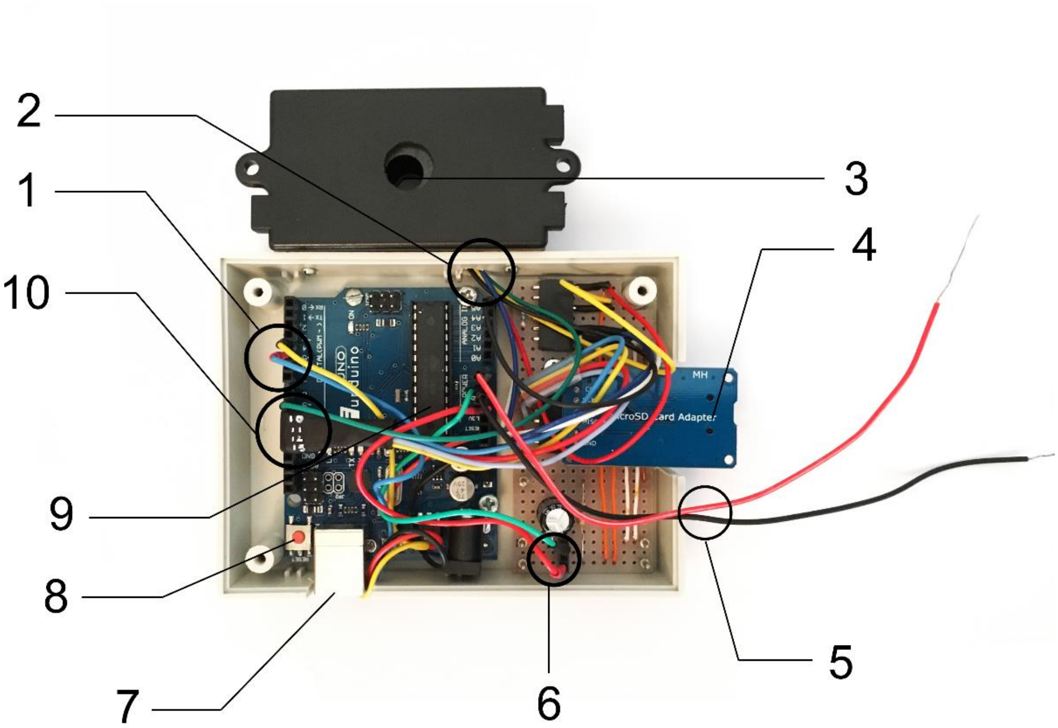
ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΠΛΑΚΕΤΑΣ ARDUINO UNO

MICROCONTROLLER	$ATmega328P$
OPERATING VOLTAGE	$5V$
INPUT VOLTAGE (RECOMMENDED)	$7-12V$
INPUT VOLTAGE (LIMIT)	$6-20V$
DIGITAL I/O PINS	$14\ (of\ which\ 6\ provide\ PWM\ output)$
PWM DIGITAL I/O PINS	6
ANALOG INPUT PINS	6
DC CURRENT PER I/O PIN	$20\ mA$
DC CURRENT FOR 3.3V PIN	$50\ mA$
FLASH MEMORY	$32\ KB$ *(ATmega328P) of which 0.5 KB used by bootloader*
SRAM	$2\ KB$ *(ATmega328P)*
EEPROM	$1\ KB$ *(ATmega328P)*
CLOCK SPEED	$16\ MHz$
LED_BUILTIN	13
LENGTH	$68.6\ mm$

Πίνακας 4-2: Τεχνικές προδιαγραφές της πλακέτας Arduino UNO

4.3 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΠΑΝΩ ΣΤΗΝ ΠΛΑΚΕΤΑ ARDUINO

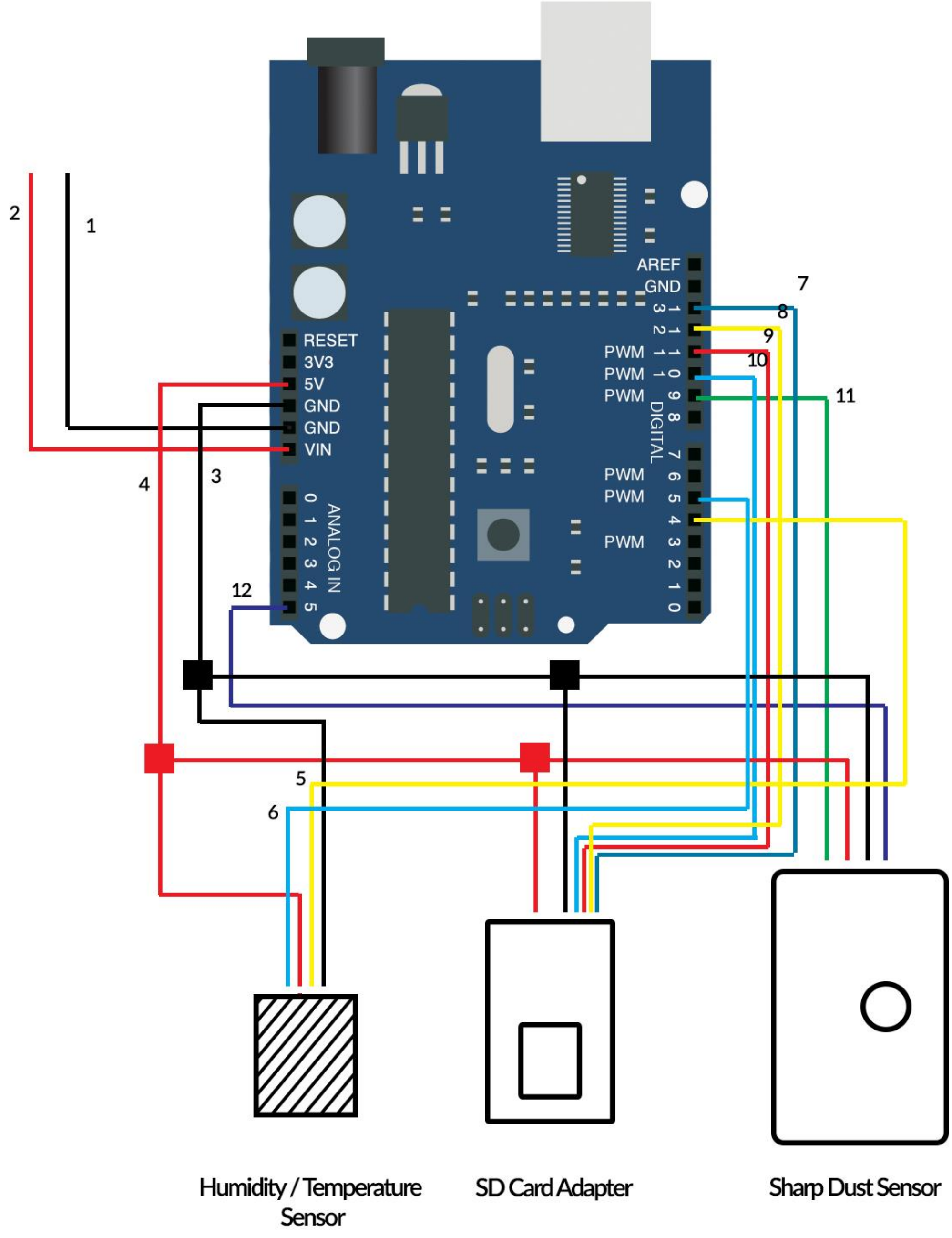
Η συνολική διάταξη περιλαμβάνει την πλακέτα η οποία παίρνει τροφοδοσία $5V$ από το UAV, με τη σειρά της αυτή δίνει τροφοδοσία $5V$ στον ανιχνευτή ο οποίος επιστρέφει ένα ενισχυμένο αναλογικό σήμα εξόδου. Αυτό το αναλογικό σήμα το εισάγουμε στον μικροελεγκτή ο οποίος το επεξεργάζεται, το μετατρέπει σε 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.



Εικόνα 4-5: Φωτογραφία του ανιχνευτή συνδεδεμένο πάνω στην πλακέτα του μικροελεγκτή

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

ΣΧΕΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑΣ



Εικόνα 4-6: Σχεδιάγραμμα συνδεσμολογίας του ανιχνευτή

1. **Power Ground**
2. **5V External Power**
3. **Sensors Ground**
4. **Sensors 5V Power**
5. **Temp. Digital Output**
6. **Humid. Digital Output**
7. **SD Adapter CS**
8. **SD Adapter SCK**
9. **SD Adapter MOSI**
10. **SD Adapter MISO**
11. **Dust Sensor Digital Input**
12. **Dust Sensor Analog Output**

4.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ

Η διαδικασία βαθμονόμησης αποτελείται από τρία βασικά στάδια. Αρχικό 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. Να φροντίσουμε ώστε τα δύο όργανα να 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 $\approx 30\mu g/m^3$).

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 έχει σχεδιαστεί ώστε να καταγράφει δεδομένα ανά δέκατο του δευτερολέπτου, επομένως ο σκοπός ήταν να πάρουμε το μέσο όρο των μετρήσεων και να τα τμηματοποιήσουμε ανά λεπτό, ώστε τα δεδομένα να μπορούν να είναι συγκρίσιμα με τα δεδομένα που πήραμε από τα όργανα αναφοράς τα οποία επίσης τμηματοποιούν τα δεδομένα τους ανά λεπτό. 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. Αυτή η διαδικασία θα γίνει με τη χρήση των στατιστικών δεικτών που θα παρουσιάσουμε παρακάτω.

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:

$$SSE = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \widehat{y_i})^2 \tag{4.1}$$

Όπου το y_i αντιστοιχεί στα δεδομένα της κάθε μέτρησης, ενώ το $\widehat{y_i}$ 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:

$$SS_{tot} = \sum_{i} (y_i - \bar{y})^2 \tag{4.2}$$

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

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} y_i \tag{4.3}$$

Ο δείκτης $r - square$ προκύπτει από τα παραπάνω ως:

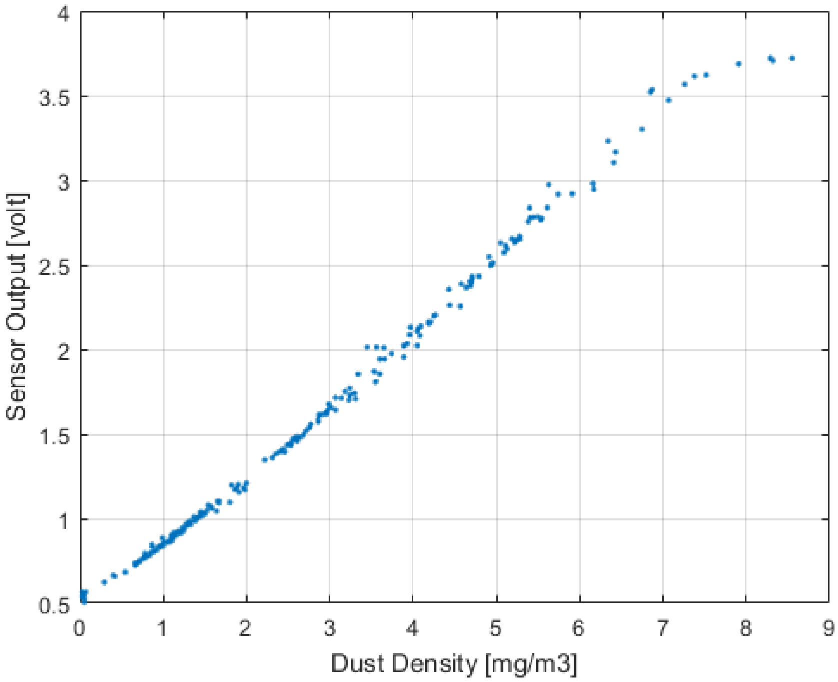
$$R^2 \equiv 1 - \frac{SSE}{SS_{tot}} \tag{4.4}$$

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).

4.4.1 Γενική απόκριση του ανιχνευτή

Στην εικόνα 4-8 φαίνεται η συνολική συμπεριφορά του ανιχνευτή η οποία προέκυψε από μια πρώτη δοκιμαστική μέτρηση μαζί με τον ανιχνευτή TSI Dust Track. 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/m^3 φτάνει σε σημείο κορεσμού



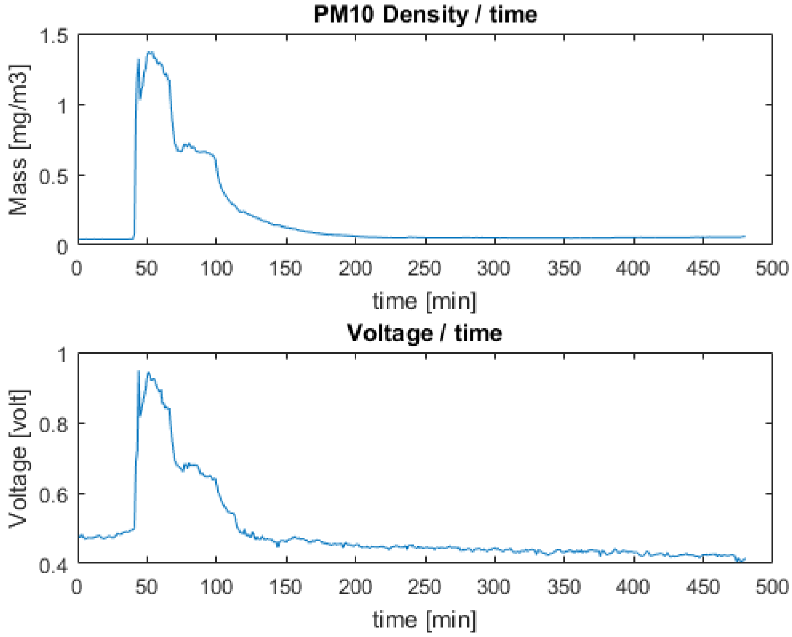
Εικόνα 4-8: Διάγραμμα απόκρισης της πρότυπης ανιχνευτικής διάταξης (τάσης εξόδου) για διάφορες συγκεντρώσεις μάζας σωματιδίων.

4.4.2 Βαθμονόμηση σε κλειστό δωμάτιο με χρήση του TSI Dust Track

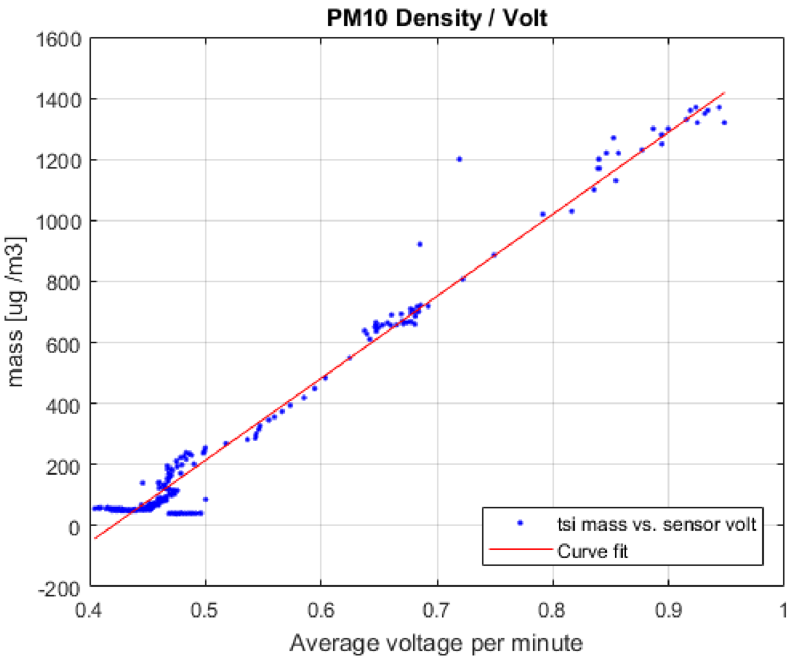
Για τη διαδικασία της βαθμονόμησης χρησιμοποιήσαμε ως όργανο αναφοράς τις μετρήσεις από έναν ανιχνευτή TSI DUST TRACK. Αρχικά τοποθετήσαμε τους δύο ανιχνευτές σε πολύ κοντινή απόσταση μέσα σε κλειστό δωμάτιο, και χρησιμοποιήσαμε μια πηγή παραγωγής ρύπων στην άλλη άκρη του δωματίου ώστε η κατανομή των ρύπων να είναι όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη. Αρχικά ως πηγή ρύπων χρησιμοποιήθηκε ένα τσιγάρο, όμως στον κλειστό χώρο οι συγκεντρώσεις ήταν κατά πολύ μεγαλύτερες απ' ότι στις καθημερινές συνθήκες της ατμόσφαιρας. Για το λόγο αυτό στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν κεριά τα οποία παράγουν ρύπους κυρίως σε $PM10$ και η συγκέντρωσή τους είναι αρκετά χαμηλή ως προς τον όγκο ενός μικρού δωματίου.

Εικόνα 4-7: Όργανο αναφοράς TSI Dust Track

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 1^{ΗΣ} ΜΕΤΡΗΣΗΣ



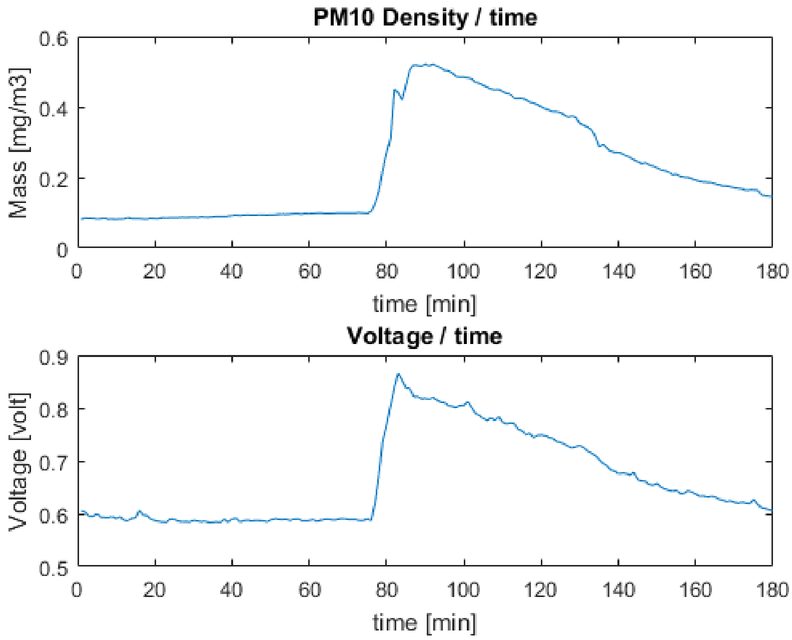
Εικόνα 4-8: Σύγκριση των δεδομένων μάζας από το όργανο TSI DustTrack με τα δεδομένα της τάσης εξόδου από την πρότυπη ανιχνευτική διάταξη, ως προς το χρόνο.



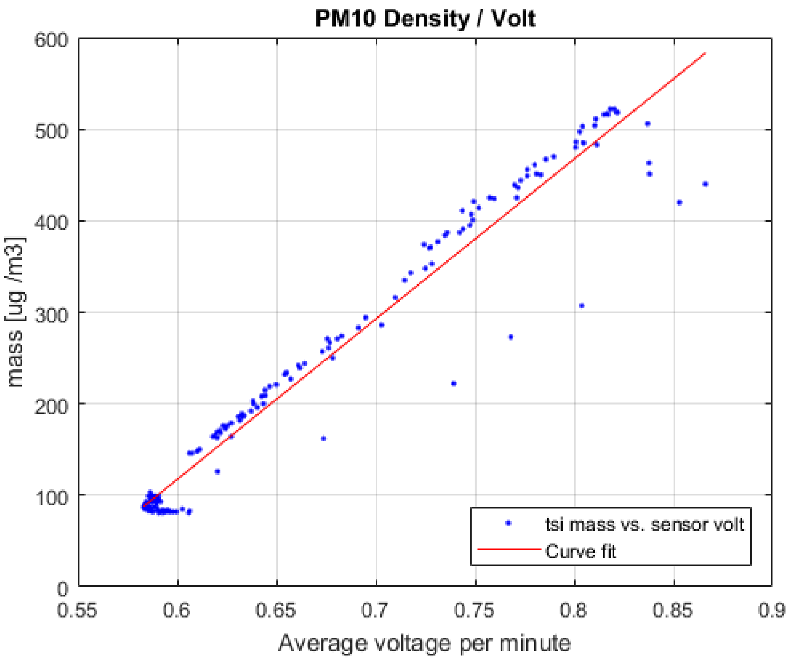
Εικόνα 4-9: Καμπύλη συσχέτισης των δεδομένων μάζας από το όργανο TSI DustTrack με τα δεδομένα της τάσης εξόδου από την πρότυπη ανιχνευτική διάταξη.

$$R - square: 0.9719$$

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 2ΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ



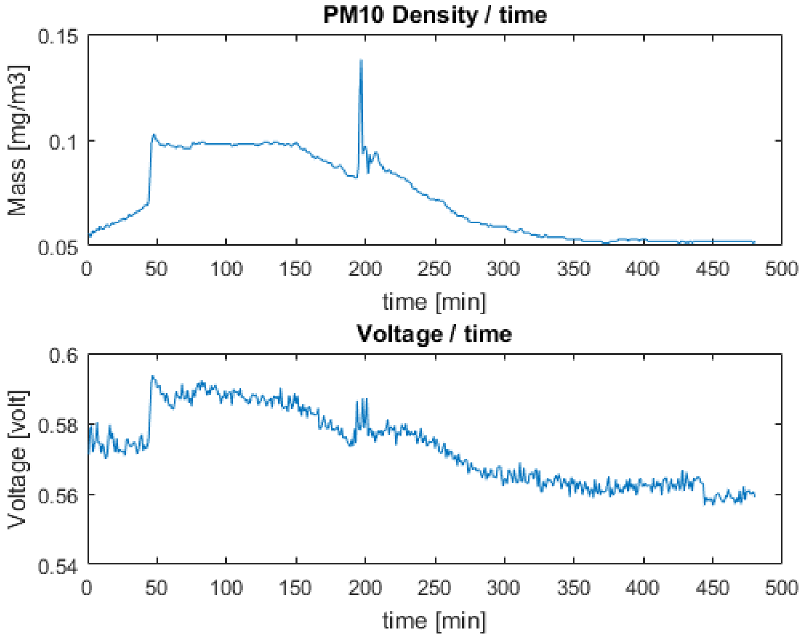
Εικόνα 4-10: Σύγκριση των δεδομένων μάζας από το όργανο TSI DustTrack με τα δεδομένα της τάσης εξόδου από την πρότυπη ανιχνευτική διάταξη, ως προς το χρόνο.



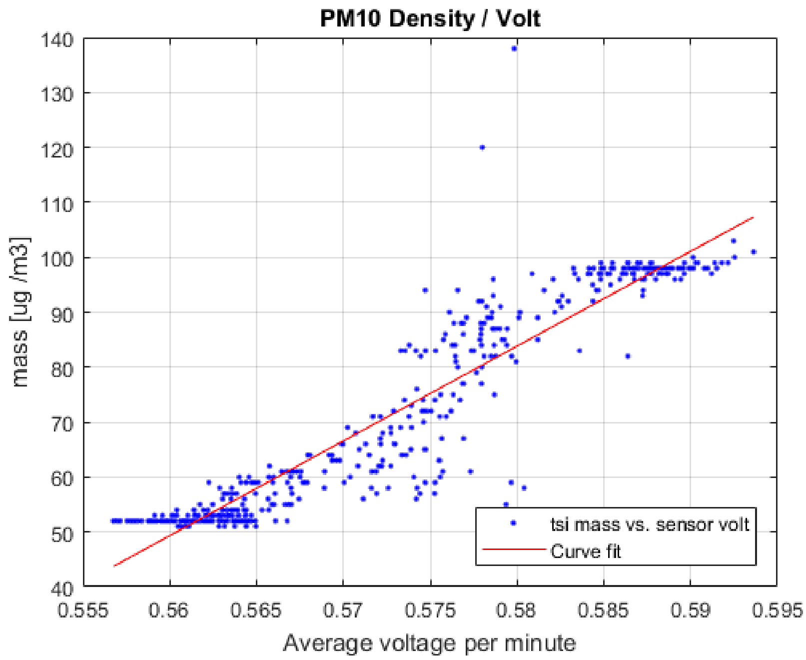
Εικόνα 4-11: Καμπύλη συσχέτισης των δεδομένων μάζας από το όργανο TSI DustTrack με τα δεδομένα της τάσης εξόδου από την πρότυπη ανιχνευτική διάταξη.

$$R - square: 0.9565$$

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 3ΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ



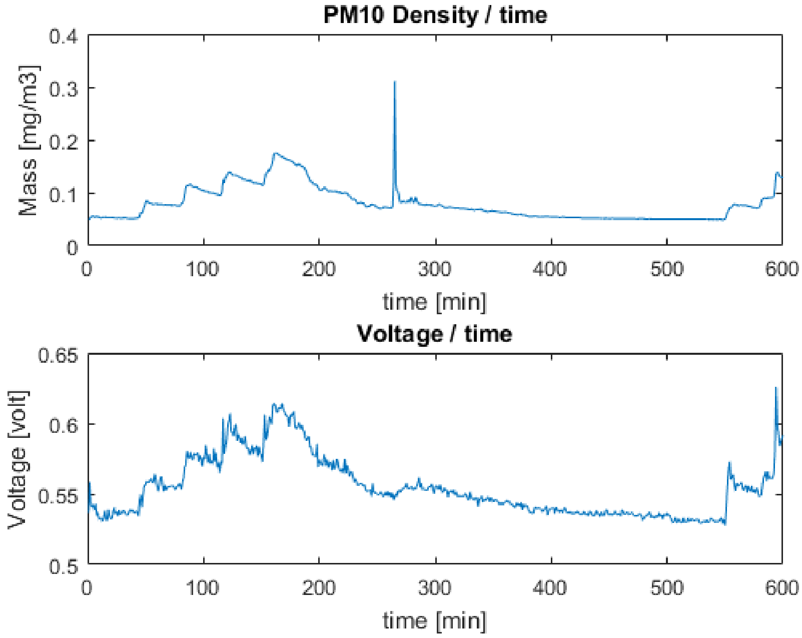
Εικόνα 4-12: Σύγκριση των δεδομένων μάζας από το όργανο TSI DustTrack με τα δεδομένα της τάσης εξόδου από την πρότυπη ανιχνευτική διάταξη, ως προς το χρόνο.



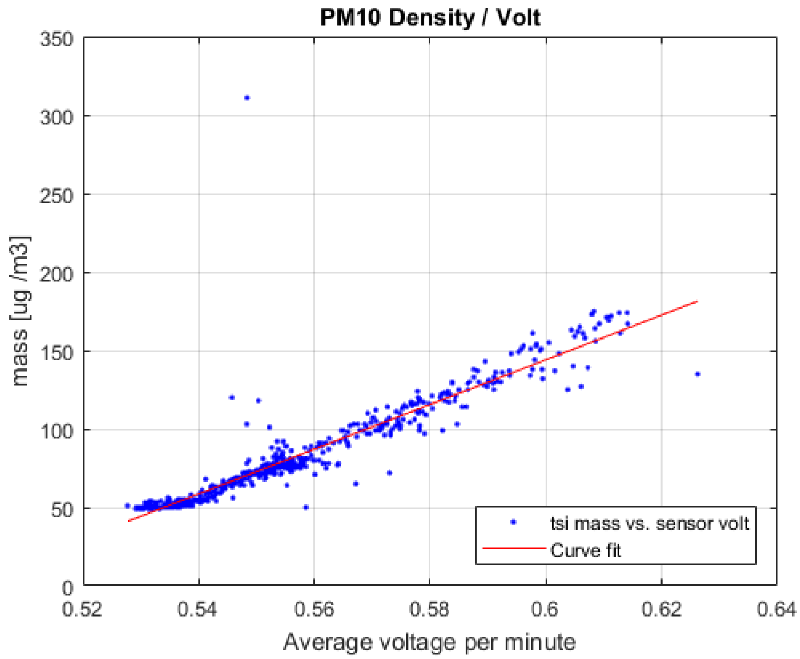
Εικόνα 4-13: Καμπύλη συσχέτισης των δεδομένων μάζας από το όργανο TSI DustTrack με τα δεδομένα της τάσης εξόδου από την πρότυπη ανιχνευτική διάταξη.

$$R - square: 0.8821$$

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 4ΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ



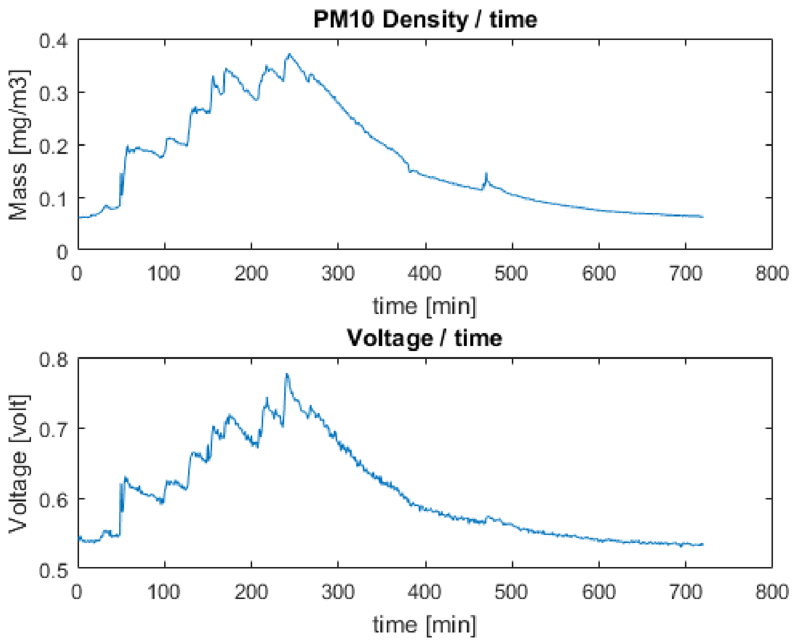
Εικόνα 4-14: Σύγκριση των δεδομένων μάζας από το όργανο TSI DustTrack με τα δεδομένα της τάσης εξόδου από την πρότυπη ανιχνευτική διάταξη, ως προς το χρόνο.



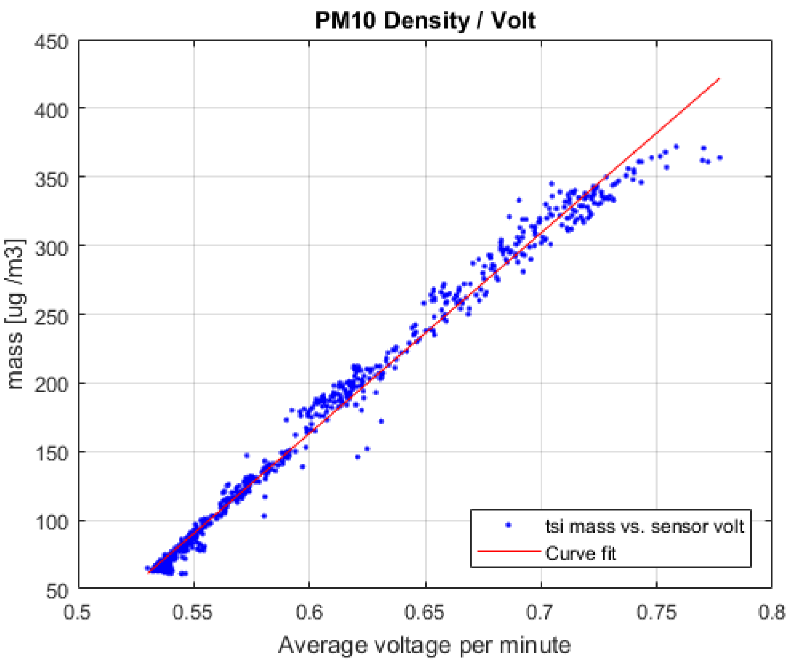
Εικόνα 4-15: Καμπύλη συσχέτισης των δεδομένων μάζας από το όργανο TSI DustTrack με τα δεδομένα της τάσης εξόδου από την πρότυπη ανιχνευτική διάταξη.

$$R - square: 0.8588$$

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 5ΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ



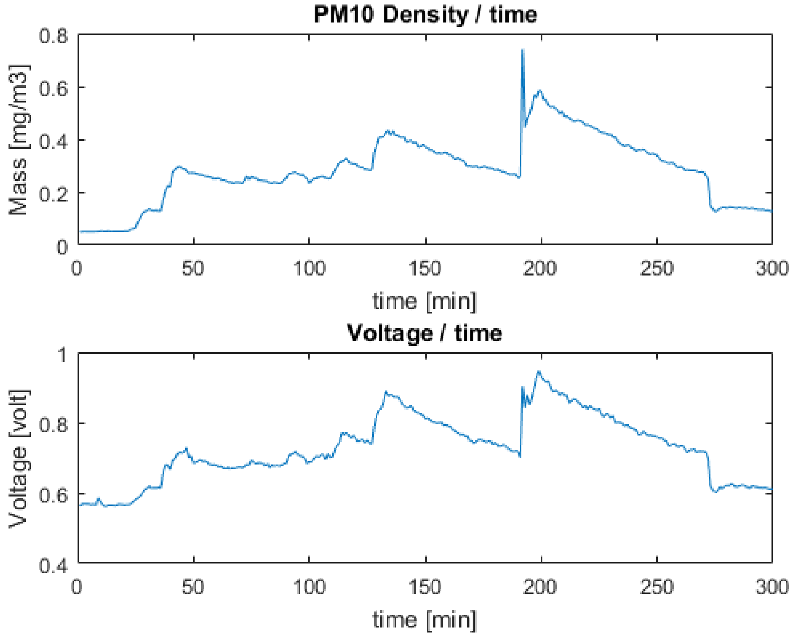
Εικόνα 4-16: Σύγκριση των δεδομένων μάζας από το όργανο TSI DustTrack με τα δεδομένα της τάσης εξόδου από την πρότυπη ανιχνευτική διάταξη, ως προς το χρόνο.



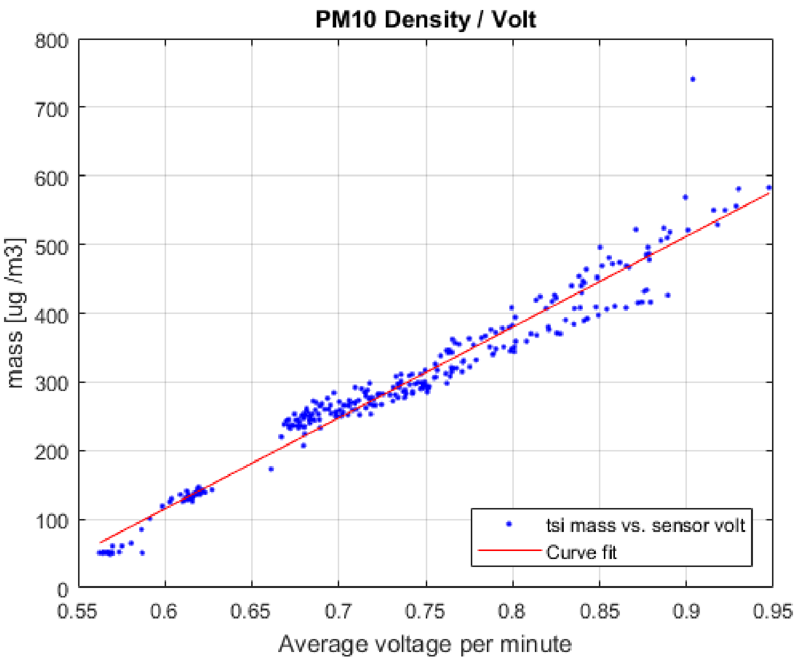
Εικόνα 4-17: Καμπύλη συσχέτισης των δεδομένων μάζας από το όργανο TSI DustTrack με τα δεδομένα της τάσης εξόδου από την πρότυπη ανιχνευτική διάταξη.

$$R - square: 0.9885$$

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 6ΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ



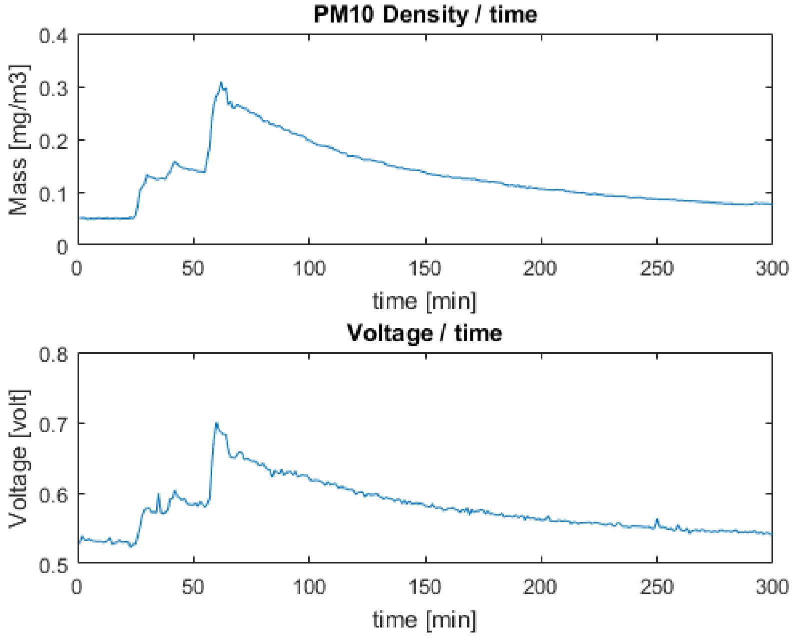
Εικόνα 4-18: Σύγκριση των δεδομένων μάζας από το όργανο TSI DustTrack με τα δεδομένα της τάσης εξόδου από την πρότυπη ανιχνευτική διάταξη, ως προς το χρόνο.



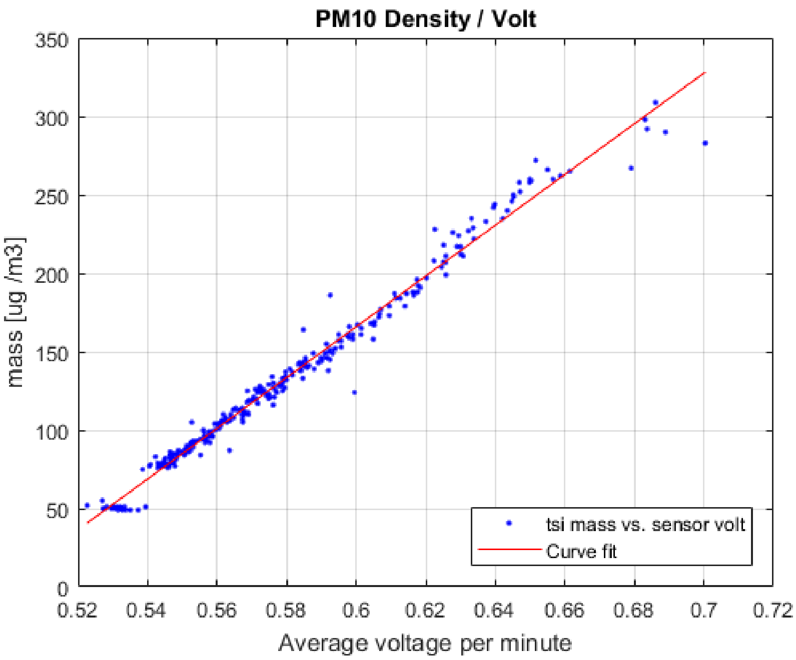
Εικόνα 4-19: Καμπύλη συσχέτισης των δεδομένων μάζας από το όργανο TSI DustTrack με τα δεδομένα της τάσης εξόδου από την πρότυπη ανιχνευτική διάταξη.

$$R - square: 0.9585$$

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 7ΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ



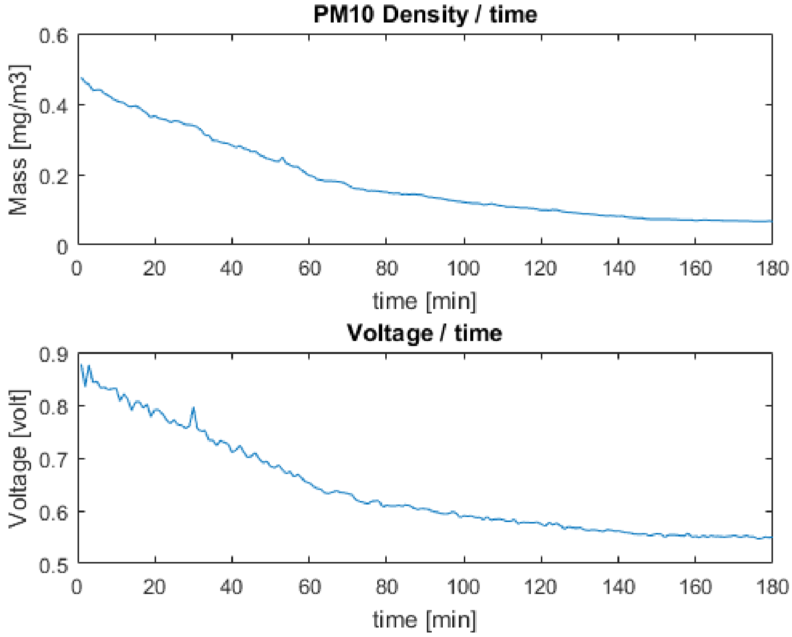
Εικόνα 4-20: Σύγκριση των δεδομένων μάζας από το όργανο TSI DustTrack με τα δεδομένα της τάσης εξόδου από την πρότυπη ανιχνευτική διάταξη, ως προς το χρόνο.



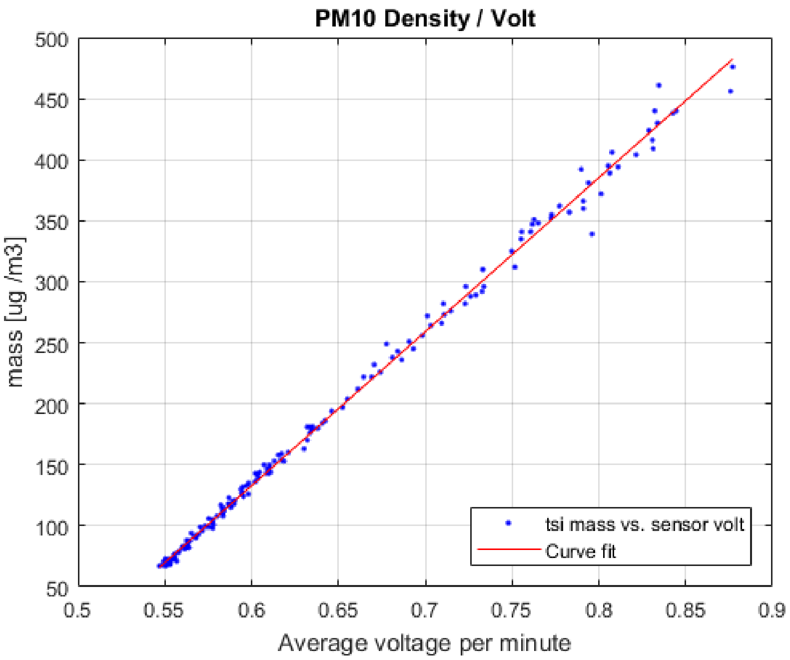
Εικόνα 4-21: Καμπύλη συσχέτισης των δεδομένων μάζας από το όργανο TSI DustTrack με τα δεδομένα της τάσης εξόδου από την πρότυπη ανιχνευτική διάταξη.

$$R - square: 0.9840$$

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 8^{ΗΣ} ΜΕΤΡΗΣΗΣ



Εικόνα 4-22: Σύγκριση των δεδομένων μάζας από το όργανο TSI DustTrack με τα δεδομένα της τάσης εξόδου από την πρότυπη ανιχνευτική διάταξη, ως προς το χρόνο.



Εικόνα 4-23: Καμπύλη συσχέτισης των δεδομένων μάζας από το όργανο TSI DustTrack με τα δεδομένα της τάσης εξόδου από την πρότυπη ανιχνευτική διάταξη.

$$R - square: 0.9966$$

4.4.3 Αποτελέσματα μετρήσεων με τη χρήση του TSI Dust Track

Στις περισσότερες από τις παραπάνω μετρήσεις παρατηρούμε ότι υπήρχε πολύ καλή συμφωνία μεταξύ του σήματος από την πρότυπη ανιχνευτική διάταξη (τάση εξόδου) και των δεδομένων που κατέγραψε το όργανο αναφοράς TSI DustTrack. Για τις συγκεκριμένες μετρήσεις η συμφωνία μεταξύ των δύο είχε να κάνει με την ομοιογένεια των ρύπων μέσα στο χώρο του δωματίου και με την επίδραση που είχε η υγρασία στις μετρήσεις. Παρακάτω παραθέτουμε ένα συγκεντρωτικό πίνακα (πίνακας 4-1) με όλες τις μετρήσεις που έγιναν, τη διάρκειά τους και τους στατιστικούς δείκτες από τις βέλτιστες καμπύλες που προέκυψαν πάνω στα δεδομένα τους.

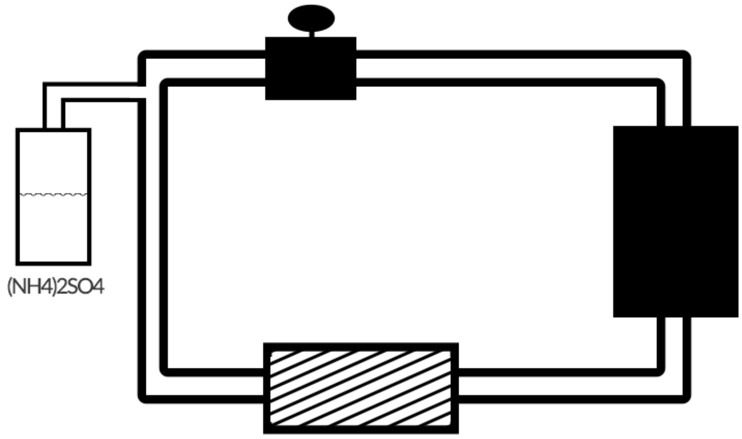
# ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΔΙΑΡΚΕΙΑ (MIN)	SSE	R-SQUARE
1	480	1.2318	0.9719
2	180	0.1788	0.9565
3	480	0.0208	0.8821
4	600	0.0876	0.8588
5	720	0.0761	0.9885
6	300	0.1949	0.9585
7	300	0.0160	0.9840
8	180	0.0082	0.9966

Πίνακας 4-1: Στοιχεία ως προς την ακρίβεια των μετρήσεων που έγιναν με το όργανο αναφοράς TSI DustTrack.

4.4.4 Πειραματική διάταξη βαθμονόμησης περιορισμένου όγκου

Στη συνέχεια έγιναν μετρήσεις στο ερευνητικό εργαστήριο ραδιενέργειας περιβάλλοντος στο κέντρο ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος, με σκοπό η νέα πειραματική διάταξη να έχει περιορισμένο όγκο και ελεγχόμενες συγκεντρώσεις σωματιδίων, ώστε να έχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια μετρήσεων σε χαμηλές συγκεντρώσεις ρύπων.

Σε αυτή τη διάταξη χρησιμοποιήσαμε διάλυμα θειϊκού αμμωνίου. Με μία αντλία αέρα, δημιουργήσαμε ατμοσφαιρικούς ρύπους τους οποίους χωρίσαμε μέσω μια διακλάδωσης και τους κατευθύναμε στο κλειστό μονωμένο κουτί το οποίο περιείχε την πρότυπη ανιχνευτική διάταξη που περιγράψαμε παραπάνω, το όργανο TSI Dust Track κι ένα επιπλέον όργανο μέτρησης κατανομής σωματιδίων ως προς το μέγεθος τους της εταιρίας Grimm. Στη μία πλευρά τοποθετήθηκε μια βάνα αυξομείωσης της ροής του αέρα και στην άλλη ένα φίλτρο που επέστρεφε καθαρό αέρα. Με αυτό τον τρόπο αυξομειώνοντας τη ροή αέρα από τη βάνα μπορούσαμε να ελέγχουμε τη ροή των ατμοσφαιρικών ρύπων που εισέρχονται στο χώρο με τους ανιχνευτές.



Εικόνα 4-24: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ GRIMM

Σε αυτές τις μετρήσεις το όργανο αναφοράς είναι ένας ανιχνευτής καταγραφής πλήθους σωματιδίων ανά λίτρο αέρα, κατανεμημένα ως προς τη διάμετρό τους, της εταιρίας Grimm. Για τη σύγκριση των δεδομένων του Grimm και της ανιχνευτικής μας διάταξης, το πρώτο βήμα ήταν η μετατροπή των δεδομένων του Grimm σε δεδομένα μάζας. Θεωρώντας ότι τα ανιχνεύσιμα σωματίδια είναι σφαιρικά, υπολογίσαμε αρχικά τον όγκο τους για κάθε κανάλι μεγέθους ως $V = (4/3)\ \pi r^3$ και στη συνέχεια υπολογίστηκε η μάζα θεωρώντας επίσης ότι η πυκνότητα του θειικού αμμωνίου είναι $1{,}77 g/cm^3$.

Το δεύτερο βήμα ήταν ο συγχρονισμός των δεδομένων. Για να το πετύχουμε αυτό χρησιμοποιήσαμε την τεχνική της συσχέτισης από την ανάλυση σήματος.

Η συσχέτιση δύο σημάτων f και g δίνεται από τη σχέση:

$$(f \star g)(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f^*(t)\ g(t+\tau)\ dt \qquad (4.5)$$

Όπου f^* είναι ο μιγαδικός συζυγής του σήματος f. Η συζυγία εμφανίζεται επειδή εν γένει τα σήματα είναι μιγαδικά. Στη συγκεκριμένη περίπτωση όπου τα δύο σήματα είναι πραγματικά μπορεί να παραληφθεί. Πιο συγκεκριμένα, για την περίπτωση αυτή όπου τα δύο σήματα (τάση εξόδου ανιχνευτικής διάταξης και μάζα καταμετρημένων σωματιδίων από το Grimm) είναι πραγματικά και διακριτά, η συσχέτιση τους δίνεται από τη σχέση:

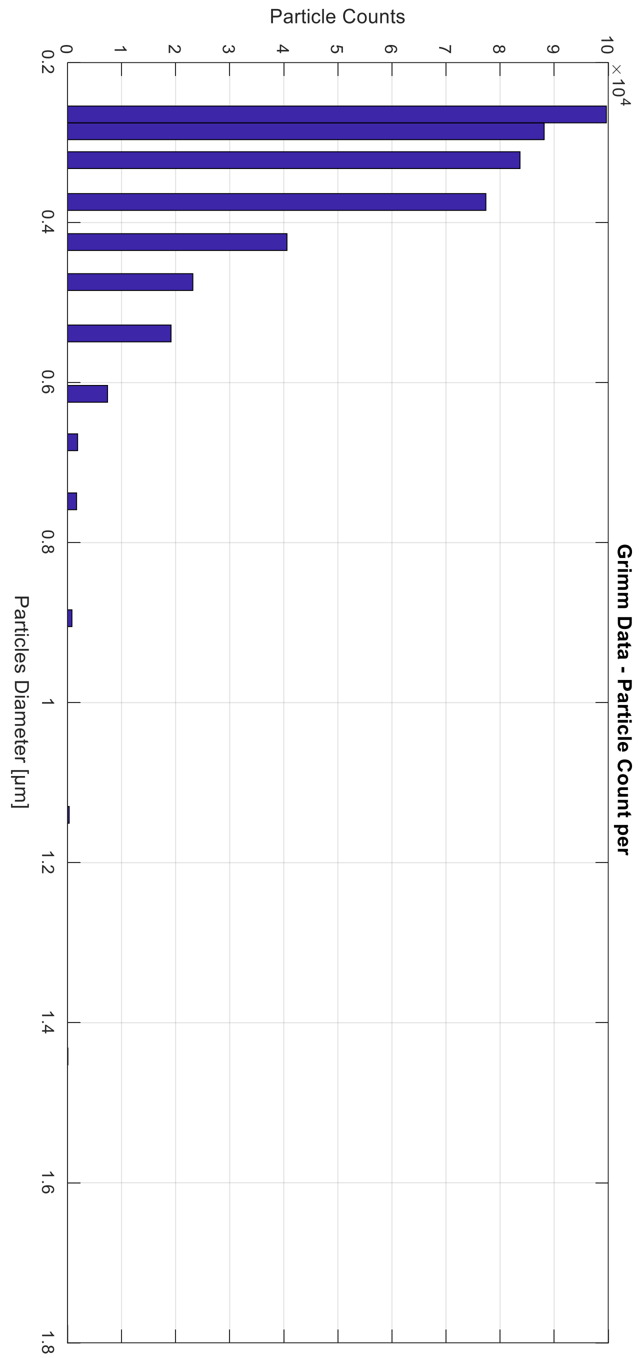
$$(f \star g)(\tau) = \sum_{t=1}^{t_{max}} f(t)\ g(t+\tau) \qquad (4.6)$$

Το σημείο τ για το οποίο θα έχουμε μέγιστο στη συνάρτηση της συσχέτισης, θα αντιστοιχεί στη διόρθωση του σήματος g ως προς το χρόνο τ. Εδώ η $f(t)$ αντιστοιχεί στο σήμα της τάσης εξόδου της ανιχνευτικής διάταξης και η $g(t)$ αντιστοιχεί στα δεδομένα μάζας του Grimm.

Τέλος, πρέπει να βρεθεί ποια είναι τα ακριβή μεγέθη σωματιδίων που μετρά ο ανιχνευτής. Για να το βρούμε αυτό υπολογίστηκε η βέλτιστη καμπύλη για διάφορα κανάλια μεγέθους σωματιδίων του Grimm. Στη συνέχεια, από αυτά επιλέξαμε το μέγιστο και ελάχιστο εύρος ανίχνευσης με βάση το στατιστικό δείκτη ακρίβειας $r - square$ της κάθε καμπύλης. Επομένως επιλέξαμε το ελάχιστο και μέγιστο κανάλι μέτρησης που θα μεγιστοποιούσε τον δείκτη $r - square$ της προκύπτουσας καμπύλης για τα δεδομένα των μετρήσεών μας. Παρακάτω είναι οι διάμετροι σε μm από τα κανάλια μέτρησης του οργάνου Grimm.

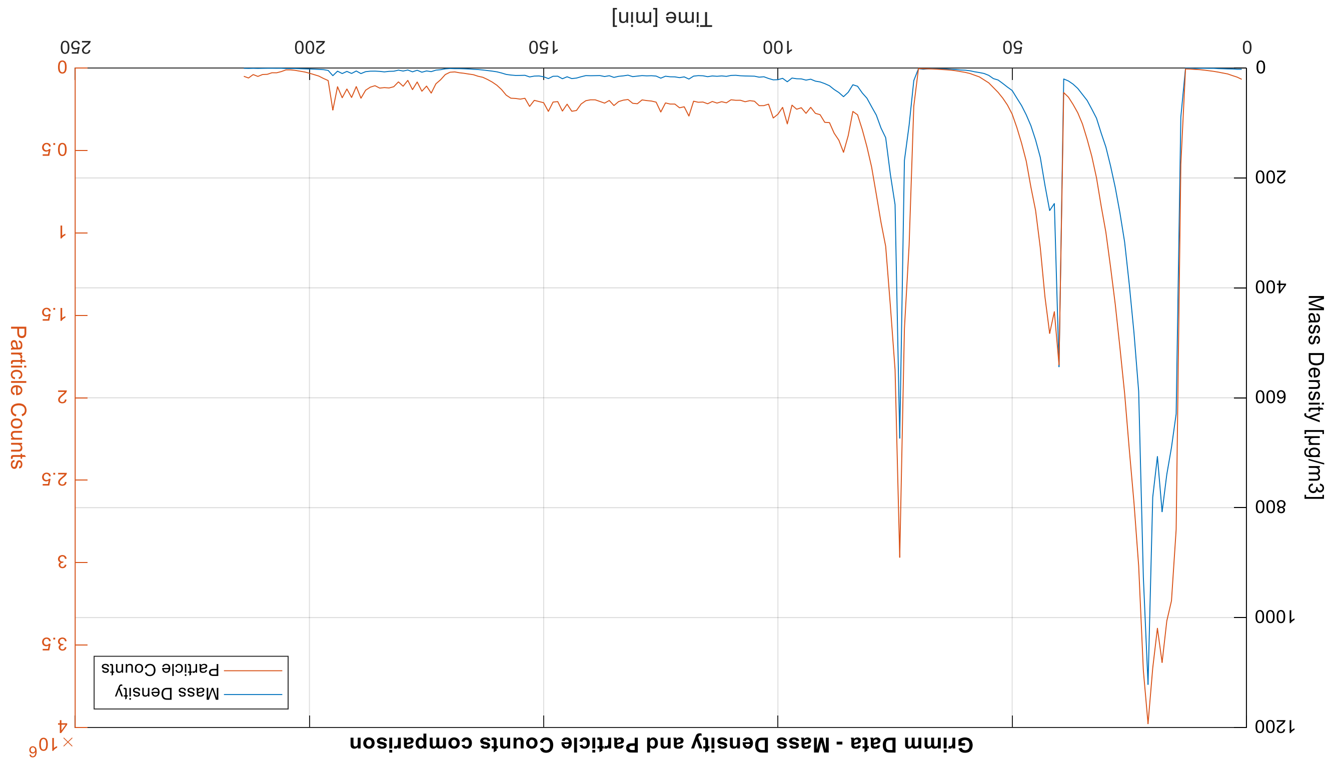
Channel 1	Channel 2	Channel 3	Channel 4	Channel 5	Channel 6	Channel 7	Channel 8
0.2648	0.2858	0.3219	0.3742	0.4243	0.4743	0.5385	0.614
Channel 9	Channel 10	Channel 11	Channel 12	Channel 13	Channel 14	Channel 15	Channel 16
0.6745	0.7483	0.8944	1.1402	1.4422	1.7889	2.2361	2.7386
Channel 17	Channel 18	Channel 19	Channel 20	Channel 21	Channel 22	Channel 23	Channel 24
3.2404	3.7417	4.4721	5.7009	6.9821	7.98436	9.21954	11.1803
Channel 25	Channel 26	Channel 27	Channel 28	Channel 29	Channel 30	Channel 31	
13.6931	16.2019	18.7083	22.3607	27.3861	30.9839	56.5685	

Πίνακας 4-2: Κανάλια καταγραφής μεγέθους αιωρούμενων σωματιδίων του ανιχνευτή Grimm.

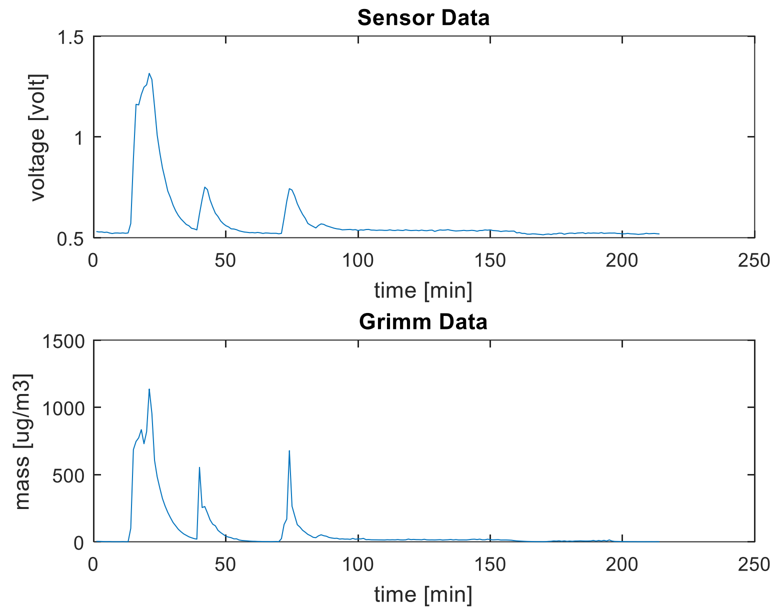


Εικόνα 4-25: Μέση κατανομή συγκέντρωσης σωματιδίων PM10 μέσα στο μονωμένο κουτί

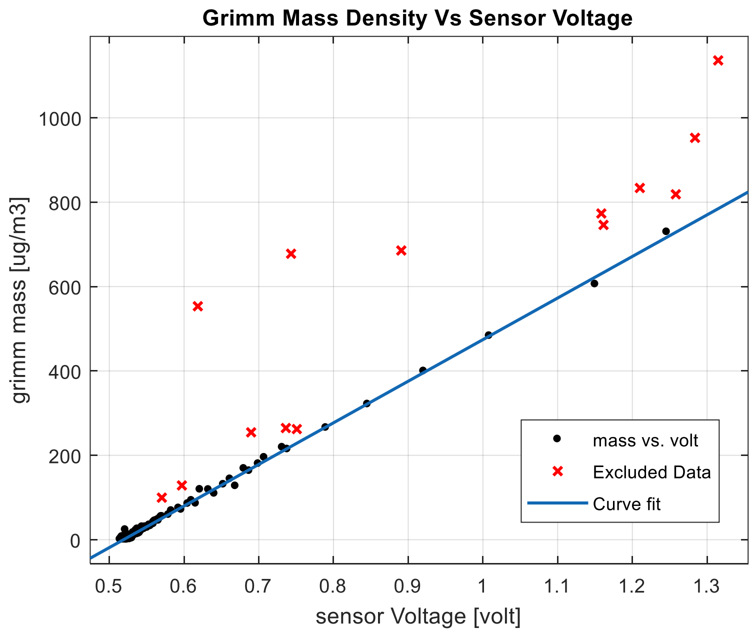
Εικόνα 4-26: Σύγκριση μάζας σωματιδίων και συνολικού αριθμού σωματιδίων μέσα στο μονωμένο κουτί μετρήσεων



ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 1^{ΗΣ} ΜΕΤΡΗΣΗΣ



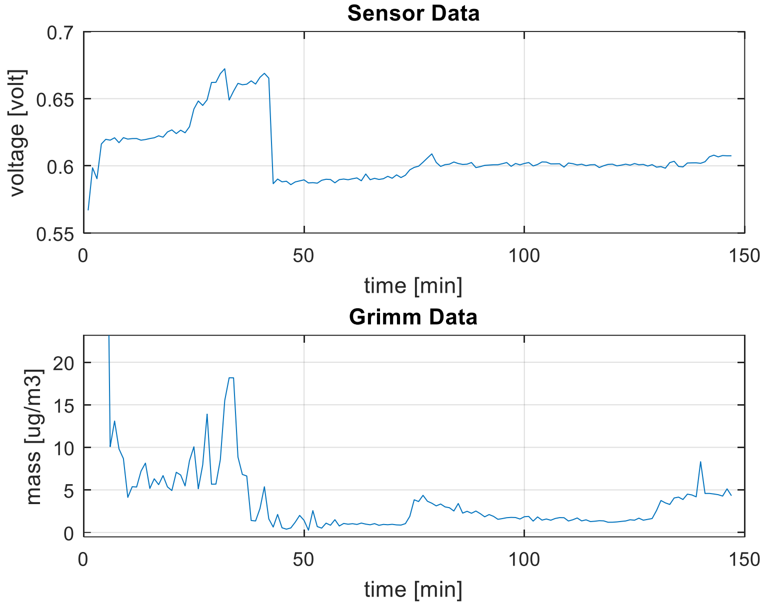
Εικόνα 4-27: Σύγκριση των δεδομένων μάζας από το όργανο Grimm με τα δεδομένα της τάσης εξόδου από την πρότυπη ανιχνευτική διάταξη, ως προς το χρόνο.



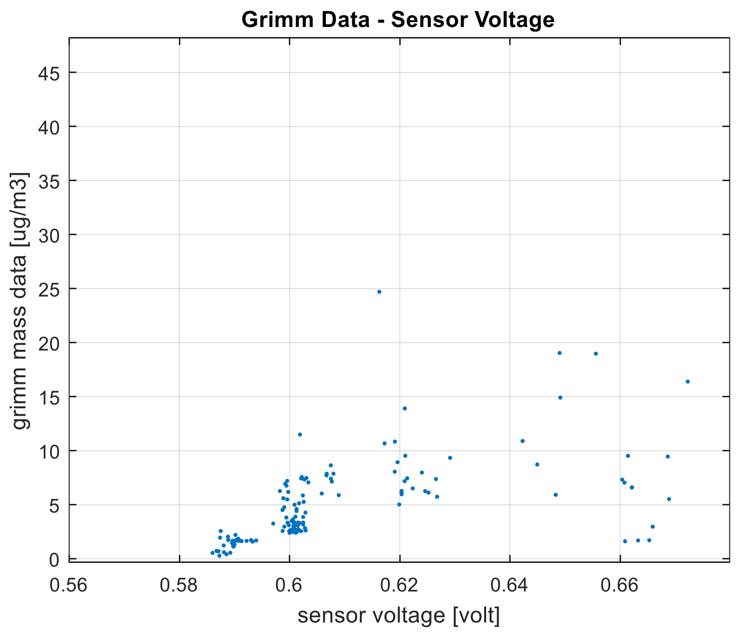
Εικόνα 4-28: Καμπύλη συσχέτισης των δεδομένων μάζας από το όργανο Grimm με τα δεδομένα της τάσης εξόδου από την πρότυπη ανιχνευτική διάταξη.

$$SSE: 4894 \;|\; R - square: 0.9974$$

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 2ΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

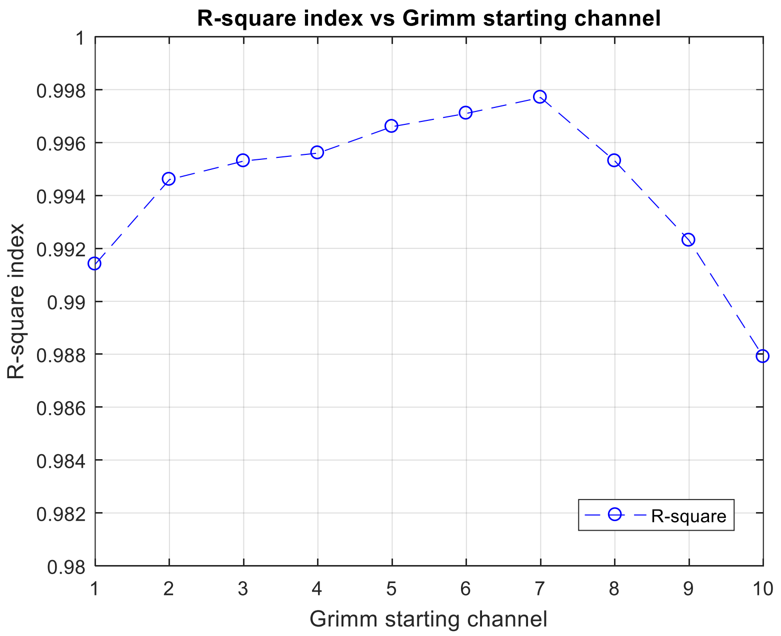


Εικόνα 4-29: Σύγκριση των δεδομένων μάζας από το όργανο Grimm με τα δεδομένα της τάσης εξόδου από την πρότυπη ανιχνευτική διάταξη, ως προς το χρόνο.



Εικόνα 4-30: Συσχέτιση των δεδομένων μάζας από το όργανο Grimm με τα δεδομένα της τάσης εξόδου από την πρότυπη ανιχνευτική διάταξη.

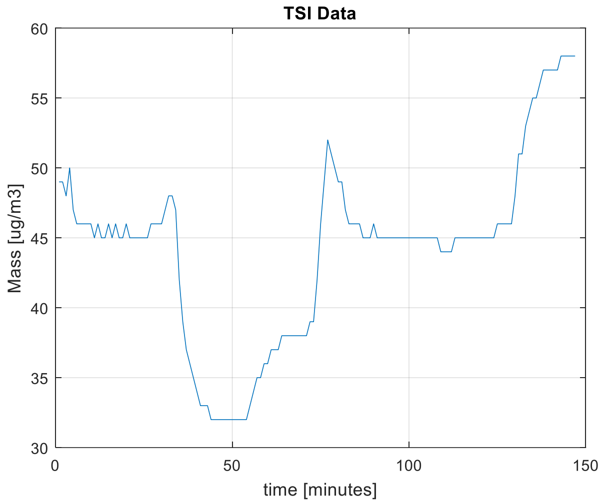
Από την πρώτη μέτρηση που έγινε στο Δημόκριτο παρατηρούμε ότι υπάρχει μια πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ των δεδομένων μάζας του Grimm και της τάσης της ανιχνευτικής μας διάταξης. Χρησιμοποιώντας αυτές τις μετρήσεις διαπιστώσαμε ότι η καλύτερη συσχέτιση μεταξύ των δύο σημάτων (με βάση το στατιστικό δείκτη $r - square$), προκύπτει για τα κανάλια με μεγέθη σωματιδίων από $0{,}5385\mu m$ (Channel 7), μέχρι τα $11{,}1803\mu m$ (Channel 24).



Εικόνα 4-31: Τιμή του στατιστικού δείκτη $r - square$ σε σύγκριση με το κανάλι του ανιχνευτή grimm, απ΄ όπου αρχίσαμε να χρησιμοποιούμε δεδομένα. Παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή του δίνεται για το κανάλι 7, το οποίο αντιστοιχεί σε σωματίδια με διάμετρο $0{,}5385\mu m$. Επομένως μπορούμε να θεωρήσουμε ότι αυτό είναι το ελάχιστο ανιχνεύσιμο μέγεθος σωματιδίων για τη πρότυπη ανιχνευτική διάταξη.

Στη δεύτερη μέτρηση το διάλυμα θειικού αμμωνίου που χρησιμοποιήσαμε ήταν πιο αραιό, με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν λιγότερα συσσωματώματα, τα δε σωματίδια με διάμετρο ανιχνεύσιμη από τον ανιχνευτή ήταν πολύ λίγα. Παρ' όλο που η συσχέτιση μεταξύ των δύο οργάνων δεν είναι πολύ καλή, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα σημεία στα οποία οι συγκεντρώσεις ήταν κοντά στο μηδέν, ώστε να προσδιορίσουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια το offset του ανιχνευτή (τάση εξόδου για μηδενικές συγκεντρώσεις PM_{10}).

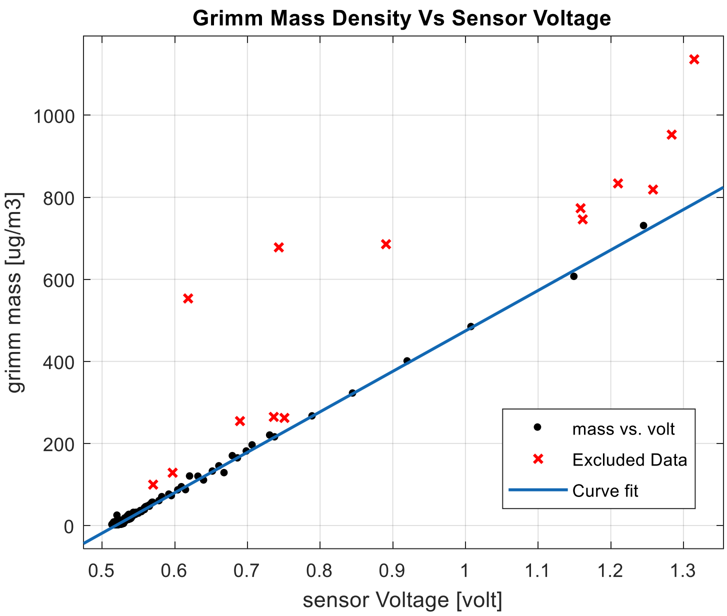
Επίσης στη δεύτερη μέτρηση μέσα στο μονωμένο θάλαμο είχε τοποθετηθεί και ο ανιχνευτής TSI. Παρατηρώντας τις μετρήσεις των τριών οργάνων παρατηρούμε ότι οι μετρήσεις του TSI είναι πολύ μεγαλύτερες από τις μετρήσεις του Grimm, ενώ δεν προκύπτει κάποια εμφανής συσχέτιση με τις μετρήσεις της πρότυπης ανιχνευτικής διάταξης. Αυτό συνεπάγεται ότι το εύρος μεγέθους των μετρήσιμων σωματιδίων από το μηχάνημα TSI, δεν ταυτίζεται με αυτό της ανιχνευτικής διάταξης που χρησιμοποιούμε. Για το λόγο αυτό δε θα λάβουμε υπόψη τις προηγούμενες μετρήσεις που έγιναν αποκλειστικά με το TSI.



Εικόνα 4-32: Χρονική εξέλιξη της συγκέντρωσης σωματιδίων PM_{10} σύμφωνα με το όργανο μέτρησης TSI Dust Track

4.4.5 Αποτελέσματα

Από τις παραπάνω μετρήσεις αυτή που θα χρησιμοποιήσουμε ως μέτρηση αναφοράς είναι η πρώτη μέτρηση που έγινε στο Ερευνητικό Κέντρο του Δημόκριτου (με δείκτη $R - square$: 0.9974). Σε αυτή τη μέτρηση έχουν αφαιρεθεί ορισμένα δεδομένα όπως φαίνεται στην εικόνα 4-32, τα οποία αντιστοιχούν σε λανθασμένες μετρήσεις των δύο οργάνων. Τα σημεία αυτά προέκυψαν μέσα από τους στατιστικούς δείκτες, ώστε η απόρριψή τους να έχει ως αποτέλεσμα καλύτερες τιμές ως προς τους δείκτες αυτούς.



Εικόνα 4-32: Καμπύλη συσχέτισης των δεδομένων μάζας από το όργανο Grimm με τα δεδομένα της τάσης εξόδου από την πρότυπη ανιχνευτική διάταξη.

$$Mass\ Density(mg/m^3) = (0.986 \pm 0.007) \cdot volt - (0.512 \pm 0.004)$$

Επιπλέον, από τη δεύτερη μέτρηση στο Δημόκριτο παρατηρούμε ότι από το 43ο - το 73ο λεπτό η τάση του ανιχνευτή είναι σταθερά στα $0.59V$, ενώ οι μετρήσεις του Grimm μας δίνουν συγκεντρώσεις μικρότερες από $1\mu g/m^3$. Αν θεωρήσουμε λοιπόν ότι για τάση εξόδου $0.59 \pm 0.01\ volt$ του ανιχνευτή, οι συγκεντρώσεις $PM10$ είναι $0\mu g/m^3$ και η ευαισθησία του με βάση την προηγούμενη εξίσωση είναι $0.9858 \pm 0.0070\ volt\ /\ mass$, μπορούμε να ορίσουμε έναν επιπλέον διορθωτικό όρο στην παραπάνω εξίσωση ο οποίος θα έχει νόημα για μικρές τιμές συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων και θα αυξήσει την ακρίβεια της τελικής σχέσης.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση:

$$Mass\ Density(mg/m^3) = sensitivity \cdot volt - offset \qquad (4.7)$$

$$offset = sensitivity \cdot volt = 0.9858 \cdot 0.59 = 0.5816\ [mg/m^3]$$

Επομένως ο διορθωτικός όρος (correction term) θα είναι:

$$ct = -0.070\ [mg/m^3]$$

Το σφάλμα της τιμής προκύπτει από τη γενική εξίσωση σφαλμάτων ως:

$$\delta f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\delta\chi_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\delta\chi_2\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\delta\chi_n\right)^2} \quad (4.8)$$

$$\delta offset = \sqrt{(sensitivity \cdot \delta volt)^2 + (volt \cdot \delta sensitivity)^2} = 0.012\ [mg/m^3]$$

Επομένως η τελική εξίσωση διαμορφώνεται ως:

$$Mass\ Density(mg/m^3\ ) = sensitivity \cdot volt - offset + ct \qquad (4.9)$$

Και αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$Mass\ Density(mg/m^3) = (0.986 \pm 0.007) \cdot volt - (0.582 \pm 0.012)$$

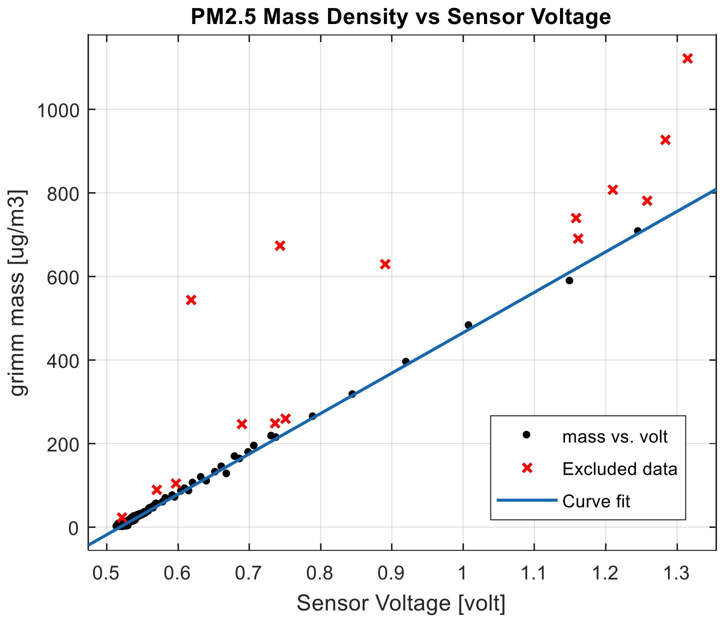
Από τα παραπάνω συνεπάγεται ότι η ακρίβεια της ανιχνευτικής μας διάταξης για συγκεντρώσεις μεταξύ $0 - 100\mu g/m^3$, θα είναι προσεγγιστικά $\pm 13\mu g/m^3$.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειώσουμε, ότι η ακρίβεια της τάσης εξόδου που καταγράφεται από την ανιχνευτική διάταξη είναι 2 δεκαδικά ψηφία ($0{,}01 volt$). Με βάση τα παραπάνω, από την ευαισθησία που υπολογίσαμε προκύπτει ότι η ελάχιστη ακρίβεια ανά μέτρηση θα είναι $\pm 10\mu g/m^3$.

4.4.6 Απόκριση ανιχνευτικής διάταξης για σωματίδια $PM_{2.5}$

Χρησιμοποιώντας ξανά την πρώτη μέτρηση που διεκπεραιώθηκε στο ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος θα ακολουθήσουμε την ίδια διαδικασία με πριν, με τη διαφορά ότι θα υπολογίσουμε την απόκριση της ανιχνευτικής διάταξης μόνο για τα αιωρούμενα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από $2.5\mu m$ ($PM_{2.5}$).

Για αυτό το εύρος σωματιδίων η ευαισθησία του ανιχνευτή μπορεί να υπολογιστεί από την καμπύλη της εικόνας 4-33.



Εικόνα 4-33: Καμπύλη συσχέτισης των δεδομένων μάζας από το όργανο Grimm με τα δεδομένα της τάσης εξόδου από την πρότυπη ανιχνευτική διάταξη για σωματίδια PM2.5

$$Mass\ Density(mg/m^3) = (0.967 \pm 0.007) \cdot volt - (0.502 \pm 0.003)$$

Η αναλογία των δύο εξισώσεων μας δείχνει ότι η αναλογία της ανίχνευσης ανέρχεται σε $PM2.5/PM10 \approx 98\%$. Είναι πολύ μεγάλη και προκύπτει επειδή η πλειοψηφία των σωματιδίων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν $PM_{2.5}$. Επομένως, δε θα μπορέσουμε να την χρησιμοποιήσουμε για να προβλέψουμε την αναλογία συγκεντρώσεων $PM_{2.5}/PM_{10}$ σε πραγματικές συνθήκες μετρήσεων.

4.4.7 Συμπεράσματα λειτουργίας πρότυπης ανιχνευτικής διάταξης

Στον παρακάτω πίνακα παραθέτουμε τα βασικά χαρακτηριστικά της ανιχνευτικής διάταξης σχετικά με την ανίχνευση αιωρούμενων σωματιδίων $PM10$.

Ευαισθησία	$\mathbf{0,986 mg/m^3}$
Offset	$0{,}5246 volt$
Ακρίβεια μέτρησης	$\pm 13 \mu g/m^3$
Εύρος μεγέθους ανιχνεύσιμων σωματιδίων	$0{,}54 \mu m - 11{,}18 \mu m$
Δειγματοληψία	$10 μετρήσεις/s$

Πίνακας 4-4: Χαρακτηριστικά μετρήσεων της πρότυπης ανιχνευτικής διάταξης

4.5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ HARDWARE ΤΟΥ UAV

Το υλικό τμήμα του UAV αποτελείται από τη πλακέτα Pixhawk 2 του εγχειρήματος ανοιχτού hardware Pixhawk και έχει δημιουργηθεί από τη κοινότητα του οργανισμού σε συνεργασία με τη 3D Robotics.

Εικόνα 4-34: Η πλακέτα του UAV της εταιρίας Pixhawk

Βασικά Χαρακτηριστικά

- 168 MHz / 252 MIPS Cortex-M4F
- 14 PWM / Servo outputs (8 with failsafe and manual override, 6 auxiliary, high-power compatible)
- Abundant connectivity options for additional peripherals (UART, I2C, CAN)
- Integrated backup system for in-flight recovery and manual override with dedicated processor and stand-alone power supply (fixed-wing use)
- Backup system integrates mixing, providing consistent autopilot and manual override mixing modes (fixed wing use)
- Redundant power supply inputs and automatic failover
- External safety switch
- Multicolor LED main visual indicator
- High-power, multi-tone piezo audio indicator
- microSD card for high-rate logging over extended periods of time

Επεξεργαστής

- 32bit STM32F427 Cortex M4 core with FPU
- 168 MHz
- 256 KB RAM
- 2 MB Flash (fully accessible)
- 32-bit STM32F103 failsafe co-processor

Αισθητήρες | TBA

Διεπαφές

- 5x UART (serial ports), one high-power capable, 2x with HW flow control
- 2x CAN (one with internal 3.3V transceiver, one on expansion connector)
- Spektrum DSM / DSM2 / DSM-X® Satellite compatible input
- Futaba S.BUS® compatible input and output
- PPM sum signal input
- RSSI (PWM or voltage) input
- I2C
- SPI
- 3.3 and 6.6V ADC inputs
- Internal micro USB port and external micro USB port extension

Τροφοδοσία συστήματος και προστασία

- Ideal diode controller with automatic failover

- Servo rail high-power (max. 10V) and high-current (10A+) ready
- All peripheral outputs over-current protected, all inputs ESD protected

4.6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ SOFTWARE ΤΟΥ UAV

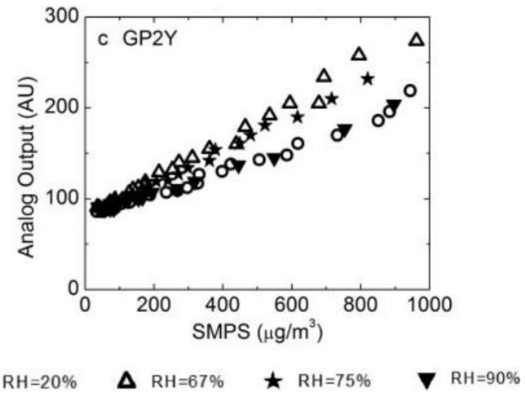
Το λογισμικό πλοήγησης του UAV είναι το Ardupilot. Το Ardupilot είναι μια open-source υλοποίηση λογισμικού για έλεγχο μη επανδρωμένων αεροσκαφών, με σημαντικούς κατασκευαστές (3DRobotics) να συμμετέχουν στην ανάπτυξή του η οποία ξεκίνησε το 2007. Ο κώδικας είναι διαθέσιμος με άδεια χρήσης GPL v3. Το λογισμικό διαχωρίζεται σε τρείς επιμέρους πλατφόρμες: To Copter, λογισμικό για τον έλεγχο ελικοπτέρων και multirotors, το Plane για έλεγχο αεροπλάνων και λοιπών gliders και τέλος το Rover για τον έλεγχο οχημάτων και μη ιπτάμενων μηχανών. Πλέον υπολογίζεται ότι είναι εγκατεστημένο σε πάνω από 1 εκατομμύριο οχήματα, αναδεικνύοντάς το ως το πιο δοκιμασμένο λογισμικό πλοήγησης μη επανδρωμένων οχημάτων παγκοσμίως. Το λογισμικό συνήθως είναι προ εγκατεστημένο σε αεροσκάφη ορισμένων κατασκευαστών όπως οι 3DR, jDrones, PrecisionHawk, AgEagle και Kespry, ενώ χρησιμοποιείται επιπλέον για δοκιμές και ερευνητικές μελέτες μεγάλων εταιρειών και οργανισμών όπως η NASA, η Intel και η Boing (38).

Ορισμένα από τα χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

- Fully autonomous, semi-autonomous and fully manual flight modes, programmable missions with 3D waypoints, optional geofencing.
- Stabilization options to negate the need for a third-party co-pilot.
- Simulation with a variety of simulators, including Ardupilot SITL.
- Large number of navigation sensors supported, including several models of RTK GPSs, traditional L1 GPSs, barometers, magnetometers, laser and sonar rangefinders, optical flow, ADS-B transponder, infrared, airspeed, sensors.
- Sensor communication via SPI, I²C, CAN Bus, Serial communication, SMBus.
- Failsafes for loss of radio contact, GPS and breaching a predefined boundary, minimum battery power level.
- Support for navigation in GPS denied environments, with vision-based positioning, optical flow, SLAM, Ultra-Wide Band positioning.
- Support for actuators such as parachutes and magnetic grippers.
- Support for brushless and brushed motors.
- Photographic and video gimbal support and integration.
- Integration and communication with powerful secondary computers
- Rich documentation through Ardupilot wiki.
- Flight modes: Stabilize, Alt Hold, Loiter, RTL (Return-to-Launch), Auto, Acro, AutoTune, Brake, Circle, Drift, Guided, (and Guided_NoGPS), Land, PosHold, Sport, Throw, Follow Me, Simple, Super Simple, Avoid_ADSB.
- Auto-tuning
- Wide variety of frame types supported, including tricopters, quadcopters, hexacopter, flat and co-axial octocopters, and custom motor configurations
- Support for traditional electric and gas helicopters, mono copters, trandem helicopters.

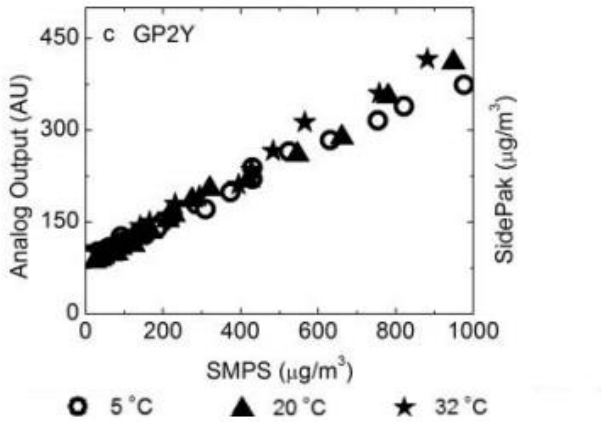
4.7 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι με τους οποίους η υγρασία επιδρά στις μετρήσεις του σένσορα. Αρχικά η μεγάλη συγκέντρωση υδρατμών μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στο κύκλωμα με αποτέλεσμα, να επηρεάσει την απόδοσή του. Επιπλέον, από τη στιγμή που οι αέριοι ρύποι μπορούν να συλλέξουν μικροσωματίδια νερού, το μέγεθος και η χημική τους σύσταση μεταβάλλονται ανάλογα με τη σχετική υγρασία. Αυτό όπως περιεγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι καθοριστικό για τον συντελεστή κέδασης $\sigma_{sp}(RH, \lambda)$, καθώς αυτός αυξάνεται με την αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων. Ένας επιπλέον παράγοντας που επηρεάζει το συντελεστή ενίσχυσης σκέδασης, είναι το μήκος κύματος της σκεδάζουσας ακτινοβολίας το οποίο όμως δε θα χρειαστεί να τον λάβουμε υπόψη καθώς το μήκος κύματος της ακτινοβολίας του ανιχνευτή δε μεταβάλλεται, αλλά είναι σταθερό στα $900nm$. Στο διπλανό σχήμα φαίνεται η επίδραση της σχετικής υγρασίας στις μετρήσεις του ανιχνευτή για τέσσερεις διαφορετικές τιμές της από 20% έως 90% (32).



Εικόνα 4-35: Διάγραμμα συμπεριφοράς αισθητήρα για διαφορετικές τιμές υγρασίας (32)

Σε αντίθεση με την υγρασία, η επίδραση της θερμοκρασίας δεν είναι τόσο σημαντική καθώς με βάση τη θεωρία αυτή δεν επηρεάζει την σκέδαση και την απορρόφηση της ακτινοβολίας. Παρ' όλα αυτά πολύ μεγάλες θερμοκρασίες θα πορούσαν να επηρεάσουν τα κυκλώματα του ανιχνευτή (32). Στο διπλανό σχήμα φαίνεται η συμπεριφορά του αισθητήρα για διαφορετικές τιμές της θερμοκρασίας. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, οι τιμές που δίνει δε μεταβάλλονται σημαντικά παρά την αύξηση της θερμοκρασίας.



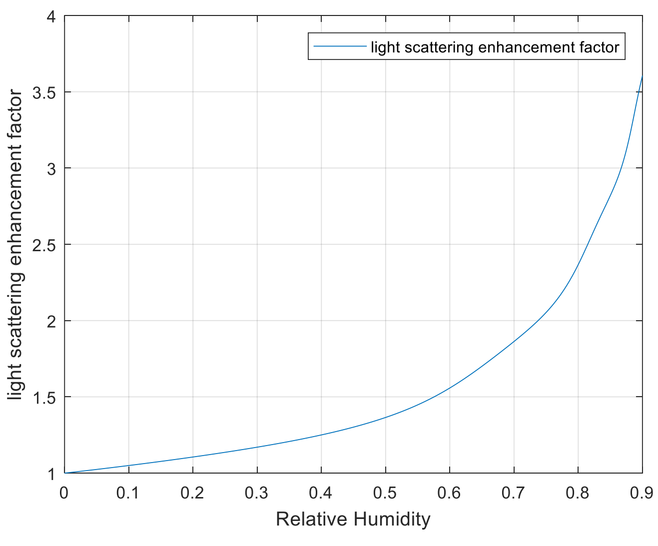
Εικόνα 4-36: Διάγραμμα συμπεριφοράς αισθητήρα για διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας (32)

Για να αντιμετωπίσουμε τη συνεισφορά της υγρασίας στη σκέδαση, θα χρησιμοποιήσουμε τη θεωρία της σκέδασης Mie, για την ενίσχυση σκέδασης, όπως διατυπώθηκε στο 2° κεφάλαιο. Τα στοιχεία που θα χρειαστούμε γι αυτή τη μελέτη είναι η σχετική υγρασία RH, ο μιγαδικός δείκτης διάθλασης m, η υγροσκοπική παράμετρος κ και το ποσοστό στο οποίο αντιστοιχεί το κάθε στοιχείο ως προς τη συνολική μάζα που μελετάμε.

Αρχικά, γνωρίζοντας τη σχετική υγρασία μπορούμε να υπολογίσουμε τον υγροσκοπικό συντελεστή μεγέθυνσης $g(RH)$, ο οποίος μας δείχνει τη μεταβολή στο μέγεθος ενός σωματιδίου (εξισώσεις 2.27 και 2.28). Από αυτόν μπορούμε να υπολογίσουμε τη μεταβολή στο μιγαδικό δείκτη διάθλασης λόγω της σχετικής υγρασίας (εξίσωση 2.29) και στη συνέχεια με δεδομένα το μέγεθος και το δείκτη διάθλασης μπορούμε να υπολογίσουμε την απόδοση σκέδασης $Q_{sca}(x, m)$ (εξίσωση 2.22), αφού πρώτα υπολογίσουμε τους συντελεστές Mie (εξισώσεις 2.20 και 2.21).

Τέλος, αφού έχουμε συλλέξει όλα τα στοιχεία που χρειαζόμαστε, μπορούμε να υπολογίσουμε του συντελεστές σκέδασης για την κατάσταση των σωματιδίων με και χωρίς σχετική υγρασία (εξίσωση 2.26) και να υπολογίσουμε το συντελεστή ενίσχυσης σκέδασης (εξίσωση 2.25), ο οποίος θα μας δώσει την ενίσχυση της σκέδασης λόγω της σχετικής υγρασίας.

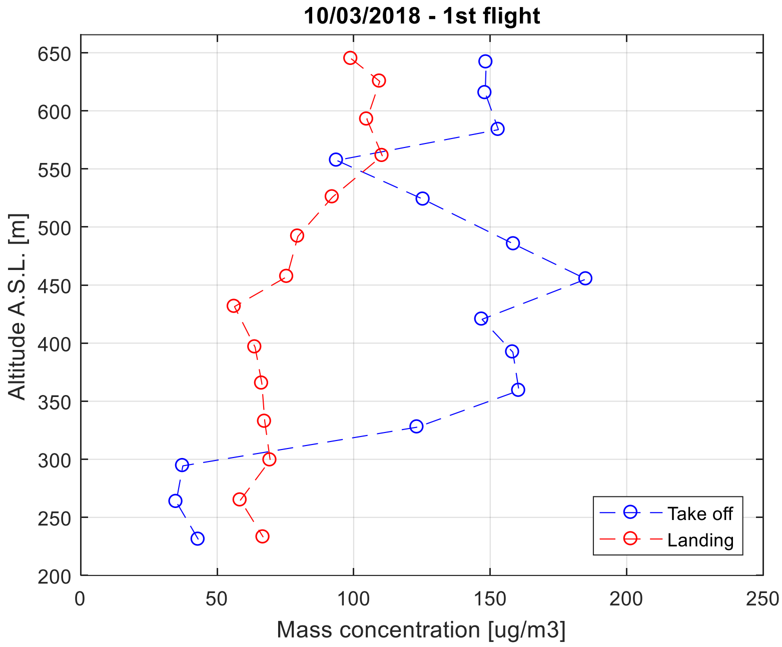
Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία για όλα τα στοιχεία που αποτελούν τους υπό μελέτη αέριους ρύπους, θα είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε την επίδραση της σχετικής υγρασίας στις μετρήσεις μας. Για τον υπολογισμό δημιουργήθηκε ένας αλγόριθμος σε γλώσσα MatLab που αναλύουμε στο παράρτημα 4. Στην εικόνα 4-37 αποτυπώνεται ένα ενδεικτικό διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή ενίσχυσης- σκέδασης για ένα τυπικό δείγμα αερολυμάτων σε φαινόμενο σκόνης από τη Σαχάρα. Σε αυτό μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι για υγρασία μέχρι 45% που είχαμε στις μετρήσεις μας η ενίσχυση της σκέδασης είναι μέχρι και 30%.



Εικόνα 4-37: Επίδραση της σχετικής υγρασίας πάνω στην ενίσχυση σκέδασης των αέριων ρύπων για ένα ενδεικτικό δείγμα αερολυμάτων από σκόνη Σαχάρας.

4.8 Αποκριση ανιχνευτικης διαταξης κατα τη διαρκεια πτησης

Στις περισσότερες πτήσεις παρατηρήθηκε ότι τα δεδομένα για τις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων κατά την προσγείωση ήταν σημαντικά μικρότερα από ότι στην απογείωση. Αυτό είναι πολύ πιθανό να οφείλεται στο γεγονός ότι οι έλικες του UAV δημιουργούν πυκνώματα ή αραιώματα αέρα στο σημείο που βρίσκεται η ανιχνευτική διάταξη, με αποτέλεσμα να επηρεάζονται οι μετρήσεις των συγκεντρώσεων.



Εικόνα 4-38: Σύγκριση μετρήσιμων συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων κατά τη διάρκεια της απογείωσης και της προσγείωσης στην πτήση της 10ης Μαρτίου 2018.

Για να αντιμετωπίσουμε αυτό το πρόβλημα στις μετρήσεις, διατηρήσαμε μόνο τα δεδομένα της προσγείωσης. Κατά την προσγείωση η συνεισφορά που έχουν οι έλικες περιορίζεται στην απαιτούμενη ώστε το UAV να διατηρήσει την ισορροπία του και μια ομαλή ταχύτητα καθόδου. Επομένως υποθέτουμε ότι η επίδρασή τους στην ανιχνευτική διάταξη είναι σημαντικά μικρότερη απ' ότι στην απογείωση, όπου λειτουργούν σε πολύ μεγαλύτερη ισχύ.

Ακόμα, σε αρκετές μετρήσεις παρατηρήθηκε ότι μετά το μέγιστο υψόμετρο της πτήσης, η μετρήσιμη συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων ελαττώνεται απότομα (όπως και στην εικόνα 4-38), γεγονός το οποίο οφείλεται ότι το UAV μειώνει απότομα την ισχύ στους έλικες. Για το λόγο αυτό η μετρήσιμη συγκέντρωση που αντιστοιχεί στο μέγιστο υψόμετρο συχνά δεν είναι αληθής.

5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΤΗΣΕΩΝ

Παρακάτω παρουσιάζονται τα δεδομένα από τις πτήσεις που πραγματοποιήθηκαν, παραθέτοντας τα διαγράμματα υψομέτρου – μάζας, συγκέντρωσης μάζας, υγρασίας, θερμοκρασίας με το χρόνο και το υψόμετρο αντίστοιχα. Σε όλα τα διαγράμματα ως υψόμετρο θεωρούμε το απόλυτο υψόμετρο από τη μέση στάθμη της θάλασσας, το οποίο για την περιοχή όπου πραγματοποιούνται οι πτήσεις ξεκινάει από τα $200m$.

Ο χρόνος μέτρησης για τον ανιχνευτή ξεκινάει από τη στιγμή που το UAV τροφοδοτείται με ρεύμα, οι μετρήσεις όμως που λαμβάνουμε υπόψη είναι από τη στιγμή που το UAV μπαίνει στην κατάσταση «Armed» («οπλισμένο» ή αλλιώς ότι βρίσκεται σε ετοιμότητα για πτήση). Επίσης, από αυτές τις μετρήσεις διατηρούμε μόνο αυτές που έχουν σχετικό ύψος σύμφωνα με τον αισθητήρα GPS του UAV πάνω από 10 μέτρα από το έδαφος, ώστε να αποφύγουμε τις μετρήσεις του αισθητήρα κατά την απογείωση και προσγείωση, όπου η ισχύς από τους έλικες σηκώνει σκόνη από το έδαφος.

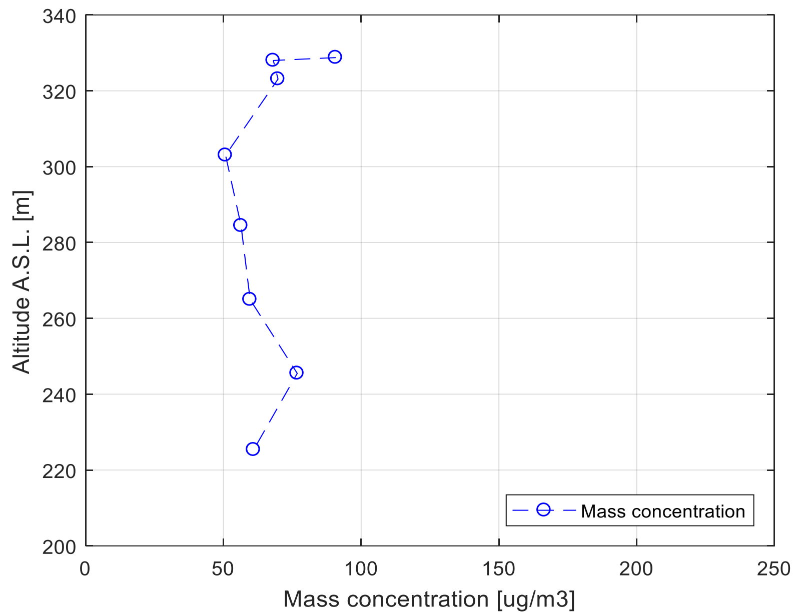
Ακόμα, όπως αναφέρουμε και στην τελευταία παράγραφο του προηγούμενου κεφαλαίου, τα δεδομένα προέρχονται μόνο από τις μετρήσεις της ανιχνευτικής διάταξης κατά την προσγείωση του UAV, ώστε να ελαχιστοποιείται η επίδραση που έχουν οι έλικες.

Τέλος, για να υπολογίσουμε την επίδραση της υγρασίας με τη μέθοδο που περιγράφουμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, χρησιμοποιήσαμε δεδομένα από το ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος σχετικά με τις συγκεντρώσεις μάζας των Cl, NH_4, NO_3, SO_4 και Organic fractions για τις αντίστοιχες μέρες που είχαμε παράλληλα μετρήσεις με το UAV και το σταθμό EOLE. Τα επιπλέον δεδομένα για το μιγαδικό δείκτη διάθλασης και την υγροσκοπική παράμετρο βρέθηκαν από τη σχετική βιβλιογραφία [παράρτημα 1 και ηλεκτρονική αναφορά (40)].

5.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ 1ΗΣ ΠΤΗΣΗΣ – 02/11/2017

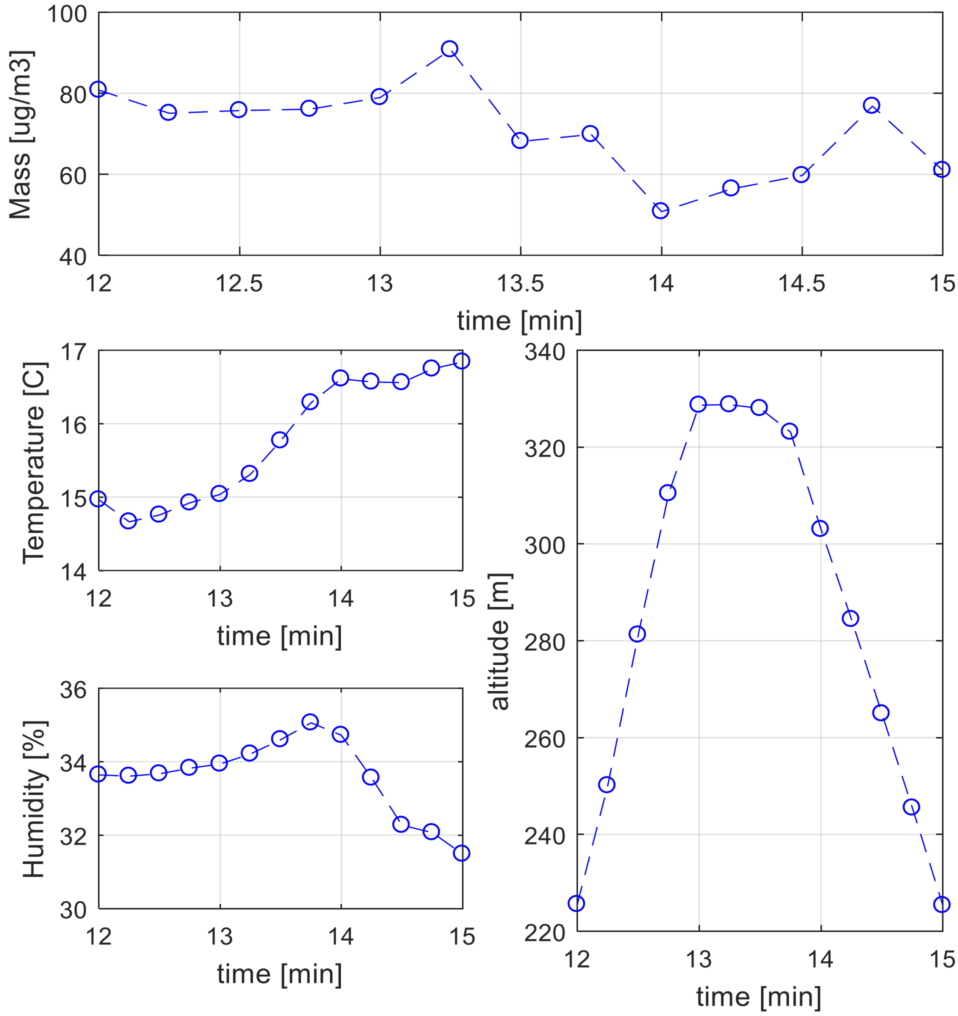
Οι συγκεντρώσεις αυτής της μέτρησης κυμαίνονται μεταξύ 50 και $75\mu g/m^3$. Το κάθε δεδομένο προκύπτει από το μέσο όρο μετρήσεων 20 δευτερολέπτων. Παρατηρούμε μείωση στη συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων για υψόμετρο μεταξύ 250m και 300m και απότομη αύξηση μέχρι τα 320m. Το τελευταίο σημείο της παραπάνω πτήσης μπορούμε να το παραλείψουμε γιατί όπως περιγράφουμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο η μέτρηση αυτή επηρεάζεται από την αλλαγή της ισχύος στους έλικες.

5.1.1 Διάγραμμα κατακόρυφης κατανομής συγκέντρωσης μάζας PM_{10}



Εικόνα 5-1: Κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης μάζας, όπως αυτή καταγράφηκε από τον αισθητήρα στις 2 Νοεμβρίου 2017.

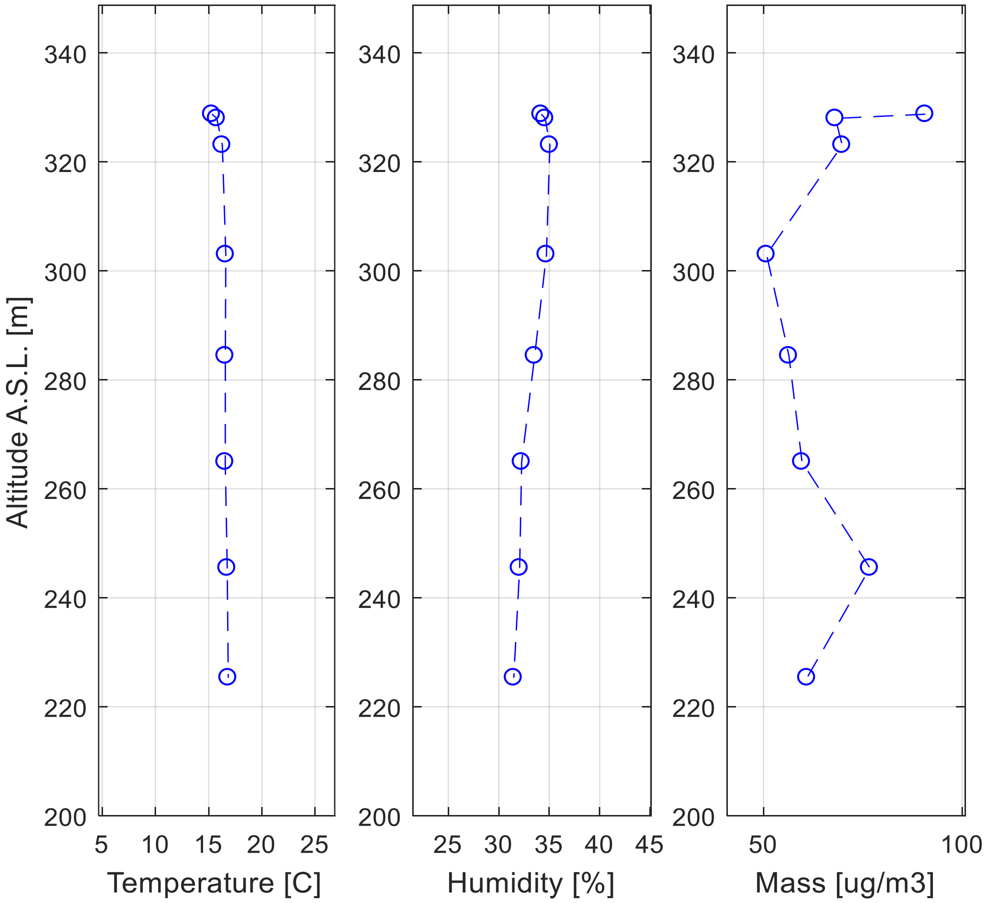
5.1.2 Διάγραμμα υγρασίας, θερμοκρασίας, μάζας ως προς το χρόνο



Εικόνα 5-2: Διάγραμμα πυκνότητας μάζας σωματιδίων PM_{10}, θερμοκρασίας, υγρασίας και υψομέτρου, ως προς το χρόνο για την πτήση στις 2 Νοεμβρίου 2017.

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η χρονική εξέλιξη των συγκεντρώσεων PM_{10}, η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και το υψόμετρο ως προς το χρόνο. Σε αυτό το διάγραμμα φαίνεται ότι το μέγιστο υψόμετρο έχει καταγραφεί στο 13^{ο} λεπτό μετρήσεων. Παρατηρούμε ότι τα δεδομένα στα αριστερά του (δεδομένα κατά την απογείωση του UAV) είναι σταθερά μεγαλύτερα απ' ότι στα δεξιά του (δεδομένα προσγείωσης).

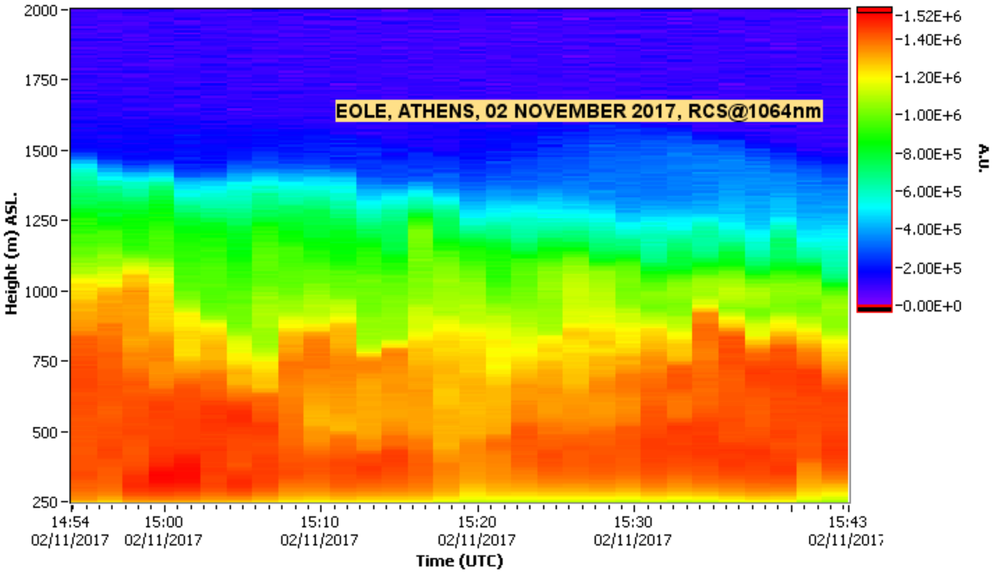
Διάγραμμα υγρασίας, θερμοκρασίας, μάζας ως προς το υψόμετρο



Εικόνα 5-3: Διάγραμμα θερμοκρασίας, υγρασίας και πυκνότητας μάζας σωματιδίων PM_{10}, ως προς το απόλυτο υψόμετρο από τη στάθμη της θάλασσας για την πτήση στις 2 Νοεμβρίου 2017.

Βλέπουμε ότι η υγρασία και η θερμοκρασία έχουν πολύ μικρές διακυμάνσεις οι οποίες περιορίζονται σε βαθμό ώστε να μην επηρεάζουν τις μετρήσεις συγκεντρώσεων. Ακόμα, στην τελευταία μέτρηση παρατηρούμε μια απότομη αύξηση στη συγκέντρωση μάζας. Αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι αλλάζει η ισχύς στους έλικες, η οποία επηρεάζει τις μετρήσεις.

5.1.3 Αποτελέσματα μετρήσεων του σταθμού Lidar EOLE



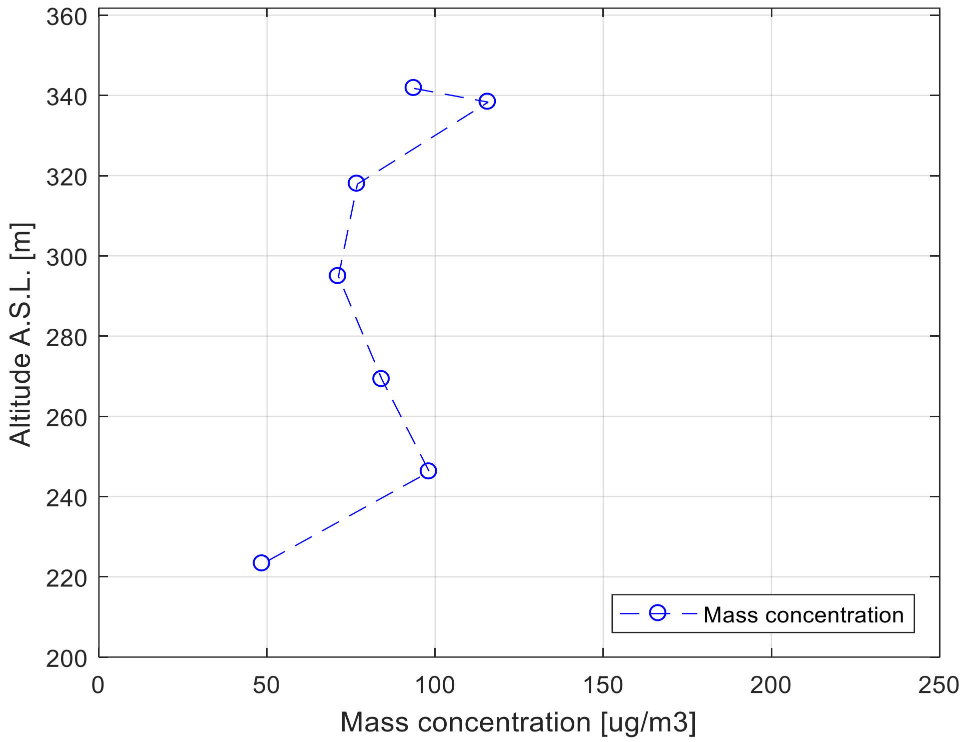
Εικόνα 5-4: Χωροχρονική εξέλιξη του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος Lidar στα $1064nm$, διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCS), όπως καταγράφηκε στις 2 Νοεμβρίου 2017

Η χρονική και χωρική μεταβολή του διορθωμένου σήματος lidar στα $1064nm$ για την περίπτωση της 2 Νοεμβρίου 2017 σε αυθαίρετες μονάδες, όπως καταγράφηκε από τη διάταξη EOLE του Ε.Μ.Π., παρουσιάζεται στην εικόνα 5-1. Φαίνεται ότι υπάρχει ένα στρώμα σωματιδίων με πολύ υψηλές συγκεντρώσεις μέχρι τα 900m περίπου και ένα ακόμα μέχρι τα 1300-1400m με αρκετά χαμηλότερες. Από εκεί και πάνω το οπισθοσκεδάζον σήμα είναι πολύ ασθενές, καταδεικνύοντας ότι οι συγκεντρώσεις είναι σε χαμηλά επίπεδα. Γενικά στο υψόμετρο από 250m μέχρι 450m που έγιναν οι μετρήσεις της ανιχνευτικής διάταξης με τη χρήση του UAV, η συγκέντρωση ατμοσφαιρικών ρύπων είναι σε αρκετά υψηλά επίπεδα.

5.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ 2ΗΣ ΠΤΗΣΗΣ – 24/11/2017

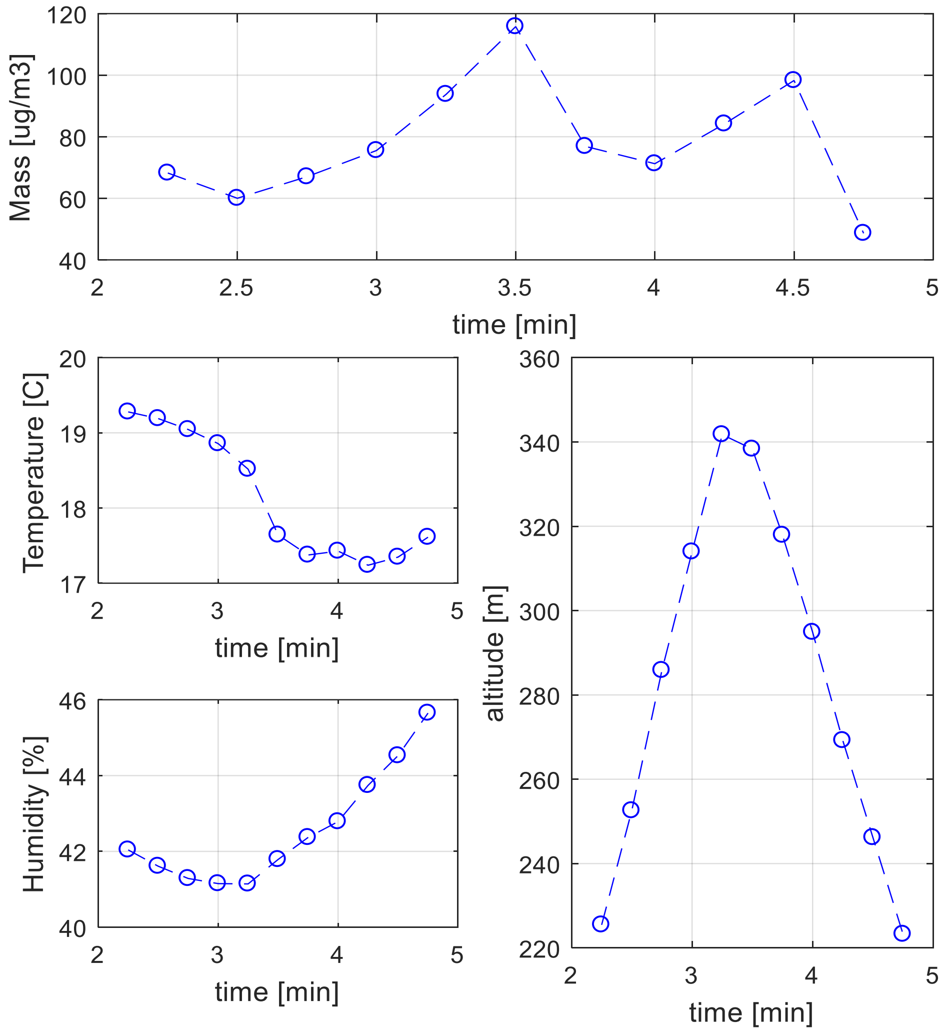
Η πτήση έγινε στις 24 Νοεμβρίου μεταξύ 13.30 και 13.40. Η διακύμανση των δεδομένων είναι μεταξύ 70 και $100\mu g/m^3$. Τα δεδομένα προκύπτουν από το μέσο όρο μετρήσεων 15 δευτερολέπτων. Παρατηρούμε ότι υπάρχει μια μεγάλη αύξηση στη συγκέντρωση των αέριων ρύπων μετά τα 50m πάνω από το έδαφος, ενώ κάτω από αυτό το ύψος οι συγκεντρώσεις κυμαίνονται σε φυσιολογικά επίπεδα (μικρότερα από $50\mu g/m^3$).

5.2.1 Διάγραμμα κατακόρυφης κατανομής συγκέντρωσης μάζας PM_{10}



Εικόνα 5-5: Κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης μάζας, όπως αυτή καταγράφηκε από τον αισθητήρα στις 24 Νοεμβρίου 2017, 13.30 UTC.

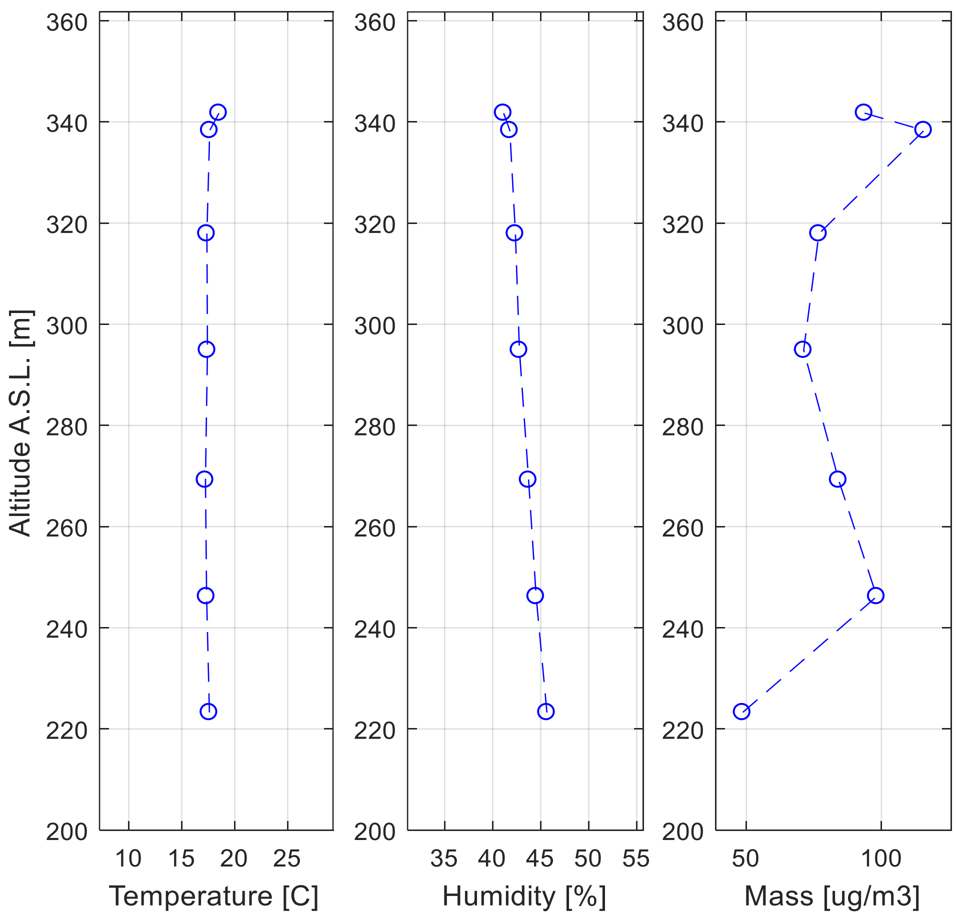
5.2.2 Διάγραμμα υγρασίας, θερμοκρασίας, μάζας ως προς το χρόνο



Εικόνα 5-6: Διάγραμμα πυκνότητας μάζας σωματιδίων PM_{10}, θερμοκρασίας, υγρασίας και υψομέτρου, ως προς το χρόνο για την πτήση στις 24 Νοεμβρίου 2017, 13.30 UTC.

Η χρονική εξέλιξη των συγκεντρώσεων PM_{10}, της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας και του υψομέτρου ως προς το χρόνο. Το μέγιστο ύψος είναι στο $3^{ο}$ λεπτό και 15'', ενώ παρατηρούμε επίσης ότι οι ταχύτητες ανόδου και καθόδου είναι παρόμοιες.

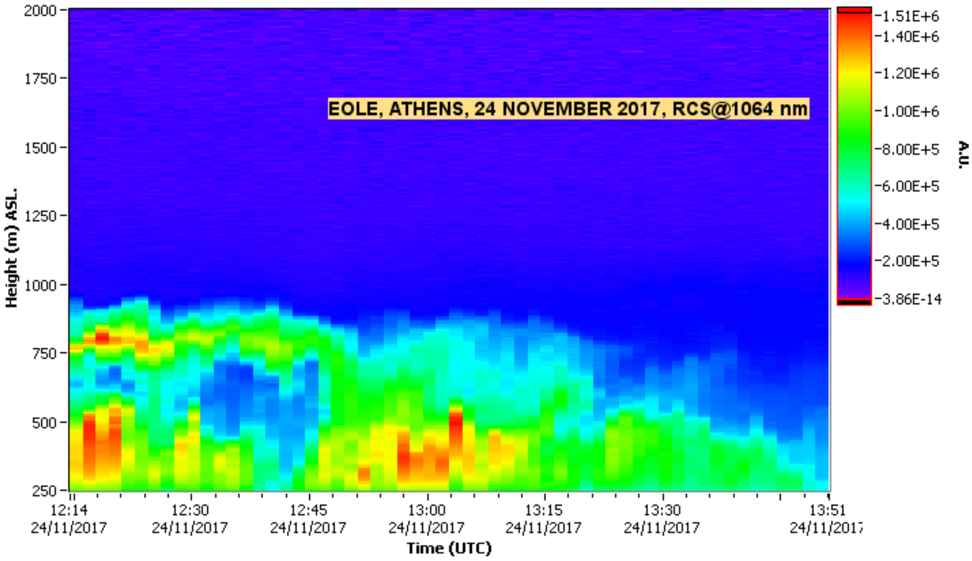
5.2.3 Διάγραμμα υγρασίας, θερμοκρασίας, μάζας ως προς το υψόμετρο



Εικόνα 5-7: Διάγραμμα θερμοκρασίας, υγρασίας και πυκνότητας μάζας σωματιδίων PM_{10}, ως προς το απόλυτο υψόμετρο από τη στάθμη της θάλασσας για την πτήση στις 2 Νοεμβρίου 2017, 13.30 UTC.

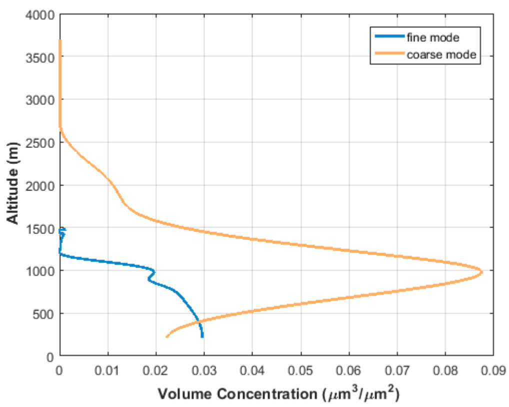
Η θερμοκρασία φαίνεται να διατηρείται σταθερή σε όλη τη διάρκεια της πτήσης, ενώ η σχετική υγρασία κυμαίνεται μεταξύ 40% και 45%, τιμές οι οποίες δεν επηρεάζουν τις μετρήσεις των συγκεντρώσεων.

5.2.4 Αποτελέσματα μετρήσεων του συστήματος Lidar EOLE



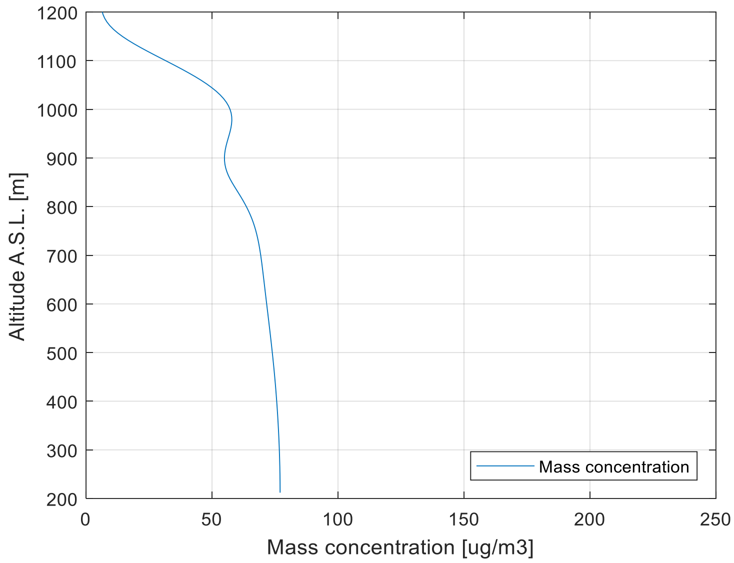
Εικόνα 5-8: Χωροχρονική εξέλιξη του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος Lidar στα $1064nm$, διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCS), όπως καταγράφηκε από το σταθμό EOLE στις 24 Νοεμβρίου 2017

Στη παραπάνω εικόνα φαίνεται η χρονική και χωρική μεταβολή του διορθωμένου σήματος lidar στα $1064nm$ για την περίπτωση της 24 Νοεμβρίου 2017 σε αυθαίρετες μονάδες, όπως καταγράφηκε από τη διάταξη EOLE του Ε.Μ.Π. Παρατηρούμε ότι έχουν καταγραφεί δυο χρονικές περίοδοι όπου το σήμα από την οπισθοσκεδάζουσα ακτινοβολία είναι σημαντικά μεγάλο στις 12.15 και στη 13.00 UTC, ενώ αντιθέτως, η ένταση του σήματος της διάταξης είναι μέτρια προς ασθενή στο υπόλοιπο χρονικό διάστημα για μετρήσεις σε μικρότερο υψόμετρο από τα 500m.



Η πτήση του UAV πραγματοποιήθηκε στις 13.30 UTC, επομένως περιμένουμε ότι η πυκνότητα συγκέντρωσης σωματιδίων PM_{10} θα είναι μεγαλύτερη από το συνηθισμένο όριο συγκέντρωσης $(30 - 40\mu g/m^3)$, χωρίς όμως να αγγίζει πολύ υψηλά επίπεδα.

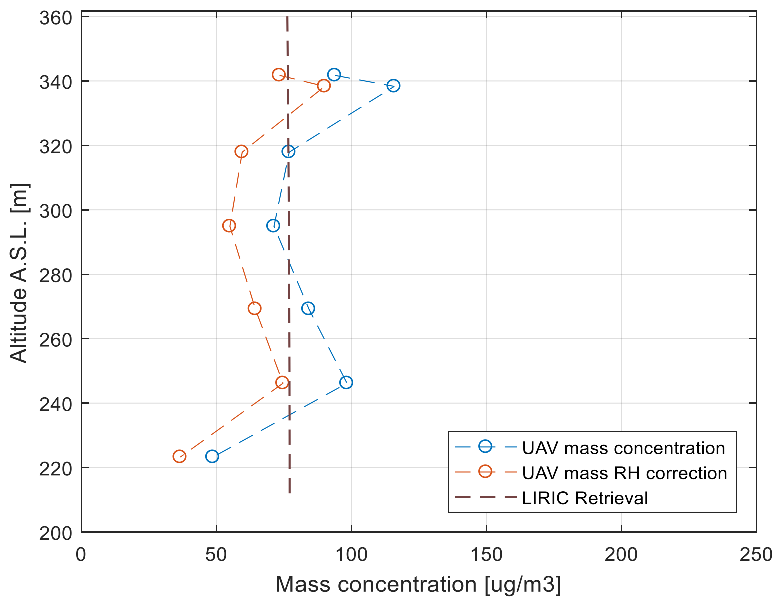
Εικόνα 5-9: Οι κατακόρυφες κατανομές όγκου λεπτών και αδρών σωματιδίων, όπως υπολογίσθηκαν από τον αλγόριθμο LIRIC, συνδυάζοντας τις μετρήσεις του σταθμού Lidar και του ηλιακού φωτόμετρου CIMEL στο Brindisi στις 24 Νοεμβρίου 2017.



Εικόνα 5-10: Οι κατακόρυφες κατανομές μάζας των συνολικών σωματιδίων (λεπτών και αδρών), όπως αυτές υπολογίσθηκαν με βάση το παραπάνω διάγραμμα και την εξίσωση (3.12) για τη μέτρηση στις 24 Νοεμβρίου 2017, 13.30 UTC.

5.2.5 Διόρθωση αποτελεσμάτων UAV λόγω σχετικής υγρασίας

Για αυτή τη μέρα τα δεδομένα ποσοστών των ατμοσφαιρικών ρύπων όπως καταγράφηκαν από το ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος είναι Cl: 1%, NH_4NO_3: 8%, $(NH_4)_2SO_4$: 25%, $Organic\ fraction$: 66%.



Εικόνα 5-11: Οι κατακόρυφες κατανομές μάζας, όπως αυτή μετρήθηκε από το UAV, με τη διόρθωση λόγω της σχετικής υγρασίας, και από τον αλγόριθμο LIRIC στις 24 Νοεμβρίου 2017, 13.30 UTC

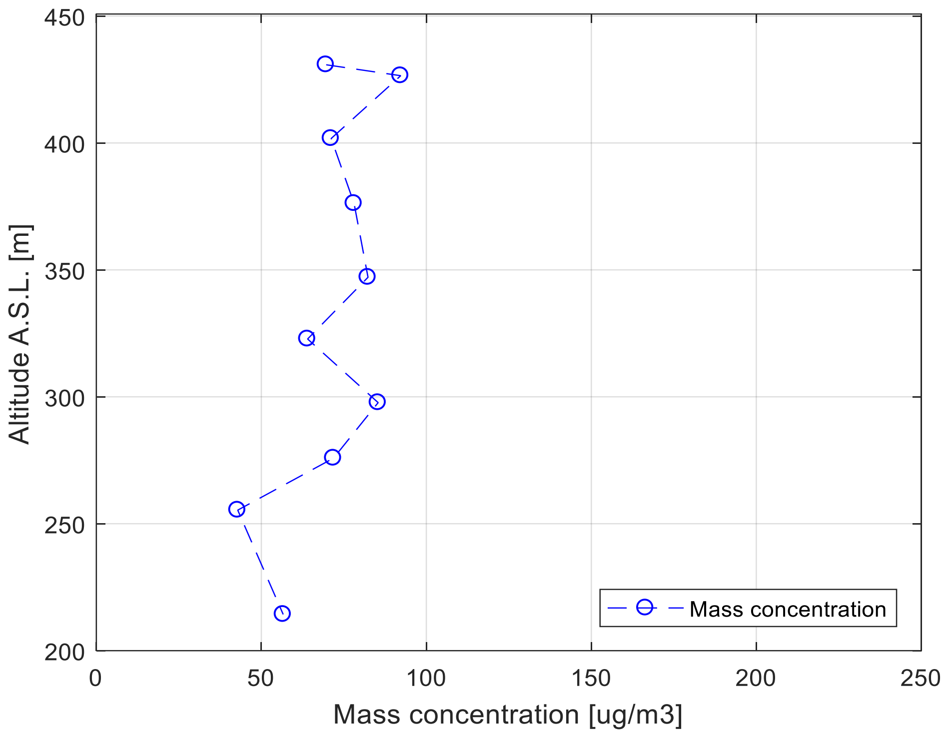
Τα δεδομένα που προκύπτουν από το σταθμό Lidar και από την πρότυπη ανιχνευτική διάταξη που χρησιμοποιήσαμε φαίνεται να έχουν παρόμοια αποτελέσματα. Η μέση τιμή από την ανιχνευτική διάταξη πάνω στο UAV για υψόμετρο μέχρι $350m$ ήταν $72\mu g/m^3$ και αντίστοιχα $64\mu g/m^3$, όπως υπολογίστηκε με τη διόρθωση λόγω της σχετικής υγρασίας, ενώ αντίστοιχη είναι και η τιμή που μετρήθηκε από τη διάταξη lidar στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα μπορούμε να δούμε ότι οι μετρήσεις δεν είναι ακριβώς ίδιες, καθώς η ανιχνευτική διάταξη πάνω στο UAV έχει αρκετές διακυμάνσεις, σε αντίθεση με τις μετρήσεις από το Lidar. Αυτό συμβαίνει αρχικά επειδή η ανιχνευτική διάταξη έχει μεγαλύτερη χωρική και χρονική ακρίβεια, αλλά κυρίως επειδή επηρεάζεται πολύ πιο έντονα από εξωτερικούς παράγοντες, όπως μικρές ριπές ανέμων ή τη ροή του αέρα από τους έλικες του UAV. Παρ' όλα αυτά, τα αποτελέσματα μεταξύ τους είναι συγκρίσιμα.

5.3 ΔΕΔΟΜΕΝΑ 3ΗΣ ΠΤΗΣΗΣ – 29/11/2017

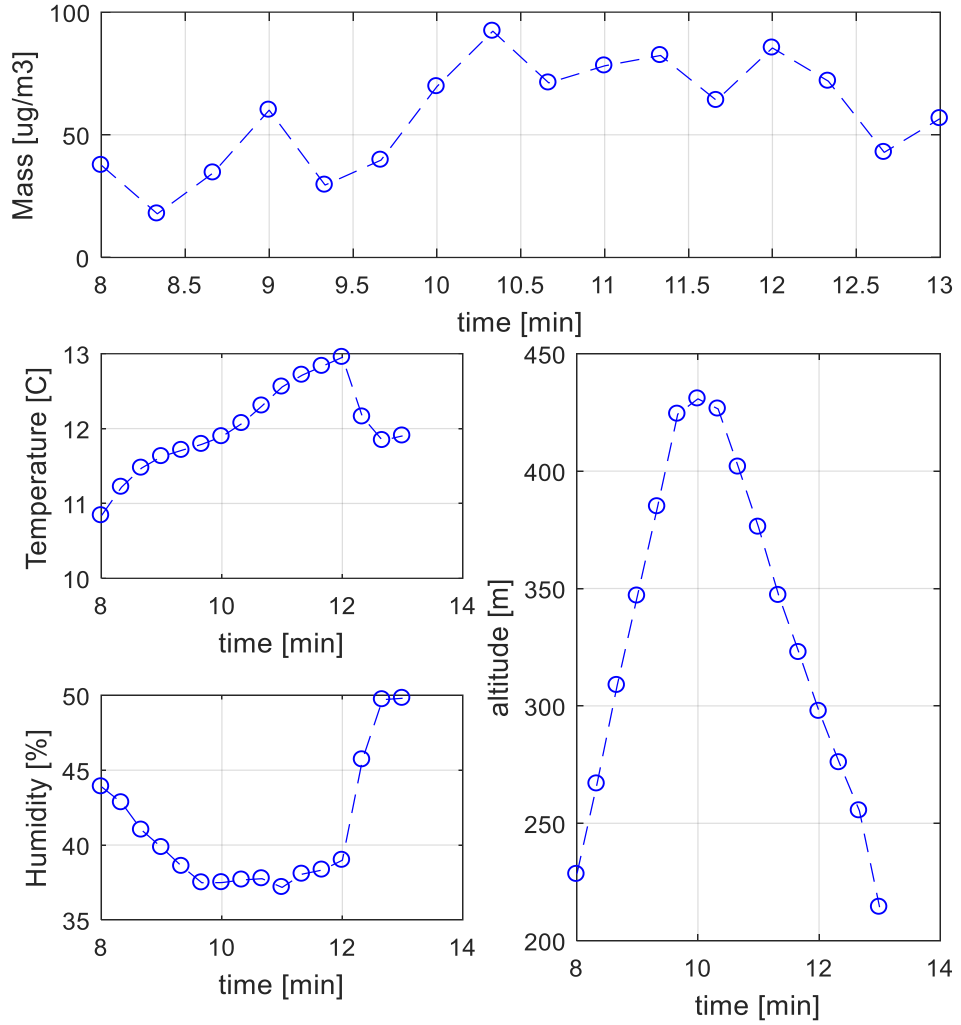
Βλέπουμε ότι οι συγκεντρώσεις μέχρι τα 250m είναι μεταξύ $40 - 60\mu g/m^3$. Από τα $280m$ αυξάνονται στα $65 - 85\mu g/m^3$. Τα δεδομένα είναι ο μέσο όρος από μετρήσεις 20 δευτερολέπτων. Η ελάχιστη τιμή παρατηρούμε ότι είναι στα $43\mu g/m^3$και δίνεται για υψόμετρο 260m (60m πάνω από το έδαφος), ενώ η μέγιστη τιμή είναι $92\mu g/m^3$ και καταγράφηκε για υψόμετρο 440m (240m πάνω από το έδαφος).

5.3.1 Διάγραμμα κατακόρυφης κατανομής συγκέντρωσης μάζας PM_{10}



Εικόνα 5-12: Κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης μάζας, όπως αυτή καταγράφηκε από τον αισθητήρα στις 29 Νοεμβρίου 2017.

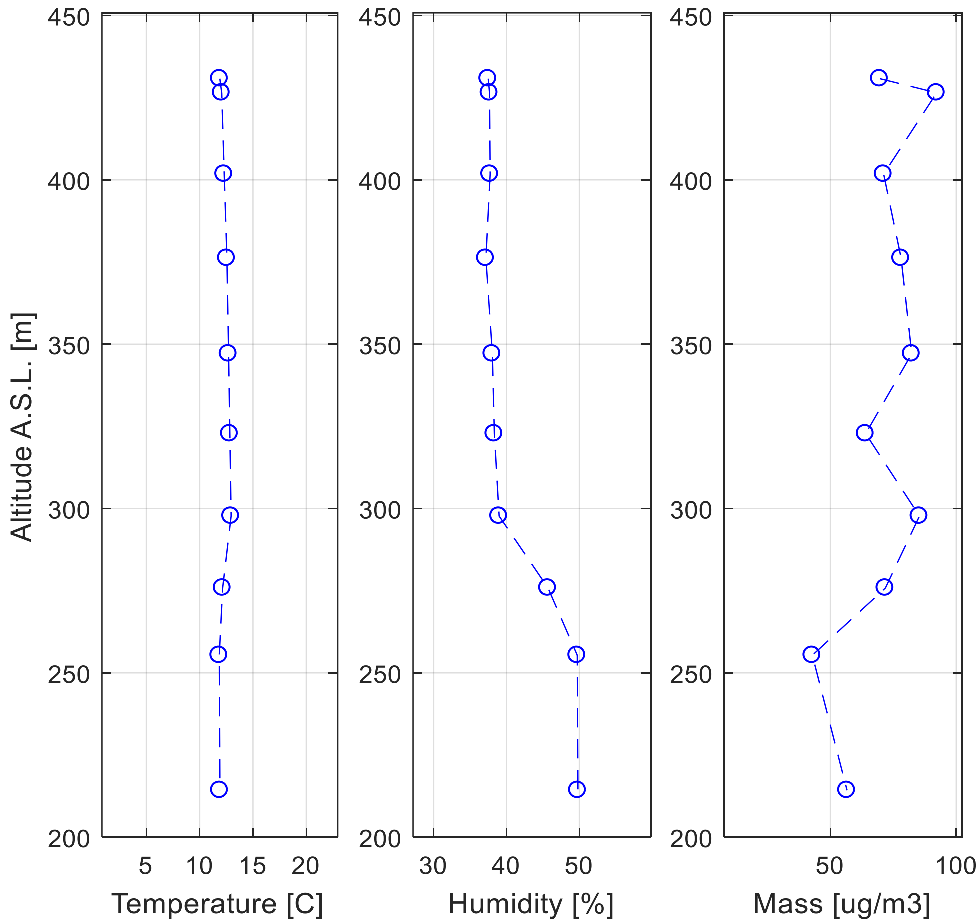
5.3.2 Διάγραμμα υγρασίας, θερμοκρασίας και μάζας ως προς το χρόνο



Εικόνα 5-13: Διάγραμμα πυκνότητας μάζας σωματιδίων PM_{10}, θερμοκρασίας, υγρασίας και υψομέτρου, ως προς το χρόνο για την πτήση στις 29 Νοεμβρίου 2017.

Από την εικόνα 5-13 φαίνεται ότι το μέγιστο υψόμετρο για την πτήση ήταν στο 10ο λεπτό. Από το πρώτο διάγραμμα της εικόνας φαίνεται ότι τα δεδομένα δεξιά από το 10ο λεπτό (δεδομένα καθόδου) είναι σταθερά μεγαλύτερα απ' ότι αριστερά (άνοδος). Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τις υπόλοιπες μετρήσεις που συνήθως παρατηρείται το αντίθετο. Συνήθως οι μετρήσεις συγκεντρώσεων κατά την άνοδο είναι μεγαλύτερη από ότι στην κάθοδο, λόγω της ισχύος που έχουν οι έλικες.

5.3.3 Διάγραμμα υγρασίας, θερμοκρασίας και μάζας ως προς το υψόμετρο



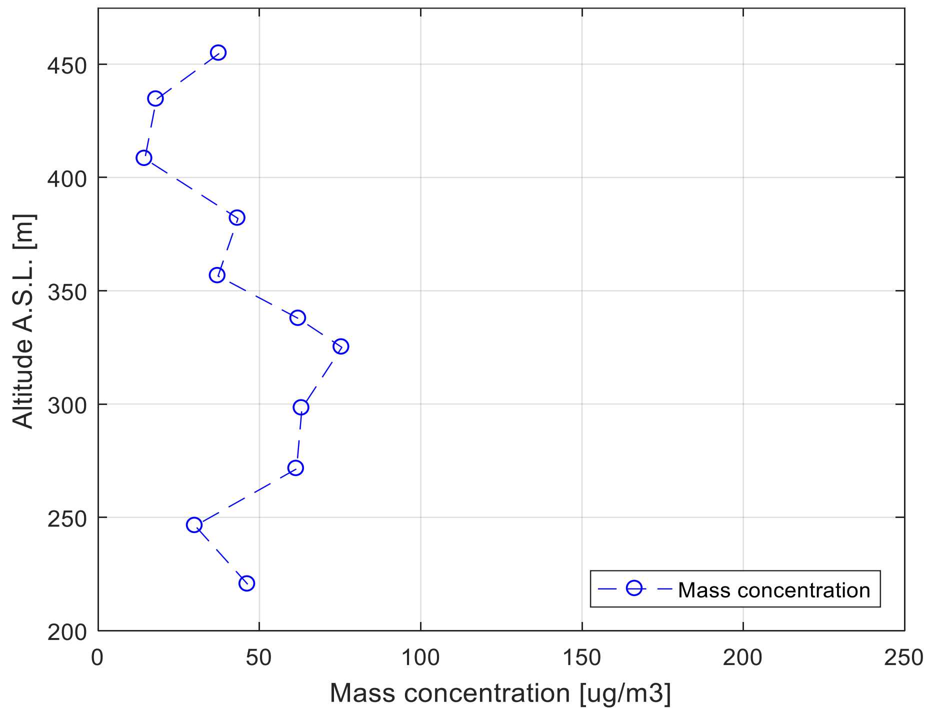
Εικόνα 5-14: Διάγραμμα θερμοκρασίας, υγρασίας και πυκνότητας μάζας σωματιδίων PM_{10}, ως προς το απόλυτο υψόμετρο από τη στάθμη της θάλασσας για την πτήση στις 29 Νοεμβρίου 2017.

Από την παραπάνω εικόνα παρατηρούμε ότι παρ' όλο που η θερμοκρασία παραμένει σταθερή με το ύψος, η σχετική υγρασία παρουσιάζει μια απότομη μείωση από τα 250m που είναι στο 50% μέχρι τα 300m όπου μειώνεται στο 40%. Αυτή η διαφοροποίηση είναι σημαντική και θα μπορούσε να προκαλέσει αύξηση στις συγκεντρώσεις κάτω από τα 300m περίπου 5%. Η συνολική επίδραση της υγρασίας εξαρτάται από τα είδη των συγκεντρώσεων και θα μπορούσε να προκαλέσει μέχρι 25% αύξηση στις μετρήσεις των συγκεντρώσεων.

5.4 ΔΕΔΟΜΕΝΑ 4ΗΣ ΠΤΗΣΗΣ – 08/12/2017

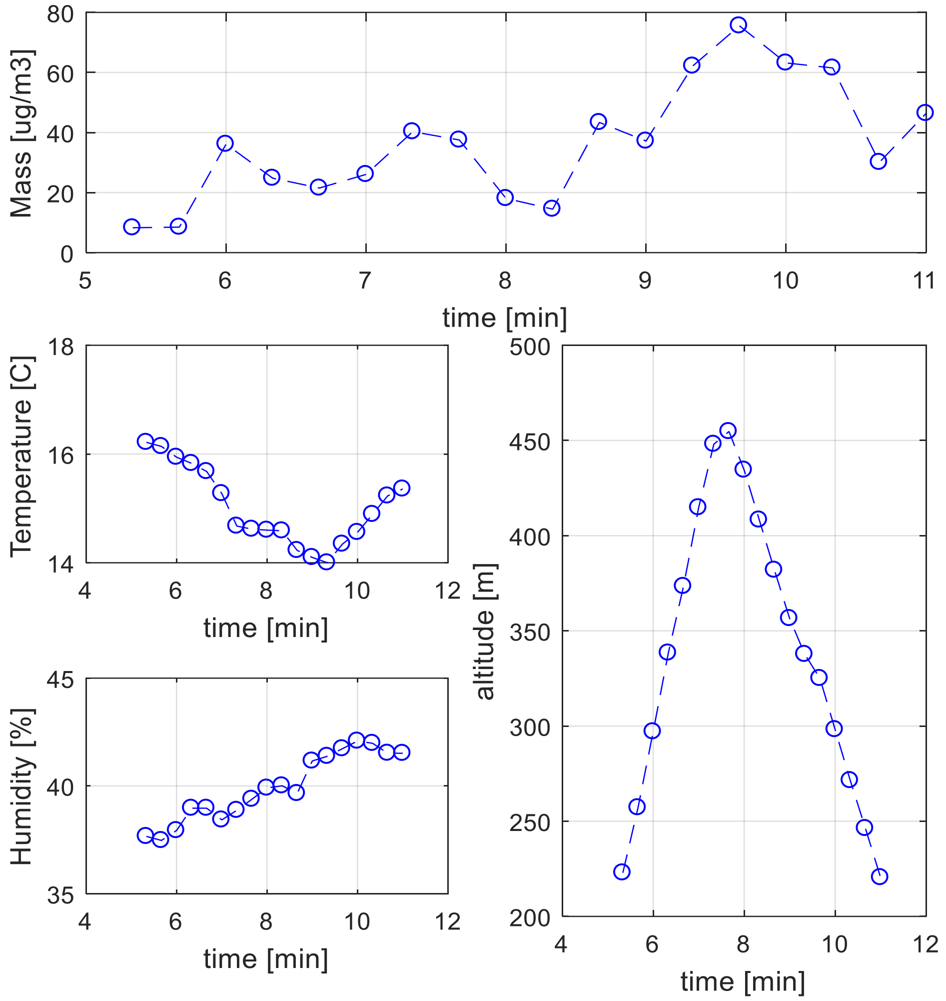
Οι συγκεντρώσεις μεταξύ 250m με 350m παρουσιάζουν μια αύξηση η οποία φτάνει μέχρι τα $80\mu g/m^3$, αλλά σε γενικές γραμμές οι συγκεντρώσεις διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα, κάτω από $30\mu g/m^3$. Παρατηρούμε ότι η ελάχιστη τιμή καταγράφηκε για υψόμετρο μεταξύ 400m και 450m και ήταν κάτω από $20\mu g/m^3$, ενώ η μέγιστη ήταν στα 330m, $75\mu g/m^3$.

5.4.1 Διάγραμμα κατακόρυφης κατανομής συγκέντρωσης μάζας PM_{10}



Εικόνα 5-15: Κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης μάζας, όπως αυτή καταγράφηκε από τον αισθητήρα στις 8 Δεκεμβρίου του 2017.

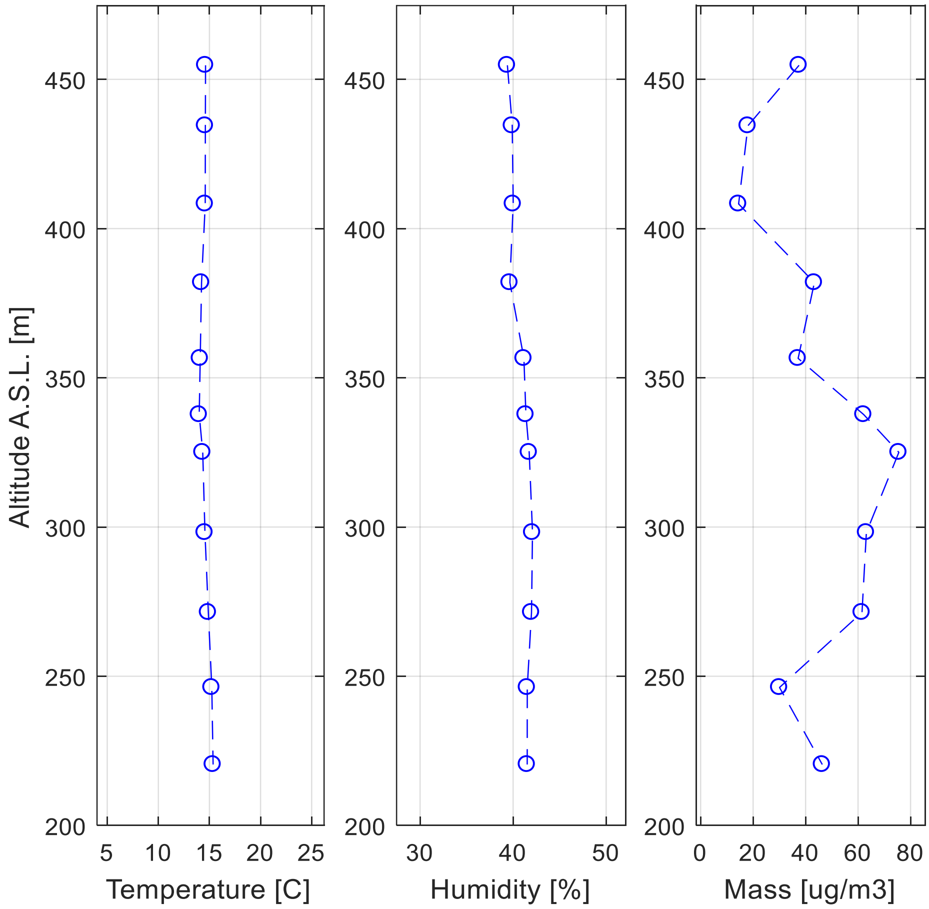
5.4.2 Διάγραμμα υγρασίας, θερμοκρασίας και μάζας ως προς το χρόνο



Εικόνα 5-16: Διάγραμμα πυκνότητας μάζας σωματιδίων PM_{10}, θερμοκρασίας, υγρασίας και υψομέτρου, ως προς το χρόνο για την πτήση στις 8 Δεκεμβρίου του 2017.

Όπως και στην προηγούμενη πτήση έτσι και εδώ φαίνεται ότι τα δεδομένα κατά την απογείωση του UAV είναι μικρότερα απ’ ότι κατά την προσγείωσή του, ενώ παρατηρούμε ακόμα ότι η ταχύτητα κατά την προσγείωση ήταν σίγουρα μικρότερη απ’ ότι κατά την απογείωση.

5.4.3 Διάγραμμα υγρασίας, θερμοκρασίας και μάζας ως προς το υψόμετρο



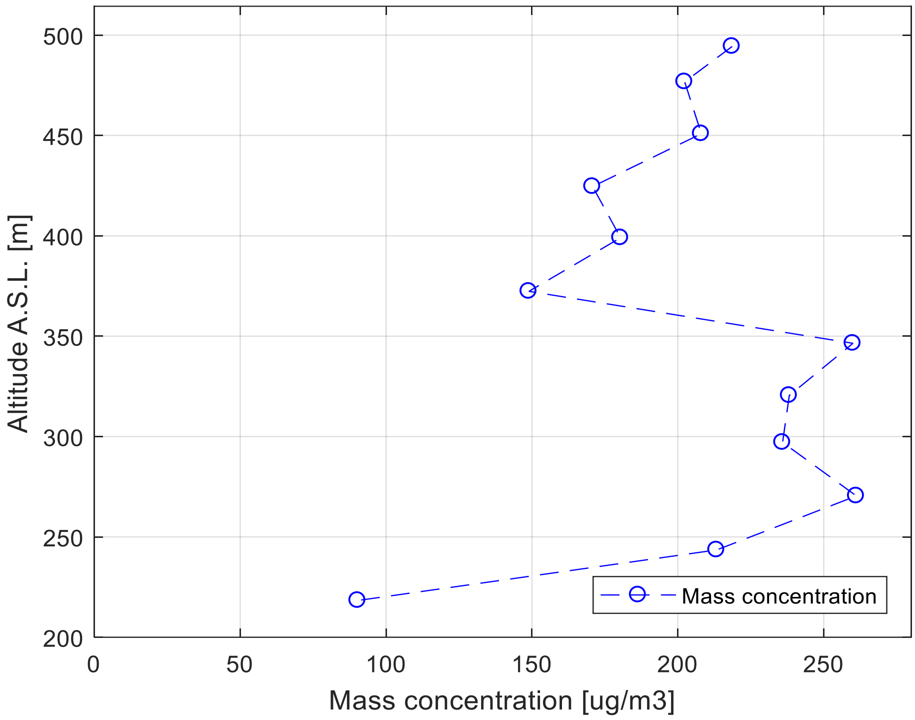
Εικόνα 5-17: Διάγραμμα θερμοκρασίας, υγρασίας και πυκνότητας μάζας σωματιδίων PM_{10}, ως προς το απόλυτο υψόμετρο από τη στάθμη της θάλασσας για την πτήση στις 8 Δεκεμβρίου 2017.

Οι τιμές της θερμοκρασίας παραμένουν σταθερές με το ύψος, ενώ η σχετική υγρασία είναι περίπου στο 40%. Παρ' όλο που οι τιμές της σχετικής υγρασίας δεν έχουν μεγάλη διακύμανση μεταξύ τους, ευρίσκονται σε ένα σχετικά υψηλό επίπεδο που θα μπορούσε να επηρεάσει τις μετρήσεις της ανιχνευτικής διάταξης μέχρι και 20%.

5.5 ΔΕΔΟΜΕΝΑ 5ΗΣ ΠΤΗΣΗΣ – 09/03/2018

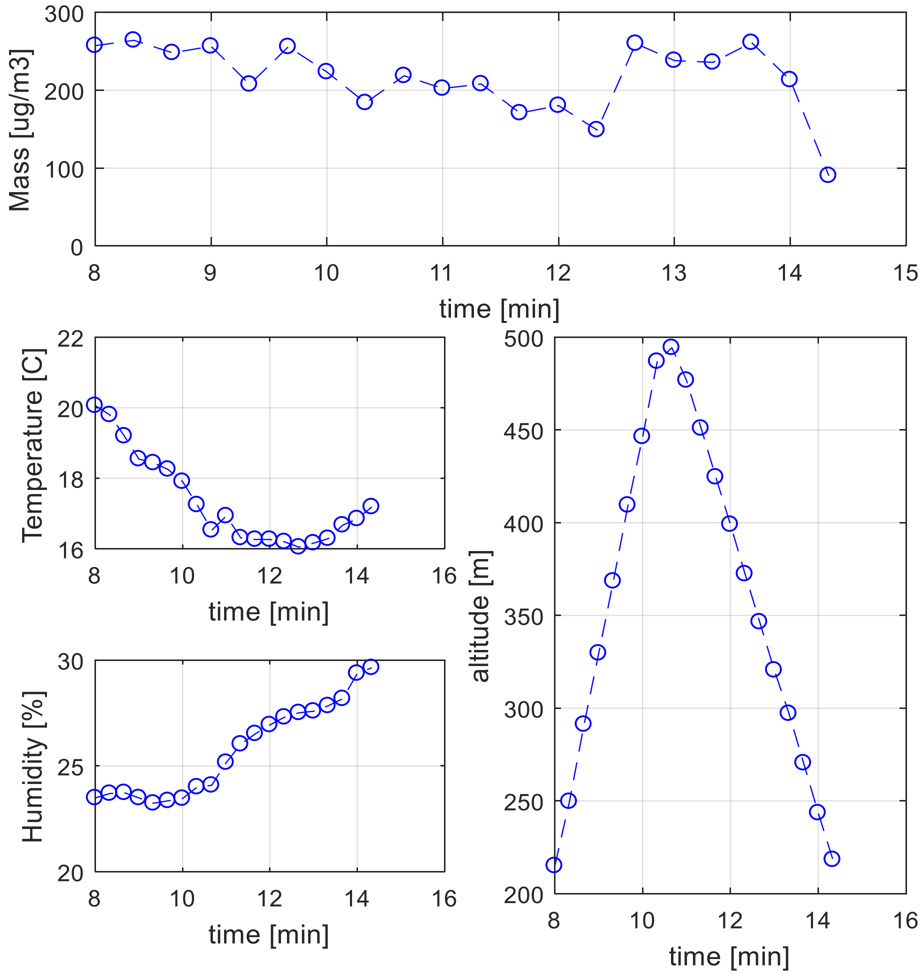
Κοντά στο έδαφος οι μετρήσεις δίνουν αρκετά υψηλές συγκεντρώσεις, ωστόσο χαμηλότερες από $100\mu g/m^3$. Παρατηρούμε μια πολύ μεγάλη αύξηση μέχρι τα $350m$ περίπου όπου υποθέτουμε την παρουσία από σύννεφο σκόνης (φαινόμενο Σαχάρας). Από τα $350m$ μέχρι και τα $500m$, όπου ήταν το μέγιστο υψόμετρο γι αυτή την πτήση, οι μετρήσεις των συγκεντρώσεων δείχνουν να αυξάνονται. Τα δεδομένα σημεία είναι ο μέσος όρος από μετρήσεις 15 δευτερολέπτων.

5.5.1 Διάγραμμα κατακόρυφης κατανομής συγκέντρωσης μάζας PM_{10}



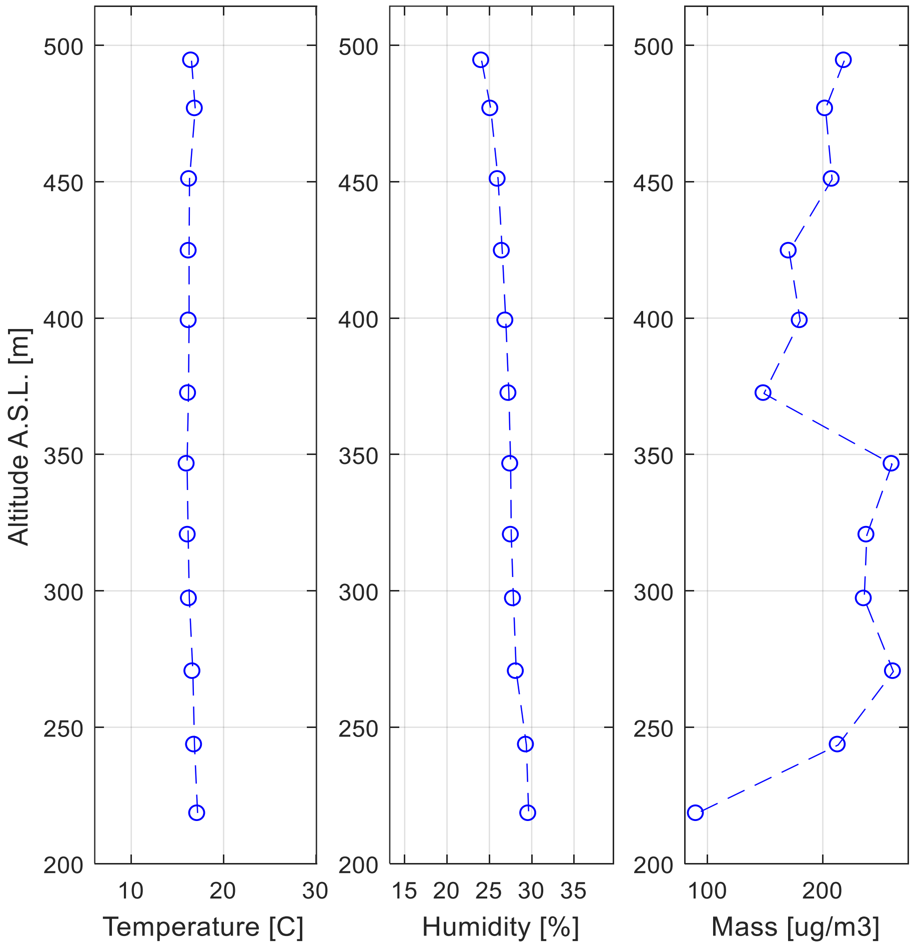
Εικόνα 5-18: Κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης μάζας, όπως αυτή καταγράφηκε από τον αισθητήρα στις 9 Μαρτίου του 2018.

5.5.2 Διάγραμμα υγρασίας, θερμοκρασίας και μάζας ως προς το χρόνο



Εικόνα 5-19: Διάγραμμα πυκνότητας μάζας σωματιδίων PM_{10}, θερμοκρασίας, υγρασίας και υψομέτρου, ως προς το χρόνο για την πτήση στις 9 Μαρτίου του 2018.

5.5.3 Διάγραμμα υγρασίας, θερμοκρασίας και μάζας ως προς το υψόμετρο

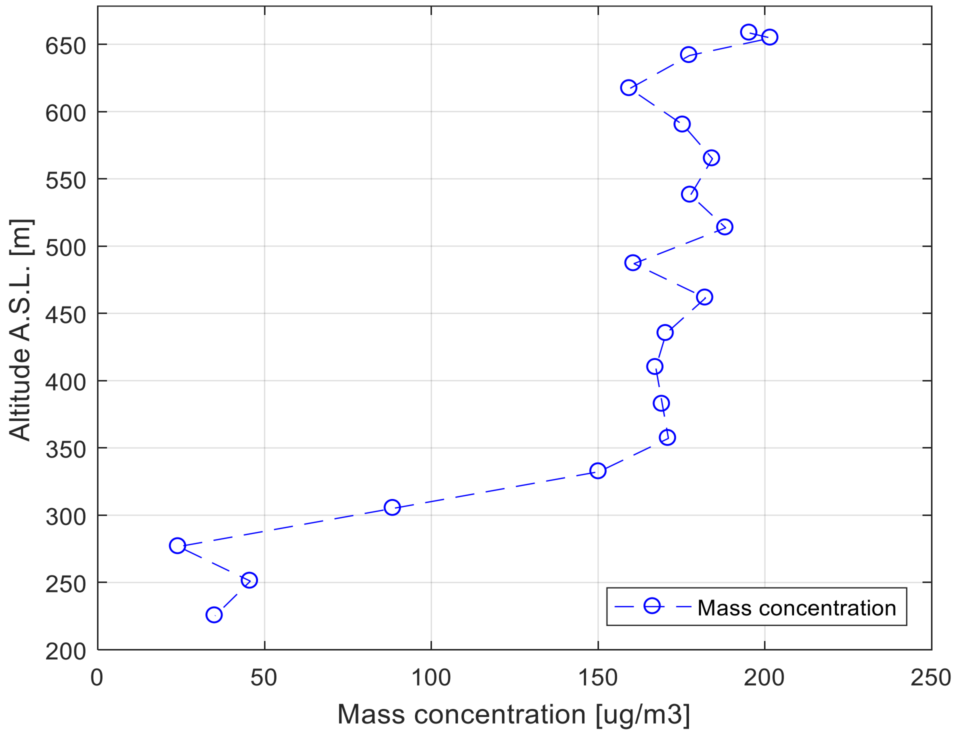


Εικόνα 5-20: Διάγραμμα θερμοκρασίας, υγρασίας και πυκνότητας μάζας σωματιδίων PM_{10}, ως προς το απόλυτο υψόμετρο από τη στάθμη της θάλασσας για την πτήση της 9ης Μαρτίου 2018.

5.6 ΔΕΔΟΜΕΝΑ 6ΗΣ ΠΤΗΣΗΣ – 09/03/2018

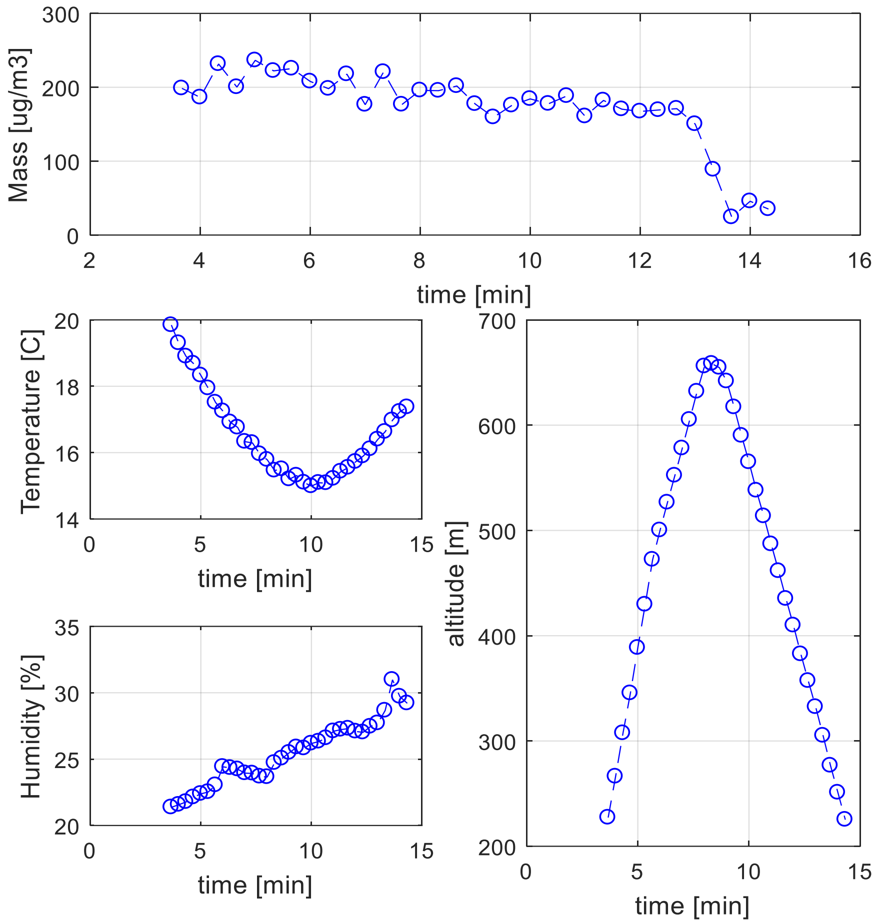
Αυτή η πτήση πραγματοποιήθηκε λίγες ώρες μετά την ολοκλήρωση της 5ης πτήσης. Από τα δεδομένα παρατηρούμε ότι το UAV μπαίνει στο σύννεφο σκόνης περίπου στα 300m και από τα 350m και πάνω οι συγκεντρώσεις σταθεροποιούνται μεταξύ 160 και $180\mu g/m^3$.

5.6.1 Διάγραμμα κατακόρυφης κατανομής συγκέντρωσης μάζας PM_{10}



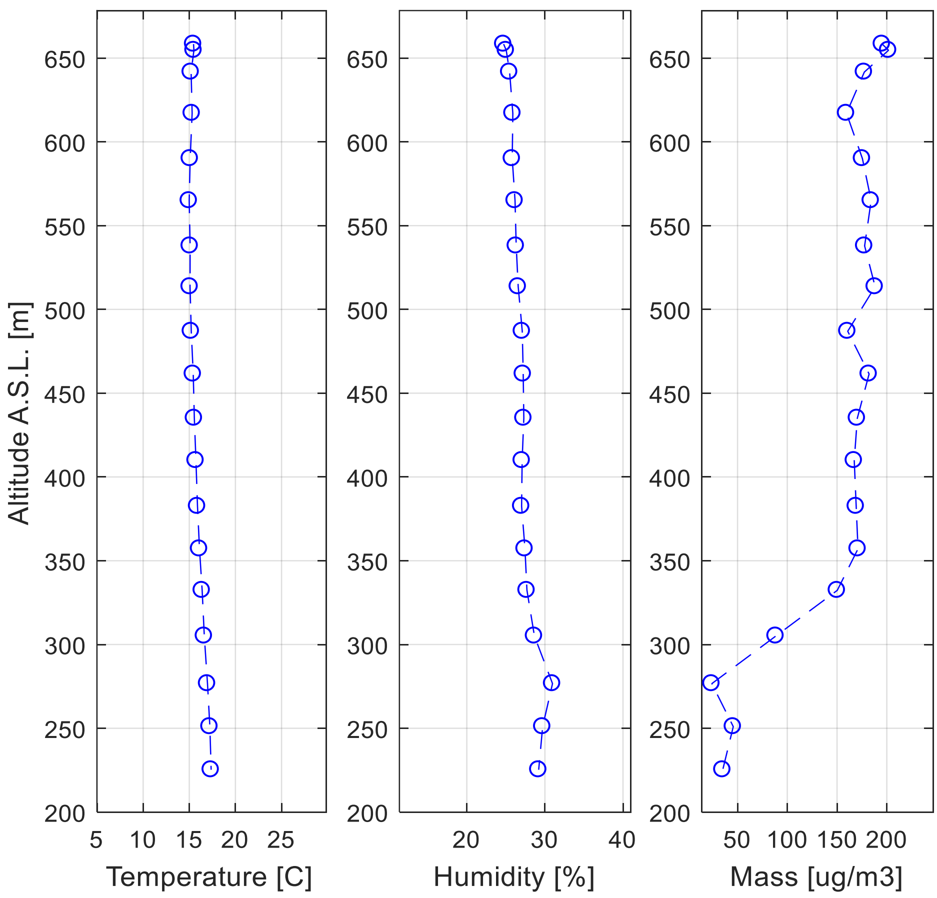
Εικόνα 5-21: Κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης μάζας, όπως αυτή καταγράφηκε από τον αισθητήρα της 9ης Μαρτίου 2018, 12.30 UTC.

5.6.2 Διάγραμμα υγρασίας, θερμοκρασίας και μάζας ως προς το χρόνο



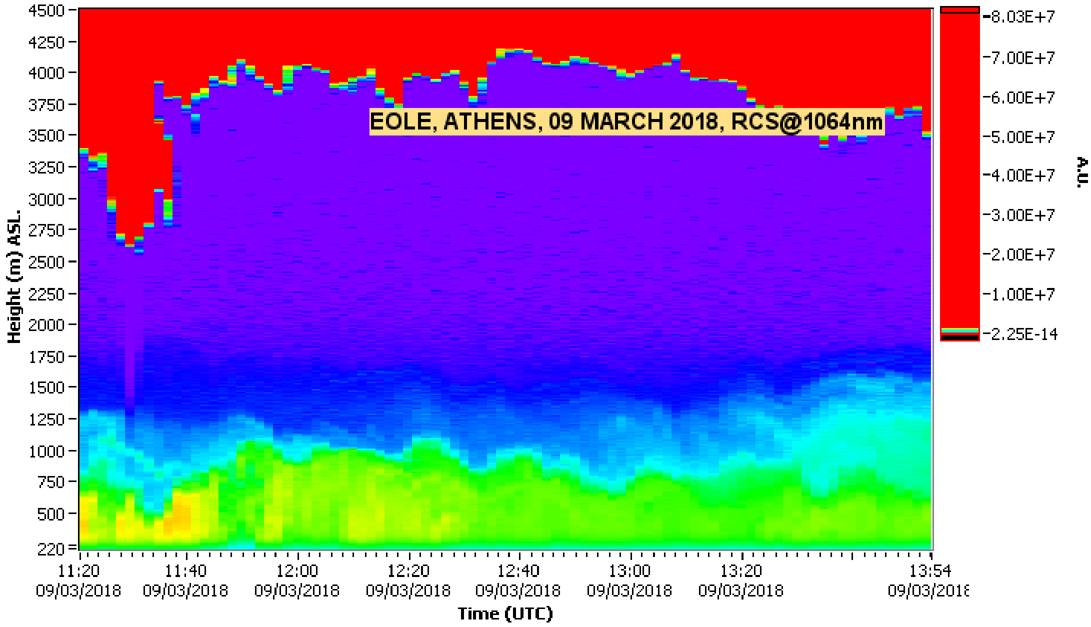
Εικόνα 5-22: Διάγραμμα πυκνότητας μάζας σωματιδίων PM_{10}, θερμοκρασίας, υγρασίας και υψομέτρου, ως προς το χρόνο για την πτήση της 9^{ης} Μαρτίου 2018, 12.30 UTC.

5.6.3 Διάγραμμα υγρασίας, θερμοκρασίας και μάζας ως προς το υψόμετρο

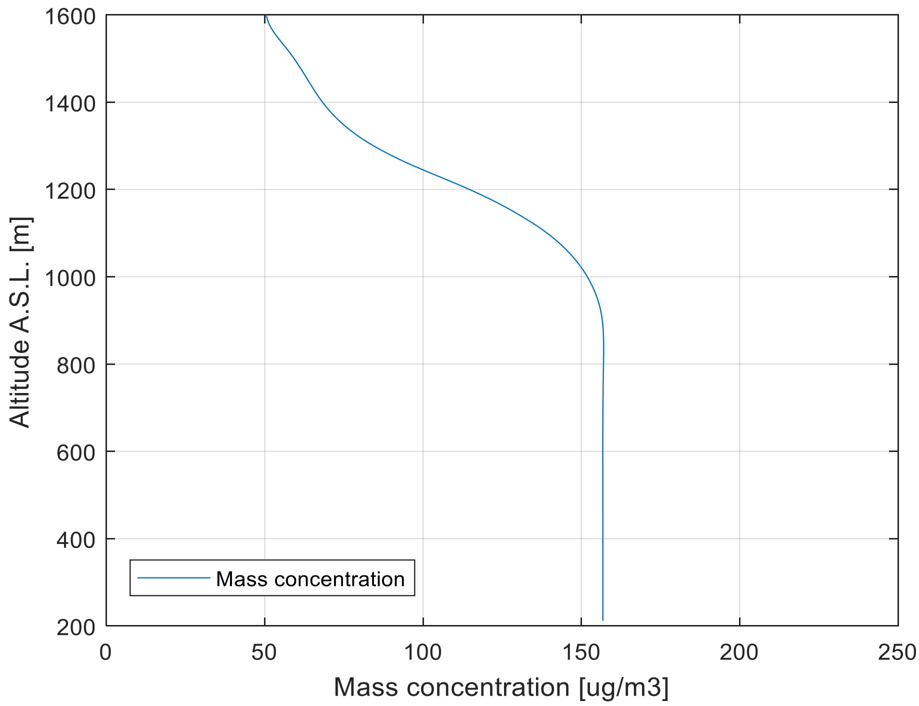


Εικόνα 5-23: Διάγραμμα θερμοκρασίας, υγρασίας και πυκνότητας μάζας σωματιδίων PM_{10}, ως προς το απόλυτο υψόμετρο από τη στάθμη της θάλασσας για την πτήση της 9ης Μαρτίου 2018, 12.30 UTC.

5.6.4 Αποτελέσματα μετρήσεων του συστήματος Lidar EOLE



Εικόνα 5-24: Χωροχρονική εξέλιξη του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος Lidar στα $1064nm$, διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCS), όπως καταγράφηκε από το σύστημα EOLE στις 9 Μαρτίου 2018.

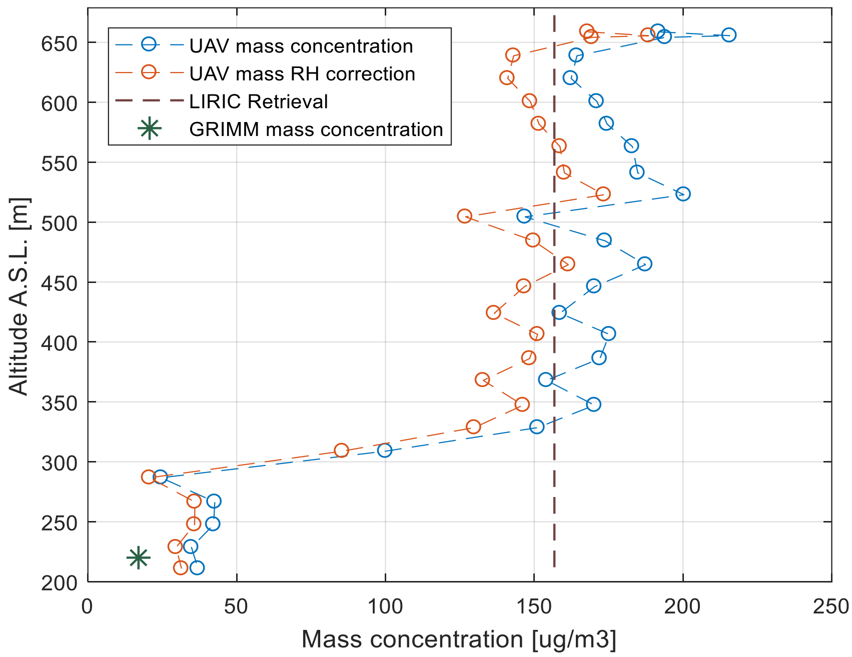


Εικόνα 5-25: Οι κατακόρυφες κατανομές μάζας των συνολικών σωματιδίων (λεπτών και αδρών), όπως αυτές υπολογίσθηκαν με χρήση του αλγορίθμου LIRIC και την εξίσωση (3.12), από τα δεδομένα του σταθμού Lidar στις 9 Μαρτίου του 2018, 12.30 UTC.

Στην εικόνα 5-24 φαίνεται η χωρική και χρονική εξέλιξη του σήματος Lidar στα $1064nm$, διορθωμένο ως προς την απόσταση. Βλέπουμε ότι υπάρχουν τρία χαρακτηριστικά στρώματα ως προς τις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων. α) Το πρώτο έχει σημαντικά υψηλές συγκεντρώσεις και εκτείνεται από το έδαφος μέχρι τα 1000m. β) Το δεύτερο, όπου οι συγκεντρώσεις είναι αρκετά μικρότερες εκτείνεται μέχρι τα 3500m περίπου. Γ) Το τρίτο, το οποίο εκτείνεται σε όλο το υπόλοιπο εύρος ύψους ανίχνευσης, από το Lidar και από το οπισθοσκεδάζον σήμα του παρατηρούμε ότι έχει πολύ υψηλές συγκεντρώσεις σωματιδίων. Επομένως καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ένα μέρος των αιωρούμενων σωματιδίων είναι συγκεντρωμένο κοντά στο έδαφος, ενώ η πλειοψηφία τους έχει συγκεντρωθεί σε υψόμετρο μεγαλύτερο από $3500m$.

5.6.5 Διόρθωση αποτελεσμάτων UAV λόγω της σχετικής υγρασίας

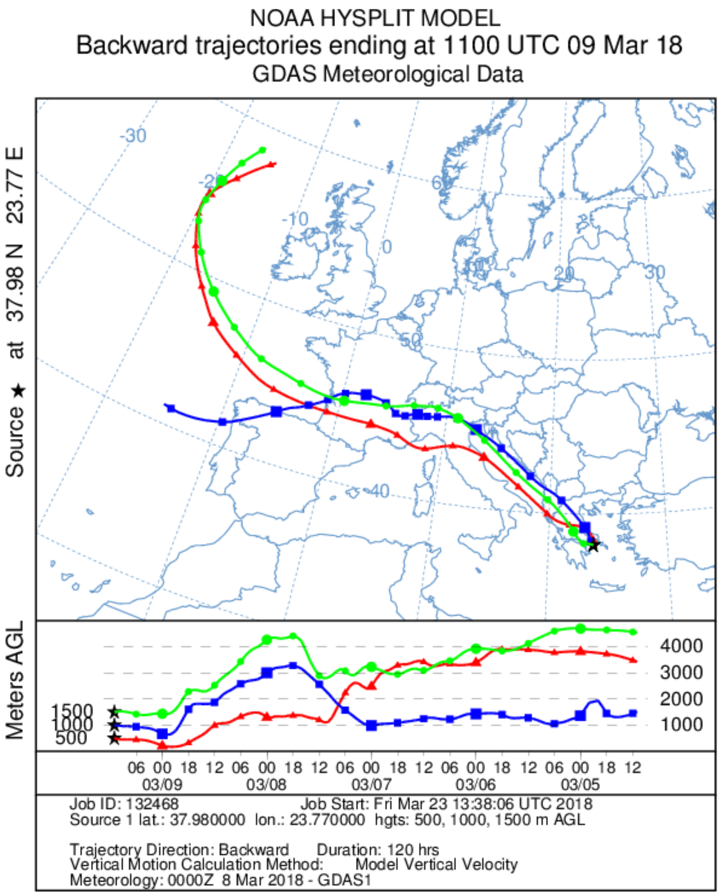
Γι αυτή τη μέρα, τα δεδομένα ποσοστών των ατμοσφαιρικών ρύπων όπως καταγράφηκαν από το ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος ήταν Cl: 0,4%, NH_4NO_3: 10%, $(NH_4)_2SO_4$: 14%, $Organic\ fraction$: 75.6%.



Εικόνα 5-26: Οι κατακόρυφες κατανομές μάζας, όπως αυτή μετρήθηκε από το UAV, με τη διόρθωση λόγω της σχετικής υγρασίας από τον αλγόριθμο LIRIC και από τον επίγειο αισθητήρα GRIMM στο ΕΜΠ στις 9 Μαρτίου 2018, 12.30 UTC.

Η μέση τιμή των συγκεντρώσεων μάζας όπως αυτή μετρήθηκε από την ανιχνευτική διάταξη πάνω στο UAV είναι $177\mu g/m^3$ και $153\mu g/m^3$ αντίστοιχα, με τη διόρθωση ως προς τη σχετική υγρασία για υψόμετρο μεγαλύτερο από $350m$. Οι μετρήσεις από το σταθμό Lidar έχουν μέση τιμή $157\mu g/m^3$ γι αυτό το υψόμετρο. Επομένως οι δύο διαφορετικές τεχνικές μέτρησης μας δίνουν αρκετά κοντινά μεταξύ τους αποτελέσματα. Επίσης, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι οι μετρήσεις από την ανιχνευτική διάταξη στο UAV περιέχουν αρκετές διακυμάνσεις, ενώ οι μετρήσεις του σταθμού Lidar είναι σταθερές για υψόμετρα από 300 μέχρι τα 800m.

Από την εικόνα 5-27 φαίνεται επιπλέον η πορεία των αερολυμάτων προς την ατμόσφαιρα της Αθήνας, όπως προκύπτει με βάση το μοντέλο $Hysplit$ για τις 9 Μαρτίου 2018.

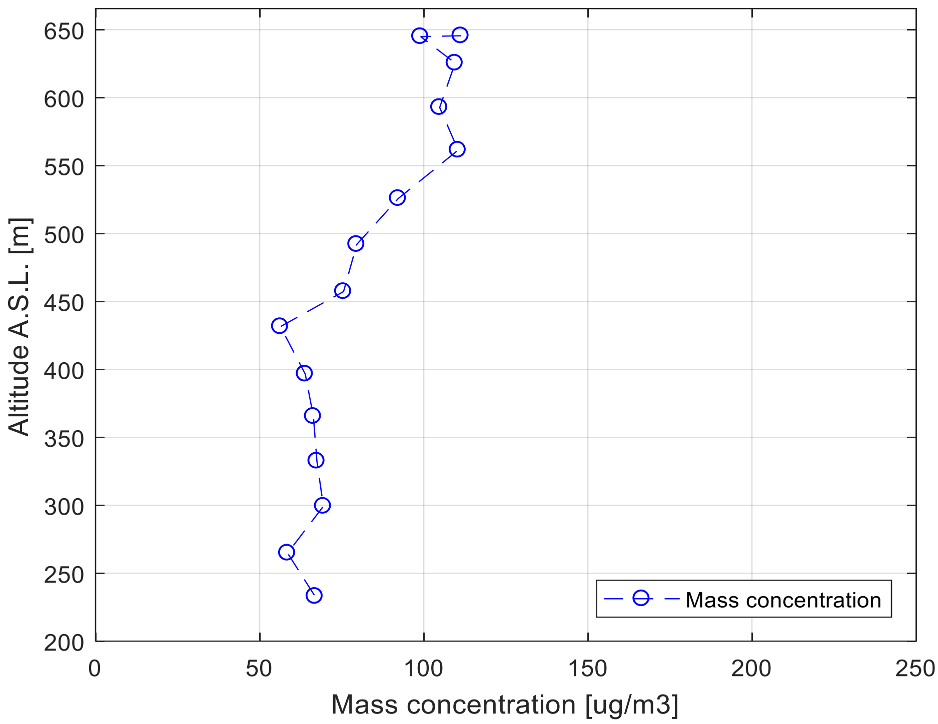


Εικόνα 5-27: Οι τροχιές των κατακόρυφων κατανομών αερολυμάτων με βάση το μοντέλο $Hysplit$ για τα ύψη των 500m, 1000m και 1500m για χρονική διάρκεια 120 ωρών στις 8 με 9 Μαρτίου του 2018.

5.7 ΔΕΔΟΜΕΝΑ 7ΗΣ ΠΤΗΣΗΣ – 10/03/2018

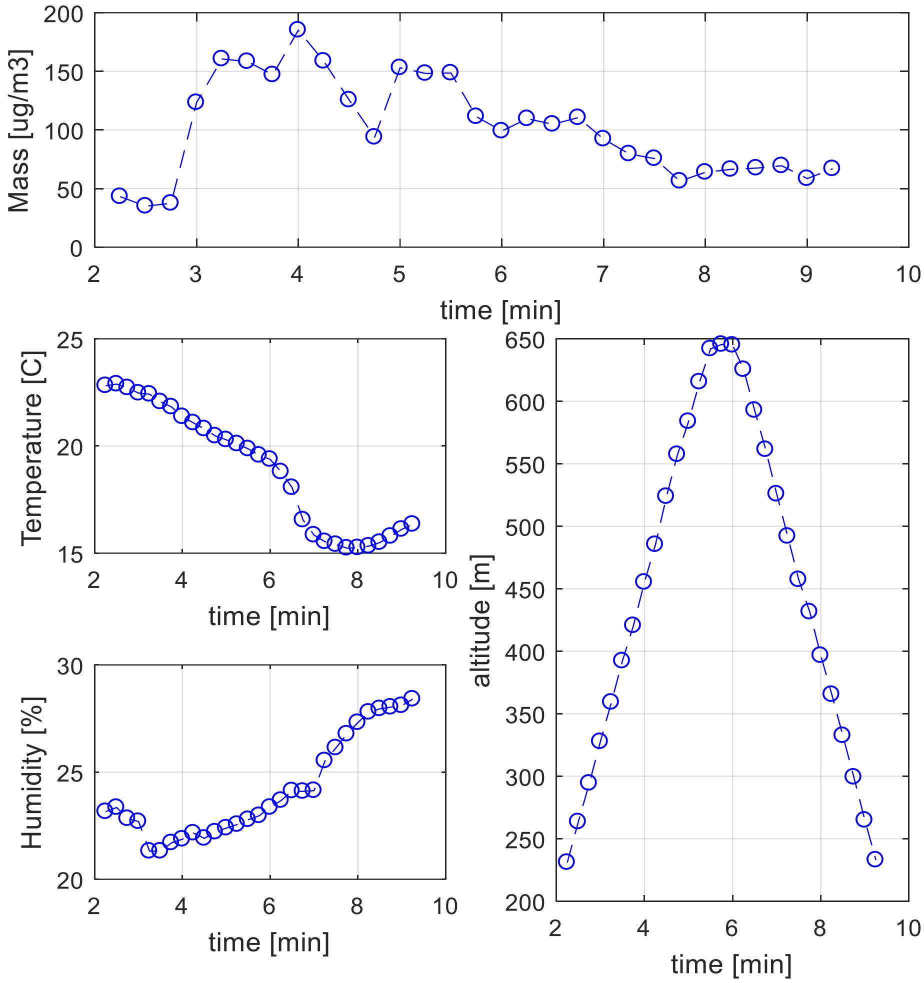
Η πτήση πραγματοποιήθηκε στις 10 Μαρτίου του 2018. Οι συγκεντρώσεις κοντά στο έδαφος διατηρούνται σε φυσιολογικά επίπεδα μεταξύ 50 και $70\mu g/m^3$. Μετά τα 450m παρατηρείται μια σταδιακή αύξηση των αιωρούμενων σωματιδίων, οι συγκεντρώσεις των οποίων φτάνουν μέχρι τα $110\mu g/m^3$. Τα σημεία του διαγράμματος προκύπτουν από το μέσο όρο μετρήσεων για 15 δευτερόλεπτα.

5.7.1 Διάγραμμα κατακόρυφης κατανομής συγκέντρωσης μάζας PM_{10}



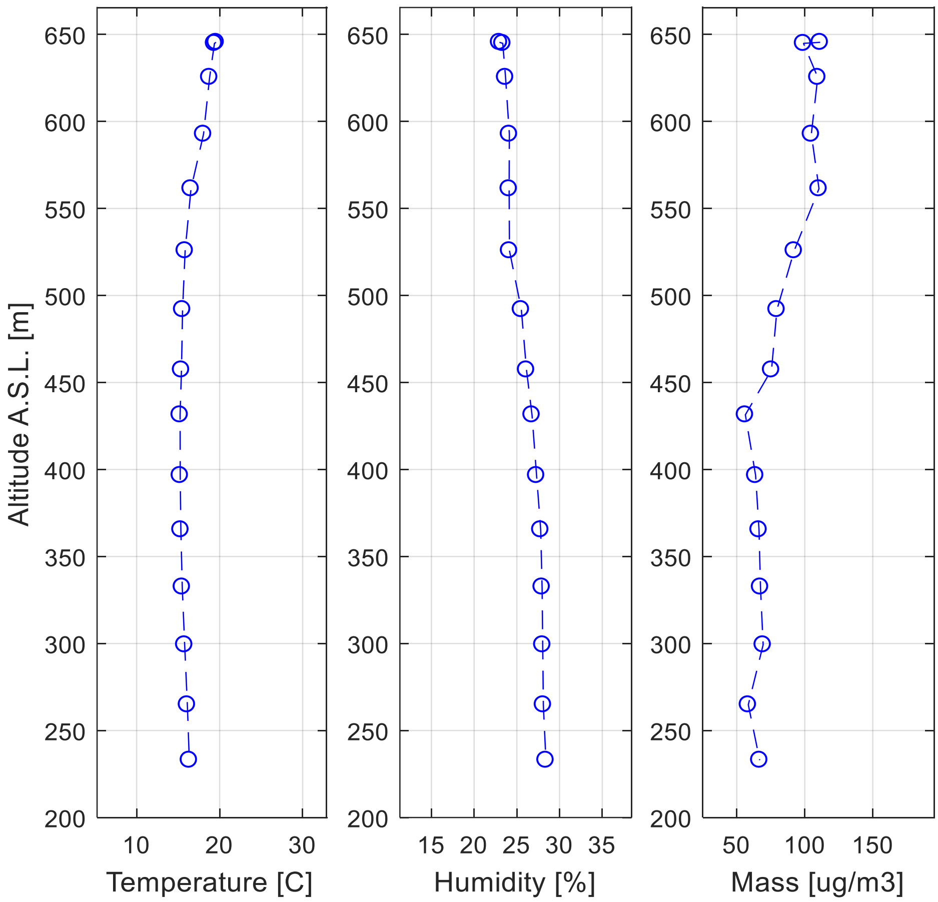
Εικόνα 5-28: Κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης μάζας, όπως αυτή καταγράφηκε από τον αισθητήρα στις 10 Μαρτίου του 2018.

5.7.2 Διάγραμμα υγρασίας, θερμοκρασίας και μάζας ως προς το χρόνο



Εικόνα 5-29: Διάγραμμα πυκνότητας μάζας σωματιδίων PM_{10}, θερμοκρασίας, υγρασίας και υψομέτρου, ως προς το χρόνο για την πτήση στις 10 Μαρτίου του 2018.

5.7.3 Διάγραμμα υγρασίας, θερμοκρασίας και μάζας ως προς το υψόμετρο

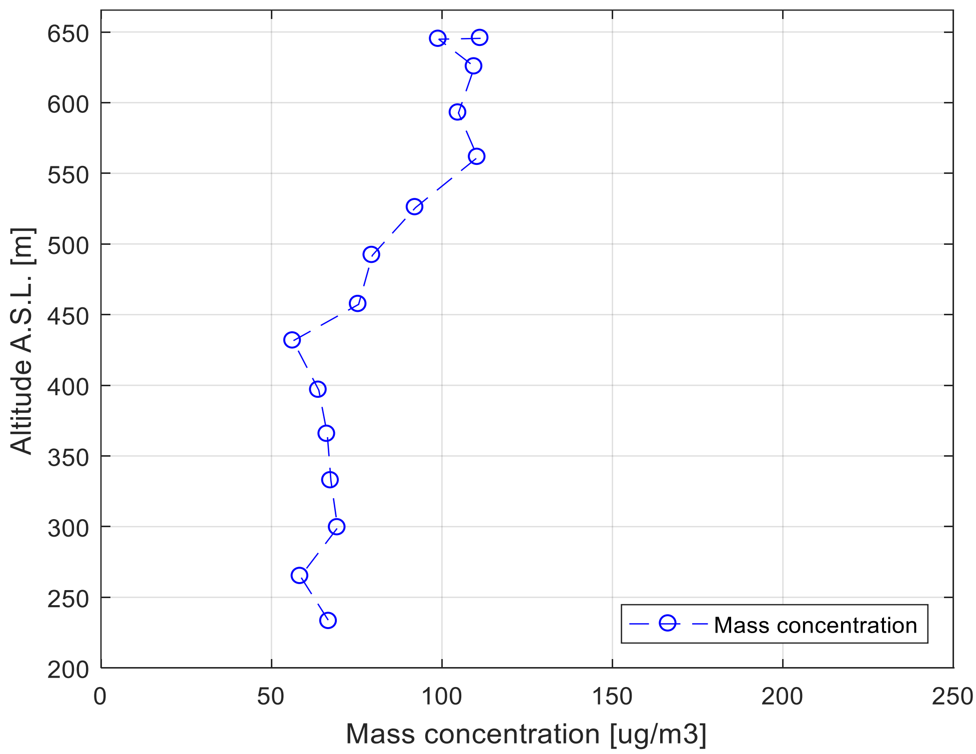


Εικόνα 5-30: Διάγραμμα θερμοκρασίας, υγρασίας και πυκνότητας μάζας σωματιδίων PM_{10}, ως προς το απόλυτο υψόμετρο από τη στάθμη της θάλασσας για την πτήση της 10^{ης} Μαρτίου 2018.

5.8 ΔΕΔΟΜΕΝΑ 8ΗΣ ΠΤΗΣΗΣ – 10/03/2018

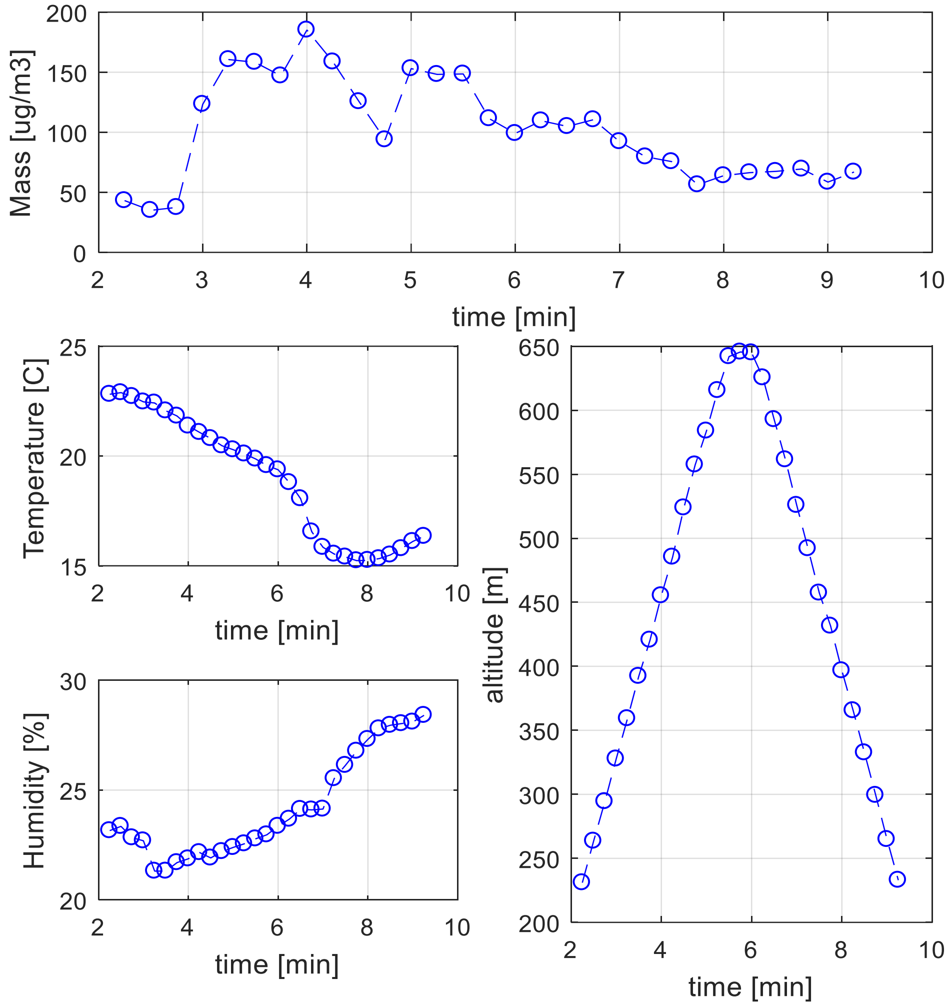
Αυτή η πτήση είχε μια χρονική διαφορά περίπου 15 λεπτών από την προηγούμενη. Μπορούμε να δούμε ότι οι δύο μετρήσεις είναι παρόμοιες μέχρι τα 500m. Αντιθέτως, σε μεγαλύτερα υψόμετρα παρατηρούμε ότι οι συγκεντρώσεις παραμένουν περίπου στα ίδια επίπεδα. Τα σημεία είναι ο μέσος των μετρήσεων 20 δευτερολέπτων. Σε αυτή την πτήση, σχεδόν όλες οι μετρήσεις σε κυμαίνονται μεταξύ 50 και $70\mu g/m^3$. Αντίστοιχα με την προηγούμενη, οι δύο τελευταίες πτήσεις (στο μεγαλύτερο υψόμετρο) δεν είναι αξιόπιστες, επειδή είναι κοντά στο σημείο που ξεκίνησε η προσγείωση του UAV.

5.8.1 Διάγραμμα κατακόρυφης κατανομής συγκέντρωσης μάζας PM_{10}



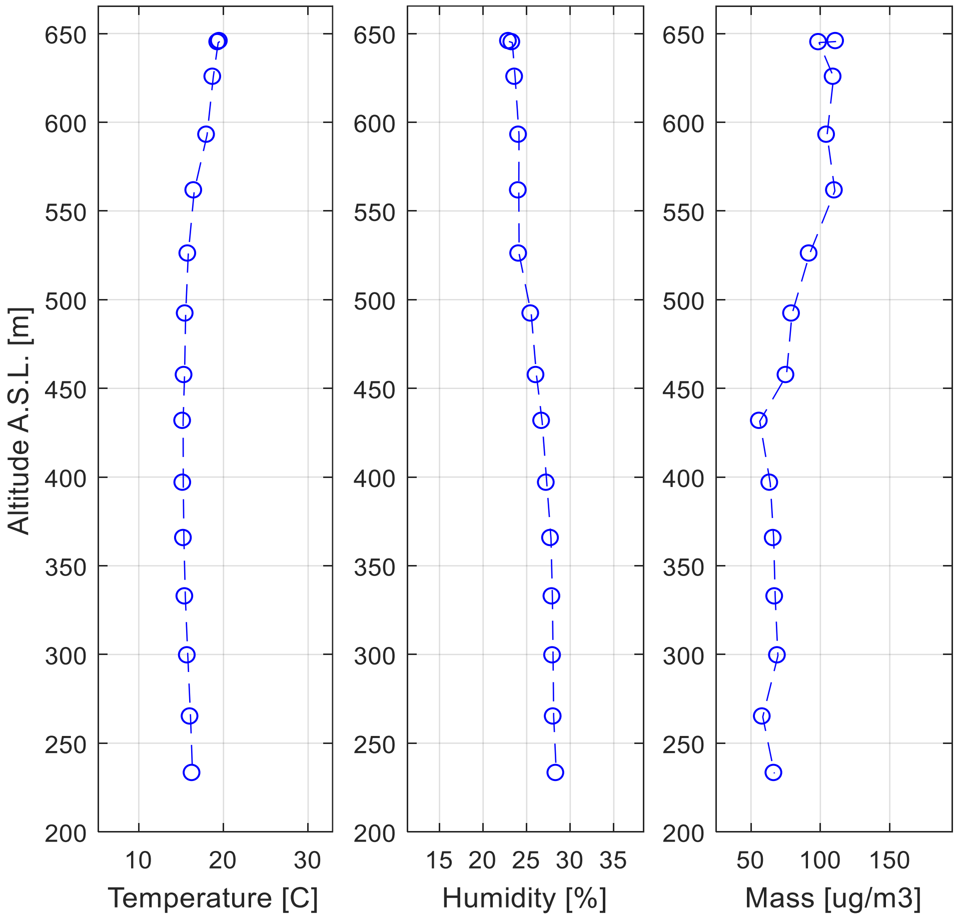
Εικόνα 5-31: Κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης μάζας, όπως αυτή καταγράφηκε από τον αισθητήρα στις 10 Μαρτίου του 2018.

5.8.2 Διάγραμμα υγρασίας, θερμοκρασίας και μάζας ως προς το χρόνο



Εικόνα 5-32: Διάγραμμα πυκνότητας μάζας σωματιδίων PM_{10}, θερμοκρασίας, υγρασίας και υψομέτρου, ως προς το χρόνο για την πτήση στις 10 Μαρτίου του 2018.

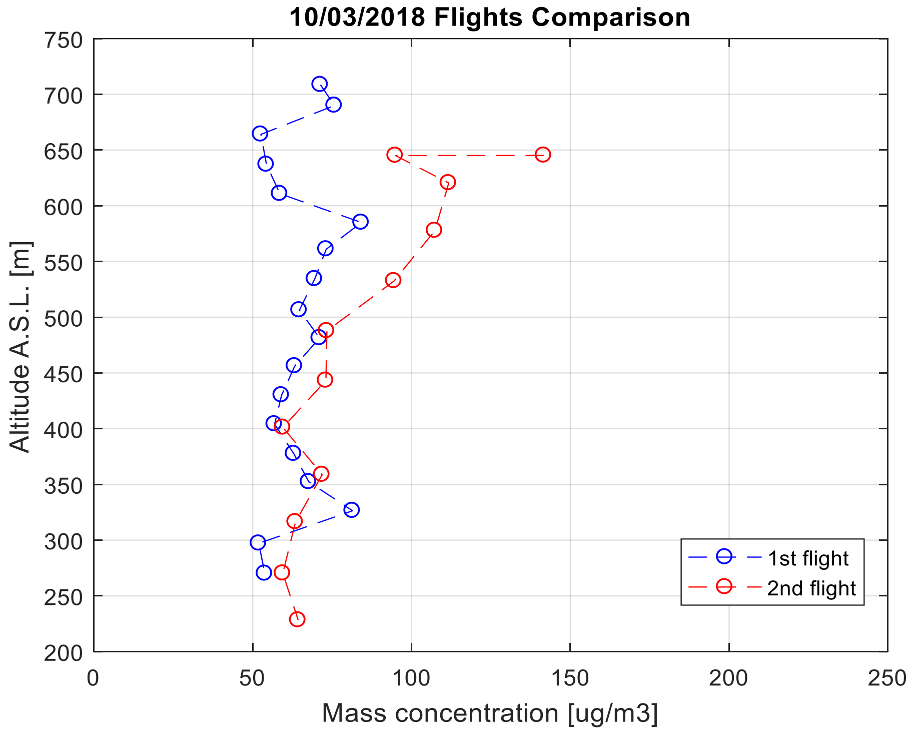
5.8.3 Διάγραμμα υγρασίας, θερμοκρασίας και μάζας ως προς το υψόμετρο



Εικόνα 5-33: Διάγραμμα θερμοκρασίας, υγρασίας και πυκνότητας μάζας σωματιδίων PM_{10}, ως προς το απόλυτο υψόμετρο από τη στάθμη της θάλασσας για την πτήση της 10^{ης} Μαρτίου 2018.

5.8.4 Σύγκριση μετρήσεων 7ης και 8ης πτήσης

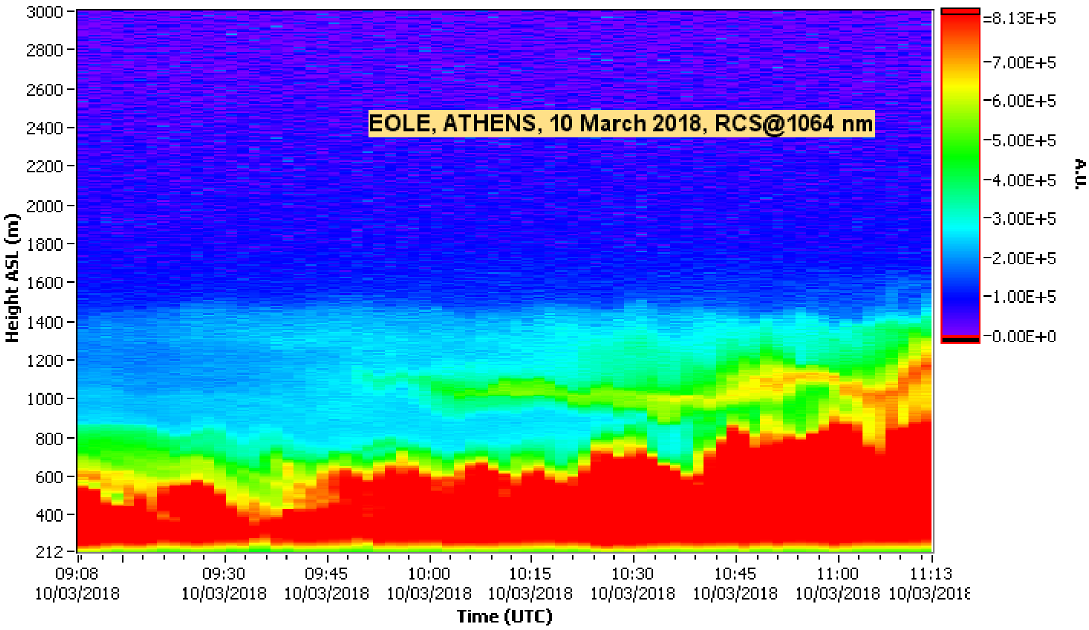
Στην εικόνα 5-34 συγκρίνουμε τις μετρήσεις από τις δύο προηγούμενες πτήσεις.



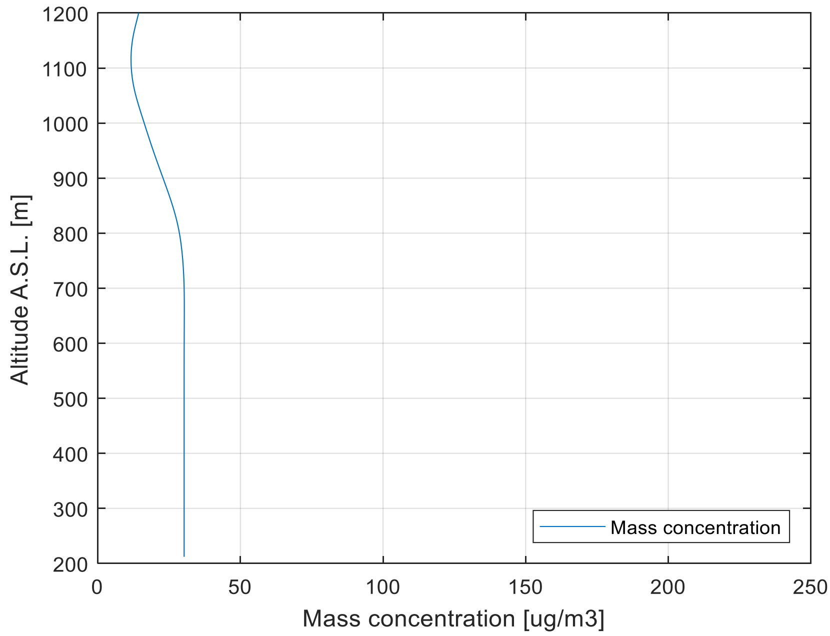
Εικόνα 5-34: Διάγραμμα σύγκρισης μετρήσεων κατακόρυφης συγκέντρωσης σωματιδίων PM10 κατά την πρώτη (μπλε) και δεύτερη (κόκκινο) πτήση της 10ης Μαρτίου 2018.

Παρατηρούμε ότι τα δεδομένα των δύο πτήσεων για υψόμετρο κάτω από 500m είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, αλλά στη συνέχεια, όσο αυξάνεται το υψόμετρο τα δεδομένα παρουσιάζουν απόκλιση. Επειδή το χρονικό διάστημα μεταξύ των μετρήσεων ήταν περίπου 10 λεπτά, αυτή η απόκλιση πιθανότατα οφείλεται σε κάποιο άνεμο, ο οποίος προκάλεσε αύξηση των συγκεντρώσεων. Όπως αναφέρουμε και στην παράγραφο 4.8, η τελευταία μέτρηση της 2ης πτήσης παρουσιάζει απότομη μείωση, ωστόσο υποθέτουμε ότι αυτό συμβαίνει λόγω της μείωσης της ισχύος στους έλικες του UAV, για το λόγο αυτό μπορεί να αγνοηθεί.

5.8.5 Αποτελέσματα μετρήσεων του συστήματος Lidar EOLE



Εικόνα 5-35: Χωροχρονική εξέλιξη του οπισθοσκεδαζόμενου σήματοςLidar στα $1064nm$, διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCS), όπως καταγράφηκε από το σταθμό EOLE στις 10 Μαρτίου 2018.

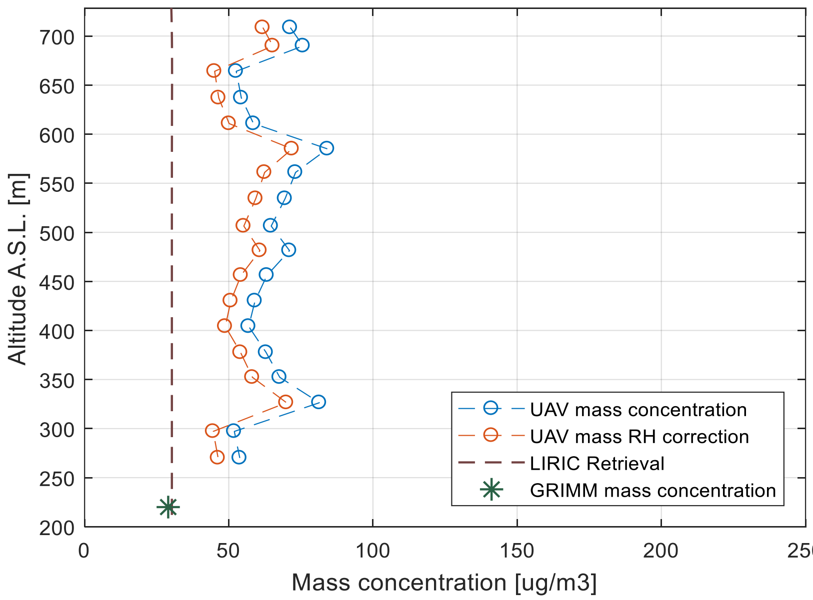


Εικόνα 5-36: Οι κατακόρυφες κατανομές μάζας των συνολικών σωματιδίων (λεπτών και αδρών), όπως αυτές υπολογίστηκαν με χρήση του αλγορίθμου LIRIC και την εξίσωση (3.12), από τα δεδομένα του σταθμού Lidar στις 10 Μαρτίου 2018, 10.00 UTC.

Στην εικόνα 5-35 φαίνεται η χωρική και χρονική εξέλιξη του σήματος Lidar στα $1064nm$, διορθωμένο ως προς την απόσταση. Βλέπουμε ότι η μεγάλη πλειοψηφία των αιωρούμενων σωματιδίων βρίσκεται στην περιοχή πάνω από το έδαφος και μέχρι τα 800m. Στη συνέχεια ακολουθεί ένα στρώμα με σημαντικά πιο αραιή πυκνότητα ρύπων και από τα 1500m μέχρι τα 3000m (που είναι και το μέγιστο υψόμετρο καταγραφής δεδομένων) η ατμόσφαιρα είναι καθαρή. Η ένταση του σήματος της διάταξης Lidar είναι χαμηλή σε γενικές γραμμές, εξ αυτού προκύπτει ότι τα αιωρούμενα σωματίδια στην ατμόσφαιρα για αυτή την ημέρα κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα.

5.8.6 Διόρθωση αποτελεσμάτων UAV λόγω σχετικής υγρασίας

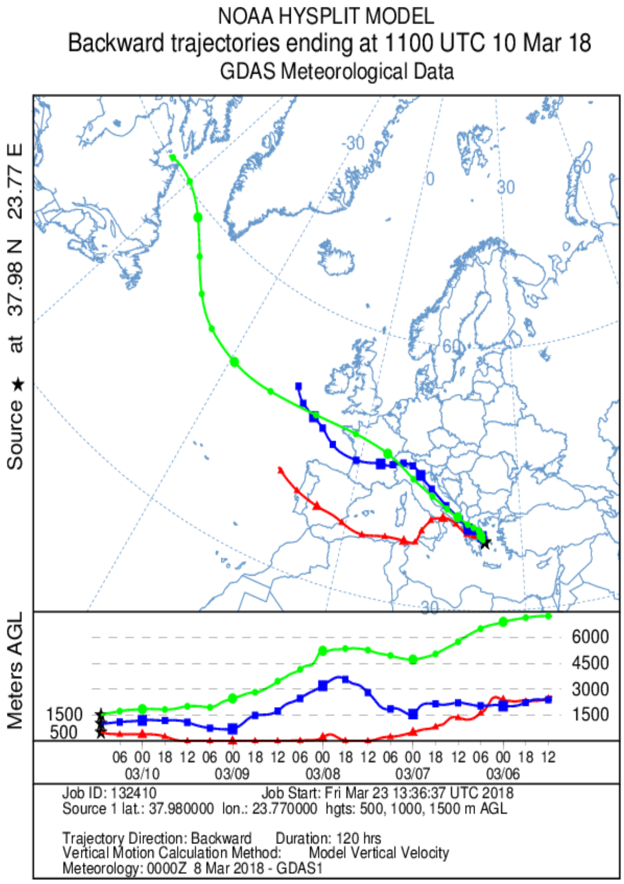
Γι αυτή την ημέρα τα δεδομένα ποσοστών των ατμοσφαιρικών ρύπων, όπως αυτά καταγράφηκαν από το ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος είναι Cl: 1%, NH_4NO_3: 8%, $(NH_4)_2SO_4$: 25%, $Organic\ fraction$: 66%.



Εικόνα 5-37: Οι κατακόρυφες κατανομές μάζας, όπως αυτή μετρήθηκε από το UAV, με τη διόρθωση λόγω της σχετικής υγρασίας, από τον αλγόριθμο LIRIC και από τον επίγειο αισθητήρα GRIMM στο ΕΜΠ, στις 10 Μαρτίου 2018, 10.00 UTC.

Οι μετρήσεις μεταξύ της ανιχνευτικής διάταξης και των αποτελεσμάτων από τα δεδομένα του σταθμού Lidar φαίνεται να διαφέρουν αρκετά μεταξύ τους. Οι μετρήσεις από το σταθμό lidar μας δίνουν μια μέση τιμή περίπου $30\mu g/m^3$, ενώ οι μετρήσεις από την ανιχνευτική διάταξη μας δίνουν μια μέση τιμή $70\mu g/m^3$ και $56\mu g/m^3$ με τη διόρθωση λόγω της σχετικής υγρασίας. Όπως έχει περιγραφεί έως τώρα, υπάρχουν αρκετοί λόγοι που εξηγούν αυτή τη διαφορά, , συμπεριλαμβανομένων και των ανέμων και της συνεισφοράς που έχουν οι έλικες του UAV.

Μια επιπλέον πιθανή αιτία είναι η διαφορά στο μήκος κύματος των δύο ανιχνευτικών διατάξεων. Η διάταξη που χρησιμοποιούμε στο UAV χρησιμοποιεί μήκος κύματος στα $900nm$, ενώ η διάταξη lidar χρησιμοποιεί μήκος κύματος στα $1064nm$. Αυτό συνεπάγεται ότι η ευαισθησία της πρώτης διάταξης για μικρότερα σωματίδια είναι μεγαλύτερη και επομένως έχει μεγαλύτερο εύρος ανιχνεύσιμων σωματιδίων. Επίσης σε μια «καθαρή» ημέρα, η πλειοψηφία των αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα ανήκουν στην κατηγορία των «λεπτών» σωματιδίων (διάμετρος μικρότερη από 2.5μm). Για το λόγο αυτό, είναι πιθανό να ανιχνεύει μεγαλύτερο πλήθος σωματιδίων και η διαφορά μετρήσεων μεταξύ των δύο διατάξεων να γίνεται πιο έντονα αντιληπτή τις ημέρες που η πλειοψηφία των αερολυμάτων ανήκει στην κατηγορία των «λεπτών σωματιδίων». Αυτή η αιτία δεν δικαιολογεί πάντοτε μια τόσο μεγάλη διαφορά στις δύο τεχνικές, όμως δικαιολογεί μια απόκλιση μεταξύ τους. Από το διπλανό διάγραμμα φαίνεται επιπλέον η πορεία των αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα της Αθήνας, όπως προκύπτει με βάση το μοντέλο $Hysplit$ για τις 10 Μαρτίου 2018.

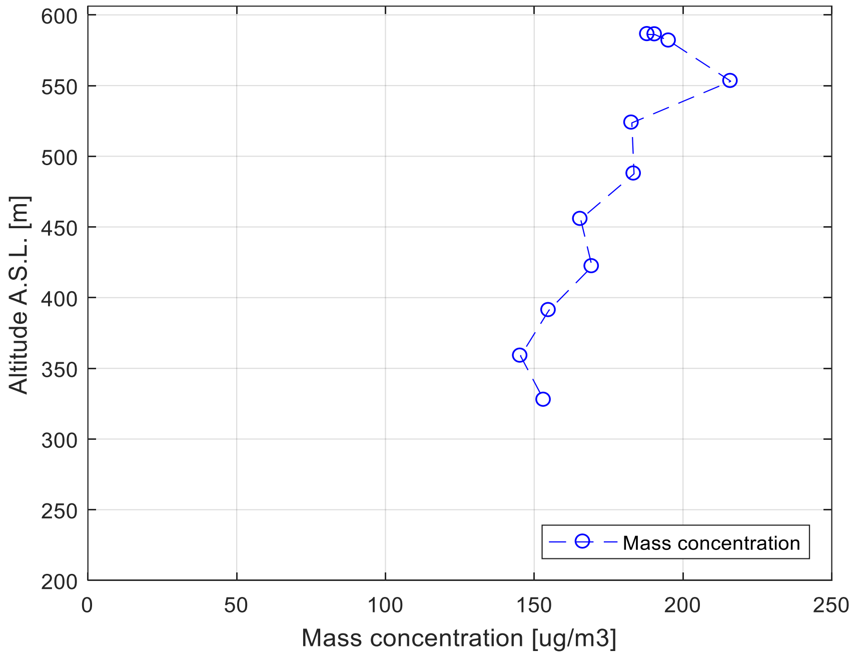


Εικόνα 5-38: Οι τροχιές των κατακόρυφων κατανομών αερολυμάτων στην Αθήνα με βάση το μοντέλο $Hysplit$ για τα ύψη 500m (κόκκινο), 1000m (μπλε) και 1500m (πράσινο), για τις 10 Μαρτίου 2018, με χρονική διάρκεια 120 ωρών.

5.9 ΔΕΔΟΜΕΝΑ 10ΗΣ ΠΤΗΣΗΣ – 27/03/2018

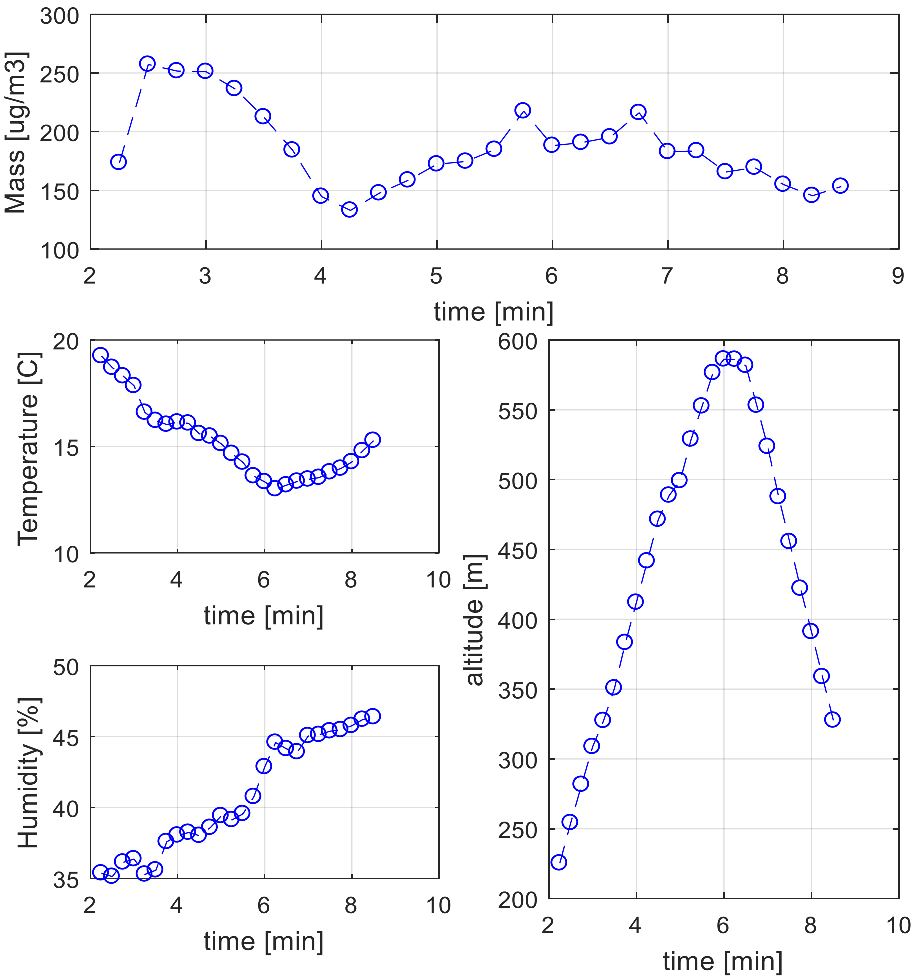
Η πτήση αυτή του UAV πραγματοποιήθηκε στις 27 Μαρτίου 2018 στις 10:00 UTC. Οι συγκεντρώσεις PM_{10} παρατηρούμε ότι είναι σε πολύ υψηλά επίπεδα, καθώς κυμαίνονται από $150\mu g/m^3$ κοντά στο έδαφος και σταδιακά αυξάνονται. Προς το τέλος της πτήσης παρουσιάστηκε πρόβλημα στη σύνδεση μεταξύ του φορητού υπολογιστή και του UAV και γι αυτό το λόγο τα δεδομένα ξεκινούν από το υψόμετρο των 330m (130m πάνω από το έδαφος).

5.9.1 Διάγραμμα κατακόρυφης κατανομής συγκέντρωσης μάζας PM_{10}



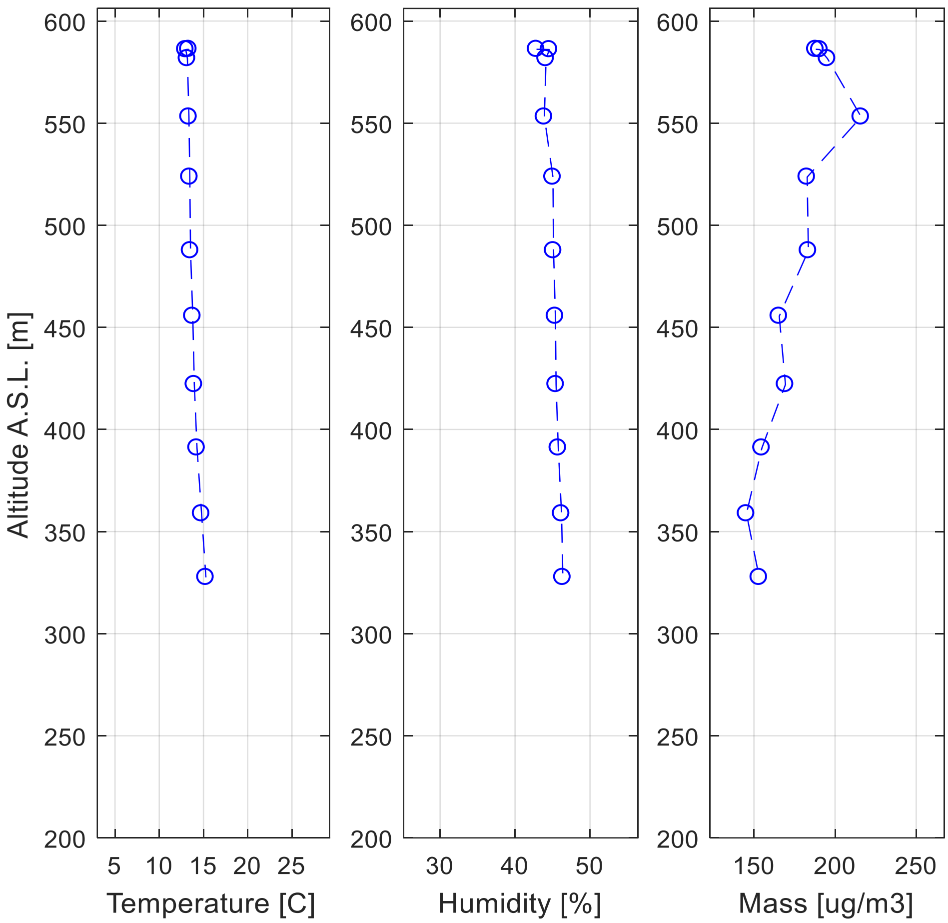
Εικόνα 5-39: Κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης μάζας, όπως αυτή καταγράφηκε από τον αισθητήρα στις 27 Μαρτίου 2018, 10.00 UTC.

5.9.2 Διάγραμμα υγρασίας, θερμοκρασίας και μάζας ως προς το χρόνο



Εικόνα 5-40: Διάγραμμα πυκνότητας μάζας σωματιδίων PM_{10}, θερμοκρασίας, υγρασίας και υψομέτρου, ως προς το χρόνο για την πτήση στις 27 Μαρτίου του 2018, 10.00 UTC.

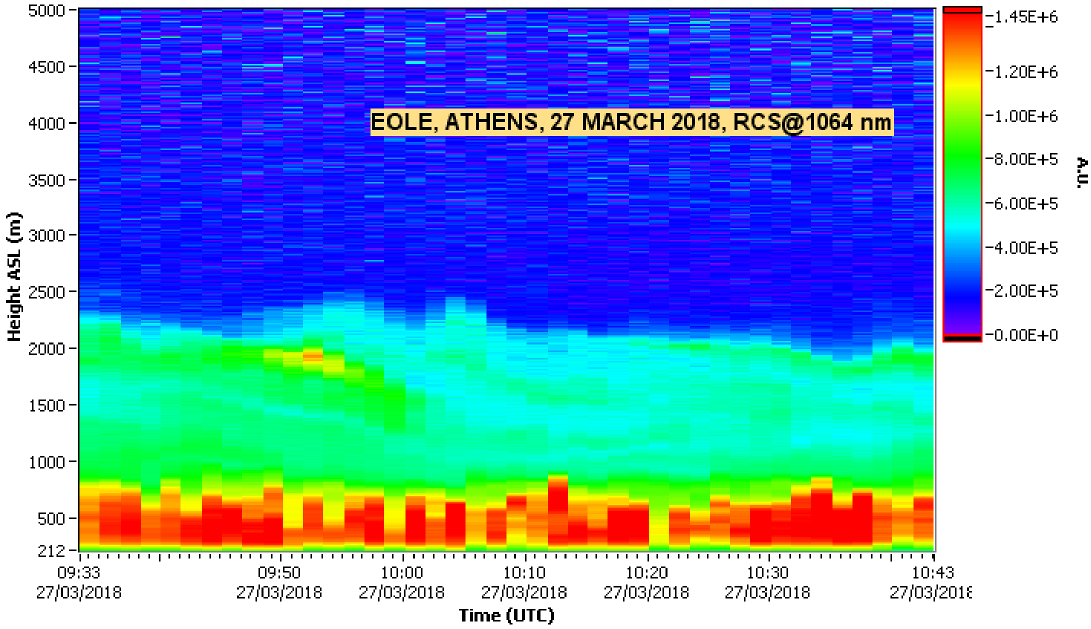
5.9.3 Διάγραμμα υγρασίας, θερμοκρασίας και μάζας ως προς το υψόμετρο



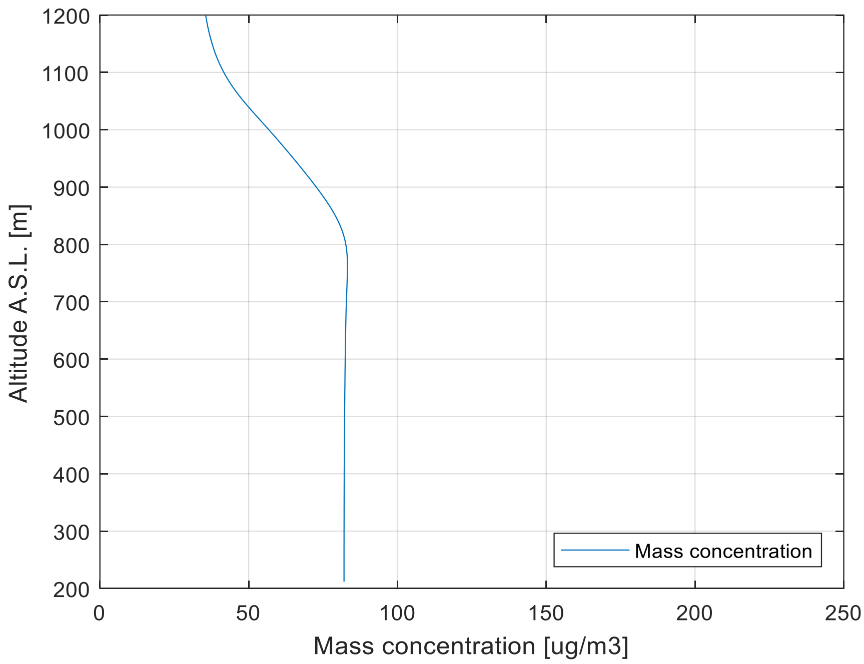
Εικόνα 5-41: Διάγραμμα θερμοκρασίας, υγρασίας και πυκνότητας μάζας σωματιδίων PM_{10}, ως προς το απόλυτο υψόμετρο από τη στάθμη της θάλασσας για την πτήση στις 27 Μαρτίου 2018, 10.00 UTC.

Όπως παρατηρούμε στα παραπάνω διαγράμματα, δεν υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των τιμών της σχετικής υγρασίας και της θερμοκρασίας. Το μόνο χαρακτηριστικό που παρουσιάζει μεταβολή είναι πυκνότητα μάζας των σωματιδίων PM_{10}.

5.9.4 Αποτελέσματα μετρήσεων του συστήματος Lidar EOLE



Εικόνα 5-42: Χωροχρονική εξέλιξη του οπισθοσκεδαζόμενου σήματοςLidar στα $1064nm$, διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCS), όπως καταγράφηκε από το σταθμό EOLE στις 27 Μαρτίου 2018.

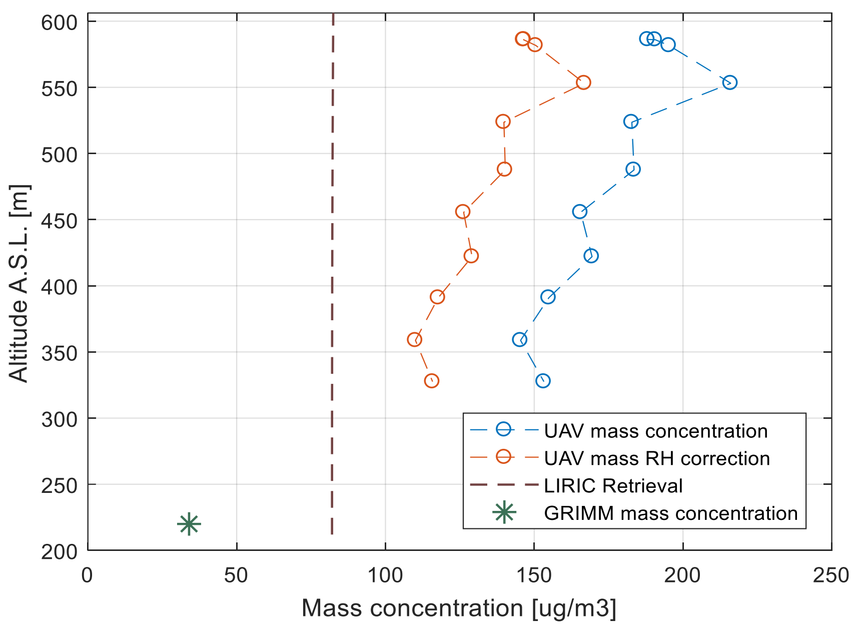


Εικόνα 5-43: Οι κατακόρυφες κατανομές μάζας των συνολικών σωματιδίων (λεπτών και αδρών), όπως αυτές υπολογίστηκαν με χρήση του αλγορίθμου LIRIC και της εξίσωσης (3.12), από τα δεδομένα του σταθμού Lidar, στις 27 Μαρτίου 2018, 10.00 UTC.

Στην εικόνα 5-38 φαίνεται η χωρική και χρονική εξέλιξη του σήματος Lidar στα $1064nm$, διορθωμένο ως προς την απόσταση. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, υπάρχουν τρία στρώματα αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Το πρώτο, είναι αυτό που περιέχει τη μεγαλύτερη ποσότητα σωματιδίων, ξεκινάει από το έδαφος και φτάνει μέχρι τα 1000m. Το δεύτερο, φθάνει μέχρι τα 2500km και έχει αρκετά χαμηλότερες συγκεντρώσεις και το τρίτο, που φαίνεται να έχει τη μικρότερη συγκέντρωση σωματιδίων, ξεκινάει από 2500km και φτάνει μέχρι τα 5000km, (μέγιστο υψόμετρο καταγραφής δεδομένων). Παρατηρώντας τις τιμές του σήματος εξόδου, προκύπτει ότι είναι περίπου οι διπλάσιες από αυτές της προηγούμενης μέτρησης.

5.9.5 Διόρθωση αποτελεσμάτων UAV λόγω σχετικής υγρασίας

Για αυτή την ημέρα, τα δεδομένα ποσοστών των ατμοσφαιρικών ρύπων όπως καταγράφηκαν από το ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος είναι
Cl: 0,4%, NH_4NO_3: 5%, $(NH_4)_2SO_4$: 45.6%, $Organic\ fraction$: 49%.



Εικόνα 5-44: Οι κατακόρυφες κατανομές μάζας, όπως αυτή μετρήθηκε από το UAV, με τη διόρθωση λόγω της σχετικής υγρασίας από τον αλγόριθμο LIRIC και από τον επίγειο αισθητήρα GRIMM στο ΕΜΠ, στις 27 Μαρτίου 2018, 10.00 UTC.

Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου LIRIC (εικόνα 5-43) για υψόμετρο μικρότερο από 600m, δίνουν μέση τιμή συγκέντρωσης $82\mu g/m^3$. Η τιμή αυτή, φαίνεται αρκετά μικρότερη από την τιμή μέτρησης, με την πρότυπη ανιχνευτική διάταξη να ανέρχεται σε $186\mu g/m^3$ και $135\mu g/m^3$, μετά τη διόρθωση λόγω σχετικής υγρασίας.

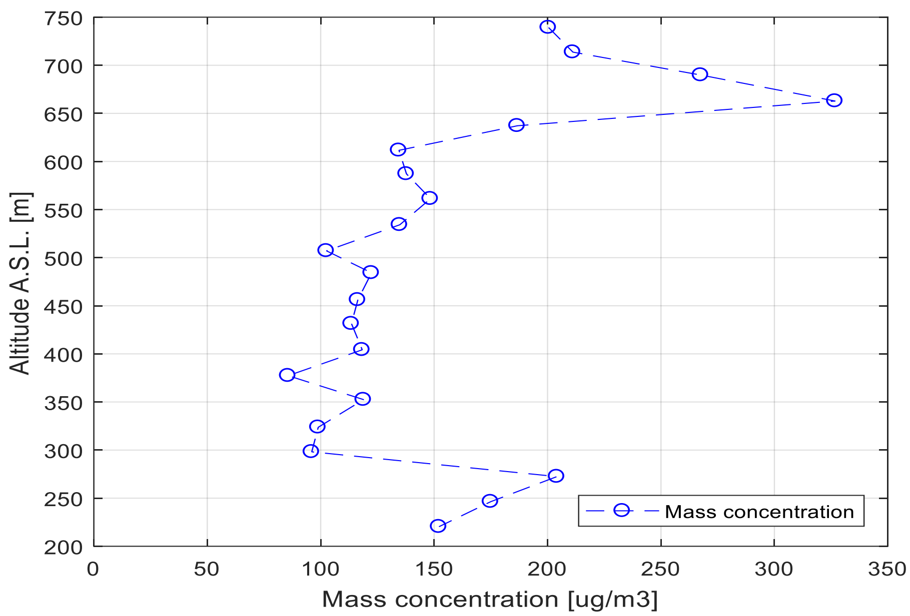
Η διαφορά αυτή μπορεί να οφείλεται σε δύο βασικούς παράγοντες :

Ο πρώτος είναι ο άνεμος, ο οποίος ήταν έντονος κατά τη διάρκεια της πτήσης, θα μπορούσε ενδεχομένως να επηρεάσει τις συγκεντρώσεις στην υποδοχή της ανιχνευτικής διάταξης. Ο δεύτερος, είναι η σχετική υγρασία η οποία είχε μια μέση τιμή πάνω από 40% η οποία αυξάνει σημαντικά την οπισθοσκεδάζουσα ακτινοβολία της ανιχνευτικής διάταξης και κατ’ επέκταση το σήμα εξόδου για της μετρήσεις.

5.10 ΔΕΔΟΜΕΝΑ 11ΗΣ ΠΤΗΣΗΣ – 29/03/2018

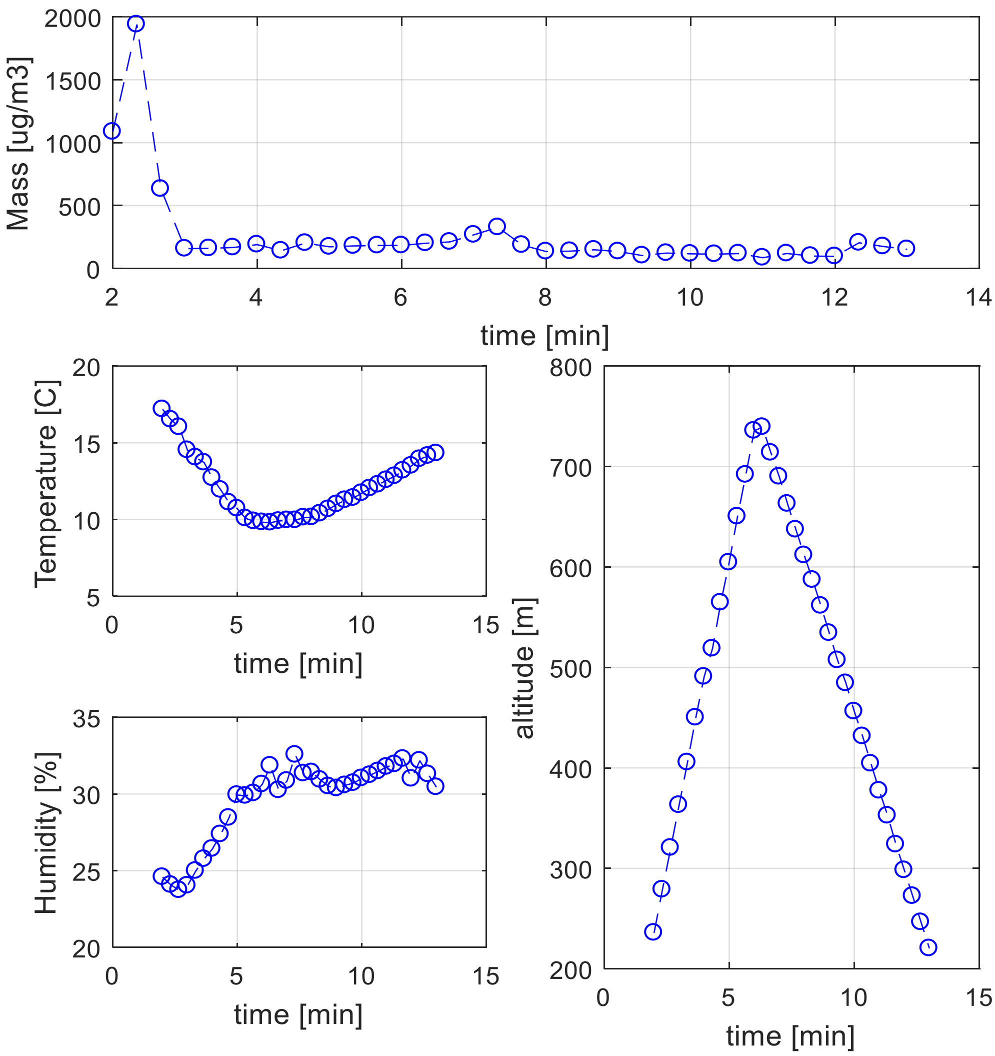
Η πτήση πραγματοποιήθηκε στις 29 Μαρτίου 2018 στις 09:00 UTC. Οι συγκεντρώσεις κοντά στο έδαφος είναι στα $150\mu g/m^3$. Από 300m - 600m ξεκινάει από τα $100\mu g/m^3$ και αυξάνεται σταδιακά μέχρι τα 150m , ενώ τα υπόλοιπα σημεία, για υψόμετρο μεγαλύτερο από 650m, είναι πάνω από $200\mu g/m^3$. Τα δύο σημεία μεταξύ 650m και 700m δεν είναι αξιόπιστα καθώς παρουσιάζουν μια πολύ απότομη αύξηση χωρίς κάποιον προφανή λόγο.

5.10.1 Διάγραμμα κατακόρυφης κατανομής συγκέντρωσης μάζας PM_{10}



Εικόνα 5-45: Κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης μάζας, όπως αυτή καταγράφηκε από τον αισθητήρα στις 29 Μαρτίου 2018.

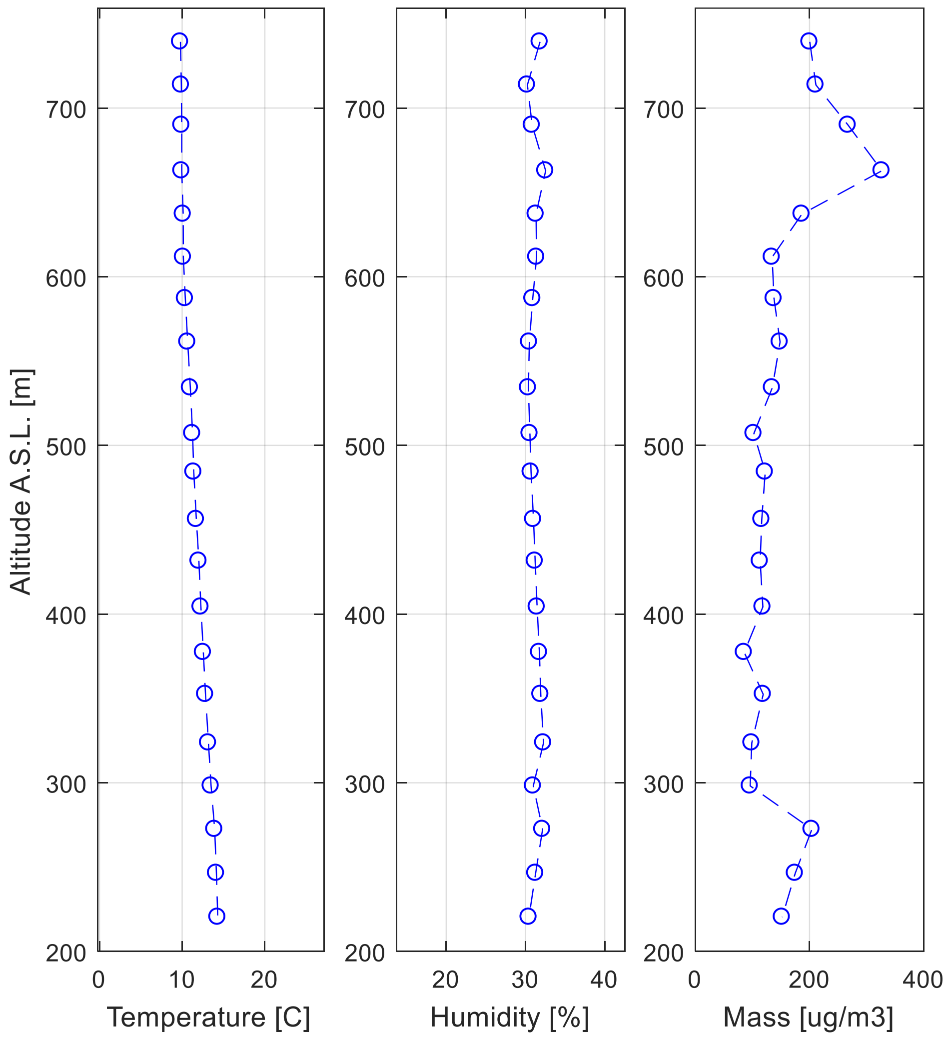
5.10.2 Διάγραμμα υγρασίας, θερμοκρασίας και μάζας ως προς το χρόνο



Εικόνα 5-46: Διάγραμμα πυκνότητας μάζας σωματιδίων PM10, θερμοκρασίας, υγρασίας και υψομέτρου, ως προς το χρόνο για την πτήση στις 29 Μαρτίου του 2018.

Στην εικόνα 5-46 φαίνεται η χρονική εξέλιξη των σημάτων της θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, πυκνότητας μάζας των σωματιδίων PM_{10} και του υψομέτρου. Στην αρχή της πτήσης παρατηρούμε ότι υπάρχει μια πολύ έντονη αύξηση στην πυκνότητα μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων η οποία οφείλεται σε κάποιο εξωτερικό παράγοντα.

5.10.3 ιάγραμμα υγρασίας, θερμοκρασίας και μάζας ως προς το υψόμετρο



Εικόνα 5-47: Διάγραμμα θερμοκρασίας, υγρασίας και πυκνότητας μάζας σωματιδίων PM_{10}, ως προς το απόλυτο υψόμετρο από τη στάθμη της θάλασσας για την πτήση στις 29 Μαρτίου 2018.

Η θερμοκρασία, κατά τη διάρκεια της πτήσης είχε τιμές από 10°C μέχρι 15°C, ενώ η σχετική υγρασία ήταν στο 30%. Όμως οι τιμές αυτές, όπως και στις προηγούμενες μετρήσεις, δεν επαρκούν ώστε να επηρεάσουν τις μετρήσεις των συγκεντρώσεων μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10}.

5.11 Σύγκριση μετρήσεων τεχνικής Lidar με την ανιχνευτική διάταξη

Στη συνέχεια θα παραθέσουμε ένα συγκεντρωτικό πίνακα με όλες τις μετρήσεις όπου είχαμε δεδομένα παράλληλα από τις δύο τεχνικές.

# ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ LIDAR	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ UAV	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΜΕ ΤΗΝ RH	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ UAV
1	24/11/2017	$77\mu g/m^3$	$72\mu g/m^3$	$64\mu g/m^3$	$26\mu g/m^3$
2	09/03/2018	$157\mu g/m^3$	$171\mu g/m^3$	$154\mu g/m^3$	$55\mu g/m^3$
3	10/03/2018	$30\mu g/m^3$	$73\mu g/m^3$	$56\mu g/m^3$	$20\mu g/m^3$
4	27/03/2018	$82\mu g/m^3$	$186\mu g/m^3$	$135\mu g/m^3$	$35\mu g/m^3$

Πίνακας 5-1: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων σύγκρισης των δύο τεχνικών για τις ημερομηνίες που πραγματοποιήθηκαν παράλληλες μετρήσεις.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας παρουσιάστηκε όλη η διαδικασία δημιουργίας μιας πρότυπης ανιχνευτικής διάταξης που αφορά στην ανίχνευση συγκεντρώσεων μάζας σωματιδίων PM_{10} , καθώς και η χρήση της για μετρήσεις με μη επανδρωμένο αερομεταφερόμενο όχημα.

Όσον αφορά στον αρχικό στόχο αυτής της εργασίας, αυτός ήταν η σύγκριση των δεδομένων της ανιχνευτικής διάταξης με τα δεδομένα μετρήσεων του σταθμού EOLE Lidar του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. ΄Οπως διαπιστώνουμε από τα αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου, οι μετρήσεις στις περισσότερες περιπτώσεις είναι συγκρίσιμες μεταξύ τους σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό. Φυσικά, όπως είδαμε υπάρχουν αρκετοί λόγοι που εμποδίζουν την άμεση σύγκριση αυτών των δύο μεθόδων. Αρχικά, δεν υπάρχει η δυνατότητα εξαγωγής ασφαλών συμπερασμάτων με τη τεχνική Lidar για την περιοχή μέχρι και τα πρώτα 800-1000m, λόγω του φαινομένου της πλημμελούς επικάλυψης της δέσμης στο οπτικό πεδίο του τηλεσκοπίου του Lidar. Το μέγιστο υψόμετρο μετρήσεων που μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση του παρόντος UAV που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4, υπολογίζουμε ότι είναι περίπου στα 800m από το έδαφος για ιδανικές καιρικές συνθήκες με απόλυτη άπνοια. Από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, δεν υπήρξε η δυνατότητα πτήσης σε αυτό το υψόμετρο, με α-ποτέλεσμα να μην έχουμε μετρήσεις που να μπορούν να είναι άμεσα συγκρίσιμες και από τις δύο τεχνικές.

Ένας άλλος παράγοντας που εμποδίζει τη σύγκριση των δύο μεθόδων, είναι η επίδραση που έχουν εξωτερικοί παράγοντες όπως ο άνεμος, η υγρασία και η ταχύτητα κίνησης του UAV στις μετρήσεις συγκεντρώσεων μάζας της πρότυπης ανιχνευτικής διάταξης. Επομένως, η αξιοπιστία των μετρήσεων της είναι συνάρτηση αρκετών επιπλέον συνθηκών κατά τη διάρκεια της πτήσης.

Συνοψίζοντας, τα δυνατά σημεία της τεχνικής καταμέτρησης ατμοσφαιρικών ρύπων με τη χρήση ανιχνευτικής διάταξης σε μη επανδρωμένο αερομεταφερόμενο όχημα είναι, η άμεση μέτρηση μάζας των ατμοσφαιρικών ρύπων, η δυνατότητα χρήσης της διάταξης σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές και το μεγάλο πλήθος δεδομένων που συλλέγει με αρκετά υψηλή χωρική και χρονική ακρίβεια.

Τα αδύναμα σημεία αυτής της τεχνικής είναι : α) το περιορισμένο (σχετικά) υψόμετρο μετρήσεων (μέγιστο υψόμετρο $\approx 800m$ από το έδαφος) και β) η συνεισφορά των εξωτερικών παραγόντων , όπως περιγράψαμε παραπάνω στις μετρήσεις της διάτα-ξης.

Οι βελτιώσεις αυτής της τεχνικής που προτείνονται ως συνέχεια αυτής της εργασίας, έχουν ως κύριο στόχο την ευχρηστία, τη συλλογή περισσότερων δεδομένων και τη μείωση των σφαλμάτων.

- Η πιο σημαντική βελτίωση που προτείνεται είναι η μετατροπή στη μέθοδο εισαγωγής του δείγματος αέρα στον αισθητήρα, ώστε να μην επηρεάζεται από τον άνεμο, και του έλικες του UAV. Για να επιτευχθεί αυτό θα μπορούσε να προστεθεί μια μικρή αντλία αέρα στην έξοδο του ανιχνευτή και ένα σωληνάκι για την είσοδο του αέρα, το οποίο θα τοποθετηθεί κοντά στο χώρο της μπαταρίας. Μια τέτοια τροποποίηση θα μπορούσε να μειώσει όλους τους εξωτερικούς παράγοντες που επηρεάζουν τις μετρήσεις της διάταξης και να βελτιώσει σημαντικά την ακρίβεια της.

- Η δεύτερη βελτίωση που προτείνεται είναι η ενσωμάτωση της ανιχνευτικής διάταξης, πάνω στην πλακέτα Pixhawk του UAV. Με αυτό τον τρόπο τα δεδομένα θα συλλέγονται απευθείας από τη πλακέτα του UAV χωρίς να απαιτείται ο συγχρονισμός με τα δεδομένα που καταγράφει η διάταξη στην κάρτα SD (το οποίο συνεπάγεται καλύτερη χωρική και χρονική ακρίβεια). Επίσης με αυτό τον τρόπο υπάρχει η δυνατότητα το UAV να στέλνει την ώρα της πτήσης τα δεδομένα συγκέντρωσης ρύπων στον υπολογιστή με τον οποίο είναι συνδεδεμένο, το οποίο θα μπορούσε να βοηθήσει για επιπλέον εφαρμογές πέρα από τη κατακόρυφη μέτρηση των αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας.

- Μια επιπλέον βελτίωση που θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί είναι η σύνδεση κάποιου ανιχνευτή τεχνολογίας OPC (Optical Particle Counters) με την πλακέτα Arduino. Η χρήση ενός τέτοιου ανιχνευτή μπορεί να οδηγήσει στην καταγραφή της ποσότητας των σωματιδίων ως προς τη διάμετρο τους, δεδομένα τα οποία θα μπορούσαν να βοηθήσουν στην αναγνώριση όχι μόνο της μάζας αλλά και του είδους των ρύπων.

- Τέλος προτείνεται η σύνδεση της πλακέτας του UAV με κάποιο αισθητήρα ανέμου ώστε να υπάρχει καταγραφή δεδομένων για τις κινήσεις των αέριων μαζών.

Η χρήση μη επανδρωμένων αερομεταφερόμενων οχημάτων για επιστημονικούς σκοπούς στον τομέα του περιβάλλοντος είναι μια αρκετά νέα τεχνική, η οποία περιμένουμε ότι θα δώσει λύσεις σε πολλά προβλήματα που αντιμετωπίζονται στη συλλογή των δεδομένων. Σε αυτή την εργασία περιγράφεται μια από τις πρώτες προσπάθειες στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο για την αξιοποίηση αυτής της καινοτομίας και τα αποτελέσματα δείχνουν να είναι ενθαρρυντικά. Αποκτώντας σταδιακά μεγαλύτερη εμπειρία πάνω στη χρήση του και βελτιώνοντας το ώστε να προσαρμόζεται καλύτερα στις ερευνητικές ανάγκες του εργαστηρίου, μπορεί να αποτελέσει ένα πολύ σημαντικό όργανο μετρήσεων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Παπαγιάννης, Α.** *Φυσική Περιβάλλοντος.*

2. **Danielson, E., Levin, J. και Abrams, E.** *McGraw-Hill Concise Encyclopedia of Science & Technology.*

3. **Lydolph, P.** *The climate of the earth.*

4. **John H. Seinfeld, Spyros N. Pandis.** *Atmosperic Chemistry And Physics.*

5. **Schwenn, R. και Marsch, E.** *Physics and Chemistry in Space.*

6. **Prölss, G.W. και Bird, M. K.** *Physics of the Earth's Space Environment.*

7. **STULL, R.B.** *An introduction to boundary layer meteorology.*

8. **ROTACH, M.W.** *Boundary-Layer Meteorology .*

9. **Αργυρίου, Α.** *Μετεωρολογία της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.*

10. **N.Garrett και Guinness, Paul.** *Cambridge International A and AS Level Geography.*

11. **Νιάχου, Κ.** *Μελέτη φυσικού και υβριδικού αερισμού στο αστικό περιβάλλον.*

12. **Frederick K. Lutgens, Edward J. Tarbuck.** *The Atmosphere: An Introduction to Meteorology*

13. **Zieger, Paul Christoph.** *Effects of relative humidity on aerosol light scattering.*

14. **Finlayson-Pitts B., Pitts J.** *Chemistry of the upper and lower atmosphere*, 1999.

15. **Dockery, Douglas W.** *An association between air pollution and mortality in six U.S cities*, 1993

16. **Joel Schwartz, Douglas W. Docker.** *Is Daily Mortality Associated Specifically with Fine Particles?* 1996, Journal of the Air & Waste Management Association, Τόμ. 46.

17. **Brauer M.** et al. 2016, for the Global Burden of Disease Study 2016.

18. **Querol X., Amato F.** *Measures to Improve Urban Air Quality.* 2017.

19. **Παπαγιάννης Α., Μακροπούλου Μ.** *Εφαρμογές των Lasers στη Βιοιατρική και το Περιβάλλον.*

20. **Goyer G., Watson R.** *The Laser and its Application to Meteorology.* 1963, Bulletin of the American Meteorological Society.

21. **Cracknell A. και Ladson H.** *Introduction to Remote Sensing.* 1991.

22. **Κόκαλης Π.** *Μελετη τροποσφαιρικων αερολυματων με επιγειες και δορυφορικες τεχνικες-αναλυση μερτησεων και στατιστικη επεξεργασια.* 2014.

23. **Χουρδάκης Γ.** *Σχεδιαση και αναπτυξη παλμικων laser αεριων και συστηματος τηλεπισκοπησης με σκοπο την καταγραφη των αιωρουμενων σωματιδιων τησ ατμοσφαιρας,* 2004.

24. **Fernald F., Benjamin H., Reagan J.** *Determination of Aerosol Height Distributions by Lidar*, 1972

25. **Papayannis A.,** *Multiwavelength lidar for ozone measurements in the troposphere and the lower stratosphere*, 1990

26. **Ansmann A., Riebesell M., Weitkamp C.** *Measurement of atmospheric aerosol extinction profiles with a Raman lidar*, 1990

27. **Ferrare R.** *Raman lidar measurements of aerosol extinction and backscattering*, 1998

28. **Chaikovsky A.** *Methodology to retrieve atmospheric aerosol parameters by combining ground-based measurements of multiwavelength lidar and sun sky-scanning radiometer.*

29. **Chaikovsky A.** *Studying altitude profiles of atmospheric aerosol parameters by combined multi-wavelength lidar and sun sky radiance measurements*, 2004.

30. **Steel R., Torrie J.** *Principles and Procedures of Statistics with Special Reference to the Biological Sciences*, 1960.

31. **Glantz S., Slinker B.** *Primer of Applied Regression and Analysis of Variance.* 1990

32. **Yang Wang, Jiayu Li, He Jing, Qiang Zhang, Jingkun Jiang & Pratim Biswas** *Laboratory Evaluation and Calibration of Three Low-Cost Particle Sensors for Particulate Matter Measurement,* 2015.

33. **Keady P.** *Application note ITI-075,* TSI Incorporated, 2000.

34. **Sharp,** Application note of Sharp dust sensor GP2Y1010AU0F.

36. **Μπάρτζης Ι.** *Σημειώσεις μαθήματος "Εκπομπές και Μεταφορά Αέριων Ρύπων".*

37. **Wayne R.** *Chemistry of Atmospheres.*

Ηλεκτρονικές πηγές

38. ***ArduPilot*** | ardupilot.org | Σύνδεσμος

39. ***elte.prompt.hu*** | The planetary boundary layer | Σύνδεσμος

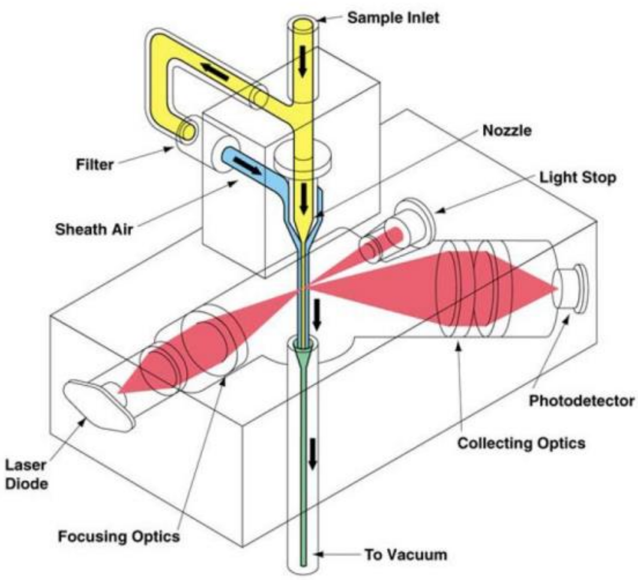
40. **Refractive index** | refractiveindex.info | Σύνδεσμος

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΥΓΡΟΣΚΟΠΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ Κ

Compound	Growth factor derived k			CCN derived k		
	Klow	κmean	κup	κlow	Kmean	Kup
$(NH_4)2SO_4$	0.33(6)	0.53	0.72(6)	N/A	0.61(13)	N/A
NH_4NO_3	N/A	N/A	N/A	0.577	0.67(10)	0.753
NaCl	0.91(6)	1.12(13)	1.33(6)	N/A	1.28(13)	N/A
H2SO4	N/A	1.19(13)	N/A	N/A	0.90(13)	N/A
NaNO3	N/A	0.80(13)	N/A	N/A	0.88(13)	N/A
NaHSO4	N/A	1.01(13)	N/A	N/A	0.91(13)	N/A
Na_2SO_4	N/A	0.68(13)	N/A	N/A	0.80(13)	N/A
$(NH_4)3H(SO_4)2$	N/A	0.51(13)	N/A	N/A	0.65(13)	N/A
malonic acid	0.28	0.44(6)	0.6	0.199	0.227(11)	0.255
glutaric acid	0.12	0.2(6)	0.28	0.113	0.195(8)	0.376
glutamic acid	N/A	0.154(5)	N/A	0.113	0.182(5)	0.319
succinic acid	N/A	<0.006(12)	N/A	0.166	0.231(4)	0.295
adipic acid	N/A	< 0.006(14)	N/A	N/A	0.096(1)	N/A
levoglucosan	0.15	0.165(6)	0.18	0.193	0.208(10)	0.223
phthalic acid	N/A	0.059(5)	N/A	0.022	0.051(5)	0.147
homophthalic acid	N/A	0.081(5)	N/A	0.048	0.094(5)	0.212
leucine	N/A	N/A	N/A	0.001	0.002(9)	0.003
pinic acid	N/A	N/A	N/A	0.158	0.248(9)	0.418
pinonic acid	N/A	<0.006(12)	N/A	0.063	0.106(9)	0.196
norpinic acid	N/A	N/A	N/A	0.113	0.182(9)	0.318
poly(acrylic acid)	N/A	0.060(2)	N/A	0.040	0.051(7)	0.068
Suwanee River fulvic acid	N/A	0.056(2) 0.044(12)	N/A	0.057 0.050 0.029	0.067(10) 0.056(3a) 0.033(3b)	0.077 0.063 0.037
α−pinene/O3/dark secondary organic aerosol	N/A	0.022(15) 0.070(18) 0.037(19)	N/A	0.014(16) 0.028(17)	0.1±0.04[15]	0.091(16) 0.229(17)
β−pinene/O3/dark secondary organic aerosol	N/A	0.022(15) 0.009(19)	N/A	0.033(16) 0.033(17)	0.1±0.04[15]	0.178(16) 0.106(17)
Oxidized diethylhexyl sebacate	N/A	< 0.006(20)	N/A	N/A	0.002(20)	N/A

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ TSI DUSTTRACK

Ο ανιχνευτής αερολυμάτων TSI DustTrack χρησιμοποιεί τεχνολογία ανίχνευσης με χρήση φωτομέτρου. Αυτή η τεχνολογία βασίζεται στη λογική ότι η σκέδαση μια ακτινοβολίας (μήκος κύματος: $\approx 1\mu m$) πάνω σε ένα όγκο αέρα, θα είναι ανάλογη της μάζας των αερολυμάτων (αιωρούμενα σωματίδια μεγέθους από $0.1\mu m$ έως $10\mu m$), που περιέχονται μέσα σε αυτόν. Τα θετικά στοιχεία αυτής της τεχνικής είναι η ακρίβεια των μετρήσεων ως προς τη μάζα του υπό μελέτη όγκου αέρα και η άμεση δειγματοληψία, ενώ αντίστοιχα τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η αδυναμία προσδιορισμού του πλήθους και του μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων.



Εικόνα Π2-1: Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας του ανιχνευτή αερολυμάτων TSI DustTrack (33)

Η λειτουργία του ανιχνευτή φαίνεται στο σχήμα Π2-1. Αρχικά με τη χρήση αντλίας τραβάει ένα δείγμα αέρα, το οποίο στη συνέχεια χωρίζεται σε δύο μέρη. Το ένα μέρος του φιλτράρεται και στη συνέχεια χρησιμοποιείται για να περιστοιχίσει το υπόλοιπο δείγμα που περιέχει τα αιωρούμενα σωματίδια. Για το επόμενο στάδιο χρησιμοποιείται μια δέσμη η οποία παράγεται από ένα διοδικό Laser και εστιάζεται με χρήση οπτικών στοιχείων πάνω στη ροή του αέρα. Ένα μέρος αυτής της ακτινοβολίας σκεδάζεται και εστιάζεται πάνω σε ένα φωτοανιχνευτή. Τέλος, ο φωτοανιχνευτής δημιουργεί ένα ηλεκτρικό σήμα, το οποίο είναι ανάλογο της ανιχνευθείσας μάζας αιωρούμενων σωματιδίων που περιέχονται σε αυτόν τον όγκο αέρα.

Ο φωτοανιχνευτής που χρησιμοποιεί το όργανο TSI DustTrack ανιχνεύει σωματίδια διαμέτρου από $0.1\mu m$ έως $10\mu m$ και με συγκεντρώσεις από $0.001 mg/m^3$ έως $400 mg/m^3$. Για τον περιορισμό του μεγέθους των ανιχνεύσιμων αερολυμάτων υπάρχει η δυνατότητα προσθήκης φίλτρου πάνω στο σημείο της εισόδου του αέρα το οποίο επιτρέπει την είσοδο μόνο σε σωματίδια διαμέτρων $PM1$, $PM2.5$ ή $PM10$. (33)

Στη συνέχεια ακολουθεί ένας πίνακας που περιλαμβάνει τα βασικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ TSI DUSTTRACK

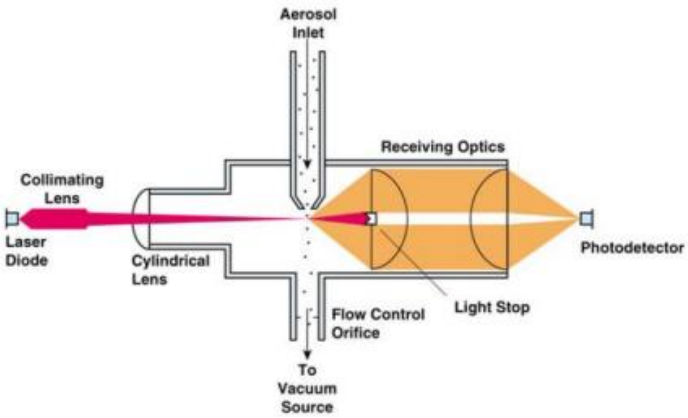
ΕΙΔΟΣ ΦΩΤΟΑΝΙΧΝΕΥΤΗ	Σκέδασης του φωτός 90°
ΑΝΙΧΝΕΥΣΙΜΑ ΜΕΓΕΘΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	0.1 έως $10\mu m$
ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	0.1% ή $0.001 mg/m^3$
ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ	$\pm 0.002 mg/m^3$ ανά 24 ώρες με σταθερά χρόνου $10s$
ΡΟΗ ΑΕΡΑ	$1.4 - 3.0 L/min$
ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΡΟΗΣ	$\pm 5\%$
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	0℃ έως 50℃
ΥΓΡΑΣΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	0 έως 95% RH
ΣΤΑΘΕΡΑ ΧΡΟΝΟΥ	1 έως $60s$
ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	$> 60\ 000$ σημεία (5MB εσωτερική μνήμη)
ΡΥΘΜΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	$1s$ έως $1h$

Πίνακας Π2-1: Χαρακτηριστικά ανιχνευτή TSI DustTrack

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3: ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ GRIMM

Ο ανιχνευτής της εταιρίας Grimm, που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις βαθμονόμησης στο ερευνητικό κέντρο του Δημόκριτου, χρησιμοποιεί την τεχνολογία OPC (Optical Particle Counters – Οπτικοί καταμετρητές σωματιδίων). Οι οπτικοί καταμετρητές σωματιδίων μετρούν το μέγεθος των σωματιδίων και τον αριθμό της συγκέντρωσης τους, ανιχνεύοντας τη σκέδαση του φωτός από μεμονωμένα σωματίδια.

Τα σωματίδια καθοδηγούνται πάνω σε μια εστιασμένη δέσμη Laser και παράγουν μια λάμψη φωτός, όπως αυτή φαίνεται στο σχήμα Π3-1. Η ένταση του σκεδάσιμου φωτός είναι συνάρτηση ης διαμέτρου του σωματιδίου, του δείκτη διάθλασης και του σχήματος. (33)



Εικόνα Π3-1: Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας του ανιχνευτή αερολυμάτων της εταιρίας Grimm.

Ο φωτοανιχνευτής ανιχνεύει το μέγεθος του φωτός που σκεδάζεται από κάθε σωματίδιο και το καταγράφει για κάθε κανάλι εύρους μεγέθους. Τα διαθέσιμα κανάλια μεγέθους είναι από $0.2\mu m$ έως $56\mu m$ και παρατίθενται στον πίνακα Π3-1.

Channel 1	Channel 2	Channel 3	Channel 4	Channel 5	Channel 6	Channel 7	Channel 8
0.2648	0.2858	0.3219	0.3742	0.4243	0.4743	0.5385	0.614
Channel 9	Channel 10	Channel 11	Channel 12	Channel 13	Channel 14	Channel 15	Channel 16
0.6745	0.7483	0.8944	1.1402	1.4422	1.7889	2.2361	2.7386
Channel 17	Channel 18	Channel 19	Channel 20	Channel 21	Channel 22	Channel 23	Channel 24
3.2404	3.7417	4.4721	5.7009	6.9821	7.98436	9.21954	11.1803
Channel 25	Channel 26	Channel 27	Channel 28	Channel 29	Channel 30	Channel 31	
13.6931	16.2019	18.7083	22.3607	27.3861	30.9839	56.5685	

Πίνακας Π3-1: Κανάλια καταγραφής μεγέθους αιωρούμενων σωματιδίων του ανιχνευτή Grimm.

Ο παρακάτω αλγόριθμος χρησιμοποιεί τη θεωρία της σκέδασης Mie με σκοπό να μοντελοποιήσει την επίδραση της σχετικής υγρασίας στη σκέδαση της ακτινοβολί-ας από το Laser της πρότυπης ανιχνευτικής διάταξης. Χρησιμοποιεί ως είσοδο τη σχετική υγρασία, τη διάμετρο, την υγροσκοπική παράμετρο και το μιγαδικό δείκτη διάθλασης των ρύπων τις ατμόσφαιρας και επιστρέφει το συντελεστή ενίσχυσης σκέδασης $f(RH)$.

Συνολικά αποτελείται από τρία αρχεία. α) Το αρχείο mie_abcd.m που υπολογίζει τους συντελεστές Mie a_n, b_n, c_n, d_n. β) Το αρχείο Qsca.m υπολογίζει τον υγροσκοπικό συντελεστή μεγέθυνσης. γ) Το αρχείο f_lsef.m που υπολογίζει το συντελεστή ενίσχυσης σκέδασης. Τα τρία αρχεία είναι μορφής function.

mie_abcd.m

```
function result = mie_abcd(m, x)
    % Computes a matrix of Mie coefficients, a_n, b_n, c_n, d_n,
    % of orders n=1 to nmax, complex refractive index m=m'+im",
    % and size parameter x=k0*a, where k0= wave number
    % in the ambient medium, a=sphere radius;

    nmax=round(2+x+4*x.^(1/3));
    n=(1:nmax); nu = (n+0.5); z=m.*x; m2=m.*m;
    sqx= sqrt(0.5*pi./x); sqz= sqrt(0.5*pi./z);
    bx = besselj(nu, x).*sqx;
    bz = besselj(nu, z).*sqz;
    yx = bessely(nu, x).*sqx;
    hx = bx+i*yx;
    b1x=[sin(x)/x, bx(1:nmax - 1)];
    b1z=[sin(z)/z, bz(1:nmax - 1)];
    y1x=[-cos(x)/x, yx(1:nmax - 1)];
    h1x= b1x+i*y1x;
    ax = x.*b1x - n.*bx;
    az = z.*b1z - n.*bz;
    ahx= x.*h1x - n.*hx;
    an = (m2.*bz.*ax - bx.*az)./(m2.*bz.*ahx - hx.*az);
    bn = (bz.*ax - bx.*az)./(bz.*ahx - hx.*az);
    cn = (bx.*ahx - hx.*ax)./(bz.*ahx - hx.*az);
    dn = m.*(bx.*ahx - hx.*ax)./(m2.*bz.*ahx - hx.*az);
    result=[an; bn; cn; dn];
```

Qsca.m

```
function result = Qsca(m, x)
    % Computation of Mie Efficiencies for given
```

```
% complex refractive-index ratio m=m'+im"
% and size parameter x=k0*a, where k0= wave number in ambient
% medium, a=sphere radius, using complex Mie Coefficients
% an and bn for n=1 to nmax,
% scattering (qsca), absorption (qabs), backscattering (qb),
% asymmetry parameter (asy=<costeta>) and (qratio=qb/qsca).9
% Uses the function "Mie_abcd" for an and bn, for n=1 to nmax.
% The result for the given example is only the qsca.


% To avoid a singularity at x=0
if x==0
    result = 0;

elseif x>0
  % This is the normal situation
    nmax=round(2+x+4*x.^(1/3));
    n1=nmax - 1;
    n=(1:nmax);cn=2*n+1; c1n=n.*(n+2)./(n+1); c2n=cn./n./(n+1);
    x2=x.*x;
    f=mie_abcd(m,x);
    anp=(real(f(1,:))); anpp=(imag(f(1,:)));
    bnp=(real(f(2,:))); bnpp=(imag(f(2,:)));
    g1(1:4,nmax)=[0; 0; 0; 0]; % displaced numbers used for
    g1(1,1:n1)=anp(2:nmax);    % asymmetry parameter, p. 120
    g1(2,1:n1)=anpp(2:nmax);
    g1(3,1:n1)=bnp(2:nmax);
    g1(4,1:n1)=bnpp(2:nmax);
    dn=cn.*(anp+bnp);
    q=sum(dn);
    qext=2*q/x2;
    en=cn.*(anp.*anp+anpp.*anpp+bnp.*bnp+bnpp.*bnpp);
    q=sum(en);
    qsca=2*q./x2;
    qabs=qext - qsca;
    fn=(f(1,:) - f(2,:)).*cn;
    gn=(-1).^n;
    f(3,:)=fn.*gn;
    q=sum(f(3,:));
    qb=q*q'/x2;

    asy1=c1n.*(anp.*g1(1,:)+anpp.*g1(2,:)
    + bnp.*g1(3,:)+bnpp.*g1(4,:));

    asy2=c2n.*(anp.*bnp+anpp.*bnpp);
    asy=4/x2*sum(asy1+asy2)/qsca;
    qratio=qb/qsca;

    % Result
    result= qsca;
end;
```

f_lsef.m

```
function result = f_lsef(RH,k,m,D,prop)
    %%Computation of light scattering enhancement factor
    % for given relative humidity (RH)

    %%Initialize parameters
    % RH: Relative Humidity [double]
    % k: Hygroscopicity parameter [array]
    % m: Complex refractive index [array]
    % mH2O: Water refractive index [double]
    % D: particles diameter [array]
    % prop: Propability to reach each type of particles [array]
    % wavelength: sensor laser wavelength; [double]

    mH2O = 1.3268 + 0.00000338i;
    wavelength = 900e-9;
    x = (pi * D)/wavelength;

    %% Calculate hygroscopic growth and wet parameters
    g = ( 1 + k*(RH/(1-RH)) ).^ (1/3);
    D_wet = g .* D;
    m_wet = ( m + mH2O*(g.^3 - 1) ) ./ (g .^ 3);
    x_wet = (pi * D_wet) / wavelength;

    %% Calculate scattering efficiency
    for i = 1:length(k)
        Qsca_dry(i) = Qsca(m(i), x(i));
        Qsca_wet(i) = Qsca(m_wet(i), x_wet(i));
    end


    %% Result
    f = (D_wet/D) .^ 2 .* (Qsca_wet ./ Qsca_dry);
    result = propability * f';
```