ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Οπτικές και μικροφυσικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων και η επίδρασή τους στο κλίμα

Μαρία-Ελένη Γιδαράκου

Εκπόνηση Διπλωματικής Διατριβής ως μέρος του
Προπτυχιακού Τίτλου Σπουδών

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

Επιβλέπων Καθηγητής: Αλέξανδρος Παπαγιάννης, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2021

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

Οπτικές και μικροφυσικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων και η επίδρασή τους στο κλίμα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία-Ελένη Γιδαράκου

Επιβλέπων Καθηγητής: Αλέξανδρος Παπαγιάννης, Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 28/06/21.

(Υπογραφή)	*(Υπογραφή)*	*(Υπογραφή)*
.....	.....	.....
Α. Παπαγιάννης	Π. Κόκκαλης	Σ. Σολωμός
Καθηγητής,	Επίκουρος Καθηγητής,	Ερευνητής,
Ε.Μ.Π	University of Kuwait	Ακαδημία Αθηνών

Αθήνα, Ιούνιος 2021

στους δικούς μου ανθρώπους

Ευχαριστίες

Αυτή η Διπλωματική Εργασία (ΔΕ) πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ὄπτοηλεκτρονικής, Lasers και Εφαρμογές τους' του Τομέα Φυσικής, της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Κύριος επιβλέπων ήταν ο Καθηγητής Αλέξανδρος Παπαγιάννης.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του ΕΜΠ και επιβλέποντα αυτής της ΔΕ, κ. Αλέξανδρο Παπαγιάννη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε από την αρχή της συνεργασίας μας, ο οποίος ήταν πάντα πρόθυμος και διαθέσιμος να βοηθήσει. Χάρη στην υποστήριξή, την πολύτιμη καθοδήγησή του και στην αγάπη του για την Φυσική του Περιβάλλοντος, κατάφερε να μου μεταδώσει κι εμένα το ενδιαφέρον γι΄ αυτόν τον κλάδο και να ασχοληθώ με την παρούσα εργασία, η οποία μου ενέπνευσε την επιθυμία να συνεχίσω στον τομέα αυτό. Η κατανόηση και οι συνεχείς προσπάθειές του για την εξασφάλιση της απαραίτητης υλικοτεχνικής υποδομής, αποτέλεσαν σημαντικούς παράγοντες για την ομαλή ολοκλήρωση της συγκεκριμένης ΔΕ.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Δήμητρα Ανάγνου για την εξαιρετική συννενόηση και συνεργασία. Δεν θα μπορούσα να παραλείψω από τις ευχαριστίες μου τις υποψήφιες Διδάκτορες Μαρία Μυλωνάκη και Χριστιάννα Παπανικολάου για την καθοδήγηση, για το πολύπλευρη βοήθειά τους και το ενδιαφέρον τους καθ΄ όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της ΔΕ. Επίσης, ευχαριστώ την Δρ. Ράνια Σουπιωνά για την βοήθεια και την συνεργασία, η οποία συντέλεσε στην ολοκλήρωση της ΔΕ.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τον αδελφό μου Παναγιώτη, καθώς επίσης και όλες-ους μου τις-τους φίλες-ους που μου στάθηκαν και με στήριξαν και μου έδωσαν κουράγιο και δύναμη σε όλη την διάρκεια εκπόνησης της ΔΕ.

Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας ΔΕ είναι η μελέτη των αιωρούμενων σωματιδίων, με χρήση της μεθόδου τηλεπισκόπησης της ατμόσφαιρας (τεχνική lidar), μέσω ανάλυσης των μετρήσεων για την ανάκτηση των οπτικών και μικροφυσικών ιδιοτήτων και την στατιστική επεξεργασία τους.

Το πρώτο κεφάλαιο έχει ως στόχο τη γνωριμία και εξοικείωση με τον όρο αιωρούμενα σωματίδια καθώς, επίσης, και με τον ρόλο τους στην ατμόσφαιρα. Συγκεκριμένα, εξετάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων, οι κατηγορίες στις οποίες κατατάσσονται, οι πηγές προέλευσής τους, καθώς και οι φυσικές και οπτικές τους ιδιότητες. Επιπλέον, δίνεται ο ορισμός της Παγκόσμιας Κλιματικής Αλλαγής (ΠΚΑ) και παρουσιάζονται οι τρόποι επίδρασης των σωματιδίων αυτών στην διάδοση της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα, καθώς και οι επιπτώσεις στο κλίμα, στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη υγεία.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται σε μια γενικότερη επισκόπηση της τεχνικής lidar, καθώς επίσης και στις βασικές εξισώσεις που διέπουν τα συστήματα lidar με τα οποία ασχοληθήκαμε στην παρούσα εργασία (lidar ελαστικής οπισθοσκέδασης, lidar ανελαστικής οπισθοσκέδασης και lidar αποπόλωσης).

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζουμε μια εκτενή περιγραφή των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν και από τα οποία αντλήθηκαν δεδομένα. Συγκεκριμένα, για τη λήψη των μετρήσεων lidar χρησιμοποιήθηκε το σύστημα Raman-lidar του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, EOLE. Επιπλέον, περιγράφεται συνοπτικά το Ευρωπαϊκό δίκτυο lidar EARLINET. Στο ίδιο κεφάλαιο παρουσιάζεται η τεχνική telecover, που αποσκοπεί στον έλεγχο της ευθυγράμμισης της εκπεμπόμενης δέσμης laser σε σχέση με τον οπτικό άξονα του τηλεσκοπίου λήψης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναφέρονται τα κυριότερα προγράμματα, κώδικες, αλγόριθμοι, μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία των δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, το αυτοματοποιημένο εργαλείο Single Calculus Chain (SCC) επιτρέπει την ανάκτηση των οπτικών ιδιοτήτων (συντελεστής οπισθοσκέδασης και εξασθένησης, λόγος lidar, συντελεστής Ångström και συντελεστής αποπόλωσης) των αιωρούμενων σωματιδίων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η στατιστική ανάλυση των οπτικών και μικροφυσικών ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων που υπολογίσθηκαν με βάση τις μετρήσεις lidar κατά την περίοδο 2020-2021.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα και οι προοπτικές της προοπτικές της έρευνας στο πλαίσιο της ΔΕ.

Abstract

The main objective of this Diploma Thesis is the study of suspended particles, using the atmospheric laser remote sensing (lidar) technique, through a statistical analysis of measurements to retrieve the aerosol optical and microphysical properties.

The first chapter aims to acquaint and familiarize with the term suspended particles as well as their role in the atmosphere. In particular, the main characteristics of the suspended particles, the categories into which they are classified, their sources of origin, as well as their physical and optical properties are examined. In addition, the definition of the Global Climate Change is given and the ways in which these particles affect the propagation of radiation in the atmosphere, as well as their impact on climate, environment and the human health are presented.

The second chapter provides a general overview of the lidar technique, as well as the basic equations underlying the lidar systems we dealt with in in the frame of this Thesis (Elastic lidar, Raman lidar and Depolarization lidar).

In the third chapter we present an extensive description of the instrumentation used. Specifically, we present the lidar system of the National Technical University of Athens, EOLE. In addition, the European lidar network EARLINET is briefly described. Within the same chapter, we present the telecover technique, which aims to control the alignment of the emitted beam laser relative to the optical axis of the receiving telescope.

In the fourth chapter, the main programs, codes, algorithms, models that were used to process the data are listed. More specifically, the automated tool Single Calculus Chain (SCC) allows the retrieval of the optical properties (backscatter and attenuation coefficient, lidar ratio, Ångström coefficient, Depolarization ratio) of the suspended particles.

The fifth chapter presents the statistical analysis of the optical and microphysical properties of the suspended particles calculated on the basis of the lidar measurements obtained in the period 2020-2021.

Finally, the sixth chapter presents the main conclusions and perspectives of this work.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες **iii**

Περίληψη **iv**

Abstract **v**

1 Αιωρούμενα Σωματίδια **1**
1.1 Αιωρούμενα σωματίδια 1
1.2 Πηγές των αιωρούμενων σωματιδίων 2
1.2.1 Προέλευση των αιωρούμενων σωματιδίων 3
1.3 Φυσικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων 8
1.3.1 Μέγεθος και μορφή αιωρούμενων σωματιδίων 8
1.4 Οπτικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων 9
1.4.1 Σκέδαση Rayleigh 10
1.4.2 Σκέδαση Mie 11
1.4.3 Ανελαστική σκέδαση Raman 12
1.5 Επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων στο γήινο κλίμα 15
1.5.1 Ορισμός της κλιματικής αλλαγής 15
1.5.2 Φαινόμενο άμεσης επίδρασης 18
1.5.3 Φαινόμενο έμμεσης επίδρασης 19
1.5.4 Φαινόμενο ημιάμεσης επίδρασης 20
1.6 Επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στο περιβάλλον 20
1.7 Επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στην υγεία 21

2 Τεχνική lidar **24**
2.1 Ιστορική αναδρομή 24
2.2 Αρχή λειτουργίας και περιγραφή της τεχνικής lidar 26
2.3 Τεχνικές τηλεπισκόπησης lidar 28
2.3.1 Τεχνική lidar ελαστικής οπισθοσκέδασης 29
2.3.2 Μέθοδος Klett 30
2.3.3 Τεχνική lidar ανελαστικής οπισθοσκέδασης (Raman lidar) 32
2.3.4 Τεχνική lidar αποπόλωσης 34
2.4 Επεξεργασία σημάτων και δεδομένων lidar 35
2.4.1 Διορθώσεις αναλογικών σημάτων 35
2.4.2 Διορθώσεις σημάτων καταμέτρησης φωτονίων 37

2.4.3 Γεωμετρική οπτική επικάλυψη συστήματος lidar 38
2.5 Υπολογισμός των οπτικών ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων 41
2.5.1 Συντελεστές εξασθένησης και οπισθοσκέδασης των αιωρούμενων σωματιδίων 42
2.5.2 Λόγος lidar των αιωρούμενων σωματιδίων 43
2.5.3 Εκθέτης Ångström 44
2.5.4 Συντελεστής αποπόλωσης 45

3 Περιγραφή πειραματικών διατάξεων lidar του ΕΜΠ-Διαδικασία πιστοποίησης ποιότητας 46
3.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης του συστήματος lidar EOLE 46
3.1.1 Σύστημα εκπομπής EOLE 47
3.1.2 Σύστημα ανίχνευσης EOLE 49
3.1.3 Σύστημα καταγραφής και αποθήκευσης δεδομένων EOLE 50
3.2 Περιγραφή πειραματικής διάταξης του συστήματος lidar DEPOLE 51
3.2.1 Σύστημα εκπομπής DEPOLE 51
3.2.2 Σύστημα ανίχνευσης DEPOLE 51
3.3 Πιστοποίηση του συστήματος Raman lidar (EOLE) του ΕΜΠ 52
3.3.1 Ευρωπαϊκό Δίκτυο συστημάτων lidar (EARLINET) 52
3.3.2 Πιστοποίηση του οπτικού συστήματος λήψης με χρήση της τεχνικής telecover 54

4 Επεξεργασία δεδομένων lidar 62
4.1 Ο κώδικας Single Calculus Chain (SCC) 62
4.2 Προσδιορισμός της πηγής προέλευσης των αιωρούμενων σωματιδίων 64
4.3 Χαρακτηρισμός αιωρούμενων σωματιδίων 65
4.4 Μοντέλο διασποράς σκόνης BSC/DREAM$_{8b}$ 68
4.5 Αλγόριθμος αναστροφής του υπολογιστικού πακέτου SphInX 70
4.6 Μεθοδολογία επεξεργασίας δεδομένων 72

5 Ανάλυση δεδομένων lidar 76
5.1 Πειραματικά στατιστικά αποτελέσματα 76
5.2 Ανάλυση περίπτωσης (case study) - 12/4/2021 82

6 Συμπεράσματα - Προοπτικές 87

Α΄ Στοιχεία της γήινης ατμόσφαιρας 97

Β΄ Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης και χαρακτηρισμού στρωματώσεων αερολυμάτων (2020-2021) στην περιοχή της Αθήνας 102

Κεφάλαιο 1

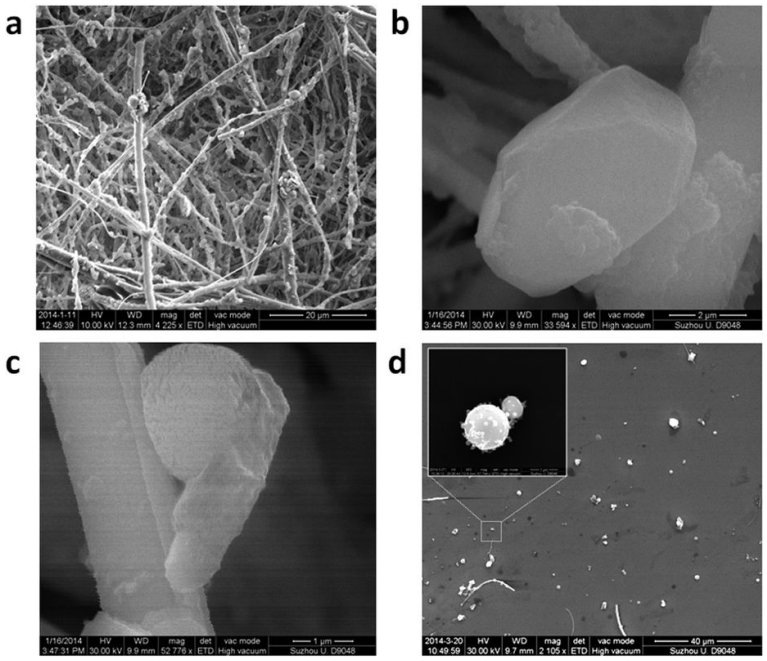
Αιωρούμενα Σωματίδια

1.1 Αιωρούμενα σωματίδια

Ως αιωρούμενα σωματίδια (Suspended Particulate Matter, SPM) ή αλλιώς αερολύματα, χαρακτηρίζουμε κάθε σώμα, στερεό ή υγρό εκτός του ύδατος, που βρίσκεται σε διασπορά και έχει διάμετρο μεγαλύτερη από 0.0002 μm και μικρότερη από 100 μm περίπου. Η σκόνη, ο καπνός, η ιπτάμενη τέφρα αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα αιωρούμενων σωματιδίων. Κάποια σωματίδια είναι αρκετά μεγάλα ή σκουρόχρωμα, ώστε καθίστανται ορατά σαν καπνός, ενώ άλλα είναι τόσο μικρά που δύνανται να ανιχνευθούν μόνο με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

Το ανώτερο όριο αντιστοιχεί σε μέγεθος μικρού υδροσταγονίδιου (ψιλή βροχή) ή λεπτής άμμου ($\sim$ 60 μm). Τα σωματίδια αυτά είναι τόσο μεγάλα που πολύ γρήγορα απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα και δεν παραμένουν για πολύ χρόνο αιωρούμενα σε αυτή. Υπάρχουν όμως και μεγαλύτερα σωματίδια που παράγονται στην ατμόσφαιρα (σταγόνες βροχής $\sim$ 100 mm, χαλάζι $\sim$ 1-20 mm). Τα σημαντικότερα σωματίδια όσον αφορά το ρόλο τους στην ατμοσφαιρική χημεία και την φυσική της ατμόσφαιρας είναι αυτά που η διάμετρός τους κυμαίνεται μεταξύ 0.002 μm - 10 μm. Στην Εικόνα 1.1.1 παρουσιάζεται η μορφολογία των αιωρούμενων σωματιδίων $PM_{2.5}$.

Ορισμένα σωματίδια διαφεύγουν απευθείας από τις πηγές τους, όπως οι καπνοδόχοι και τα αυτοκίνητα. Σε άλλες πάλι περιπτώσεις, αέρια όπως CO, SO_2, NO_X, και VOC αντιδρούν με διάφορες ενώσεις του αέρα και δημιουργούν έτσι τα λεπτόκοκκα σωματίδια. Η φύση τους και η χημική σύστασή τους ποικίλλει και εξαρτάται από την τοποθεσία, την εποχή του χρόνου και τις καιρικές συνθήκες. Η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων σε καθαρή ατμόσφαιρα είναι της τάξης των 10 $\mu g/m^3$ (WHO, 2005).



Εικόνα 1.1.1: Μορφολογία των αιωρούμενων σωματιδίων $PM_{2.5}$ (Shi, 2015)

.

Τα αιωρούμενα σωματίδια λοιπόν προέρχονται τόσο από φυσικές (ωκεανοί, έρημοι, εκρήξεις ηφαιστείων, κ.α.), όσο και ανθρωπογενείς πηγές. Εκπέμπονται απευθείας στην ατμόσφαιρα ή δημιουργούνται εκεί από χημικές αντιδράσεις και διαδικασίες μετατροπής αερίων σε σωμάτια και ονομάζονται πρωτογενή και δευτερογενή, αντίστοιχα. Τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να μεταβάλλουν το μέγεθος και την σύστασή τους με εξάτμιση ή συμπύκνωση ατμών, με συνένωση με άλλα σωματίδια, με χημικές αντιδράσεις ή με ενεργοποίηση υπό την παρουσία υπερκορεσμένου νερού έτσι ώστε να μετατραπούν σε ομίχλη και υδροσταγονίδια.

1.2 Πηγές των αιωρούμενων σωματιδίων

Υπάρχουν τρεις κύριες πηγές αιωρούμενων σωματιδίων στη γήινη ατμόσφαιρα: τα σωματίδια με θαλάσσια προέλευση (marine), τα σωματίδια με ηπειρωτική προέλευση (continental) και, τέλος, αυτά με πολική προέλευση (polar). Σε κάθε περίπτωση, η σύσταση, οι οπτικές και μικροφυσικές τους ιδιότητες διαφέρουν.

Όσον αφορά τα σωματίδια με ηπειρωτική προέλευση διακρίνουμε άλλες τρεις κατηγορίες ανάλογα με την προέλευση τους: την αστική προέλευση (urban aerosols), την προέλευση από απομακρυσμένες αγροτικές περιοχές (rural aerosols) και την προέλευση από τις διάφορες ερήμους (desert dust aerosols).

Στην περίπτωση των σωματιδίων με επίγεια προέλευση, κύριες πηγές είναι οι έρημοι (άλατα πυριτίου και σιδήρου), οι βιομηχανικές δραστηριότητες (αιθάλη, οργανικά σωματίδια, νιτρικά άλατα), η καύση της βιομάζας (αιθάλη), η καύση ορυκτών καυσίμων (τέφρα), η ηφαιστειακή δραστηριότητα (θειικά άλατα) και γενικά οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες (Seinfeld & Pandis, 1998).

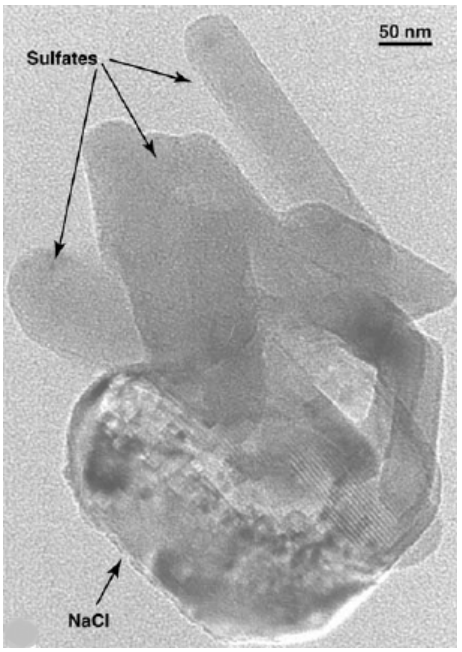
Η ανθρωπογενής δραστηριότητα έχει σημαντικές επιρροές σε παγκόσμια κλίμακα. Η συγκέντρωση των αερίων έχει αυξηθεί σημαντικά λόγω της βιομηχανικής δραστηριότητας και των μεταφορών. Λόγω της αύξησης της συγκέντρωσης των αερολυμάτων, οδηγούμαστε σε σοβαρά προβλήματα υγείας, κυρίως στις πυκνοκατοικημένες, βιομηχανικές περιοχές (European Environment Agency (EEA), 2013). Επίσης, η αύξηση αυτή έχει συμβάλλει σημαντικά και στην ΠΚΑ (IPCC, 2013).

1.2.1 Προέλευση των αιωρούμενων σωματιδίων

Για τη μελέτη των αιωρούμενων σωματιδίων έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα τα οποία τα ταξινομούν σε κατηγορίες ανάλογα με τη προέλευσή τους και τη χημική τους σύσταση. Παρακάτω περιγράφονται οι σημαντικότεροι τύποι αιωρούμενων σωματιδίων.

Αστικά αερολύματα: Τα αστικά αερολύματα αποτελούν μείγματα εκπομπών πρωτογενών σωματιδίων, τα οποία προέρχονται από τη βιομηχανική δραστηριότητα, τις μεταφορές, την παραγωγή ενέργειας καθώς και από φυσικές πηγές. Επιπλέον, αποτελούν και μείγματα δευτερογενών σωματιδίων τα οποία δημιουργούνται από μηχανισμούς μετατροπής αερίου-σωματιδίου. Η αριθμητική κατανομή (aerosol size distribution) κυριαρχείται από σωματίδια μικρότερα του 1 μm, ενώ το μεγαλύτερο μέρος τους έχει διάμετρο από 0.1 μm έως 0.5 μm. Η κατανομή μάζας (mass concentration) εμφανίζει συνήθως δύο μέγιστα, ένα στην περιοχή όπου η διάμετρος είναι μικρότερη από 1 μm στην περιοχή συσσωμάτωσης και ένα στην περιοχή των αδρών σωματιδίων 5 μm - 10 μm.

Θαλάσσια αερολύματα: Τα θαλάσσια αερολύματα δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση του αέρα με την θάλασσα καθώς οι ανερχόμενες φυσαλίδες αέρα ¨εκρήγνυνται' στην επιφάνεια του ωκεανού. Η παγκόσμια παραγωγή θαλασσινού αλατιού (NaCl) υπολογίζεται στο εύρος των $1 - 3 \times 10^4$ Tg ετησίως, ενώ το 32% της παγκόσμιας ροής εκτιμάται ότι βρίσκεται στο Βόρειο Ημισφαίριο (O'Dowd & de Leeuw, 2007). Οι συγκεντρώσεις θαλάσσιων ατμοσφαιρικών σωματιδίων είναι συνήθως της τάξης των 100-300 cm^3. Τα θαλάσσια αερολύματα περιέχουν αιωρούμενα σωματίδια όλων των μεγεθών, της περιοχής των πυρήνων Aitken (Dp $<$ 0.1 μm), της περιοχής συσσωμάτωσης (0.1 μm $<$ Dp $<$ 0.6 μm) και των αδρών σωματιδίων (Dp $>$ 0.6 μm), όπου Dp η διάμετρος.



Εικόνα 1.2.1: Θειικό άλας προσκολλημένο σε ένα σωματίδιο χλωριούχου νατρίου (Buseck, 1999)

.

Αγροτικά ηπειρωτικά αερολύματα: Τα αερολύματα στις αγροτικές περιοχές είναι κυρίως φυσικής προέλευσης αλλά επιδρούν σε αυτά και ανθρωπογενείς πηγές. Η αριθμητική κατανομή χαρακτηρίζεται από σωματίδια με διαμέτρους 0.02 μm και 0.08 μm (Jaenicke, 1993). Η κατανομή μάζας κυριαρχείται από τα αδρά σωματίδια με το κέντρο να βρίσκεται περίπου στα 7 μm.

Απομακρυσμένα ηπειρωτικά αερολύματα: Τα πρωτογενή σωματίδια (σκόνη, γύρη, φυτικά κεριά) και δευτερογενή προϊόντα οξείδωσης είναι τα κύρια συστατικά των απομακρυσμένων ηπειρωτικών αερολυμάτων (Deepak et al., 1991). Οι αριθμητικές συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων κυμαίνονται περίπου από 1000 cm^3 έως 10000 cm^3.

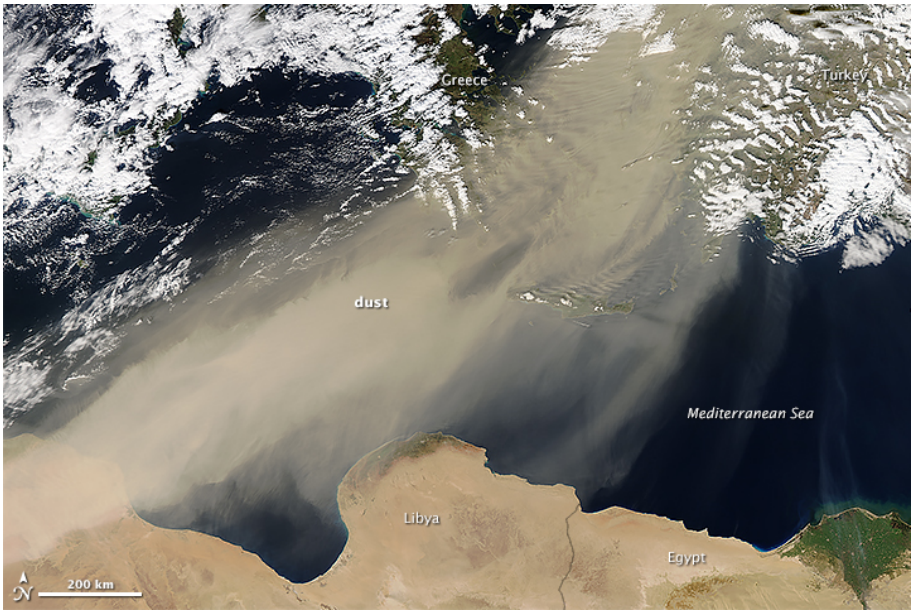
Αερολύματα ελεύθερης τροπόσφαιρας: Συναντώνται στη μεσαία και ανώτερη τροπόσφαιρα πάνω από τα νέφη και η διάμετρός τους κυμαίνεται από 0.01 μm έως 0.25 μm (Jaenicke, 1993).

Πολικά αερολύματα: Συναντώνται κοντά στην γήινη επιφάνεια στις περιοχές της Αρκτικής και της Ανταρκτικής. Η βόρεια πολική περιοχή χαρακτηρίζεται από μια επικρατούσα ¨Αρκτική ομίχλη¨, η οποία προτάθηκε ότι προέρχεται από ανθρωπογενείς εκπομπές στα βόρεια μεσαία πλάτη (Rahn et al. 1977; Barrie 1986). Τα πολικά αερολύματα αυξάνονται το χειμώνα και στις αρχές της άνοιξης (Φεβρουάριος έως Απρίλιος) κάθε χρόνο. Αυτήν την περίοδο η συγκέντρωση των σωματιδίων αυξάνεται σε

περισσότερο από 200 cm ^{3}. Τα αερολύματα περιλαμβάνουν θαλασσινό αλάτι με αμμώνιο, νιτρικό άλας, σκόνη και οργανική ύλη. Η αριθμητική κατανομή των πολικών αερολυμάτων εμφανίζεται περίπου στα 0.15 μm ενώ στην κατανομή μάζας εμφανίζονται δύο μέγιστα, στα 0.75 μm και 8 μm. Η μέση διάμετρος στο πεδίο των πυρήνων Aitken είναι 0.05 μm και στην περιοχή συσσωμάτωσης 0.2 μm.

Ερημικά αερολύματα: Τα ερημικά αερολύματα, βρίσκονται πάνω από ερήμους αλλά λόγω της μεταφοράς τους σε μεγάλες αποστάσεις, βρίσκονται και σε παρακείμενες περιοχές όπως οι ωκεανοί (Jaenicke et al., 1978; d'Almeida et al., 1983; Li et al., 1996). Η κατανομή μεγέθους είναι παρόμοια με αυτή των απομακρυσμένων ηπειρωτικών αερολυμάτων, αλλά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα του ανέμου. Η αριθμητική κατανομή τείνει να εμφανίζει τρία μέγιστα σε διαμέτρους 0.01 μm, 0.05 μm και 10 μm, αντίστοιχα (Jaenicke, 1993).

Έχει αποδειχθεί ότι μεμονωμένες ¨καταιγίδες' άμμου από την έρημο της Σαχάρας μεταφέρουν σκόνη από τη βορειοδυτική ακτή της Αφρικής, πέρα από τον Ατλαντικό, στην ανατολική ακτή των Ηνωμένων Πολιτειών (Prospero et al., 1987; Ott et al., 1991). Η μεταφορά σκόνης πραγματοποιείται από τις ερήμους της Ασίας στον Ειρηνικό Ωκεανό (Prospero, 1995). Πάντως, ενώ σωματίδια μεγάλου μεγέθους μέχρι και διαμέτρου 100 μm βρίσκονται στις περιοχές των ερήμων, μόνο σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 10 μm μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις, συχνά πάνω από 5000 km (Seinfeld et al., 1998).



Εικόνα 1.2.2: Μεταφορά σκόνης από την Αφρική στον Ελλαδικό και Τουρικό χώρο στις 1/2/15. (NASA image by Jeff Schmaltz, LANCE/EOSDIS Rapid Respons, http://earthobservatory.nasa.gov/

.

Όσον αφορά την Ελλάδα, αλλά και τις περιοχές της Μεσογείου, επηρεάζονται άμεσα από σωματίδια σκόνης τα οποία προέρχονται από την Αφρική και πιο συγκεκριμένα, από την περιοχή της Sahel, την έρημο Σαχάρα και τις ερημικές περιοχές της Namimbia, στην Νότια Αφρική. Στην Εικόνα 1.2.2, παρουσιάζεται ένα έντονο επεισόδιο μεταφοράς σκόνης από την έρημο Σαχάρα, προς τον Ελλαδικό και Τουρκικό χώρο, το οποίο και καταγράφηκε από τον δορυφορικό αισθητήρα MODIS της NASA, στις 1 Φεβρουαρίου 2015.

Ηφαιστειακά αερολύματα: Οι ηφαιστειακές εκρήξεις σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη είναι γεγονότα υψηλής συχνότητας και έντασης ικανά να απελευθερώνουν μεγάλες ποσότητες αερολυμάτων στο περιβάλλον. Μελέτες έχουν δείξει ότι η Αρκτική είναι μια περιοχή ιδιαίτερα ευαίσθητη σε διαταραχές του ισοζυγίου της γήινης ακτινοβολίας που οφείλονται σε αερολύματα, και ιδιαίτερα στα ηφαιστειακά αερολύματα. Συνεπώς, οι ηφαιστειακές εκπομπές αποτελούν μια βασική φυσική πηγή εκπομπής αερολυμάτων στην τροπόσφαιρα σε παγκόσμια κλίμακα (Mather et al., 2003).

Οι ηφαιστειακές εκρήξεις είναι ικανές να παράγουν ένα τεράστιο, σποραδικό σήμα αερολύματος, που διαρκεί από λεπτά έως χρόνια (Simkin et al., 1994), και οι εκρήξεις μεγάλου γεωγραφικού πλάτους μπορούν να διανέμουν αερολύματα σε περιοχές που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από την περιοχή που βρίσκεται το ηφαίστειο, όπως αποδεικνύεται από την έκρηξη του Eyjafjallajökull το 2010 στην Ισλανδία, η οποία διέκοψε τις αεροπορικές μεταφορές σε μεγάλο μέρος της Ευρώπης. Ανάλογα με την εποχή του χρόνου, μπορεί να υπάρχουν ηφαιστειακά αερολύματα μαζί με άλλους τύπους αερολυμάτων.

Εικόνα 1.2.3: Απελευθέρωση της ηφαιστειακής τέφρας του ηφαιστείου Eyjafjallajökull στην Νότια Ισλανδία, στις 17 Απριλίου του 2010. (Institute of Earth Sciences, https://earthice.hi.is/eruption-eyjafjallajokull$_2$010)

.

Τα ηφαιστειακά αερολύματα μπορούν να είναι εξωτερικά μίγματα τέφρας, θειικών και υδρομετεώρων ή / και εσωτερικών μιγμάτων τέφρας επικαλυμμένα με θειικά, νερό ή / και πάγο (Rose et al., 2004.). Η τέφρα και τα θειικά άλατα θεωρούνται τα κυρίαρχα συστατικά αερολύματος των περισσότερων ηφαιστειακών αερολυμάτων (Andersson et al., 2013. Στις ηφαιστειακές εκρήξεις, τα θειικά άλατα σχηματίζονται από αντίδραση μεταξύ εκπεμπόμενου ηφαιστειακού διοξειδίου του θείου (SO_2) και νερού και μπορούν να παραμείνουν στη στρατόσφαιρα για έως και 3 χρόνια (Carslaw et al., 2009), προκαλώντας ψύξη στην επιφάνεια και θέρμανση στη στρατόσφαιρα (Robock, 2000). Η διάρκεια ζωής της λεπτής τέφρας (αεροδυναμική διάμετρος $< 2{,}5$ μm) στη στρατόσφαιρα είναι της τάξης μερικών εβδομάδων (Niemeier et al., 2009). Κατά συνέπεια, τα θειικά άλατα είναι συνήθως τα μόνα αερολύματα που περιλαμβάνονται στις παγκόσμιες εκτιμήσεις διαταραχής του κλίματος από μια συγκεκριμένη έκρηξη (Stenchikov et al., 1998). Ωστόσο, η ηφαιστειακή τέφρα και τα θειικά αερολύματα στην τροπόσφαιρα είναι σημαντικά σε περιφερειακό επίπεδο και έχουν συγκρίσιμη διάρκεια ζωής (περίπου ημέρες έως εβδομάδες). Επομένως, τόσο η τέφρα όσο και το θειικό άλας πρέπει να συμπεριληφθούν στην εκτίμηση της περιφερειακής επίδρασης του ισοζυγίου της ακτινοβολίας.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα τροποσφαιρικά ηφαιστειακά αερολύματα διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στο ισοζύγιο ακτινοβολίας τόσο άμεσα με την σκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας και την απορρόφηση της γήινης θερμικής ακτινοβολίας όσο και έμμεσα προκαλώντας αλλαγές στην νεφοκάλυψη και στις ιδιότητες των νεφών (Kaufman et al., 2002). Παρά το γεγονός ότι τα ηφαιστειακά αερολύματα έχουν χαμηλότερους ρυθμούς εκπομπής από ότι τα ανθρωπογενή, έχουν εξίσου σημαντική επίδραση στο ισοζύγιο ακτινοβολίας του πλανήτη με αυτή των ανθρωπογενών. Αυτό κυρίως συμβαίνει λόγω του ότι απελευθερώνονται στην ελεύθερη τροπόσφαιρα σε αντίθεση με τις ανθρωπογενής εκπομπές που ανιχνεύονται στις κατώτερες ζώνες της τροπόσφαιρας, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο χρόνος ζωής τους (Graf et al., 1998).

Επιπλέον, τα τροποσφαιρικά ηφαιστειακά αερολύματα έχουν επιπτώσεις, τόσο σε τοπικό όσο και σε μεγαλύτερο επίπεδο, στα οικοσυστήματα, όπου τα θειικά κυρίως αερολύματα αποβαίνουν τοξικά για τα φυτά και τα δέντρα αλλά και στην ανθρώπινη υγεία, προκαλώντας κρίσεις άσθματος και ασθένειες στην καρδιά και τους πνεύμονες με αποτέλεσμα σε ορισμένες περιπτώσεις την αύξηση της θνησιμότητας (Grattan et al., 2003). Γενικά οι βασικές παράμετροι για τον προσδιορισμό της φύσης και επίδρασης των ηφαιστειακών αερολυμάτων είναι : **(i)** ο ρυθμός εκπομπής των σωματιδίων και η κατανομή τους στον χώρο και τον χρόνο, **(ii)** η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων , **(iii)** η ανάλυση της χημικής τους σύσταση και **(iv)** η μορφολογία τους.

1.3 Φυσικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων

1.3.1 Μέγεθος και μορφή αιωρούμενων σωματιδίων

Το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων, αν υποθέσουμε ότι αυτά έχουν σφαιρικό ή σχεδόν σφαιρικό σχήμα, εκφράζεται κατά κανόνα από την ακτίνα ή την διάμετρο τους. Εκτός των σφαιρικών σωματιδίων λοιπόν, υπάρχουν και τα κρυσταλλικά σωματίδια, τα οποία εμφανίζονται σε μία μεγάλη γεωμετρική ποικιλία καθώς επίσης και τα άμορφα σωματίδια, τα οποία είναι σπανίως σφαιρικά. Επιπλέον, τα σωματίδια διαφέρουν μεταξύ τους και ως προς την πυκνότητά τους. Η κατανομή μεγεθών μπορεί να αναφέρεται στην αριθμητική πυκνότητα, τον όγκο, την μάζα ή σε οποιαδήποτε άλλη ιδιότητα των αιωρούμενων σωματιδίων η οποία μεταβάλλεται με το μέγεθος των σωματιδίων.

Το μέγεθος των σωματιδίων είναι καθοριστικό τόσο για τη διείσδυση και απόθεσή τους στο αναπνευστικό σύστημα, όσο και για το χρόνο παραμονής τους στην ατμόσφαιρα και τη δυνατότητα μεταφοράς τους σε μακρινές αποστάσεις. Εκφράζεται κατά κανόνα από την ισοδύναμη αεροδυναμική διάμετρο Dp.

Τα αιωρούμενα σωματίδια διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες αναφορικά με τις διαστάσεις τους: **(i)** τα υπέρλεπτα σωματίδια (ultra fine) με 0.001 μm $\leq$ Dp $\leq$ 0.01 μm, **(ii)** τα σωματίδια Aitken με 0.01 μm $\leq$ Dp $\leq$ 0.2 μm, **(iii)** τα συσσωματώματα με 0.2 μm $\leq$ Dp $\leq$ 2 μm και **(iv)** τα αδρά σωματίδια (coarse) με Dp $\geq$ 2.0 μm.

Προφανώς, συμπεραίνουμε ότι όσο μεγαλώνει η διάμετρος των αιωρούμενων σωματιδίων, τόσο αυξάνεται η πιθανότητα να κατακρημνισθούν προς την επιφάνεια της γης εξαιτίας της βαρύτητας. Είναι, επίσης πιθανόν να υποστούν, ξηρή ή υγρή εναπόθεση, λόγω προσκόλλησης σε κάποιον ρυπαντή ή σε υδροσταγονίδια.

Οι πυρήνες Aitken αποτελούνται από σωματίδια που είναι τα υποπροϊόντα της καύσης, καθώς και σωματίδια που είναι προϊόντα της διαδικασίας μετατροπής αερίου σε σωματίδιο, όπως επίσης και από διαδικασίες καύσης στις οποίες δημιουργούνται θερμοί, υπερκορεσμένοι ατμοί και στη συνέχεια υφίστανται συμπύκνωση. Τα σωματίδια που απελευθερώνονται ως αποτέλεσμα της καύσης προέρχονται κυρίως από ανθρωπογενείς πηγές. Ωστόσο, η διαδικασία μετατροπής αερίου σε σωματίδιο είναι μια φυσική πηγή (υποθέτοντας ότι τα πρόδρομα αέρια δεν είναι ανθρωπογενή). Αυτά τα σωματίδια δρουν σαν πυρήνες συμπύκνωσης των ατμών αερίων χαμηλής πίεσης, ωθώντας τα να μεγαλώσουν μέσω διαδικασιών συσσωμάτωσης. Εναλλακτικά, τα σωματίδια αυτά μπορούν να αυξήσουν ακόμη περισσότερο το μέγεθός τους, μέσω της διαδικασίας της συσσωμάτωσης. Αυτό το πεδίο περιλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του αριθμού των σωματιδίων αλλά μικρό μέρος της συνολικής μάζας εξαιτίας του μικρού μεγέθους τους. Ο χρόνος ζωής των πυρήνων Aitken είναι μικρός, μόλις μερικά λεπτά, εξαιτίας της γρήγορης συμπύκνωσής τους.

Τα συσσωματώματα προέρχονται κυρίως από την συμπύκνωση ατμών χαμηλής πτητικότητας και από την συσσωμάτωση μικρότερων σωματιδίων από το πεδίο των πυρήνων, είτε μεταξύ τους είτε, πιθανότερα, με μεγαλύτερα σωματίδια. Εξαιτίας της φύσης των πηγών τους τα σωματίδια της περιοχής συσσωμάτωσης γενικά περιέχουν οργανικές ενώσεις, αλλά και διαλυτές ανόργανες ενώσεις. Τα συσσωματώματα αποτελούν μόνο το 5% του συνολικού αριθμού των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, αλλά αποτελούν περίπου το 50% της συνολικής μάζας των αερολυμάτων. Επειδή, μάλιστα, είναι πολύ μικρά μετακινούνται μέσω ενσωμάτωσής τους σε σταγονίδια στα νέφη και οπότε ακολουθεί απόπλυση κατά την διάρκεια της ατμοσφαιρικής κατακρήμνισης. Τα συσσωματώματα έχουν μεγαλύτερο χρόνο ζωής από τα αδρά σωματίδια, κάτι το οποίο συνδυαζόμενο με τις επιδράσεις τους στην ορατότητα της ατμόσφαιρας, στο σχηματισμό νεφών και στην ανθρώπινη υγεία, τα καθιστούν πολύ σημαντικά.

Τα αδρά σωματίδια συνήθως παράγονται από μηχανικές διαδικασίες. Ενώ τα σωματίδια σε αυτήν την κατηγορία είναι σε γενικές γραμμές αρκετά μεγάλα, ούτως ώστε να κατακρημνίζονται εξαιτίας της βαρύτητας, υπάρχουν μηχανισμοί μεταφοράς μεγάλης κλίμακας μέσω των ανέμων, που μπορούν να τα μεταφέρουν σε μεγάλες αποστάσεις. Ένας ακόμη μηχανισμός απομάκρυνσης αυτών των σωματιδίων είναι εκείνος της απόπλυσης. Η χημική σύνθεση των σωματιδίων αντικατοπτρίζει την πηγή τους και για αυτό κυρίως περιλαμβάνουν ανόργανα συστατικά όπως άμμο, αλάτι αλλά και σημαντικές ποσότητες οργανικών συστατικών που σχετίζονται κυρίως με σωματίδια σκόνης. Η πλειονότητα των βιολογικών σωματιδίων, όπως σπόροι, γύρη, αλάτι, κ.λ.π., ανήκουν στην κατηγορία των ογκωδών σωματιδίων.

1.4 Οπτικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων

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**). Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάδοση της στη γήινη ατμόσφαιρα εξασθενεί και η εξασθένηση αυτή οφείλεται σε φαινόμενα σκέδασης και απορρόφησης. Η διαδικασία της σκέδασης μπορεί να χωριστεί σε ελαστική και μη ελαστική.

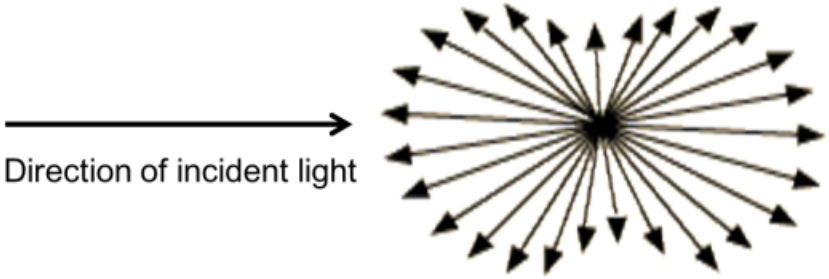
Η **σκέδαση** της ηλιακής ακτινοβολίας οφείλεται τόσο στην ύπαρξη των αιωρούμενων σωματιδίων (φαινόμενο σκέδασης Mie), όσο και των μορίων της ατμόσφαιρας (φαινόμενο σκέδασης Rayleigh). Και στις δυο περιπτώσεις το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που

επανεκπέμπεται παραμένει σταθερό (ελαστική σκέδαση). Αντιθέτως, η σκέδαση Raman είναι μη ελαστική και οφείλεται στα μόρια της ατμόσφαιρας (π.χ N_2, O_2, O_3, H_2O, κλπ.) (Measures, 1992).

Η **απορρόφηση** της ηλιακής ακτινοβολίας οφείλεται επίσης στα αιωρούμενα σωματίδια, η απορρόφηση στην περιοχή του υπεριώδους γίνεται κυρίως από τα αερολύματα που περιέχουν πυρίτιο (Si), αλλά και στα μόρια της ατμόσφαιρας. Στην τελευταία περίπτωση η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από τα μόρια της ατμόσφαιρας μπορεί να οδηγήσει σε φωτοδιάσπαση του μορίου ή σε φωτοϊονισμό. Αυτό συμβαίνει κυρίως στην υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία η οποία απορροφάται στα υψηλά ατμοσφαιρικά στρώματα. Τα μεγαλύτερα μήκη κύματος διεισδύουν βαθύτερα στην ατμόσφαιρα, μέχρι να απορροφηθούν και αυτά από τα διάφορα ατμοσφαιρικά αέρια. Όσο πιο κοντά πλησιάζουμε στην επιφάνεια της γης, τόσο αυξάνεται η πυκνότητα της ατμόσφαιρας και παράλληλα αυξάνεται και η απορρόφηση της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας (UV).

1.4.1 Σκέδαση Rayleigh

Στην Εικόνα 1.4.1 παρουσιάζεται το πολικό διάγραμμα της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας laser από τα μόρια της ατμόσφαιρας (σκέδαση Rayleigh) .



Εικόνα 1.4.1: Η διαδικασία σκέδασης Rayleigh (Alkholidi, 2014).

Η διαδικασία αυτή χαρακτηρίζεται από τη διαφορική ενεργό διατομή σκέδασης $\frac{d\sigma_R}{d\Omega}$, που δίνεται από τη σχέση (Measures, 1992):

$$\frac{d\sigma_R}{d\Omega} = \frac{\pi^2(n^2-1)^2}{N^2\lambda^4}((cos\phi)^2(cos\theta)^2 + (sin\phi)^2) \tag{1.1}$$

όπου n είναι το πραγματικό μέρος του δείκτη διάθλασης της ατμόσφαιρας, είναι η μέση πυκνότητα των μορίων της ατμόσφαιρας (προκύπτει από ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο) (σε

mol cm^{-3}) και , οι γωνίες σε σφαιρικές συντεταγμένες που σχηματίζουν η προσπίπτουσα και η σκεδαζόμενη πολωμένη ακτινοβολία, αντίστοιχα.

Ολοκληρώνοντας σε στερεά γωνία 4π, προκύπτει η συνολική ενεργός διατομή σκέδασης, σ_R (Measures, 1992):

$$\sigma_{\pi}^{mol}(\lambda_L) = \frac{d\sigma_{mol}(\theta = \pi)}{d\Omega} = \frac{\pi^2(n^2-1)^2}{N^2\lambda^4} \tag{1.2}$$

όπου παρατηρούμε την εξάρτηση από το μήκος κύματος που είναι της μορφής λ^{-4}.

Ο μοριακός συντελεστής οπισθοσκέδασης $\beta_{mol}(\lambda_L, z)$ συνδέεται με τον μοριακό συντελεστή εξασθένησης $\alpha_{mol}(\lambda_L, z)$ με την ακόλουθη σχέση, με απόκλιση που δεν ξεπερνά το 1.5%:

$$\frac{\alpha_{mol}(\lambda_L, z)}{\beta_{mol}(\lambda_L, z)} = \frac{8\pi}{3} \tag{1.3}$$

Ο μοριακός συντελεστής εξασθένησης υπολογίζεται μέσω του μοριακού συντελεστή οπισθοσκέδασης, ο οποίος υπολογίζεται από την σχέση:

$$\beta_{mol}(\lambda_L, z) = N\sigma_{\pi}^{mol}(\lambda_L) \tag{1.4}$$

1.4.2 Σκέδαση Mie

Στη σκέδαση Mie παίζει πολύ σημαντικό ρόλο το μέγεθος του σκεδάζοντος σωματιδίου σε σχέση με το μήκος κύματος λ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας καθώς επίσης και οι οπτικές ιδιότητες των σωματιδίων που σχετίζονται με τον δείκτη διάθλασης τους: $m = n + ik$, όπου n και k είναι το πραγματικό και το φανταστικό μέρος, αντίστοιχα, του δείκτη διάθλασης ο οποίος είναι συνάρτηση του μήκους κύματος. Ο δείκτης n φανερώνει την ταχύτητα του φωτός στο υλικό μέσω, ενώ ο δείκτης k είναι ενδεικτικός της απορροφητικότητας του υλικού του σωματιδίου αυτού.

Ορίζουμε σαν παράμετρο μεγέθους α του αερολύματος το συντελεστή (McCartney, 1976):

$$\alpha = \frac{2\pi r}{\lambda} = \frac{\pi D_p}{\lambda}$$

όπου r είναι η ακτίνα του σωματιδίου, Dp η διάμετρός του και λ το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Στη σκέδαση Mie τα σωματίδια-σκεδαστές έχουν διάμετρο συγκρίσιμη με το μήκος κύματος δηλ. α ≈ 1.

Στην περίπτωση σκέδασης από σωματίδια με διάμετρο πολύ μεγαλύτερη από το μήκος κύματος λ (Dp > 100 μm) π.χ. σκέδαση από σταγονίδια βροχής, έχουμε φαινόμενα πολλαπλής σκέδασης (multiple scattering α ≫ 1). Η θεωρία του Mie το 1908, κατέδειξε την πλήρη ασυμμετρία που υπάρχει ανάμεσα στην εμπρόσθια σκέδαση (forward scattering) και την οπισθοσκέδαση (backscattering). Συγκεκριμένα, για σωματίδια με διάμετρο Dp > λ υπερτερεί η εμπρόσθια σκέδαση. Τέλος, η σκέδαση Mie αναφέρεται τόσο σε σφαιρικά, όσο και σε μη σφαιρικά αιωρούμενα σωματίδια (Van de Hulst, 1981, Bohren et al., 1981, Mischenko et al., 1999)

Εάν Fo (W m^{-2}) είναι η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στα αερολύματα, τότε η σκεδαζόμενη ενέργεια Fscat (W) δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$F_{scat} = C_{scat} \times F_0$$

όπου, $C_{scat}(m^2)$ η ενεργός διατομή απλής σκέδασης από τα αερολύματα (single-particle scattering cross section)

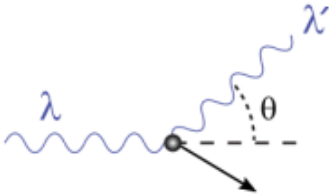
Η ένταση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας από τα σωματίδια αυτά κατανέμεται στον χώρο ανάλογα με τις διαστάσεις (δηλ. την τιμή του συντελεστή α) και το σχήμα των αερολυμάτων. Εάν το σωματίδιο είναι ισότροπο (σφαιρική συμμετρία), η κατανομή της έντασης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας στο χώρο είναι συμμετρική, με άξονα συμμετρίας τη διεύθυνση του κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Στην περίπτωση μη πολωμένου φωτός εισάγουμε τον συντελεστή αποπόλωσης δ (depolarization), όπου $\delta = \frac{P_\perp}{P_\parallel}$, όπου $P_\perp$ και $P_\parallel$ είναι η ένταση του οπισθοσκεδαζόμενου φωτός στις κάθετες και παράλληλες πολώσεις που είναι κάθετες μεταξύ τους (Van de Hulst, 1981). Τυπικές τιμές του δ κυμαίνονται από 0.02 έως 0.3. Αντίστοιχα, μια πολωμένη δέσμη laser αποπολώνεται όταν σκεδασθεί από παγοκρυστάλλους, υδροσταγονίδια νεφών ή συμπυκνωμένα νανοσωματίδια υδρατμών σε ύψος 80-86 km (Baumgarten et al., 2002). Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η απορρόφηση από τα αιωρούμενα σωματίδια προκαλείται μόνο από εκείνα που έχουν μη μηδενικό φανταστικό δείκτη διάθλασης k. Έτσι, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του k τόσο ισχυρότερη είναι και η απορρόφηση από τα αιωρούμενα σωματίδια.

1.4.3 Ανελαστική σκέδαση Raman

Εκτός από τις ελαστικές σκεδάσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, η ακτινοβολία laser σκεδάζεται και ανελαστικά από τα μόρια της ατμόσφαιρας (π.χ. N_2, O_2, O_3, H_2O). Όπως, προαναφέρθηκε, στην ελαστική σκέδαση η συχνότητα του σκεδαζόμενου φωτονίου ν_s είναι

ίδια με την προσπίπτουσα συχνότητα της ακτινοβολίας ν_i. Το μόριο σε αυτή την περίπτωση διατηρεί την (περιστροφική και ταλαντωτική) κβαντική του κατάσταση. Αντίθετα, η ανελαστική σκέδαση οδηγεί στην αλλαγή της κβαντικής κατάστασης του μορίου και τη μεταβολή της συχνότητας του σκεδαζόμενου φωτονίου κατά $\Delta\nu$.



Εικόνα 1.4.2: Αρχή λειτουργίας της ανελαστικής σκέδασης Raman (Williams, 1977)

.

Θεωρούμε ένα μόριο που ακτινοβολείται από ακτινοβολία μήκους κύματος λ, τότε αυτό θα απορροφήσει ενέργεια και θα διεγερθεί σε μια ανώτερη ενεργειακά κατάσταση, η ενέργεια του παραγόμενου φωτονίου μειώνεται και γίνεται:

$$\nu^{'} = \nu - \Delta\nu \tag{1.5}$$

Αυτού του τύπου η σκέδαση ονομάζεται σκέδαση Stokes. Σε περίπτωση που το μόριο αποδιεγερθεί μεταφέροντας ενέργεια στο φωτόνιο, η τελική συχνότητα του φωτονίου είναι μεγαλύτερη από την προσπίπτουσα:

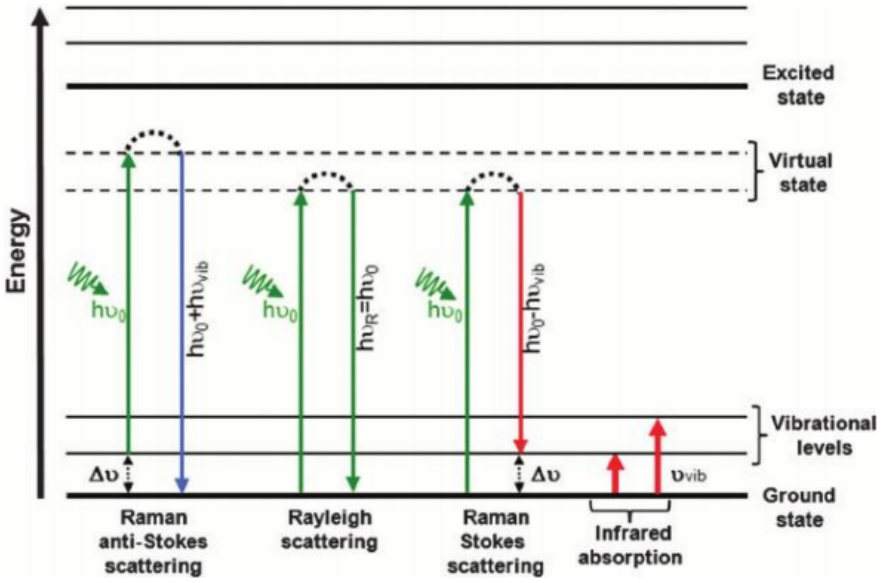
$$\nu^{'} = \nu + \Delta\nu \tag{1.6}$$

και η διαδικασία ονομάζεται σκέδαση anti-Stokes.

Η μεταβολή της συχνότητας είναι:

$$\Delta\nu = \nu_i - \nu_s = \frac{\Delta E}{hc} \tag{1.7}$$

όπου ΔΕ είναι η διαφορά των ενεργειακών επιπέδων του μελετούμενου μορίου, είναι χαρακτηριστική του καθενός μορίου, και συνεπώς προσφέρει ένα τρόπο ¨ταυτοποίησης' των μορίων μέσω του μήκους κύματος της ακτινοβολίας που σκεδάζουν (Εικόνα 1.4.3).



Εικόνα 1.4.3: Ενεργειακό διάγραμμα που δείχνει μεταβάσεις που εμπλέκονται κατά τη διάρκεια της απορρόφησης υπερύθρων, σκέδαση Rayleigh, Raman, Stokes και anti-Stokes (Baker et al., 2016).

Αυτό το διάγραμμα Jablonski δείχνει ότι οι ίδιες δονητικές καταστάσεις ενός δεδομένου μορίου μπορούν να ανιχνευθούν μέσω δύο διαφορετικών οδών. Η μία μετρά άμεσα την απόλυτη συχνότητα (απορρόφηση IR) και η άλλη μετρά τη σχετική συχνότητα ή μετατόπιση Raman (Stokes και anti-Stokes). $h\nu_0$ η προσπίπτουσα ενέργεια laser, $h\nu_{vib}$ δονητική ενέργεια, $h\nu_R$ μετατόπιση Raman, ν_{vir} συχνότητες δόνησης.

Στα διατομικά μόρια (πχ. όπως το N_2) είναι εύκολη η θεωρητική εξέταση των ταλαντωτικών – περιστροφικών επιπέδων του μορίου και η κίνησή τους μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά από ένα ελεύθερα περιστρεφόμενο αρμονικό ταλαντωτή. Για αυτό το σύστημα τα ταλαντωτικά επίπεδα δίνονται από τη σχέση:

$$E_{vib,u} = hc\nu_{vib}(u + \frac{1}{2}), u = 0, 1, 2, ... \tag{1.8}$$

όπου ν_{vib} είναι η συχνότητα ταλάντωσης του μορίου και u ο ταλαντωτικός κβαντικός αριθμός.

Η ενέργεια του περιστροφικού μορίου δίνεται από τη σχέση:

$$E_{rotJ,u} = hc[B_u J(J+1) - D_u J^2(J+1)^2], J = 0, 1, 2, ... \tag{1.9}$$

όπου J είναι ο περιστροφικός κβαντικός αριθμός και τα B_u και D_u είναι σταθερές της περιστροφής και της ταλαντωτικής παραμόρφωσης, αντίστοιχα. Οι δύο τελευταίες σταθερές εξαρτώνται από τη συγκεκριμένη ταλαντωτική κατάσταση u του μορίου. Ο όρος D_u έχει μικρή συνεισφορά στην ενέργεια, ενώ αποκτά σημασία για μεγάλες τιμές του J.

Για να υπολογίσουμε τις παρατηρούμενες ενέργειες του ταλαντωτικού – περιστροφικού φάσματος ενός μορίου πρέπει να λάβουμε υπόψη μας τους κανόνες επιλογής:

$$\Delta u = 0, \pm 1 \tag{1.10}$$

και

$$\Delta J = 0, \pm 2 \tag{1.11}$$

Οι μεταβάσεις με αντιστοιχούν στις σκεδάσεις Rayleigh. Οι μεταβάσεις με οδηγούν στις σκεδάσεις Stokes ενώ αυτές με στις σκεδάσεις anti-Stokes. Οι μεταβάσεις με οδηγούν σε πολύ μικρή αλλαγή συχνότητας που δεν έχει εφαρμογές σε συστήματα lidar, καθώς αντιστοιχούν στον κλάδο Q του φάσματος. Για έχουμε αντίστοιχα τους κλάδους S και Q.

Η ένταση των παρατηρούμενων συχνοτήτων από τη σκέδαση Raman είναι ανάλογη της ενεργού διατομής της συγκεκριμένης σκέδασης η οποία προκύπτει ως το γινόμενο της πιθανότητας μετάβασης από την αρχική στην τελική κατάσταση και της πυκνότητας καταστάσεων της αρχικής κατάστασης. Συγκεκριμένα, μας ενδιαφέρει η διαφορική ενεργός διατομή για σκέδαση στις 180° ως προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία (περίπτωση οπισθοσκέδασης).

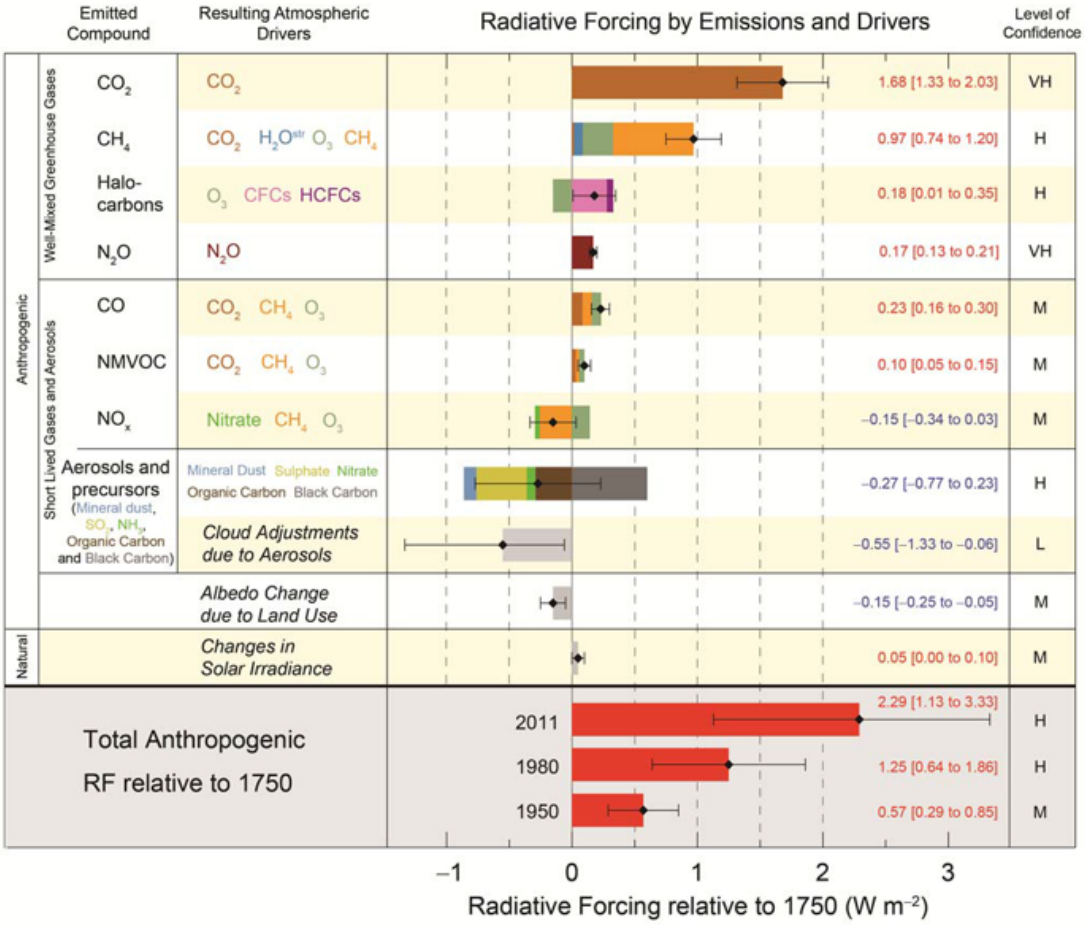
1.5 Επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων στο γήινο κλίμα

1.5.1 Ορισμός της κλιματικής αλλαγής

Συχνά, ο όρος "κλιματική αλλαγή' ταυτίζεται με την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της επιφάνειας της γης. Όμως, κλιματική αλλαγή δεν είναι μόνο αυτή η αλλαγή, αλλά ένα σύνολο παρατηρήσημων αλλαγών (United States Environmental Protection Agency, 2016).

Πιο συγκεκριμένα, κλιματική αλλαγή είναι η αργή αλλά σταθερή μεταβολή του γήινου κλίματος, τόσο μέσω των φυσικών όσο και των ανθρωπογενών επιδράσεων. Η παγκόσμια

κλιματική αλλαγή (ΠΚΑ) είναι αποτέλεσμα της πολύπλοκης αλληλεπίδρασης εκατοντάδων μεταβλητών που χαρακτηρίζουν από τη μία την κύρια πηγή ενέργειας, δηλαδή την ηλιακή ακτινοβολία και από την άλλη ένα μεγάλο αριθμό αιωρούμενων σωματιδίων που έχουμε ήδη προαναφέρει. Οποιαδήποτε επέμβαση του ανθρώπου στους παράγοντες που διαμορφώνουν το κλίμα μπορεί να οδηγήσει στην αλλαγή του. Η αύξηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, μέσω της αύξησης της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου και των αιωρούμενων σωματιδίων, η επέκταση της τρύπας του όζοντος και η συστηματική καταστροφή των τροπικών δασών, είναι κάποιοι από τους παράγοντες που συντελούν στην ΠΚΑ καθώς διαταράσσουν το ενεργειακό ισοζύγιο της ατμόσφαιρας. Τα τελευταία χρόνια, πληθαίνουν οι ενδείξεις ότι οι ανθρωπογενείς εκπομπές ρυπογόνων ουσιών στην ατμόσφαιρα ωθούν το κλίμα σε μια νέα κατάσταση αστάθειας (IPCC, 2016).



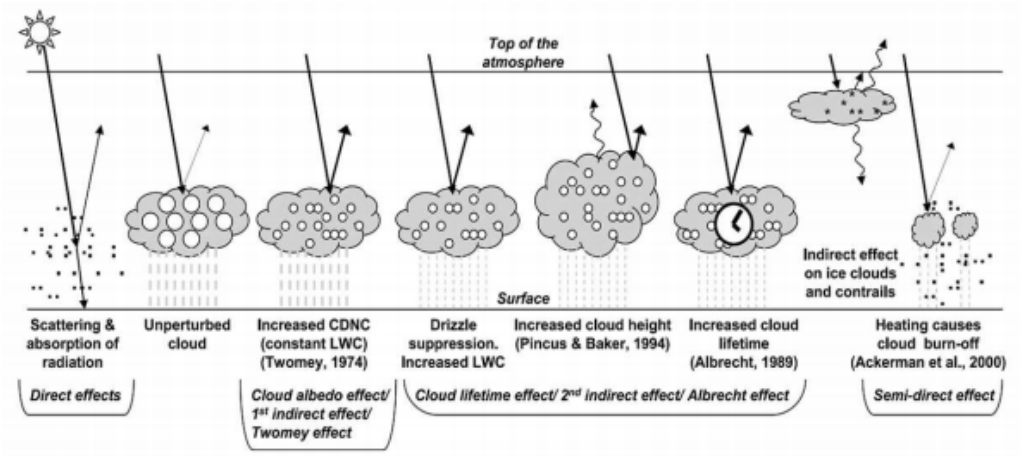
Εικόνα 1.5.1: Μέση Παγκόσμια κατακράτηση ακτινοβολίας (Wm^{-2}) για τα σημαντικότερα αιωρούμενα σωματίδια (IPCC, 2014).

Το φαινόμενο της ΠΚΑ οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην αύξηση της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου. Τα κύρια θερμοκηπικά αέρια είναι τα εξής: οι υδρατμοί (H_2O),

το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) , το όζον (O_3), το μεθάνιο (CH_4), το οξείδιο του αζώτου (N_2O), και οι χλωροφθοράνθρακες (CFC). Τα αέρια αυτά προέρχονται τόσο από φυσικές όσο και από ανθρωπογενείς πηγές (εκτός από τους CFC). Στην Εικόνα 2.5.1 παρουσιάζεται η μέση κατακράτηση ακτινοβολίας (σε Wm^{-2}) που προκαλείται από αυτά τα βασικότερα αέρια του φαινομένου του θερμοκηπίου, με βάση το έτος αναφοράς 1750 (πριν την βιομηχανική επανάσταση) σε σύγκριση με το έτος 2011.

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι ένα γεωφυσικό φαινόμενο, το οποίο είναι υπεύθυνο για τη διατήρηση κατάλληλων συνθηκών ζωής στον πλανήτη, , χάρη στο οποίο η μέση θερμοκρασία της γης διατηρείται στους 15^oC. Τα αέρια του θερμοκηπίου επιτρέπουν την διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας προς τη γη, ενώ αντίθετα απορροφούν και επανεκπέμπουν προς το έδαφος μέρος της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπει η γη.

Εκτός από τα αέρια του θερμοκηπίου που επηρεάζουν τη ροή της γήινης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, στην ατμόσφαιρα σχηματίζονται και τα νέφη τα οποία παρεμβάλλονται τόσο στη ροή της ηλιακής όσο και της γήινης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Επιπλέον, επηρεάζουν σημαντικά το ισοζύγιο ενέργειας, αφού καλύπτουν κατά μέσο όρο το 60% της επιφάνειας της γης.



Εικόνα 1.5.2: Σχηματικό διάγραμμα της επίδρασης των αιωρούμενων σωματιδίων στο γήινο κλίμα, μέσω του άμεσου, έμμεσου και ημιάμεσου τρόπου (IPCC, 2007).

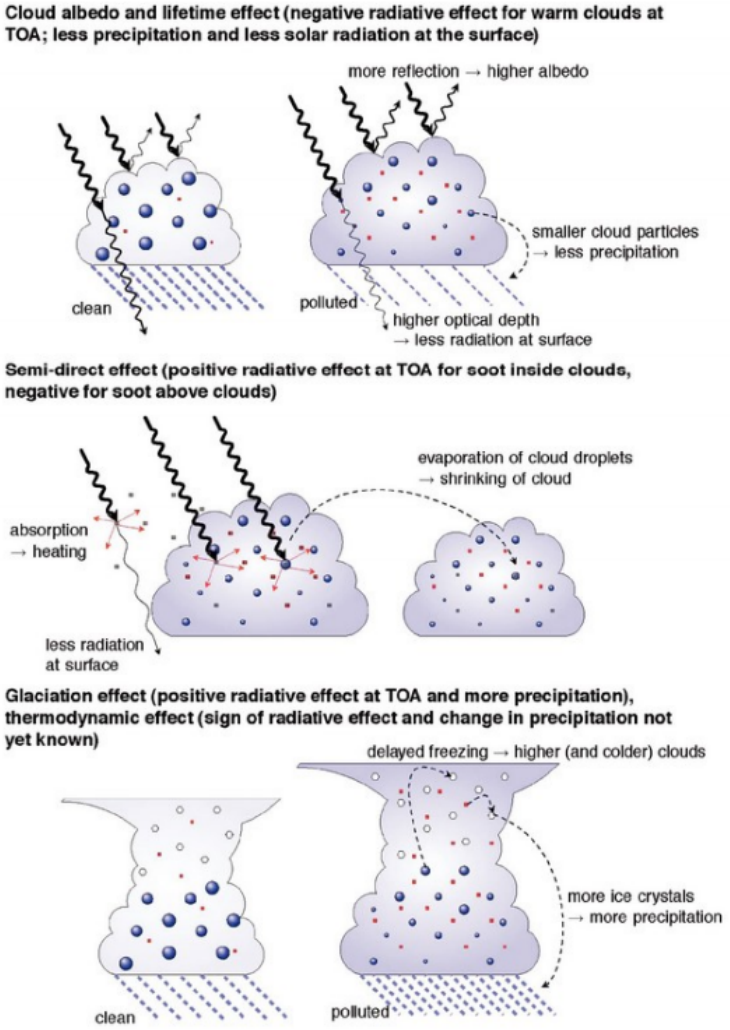
Αρχικά, τα νέφη ανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία, οπότε μειώνουν τη συνολική ενέργεια που εισέρχεται στο σύστημα γης-ατμόσφαιρας. Επιπλέον, όπως και τα αέρια του θερμοκηπίου, απορροφούν και επανεκπέμπουν υπέρυθρη ακτινοβολία που λαμβάνουν από την επιφάνεια της γης ή παγιδεύουν ενέργεια στο σύστημα γης-ατμόσφαιρας. Ποιο φαινόμενο από τα δύο υπερισχύει εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως είναι το

μέγεθος και η συγκέντρωση των σταγονιδίων που σχηματίζουν το νέφος, από το αν το νέφος αποτελείται από υγρά σταγονίδια ή παγοκρυστάλλους, από την θερμοκρασία του δηλ., από το ύψος στο οποίο βρίσκεται στην ατμόσφαιρα και από το πάχος του. Πιο συγκεκριμένα, τα χαμηλά νέφη (σε ύψος μικρότερο από 2-3 km από την επιφάνεια της γης) πυκνά νέφη λειτουργούν περισσότερο ως ανακλαστήρες της ηλιακής ακτινοβολία, οπότε ψύχουν τοπικά την ατμόσφαιρα. Ενώ, τα ψηλά (σε ύψος μεγαλύτερο των 5 km από την επιφάνεια της γης) λεπτά νέφη, λειτουργούν περισσότερο ως παγίδες θερμικής ενέργειας και συνεισφέρουν στην τοπική θέρμανση.

Τα αιωρούμενα σωματίδια επιδρούν στην ΠΚΑ, με τρεις τρόπους: **(i)** τον άμεσο, **(ii)** τον έμμεσο και τον **(iii)** ημι-άμεσο τρόπο. Άμεση επίδραση (direct effect) στην παγκόσμια κλιματική αλλαγή έχουμε λόγω της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων με την ηλιακή ακτινοβολία, λόγω απορρόφησης ή σκέδασης της ηλιακής/γήινης ακτινοβολίας. Έμμεση επίδραση (indirect effect) έχουμε λόγω μεταβολής της διάταξης των υδροσταγονιδίων κατά τον σχηματισμό νεφών εξαιτίας της παρουσίας αιωρούμενων σωματιδίων και ημιάμεση επίδραση (semi-direct effect) έχουμε όταν μεταβάλλεται ο μηχανισμός δημιουργίας των νεφών (Ackerman et al., 2000; Koren et al., 2004).

1.5.2 Φαινόμενο άμεσης επίδρασης

Τα αιωρούμενα σωματίδια αλληλεπιδρούν με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, μέσω των διαδικασιών σκέδασης και απορρόφησης. Το γεγονός αυτό, διαταράσσει το ενεργειακό ισοζύγιο της γης, δηλαδή την ισορροπία μεταξύ της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με την εκπεμπόμενη γήινη ακτινοβολία. Όταν διαταράσσεται το ενεργειακό ισοζύγιο προκαλείται αλλαγή στις κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στην γη μέχρι να επιτευχθεί ξανά ισορροπία. Με αυτό τον τρόπο λοιπόν, μέσω σκέδασης και απορρόφησης, τα σωματίδια εμποδίζουν άμεσα την ηλιακή ακτινοβολία να φτάσει στην επιφάνεια της γης. Αυτός ο τρόπος ονομάζεται άμεση επίδραση των σωματιδίων στο γήινο κλίμα. Τα σωματίδια που σκεδάζουν την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία επανεκπέμπουν μέρος της στο διάστημα οπότε έχουμε τοπική ψύξη της ατμόσφαιρας. Από την άλλη πλευρά, τα σωματίδια που απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία, λειτουργούν όπως τα αέρια του θερμοκηπίου και συμβάλλουν στην αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της γης. Ο βαθμός που τα αιωρούμενα σωματίδια επηρεάζουν την κλιματική αλλαγή εξαρτάται από το σχήμα, το μέγεθος και την χημική σύστασή τους, καθώς και από τη ζενίθεια γωνία του ήλιου (SZA).



Εικόνα 1.5.3: Σχηματικό διάγραμμα του φαινόμενου αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα (IPCC, 2007).

1.5.3 Φαινόμενο έμμεσης επίδρασης

Η έμμεση επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων στην αλλαγή του κλίματος της γης, σχετίζεται με την επίδραση των αερολυμάτων στις μικροφυσικές ιδιότητες των νεφών, μεταβάλλοντας την ανακλαστικότητα των νεφών ή αλλάζοντας την εσωτερική δομή των νεφών καθυστερώντας το σχηματισμό υδροσταγονιδίων με συνέπεια την μείωση της συχνότητας των βροχοπτώσεων. Η έμμεση επίδραση είναι πολύπλοκη και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων και των υδρατμών στην ατμόσφαιρα, καθώς και η ανακλαστική ικανότητα των νεφών.

Τα αιωρούμενα σωματίδια λειτουργούν ως πυρήνες συμπύκνωσης των υδρατμών (Cloud Condensation Nuclei: CCN), αυξάνοντας την ανακλαστικότητα των νεφών, δηλαδή την

λευκαύγεια των νεφών (albedo), με συνέπεια η ηλιακή και η γήινη ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω σε αυτά, να σκεδάζεται πολλαπλά, επηρεάζοντας έτσι το ενεργειακό ισοζύγιο της γης. Η αύξηση της συγκέντρωσης των πυρήνων συμπύκνωσης των υδρατμών (CCN) σε συνδυασμό με την ύπαρξη υγρασίας οδηγεί σε νέφη με μεγαλύτερη συγκέντρωση υδροσταγονιδίων που έχουν όμως μικρότερη ακτίνα. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε μείωση της πιθανότητας βροχόπτωσης ενός νέφους. Ο χρόνος παραμονής των θερμών νεφών στην τροπόσφαιρα παρατείνεται και ο ρυθμός βροχοπτώσεων ελαττώνεται, παρόλο που υπάρχει αρκετό ποσοστό υδρατμών στην ατμόσφαιρα για την δημιουργία βροχής (Seinfeld et al., 2006; Russo, 2007).

1.5.4 Φαινόμενο ημιάμεσης επίδρασης

Τα αερολύματα που περιέχουν αιθάλη και ορυκτή σκόνη μπορούν να προκαλέσουν αυξημένη αδιαβατική θέρμανση της ατμόσφαιρας και να επιτείνουν την εξάτμιση των υδρατμών στα νέφη (Ackerman et al., 2000; Koren et al., 2004).

1.6 Επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στο περιβάλλον

Μετά την αύξηση της αστικοποίησης, τα αερομεταφερόμενα σωματίδια έχουν γίνει ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την αστική ατμοσφαιρική ρύπανση. Καθώς η παγκόσμια οικονομική ανάπτυξη αυξάνεται, η ρύπανση του περιβάλλοντος γίνεται ολοένα και πιο σοβαρή. Είναι γνωστό ότι η φυσική και η χημική σύσταση και τα οπτικά χαρακτηριστικά των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων σχετίζονται στενά με τις ομοιογενείς και ετερογενείς φάσεις χημικών αντιδράσεων, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα μια σειρά περιβαλλοντικών προβλημάτων, όπως υποβάθμιση της ποιότητας του αέρα, καταστροφή της στιβάδας του όζοντος, σχηματισμός όξινης βροχής και ατυχήματα που σχετίζονται με την ομίχλη και τον καπνό.

Η ατμοσφαιρική ρύπανση των αερολυμάτων μπορεί να είναι σοβαρή και υπήρξε αύξηση των σοβαρών ατυχημάτων που οφείλονται στη ρύπανση των αερολυμάτων (Dockery et al., 1993; Schichtel et al., 2001). Τα αερολύματα στον ρυπασμένο αστικό αέρα συνήθως περιέχουν πολλές πολύπλοκες οργανικές χημικές ουσίες, όπως πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC), πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAHs) και άλλες τοξικές και καρκινογόνες χημικές ουσίες. (Cheng et al., 2007; Bi et al., 2005; Fang et al., 2005; Hong et al., 2007; De Kok et al., 2006; Miyazaki et al., 2009; Mastral et al., 2003; Uchimiya et al., 2008; Wang et al., 2007; Wingfors et al., 2001; Xie et al., 2009; Yassa et al., 2001). Με την εισπνοή τα σωματίδια εισέρχονται στις πνευμονικές κυψελίδες και

αεραγωγούς όπου εγκλωβίζονται λόγω του μικρού μεγέθους και των φυσικοχημικών τους ιδιοτήτων (Katsouyanni et al., 1994).

Εικόνα 1.6.1: Φωτοχημικό νέφος στην ατμόσφαιρα της Αθήνας στις 21/6/16 (Energy In, https://energyin.gr).

Η σκόνη είναι ένας άλλος σημαντικός τύπος αερολύματος που επηρεάζει το περιβάλλον. Κατά την ατμοσφαιρική κυκλοφορία, σωματίδια σκόνης μπορούν να μεταφερθούν σε πυκνοκατοικημένες περιοχές και ωκεανούς χιλιάδες χιλιόμετρα από την πηγή, επηρεάζοντας το φυσικό περιβάλλον του ανθρώπου (Cheng et al., 2008; Zhang et al., 2005). Είναι ευρέως γνωστό ότι η ατμοσφαιρική σκόνη μπορεί να εξουδετερώσει την όξινη βροχή και να επηρεάσει τη φωτοχημική οξείδωση και τα ωκεάνια περιβάλλοντα (Jickells et al., 2005).

1.7 Επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στην υγεία

Τα αιωρούμενα σωματίδια είναι διαισθητικά ατμοσφαιρικά ιχνοστοιχεία που μπορούν να ανιχνευθούν από τις αισθήσεις, παρεμβαίνουν στο οπτικό πεδίο και είναι επιβλαβή για τα αναπνευστικά συστήματα των ζώων και των ανθρώπων (Dockery et al., 1993; Garshick et al., 2008; Ramon et al., 2006; Pope, 2000; Schichtel et al., 2001; Schwartz et al., 1996; Tsai et al., 2003; Tsai et al., 1999; Wilson et al., 1997).

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO) ανακοίνωσε ότι η κακή ποιότητα του αέρα μπορεί να προκαλέσει άσθμα, εγκεφαλικό επεισόδιο, καρδιακές παθήσεις και επιπλοκές κατά την εγκυμοσύνη (Kelly et al., 2015; Mannucci et al., 2017; Bove et al., 2019) . Επιπλέον, υπάρχουν ενδείξεις ότι η βραχυπρόθεσμη έκθεση στην ατμοσφαιρική ρύπανση συμβάλλει στην επιδείνωση της ψυχικής υγείας στα παιδιά (Ritz et al., 2008). Επιπλέον, έχει ήδη επιβεβαιωθεί ότι σωματίδια που έχουν διεισδύσει στην αναπνευστική οδό (Deepthi et al., 2019) αλληλεπιδρούν μεταξύ τους για να επηρεάσουν τα κύτταρα του αίματος καθώς και τα εγκεφαλικά κύτταρα (Sah et al., 2019; Liu et al., 2015).

Επιπλέον, πολύ λίγα πράγματα είναι γνωστά σχετικά με την επίδραση της ποιότητας του αέρα σε αλλεργικές ασθένειες. Τις τελευταίες δεκαετίες, παρατηρήθηκε αύξηση των κρουσμάτων αλλεργιών, σε βιομηχανικές χώρες. Ως κυριότεροι λόγοι θεωρούνται οι αυξημένες συγκεντρώσεις υπέρλεπτων σωματιδίων, ενώσεις οξειδίων του αζώτου και όζοντος. Η κυρίαρχη ομάδα αλλεργιών προέρχεται από μόρια πρωτεϊνών, τα οποία και αποτελούν το 5% των σωματιδίων σε αστικές περιοχές. Αυτά δεν συναντώνται μόνο στην κατηγορία των γιγαντιαίων σωματιδίων όπως η γύρη με Dp > 10 mm, αλλά και στην κατηγορία των λεπτών σωματιδίων, όπως μικροοργανισμοί, λεπτή γύρη, και μίξη πρωτεϊνών από σταγόνες βροχής με σωματίδια σκόνης από το δρόμο (Bernstein et al., 2004).

Λόγω της επικινδυνότητας των αιωρούμενων σωματιδίων για τον άνθρωπο, η Ευρωπαϊκή Ένωση θέσπισε μια σειρά από μέτρα τα οποία πρέπει να τηρούνται ώστε να προστατεύεται η ανθρώπινη υγεία.

Όριο εκτίμησης	**Μέσος όρος 24 ωρών** PM_{10}	**Μέσος ετήσιος όρος** PM_{10}	**Μέσος ετήσιος όρος** $PM_{2.5}$
Ανώτερο όριο εκτίμησης	70% της οριακής τιμής (35 $\mu g/m^3$, δεν πρέπει να υπερβαίνεται περισσότερο από 35 φορές σε ένα έτος)	70% της οριακής τιμής (28 $\mu g/m^3$)	70% της οριακής τιμής (17$\mu g/m^3$).
Κατώτερο όριο εκτίμησης	50% της οριακής τιμής (25 $\mu g/m^3$, δεν πρέπει να υπερβαίνεται περισσότερο από 35 φορές σε ένα έτος)	50% της οριακής τιμής (20 $\mu g/m^3$)	50% της οριακής τιμής (12 $\mu g/m^3$)

(*) Το ανώτερο όριο εκτίμησης και το κατώτερο όριο εκτίμησης για τα $PM_{2.5}$ δεν ισχύουν για τις μετρήσεις για την εκτίμηση της συμμόρφωσης προς το στόχο της μείωσης της έκθεσης σε σωματίδια $PM_{2.5}$, που αποσκοπεί στην προστασία της ανθρώπινης υγείας.

Πίνακας 1.7.1: Καθορισμός των απαιτήσεων για την εκτίμηση των συγκεντρώσεων σωματιδίων PM_{10} και $PM_{2.5}$, στον ατμοσφαιρικό αέρα εντός ζώνης ή οικισμού (Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council).

Επινοήθηκε, λοιπόν, ο Δείκτης Ποιότητας του Αέρα (Air Quality Index: AQI) για να δίνει ένα μέτρο της ποιότητας του αέρα που αναπνέουμε σε συνδυασμό πάντα με τις άμεσες επιπτώσεις για την υγεία. Η Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος υπολογίζει τον AQI για τους πέντε σημαντικότερους ρύπους (τροποσφαιρικό όζον, διοξείδιο του θείου, διοξείδιο του αζώτου και μονοξείδιο του άνθρακα) μεταξύ αυτών είναι και τα αιωρούμενα σωματίδια. Σύμφωνα μάλιστα με την τελευταία Οδηγία που δημοσιεύθηκε στην Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Οδηγία 2008/50/ΕΚ του Ευρωπαϊκού κοινοβουλίου και του συμβουλίου της 21ης Μαΐου 2008 για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη) τίθενται τα όρια - στα Κράτη Μέλη - για τα αιωρούμενα σωματίδια (PM) όπως φαίνονται στον Πίνακα 1.7.1.

Κεφάλαιο 2

Τεχνική lidar

2.1 Ιστορική αναδρομή

Η μέθοδος lidar προϋπήρχε από την δεκαετία του '30, όταν έγιναν οι πρώτες προσπάθειες μέτρησης του ύψους της ατμόσφαιρας μέσω της σάρωσης του οπτικού πεδίου ενός απομακρυσμένου τηλεσκοπίου κατά μήκος μιας συνεχής φωτεινής ακτινοβολίας. Το 1938 χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά παλμοί φωτός για τη μέτρηση των βασικών υψών των νεφών. Η γενιά αυτή, η οποία χρησιμοποιεί μια διάταξη με απομακρυσμένη τη φωτεινή δέσμη εκπομπής και το δέκτη - τηλεσκόπιο, αντικαθίσταται από τη γενιά επιστημόνων, οι οποίοι χρησιμοποιούν τον πομπό και το δέκτη τοποθετημένους έτσι ώστε η πληροφορία του ύψους να προκύπτει από τη μέτρηση του χρόνου επιστροφής μεταξύ του παλμού εκπομπής και του σήματος ανίχνευσης. Τα συγκεκριμένα συστήματα lidar που χρησιμοποιούνται για αυτές τις τεχνικές μέτρησης, αναπτύχθηκαν αρχικά από τους Middleton και Spilahaus το 1953 (Middleton & Spilhaus, 1953).

Η χρήση της μεθόδου lidar για την καταγραφή της ατμοσφαιρικής ρύπανσης άρχισε να εφαρμόζεται από τα μέσα της δεκαετίας του '60 κυρίως στις ΗΠΑ, λίγο μετά την εφεύρεση του laser και του παλμικού, ή αλλιώς Q-switched laser (1962). Λίγο αργότερα, οι Fiocco και Smullin (1963) δημοσίευσαν εικόνες της ατμόσφαιρας χρησιμοποιώντας το laser ρουβινίου (ruby laser). Μέσα σε μια δεκαετία, όλες οι βασικές τεχνικές lidar είχαν ήδη διαμορφωθεί. Από εκείνη την εποχή, τα lidar γνώρισαν μεγάλη επιτυχία, η οποία συνδέεται με την πρόοδο της τεχνολογίας των laser. Οι διατάξεις που σχεδιάστηκαν και χρησιμοποιούν laser, σχεδιάστηκαν κυρίως για lidar και ικανοποιούν μεγάλες απαιτήσεις συγκεκριμένων τεχνικών όσον αφορά της δύναμη του laser, τα μήκη κύματος, το πλάτος των παλμών, τη μορφή της δέσμης και τη φασματική ευκρίνεια.

Όσον αφορά την ατμόσφαιρα, μετά την ανάπτυξη των laser και των φωτοανιχνευτών, πολλοί τύποι συστημάτων lidar χρησιμοποιήθηκαν επανηλειμμένως για να μελετήσουν την

γήινη ατμόσφαιρα και να ανιχνεύσουν διάφορα είδη αερολυμάτων (Koelsch, 1989), αλλά και μοριακών ρύπων όπως O_3 (Mégie et al., 1977; Pelon et al., 1982; Mégie et al., 1985; Ancellet et al., 1987), NO_2 (Ferm and Svanberg 1998; Svanberg et al., 1998), SO_2 (Ancellet et al., 1987; Ferm and Svanberg 1998; Svanberg et al., 1998), Hg (Svanberg et al., 1998; Sjoholm et al., 2004), και να μετρήσουν τις οπτικές ιδιότητες των αερολυμάτων, όπως το οπτικό βάθος, τους συντελεστές οπισθοσκέδασης και εξασθένησης, διάφορες μετρήσεις (Boesenberg, 1992; Kovalev et al., 2004).

Η τεχνική lidar έχει επίσης χρησιμοποιηθεί στην έρευνα ατμοσφαιρικών αναταράξεων και στην καταγραφή του ημερήσιου κύκλου του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος (Amiridis et al., 2007; Gross et al., 2011), συμπεριλαμβανόμενου και των μετρήσεων υδρατμών και όζοντος (Ancellet et al., 1989; Papayannis et al., 1990). Η μείωση του στρατοσφαιρικού όζοντος (Mégie et al., 1977) τεκμηριώνεται ολικά, με την τεχνική lidar. Επίσης η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται στον διαχωρισμό νεφών με βάση το σχηματισμό τους από υδροσταγονίδια ή από παγοκρυστάλλους (Sassen et al., 1977). Με την τεχνική lidar έχει επίσης μελετηθεί η διαταραχή στην στρατόσφαιρα μετά από ηφαιστειακή δράση, καθώς επίσης η ηπειρωτική μετακίνηση ρυπασμένων αερίων μαζών, σκόνης από έρημους και ο καπνός από δασικές πυρκαγιές (Tesche et al., 2008; Gross et al., 2011). Στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας (μεσόσφαιρα), η τεχνική lidar έχει αποδείξει την ύπαρξη μεταλλικών ατόμων και ιόντων (Garnier at al., 1989).

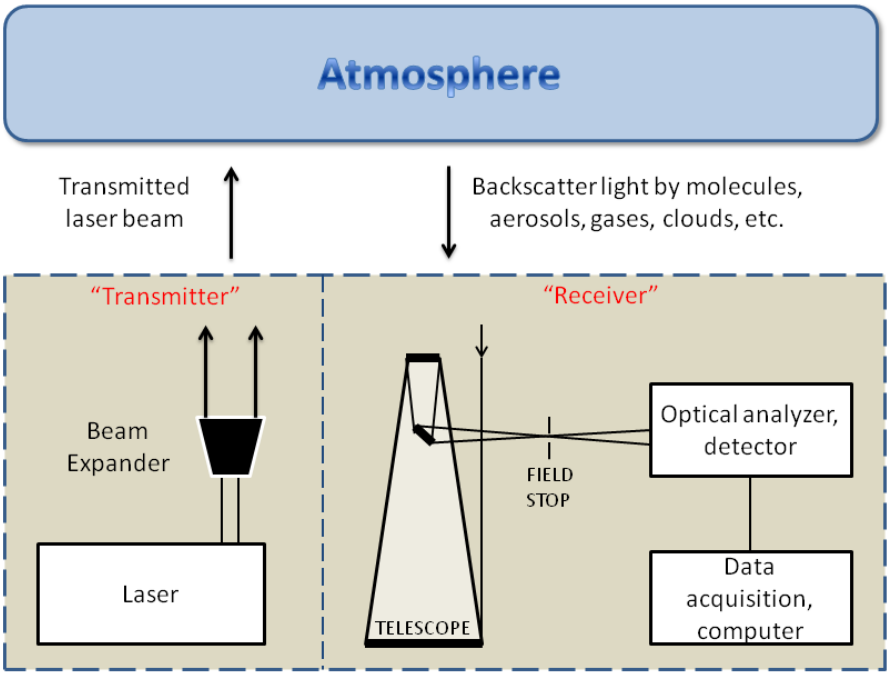
Η ίδρυση του Ευρωπαϊκού Δικτύου EARLINET (European Aerosol Lidar Network), (Boesenberg, 2003) επέτρεψε τη δημιουργία μιας πολυετούς κλιματολογικής βάσης δεδομεών της κατακόρυφης κατανομής των οπτικών ιδιοτήτων των αερολυμάτων στην Ευρωπαϊκή ήπειρο. Από την ίδρυση του δικτύου EARLINET και μετά, περισσότερες από 20.000 κατακόρυφες κατανομές των οπτικών ιδιοτήτων των αερολυμάτων ελήφθησαν κάτω από ποικίλες μετεωρολογικές συνθήκες, όσον αφορά την τοπική αλλά και τη μεγάλης εμβέλειας μεταφορά αερολυμάτων στην τροπόσφαιρα, περιλαμβάνοντας και τη μεταφορά της σκόνης που προέρχεται από την έρημο Σαχάρα και εξαπλώνεται στην ατμόσφαιρα της Ευρώπης αλλά και την ηφαιστειακή δράση του ηφαιστείου Etna στην Σικελία το 2005 και του ηφαιστείου Eyjafjallajökull της Ισλανδίας το 2010 (Papayannis, 2010).

Τέλος, τα συστήματα lidar μπορεί να είναι επίγεια, αερομεταφερόμενα, ή τοποθετημένα πάνω σε δορυφόρους, ικανά να πραγματοποιούν ολικές παρατηρήσεις των συστατικών της ατμόσφαιρας από το διάστημα (Winker et al., 2003).

2.2 Αρχή λειτουργίας και περιγραφή της τεχνικής lidar

Η τεχνική τηλεπισκόπησης με χρήση ακτινοβολίας laser, έχει καθιερωθεί διεθνώς ως μια αποτελεσματική και αξιόπιστη μέθοδος μελέτης και παρακολούθησης των βασικότερων χαρακτηριστικών της ατμόσφαιρας. Λόγω της υψηλής χωρικής και χρονικής ακρίβειας των μετρήσεων, η τεχνική lidar αποτελεί μια πολύ ισχυρή και πρωτοποριακή μέθοδο παρατήρησης της μεταβολής των σημαντικότερων μετεωρολογικών και ατμοσφαιρικών παραμέτρων καθ' ύψος, από την επιφάνεια του εδάφους έως περίπου τα 10-20 km.

Η τεχνική lidar βασίζεται στην εκπομπή παλμικής ακτινοβολίας laser στην ατμόσφαιρα και ακολούθως, στην καταγραφή οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας laser. Η ατμόσφαιρα, η οποία αποτελείται από άτομα, μόρια, αιωρούμενα σωματίδια, προκαλεί εξασθένηση της διερχόμενης ακτινοβολίας laser. Η σκεδαζόμενη ακτινοβολία συλλέγεται από ένα οπτικό τηλεσκόπιο και οδηγείται στο σύστημα λήψης και καταγραφής σημάτων lidar (Weitkamp, 2005). Η τεχνική lidar, αναλύοντας οπισθοσκεδαζόμενα σήματα που προέρχονται από την αλληλεπίδραση των συστατικών της ατμόσφαιρας με την ακτινοβολία laser, είναι ικανή να καθορίσει την κατακόρυφη κατανομή των κυριότερων ρύπων και συστατικών της ατμόσφαιρας με μεγάλη χωρική ($\sim$ 3.75-7.5 m) και χρονική ακρίβεια (10-30 s).



Εικόνα 2.2.1: Τυπική διάταξη ενός συστήματος lidar (Weitkamp, 2005).

Το σύστημα lidar αποτελείται από ένα πομπό και από ένα δέκτη. Βραχείς παλμοί φωτός με διάρκεια παλμού από μερικά fs έως μερικές δεκάδες ns και συγκεκριμένου φασματικού εύρους, παράγονται από ένα σύστημα laser. Κύρια κριτήρια επιλογής της παλμικής πηγής laser είναι η μεγάλη ισχύς κορυφής, το στενό φασματικό εύρος ζώνης και η μικρή απόκλιση της δέσμης. Πολλά συστήματα lidar χρησιμοποιούν μια μονάδα διαστολής της διαμέτρου της δέσμης (beam expander), η οποία μειώνει την απόκλιση της πριν αυτή σταλεί στην ατμόσφαιρα. Ο δέκτης αποτελείται από ένα τηλεσκόπιο που συλλέγει τα οπισθοσκεδαζόμενα από την ατμόσφαιρα φωτόνια. Συνήθως, ακολουθείται από ένα σύστημα οπτικής ανάλυσης το οποίο διαχωρίζει, φασματικά, τα λαμβανόμενα σήματα σε διάφορα μήκη κύματος ή καταστάσεις πόλωσης. Ακολούθως, η συλλεγόμενη ακτινοβολία οδηγείται σε ένα ανιχνευτή όπου το ανιχνευόμενο οπτικό σήμα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό με τη χρήση φωτοπολλαπλασιαστών: PMT ή φωτοδιόδου χιονοστιβάδας: APD. Ακολουθεί ένα σύστημα ψηφιοποίησης των ηλεκτρικών σημάτων, και τέλος, ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής χρησιμοποιείται για την αποθήκευση και την επεξεργασία των λαμβανόμενων δεδομένων.

Ένας παλμός laser ισχύος μερικών MW ή TW κατευθύνεται μέσω κατόπτρων στην ατμόσφαιρα. Συνήθως, ένα μικρό μέρος αυτού του παλμού ($\sim 1\%$) λαμβάνεται ως δείγμα για να καθορίσει τα εξής:

- το χρόνο αρχής της μέτρησης (ορισμός μηδενικού χρόνου t_o)
- το σήμα αναφοράς, το οποίο με το σήμα επιστροφής μπορούν να κανονικοποιηθούν και να δώσουν μια τιμή για την ενέργεια εξόδου, διότι, η εκπεμπόμενη ενέργεια της δέσμης laser μεταβάλλεται χρονικά
- τον έλεγχο του μήκους κύματος του laser στην περίπτωση χρήσης μεταβλητού μήκους κύματος

Η εξίσωση lidar δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$P(\lambda, z) = P_o(\lambda) \cdot (\frac{c\tau}{2}) \cdot \beta(\lambda, z) \cdot A \cdot \eta(\lambda) \cdot O(\lambda) \cdot z^{-2} e^{-2\tau(\lambda,0,z)} \tag{2.1}$$

Όπου P(λ,z) είναι ο αριθμός των ανιχνευόμενων φωτονίων στο μήκος κύματος λ και από απόσταση z, $P_o(\lambda)$ είναι ο αριθμός των εκπεμπόμενων φωτονίων στο μήκος κύματος λ, A είναι η επιφάνεια λήψης του οπτικού τηλεσκοπίου, η(λ) είναι ο συντελεστής οπτοηλεκτρονικής απόδοσης του συστήματος lidar, c η ταχύτητα του φωτός στο κενό, τ η διάρκεια του παλμού του συστήματος laser, O(λ) ο γεωμετρικός συντελεστής επικάλυψης του συστήματος lidar στην απόσταση z, β(λ,z) ο συντελεστής οπισθοσκέδασης της

ατμόσφαιρας και τ(λ,0,z) το οπτικό πάχος της ατμόσφαιρας από τα αιωρούμενα σωματίδια (aer), τα μόρια (mol) ή άλλα συστατικά (c) της ατμόσφαιρας.

$$\beta(\lambda, z) = \beta_{aer}(\lambda, z) + \beta_{mol}(\lambda, z) \tag{2.2}$$

$$\tau(\lambda, 0, z) = \int_0^z [\alpha_{mol}(\lambda, z') + \alpha_{aer}(\lambda, z') + \alpha_c(\lambda, z')]dz' \tag{2.3}$$

Τέλος, $\Delta z = \frac{c\tau}{2}$ είναι η χωρική ακρίβεια μέτρησης του συστήματος lidar.

2.3 Τεχνικές τηλεπισκόπησης lidar

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές lidar για την τηλεπισκόπηση ατμοσφαιρικών παραμέτρων, οι οποίες βασίζονται σε διαφορετικές αλληλεπιδράσεις της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας και των διάφορων συστατικών υπό μελέτη ατμόσφαιρας. Έτσι, υπάρχουν διατάξεις lidar που βασίζονται στη σκέδαση της ακτινοβολίας laser από τα ατμοσφαιρικά μόρια (σκέδαση Rayleigh), στη σκέδαση από τα αερολύματα (σκέδαση Mie), στη σκέδαση Raman, στη σκέδαση συντονισμού, στο φθορισμό, στην απορρόφηση, καθώς και στη διαφορετική σκέδαση/ απορρόφηση από τα μόρια και τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας. Μια σύντομη περιγραφή των παραπάνω οπτικών αλληλεπιδράσεων της ακτινοβολίας laser, παρουσιάζεται παρακάτω:

- *Σκέδαση Rayleigh*: Η ακτινοβολία laser σκεδάζεται ελαστικά από άτομα ή μόρια, χωρίς αλλαγή στο μήκος κύματος της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας.
- *Σκέδαση Mie*: Η ακτινοβολία laser σκεδάζεται ελαστικά από μικρά σωματίδια ή αιωρήματα (συγκρίσιμου μεγέθους με το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας), χωρίς αλλαγή στο μήκος κύματος της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας
- *Σκέδαση Raman*: Η ακτινοβολία laser σκεδάζεται ανελαστικά από τα μόρια με μετατόπιση στο μήκος κύματος της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας.
- *Σκέδαση συντονισμού*: Η συχνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας laser συμπίπτει με τη συχνότητα συγκεκριμένης ενεργειακής μετάπτωσης του ατόμου, διεγείρεται, και κατόπιν σκεδάζει το αποδιεγειρόμενο, χωρίς μετατόπιση στο μήκος κύματος.
- *Φθορισμός*: Η συχνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας laser συμπίπτει με τη συχνότητα συγκεκριμένης ενεργειακής μετάπτωσης του ατόμου, απορροφάται μερικώς και κατόπιν επανεκπέμπεται σε μεγαλύτερο μήκος κύματος.

- *Απορρόφηση*: Η δέσμη της ακτινοβολίας laser εξασθενεί, λόγω σύμπτωσης του μήκους κύματος με ζώνη απορρόφησης του εν λόγω μορίου.

- *Διαφορική σκέδαση και απορρόφηση (DIAL)*: Η διαφορική εξασθένιση δύο ακτινών laser, όπως προκύπτει από τα οπισθοσκεδαζόμενα σήματα, όταν η συχνότητα της μίας ακτίνας συμπίπτει με τη συχνότητα γνωστής μοριακής μετάπτωσης, ενώ η συχνότητα της άλλης είναι ακριβώς μετά ή πριν από αυτή τη χαρακτηριστική συχνότητα.

2.3.1 Τεχνική lidar ελαστικής οπισθοσκέδασης

Το lidar οπισθοσκέδασης αποτελείται από δύο μέρη, έναν πομπό και έναν δέκτη ακτινοβολίας. Η πηγή ακτινοβολίας ενός συστήματος lidar οπισθοσκέδασης είναι ένα laser παλμικής συνήθως λειτουργίας. Η εκπεμπόμενη ενέργεια ανά παλμό πρέπει να είναι αρκετή για να αντισταθμίσει τυχόν απώλειες λόγω απορρόφησης ή διασποράς της ακτινοβολίας και να εξασφαλίσει ότι το σήμα που επιστρέφει είναι αρκετά ισχυρό για να ανιχνευθεί. Τυπικές τιμές της εκπεμπόμενης ενέργειας είναι (0.2-0.6) j/ παλμό, με μήκος κύματος λ=532 nm. Το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας εξαρτάται από το είδος των ατμοσφαιρικών συστατικών που θέλουμε να ανιχνεύσουμε και κυμαίνεται από το υπεριώδες (0.28 μm) έως το μέσο υπέρυθρο (12 μm). 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. Ένα σημαντικό σημείο είναι το φασματικό εύρος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας laser που πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο. Αυτό εξασφαλίζει ακτινοβολία υψηλής μονοχρωματικότητας και κατα συνέπεια μεγάλη ακρίβεια και ευαισθησία στις λαμβανόμενες μετρήσεις.

Η εξίσωση οπισθοσκέδασης lidar για μονοχρωματική δέσμη laser μήκους κύματος λ, που εκπέμπεται κατακόρυφα και σε ατμοσφαιρική περιοχή στην οποία λαμβάνει χώρα αποκλειστικά μεμονωμένη ελαστική σκέδαση, δίνεται από την εξίσωση:

$$P(z,\lambda) = \frac{E \cdot n(\lambda)}{z^2} \cdot O(z,\lambda) \cdot \beta(z,\lambda) \cdot exp[-2\int_0^{z'} \alpha(z,\lambda)dz] \tag{2.4}$$

όπου P(z, λ) η στιγμιαία ισχύς της δέσμης laser που ανιχνεύεται στον χρόνο t από απόσταση z, β(z, λ) ο χωρικός συντελεστής οπισθοσκέδασης, α(z, λ) ο χωρικός συντελεστής εξασθένησης. Ο όρος E αντιστοιχεί στην εκπεμπόμενη ισχύ του παλμού του laser. Ο όρος n(λ) περιέχει παραμέτρους που αφορούν την διάταξη lidar και περιγράφουν την απόδοση των οπτικών και ανιχνευτικών διατάξεων στο μήκος κύματος ανίχνευσης λ.

Ο όρος O(z, λ), εκφράζει την συνάρτηση πλήρους επικάλυψης της διάταξης στον οπτικό δρόμο καταγραφής του μήκους κύματος λ.

Στην εξίσωση (2.4), στην περιοχή πλήρους επικάλυψης της δέσμης του laser και του οπτικού πεδίου του τηλεσκοπίου, ο όρος O(z, λ) λαμβάνει την τιμή της μονάδας.

Όπου P(λ,z) είναι ο αριθμός των ανιχνευόμενων φωτονίων στο μήκος κύματος λ και από απόσταση z, P_o(λ) είναι ο αριθμός των εκπεμπόμενων φωτονίων στο μήκος κύματος λ, A είναι η επιφάνεια λήψης του οπτικού τηλεσκοπίου, η(λ) είναι ο συντελεστής οπτοηλεκτρονικής απόδοσης του συστήματος lidar, c η ταχύτητα του φωτός στο κενό, τ η διάρκεια του παλμού του συστήματος laser, η(λ) ο γεωμετρικός συντελεστής ανακλαστικότητας του οπτικού τηλεσκοπίου, O(λ) ο γεωμετρικός συντελεστής επικάλυψης του συστήματος lidar στην απόσταση z, β(λ,z) ο συντελεστής οπισθοσκέδασης της ατμόσφαιρας και τ(λ,0,z) το οπτικό πάχος της ατμόσφαιρας από τα αιωρούμενα σωματίδια (aer), τα μόρια (mol) ή άλλα συστατικά (c) της ατμόσφαιρας.

2.3.2 Μέθοδος Klett

Είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο ότι η εξίσωση οπισθοσκέδασης lidar για μονοχρωματική δέσμη laser μήκους κύματος λ, που εκπέμπεται κατακόρυφα και σε ατμοσφαιρική περιοχή στην οποία λαμβάνει χώρα αποκλειστικά μεμονωμένη ελαστική σκέδαση, δίνεται από την εξίσωση 2.4. Η εξίσωση αυτή μπορεί να αναδιαμορφωθεί στο διορθωμένο σήμα lidar με την απόσταση (range-corrected lidar signal) S(R), σύμφωνα με την εξίσωση 2.5 :

$$S(R) = P(R,\lambda)R^2 = E{\cdot}n{\cdot}O(R)\beta(R)[\beta_{par}(R)+\beta_{mol}(R)]{\cdot}exp\left(-2\int_0^R(\alpha_{aer}(r)+\alpha_{mol}(r))dr\right) \tag{2.5}$$

Οι μοριακοί συντελεστές εξασθένησης και οπισθοσκέδασης μπορούν να καθοριστούν με τη μέθοδο της ραδιοβόλισης είτε προσεγγιστικά μέσω συντελεστών ατμοσφαιρικών μοντέλων της περιοχής. Οπότε απομένει να προσδιορίσουμε τις τιμές των $\beta_{mol}(R)$ και $\alpha_{aer}(R)$.

Εν συνεχεία, ο σωματιδιακός λόγος lidar δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$L_{aer}(R) = \frac{\alpha_{par}(R)}{\beta_{aer}(R)} \tag{2.6}$$

Ενώ, ο μοριακός λόγος lidar δίνεται από την εξίσωση:

$$L_{mol}(R) = \frac{\alpha_{mol}(R)}{\beta_{mol}(R)} = \frac{8\pi}{3} sr \tag{2.7}$$

Σε αντίθεση με το μοριακό λόγο lidar, ο σωματιδιακός λόγος lidar εξαρτάται από την απόσταση R επειδή επηρεάζεται από την κατανομή, την συγκέντρωση, το μέγεθος, το σχήμα και την χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων και συχνά αναφερόμαστε σε αυτόν ως *λόγο lidar*.

Επιπλέον, εισάγουμε τον όρο:

$$Y(R) = L_{par}(R)(\beta_{par}(R) + \beta_{mol}(R)) \tag{2.8}$$

Από τις εξισώσεις (2.6), (2.7), (2.8) προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} S(R) \cdot L_{aer}(R) \cdot exp\left(-2\int_0^R (L_{aer}(r) + L_{mol}(r))\beta_{mol}(r)dr\right) = \\ E \cdot n \cdot Y(R) exp\left(-2\int_0^R Y(r)dr\right) \end{aligned} \tag{2.9}$$

Λογαριθμίζοντας και διαφορίζοντας ως προς την απόσταση R, την εξίσωση (2.9), έχουμε:

$$\frac{d\ln\left(S(R)L_{aer}(R)exp\left[-2\int_0^R (L_{aer}(r) + L_{mol}(r))\beta_{mol}(r)dr\right]\right)}{dR} = \frac{1}{Y(R)} \cdot \frac{dY(R)}{dR} - 2Y(R) \tag{2.10}$$

Η εξίσωση (2.10) που προέκυψε είναι μια εξίσωση Bernoulli και θα την επιλύσουμε χρησιμοποιώντας την οριακή συνθήκη:

$$Y(R_o) = L_{par}(R_o)(\beta_{par}(R_o) + \beta_{mol}(R_o)) \tag{2.11}$$

Επομένως, λαμβάνουμε λύση που περιλαμβάνει τους συντελεστές οπισθοσκέδασης:

$$\begin{aligned} \beta_{aer}(R) + \beta_{mol}(R) = \\ = \frac{S(R)exp\left(-2\int_{R_0}^R (L_{aer}(r) - L_{mol}(r))\beta_{mol}(r)dr\right)}{\frac{S(R_o)}{\beta_{par}(R_o)+\beta_{mol}(R_o)} - 2\int_{R_o}^R L_{aer}(r)S(r)exp\left(-2\int_{R_0}^r (L_{aer}(r') - L_{mol}(r'))\beta_{mol}(r')dr'\right)dr} \end{aligned} \tag{2.12}$$

Το ύψος αναφοράς R_0 επιλέγεται έτσι ώστε η σκέδαση από τα αιωρούμενα σωματίδια να είναι αμελητέα σε σχέση με τη σκέδαση από την μοριακή ατμόσφαιρα (απουσία

αιωρούμενων σωματιδίων). Τέτοιες συνθήκες συνήθως προσφέρονται στην ανώτερη τροπόσφαιρα (περίπου 7-10 km ύψος).

2.3.3 Τεχνική lidar ανελαστικής οπισθοσκέδασης (Raman lidar)

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 μη ελαστική σκέδαση Raman (ανελαστική σκέδαση) από τα μοριακά συστατικά της ατμόσφαιρας λόγω των ενεργειακών 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 συστήματα laser μεγαλύτερης ισχύος συγκριτικά με άλλα συστήματα lidar, γιατί το οπτικό σήμα που επιστρέφει είναι εξαιρετικά ασθενές, λόγω της μικρής ενεργούς διατομής της σκέδασης Raman. Αξίζει να σημειωθεί ότι η σκέδαση Raman είναι τρείς τάξεις μεγέθους ασθενέστερη από την σκέδαση Rayleigh (Weitkamp, 2005).

Για την εφαρμογή της τεχνικής Raman, απαιτείται το σύστημα lidar να καταγράφει τόσο το επιστρεφόμενο σήμα λόγω της ελαστικής οπισθοσκέδασης από τα μόρια και τα σωματίδια της ατμόσφαιρας (Fernald et al., 1972), όσο και το αντίστοιχο σήμα εξαιτίας της ανελαστικής οπισθοσκέδασης από τα μόρια (Papayannis et al., 1990; Ansmann et al., 1992). Τα σήματα αυτά, περιγράφονται αντίστοιχα από τις παρακάτω εξισώσεις :

$$P(z,\lambda) = \frac{E \cdot n(\lambda)}{z^2} \cdot O(z,\lambda) \cdot \beta(z,\lambda) \cdot exp\left[-2\int_0^{z'} \alpha(z,\lambda)dz\right] \tag{2.13}$$

$$P(z,\lambda) = \frac{E \cdot n(\lambda_R)}{z^2} \cdot O(z,\lambda_R) \cdot \beta(z,\lambda_R) \cdot exp\left[-\int_0^{z'} \left(\alpha(z,\lambda) + \alpha(z,\lambda_R)\right) dz\right] \tag{2.14}$$

$$\beta_R(z,\lambda_R) = N_R(z) \cdot \frac{d\sigma_R}{d\Omega}(\pi,\lambda) \tag{2.15}$$

Οι περισσότεροι όροι των παραπάνω εξισώσεων έχουν επεξηγηθεί ήδη στην περιγραφή της εξίσωσης lidar σε ένα σύστημα οπισθοσκέδασης, στο μήκος κύματος λ. Ομοίως για την τεχνική Raman, στο μήκος κύματος λ_R. Ο όρος N_R(z) εκφράζει την κατακόρυφη κατανομή της αριθμητικής συγκέντρωσης του αζώτου και ο όρος dσN/dΩ, την ενεργό

διατομή της οπισθοσκέδασης Raman της ανιχνευόμενης ακτινοβολίας στα 387 nm και στα 607 nm, όταν αντίστοιχα εκπέμπονται ακτινοβολίες στα 355 και 532 nm.

Για την επίλυση της εξίσωσης πρέπει να υποθέσουμε μια σχέση μεταξύ των συντελεστών εξασθένησης των σωματιδίων για τα μήκη κύματος των 355 και 387 nm και μια για τα μήκη κύματος 532 και 607 nm, μέσω του εκθέτη Ångström στη θέση z (Εξίσωση 2.16) και στη συνέχεια λύνουμε ως προς το συντελεστή εξασθένησης των σωματιδίων στο εκπεμπόμενο μήκος κύματος και λαμβάνουμε την εξίσωση 2.17 (Ansmann et al., 1990):

$$\frac{\alpha_{aer}(z,\lambda)}{\alpha_{aer}(z,\lambda_R)} = \left(\frac{\lambda_R}{\lambda}\right)^{A(z)} \tag{2.16}$$

$$\alpha_{aer}(z,\lambda) = \frac{\frac{d}{dz}\left(ln\left(\frac{N_R(z)}{P(z,\lambda_R)z^2}\right)\right) - \alpha_{mol}(r,\lambda) - \alpha_{mol}(r,\lambda_R)}{1+\left(\frac{\lambda}{\lambda_R}\right)^{A(z)}} \tag{2.17}$$

Ο συντελεστής οπισθοσκέδασης για τα αιωρούμενα σωματίδια, μπορεί να υπολογιστεί με την χρήση των ελαστικά και ανελαστικά οπισθοσκεδαζόμενων σημάτων lidar στα 355-532 nm και 387-607 nm, αντίστοιχα. Εάν θεωρήσουμε τον 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_o, στην ατμόσφαιρα, μπορούμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή οπισθοσκέδασης στο μήκος κύματος εκπομπής, σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση (εξίσωση 2.18) (Ansmann et al., 1990):

$$\beta_{par}(\lambda,z) = -\beta_{mol}(\lambda,z) + [\beta_{aer}(\lambda,z_o) + \beta_{mol}(\lambda,z_o)]\times$$
$$\frac{P(\lambda_R,z_o)\cdot P(\lambda,z)\cdot N_R(z)}{P(\lambda,z_o)\cdot P(\lambda_R,z)\cdot N_R(z_o)} \times \frac{exp\left(-\int_{z_0}^{z}\left[\alpha_{aer}(\lambda_R,z)+\alpha_{mol}(\lambda_R,z)\right]dz\right)}{exp\left(-\int_{z_0}^{z}\left[\alpha_{aer}(z,\lambda)+\alpha_{mol}(z,\lambda)\right]dz\right)} \tag{2.18}$$

Για την επίλυση της εξίσωσης 2.15, απαιτείται να θεωρήσουμε τον συντελεστή οπισθοσκέδασης για τα σωματίδια σε ένα ύψος αναφοράς z_o. Αυτό γίνεται όπως και στην περίπτωση επίλυσης της εξίσωσης lidar ελαστικής οπισθοσκέδασης, όπου θεωρούμε τον συντελεστή οπισθοσκέδασης αερολυμάτων σε μια περιοχή στην ελεύθερη τροπόσφαιρα τέτοια ώστε βmol $\gg$ βaer. Στην ίδια χωρική περιοχή αντίστοιχα, υπολογίζονται οι μέσοι όροι των λόγων των σημάτων lidar που χρησιμοποιούνται στην εξίσωση 2.14, $(P(\lambda_R,z_o)/P(\lambda,z_o))$, για την αποφυγή του θορύβου που εισάγεται όταν το ύψος αναφοράς ορίζεται σε ένα μόνο σημείο.

2.3.4 Τεχνική lidar αποπόλωσης

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η οπισθοσκέδαση από σφαιρικά σωματίδια διατηρεί την κατάσταση πόλωσης της προσπίπτουσας πολωμένης δέσμης φωτός. Η τεχνική πόλωσης lidar χρησιμοποιεί αυτήν την ιδιότητα χρησιμοποιώντας μια πηγή laser που δημιουργεί μια γραμμικά πολωμένη φωτεινή δέσμη και έναν δέκτη με την ικανότητα διάκρισης μεταξύ των δύο συστατικών του οπισθοσκεδαζόμενου φωτός: την παράλληλη $P_\perp$ και την κάθετη συνιστώσα $P_\parallel$ πόλωσης, σε σχέση πάντα με το αρχικό επίπεδο πόλωσης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας laser.

Ο διαχωρισμός του σήματος επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας έναν πολωτικό διαχωριστή δέσμης, (Polarized Beam Splitter Cube - PBSC) ο οποίος διαχωρίζει την παράλληλα πολωμένη συνιστώσα του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος από την κάθετη (Sassen et al., 2000). Ο βαθμονομημένος λόγος των δύο αυτών συνιστωσών ονομάζεται *λόγος αποπόλωσης*. Οι μετρήσεις του λόγου αποπόλωσης μας δίνουν πληροφορίες σχετικά με το σχήμα ή/και την θερμοδυναμική φάση των αιωρούμενων σωματιδίων και των νεφών (Sassen et al., 1991). Η ίδια τεχνική χρησιμοποιείται επίσης στην μελέτη του σχήματος σωματιδίων ερημικής σκόνης στην ελεύθερη τροπόσφαιρα, πάνω από το ύψος του ΑΟΣ (Murayama et al., 2001; Tesche et al., 2008; Freudenthaler et al., 2009; Gross et al., 2011).

Επομένως, για το lidar αποπόλωσης, η εξίσωση lidar πρέπει να χωριστεί σε δύο εξισώσεις.

Για την παράλληλη συνιστώσα πόλωσης, ισχύει η εξίσωση:

$$P_\parallel(R,\lambda) = \frac{E(\lambda)\cdot n_\parallel\cdot(\lambda)\cdot O_\parallel(R,\lambda)}{R^2}\beta_\parallel(R,\lambda)exp\left(-2\int_0^R \alpha_\parallel(z,\lambda)dz\right) \tag{2.19}$$

Και για την κάθετη συνιστώσα πόλωσης, η ακόλουθη εξίσωση:

$$P_\perp(R,\lambda) = \frac{E(\lambda)\cdot n_\perp\cdot(\lambda)\cdot O_\perp(R,\lambda)}{R^2}\beta_\perp(R,\lambda)exp\left[-2\int_0^R \left(\alpha_\parallel(z,\lambda)+\alpha_\perp(z,\lambda)\right)dz\right] \tag{2.20}$$

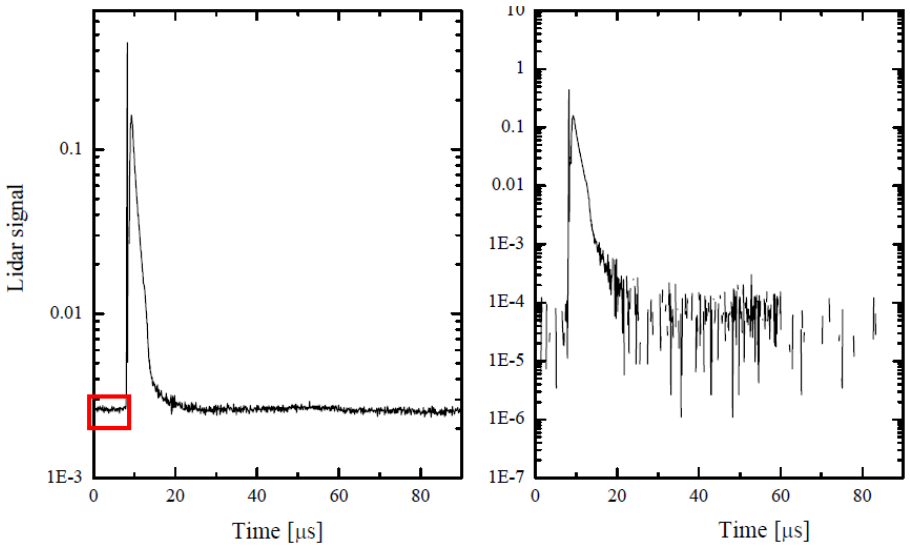
όπου $P_\perp$ και $P_\parallel$ είναι η ένταση του οπισθοσκεδαζόμενου φωτός στις κάθετες και παράλληλες πολώσεις που είναι κάθετες μεταξύ τους (van de Hust, 1981).

2.4 Επεξεργασία σημάτων και δεδομένων lidar

Η προ-επεξεργασία δεδομένων πραγματοποιείται πάντα πριν από την ανάκτηση των οπτικών ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων και διασφαλίζει ότι τα σήματα lidar διορθώνονται από κάθε πιθανή επίδραση των οργάνων. Η διαδικασία προεπεξεργασίας εκτελείται συστηματικά σε όλα τα ακατέργαστα σήματα με τη χρήση ειδικού λογισμικού. Όλα τα αναλογικά σήματα πρέπει να διορθώνονται αναφορικά με την καθυστέρηση ενεργοποίησης (trigger delay), το ατμοσφαιρικό υπόβαθρο (atmospheric background) και τον ηλεκτρονικό θόρυβο (electronic noise), ενώ τα σήματα μέτρησης φωτονίων πρέπει να διορθώνονται μόνο για την επίδραση νεκρού χρόνου (dead time).

2.4.1 Διορθώσεις αναλογικών σημάτων

Διόρθωση καθυστέρησης χρόνου καταγραφής: Η μονάδα απόκτησης δεδομένων ενεργοποιείται από το σύστημα laser για να ξεκινήσει η καταγραφή του σήματος lidar. Μια καθυστέρηση μεταξύ του πραγματικού χρόνου του εξερχόμενου παλμού laser και του χρόνου κατά τον οποίο το σύστημα ψηφιοποίησης αρχίζει να καταγράφει το σήμα lidar ονομάζεται καθυστέρηση ενεργοποίησης και είναι μια συστηματική ηλεκτρονική καθυστέρηση.



Εικόνα 2.4.1: Αφαίρεση ατμοσφαιρικού υποβάθρου χρησιμοποιώντας την ενεργοποίησης (pre-trigger region) (D'Amico, 2008).

Η χρονική καθυστέρηση αυτή, αντιστοιχεί, τυπικά, σε 1-2 time bins, δηλ. σε 7.5-15 m και συνεπάγεται μια συστηματική μετατόπιση στις πύλες ατμοσφαιρικού εύρους η οποία

προκαλεί τελικά ένα συστηματικό σφάλμα στη διόρθωση εύρους του σήματος lidar. Το σφάλμα αυτό, μπορεί να μεταδοθεί στον υπολογισμό των τελικών ιδιοτήτων του αιωρούμενου σωματιδίου. Το σφάλμα καθίσταται σημαντικό στην εκτίμηση του συντελεστή εξασθένησης αερολύματος με τη μέθοδο Raman στο κοντινό εύρος (D'Amico et al., 2016).

Διόρθωση ατμοσφαιρικού υποβάθρου: Σε ένα σύστημα lidar, το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα που ανιχνεύεται από το φωτοανιχνευτή είναι το άθροισμα της ελαστικά οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας $F_{elas,sig}$, της ελαστικά πολλαπλά σκεδαζόμενης ακτινοβολίας $F_{elas,mult}$ και της συνολικής ακτινοβολίας διαφορετικών μηκών κύματος που προέρχονται από την ανελαστική σκέδαση του εκπεμπόμενου παλμού, ΣF_{inelas} :

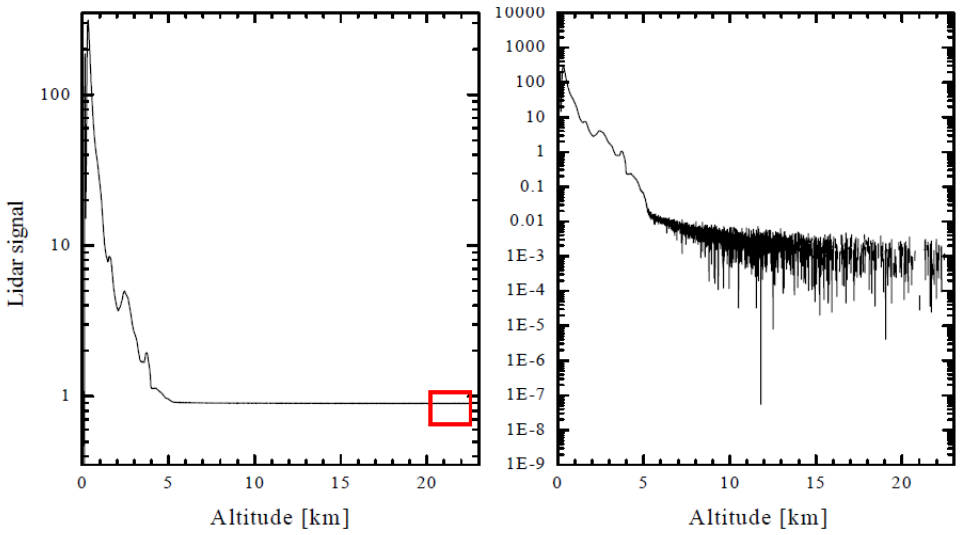
$$F_{bsc} = F_{elas,sig} + F_{elas,mult} + \Sigma F_{inelas} \tag{2.21}$$

Σε ένα σύστημα ελαστικής οπισθοσκέδασης lidar η πληροφορία που μας ενδιαφέρει αφορά τον όρο $F_{elas,sig}$, δηλ. εκείνον της απλής ελαστικής σκέδασης. Σε ένα σύστημα Raman lidar μας ενδιαφέρουν και οι όροι της μη ελαστικής σκέδασης.

Εκτός από αυτούς τους όρους, στο ανιχνευόμενο σήμα lidar συνυπάρχει και ένας όρος που οφείλεται στο ατοσφαιρικό υπόβαθρο, που είναι πολύ εντονότερος κατά την διάρκεια της ημέρας και οφείλεται στην ύπαρξη της ηλιακής ακτινοβολίας (F_{bgr}). Τελικά, η ολική ροή ακτινοβολίας που προσπίπτει στο φωτοανιχνευτή δίνεται από την εξίσωση:

$$F_{tot} = F_{bsc} + F_{bgr} \tag{2.22}$$

Για την εκτίμηση του ατμοσφαιρικού υποβάθρου, μετράται η ένταση του σήματος lidar σε μια περιοχή υψών όπου δεν αναμένεται οπισθοσκέδαση από την εκπεμπόμενη ακτινοβολία, λόγω της ολικής εξασθένησης των παλμών. Θεωρώντας ότι το σήμα που καταμετράται στον ανιχνευτή από τέτοιες περιοχές οφείλεται αποκλειστικά και μόνο στο ατμοσφαιρικό υπόβαθρο ίδιου μήκους κύματος με αυτό της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από το σύστημα lidar, μπορούμε τελικά να απομονώσουμε τον όρο της ελαστικής σκέδασης που μας ενδιαφέρει, αφαιρώντας τον από το ανιχνεύσιμο σήμα.



Εικόνα 2.4.2: Αφαίρεση ατμοσφαιρικού υποβάθρου χρησιμοποιώντας περιοχή μακρινής εμβέλειας (far-range region) (D'Amico, 2008).

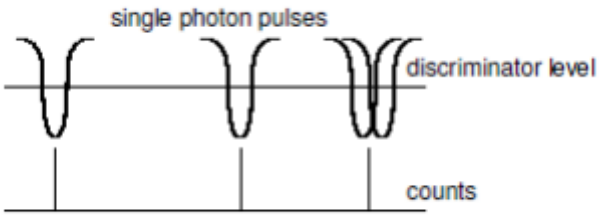
Διόρθωση ηλεκτρονικού θορύβου: Το ηλεκτρονικό υπόβαθρο σήματος προκύπτει από τι επιδράσεις των ηλεκτρονικών (ηλεκτρονικός θόρυβος) της ανίχνευσης σήματος και της μονάδας απόκτησης δεδομένων. Αυτές οι ηλεκτρονικές παραμορφώσεις αποτελούνται από ένα χρονικά σταθερό μέρος και ένα εξαρτώμενο από το εύρος ταλαντούμενο μέρος. Ορισμένος από τον τυχαίο ηλεκτρονικό θόρυβο φιλτράρεται από το τελικό προφίλ, ενσωματώνοντας αρκετά ακατέργασταση σήματα lidar. Ωστόσο, υπάρχει ένα άλλο στοιχείο του ηλεκτρονικού θορύβου που συγχρονίζεται με τον παλμό laser κατά τη συχνότητα επανάληψής του. Αυτό το στοιχείο αφαιρείται από το χρήσιμο σήμα μετά την αφαίρεση των λεγόμενων μηδενικών/σκοτεινών σημάτων. Αυτοί οι τύποι σημάτων καταγράφονται από τη μονάδα λήψης δεδομένων lidar όταν το τηλεσκόπιο λήψης καλύπτεται πλήρως με τέτοιο τρόπο ώστε το ατμοσφαιρικό φως να μην μπορεί να φθάσει στους φωτοπολλαπλασιαστές.

2.4.2 Διορθώσεις σημάτων καταμέτρησης φωτονίων

Διόρθωση νεκρού χρόνου: Σε οποιοδήποτε σύστημα ανιχνευτή, υπάρχει ένας ορισμένος χρόνος που απαιτείται για τη διάκριση και την επεξεργασία ενός μόνο φωτονίου. Εάν ένα δεύτερο φωτονίο φτάσει κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, δεν θα μετρηθεί. Ο ελάχιστος χρόνος που απαιτείται, για να μετρηθούν και οι δύο αφίξεις φωτονίων, αναφέρεται ως *νεκρός χρόνος*.

Λόγω της τυχαιότητας των ωρών άφιξης των φωτονίων, ορισμένα φωτόνια που έχουν οπισθοσκεδαστεί, δεν θα μετρηθούν. Απαιτείται διόρθωση νεκρού χρόνου για να ληφθούν υπόψη τα φωτόνια που φθάνουν κατά τη διάρκεια του χρόνου που απαιτείται για την καταγραφή της προηγούμενης άφιξης φωτονίων. Ο αριθμός των μη μετρούμενων φωτονίων

είναι σημαντικός σε μικρές αποστάσεις καθώς η οπισθοσκέδαση από τα κάτω ατμοσφαιρικά στρώματα είναι ισχυρή και οδηγεί το σύστημα σε κορεσμό (Kovalev et al., 2004).



Σχήμα 2.4.3: Αρχή λειτουργίας της καταμέτρησης φωτονίων.

Συνεπώς, για να αποφευχθεί αυτό το σημαντικό συστηματικό σφάλμα στην καταμέτρηση φωτονίων, πρέπει να υπολογισθεί η συνεισφορά του νεκρού χρόνου στα καταμετρούμενα φωτόνια N_{count}. Έτσι, εφαρμόζουμε στα δεδομένα το μετασχηματισμό διόρθωσης του νεκρού χρόνου τ_d:

$$N_{real} = \frac{N_{count}}{1 - N_{count}\tau_d} \tag{2.23}$$

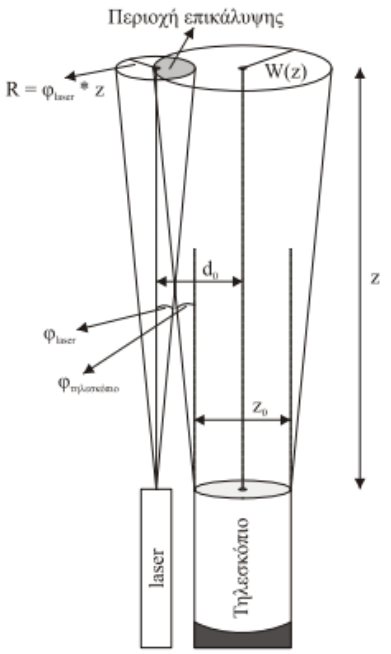
όπου N_{count} είναι ο αριθμός των φωτονίων που καταγράφηκαν, N_{real} ο αριθμός των πραγματικών φωτονίων που κατέφθασαν και τ_d είναι ο νεκρός χρόνος. Στην περίπτωσή μας ο νεκρός χρόνος είναι της τάξης των 3.7 ns (270 MHz).

2.4.3 Γεωμετρική οπτική επικάλυψη συστήματος lidar

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, παρατηρώντας και την εξίσωση lidar, ο συντελεστής γεωμετρικής επικάλυψης λαμβάνει τις τιμές μεταξύ 0 και 1 και δηλώνει την πιθανότητα η δέσμη laser να βρίσκεται εκτός ή πλήρως εντός του πεδίου όρασης του τηλεσκοπίου.

Η μη πλήρης επικάλυψη μεταξύ της δέσμης laser και του οπτικού πεδίου του τηλεσκοπίου λήψης έχει σημαντικές επιπτώσεις στην ανάκτηση δεδομένων από μετρήσεις lidar, κυρίως σε κοντινές αποστάσεις (τυπικά, μερικές δεκάδες έως εκατοντάδες μέτρα). Για μια ορθή ανάλυση και ερμηνεία των δεδομένων lidar κοντινού πεδίου, είναι απαραίτητο να γίνουν γεωμετρικές εκτιμήσεις και διορθώσεις των λαμβανόμενων σημάτων lidar που αφορούν την περιοχή της μη πλήρους επικάλυψης. Το πρόβλημα της μη πλήρους επικάλυψης που παρουσιάζεται στα διαξονικά συστήματα lidar και απεικονίζεται στην Εικόνα 2.4.4.

Αυτή είναι η ελάχιστη απόσταση πλήρους επικάλυψης όπου η συνάρτηση επικάλυψης O(R) ισούται με 1. Για να ελαχιστοποιηθεί η απόσταση της πλήρους επικάλυψης, η ακτίνα laser μεταδίδεται στην ατμόσφαιρα με μια μικρή γωνία κλίσης. Πάνω από αυτό το εύρος, η οπισθοσκεδαζόμενη ακτίνα φωτός καταγράφεται πλήρως από το τηλεσκόπιο του δέκτη. Ωστόσο, σε οποιοδήποτε χαμηλότερο υψόμετρο από το έδαφος σε αυτό το πλήρες εύρος επικαλύψεων, το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα επηρεάζεται από την ατελή λειτουργία επικάλυψης (δηλαδή, O(R) < 1).



Εικόνα 2.4.4: Επικάλυψη δέσμης laser με το οπτικό πεδίο του τηλεσκοπίου σε ένα διαξονικό σύστημα lidar (Mamouri, 2009).

Η απόσταση της πλήρους επικάλυψης μπορεί να καθοριστεί από ένα πακέτο προσομοίωσης ανίχνευσης ακτίνων λαμβάνοντας υπόψη τα γεωμετρικά και οπτικά χαρακτηριστικά των μονάδων πομπού και δέκτη (απόκλιση της δέσμης laser, το οπτικό πεδίο του τηλεσκοπίου, οι ιδιότητες απεικόνισης του συστήματος δέκτη και η απόσταση μεταξύ της δέσμης laser και του άξονα του τηλεσκοπίου). Αυτό ονομάζεται συνάρτηση θεωρητικής αλληλεπικάλυψης και έχει σχεδιαστεί για να επιτύχει το σύστημα. Η συνάρτηση επικάλυψης μπορεί να προσδιοριστεί από την παρακάτω έκφραση:

$$O(R,\lambda) = \begin{cases} \frac{1}{1+\frac{\beta_{aer,Raman}(R,\lambda)-\beta_{aer,Klett}(R,\lambda)}{\beta_{aer,Raman}(R,\lambda)+\beta_{mol}(R,\lambda)}} & \text{if} \quad R < R_{f.o} \\ 1 & \text{if} \quad R \geq R_{f.o} \end{cases} \tag{2.24}$$

Έπειτα από N επαναλήψεις, η τελική συνάρτηση επικάλυψης γράφεται ως εξής:

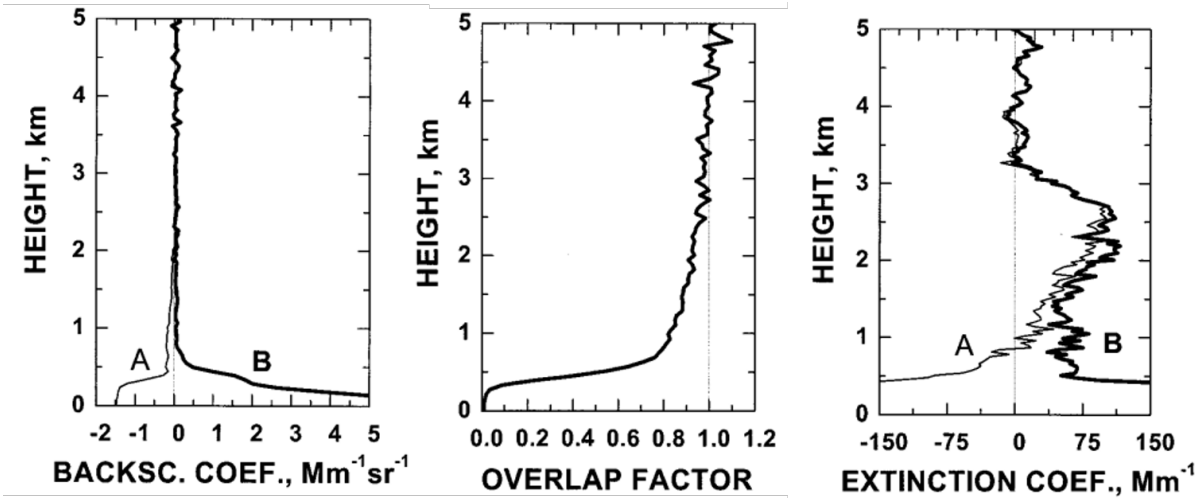
$$O'(R,\lambda) = \prod_{i=1}^{N} O'_i(R,\lambda) \tag{2.25}$$

Ωστόσο, συχνά η πειραματική λειτουργία αλληλεπικάλυψης μπορεί να διαφέρει σημαντικά από τη θεωρητική. Ο κύριος λόγος αυτής της ασυμφωνίας είναι τα προβλήματα ευθυγράμμισης συστημάτων.

Στην Εικόνα 2.4.5 (αριστερά) παρουσιάζεται η κατακόρυφη κατανομή το συντελεστή οπισθοσκέδασης για το μήκος κύματος 532 nm, η οποία ανακτήθηκε με την παράλληλη χρήση των μεθόδων Raman lidar και Klett. Η σύγκριση αυτών των δύο κατακόρυφων κατανομών αποδικνύει την λειτουργία επικάλυψης.

Στην Εικόνα 2.4.5 (μέση) παρουσιάζεται η κατακόρυφη κατανομή επικάλυψης όπως υπολογίστηκε από την εξίσωση 2.24. Παρατηρούμε ότι έχουμε πλήρη επικάλυψη στα 2.8, 2.9, 3.4, 3.7, 4.0, 4.5 km. Στην Εικόνα 2.4.5 (αριστερά), ο συντελεστής εξασθένησης Klett, β_{Klett} ισούται με τον συντελεστή εξασθένησης Raman, β_{Raman} εάν η κατακόρυφη κατανομή επικάλυψης της Εικόνας 2.4.1 (μέση) εφαρμοστεί στο υπολογισμένο σήμα του συντελεστή οπισθοσκέδασης.

Το αποτέλεσμα της διόρθωσης της επικάλυψης για τον προσδιορισμό του συντελεστή απορρόφησης του αερολύματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.4.5 (δεξιά). Ο συντελεστής απορρόφησης υπολογίστηκε με τη μέθοδο Raman lidar.



Εικόνα 2.4.5: (Αριστερά) Κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης όπως υπολογίσθηκε από την μέθοδο Klett (καμπύλη A) και από την μέθοδο Raman lidar (καμπύλη B). (Μέση) Κατακόρυφη κατανομή επικάλυψης. (Δεξιά) Κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή εξασθένησης όταν αγνοήσαμε την μη πλήρη επικάλυψη (καμπύλη A) και όταν την λάβαμε υπόψιν (καμπύλη B) (Wandinger and Ansmann, 2002).

Επιπλέον, στην Εικόνα 2.4.5 (δεξιά) φανερώνεται η αναγκαιότητα της διόρθωσης της επικάλυψης. Όπως είναι φανερό, οι μετρήσεις είναι άχρηστες για ύψη κάτω από τα περίπου 1500 m εάν αγνοηθεί το φαινόμενο επικάλυψης.

Η μέθοδος που παρουσιάζεται εδώ έχει δοκιμαστεί εκτενώς και έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε πειραματικά δεδομένα τόσο σε μετρήσεις του ΕΜΠ όσο και γενικότερα σε μετρήσεις που λαμβάνουν χώρα στην Ευρώπη. Ωστόσο, συχνά εμφανίζονται προβλήματα σε αποστάσεις μικρότερες των 1000 m, γεγονός που οφείλεται κυρίως στο ότι τα πραγματικά χαρακτηριστικά επικάλυψης διαφέρουν ελαφρώς από αυτά που υποθέσαμε για την ανάλυση δεδομένων και τα οποία προσδιορίστηκαν αρκετές ημέρες ή εβδομάδες πριν ή μετά την πραγματική παρατήρηση. Αυτό το φαινόμενο έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στα αποτελέσματα στις μικρότερες αποστάσεις, δηλαδή στα χαμηλότερα ύψη.

2.5 Υπολογισμός των οπτικών ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές αναφορές που αφορούν στην ανάλυση του ελαστικά και ανελαστικά οπισθοσκεδαζόμενου σήματος lidar με χρήση τεχνικών αντιστροφής σήματος. Από λεπτομερείς μελέτες συμπεραίνεται ότι ο καταλληλότερος αλγόριθμος επεξεργασίας για την περίπτωση της ελαστικής οπισθοσκέδασης είναι η αναλυτική αντιστροφή του σήματος κατά Klett και κατά Fernald, ενώ του ανελαστικά οπισθοσκεδαζόμενου είναι η τεχνική κατά Raman.

Αυτές οι μέθοδοι έχουν το μειονέκτημα να είναι πολύ ευαίσθητες στον ηλεκτρονικό θόρυβο του σήματος, αλλά από την άλλη πλευρά, πρόκειται για τις μοναδικές μεθόδους που δίνουν ακριβή μαθηματική λύση της εξίσωσης του lidar και τα σφάλματα που υπεισέρχονται από τις παραδοχές μπορούν να υπολογισθούν με ικανοποιητική ακρίβεια. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται οι μέθοδοι αναλυτικής αντιστροφής που εφαρμόζονται στην περίπτωσή μας.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν 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:

$$\alpha(\lambda, z) = \alpha_{aer}(\lambda, z) + \alpha_{mol}(\lambda, z) \tag{2.26}$$

$$\beta(\lambda, z) = \beta_{aer}(\lambda, z) + \beta_{mol}(\lambda, z) \tag{2.27}$$

2.5.1 Συντελεστές εξασθένησης και οπισθοσκέδασης των αιωρούμενων σωματιδίων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η μοριακή συνεισφορά στην εξασθένηση υπολογίζεται από το γινόμενο της ενεργούς διατομής εξασθένησης του μέσου ατμοσφαιρικού μορίου και της αριθμητικής συγκέντρωσης των μορίων στην ατμόσφαιρα. Στα 355 και 532 nm, η απορρόφηση από τα μόρια της ατμόσφαιρας θεωρείται αμελητέα και έτσι, η εξασθένηση της ακτινοβολίας οφείλεται, κυρίως, σε φαινόμενα μοριακής σκέδασης.

Όσον αφορά την ανάκτηση του συντελεστή εξασθένησης των αιωρούμενων σωματιδίων $\alpha_{aer}(\lambda, z)$, η μόνη αξιόπιστη τεχνική είναι η χρήση της διαφορικής εξίσωσης Raman, όπως προτάθηκε από τους Ansmann et al., (1992), σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\alpha_{aer}(z,\lambda) = \frac{\frac{d}{dz}\left(ln\left(\frac{N_R(z)}{P(z,\lambda_R)z^2}\right)\right) - \alpha_{mol}(r,\lambda) - \alpha_{mol}(r,\lambda_R)}{1+\left(\frac{\lambda}{\lambda_R}\right)^{A(z)}} \tag{2.28}$$

όπου A(z) είναι ο εκθέτης Ångström, ο οποίος ταυτίζεται με τον $AE_a(z, \frac{\lambda_1}{\lambda_2})$, όπως θα τον ορίσουμε στην παράγραφο 2.5.4.

Μετά την παραδοχή του σταθερού με το ύψος λόγου lidar, και για την περιοχή πλήρους επικάλυψης της δέσμης laser με το οπτικό πεδίο του τηλεσκοπίου, η εξίσωση lidar μπορεί να επιλυθεί ως προς τον συντελεστή οπισθοσκέδασης των αιωρουμένων σωματιδίων με μια επιπλέον παραδοχή που αφορά την σταθερά βαθμονόμησης του συστήματος. Συνήθως θεωρούμε μια περιοχή βαθμονόμησης του συντελεστή οπισθοσκέδασης των αιωρουμένων σωματιδίων στο λεγόμενο ύψος αναφοράς (z_o), που εξαρτάται από το SNR του κάθε συστήματος lidar. Στο ύψος αναφοράς, θεωρούμε ότι η ατμόσφαιρα είναι ελεύθερη από σωματίδια και η οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία προέρχεται μόνο από την συνεισφορά των ατμοσφαιρικών μορίων. Ο συντελεστής οπισθοσκέδασης επομένως μπορεί να υπολογισθεί από την εξίσωση:

$$\beta_{aer}(z,\lambda) = -\beta_{mol}(z,\lambda)$$
$$+\frac{P(z,\lambda)\cdot z^2\cdot exp[-2\cdot(s_{aer}-s_{mol})\cdot\int_{z_o}^{z}\beta_{mol}(\zeta,\lambda)d\zeta]}{\frac{P(z_o,\lambda)\cdot z_o^2}{\beta_{aer}(z_o)+\beta_{mol}(z_o)} - 2\cdot s_{aer}\cdot\int_{z_o}^{z}P(\zeta,\lambda)d\zeta\cdot\zeta^2\cdot exp[-2\cdot(s_{aer}-s_{mol})\cdot\int_{z_o}^{z}\beta_{mol}(z',\lambda)dz']d\zeta}$$

Οι περιορισμοί οφείλονται στο γεγονός ότι οι συντελεστές εξασθένησης και οπισθοσκέδασης των αιωρούμενων σωματιδίων, πρέπει να υπολογιστούν από μία και μόνο μετρούμενη ποσότητα, το ελαστικά οπισθοσκεδαζόμενο σήμα lidar.

Στην περίπτωση ενός συστήματος Raman lidar, όπως είδαμε και στην παράγραφο 2.3.3, ο συντελεστής οπισθοσκέδασης των αιωρούμενων σωματιδίων υπολογίζεται με τη χρήση των ελαστικά και ανελαστικά οπισθοσκεδαζόμενων σημάτων lidar στα 355-532 nm και 387-607 nm και αντίστοιχα, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\beta_{aer}(\lambda, z) = -\beta_{mol}(\lambda, z) + [\beta_{aer}(\lambda, z_o) + \beta_{mol}(\lambda, z_o)] \times \\ \frac{P(\lambda_R, z_o) \cdot P(\lambda, z) \cdot N_R(z)}{P(\lambda, z_o) \cdot P(\lambda_R, z) \cdot N_R(z_o)} \times \frac{exp\left(-\int_{z_0}^{z} [\alpha_{aer}(\lambda_R, z) + \alpha_{mol}(\lambda_R, z)]\, dz\right)}{exp\left(-\int_{z_0}^{z} [\alpha_{aer}(z, \lambda) + \alpha_{mol}(z, \lambda)]\, dz\right)} \tag{2.29}$$

2.5.2 Λόγος lidar των αιωρούμενων σωματιδίων

Υπάρχουν πολλές αναφορές που αφορούν στην ανάλυση του ελαστικά οπισθοσκεδαζόμενου σήματος lidar, με χρήση τεχνικών αντιστροφής σήματος. Η εξίσωση lidar, καθόσον μπορούν να προσδιοριστούν με μεγάλη ακρίβεια οι συντελεστές εξασθένησης και οπισθοσκέδασης, που αφορούν την μοριακή ατμόσφαιρα, περιέχει δύο αγνώστους: τους συντελεστές εξασθένησης και οπισθοσκέδασης των σωματιδίων. Έτσι, η επίλυσή της είναι αδύνατη.

Για την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης αυτής, χρησιμοποιείται ο *λόγος lidar* για τα αιωρούμενα σωματίδια:

$$S = \alpha_{aer}(\lambda, z)/\beta_{aer}(\lambda, z) \tag{2.30}$$

Δηλαδή, είναι ο λόγος του συντελεστή εξασθένησης προς τον συντελεστή οπισθοσκέδασης των αερολυμάτων. Ο *λόγος lidar* είναι μια παράμετρος που εξαρτάται από το μήκος κύματος και γενικά δεν είναι σταθερός με το ύψος. Από διάφορες πειραματικές εκστρατείες έχει προκύψει ότι ο *λόγος lidar* λαμβάνει ένα μεγάλο εύρος τιμών που κυμαίνεται από 20 έως 120 sr.

Στη χρήση της τεχνικής της ελαστικής οπισθοσκέδασης lidar, η εκ των προτέρων υπόθεση γνώσης της τιμή του λόγου lidar, καθώς και η υπόθεση ότι ο λόγος αυτός παραμένει σταθερός με το ύψος, αποτελούν την μεγαλύτερη πηγή αβεβαιότητας στην επίλυση της διαφορικής εξίσωσης του lidar ελαστικής οπισθοσκέδασης (Bösenberg, 1997). Από μελέτες ευαισθησίας αλγορίθμων αναφορικά με την επιλογή μιας σταθερής τιμής του λόγου lidar, έχει υπολογισθεί ότι μια υπερεκτίμησή έως 40%, καταλήγει σε αβεβαιότητα στον υπολογισμό του $\alpha_{aer}(\lambda, z)$ της τάξης του -20% έως τα 2000 m και ±50% έως τα 4000 m.

2.5.3 Εκθέτης Ångström

Ο εκθέτης Ångström $AE_b(z, \frac{\lambda_1}{\lambda_2})$ στην περίπτωση της οπισθοσκέδασης από τα αερολύματα, για ένα ζεύγος μηκών κύματος λ_1 και λ_2 ($\lambda_1 < \lambda_2$) ορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$AE_b(z, \frac{\lambda_1}{\lambda_2}) = \frac{-ln(\frac{\beta_{aer}(\lambda_1,z)}{\beta_{aer}(\lambda_2,z)})}{ln(\frac{\lambda_1}{\lambda_2})} \tag{2.31}$$

Αντίστοιχα, ορίζεται και ο εκθέτης Ångström $AE_e(z, \frac{\lambda_1}{\lambda_2})$ στην περίπτωση εξασθένησης από τα αιωρούμενα σωματίδια, για το ζεύγος μηκών κύματος λ_1 και λ_2 θέτοντας στη θέση των $\beta_{aer}(\lambda, z)$, τα $\alpha_{aer}(\lambda, z)$.

Σε κάθε περίπτωση, οι κατακόρυφες κατανομές του εκθέτη Ångström αναφέρονται στην περιοχή πλήρους επικάλυψης των δεσμών στα 355/532 nm ή στα 532/1064 nm και για το λόγο αυτό δίδονται, συνήθως, για ύψη μεγαλύτερα των 400-600 m.

Για τον τελικό υπολογισμό του συντελεστή εξασθένησης των σωματιδίων, στην περίπτωση ενός συστήματος Raman lidar (εξίσωση 2.10) πρέπει να θεωρηθεί μια τιμή για τον εκθέτη, ο οποίος για κοντινά μήκη κύματος, όπως τα ζεύγη 355-387 nm και 532-607 nm, καθώς και για σωματίδια διαμέτρου συγκρίσιμης των μηκών κύματος, μπορεί να θεωρηθεί ίσος με τη μονάδα.

Είδος σωματιδίων	**Καύση βιομάζας**	**Ερημική σκόνη**	**Θαλάσσια**	**Ηπειρωτικά**
Εκθέτης Ångström $AE_b(z, \frac{\lambda_1}{\lambda_2})$ 355nm/532nm	0.6	-1.08	0.03	1.08
Εκθέτης Ångström $AE_e(z, \frac{\lambda_1}{\lambda_2})$ 355nm/532nm	1.19	-0.115	0.11	1.33
lidar ratio (sr) LR_{355} 355 nm	98	58	20	65
lidar ratio (sr) LR_{532} 532 nm	77	39	20	59

Πίνακας 2.5.1: Μέση τιμή εκθέτη Ångström, $AE_b(z, \frac{\lambda_1}{\lambda_2})$ και Ångström $AE_e(z, \frac{\lambda_1}{\lambda_2})$ για το ζεύγος μηκών κύματος 355nm/532nm, και του λόγου lidar για τα 355 και 532 nm (Wandinger et al., 2016).

Επομένως, όπως παρουσιάζεται και στον Πίνακα 2.5.1, ο εκθέτης Ångström, $AE(z, \frac{\lambda_1}{\lambda_2})$ για το ζεύγος 355-532 nm, λαμβάνει τιμές από -1 έως 3 και είναι ενδεικτικός του μεγέθους και του είδους των σωματιδίων.

2.5.4 Συντελεστής αποπόλωσης

Μία βασική παράμετρος του φωτός είναι η πόλωση την οποία και μπορούμε να εκμεταλλευτούμε στην τεχνική lidar για να πάρουμε πλήθος πληροφοριών για την σφαιρικότητα των αερολυμάτων και των νεφών στην ατμόσφαιρα. Η πηγή ακτινοβολίας σε ένα lidar, είναι το σύστημα laser, το οποίο γενικώς έχει την ιδιότητα να παράγει γραμμικά πολωμένο φώς. Αφού η πολωμένη ακτινοβολία laser οπισθοσκεδασθεί από την ατμόσφαιρα, μπορούμε να μετρήσουμε το ποσοστό της ακτινοβολίας που οπισθοσκεδάζεται προς το τηλεσκόπιο και διατηρεί την αρχική του πόλωση και παράλληλα το ποσοστό της ακτινοβολίας laser που έχει υποστεί αποπόλωση ύστερα από τη σκέδασή του. Πιο συγκεκριμένα, μετράμε το παράλληλα και το κάθετα πολωμένο οπισθοσκεδαζόμενο σήμα lidar σε σχέση πάντα με την διεύθυνση πόλωσης της αρχικά εκπεμπόμενης ακτινοβολίας laser. Με αυτό τον τρόπο δίνεται η ικανότητα ανίχνευσης ακόμη και πολύ λεπτών στρωμάτων μη σφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων ή παγοκρυστάλλων νεφών, λόγω της έντονης αποπόλωσης που υφίσταται η ακτινοβολία laser από τα σωματίδια αυτά.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, για το lidar αποπόλωσης, η εξίσωση lidar πρέπει να χωριστεί σε δύο εξισώσεις.

Για την παράλληλη συνιστώσα πόλωσης, ισχύει η εξίσωση:

$$P_{\parallel}(R,\lambda) = \frac{E(\lambda)\cdot n_{\parallel}\cdot(\lambda)\cdot O_{\parallel}(R,\lambda)}{R^2}\beta_{\parallel}(R,\lambda)exp\left(-2\int_0^R \alpha_{\parallel}(z,\lambda)dz\right) \tag{2.32}$$

Και για την κάθετη συνιστώσα πόλωσης, η ακόλουθη εξίσωση:

$$P_{\perp}(R,\lambda) = \frac{E(\lambda)\cdot n_{\perp}\cdot(\lambda)\cdot O_{\perp}(R,\lambda)}{R^2}\beta_{\perp}(R,\lambda)exp\left[-2\int_0^R \left(\alpha_{\parallel}(z,\lambda)+\alpha_{\perp}(z,\lambda)\right)dz\right] \tag{2.33}$$

όπου $P_{\perp}$ και $P_{\parallel}$ είναι η ένταση του οπισθοσκεδαζόμενου φωτός στις κάθετες και παράλληλες πολώσεις που είναι κάθετες μεταξύ τους (van de Hulst, 1981).

Ορίζουμε λοιπόν τον συντελεστή αποπόλωσης δ (depolarization):

$$\delta = \frac{P_{\perp}}{P_{\parallel}} \tag{2.34}$$

Κεφάλαιο 3

Περιγραφή πειραματικών διατάξεων lidar του ΕΜΠ-Διαδικασία πιστοποίησης ποιότητας

3.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης του συστήματος lidar EOLE

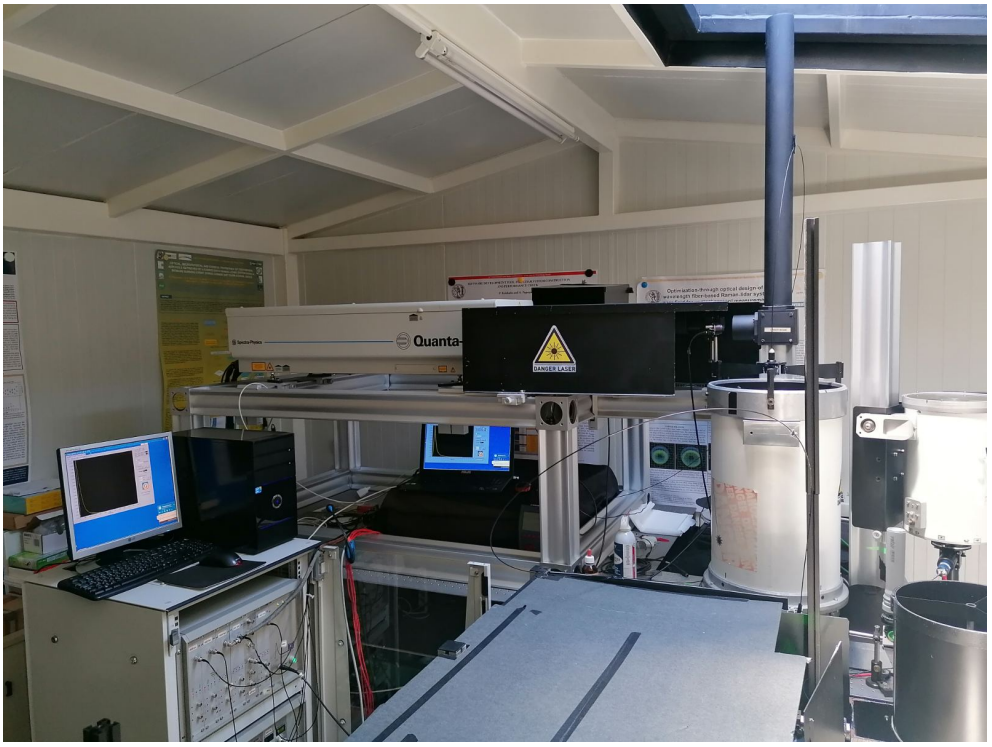
Η διάταξη Raman lidar (EOLE) της Μονάδας Τηλεπισκόπησης της Ατμόσφαιρας (Laser Remote Sensing Unit-LRSU) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, είναι εγκατεστημένη στον Τομέα Φυσικής (37.98^{o}N, 23.78^o E, και υψόμετρο 212 m a.s.l.)

Το σύστημα EOLE lidar λειτουργεί ως σύστημα ανίχνευσης/καταγραφής 6 μηκών κύματος ελαστικής οπισθοσκέδασης και σκέδασης Raman, με τριπλή δέσμη εκπομπής laser (355, 532 και 1064 nm). Ειδικότερα, το σύστημα EOLE έχει τη δυνατότητα ταυτόχρονης ανίχνευσης/καταγραφής των τριών ελαστικά οπισθοσκεδαζόμενων σημάτων lidar (355, 532 και 1064 nm), παράλληλα με την ανίχνευση/καταγραφή της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας Raman των 355 nm και 532 nm από το ατμοσφαιρικό άζωτο (N_2) (387 nm και 607 nm, αντίστοιχα) και της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας Raman της ακτινοβολίας των 355 nm από τα μόρια των ατμοσφαιρικών υδρατμών (H_2O) (407 nm).

Η διάταξη Raman-lidar του ΕΜΠ αποτελείται από τα ακόλουθα βασικά μέρη:

- Οπτική διάταξη εκπομπής της ακτινοβολίας laser

- Διάταξη ανίχνευσης της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας laser
- Σύστημα ανίχνευσης, καταγραφής, ψηφιοποίησης και αποθήκευσης των σημάτων lidar



Εικόνα 3.1.1: Η πειραματική διάταξη EOLE lidar του ΕΜΠ.

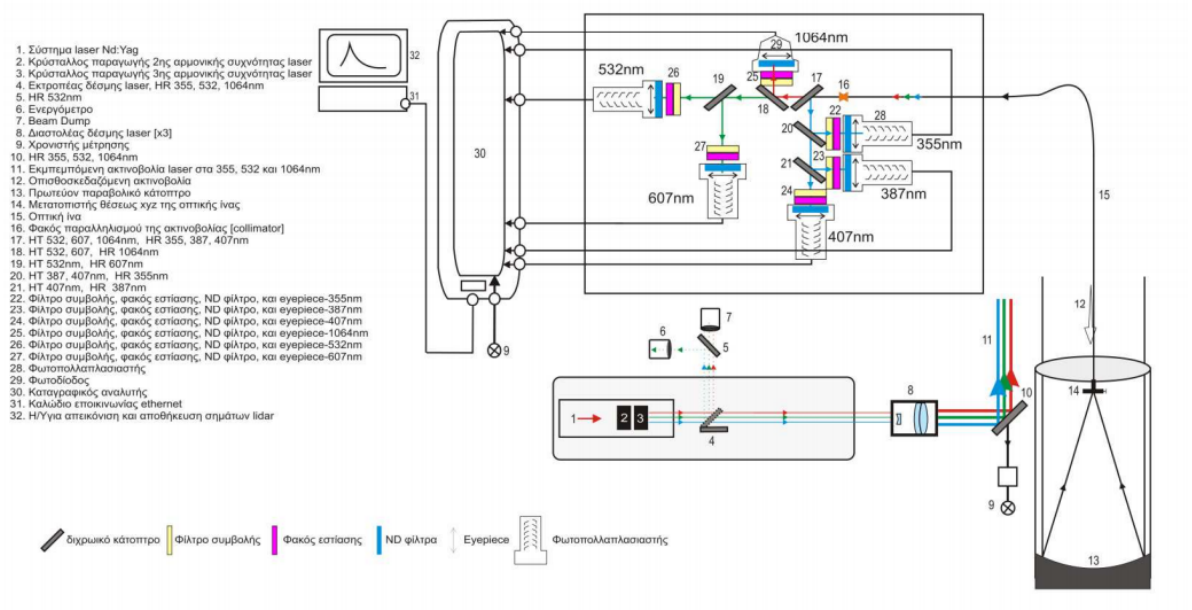
3.1.1 Σύστημα εκπομπής EOLE

Στη διάταξη Raman-lidar (EOLE), ως πηγή laser χρησιμοποιείται ένα παλμικό laser στερεάς κατάστασης Nd:YAG της Spectra-Physics (Lab-170-10), το οποίο αρχικά εκπέμπει ακτινοβολία στα 1064 nm με ενέργεια 850 mJ/παλμό, με επαναληπτικότητα 10 Hz. Με την παρεμβολή δύο μη γραμμικών κρυστάλλων KD*P, που ελέγχονται θερμικά από το σύστημα laser ώστε να παραμένουν σε σταθερή θερμοκρασία λειτουργίας, έχουμε την παραγωγή της δεύτερης στα 532 nm και τρίτης αρμονικής συχνότητας στα 355 nm, αντίστοιχα. Έτσι, οι ταυτόχρονα εκπεμπόμενες δέσμες laser στα 1064 nm, 532 nm και 355 nm, έχουν ενέργεια ανά παλμό 260 mJ, 240 mJ και 310 mJ, αντίστοιχα. Και οι τρεις αυτές ακτινοβολίες εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα μέσω ειδικού κατόπτρου αφού πρώτα η δέσμη διευρυνθεί με τη χρήση ειδικά σχεδιασμένου αχρωματικού διευρυντή δέσμης laser (beam expander) της DOROTEK GmbH (Kokkalis et al., 2012).

Όπως προαναφέρθηκε, η πηγή laser εκπέμπει ομοαξονικά και ταυτόχρονα τρεις δέσμες, στα 355, 532 και 1064 nm. Από τη στιγμή όμως που το σύστημα laser τίθεται σε

λειτουργία Q-Switch, απαιτείται ένα χρονικό διάστημα 15 min, έως ότου η δέσμη laser αποκτήσει μέγιστη και σταθερή ενέργεια σε όλη τη χωρική της κατανομή. Είναι γνωστό ότι μια ενεργειακά ασταθής και χωρικά ασύμμετρη δέσμη laser μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις (καταστροφή των ειδικών επιστρώσεων των οπτικών στοιχείων) όταν προσπέσει π.χ. σ'έναν διαστολέα δέσμης. Για το λόγο αυτό, η διάδοση μέσω του διαστολέα δέσμης και η εκπομπή προς την ατμόσφαιρα της δέσμης laser, γίνεται μόνον αφού σταθεροποιηθεί και ομογενοποιηθεί χωρικά η παραγόμενη ακτινοβολία laser.

Ως διαστολέας δέσμης χρησιμοποιείται ένα σύστημα φακών, το οποίο επιτρέπει την αύξηση της διαμέτρου της δέσμης laser με σκοπό την μείωση της γωνιακής της απόκλισης. Υπάρχουν δύο τύποι διαστολέων δέσμης, ο Galilean και ο Keplerian. Στο συγκεκριμένο σύστημα χρησιμοποιείται ένας διαστολέας δέσμης τύπου Galilean. Για το σύστημα laser του EOLE, και τον Galilean διαστολέα του, η εξερχόμενη δέσμη laser προς την ατμόσφαιρα έχει διάμετρο 30 mm και γωνιακή απόκλιση (πλήρους γωνίας, (FWHM)) 0.17 mm. Ο διαστολέας που χρησιμοποιείται είναι αχρωματικός, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ομοιόμορφη διαστολή της δέσμης στα τρία μήκη κύματος εκπομπής. Ο διαστολέας αυτός κατασκευάστηκε από την εταιρεία Dorotek GmbH και αποτελείται από 4 φακούς (3 από N-BaK_2 και 1 από CaF_2), με ειδικές αντιανακλαστικές επιστρώσεις σε όλες τις επιφάνειες των επιμέρους οπτικών για τα μήκη κύματος 355, 532 και 1064 nm.



Εικόνα 3.1.2: Η διάταξη Raman-lidar (EOLE) του ΕΜΠ (Kokkalis, 2014).

3.1.2 Σύστημα ανίχνευσης EOLE

Η ανίχνευση της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενός οπτικού τηλεσκόπιου τύπου Cassegrain, που φέρει ένα κοίλο παραβολικό κάτοπτρο διαμέτρου D=300 mm και εστιακής απόστασης f=600 mm, με αποτέλεσμα το f-number του τηλεσκοπίου να είναι f/D=600mm/300mm=2. Το παραβολικό κάτοπτρο έχει επιστρωθεί με φθοριούχο μαγνήσιο (MgF_2) προκειμένου να αυξηθεί η ανακλαστικότητά του (˙98%) στη φασματική περιοχή 355 - 1064 nm.

Η συλλεγόμενη από το οπτικό τηλεσκόπιο ακτινοβολία laser (σήμα lidar) κατευθύνεται προς τη διάταξη ανίχνευσης του συστήματος Raman lidar μέσω μιας οπτικής ίνας από SiO_2 διαμέτρου df=1.5 mm η οποία είναι τοποθετημένη σε ειδική βάση στην εστία του παραβολικού κατόπτρου. Η χρήση αυτής της ίνας επιτρέπει στο τηλεσκόπιο να έχει πεδίο όρασης (field of view-FOV) ίσο με FOV=df/f=1.5mm/600 mm=2.5 mrad.

Τέλος, η ακτινοβολία laser που συλλέγεται από το οπτικό τηλεσκόπιο οδηγείται μέσω της οπτικής ίνας προς το φασματόμετρο ανίχνευσης. Εκεί, η συλλεγόμενη ακτινοβολία διαχωρίζεται φασματικά αρχικά σε δύο δέσμες: μία προς την υπεριώδη περιοχή του φάσματος (355-407 nm) και μία προς την ορατή και κοντινή υπέρυθρη περιοχή (532-1064 nm) μέσω ενός διχρωϊκού κατόπτρου. Στη συνέχεια, μέσω ενός συστήματος διχρωϊκών κατόπτρων διαχωρίζεται στα επί μέρους 6 διαφορετικά μήκη κύματος (355-387-407-532-607-1064 nm).

Η συλλεγόμενη ακτινοβολία εισέρχεται στο σύστημα οπτικής ανίχνευσης, δηλαδή στο φασματοφωτόμετρο, όπου και διαχωρίζεται αρχικά σε δύο φασματικές περιοχές: στην υπεριώδη περιοχή του φάσματος (355, 387 και 407 nm), και στην ορατή-κοντινή υπέρυθρη περιοχή (532, 607 και 1064 nm), μέσω ενός διχρωϊκού κατόπτρου. Ακολούθως, μέσω ενός συστήματος διχρωϊκών κατόπτρων διαχωρίζεται στα επί μέρους έξι μήκη κύματος. Η φασματικά διαχωρισμένη πλέον ακτινοβολία, πριν προσπέσει στον αντίστοιχο φωτοανιχνευτή, διέρχεται από μια συστοιχία οπτικών φίλτρων, που έχουν σαν στόχο τη μείωση του αντίστοιχου ατμοσφαιρικού υποβάθρου, αλλά και τη μείωση της έντασης της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας laser.

Η ανίχνευση των σημάτων lidar μεταξύ 355 και 607 mn πραγματοποιείται από φωτοπολλαπλασιαστές (Hamamatsu). Η ανίχνευση του σήματος lidar στα 1064 nm πραγματοποιείται από μία φωτοδίοδο χιονοστιβάδας πυριτίου ενεργούς διαμέτρου ανίχνευσης 1.5 mm (Hamamatsu).

3.1.3 Σύστημα καταγραφής και αποθήκευσης δεδομένων EOLE

Η καταγραφή των σημάτων lidar στο σύστημα του ΕΜΠ πραγματοποιείται με δύο μεθόδους. Την αναλογική μέθοδο (analog detection mode) και την τεχνική της καταμέτρησης φωτονίων (photon counting detection mode). Στην αναλογική μέθοδο καταγραφής ο παλμός εξόδου του φωτοπολλαπλασιαστή καταγράφεται σαν ρεύμα εξόδου, ενώ στην τεχνική της καταμέτρησης φωτονίων καταμετρώνται τα παραγόμενα φωτοηλεκτρόνια από τον φωτοπολλαπλασιαστή. Η τεχνική καταμέτρησης φωτονίων θεωρείται πιο αξιόπιστη από την αναλογική μέθοδο, αναφορικά με το λόγο σήματος προς θόρυβο (Signal-to-Noise-Ratio - SNR) και τη σταθερότητα του παραγόμενου σήματος. Η χρήση της όμως, εφαρμόζεται μόνο στην περίπτωση που τα προσπίπτοντα φωτόνια στην φωτοκάθοδο του φωτοπολλαπλασιαστή καταφθάνουν με χαμηλούς σχετικά ρυθμούς ($<$ 10-50 MHz), ώστε τα παραγόμενα φωτοηλεκτρόνια να είναι διακριτά και ανιχνεύσιμα ένα προς ένα.

Στο σύστημα Raman lidar του Ε.Μ.Π. για την ταυτόχρονη καταγραφή των έξι σημάτων lidar χρησιμοποιείται ένα καταγραφικό σύστημα με δυνατότητα ταυτόχρονης αναλογικής καταγραφής και ψηφιοποίησης σημάτων στα 355, 387, 532, 607, 1064 nm και καταμέτρησης φωτονίων στα 355, 532, 387, 407 και 607 nm. Το σημαντικό αυτό πλεονέκτημα δίνει τη δυνατότητα να αποφεύγεται ο κορεσμός του σήματος που προέρχεται από τις κοντινές αποστάσεις όπου το σήμα είναι μεγάλης έντασης και παράλληλα να διατηρείται η ευαισθησία του συστήματος στην καταγραφή πιο ασθενών σημάτων που προέρχονται από μεγάλες αποστάσεις.

Στην αναλογική καταγραφή των σημάτων lidar έχουμε την ψηφιοποίηση του σήματος (Analog-to-Digital Conversion) με ακρίβεια 12 bits σε 8192 χρονικές θυρίδες (time bins), με δυνατότητα άθροισης έως και 4000 παλμούς. Στην περίπτωσή μας χρησιμοποιούμε άθροιση 1000 παλμών laser προκειμένου, με επαναληπτικότητα παλμικής εκπομπής 10 Hz που διαθέτουμε, να επιτυγχάνουμε χρονική ακρίβεια μέτρησης της τάξης των 1.66 λεπτών της ώρας, ενώ η συχνότητα δειγματοληψίας των σημάτων lidar κατά την αναλογική καταγραφή των 20 MHz, να αντιστοιχεί σε 7.5 m χωρική ακρίβεια μέτρησης.

Η καταμέτρηση φωτονίων περιλαμβάνει ένα γρήγορο προενισχυτή 3-βαθμίδων και ένα διευκρινιστή σήματος (discriminator) με δυνατότητα ρύθμισής του σε 64 διαφορετικά επίπεδα. Η μέγιστη συχνότητα καταμέτρησης των φωτονίων είναι 250 MHz. Στην πράξη όμως η πραγματική αξιόπιστη τιμή της είναι της τάξης των 50 MHz, λόγω της ύπαρξης του νεκρού χρόνου (dead time), όπως θα αναφέρουμε, παρακάτω. Δηλαδή το σύστημά μας δεν είναι ικανό να καταμετρήσει σωστά τα φωτόνια από σχετικά κοντινές αποστάσεις, καθόσον αυτά υπερβαίνουν την ταχύτητα καταμέτρησης που αυτό διαθέτει.

3.2 Περιγραφή πειραματικής διάταξης του συστήματος lidar DEPOLE

Η διάταξη Depolarization lidar (DEPOLE) της Μονάδας Τηλεπισκόπησης της Ατμόσφαιρας (Laser Remote Sensing Unit-LRSU) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, είναι εγκατεστημένη στον Τομέα Φυσικής (37.98^{o}N, 23.78^o E, και υψόμετρο 212 m a.s.l.).

Το σύστημα DEPOLE lidar λειτουργεί ως σύστημα ανίχνευσης/καταγραφής 2 μηκών κύματος ελαστικής οπισθοσκέδασης, με διπλή δέσμη εκπομπής laser (355, 532 nm). Η τεχνική lidar αποπόλωσης αποτελείται από δύο κανάλια λήψης τα οποία ανιχνεύουν το οπισθοσκεδαζόμενο φως μιας γραμμικά πολωμένης δέσμης laser: η οπισθοσκεδαζόμενη δέσμη περιέχει δύο συστατικά: την κάθετη προς την εκπεμπόμενη δέσμη laser και την παράλληλη. Το σύστημα αυτό σχεδιάστηκε για τη μελέτη των αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες της αποπόλωσης της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας laser από τα μόρια και τα αερολύματα. Η ανίχνευση των δύο συστατικών επιτρέπει τη διάκριση μεταξύ διαφορετικών τύπων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα.

3.2.1 Σύστημα εκπομπής DEPOLE

Στη διάταξη DEPOLE, ως πηγή laser χρησιμοποιείται ένα παλμικό laser στερεάς κατάστασης Nd:YAG της Quantel S.A. (Brilliant), το οποίο εκπέμπει ακτινοβολία στα 355 nm με ενέργεια 65 mJ/παλμό και με συχνότητα 10 Hz.

Η ακτινοβολία laser οδηγείται προς την ατμόσφαιρα μέσω ενός διηλεκτρικού κατόπτρου, με υψηλή ανακλαστικότητα στα 355 nm. Στο σύστημα DEPOLE, η εξερχόμενη δέσμη laser έχει διάμετρο 6 mm.

3.2.2 Σύστημα ανίχνευσης DEPOLE

Η ανίχνευση της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενός οπτικού τηλεσκόπιου τύπου Dall-Kirkham/Cassegrain, που φέρει ένα κοίλο παραβολικό κάτοπτρο διαμέτρου D=200 mm και εστιακής απόστασης f=800 mm, με αποτέλεσμα το f-number του τηλεσκοπίου να είναι f/D=800mm/200mm=4.

Η συλλεγόμενη από το οπτικό τηλεσκόπιο ακτινοβολία laser (σήμα lidar) κατευθύνεται προς τη διάταξη ανίχνευσης του συστήματος DEPOLE μέσω ενός καλωδίου (Iris) διαμέτρου df=2.5 mm το οποίο είναι τοποθετημένο σε ειδική βάση στην εστία του παραβολικού κατόπτρου. Η χρήση αυτού του καλωδίου επιτρέπει στο τηλεσκόπιο να έχει πεδίο όρασης (field of view-FOV) ίσο με FOV=df/f=2.5mm/800 mm=3.125 mrad.

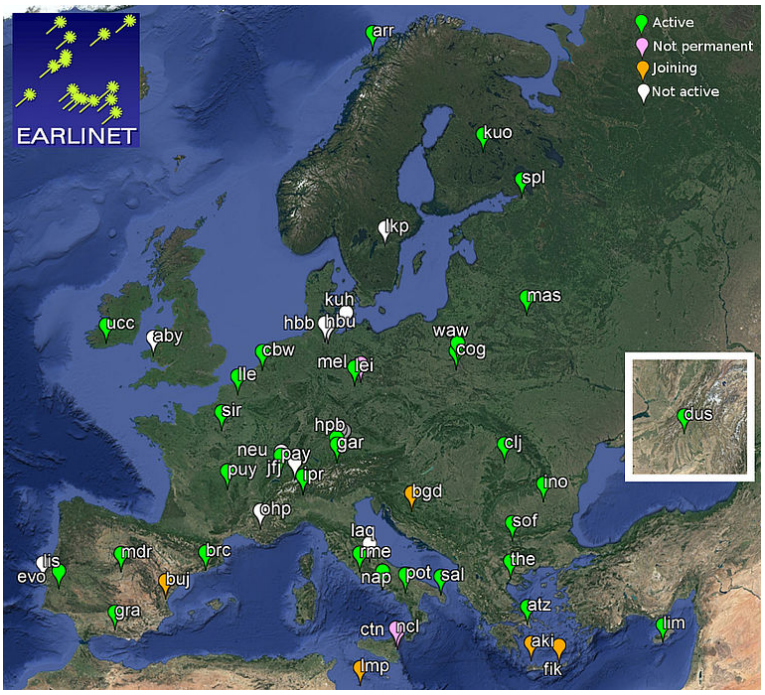
Τέλος, η ακτινοβολία laser που συλλέγεται από το οπτικό τηλεσκόπιο οδηγείται μέσω του καλωδίου προς το φασματόμετρο ανίχνευσης. Ένα σύστημα φακών (doublet collimator) επιτρέπει τον παραλληλισμό της εξερχόμενης από το διάφραγμα δέσμης, η οποία ακολούθως, οδηγείται σε μια διάταξη που επιτρέπει τόσο τον φασματικό διαχωρισμό, όσο και τον διαχωρισμό της πόλωσης. Η διάταξη αυτή περιλαμβάνει ένα φίλτρο ND, ένα φίλτρο συμβολής (IFF) και ένα πολωτικό διαχωριστή δέσμης (PBSC), προκειμένου να διαχωρισθεί η οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία σε δύο διευθύνσεις πόλωσης (παράλληλη και κάθετη). Η οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία οδηγείται, μέσω διατάξεων φακών, σε δύο φωτοπολλαπλασιαστές (Hamamatsu) για ανίχνευση και καταγραφή.

Εφόσον, δεν υπάρχουν ιδανικά οπτικά στοιχεία που να παρουσιάζουν 100% διαπερατότητα, ούτε δέσμη laser με 100% γραμμική πόλωση, απαιτείται η απόλυτη ευθυγράμμιση των στοιχείων ανίχνευσης του συστήματος DEPOLE, τόσο μεταξύ τους, όσο και με βάση την διεύθυνση πόλωσης της γραμμικής ακτινοβολίας laser. Αυτή η διαδικασία απαιτεί την ευθυγράμμιση των οπτικών που μας ενδιαφέρουν κατά τη διάρκεια της νύχτας, αφαιρώντας περιττά οπτικά στοιχεία τα οποία μπορεί να επηρεάζουν τη διεύθυνση πόλωσης του προσπίπτοντος φωτός.

3.3 Πιστοποίηση του συστήματος Raman lidar (EOLE) του ΕΜΠ

3.3.1 Ευρωπαϊκό Δίκτυο συστημάτων lidar (EARLINET)

Το European Aerosol Research Lidar Network, EARLINET, το οποίο ιδρύθηκε το 2000, είναι ένα από τα πιο σημαντικά έργα της Ευρωπαϊκής Ένωσης και στοχεύει στην καταγραφή της χωρικής και χρονικής κατανομής αιωρούμενων σωματιδίων στην Ευρωπαϊκή ήπειρο, με τη χρήση τεχνικών lidar. Ένας από τους κύριους στόχους του είναι να δημιουργηθεί μια ευρεία βάση δεδομένων που αφορά μακροχρόνιες μετρήσεις της οριζόντιας και της κατακόρυφης κατανομής των οπτικών ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων, ώστε τα δεδομένα αυτά να χρησιμοποιηθούν σε μελέτες που αφορούν την επίδραση των αερολυμάτων στην πρόγνωση των κλιματικών μεταβολών σε παγκόσμια κλίμακα.



Εικόνα 3.3.1: Οι θέσεις των σταθμών του δικτύου EARLINET (www.earlinet.org/).

Το σύστημα Raman lidar του ΕΜΠ συμμετέχει στο Ευρωπαϊκό δίκτυο lidar EARLINET από το Μάιο του 2000 μέχρι και σήμερα. Στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού προγράμματος EARLINET πραγματοποιούνται συντονισμένες μετρήσεις σε όλους τους σταθμούς lidar οι οποίοι είναι μέλη του δικτύου EARLINET (Εικόνα 3.3.1).

Οι συντονισμένες μετρήσεις lidar του δικτύου EARLINET, αφορούν μετρήσεις των οπτικών ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιούνται 2 φορές την εβδομάδα: Δευτέρα (13:00 και 19:00 UTC) και Πέμπτη (13:00 και 19:00 UTC). Τα τελικά προϊόντα (οπτικές ιδιότητες αερολυμάτων: συντελεστής οπισθοσκέδασης και εξασθένησης αερολυμάτων) που παράγει το δίκτυο EARLINET αποτελούν ένα σημαντικό εργαλείο για την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα και τη σύγχρονη κοινωνία στους εξής τομείς:

- Μελέτη φαινομένων μεταφοράς-εναπόθεσης σκόνης από την έρημο της Σαχάρα, την Αραβική χερσόννησο ή Ασιατικές περιοχές, καθώς και από δασικές πυρκαγιές, σε τοπική-περιφερειακή-ηπειρωτική κλίμακα.
- Επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων στην υπεριώδη UVB ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει στο έδαφος.
- Μελέτη διάχυσης των αέριων ρύπων σε αστικές περιοχές.

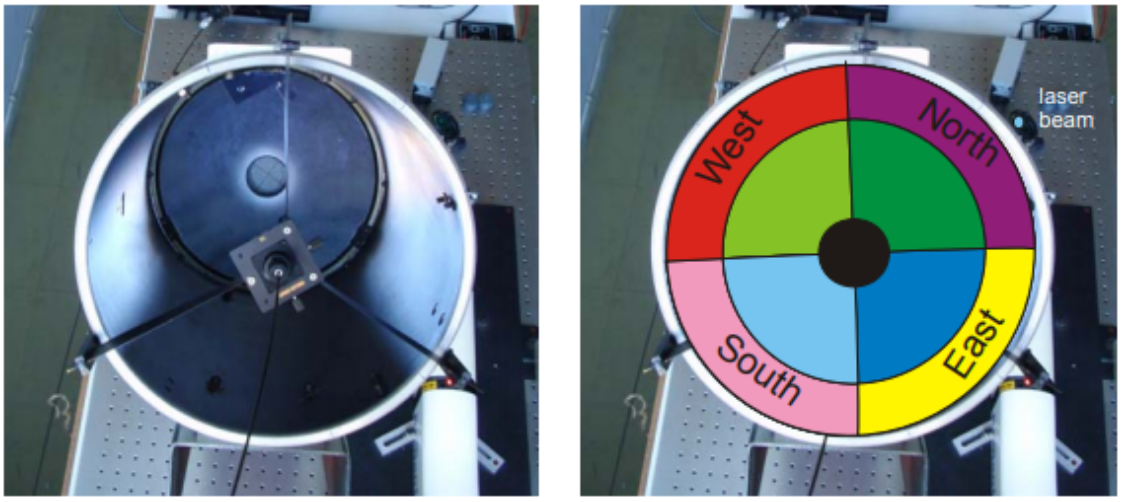
- Συσχέτιση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων με έντονα επεισόδια ατμοσφαιρικής ρύπανσης.
- Εντοπισμός των πηγών ρύπανσης από αιωρούμενα σωματίδια και της επίδρασής τους στο γήινο κλίμα.
- Έλεγχος αξιοπιστίας δορυφορικών δεδομένων (σύστημα CALIOP, Aeolus, EarthCare, κλπ.).

3.3.2 Πιστοποίηση του οπτικού συστήματος λήψης με χρήση της τεχνικής telecover

Όπως προαναφέρθηκε, προκειμένου να διασφαλισθεί η ποιότητα των λαμβανόμενων μετρήσεων lidar, στο πλαίσιο του δικτύου EARLINET, είναι απαραίτητη η συνεχής βαθμονόμηση των συστημάτων μέτρησης. Στο πλαίσιο αυτής της αξιολόγησης, στη διάταξη Raman lidar του ΕΜΠ, πραγματοποιούνται συνεχείς έλεγχοι της αξιοπιστίας καταγραφής των σημάτων lidar σε τακτά χρονικά διαστήματα.

Ένας από τους βασικότερους ελέγχους είναι η εφαρμογή της τεχνικής telecover, δηλαδή του ελέγχου της ομοιογένειας καταγραφής των οπισθοσκεδαζόμενων σημάτων lidar, από το οπτικό τηλεσκόπιο λήψης. Το σύστημα Raman lidar του Ε.Μ.Π. είναι διαξονικό, με αποτέλεσμα κάθε περιοχή του τηλεσκοπίου λήψης να καταγράφει οπισθοσκεδαζόμενο σήμα από διαφορετική περιοχή της ατμόσφαιρας (από διαφορετικό ύψος), λόγω της διαφορετικής επικάλυψης του οπτικού πεδίου του τηλεσκοπίου με τη δέσμη του laser από διαφορετικά ύψη (Weitkamp, 2005).

Ο έλεγχος της αξιοπιστίας γίνεται για διαφορετικές περιοχές ανίχνευσης του τηλεσκοπίου, εάν αυτό χωρισθεί σε τέσσερα τεταρτημόρια (Βόρειο (N), Νότιο (S), Ανατολικό (E), Δυτικό (W)) (Εικόνα 3.3.2). Βόρεια ορίζεται η περιοχή η οποία ευρίσκεται πιο κοντά στον οπτικό άξονα της δέσμης laser. Δυτικά ή Ανατολικά ορίζονται οι περιοχές του τηλεσκοπίου αναφορικά με τον άξονα εκπομπής της δέσμης laser (αριστερά και δεξιά, αντίστοιχα) και Νότια, η περιοχή που βρίσκεται πιο μακριά από τον οπτικό άξονα της δέσμης laser.



Εικόνα 3.3.2: αριστερά: Κάτοψη του τηλεσκοπίου λήψης του EOLE lidar. δεξιά: Σχηματική απεικόνιση των τεσσάρων περιοχών ελέγχου του τηλεσκοπίου λήψης μέσω της τεχνικής telecover (Freudenthaler, 2008).

Σε ένα ιδανικό σύστημα lidar το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα που προέρχεται από όλες τις περιοχές μέτρησης διαδίδεται με τον ίδιο τρόπο μέσα στην οπτική διάταξή του. Η μείωση των φωτεινών ακτίνων που προέρχονται από την κοντινή περιοχή οφείλεται στη μερική σκίαση από το μικρό άνοιγμα του οπτικού πεδίου του τηλεσκοπίου, με άμεσα αποτελέσματα στην τιμή της γεωμετρικής συνάρτησης επικάλυψης.

Ταυτόχρονα, οι ακτίνες που προέρχονται από απομακρυσμένες περιοχές και επομένως προσπίπτουν με μεγάλη γωνία (μερικές μοίρες) στα διχρωικά φίλτρα, είναι πιθανόν να προκαλούν μειωμένη διάδοση σε αυτά, λόγω της γωνιακής εξάρτησης του μήκους κύματος από τη γωνία πρόσπτωσης.

Οι παράγοντες, λοιπόν, που επηρεάζουν τη διάδοση του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος lidar το οποίο προέρχεται από διαφορετικές περιοχές του τηλεσκοπίου είναι συνοπτικά οι παρακάτω:

- Η μη πλήρης επικάλυψη μεταξύ της δέσμης του laser και του οπτικού πεδίου του τηλεσκοπίου.
- Οι διαφορετικές σκιάσεις που μπορεί να οφείλονται στα στοιχεία του τηλεσκοπίου (π.χ. στήριξη δευτερεύοντος κατόπτρου ή στήριξης της οπτικής ίνας).
- Η επίδραση της γωνιακής εξάρτησης μεταξύ της εκπεμπόμενης δέσμης laser και του οπτικού άξονα λήψης του τηλεσκοπίου.

Οι οπισθοσκεδαζόμενες φωτεινές δέσμες από τις διαφορετικές περιοχές της επιφάνειας του κατόπτρου του τηλεσκοπίου ακολουθούν διαφορετική οπτική διαδρομή μέσα στην οπτική

διάταξη και προσπίπτουν με διαφορετικές γωνίες στα οπτικά στοιχεία. Στο πλαίσιο της διαδικασίας ελέγχου της οπτικής διάταξης χρησιμοποιούμε αυτήν την διαδικασία για τον έλεγχο της ευθυγράμμισης του συστήματος lidar, όπως προτάθηκε από τον Freudenthaler (Freudenthaler, 2008).

Επομένως, όταν συγκρίνουμε τις κατακόρυφες κατανομές των εντάσεων των εξαρτημένων από την απόσταση οπισθοσκεδαζόμενων σημάτων lidar, που προέρχονται από διαφορετικές περιοχές του τηλεσκοπίου, μπορούμε να διαπιστώσουμε ενδεχόμενες διαφορές/απώλειες σήματος κατά τη διάδοση των ακτίνων στην οπτική διάταξη ανίχνευσης, και οι οποίες επηρεάζουν άμεσα την ανάκτηση των μετρούμενων οπτικών ιδιοτήτων των αερολυμάτων.

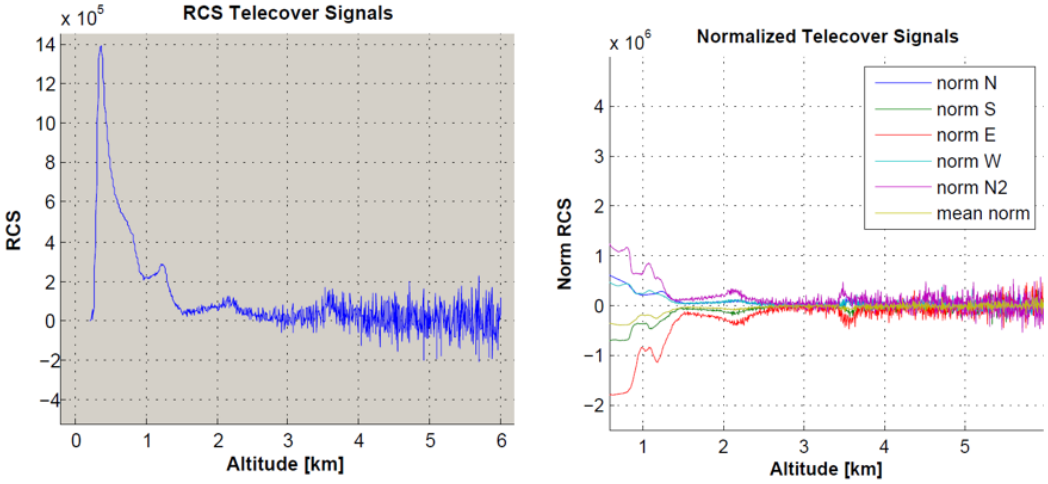
Στην περίπτωση όπου όλα τα οπτικά ανοίγματα έχουν την ίδια ενεργή επιφάνεια, οι σχετικές τιμές των σημάτων δίνουν άμεσα πληροφορίες για τη σχετική διάδοση του κάθε τομέα του τηλεσκοπίου. Οι αλλαγές στις ατμοσφαιρικές συνθήκες κατά τη διάρκεια των μετρήσεων μπορούν να προσδιοριστούν με μία επιπλέον μέτρηση στο τέλος της διαδικασίας για τον πρώτο τομέα που μετρήθηκε.

Για να μπορέσουν να συγκριθούν τα ληφθέντα από τις διαφορετικές περιοχές σήματα του συστήματος lidar πρέπει πρώτα να ακολουθηθεί μία διαδικασία κανονικοποίησης. Η κανονικοποίηση μπορεί να γίνει, είτε ως προς κάποιον από τους τέσσερεις τομείς του τηλεσκοπίου, συνήθως τον βόρειο τομέα ο οποίος και θεωρητικά έχει το ισχυρότερο σήμα, είτε, στην περίπτωση όπου το σήμα δεν είναι καλό ή είναι πολύ θορυβώδες να επιλεχθεί κάποια μακρινή περιοχή (συνήθως μεταξύ 1 και 5 km) όπου τα διορθωμένα ως προς την απόσταση σήματα από όλους του τομείς θα κανονικοποιηθούν στην μονάδα.

Η διαδικασία των μετρήσεων ελέγχου των τεσσάρων περιοχών του τηλεσκοπίου, πραγματοποιήθηκε στις 26 Απριλίου 2021. Το σύστημα Raman-lidar του ΕΜΠ βρίσκεται στα 212 m από τη μέση στάθμη της θάλασσας.

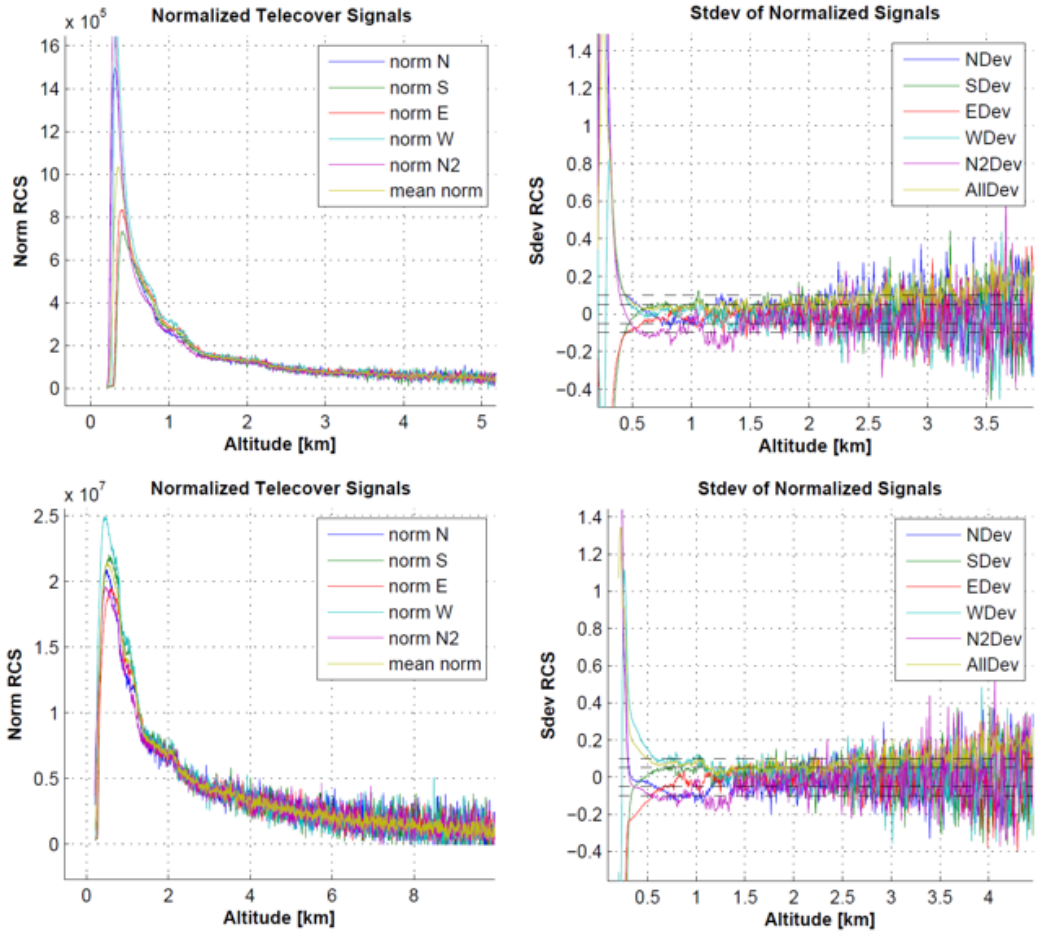
Αρχικά γνωρίζουμε ότι η δυναμική της ατμόσφαιρας αλλάζει στα πρώτα 800 m. Επιπλέον, είναι γνωστό ότι εντοπίζουμε τα αιωρούμενα σωματίδια καλύτερα στα 1064 nm, γιατί είναι πιο έντονο το σήμα.

Στην Εικόνα 3.3.3 (αριστερά) παρουσιάζεται το RCS σήμα lidar στα 1064 nm και παρατηρούμε ότι υπάρχουν έντονα αιωρούμενα σωματίδια (peaks) στα 1.25, στα 2.2 και στα 3.5 km. Επίσης, παρατηρούμε έντονη μεταβλητότητα στην ατμόσφαιρα λόγω της ύπαρξης νεφών στο υψόμετρο από 2.8 έως 3 km. Επιπλέον, στην Εικόνα 3.3.3 (δεξιά) δίνεται το κανονικοποιημένο -ως προς τη μέση- κατακόρυφη κατανομή σήμα των τεσσάρων τομέων του τηλεσκοπίου για το 1064 nm (analog).



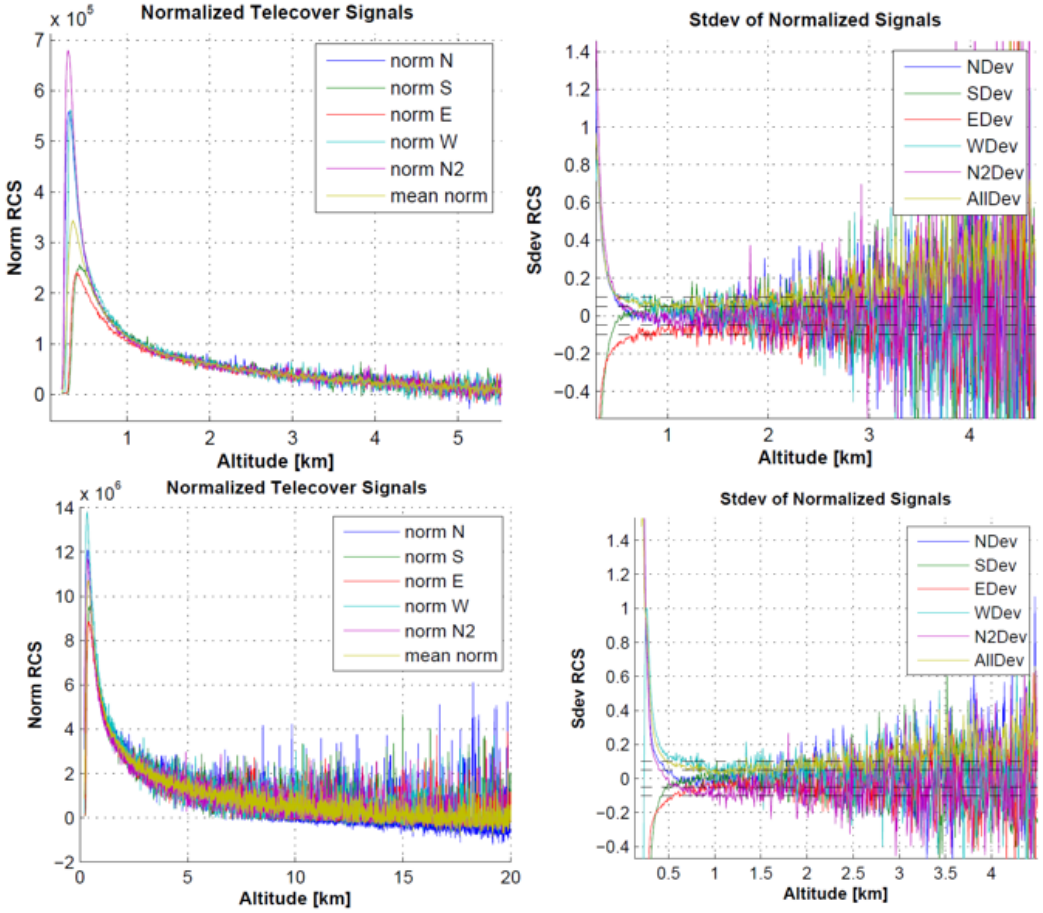
Εικόνα 3.3.3: (αριστερά) Μη διορθωμένο σήμα lidar στα 1064 nm. (δεξιά) Κανονικοποιημένα ως προς τη μέση κατακόρυφη κατανομή, διορθωμένα ως προς την απόσταση σήματα στα 1064nm (analog).

Στην Εικόνα 3.3.4 (αριστερά) παρουσιάζονται τα κανονικοποιημένα -ως προς τη μέση-κατακόρυφη κατανομή σήματα των τεσσάρων τομέων του τηλεσκοπίου για τα 355 nm τόσο για το analog όσο και για το photon. Στην παρούσα περίπτωση παρατηρείται μικρή μεταβολή των ατμοσφαιρικών συνθηκών. Η περιοχή κανονικοποίησης των σημάτων επιλέχθηκε να είναι από τα 5 - 6 km και 4 – 5 km ύψος, αντίστοιχα (normalized).



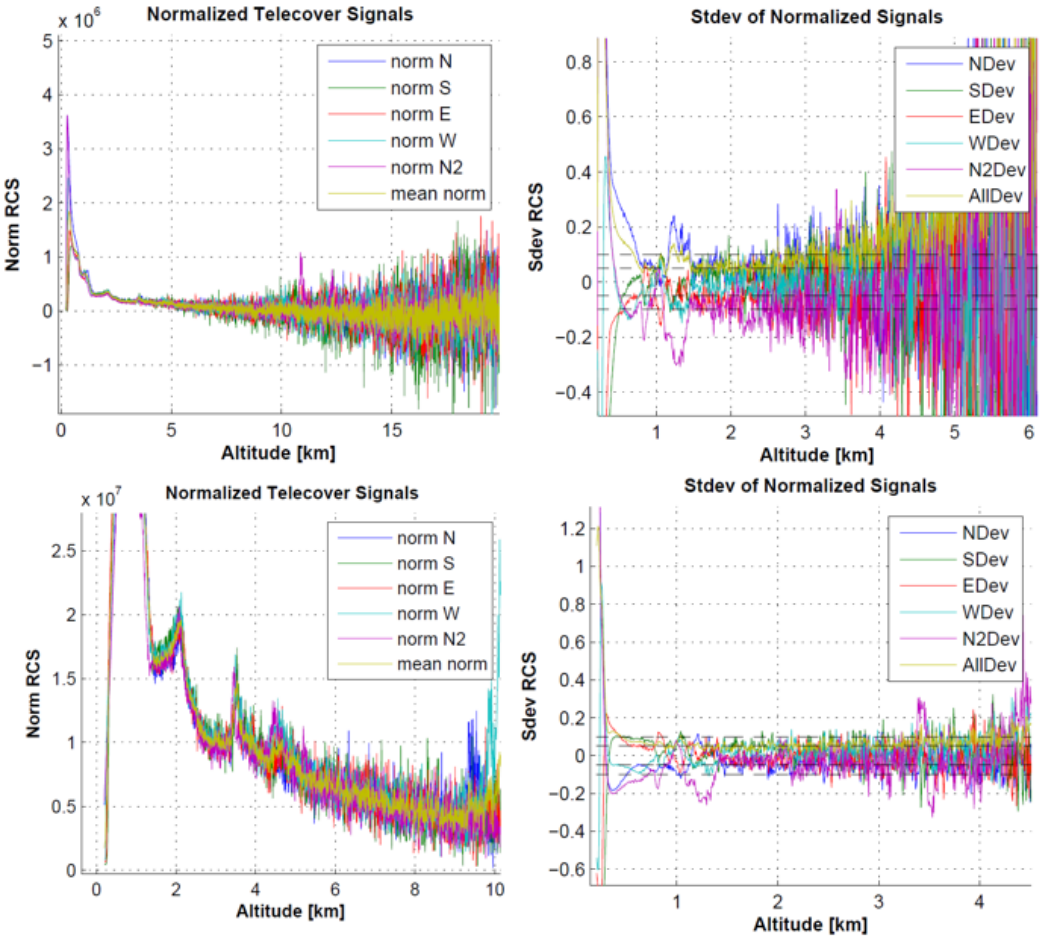
Εικόνα 3.3.4: (αριστερά) Κανονικοποιημένα ως προς τη μέση κατακόρυφη κατανομή, διορθωμένα ως προς την απόσταση σήματα στα 355nm (analog και photon). (δεξιά) Σχετική απόκλιση των σημάτων των τεσσάρων τομέων του τηλεσκοπίου στα 355nm (analog και photon).

Στην Εικόνα 3.3.5 (αριστερά) παρουσιάζονται τα κανονικοποιημένα -ως προς τη μέση- κατακόρυφη κατανομή σήματα των τεσσάρων τομέων του τηλεσκοπίου για τα 387 nm τόσο για το analog όσο και για το photon. Στην παρούσα περίπτωση παρατηρείται μικρή μεταβολή των ατμοσφαιρικών συνθηκών. Η περιοχή κανονικοποίησης των σημάτων επιλέχθηκε να είναι από τα 2.8 - 3 km και 4 – 5 km ύψος, αντίστοιχα (normalized).



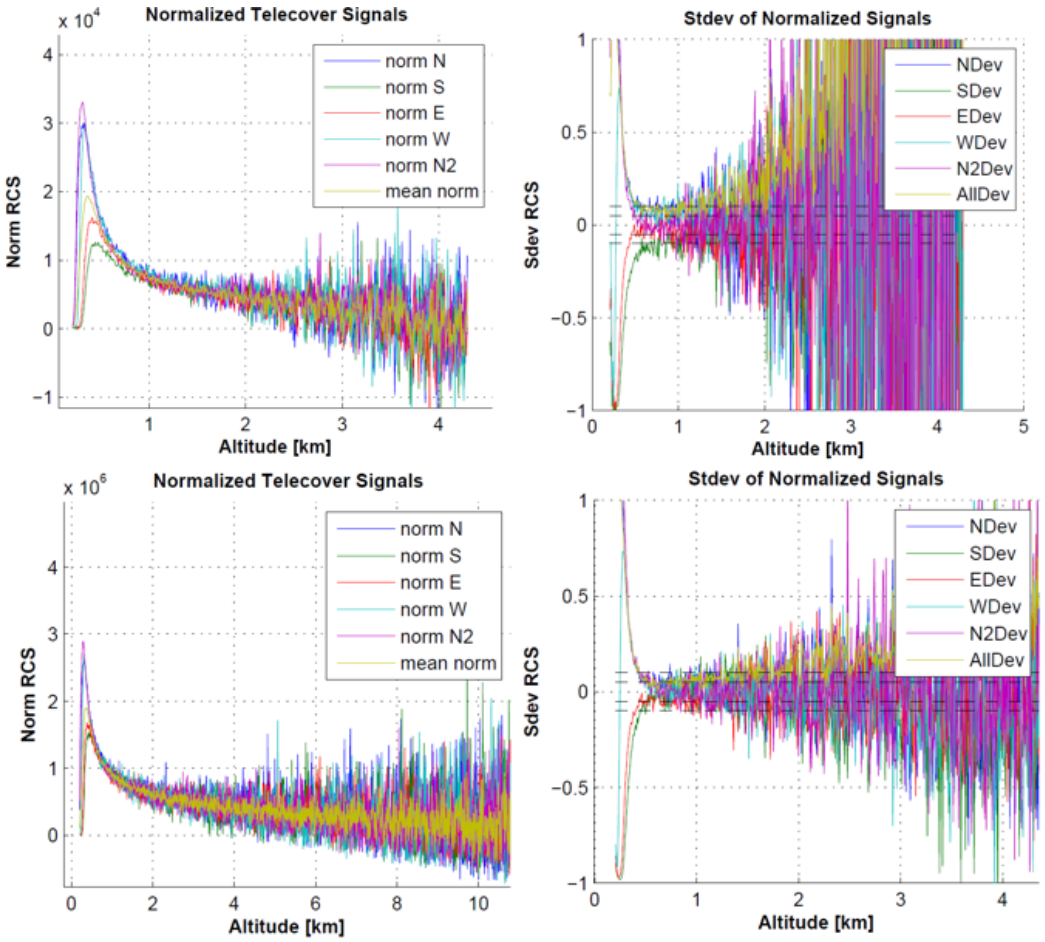
Εικόνα 3.3.5: (αριστερά) Κανονικοποιημένα ως προς τη μέση κατακόρυφη κατανομή, διορθωμένα ως προς την απόσταση σήματα στα 386nm (analog και photon). (δεξιά) Σχετική απόκλιση των σημάτων των τεσσάρων τομέων του τηλεσκοπίου στα 387nm (analog και photon).

Στην Εικόνα 3.3.6 (αριστερά) παρουσιάζονται τα κανονικοποιημένα -ως προς τη μέση-κατακόρυφη κατανομή σήματα των τεσσάρων τομέων του τηλεσκοπίου για τα 532 nm τόσο για το analog όσο και για το photon. Στην παρούσα περίπτωση παρατηρείται μικρή μεταβολή των ατμοσφαιρικών συνθηκών. Η περιοχή κανονικοποίησης των σημάτων επιλέχθηκε να είναι από τα 4 - 4.5 km και 5 – 6 km ύψος, αντίστοιχα (normalized).



Εικόνα 3.3.6: (αριστερά) Κανονικοποιημένα ως προς τη μέση κατακόρυφη κατανομή, διορθωμένα ως προς την απόσταση σήματα στα 532nm (analog και photon). (δεξιά) Σχετική απόκλιση των σημάτων των τεσσάρων τομέων του τηλεσκοπίου στα 532nm (analog και photon).

Στην Εικόνα 3.3.7 (αριστερά) παρουσιάζονται τα κανονικοποιημένα -ως προς τη μέση-κατακόρυφη κατανομή σήματα των τεσσάρων τομέων του τηλεσκοπίου για τα 607 nm τόσο για το analog όσο και για το photon. Στην παρούσα περίπτωση παρατηρείται μικρή μεταβολή των ατμοσφαιρικών συνθηκών. Η περιοχή κανονικοποίησης των σημάτων επιλέχθηκε να είναι από τα 1.5 - 2.4 km και 3.2 – 3.6 km ύψος, αντίστοιχα (normalized).



Εικόνα 3.3.7: (αριστερά) Κανονικοποιημένα ως προς τη μέση κατακόρυφη κατανομή, διορθωμένα ως προς την απόσταση σήματα στα 607nm (analog και photon). (δεξιά) Σχετική απόκλιση των σημάτων των τεσσάρων τομέων του τηλεσκοπίου στα 607nm (analog και photon).

Στις Εικόνες 3.3.4, 3.3.5, 3.3.6, 3.3.7 (δεξιά), παρουσιάζονται οι σχετικές διαφορές των σημάτων lidar για τις διαφορετικές περιοχές του τηλεσκοπίου λήψης. Από τα διαγράμματα αυτά και σύμφωνα με τα όρια της σχετικής απόκλισης που αναφέρθηκαν προηγουμένως, προκύπτει ότι η πλήρης επικάλυψη της δέσμης του laser με το οπτικό πεδίο του τηλεσκοπίου για το σύστημα lidar του ΕΜΠ παρατηρούμε ότι υπάρχει διαφορά της τάξης του 10% για τα 355, 387, 532 και 607 nm.

Το διαφορετικό ύψος της πλήρους επικάλυψης για τα τέσσερα μήκη κύματος του συστήματος οφείλεται στον διαφορετικό άξονα εκπομπής τους και στη διαφορετική οπτική διαδρομή που ακολουθούν μέσα στο φασματόμετρο. Και σύμφωνα με τα πρότυπα της EARLINET, η τυπική απόκλιση (Stdev) πρέπει να είναι μικρότερη είτε ίση με 10%.

Κεφάλαιο 4

Επεξεργασία δεδομένων lidar

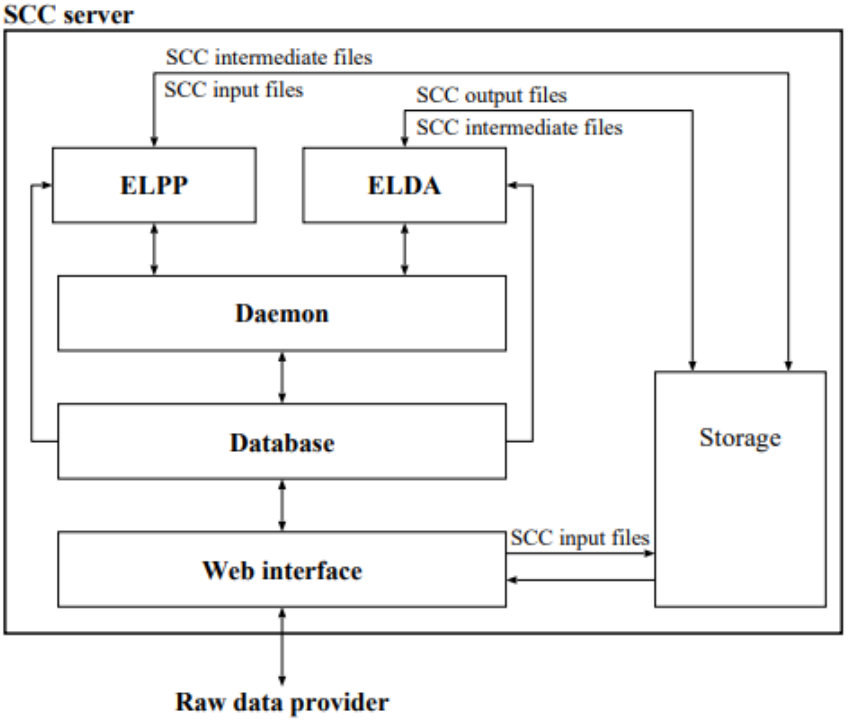
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο σταθμός EOLE lidar καθώς επίσης και ο σταθμός DEPOLE lidar του Ε.Μ.Π που συμμετέχουν στο Ευρωπαϊκό δίκτυο EARLINET πραγματοποιούν συστηματικές μετρήσεις κατά τις μεσημβρινές ώρες (13:00 UTC) και βραδινές ώρες (19:00 UTC) κάθε Δευτέρα και Πέμπτη. Επιπλέον, πραγματοποιούνται μετρήσεις όταν εμφανίζεται κάποιο ειδικό περιστατικό μεταφερόμενων αερολυμάτων (ηφαιστειακή τέφρα, καύση βιομάζας, ερημική σκόνη, βιομηχανική ρύπανση, κ.λ.π.).

Στο πλαίσιο αυτό, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να αναπτυχθούν κοινά, αυτοματοποιημένα εργαλεία ανάλυσης δεδομένων για όλους τους εταίρους του δικτύου EARLINET, ώστε να βελτιωθεί η ποιότητα και η ομοιογένεια των δεδομένων που παράγονται από το δίκτυο αυτό. Επιπλέον, η αυτοματοποιημένη ανάλυση δεδομένων προάγει τη διαθεσιμότητα των ατμοσφαιρικών παραμέτρων των αερολυμάτων σε πραγματικό χρόνο.

4.1 Ο κώδικας Single Calculus Chain (SCC)

Για την πλήρη εναρμόνιση της ανάλυσης δεδομένων και της ιχνηλάτησης των δεδομένων, αναπτύχθηκε το EARLINET Single Calculus Chain (SCC), ένα εργαλείο για την αυτόματη ανάλυση των δεδομένων lidar αιωρούμενων σωματιδίων.

Στην Εικόνα 4.1.1 παρουσιάζεται η δομή λειτουργίας (flowchart) του SCC , όπου φαίνεται η αλληλεπίδραση (interface) του SCC με τον εκάστοτε χρήστη, αλλά και με τη βάση δεδομένων του δικτύου EARLINET, όπου αποθηκεύονται τα προϊόντα της επεξεργασίας του SCC όπως είναι για παράδειγμα οι οπτικές ιδιότητες αερολυμάτων β_{aer} και α_{aer}.



Εικόνα 4.1.1: Η δομή λειτουργίας του Single Calculus Chain (D' Amico et al., 2015).

Η μονάδα ELPP (EARLINET Lidar PreProcessor), είναι η μία από τις δύο μονάδες του SCC και έχει στόχο την αυτόματη προ-επεξεργασία των δεδομένων lidar. Με τον όρο προ-επεξεργασία εννοούμε το σύνολο των λειτουργιών, οι οποίες πρέπει να εφαρμόζονται στα δεδομένα lidar πριν αυτά υποβληθούν προς επεξεργασία από το ELDA. Το ELPP έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί με δεδομένα lidar όλων των συστημάτων lidar του δικτύου EARLINET με έναν πλήρως αυτόματο τρόπο. Επιπλέον, το ELPP παρέχει τη δυνατότητα να ελέγχει την ποιότητα όλων των διαδικασιών διορθώσεων και επεξεργασίας δεδομένων.

Η εφαρμογή διαδικασιών πιστοποίησης ποιότητας σε επίπεδο προεπεξεργασίας και επεξεργασίας (Böckmann, C. et al., 2004; Pappalardo, G. et al., 2004; Freudenthaler, V., 2016) επιτρέπει την εφαρμογή ενός αυστηρού και ομοιογενούς προγράμματος διασφάλισης ποιότητας σχετικά με τα ανακτηθέντα δεδομένα από τα διάφορα συστήματα lidar με διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για ένα δίκτυο όπως το EARLINET, όπου η τυποποίηση των οπτικών προϊόντων των αερολυμάτων αποτελεί μία θεμελιώδη απαίτηση.

Η μονάδα SCC για την ανάκτηση των οπτικών ιδιοτήτων του αερολύματος από τα προ-επεξεργασμένα δεδομένα ονομάζεται ELDA (EARLINET Lidar Data Analyzer) και περιγράφεται λεπτομερώς από τους Mattis et al. (2016). Η μονάδα οπτικού επεξεργαστή της SCC (ELDA) ανακτά τις κατακόρυφες κατανομές των οπτικών ιδιοτήτων των

αερολυμάτων με βάση τα προεπεξεργασμένα σήματα lidar. Αυτά ομαδοποιούνται στους ακόλουθους τύπους προϊόντων αναφορικά με τα αιωρούμενα σωματίδια:

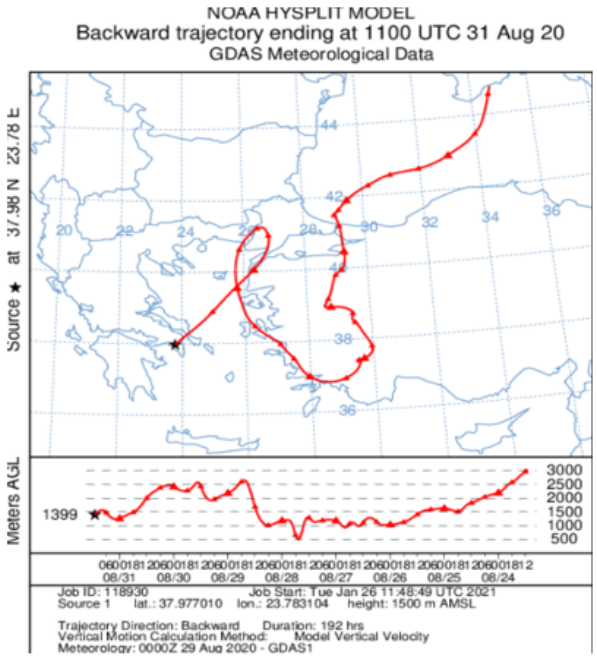
- **Ελαστικός συντελεστής οπισθοσκέδασης:** κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης, β_{aer}, των αιωρούμενων σωματιδίων ο οποίος προέρχεται από τα ελαστικά σήματα lidar.
- **Συντελεστής οπισθοσκέδασης Raman:** κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης των αιωρούμενων σωματιδίων, ο οποίος είναι αποτέλεσμα συνδυασμού ελαστικών σημάτων lidar και σημάτων Raman (Ansmann et al., 1992, Ferrare et al., 2001).
- **Συντελεστής εξασθένησης:** κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή εξασθένησης των αιωρούμενων σωματιδίων, α_{aer}, ο οποίος υπολογίζεται με τη μέθοδο Raman (Ansmann, 1992).

Η επεξεργασία των δεδομένων lidar, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα στατιστική μελέτη που θα παρουσιασθεί στο επόμενο κεφάλαιο, έγινε με τη χρήση του αυτοποιημένου εργαλείου SCC για τα δεδομένα του σταθμού lidar του Ε.Μ.Π.. Για το λόγο αυτό, δημιουργήσαμε ειδικό κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB, ο οποίος μετατρέπει τα δεδομένα lidar από αρχεία ascii σε αρχεία μορφής netcdf, ώστε να είναι συμβατά με τους μηχανισμούς ανάγνωσης του SCC.

4.2 Προσδιορισμός της πηγής προέλευσης των αιωρούμενων σωματιδίων

Για τον προσδιορισμό της πηγής προέλευσης των αιωρούμενων σωματιδίων σε συνδυασμό με τα δεδομένα lidar, χρησιμοποιούμε το Ατμοσφαιρικό μοντέλο HYSPLIT. Το HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα το οποίο υπολογίζει από τροχιές απλών πακέτων αέρα έως και πολύπλοκες προσομοιώσεις διασποράς και εναπόθεσης ρύπων. Αρχικά αναπτύχθηκε από τις κοινές προσπάθειες του Εθνικού Οργανισμού NOAA (National Oceanic and Atmosphere Administration) των ΗΠΑ και του Αυστραλιανού Γραφείου Μετεωρολογίας. Πρόσφατες αναβαθμίσεις του από διάφορους φορείς, περιλαμβάνουν βελτιώσεις στους αλγορίθμους που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς καθώς επίσης και στα γραφικά συστήματα που χρησιμοποιούνται για την οπτικοποίηση των μετρήσεων και αποτελεσμάτων.

Η διασπορά κάποιου ρύπου υπολογίζεται υποθέτοντας τον ως «φούσκα» (πακέτο αέριου ρύπου) ή ως σωματίδια. Στην πρώτη περίπτωση οι φούσκες διαρκούν ως έχουν, μέχρι το μέγεθός τους να υπερβεί (είτε οριζοντίως είτε καθέτως) τομέγεθος της κυψελίδας του χρησιμοποιούμενου από τα μετεωρολογικά δεδομένα πλέγματος. Στη συνέχεια χωρίζεται σε επί μέρους φούσκες εκ των οποίων κάθε μια περιλαμβάνει μέρος της μάζας του ρύπου. Στη δεύτερη περίπτωση ένας καθορισμένος αριθμός σωματιδίων μεταφέρεται εντός του χωρικού εύρους που καθορίζει το μοντέλο, κυρίως από ανέμους, και αυτά διασπείρονται εξαιτίας τυρβωδών ατμοσφαιρικών κινήσεων. Η αρχική διαμόρφωση του μοντέλου προϋποθέτει μια τριών διαστάσεων κατανομή των σωματιδίων.



Εικόνα 4.2.1: Παράδειγμα οπισθοτροχιάς των αερίων μαζών διάρκειας 192 ωρών που φτάνει πάνω από την Αθήνα στα 1.5 km όπως προσομοιώθηκε από το μοντέλο τροχιάς HYSPLIT, στις 31 Αυγούστου 2020, 11:00 UTC.

Στην εργασία χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο αυτό για τον υπολογισμό των οπισθοτροχιών (backtrajectory) των αερίων μαζών, δηλαδή της πορείας της οποίας ακολούθησαν για να φτάσουν σε κάποια τοποθεσία, στην περίπτωσή μας, πάνω από την Αττική.

4.3 Χαρακτηρισμός αιωρούμενων σωματιδίων

Μέχρι πρόσφατα, η ταυτοποίηση των στρωμάτων των αιωρούμενων σωματιδίων βασίζοταν, εκτός από τα δεδομένα lidar, σε ανάλυση οπισθοτροχιών αερίων μαζών, σε ατμοσφαιρικά μοντέλα (π.χ. Dream, 2012), καθώς επίσης και σε ανάκτηση δορυφορικών προϊόντων (π.χ.

MODIS dust and fire data, Giglio et al.(2013)), τα οποία θα ανεφερθούν παρακάτω, καθώς επίσης και σε επίγεια φωτομετρικά δεδομένα (Papayannis et al., 2005, 2008). Ως εκ τούτου, αναπτύχθηκε ένας βελτιωμένος αυτοματοποιημένος αλγόριθμος ταξινόμησης στρωματώσεων βασισμένος στην ταυτόχρονη ανάλυση οπισθοτροχιών αερίων μαζών και δορυφορικών δεδομένων. Ο αλγόριθμος, που ονομάζεται SCAN (Source Classification Analysis), βασίζεται στο χρονικό διάστημα που ξοδεύει η αέρια μάζα πάνω από μια ήδη χαρακτηρισμένη περιοχή πηγής αερολύματος και μια σειρά πρόσθετων κριτηρίων (Mylonaki et al., 2020).

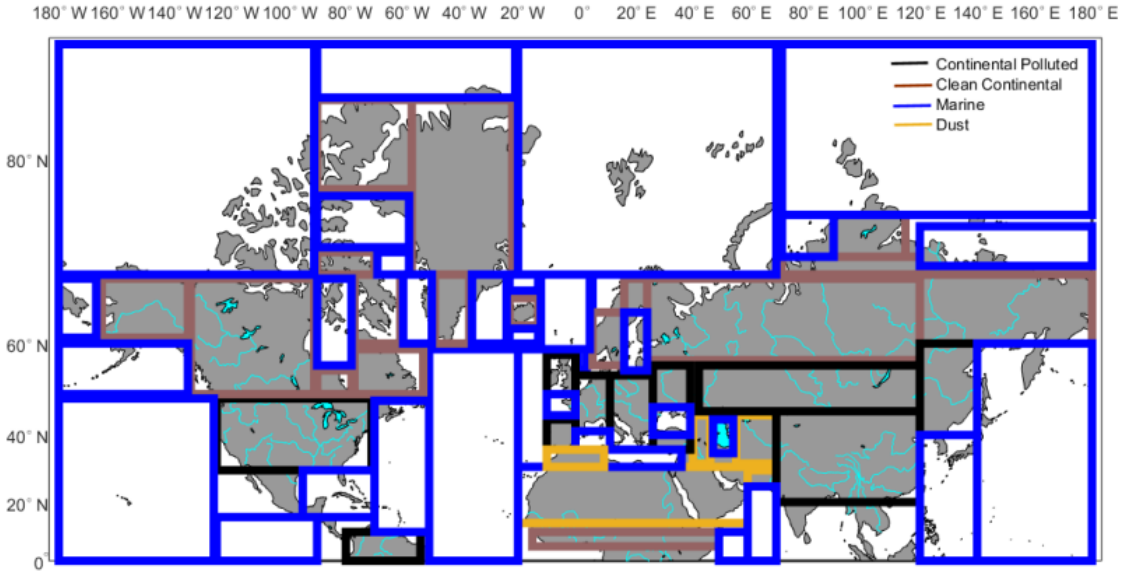
Το SCAN λοιπόν, είναι μια αυτοματοποιημένη διαδικασία ταξινόμησης των στρωμάτων των αιωρούμενων σωματιδίων που είναι ανεξάρτητη από τις οπτικές ιδιότητες και έχει αναπτυχθεί στη γλώσσα προγραμματισμού IDL. Για κάθε ταυτοποιημένη στρωμάτωση αιωρούμενων σωματιδίων μία X HYSPLIT οπισθοτροχιά (Draxler et al., 2013) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του χρόνου που διανύθηκε πάνω από προκαθορισμένες περιοχές πηγής αερολύματος πριν φτάσει πάνω από ένα σταθμό lidar στη συγκεκριμένη ημερομηνία και ύψος που παρατηρείται το στρώμα αερολύματος. Το X είναι ο αριθμός ωρών της οπισθοτροχιάς, ο οποίος μπορεί να αποφασιστεί από τον χρήστη στην αρχή της διαδικασίας.

Το SCAN προϋποθέτει συγκεκριμένες περιοχές (Εικόνα 5.2.1, χρωματιστά τετράγωνα: από τώρα και στο εξής αναφέρονται ως τομείς) από την άποψη των πηγών αερολύματος (Penning de Vries et al., 2015). Οι ρυπασμένες ηπειρωτικές περιοχές αντιπροσωπεύουν τις περιοχές με αυξημένη ανθρωπογενή δραστηριότητα σύμφωνα με τον μηνιαίο μέσο όρο του τροποσφαιρικού NO_2 από το GOME-2 (Georgloulias et al., 2019).

Λαμβάνοντας υπόψη τις πληροφορίες (γεωγραφικό πλάτος, μήκος και ύψος) από κάθε οπισθοτροχιά των αέριων μαζών από το HYSPLIT, το SCAN εφαρμόζει μια σειρά κριτηρίων:

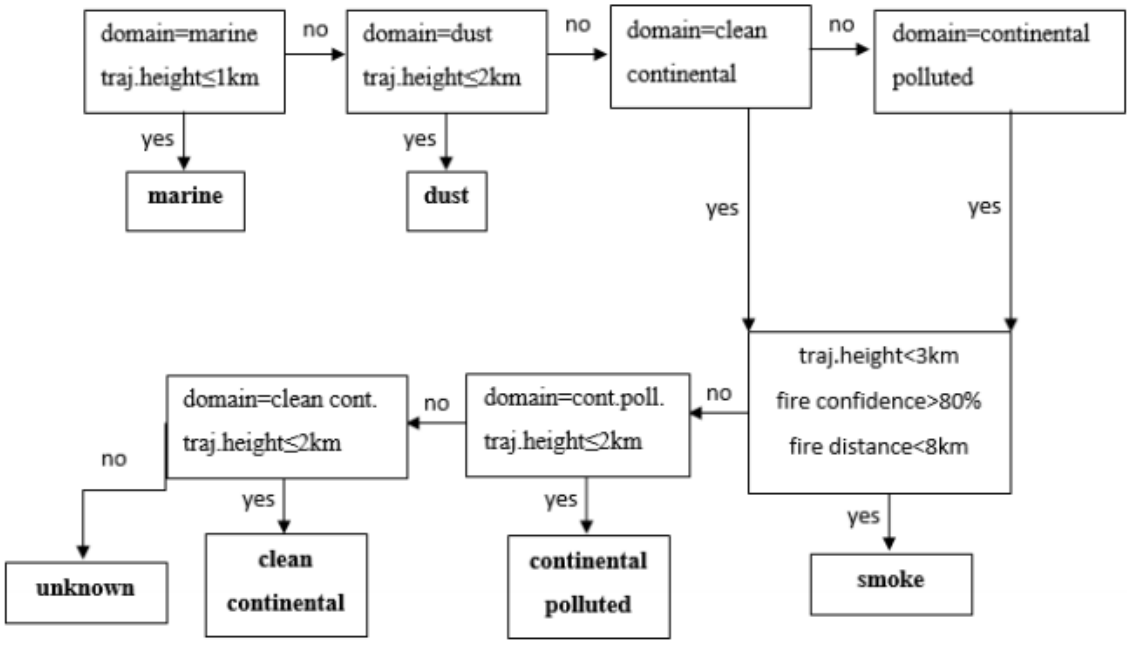
- εάν οι γεωγραφικές συντεταγμένες για τη συγκεκριμένη ώρα της οπισθοτροχιάς είναι εντός των ορίων των θαλάσσιων περιοχών και αν το ύψος αυτής της τροχιάς πάνω από τον τομέα είναι κάτω από 1 km (Wu et al., 2008; Ho et al., 2015), το SCAN εκχωρεί αυτό το στρώμα στον τύπο θαλάσσιου αερολύματος.
- εάν οι γεωγραφικές συντεταγμένες για τη συγκεκριμένη ώρα της οπισθοτροχιάς βρίσκονται εντός των ορίων των καθαρών ηπειρωτικών, ρυπασμένων ηπειρωτικών ή περιοχών σκόνης και εάν το ύψος αυτής της οπισθοτροχιάς είναι κάτω από 2 km πάνω από τον τομέα, η σάρωση εκχωρεί τη συγκεκριμένη ώρα στον καθαρό ηπειρωτικό, ρυπασμένο ηπειρωτικό ή τύπο αερολύματος σκόνης, αντίστοιχα.
- για μια ώρα που πρέπει να αποδοθεί στον τύπο αερολύματος καπνού, εκτός από τις συντεταγμένες της οπισθοτροχιάς σε αυτή τη συγκεκριμένη ώρα, η οποία θα πρέπει

να βρίσκεται εντός των ορίων των καθαρών ηπειρωτικών ή ρυπασμένων ηπειρωτικών περιοχών, το ύψος της τροχιάς σε αυτή τη συγκεκριμένη ώρα θα πρέπει να είναι κάτω από 3 km (Amiridis et al., 2010).



Εικόνα 4.3.1: Χάρτης ταξινόμησης τύπου πηγής αερολύματος του SCAN. Τα διαφορετικά έγχρωμα τετράγωνα αντιπροσωπεύουν διαφορετικές πηγές αερολύματος: τα πορτοκαλί τετράγωνα αντιστοιχούν σε σκόνη, τα μπλε τετράγωνα σε θαλάσσια, τα καφέ τετράγωνα σε καθαρές ηπειρωτικές και τα μαύρα τετράγωνα σε ρυπασμένες ηπειρωτικές πηγές αερολύματος.

Το SCAN αντλεί πληροφορίες ύπαρξης πυρκαγιάς από το Fire Information for Resource Management System (FIRMS) (https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov, χρησιμοποιώντας δεδομένα από ενεργές πυρκαγιές, μαζί με την τοποθεσία, το χρόνο και την τιμή εμπιστοσύνης (σε%) (Kaufman et al., 1998; Giglio et al., 2002; Davies et al., 2009; Justice et al., 2002) που προέρχεται από το φασματόμετρο απεικόνισης Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Η επιλεγμένη χρονική περίοδος είναι σύμφωνη με τις προσομοιώσεις του HYSPLIT (διάρκεια οπισθοτροχιάς αέριας μάζας). Σύμφωνα με το SCAN, ένα hotspot θεωρείται σημαντικό εάν η τιμή ¨εμπιστοσύνης' του MODIS είναι υψηλότερη από 80 % (Amiridis et al., 2010). Εκτός από τα παραπάνω κριτήρια, η τοποθεσία των οπισθοτροχιών της αέριας μάζας στη συγκεκριμένη ώρα πρέπει να απέχει μέγιστη απόσταση 8 km από ένα hotspot υψηλής εμπιστοσύνης, ώστε να αποδίδεται ως τύπος αερολύματος καπνού.



Εικόνα 4.3.2: Διαδικασία ταξινόμησης του SCAN. Αυτή η διαδικασία εκτελείται για κάθε ώρα της οπισθοτροχιάς που σχετίζεται με κάθε στρώμα (Mylonaki et al., 2020)

.

Το SCAN εκτελεί την παραπάνω διαδικασία ταξινόμησης για όλες τις οπισθοτροχιές αερίων μαζών και ως τελικό βήμα, μετράει τις ώρες που διέρχεται η αέρια μάζα πάνω από κάθε γεωγραφικό τομέα. Εάν εμπλέκονται περισσότεροι από ένας τομείς στην παρακολούθηση της διαδρομής της οπισθοτροχιάς, θεωρείται ότι πρόκειται για μείγμα περισσότερων του ενός τύπων αερολυμάτων. Στην περίπτωση που δεν πληρούνται τα προαναφερθέντα κριτήρια (περιορισμοί τομέα και ύψους), ο τύπος αερολύματος θεωρείται άγνωστος.

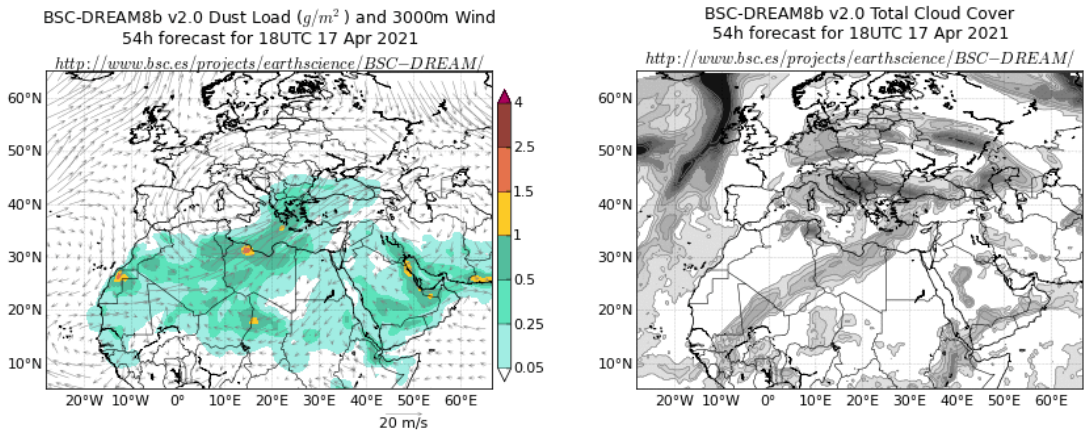
Ο μέγιστος αριθμός καθαρών τύπων αιώρουμενων σωματιδίων που μπορεί να εκχωρήσει το SCAN σε ένα στρώμα είναι έξι, και ο συνδυασμός τους δίνει στο SCAN τη δυνατότητα να εντοπίσει αερολύματα από διαφορετικές πηγές σε ένα συγκεκριμένο στρώμα. Η όλη διαδικασία ταξινόμησης του SCAN παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής στην Εικόνα 4.3.2.

4.4 Μοντέλο διασποράς σκόνης BSC/DREAM$_{8b}$

Το μοντέλο BSC/DREAM$_{8b}$ v2.0 (Dust REgional Atmospheric Model) (DREAM; Nickovic et al., 2001) (https://ess.bsc.es/bsc-dust-daily-forecast, Pérez et al., 2006; Basart et al., 2012) είναι ένα περιφερειακό μοντέλο, που σχεδιάσθηκε για να προσομοιώσει και να προβλέψει τον ατμοσφαιρικό κύκλο των αερολυμάτων σκόνης. Επιλύει τη μερική διαφορική μη γραμμική εξίσωση τύπου Euler για τη συνέχεια της μάζας

σκόνης και εισάγεται πλήρως ως μία από τις εξισώσεις πρόγνωσης στις εξισώσεις του ατμοσφαιρικού μοντέλου Eta/NCEP (National Centers for Environmental Prediction).

Το μοντέλο αυτό υπολογίζει τις ροές εκπομπής της σκόνης από την επιφάνεια της γης στα σημεία του πλέγματος του μοντέλου. Καθώς οι αέριες μάζες ανέρχονται στην ατμόσφαιρα, προσδιορίζεται η πορεία των σωματιδίων σκόνης μέσω των ατμοσφαιρικών παραμέτρων του μοντέλου (στροβιλισμός, πεδίο ανέμων, θερμοδυναμικές διεργασίες-βροχόπτωση, ανάγλυφο γήινης επιφάνειας), αποδίδοντας τελικά την ξηρή και υγρή εναπόθεση της σκόνης στην επιφάνεια της Γης.



Εικόνα 4.4.1: Παράδειγμα μεταφοράς σκόνης από την Σαχάρα στη Μεσόγειο και τα Βαλκάνια, όπως εκτιμάται από το μοντέλο BSC-DREAM, στις 17 Απριλίου 2021, 18:00 UTC. Αριστερά: Οπτικό βάθος σκόννης στα 550 nm και 3000 m άνεμος, δεξιά: συνολική νεφοκάλυψη.

Η χωρική ανάλυσή του του έχει οριστεί στα 50 km στο οριζόντιο επίπεδο περιλαμβάνει μια οριζόντια ανάλυση $0.3^o \times 0.3^o$ και σε 24 κατακόρυφα επίπεδα που εκτείνονται μέχρι περίπου τα 15 km ύψος και σε ημερήσιες προγνώσεις των 72-ωρών. Τα πεδία των μετεωρολογικών παραμέτρων αναπροσαρμόζονται κάθε 24 ώρες (12 UTC) ενώ οι οριακές συνθήκες ενημερώνονται κάθε 6 ώρες με χρήση δεδομένων από το NCEP GFS, με χωρική ανάλυση $0.5^o \times 0.5^o$.

Ο τομέας των προσομοιώσεων καλύπτει τις περιοχές της Βόρειας Αφρικής της Μέσης Ανατολής και την Ευρώπη, επιπλέον καλύπτει την έρημο Σαχάρα – Σαχέλ, την Ισπανία, τις Κανάριες Νήσοι και τον Ατλαντικό. Για την ανάλυσή μας χρησιμοποιήθηκε ο τομέας της Μέσης Ανατολής και της Ευρώπης.

4.5 Αλγόριθμος αναστροφής του υπολογιστικού πακέτου SphInX

Το λογισμικό εργαλείο SphInX (Spheroidal Inversion eXperiments) παρέχει μια αυτοματοποιημένη διαδικασία για τη διεξαγωγή υπολογισμών από δεδομένα lidar με σκοπό την απόκτηση των μικροφυσικών ιδιοτήτων αερολύματος και επιπλέον, για τη στατιστική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αναστροφής. Έχει αναπτυχθεί στο University of Potsdam (Samaras, 2016; Böckmann, 2002; Böckmann, 2005) στο πλαίσιο του προγράμματος Initial Training for atmospheric Remote Sensing (ITaRS) (2012–2016). Το λογισμικό SphInX δημιουργήθηκε για να διαχειριστεί μη σφαιρικά σωματίδια χρησιμοποιώντας μια δισδιάστατη (2D) γενίκευση του μοντέλου Mie και λαμβάνοντας υπόψη την προσέγγιση σφαιροειδούς-σωματιδίου. Ένα σφαιροειδές λαμβάνεται γεωμετρικά από μια εξέλιξη μιας έλλειψης περίπου ενός από τους κύριους άξονές του.

Δηλώνοντας τον ημι-δευτερεύοντα άξονα με το n και τον ημι-κύριο άξονα με το b, ο λόγος $\alpha = n/b$ μπορεί να χαρακτηρίσει τρία πιθανά σχήματα σωματιδίων: πεπλατησμένη σφαίρα ($\alpha < 1$), σφαίρα ($\alpha = 1$), ωοειδή σφαίρα ($\alpha < 1$). Οι κατανομές σωματιδίων είναι τα κύρια προϊόντα της κανονικοποιημένης αναστροφής, αλλά εδώ εξαρτώνται όχι μόνο από το μέγεθος (r) αλλά και από το σχήμα (α), γι΄ αυτό και αναφέρονται ως κατανομές μεγέθους σχήματος. Υπάρχουν αρκετές γνωστές μικροφυσικές παράμετροι καθώς και άλλες νέες παραμέτροι σχήματος που εισάγονται στο SphInX, οι οποίες μπορούν να υπολογιστούν γνωρίζοντας την κατανομή μεγέθους σχήματος όγκου.

Για τη μελέτη αυτή θα περιοριστούμε στις ακόλουθες παραμέτρους:

Η συνολική συγκέντρωση όγκου [$\mu m^3\ cm^{-3}$]:

$$u_t = \int_{\alpha_{min}}^{\alpha_{max}} \int_{r_{min}}^{r_{max}} u(r,\alpha)\, dr\, d\alpha \tag{4.1}$$

Η συγκέντρωση επιφανείας [$\mu m^3\ cm^{-3}$]:

$$\alpha_t = \int_{\alpha_{min}}^{\alpha_{max}} \int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{3}{\pi r^3} G(r,\alpha) u(r,\alpha)\, dr\, d\alpha \tag{4.2}$$

όπου η συνάρτηση G(r,α) υποδηλώνει τη σφαιροειδή γεωμετρική διατομή του σωματιδίου.

Η ενεργός (effective) ακτίνα [μm]:

$$R_{eff} = \frac{3u_t}{a_t} \tag{4.3}$$

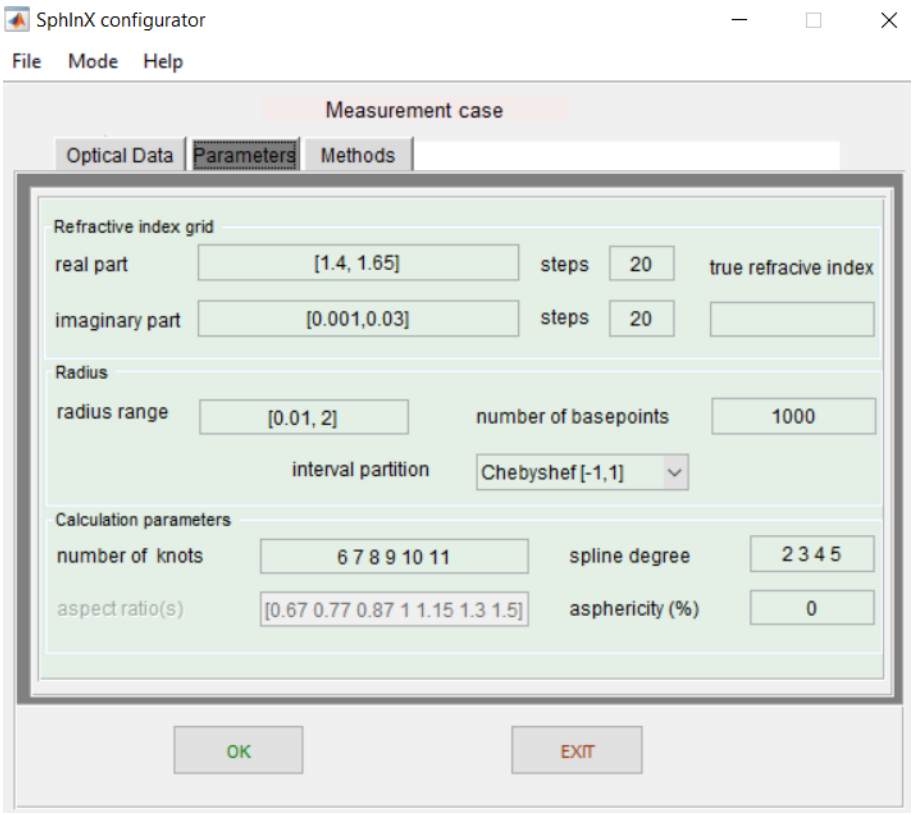
Σημειώνεται ότι το r εδώ παίζει το ρόλο μιας ακτίνας ενός πλασματικού σφαιρικού σωματιδίου με ίσο όγκο με το πραγματικό σφαιροειδές.

Το πακέτο λογισμικού αποτελείται από τρεις (κύριες) γραφικές διεπαφές χρήστη Graphical User Interfaces (GUI), που εξυπηρετούν διαφορετικούς σκοπούς.

Οι κατακόρυφες κατανομές των οπτικών δεδομένων των αιωρούμενων σωματιδίων που λαμβάνονται από τις ωριαίες κατά μέσο όρο κατακόρυφες κατανομές των οπτικών ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων που ανακτήθηκαν από τις μετρήσεις με το Raman lidar, χρησιμοποιούνται ως είσοδος για τις μικροφυσικές αναστροφές μας. Αυτό γίνεται με τον προσδιορισμό ορισμένων στρωμάτων στην ατμόσφαιρα και στη συνέχεια με τον μέσο όρο για την παραγωγή του συνόλου δεδομένων 6 σημείων, της λεγόμενης ρύθμισης $3\beta_{aer}+2\alpha_{aer}+ 1\delta_{aer}$. Αυτά τα λεπτά στρώματα επιλέγονται σε ύψη πάνω από το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, όπου οι τιμές των LR και AE μεταβάλλονται αργά και επίσης επικρατεί ομοιογένεια στην ατμόσφαιρα. Το επόμενο βήμα είναι να προσδιοριστούν οι αρχικές παράμετροι για την ανάκτηση χρησιμοποιώντας δοκιμές φυσικής γνώσης ή/και σταθερότητας αναστροφής.

Η τιμή του δείκτη διάθλασης complex refractive index (CRI) των αερολυμάτων τροφοδοτείται στο λογισμικό χωριστά για το πραγματικό και το φανταστικό μέρος, το οποίο στη συνέχεια αποτελεί ένα πλέγμα που συνδυάζει τις παρακάτω προεπιλεγμένες τιμές: πραγματικό μέρος (RRI) [1.4,1.65] και φανταστικό μέρος (IRI) [0.001,0.03]. Πρέπει επίσης να προκαθοριστεί ένα εύρος τιμών για την πραγματική ακτίνα (R_{eff}), το οποίο προκύπτει από τον λόγο της συνολικής συγκέντρωσης όγκου (u_t) και της συνολικής συγκέντρωσης επιφανείας (α_t), $r_{eff} = 3u_t/a_t$, στην συγκεκριμένες μετρήσεις επιλέξαμε radius range [0.01,2]. Στην Εικόνα 5.4.1 παρουσιάζονται οι παράμετροι που ανεφέραμε προηγουμένως και τις τιμές που θέσαμε στο λογισμικό SphInX.

Η μαθηματική μέθοδος σύγκλισης (μια από τις 5 διαθέσιμες) που έχει χρησιμοποιηθεί για τις περιπτώσεις της συγκεριμένης Διπλωματικής Εργασίας είναι η Tikhonov GCV (Tikhonov & Arsenin, 1977). Η ακτίνα είναι από 0.001 έως 2 μm, υπόθεση για fine mode σφαιρικά σωματίδια και τέλος, έχει χρησιμοποιηθεί η ρύθμιση $3\beta_{aer}+2\alpha_{aer}$.



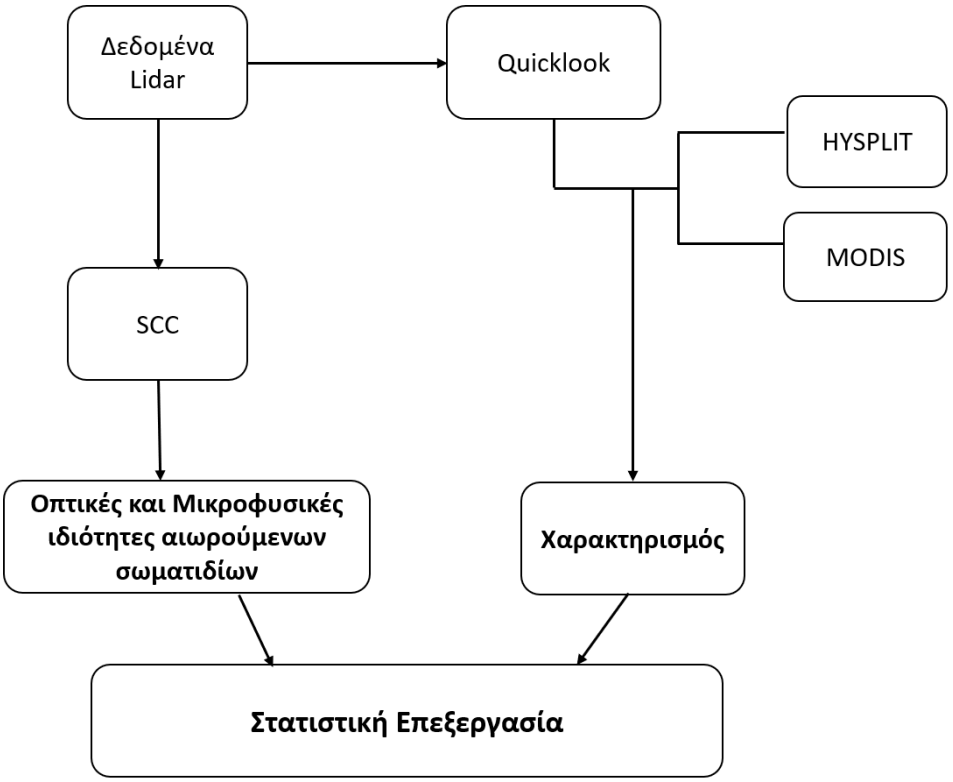
Εικόνα 4.5.1: Οι παράμετροι που θέσαμε στο λογισμικό SphInX.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην συγκεκριμένη Διπλωματική Εργασία είναι οι τιμές του πραγματικού (RRI) και φανταστικού μέρους του δείκτη διάθλασης (IRI) καθώς και του συντελεστή λευκαύγειας (SSA) στα 355 nm και η ενεργός ακτίνα R_{eff}.

4.6 Μεθοδολογία επεξεργασίας δεδομένων

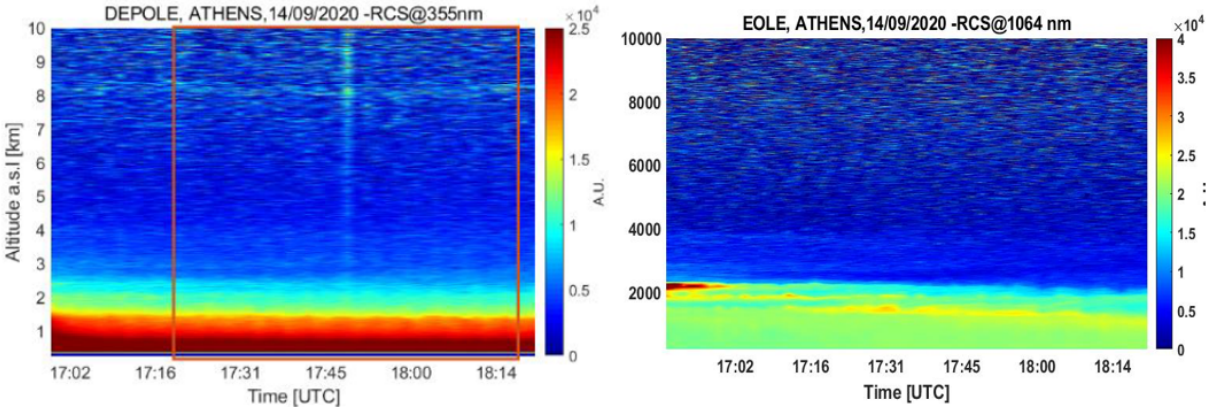
Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν 14 ενδιαφέρουσες περιπτώσεις που αντιστοιχούν σε πρωϊνές ή/και βραδινές μετρήσεις lidar. Για όλες αυτές τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν τα έτη 2020 και 2021, δημιουργήσαμε τις αντίστοιχες εικόνες οι οποίες παρουσιάζουν τη χωρο-χρονική μεταβολή του διορθωμένου (από την απόσταση και το θόρυβο του ατμοσφαιρικού υποβάθρου) σήματος lidar στα 1064 και 355 nm (quicklook). Βασιζόμενοι σε παρόμοιες απεικονίσεις, εξετάσαμε την ύπαρξη ή μη μιας ή περισσότερων στρωματώσεων αιωρούμενων σωματιδίων.

Συνοπτικά, δημιουργήσαμε ένα διάγραμμα ροής (flowchart), το οποίο αναπαριστά την μεθοδολογία της μελέτης των αιωρούμενων σωματιδίων στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.



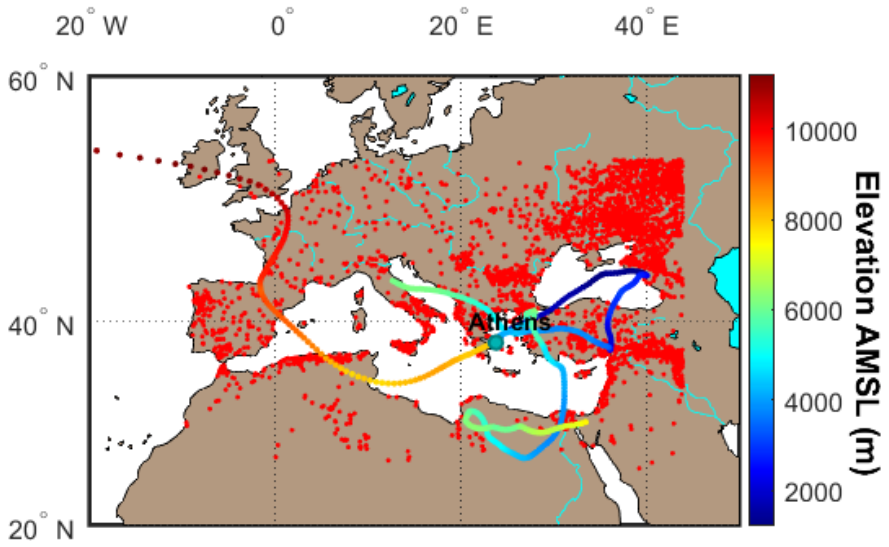
Εικόνα 4.6.1: Η μεθοδολογία (flowchart) της μελέτης των αερολυμάτων στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Ένα τυπικό παράδειγμα μετρήσεων είναι η 14η Σεπτεμβρίου 2020. Ενδεικτικά, αναφερουμε ότι στην Εικόνα 4.6.2 εμφανίζονται στρωματωσεις αερολυματων στα ύψη 1.9, 4.0 και 8.0 km.



Εικόνα 4.6.2: Χωρο-χρονική μεταβολή του διορθωμένου σήματος lidar για την περίπτωση τις 14 Σεπτεμβρίου 2020, (αριστερά): στα 355 nm και (δεξιά): στα 1064 nm.

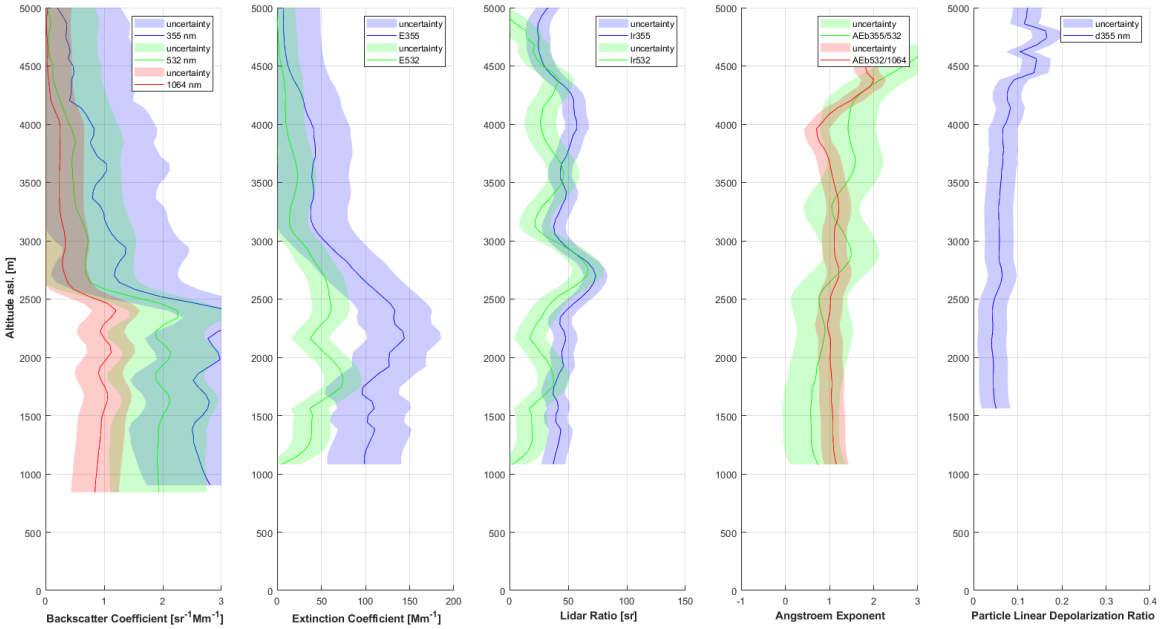
Στη συνέχεια, «τρέξαμε» το μοντέλο HYSPLIT, σε χρονικό βάθος 240 ωρών, λαμβάνοντας υπόψη τα ύψη εμφάνισης της κάθε στρωμάτωσης. Ενδεικτικά, στην Εικόνα 4.6.3 παρουσιάζονται οι οπισθοτροχιές των άεριων μαζών που κατέφθασαν πάνω από την Αθήνα στα 1.9, 4.0 και 8.0 km στις 14 Σεπτεμβρίου 2020.



Εικόνα 4.6.3: Οπισθοτροχιές των αερίων μαζών χρονικής διάρκειας 144 ωρών που καταφθάνουν πάνω από την Αθήνα στα 1.9, 4.0 και 8.0 km km στις 14 Σεπτεμβρίου 2020. Οι κόκκινες κουκίδες αντιπροσωπεύουν ενεργές πυρκαγιές που ανακτώνται από τον αισθητήρα MODIS.

Η επεξεργασία των μετρήσεων lidar που ελήφθησαν από το σταθμό lidar του Ε.Μ.Π. για τις 14 αυτές περιπτώσεις, όπως έχει ήδη αναφερθεί, έγιναν με το αυτοματοποιημένο εργαλείο SCC. Η ανάγνωση των προϊόντων όπως προκύπτουν από το SCC (β_{aer} και α_{aer}) καθώς και ο υπολογισμών των οπτικών ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων λόγος lidar (lidar Ratio - LR), ο συντελεστής αποπόλωσης (PLDR) και εκθέτης ο Angstrom (Angstrom exponent - AE), έγινε με ειδικό κώδικα τον οποίο δημιουργήσαμε σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB.

Πιο συγκεκριμένα, παραθέτουμε στην Εικόνα 4.6.4 τις οπτικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων οι οποίες υπολογίσθηκαν από το αυτοποιημένο εργαλείο SCC για τις 14 Σεπτεμβρίου 2020, τόσο για το σύστημα DEPOLE όσο και για το EOLE. Υπολογίζουμε έτσι, τον συντελεστή οπισθοσκέδασης b_{355} καθώς επίσης και τον συντελεστή αποπόλωσης PLDR, τις παραμέτρους $A_{b355/532}$, $A_{b532/1064}$, $A_{e355/532}$, LR_{355} και LR_{532} και τέλος τον συντελεστή οπιθσοκέδασης για το μήκος κύματος 355 nm b_{355}.



Εικόνα 4.6.4: (αριστερά) Κατακόρυφη κατανομή b_{aer} $(Mm^{-1}\ sr^{-1})$ και PLDR στα 355 nm, όπως παρατηρείται από το σύστημα DEPOLE lidar (17:19-18:19 UTC). Το ορθογώνιο με μπλε σκιά αντιπροσωπεύει τα γεωμετρικά όρια του μελετώμενου στρώματος αερολύματος.· (δεξιά) Οπτικές ιδιότητες αιωρούμενων σωματιδίων όπως υπολογίστηκαν από το σύστημα EOLE (16:49-17:40 UTC) στις 14 Σεπτεμβρίου 2020 πάνω από την Αθήνα.

Στον Πίνακα 4.6.1 συνοψίζουμε τις μέσες τιμές και τις τυπικές αποκλίσεις των παραμέτρων $A_{b355/532}$, $A_{b532/1064}$, LR_{355} και LR_{532}, PLDR, b_{aer} στα 355 nm για τις ανιχνευθείσες στρωματώσεις αιωρούμενων σωματιδίων από τα συστήματα EOLE lidar και DEPOLE lidar στις 14 Σεπτεμβρίου 2020.

Layer [km]	**b_{355}[$Mm^{-1}sr^{-1}$]**	**$A_{b355/532}$**	**$A_{532/1064}$**	**LR_{355} [sr]**	**LR_{532} [sr]**	**PLDR (%)**
1.9	2.83±0.15	0.77±0.06	1.03±0.01	45±2	30±6	4.38±0.19
4.0	0.75±0.09	1.45±0.03	0.87±0.18	55±2	28±2	6.67±0.10
8.0	0.40±0.16	1.02±0.04	0.92±0.15	49±6	26±6	19.01±1.02

Πίνακας 4.6.1: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση για δύο παρατηρούμενες στρωματώσεις αιωρούμενων σωματιδίων που ανιχνεύθηκαν από το EOLE lidar και το DEPOLE lidar πάνω από την Αθήνα στις 14 Σεπτεμβρίου 2020.

Κεφάλαιο 5

Ανάλυση δεδομένων lidar

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η παρουσίαση των οπτικών ιδιοτήτων των διαφόρων τύπων αερολυμάτων και των μειγμάτων τους που παρατηρούνται στην πόλη των Αθηνών από το σύστημα EOLE lidar κατά τη χρονική περίοδο 2020 - 2021.

Ο χαρακτηρισμός αερολύματος βασίσθηκε στην ανάλυση τροχιών των αερίων μαζών που παρέχεται από το Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model (HYSPLIT; Draxler, 1998) και οι αντίστοιχες πληροφορίες για τα σημεία πυρκαγιάς δόθηκαν από το σύστημα Fire Information for Resource Management System (FIRMS) και τον δορυφόρο MODIS (Giglio et al., 2013), τα οποία θα αναλύσουμε περαιτέρω παρακάτω. Επιπλέον, θα αναφερθούμε και στο μοντέλο διασποράς σκόνης BSC/DREAM$_{8b}$ (Basart et al., 2012), το οποίο προσομοιώνει και να προβλέπει τον ατμοσφαιρικό κύκλο των αερολυμάτων σκόνης.

Οι κατακόρυφες κατανομές των οπτικών ιδιοτήτων αερολύματος ανακτήθηκαν χρησιμοποιώντας των κώδικα Single Calculus Chain (SCC) που περιγράφεται από τους D'Amico et al., (2016) and Mattis et al., (2016). Οι στρωματώσεις των αερολυμάτων προέκυψαν από μια πρόσφατα δημοσιευμένη μέθοδο βασισμένη στην επεξεργασία εικόνας των σημάτων lidar (Maroufidis et al., 2020).

5.1 Πειραματικά στατιστικά αποτελέσματα

Συνολικά μελετήθηκαν 24 περιπτώσεις στρωματώσεων αιωρούμενων σωματιδίων και διαχωρίσαμε αυτές τις περιπτώσεις σε 4 κατηγορίες που προέκυψαν από το μοντέλο SCAN.

Οι ημερομηνίες των 24 περιπτώσεων παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β΄. Κάθε γραμμή αποτελεί μία διαφορετική περίπτωση. Δίπλα σε κάθε ημερομηνία αναγράφεται η κατηγορία

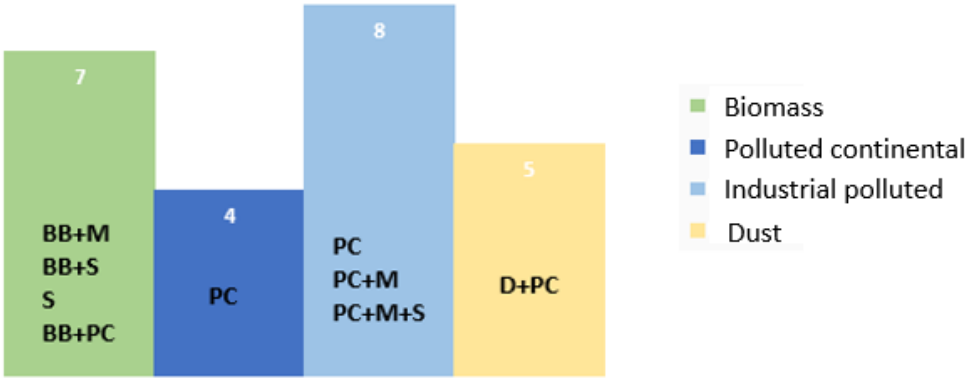
στην οποία κατατάχθηκε η περίπτωση ανάλογα με το είδος της πρόσμιξης που τη χαρακτηρίζει (PC: ρυπασμένα ηπειρωτικά αερολύματα BB+PC: καύση βιομάζας και ρυπασμένα ηπειρωτικά αερολύματα, S: καπνός, BB+M: καύση βιομάζας και θαλάσσια αερολύματα, BB+S: καύση βιομάζας και σκόνη, PC+M: ρυπασμένα ηπειρωτικά και θαλάσσια αερολύματα, PC+M+S: ρυπασμένα ηπειρωτικά αερολύματα, θαλάσσια αερολύματα και καπνός, D+PC: ερημικά και ρυπασμένα ηπειρωτικά αερολύματα).

Στην πρώτη κατηγορία, επιλέξαμε στρωματώσεις οι οποίες περιέχουν αιωρούμενα σωματίδια από καύση βιομάζας ή πρόσμιξη αυτών με αιωρούμενα σωματίδια άλλης προέλευσης (θαλάσσια, ηπειρωτικά ή ερημικά).

Στην δεύτερη κατηγορία επιλέξαμε στρωματώσεις αερολυματων σε περιπτώσεις χαρακτηριστικών δομών του ΑΟΣ - PBL, το οποίο θα αναλυθεί περαιτέρω στο Παράρτημα Α) και γενικά αποτελούνται από αιωρούμενα σωματίδια διαφορετικών προελεύσεων, στις μετρήσεις μας όμως στην κατηγορία αυτή, βρέθηκαν μόνο ρυπασμένα ηπειρωτικά αιωρούμενα σωματίδια (polluted continental).

Στην τρίτη κατηγορία, επιλέξαμε στρωματώσεις οι οποίες περιέχουν αιωρούμενα σωματίδια που προέρχονται από την Μαύρη Θάλασσα ή πρόσμιξη αυτών με αιωρούμενα σωματίδια άλλης προέλευσης (θαλάσσια, ηπειρωτικά ή ερημικά). Επειδή γύρω από την Μαύρη Θάλασσα βρίσκονται βιομηχανικές περιοχές (π.χ. Κωνσταντινούπολη), τα σωματίδια εκεί είναι κυρίως βιομηχανικά ρυπασμένα αιωρούμενα σωματίδια (industrial polluted).

Τέλος, στην τέταρτη κατηγορία, επιλέξαμε μια ημέρα (12/4/21) που υπάρχουν στρωματώσεις με στρωματώσεις οι οποίες περιέχουν αιωρούμενα σωματίδια σκόνης που προέρχονται από την Αφρική.



Πίνακας 5.1.1: Κατηγοριοποίηση των αιωρούμενων σωματιδίων αναφορικά με την πηγή προέλευσής τους για τις 4 κατηγορίες.

Η ταξινόμηση των αιωρούμενων σωματιδίων για αυτή τη Διπλωματική Εργασία βασίστηκε στη μεθοδολογία που περιγράφηκε πρόσφατα από τους Mylonaki et al., (2020) και στην παράγραφο 4.3, όπου εισαγάγαμε μια αυτοματοποιημένη μέθοδο ταξινόμησης τύπου αερολύματος η οποία βασίζεται στα προαναφερθέντα ¨εργαλεία' (διαχωρισμός στρώματος, HYSPLIT, MODIS), για να χαρακτηρίσουμε ένα στρώμα αερολύματος. Επιπλέον, βασίζεται σε προκαθορισμένες γεωγραφικές περιοχές σύμφωνα με τα αερολύματα που παρατηρούνται συχνότερα στο ΑΟΣ αυτών των περιοχών.

Έτσι, κάθε περιοχή στο χάρτη είναι μια περιοχή πηγής ενός συγκεκριμένου τύπου αερολύματος. Οι γεωγραφικές περιοχές στο χάρτη και οι πληροφορίες των οπισθοτροχιών και των πιθανών περιοχών πυρκαγιάς όπως καταγράφονται από τον MODIS συνδυάζονται με αποτέλεσμα την ταξινόμηση των αερολυμάτων.

Στο πλαίσιο αυτής τη εργασίας υπολογίσαμε, επίσης, τις μέσες τιμές και την τυπική απόκλιση των μικροφυσικών ιδιοτήτων των αερολυμάτων για κάθε μελετούμενη περίπτωση, όπως εκτιμήθηκαν από τον αλγόριθμο αντιστροφής του υπολογιστικού πακέτου SphInX για όλες τις περιπτώσεις καθεμιάς από τις τέσσερις κατηγορίες.

Ο Πίνακας 5.1.2 συνοψίζει τις μέσες τιμές και την τυπική απόκλιση των οπτικών και μικροφυσικών ιδιοτήτων των αερολυμάτων των τεσσάρων κατηγοριών, όπως προέκυψαν από τη συγκεκριμένη μελέτη.

Παράμετροι		Κατηγορίες			
		Biomass	PBL	Black Sea	Dust
Οπτικές ιδιότητες	b_{355} [$Mm^{-1} sr^{-1}$]	1.76±0.15	2.93±0.37	1.14±0.12	1.004±0.178
	δ_{355}	3.78±0.60	2.53±0.35	4.64±0.57	12.53±2.74
	LR_{355} [sr]	50±4	49±4	54±6	45±11
	LR_{532} [sr]	33±8	29±7	48±9	40±7
	LR_{355} / LR_{355}	1.17±0.40	1.72±0.6	1.13±0.68	1.12±0.88
	$A_{b355/532}$	1.16±0.09	1.085±0.07	1.25±0.12	0.51±0.30
	$A_{e355/532}$	2.41±0.78	2.44±0.44	1.94±0.51	0.07±1.03
	e_{355} [Mm^{-1}]	160±17	135±36	58±10	61±17
Μικροφυσικές ιδιότητες	R_{eff} (μm)	0.12±0.015	0.13±0.02	0.133±0.007	-
	RRI	1.54±0.02	1.55±0	1.52±0.02	-
	IRI	0.007±0.0065	0.003±0.0003	0.008±0.004	-
	SSA_{532}	0.965±0.035	0.98±0.02	0.63±0.03	-
	SSA_{355}	0.965±0.04	0.98±0.02	0.627±0.03	-

Πίνακας 5.1.2: Μέσες τιμές οπτικών και μικροφυσικών ιδιοτήτων των τεσσάρων κατηγοριών μαζί με την τυπική απόκλιση (SD). Μηδενική τιμή SD δείχνει μη-μεταβλητότητα στην αντίστοιχη ανακτημένη παράμετρο.

Ο Πίνακας 5.1.3 συνοψίζει τις μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις των οπτικών ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων για τις 4 κατηγορίες: Biomass, Continental polluted, Industrial polluted, Dust.

	Biomass	Continental poll.	Industrial poll.	Dust
b_{355} [Mm^{-1} sr^{-1}]	1.76±0.15	2.92±0.37	1.14±0.12	1.15±0.18
b_{532} [Mm^{-1} sr^{-1}]	1.04±0.08	1.90±0.19	0.70±0.04	1.15±0.13
b_{1064} [Mm^{-1} sr^{-1}]	0.57±0.06	0.86±0.09	0.34±0.03	0.62±0.08
$A_{b355/532}$	1.16±0.08	1.08±0.07	1.25±0.12	0.09±0.30
$A_{b532/1064}$	0.89±0.06	1.18±0.02	1.11±0.04	0.95±0.08
$A_{e355/532}$	2.41±0.78	2.44±0.44	1.94-0.14i±0.51	0.07±1.03
e_{355} [Mm^{-1}]	160±17	135±36	58±10	61±17
e_{532} [Mm^{-1}]	62±12	51±13	27±5	58±9
LR_{355} [sr]	50±4	50±4	54±6	45±11
LR_{532} [sr]	33±8	29±7	48±9	40±7
LR_{355}/ LR_{532}	1.53±0.5	1.72±0.60	1.11±0.62	1.12±1.63
PLDR (%)	4.32±0.58	2.53±0.35	4.64±0.57	16.69±2.74

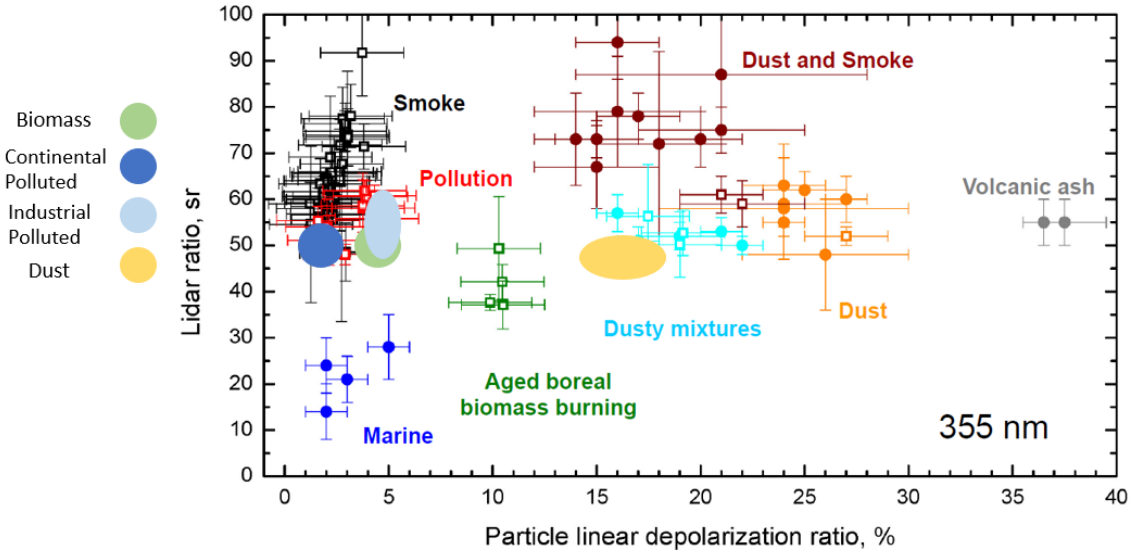
Πίνακας 5.1.3: Τιμές και τυπικές αποκλίσεις των οπτικών ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων για τις 4 κατηγορίες: Biomass, Continental polluted, Industrial polluted, Dust.

Όσον αφορά τις οπτικές ιδιότητες των αερολυμάτων, οι συνιστώσες b_{355} και e_{355} λαμβάνουν χαμηλότερες τιμές για τις κατηγορίες Dust και Industrial polluted (1.004±0.178 $Mm^{-1}sr^{-1}$, 61±17 Mm^{-1} και 1.14±0.12 $Mm^{-1}sr^{-1}$, 58±10 Mm^{-1}, αντίστοιχα) και μεγαλύτερες τιμές (2.93±0.37 $Mm^{-1}sr^{-1}$, 160±17 Mm^{-1} και 1.76±0.15 $Mm^{-1}sr^{-1}$, 160±17 Mm^{-1}) για την κατηγορία Continental polluted και Biomass, αντίστοιχα. Οι μεγαλύτερες τιμές των δ_{p355} (0.13±0.03), υποδεικνύουν το μη σφαιρικό

σχήμα των στρωμάτων σκόνης που διέρχεται από τη Σαχάρα (Freudenthaler et al., 2009) της αντίστοιχης κατηγορίας Dust. Παρατηρούμε επίσης ότι οι τιμές των LR_{355} και LR_{532} είναι μεγαλύτερες για την κατηγορία Industrial polluted, κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο καθώς στην συγκεκριμένη κατηγορία επικρατεί κατάσταση ανάμειξης των στρωματώσεων από σωματίδια αστικής/ηπειρωτικής προέλευσης, τα οποία γνωρίζουμε όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6.1 ότι λαμβάνουν μεγάλες τιμές LR. Παρατηρείται επίσης ότι η αναλογία του λογού lidar στα δύο μήκη κύματος, δηλαδή ο λόγος LR_{355}/LR_{532} συγκλίνει στη μονάδα για την κατηγορία Dust. Τέλος, για την ίδια κατηγορία παρατηρούμε ότι οι παράμετροι $A_{e355/532}$, $A_{b355/532}$ τείνουν στο μηδέν λαμβάνοντας μια μέση τιμή ίση με 0.07 ± 1.03 και 0.51 ± 0.30, αντίστοιχα.

Βάσει της κατηγοριοποίησης που προηγήθηκε βασιζόμενη σε ένα αερομεταφερόμενο σύστημα High Spectral Resolution Lidar (HSRL) που προτάθηκε από τους Groß et al. (2013), αναπαραστήσαμε γραφικά τις παραμέτρους LR_{355} και δ_{p355} και εντοπίσαμε τις 4 κατηγορίες που αναφέραμε προηγουμένως (Εικόνα 5.1.1).

Η πρώτη κατηγορία (πράσινα σημεία - Biomass) αντιπροσωπεύει μια κατάσταση ανάμειξης σωματιδίων καύσης βιομάζας, αερολύματα αστικής/ηπειρωτικής και θαλάσσιας προέλευσης καθώς επίσης και καπνό και χαρακτηρίζεται από μικρή διασπορά μέσων τιμών LR_{355} και πολύ μικρές μέσες τιμές δ_{p355} (45 sr $\leq LR_{355} \leq$ 55 sr, 0.02 $\leq \delta_{p355} \leq$ 0.04). Η δεύτερη κατηγορία, (μπλε σημεία - Continental polluted) αποδίδεται σε στρωματώσεις με σωματίδια αποκλειστικά αστικής/ηπειρωτικής προέλευσης, (50 sr $\leq LR_{355} \leq$ 51 sr, 0,02 $\leq \delta_{p355} \leq$ 0.03). Η τρίτη κατηγορία (γαλάζια σημεία - Industrial polluted) αποδίδεται σε μια κατάσταση ανάμειξης, όπου κυριαρχούν τα σωματίδια αστικής/ηπειρωτικής προέλευσης, αλλά υπάρχουν και αερολύματα θαλάσσιας προέλευσης καθώς επίσης και καπνός , (48 sr $\leq LR_{355} \leq$ 62 sr, 0.01 $\leq \delta_{p355} \leq$ 0.09). Τέλος, η τέταρτη κατηγορία (κίτρινα σημεία - Dust), αντιπροσωπεύει μια κατάσταση ανάμιξης σκόνης Σαχάρας και σωματιδίων αστικής/ηπειρωτικής προέλευσης (44 sr $\leq LR_{355} \leq$ 45 sr, 0.13 $\leq \delta_{p355} \leq$ 0.19).



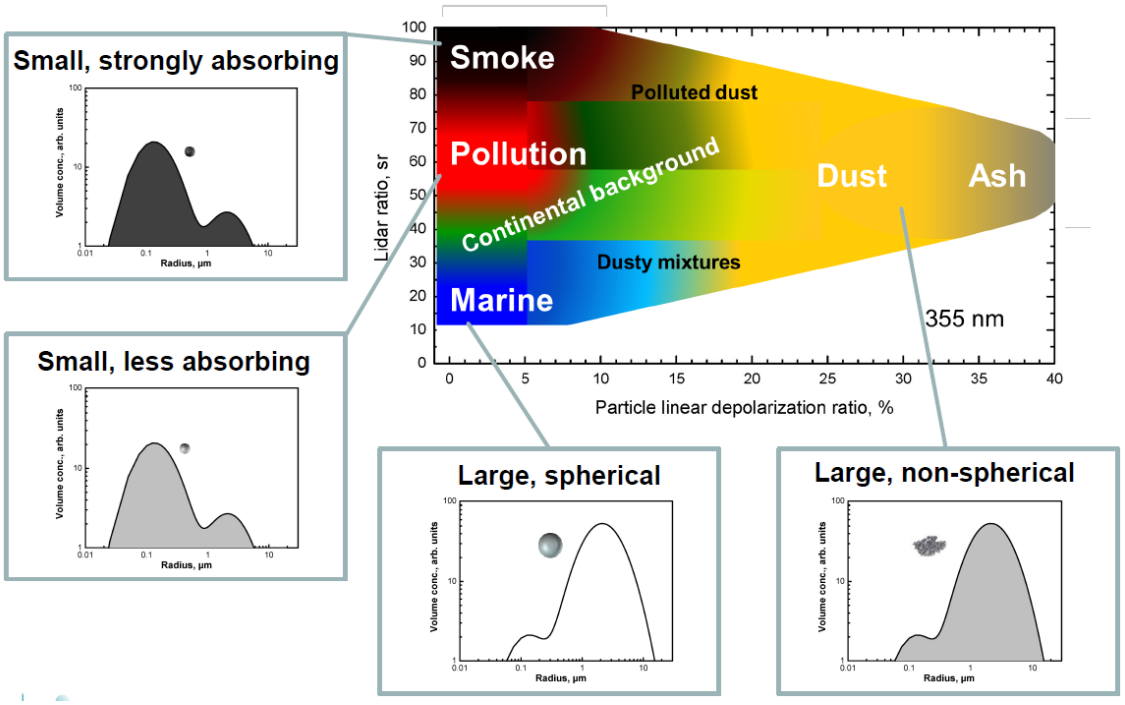
Εικόνα 5.1.1: Ζεύγος τιμών LR_{355} και δ_{p355} από μετρήσεις HSRL όπως παρουσιάσθηκαν από τους Groß et al. (2013), (σύμβολα ρόμβου και γραμμές σφάλματος) παράλληλα με τις επιλεγμένες μετρήσεις των τεσσάρων κατηγοριών (χρωματιστές κουκκίδες).

Τα όρια των κατηγοριών όσον αφορά, κυρίως, την παράμετρο αποπόλωσης δ_{p355}, συμπεριλαμβανομένης της τυπικής απόκλισης, δεν είναι σαφώς καθορισμένα και διακριτά αλλά αλληλεπικαλύπτεται δείχνοντας μια ρεαλιστική μετάβαση από τη μία κατηγορία στην άλλη, γεφυρώνοντας τα κενά της HSRL κατηγοριοποίησης.

Δεδομένου ότι η κάθε κατηγορία αποτελείται από τις προσμίξεις αιωρούμενων σωματιδίων, συμπεραίνουμε ότι οι τιμές που λάβαμε από τις μετρήσεις μας συμφωνούν με αυτές της Βιβλιογραφίας.

Έτσι, η κατηγορία Biomass λαμβάνει τη μικρότερη μέση τιμή ενεργούς ακτίνας(R_{eff} = 0.120 ± 0.015 μm) λόγω του εκ φύσεως μικρότερου μεγέθους των αερολυμάτων καύσης βιομάζας, ενώ ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές παρουσιάζονται για τις άλλες τρεις κατηγορίες αερολυμάτων. Οι τιμές του πραγματικού (RRI) και φανταστικού μέρους του δείκτη διάθλασης (IRI) καθώς και του συντελεστή λευκαύγειας (SSA) στα 355 και 532 nm ήταν παρόμοιες και για όλες τις κατηγορίες.

Τα αποτελέσματα των μικροφυσικών ιδιοτήτων είναι σε συμφωνία με αυτά που αναφέρονται στη μελέτη των Holzer-Popp et al. (2013) και Wandinger et al. (2016) και παρουσιάζονται στην Στην Εικόνα 5.1.2.

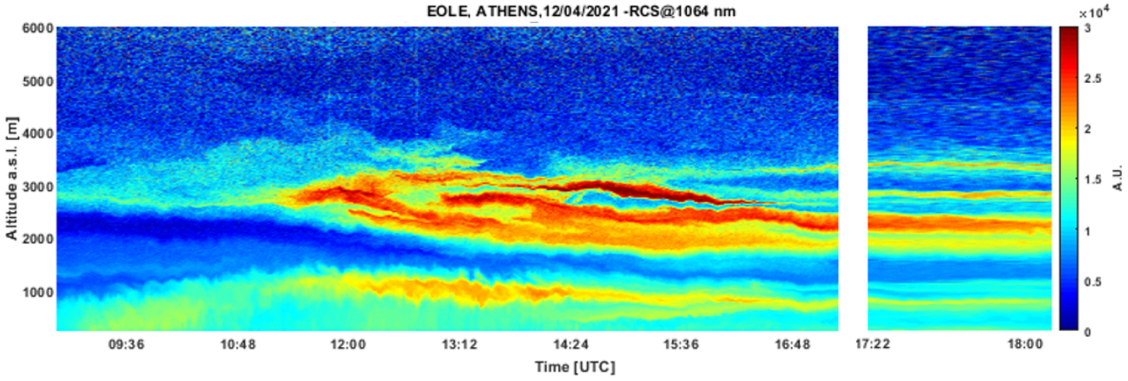


Εικόνα 5.1.2: Μικροφυσικές ιδιότητες για τις διάφορες κατηγορίες αιωρούμενων σωματιδίων (Wandinger et al., 2016).

5.2 Ανάλυση περίπτωσης (case study) - 12/4/2021

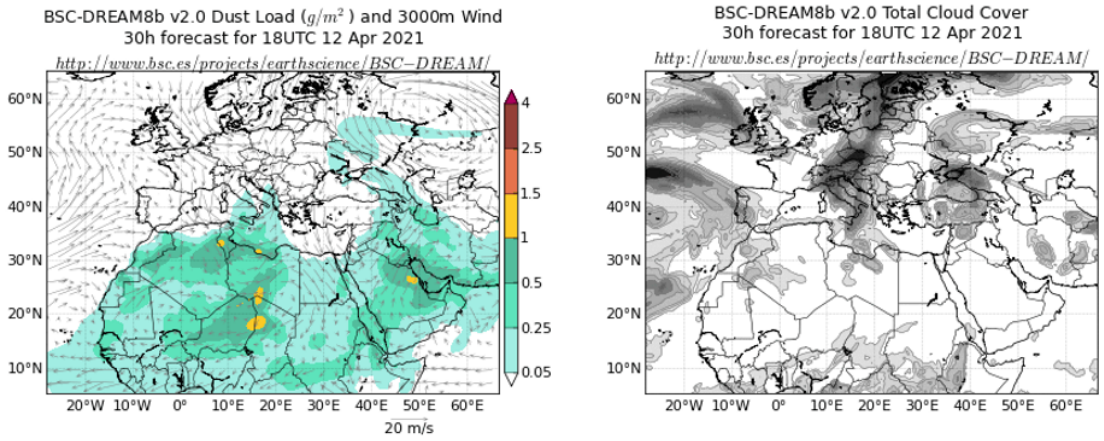
Εν συνεχεία, θα παρουσιάσουμε μια αναλυτική περιγραφή της περίπτωσης μεταφοράς αιωρούμενων σωματιδίων σκόνης από που προέρχονται από την Αφρική στο Λεκανοπέδιο Αθηνών (12 Απριλίου 2021). Η μεθοδολογία που παρουσιάζουμε εδώ ακολουθήθηκε και για όλες τις αντίστοιχες περιπτώσεις μελέτης των αερολυμάτων στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Η χωροχρονική μεταβολή του διορθωμένου σήματος lidar στα 1064 nm για την περίπτωση της 12 Απριλίου 2021 (09:00-18:10 UTC), όπως καταγράφηκε από το σύστημα EOLE του Ε.Μ.Π. παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.2.1. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρήθηκε ένα διακριτό στρώμα αερολύματος στην περιοχή ύψους 2.5 - 3.5 km (09:00-10:00 UTC) που επεκτάθηκε αργότερα από ύψος 1.9 - 3.3 km, τελικά, παρουσιάζονται 4 διακριτά στρώματα αερολύματος στα 2, 2.4, 2.9 και 3.3 km ύψος πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας (17:22-18:10 UTC).



Εικόνα 5.2.1: Χωρο-χρονική μεταβολή του διορθωμένου σήματος lidar στα 1064 nm για την περίπτωση τις 12 Απριλίου 2021.

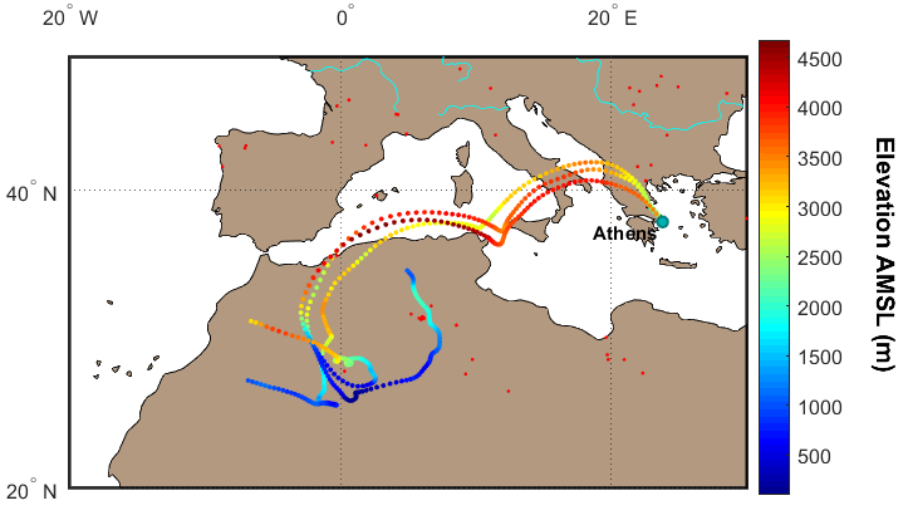
Παρατηρούμε από την Εικόνα 5.2.2 ότι οι μάζες του αέρα που προέρχονται από την έρημο της Σαχάρας, πέρασαν από τη τη Μεσόγειο Θάλασσα και έφτασαν πάνω από την Αθήνα μέσω της Ιταλίας και της Αλβανίας, όπου εντοπίστηκαν τα σημεία θέσεις δασικών πυρκαγιών.



Εικόνα 5.2.2: Μεταφορά σκόνης από την Σαχάρα στη Μεσόγειο, την Αθήνα και τα Βαλκάνια, όπως εκτιμάται από το μοντέλο BSC-DREAM, στις 12 Απριλίου 2021, 18:00 UTC. Αριστερά: Οπτικό βάθος σκόννης στα 550 nm και 3000 m άνεμος, δεξιά: συνολική νεφοκάλυψη.

Στην Εικόνα 5.2.3 παρουσιάζουμε την καταγραφή των δασικών πυρκαγιών από το δορυφόρο MODIS για την περίοδο από 5 έως 12 Απριλίου 2021 (με κόκκινες κουκίδες σημειώνονται οι εστίες των πυρκαγιών), καθώς και τις οπισθοτροχιές των αερίων μαζών που καταφθάνουν στην Αθήνα, σύμφωνα με το μοντέλο NOAA HYSPLIT (δεδομένα

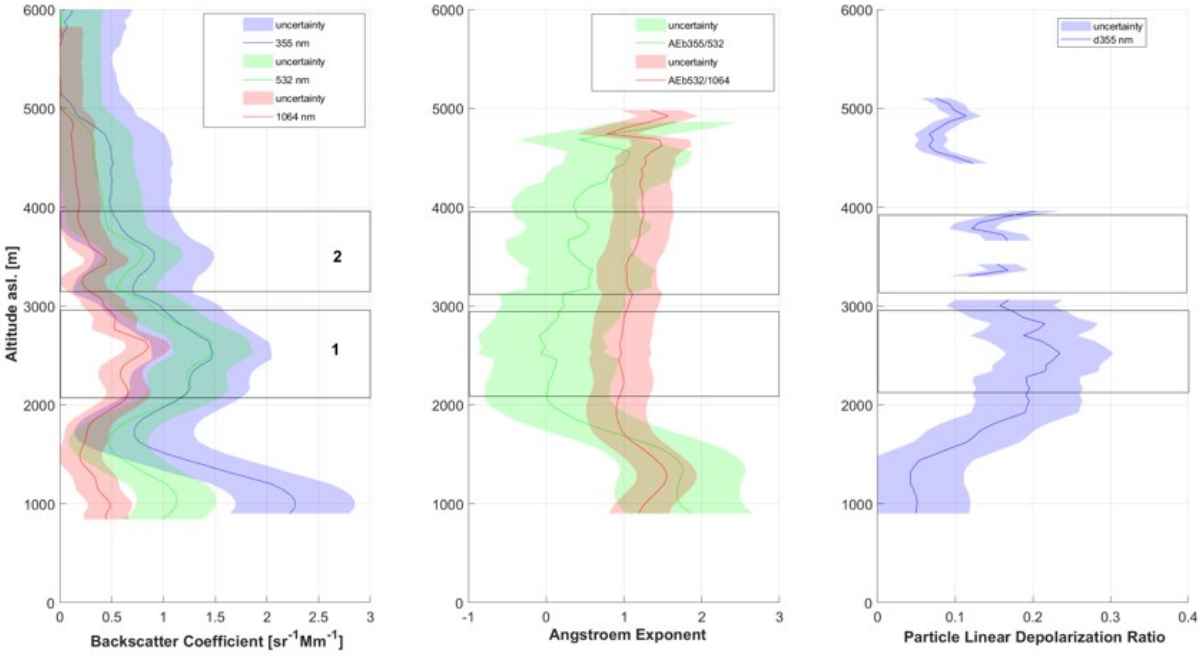
GDAS1) (διάρκειας 192 ωρών) στις 12 Απριλίου 2021 (16:00 UTC) σε 3 διαφορετικά ύψη (2.0, 2.5 και 3.0 km).



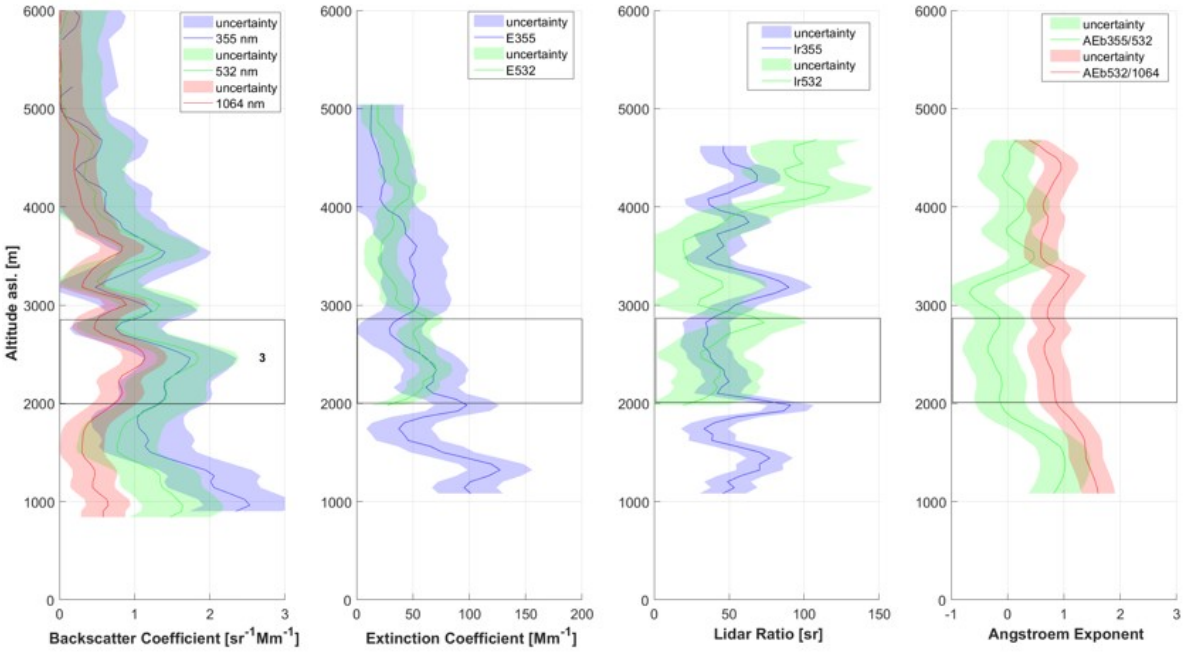
Εικόνα 5.2.3: Οπισθοτροχιές των αερίων μαζών διάρκειας 192 ωρών που φτάνουν πάνω από την Αθήνα στα 2.0, 2.5 και 3.0 km στις 12.04.21 (16:00 UTC). Οι κόκκινες κουκίδες αντιπροσωπεύουν ενεργές πυρκαγιές που ανακτώνται από το MODIS (επίπεδο εμπιστοσύνης > 80%).

Οι ανακτημένες οπτικές ιδιότητες των b_{aer}, AE, PLDR και b_{aer}, a_{aer}, LR, AE, παρουσιάζονται στις Εικόνες 5.2.4 (16:00-17:00 UTC) και 5.2.5 (17:22-18:10 UTC). Η υψηλή τιμή του PLDR ($\sim$ 20%) μέσα στο στρώμα αερολύματος (ύψος 2-2, 5 km) επιβεβαιώνει την παρουσία σωματιδίων σκόνης, πιθανώς αναμεμειγμένων με καύση βιομάζας (BB) μέσω της διέλευσής τους πάνω από την Ιταλία και την Αλβανία.

Στην Εικόνα 5.2.4 έχουμε αναπαραστήσει τα στρώματα (Layers) των αιωρούμενων σωματιδίων, πιο συγκεκριμένα τα Layer 1, Layer 2 αφορούν την πρωινή μέτρηση και βρίσκονται στο υψόμετρο 2042 - 2942 m και 3242 - 2842 m αντίστοιχα, ενώ στην Εικόνα 5.2.5 το Layer 3 αφορά την βραδινή μέτρηση και βρίσκεται στο υψόμετρο 2042 - 2702 m.



Εικόνα 5.2.4: Οπτικές ιδιότητες αιωρούμενων σωματιδίων (16:00-17:00 UTC) για τις 12 Απριλίου 2021.



Εικόνα 5.2.5: Οπτικές ιδιότητες αιωρούμενων σωματιδίων (17:22-18:10 UTC) για τις 12 Απριλίου 2021.

Ο Πίνακας 5.2.1 συνοψίζει τις μέσες τιμές των $A_{b355/532}$, $A_{b532/1064}$, LR_{355}, LR_{532}, PLDR για τα 3 στρώματα αιωρούμενων σωματιδίων (πρωί L1, L2· βράδυ L3).

Layers	$\mathbf{A_{b355/532}}$	$\mathbf{A_{b532/1064}}$	$\mathbf{LR_{355}}$ **[sr]**	$\mathbf{LR_{532}}$ **[sr]**	**PLDR (%)**
1	0.04±0.08	0.97±0.03	-	-	19.41±1.09
2	0.45±0.12	1.12±0.08	-	-	13.97±2.32
3	-0.21±0.09	0.76±0.07	45±11	40±7	-

Πίνακας 5.2.1: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση για τα 3 στρώματα αιωρούμενων σωματιδίων που ανιχνεύθηκαν από τα EOLE και DEPOLE lidar πάνω από την Αθήνα για τις 12 Απριλίου 2021.

Τα δεδομένα αυτά για τη συγκεκριμένη ημερομηνία, αλλά και για τις υπόλοιπες ημερομηνίες, καταγράφηκαν στον Πίνακα Β.1 και Πίνακα Β.2, οι οποίοι παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β και χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα Διπλωματική Εργασία.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα - Προοπτικές

Μετά τη βιομηχανική επανάσταση, οι συγκεντρώσεις των αερολυμάτων έχουν αυξηθεί σημαντικά και η ανταπόκριση του κλιματικού συστήματος της γης σε αυτή την απότομη αύξηση των ανθρωπογενών εκπομπών δεν έχει ακόμη αξιολογηθεί καλά και πρέπει να να διερευνηθεί περαιτέρω (IPPC, 2013). Συνεπώς, θα πρέπει να βελτιώσουμε την γνώση μας για το ρόλο των αερολυμάτων και των σταγονιδίων νέφους στο κλιματικό σύστημα (τόσο άμεσες, όσο και έμμεσες επιδράσεις).

Σύμφωνα με την IPCC (IPCC, 2013), η συνολική άμεση ακτινοβολία αερολύματος για όλους τους τύπους αερολυμάτων είναι -0.5 Wm^{-2}, με 5 έως 95 % εύρος εμπιστοσύνης από -0.1 έως -0.9 Wm^{-2} και με μεσαίο χαμηλό επίπεδο επιστημονικής κατανόησης. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για την περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου, όπου η γνώση των μικροφυσικών ιδιοτήτων των σωματιδίων αερολύματος καθώς και η χωρική κατανομή τους παραμένει ένα βασικό ζήτημα για την αξιολόγηση της επίδρασής τους στο παγκόσμιο κλίμα.

Για να κατανοήσουμε περαιτέρω τις επιπτώσεις των αερολυμάτων στο κλίμα της Γης, απαιτούνται οι κατακόρυφες κατανομές των οπτικών και μικροφυσικών ιδιοτήτων τους με υψηλή χωρο-χρονική ανάλυση. Η τεχνική lidar είναι το ιδανικό εργαλείο για παρόμοιες μελέτες από τις οποίες μπορούμε να υπολογίσουμε τις κατακόρυφες κατανομές των συντελεστών οπισθοσκέδασης (b_{aer}) και εξασθένησης (a_{aer}), καθώς και τον λόγο lidar (LR), τον εκθέτη Ångström (AE) και τον λόγο γραμμικής αποπόλωσης σωματιδίων (PLDR).

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας ήταν η παρουσίαση των οπτικών και μικροφυσικών ιδιοτήτων των διαφόρων τύπων αερολυμάτων και των μειγμάτων τους που παρατηρούνται στην πόλη των Αθηνών από το σύστημα EOLE lidar κατά τη χρονική περίοδο 2020 - 2021. Επιπλέον, λάβαμε μέρος στην αξιολόγηση του οπτικού συστήματος λήψης του EOLE lidar με τη χρήση τεχνικής telecover.

Ο χαρακτηρισμός αερολύματος βασίστηκε στην ανάλυση τροχιάς των μαζών που παρέχεται από το HYSPLIT και οι αντίστοιχες πληροφορίες για τα σημεία πυρκαγιάς δόθηκαν από το σύστημα FIRMS και τον δορυφόρο MODIS. Οι κατακόρυφες κατανομές των οπτικών ιδιοτήτων αερολύματος ανακτήθηκαν χρησιμοποιώντας τον κώδικα SCC.

Η αξιολόγηση του οπτικού συστήματος λήψης του EOLE έδειξε ότι το σύστημά μας είναι πολύ καλά ευθυγραμμισμένο, καθώς η σχετική τυπική απόκλιση των διορθωμένων και κανονικοποιημένων δεδομένων lidar σε όλα τα μήκη κύματος κυμαίνεται εντός των επιτρεπτών ορίων ($\pm 10\%$).

Επιπροσθέτως, η στατιστική μελέτη αιωρούμενων σωματιδίων από τις παραπάνω κατηγορίες, οι οποίες όπως είναι φανερό, αποτελούνται και από προσμίξεις αυτών ως προς το είδος των προσμίξεων που περιέχει η κάθε στρωμάτωση έδειξε ότι οι προσμίξεις επηρεάζουν τις οπτικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων. Το γεγονός αυτό καθιστά εξαιρετικά δύσκολο το χαρακτηρισμό του κάθε είδους των αιωρούμενων σωματιδίων από τις συγκεκριμένες οπτικές ιδιότητες, λόγω των παρόμοιων μέσων όρων των οπτικών ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων για όλες τις κατηγορίες προσμίξεων αιωρούμενων σωματιδίων.

Συμπερασματικά, οι οπτικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων δεν είναι ικανές να βοηθήσουν από μόνες τους στο χαρακτηρισμό του κάθε είδους των αιωρούμενων σωματιδίων καθώς, οι τιμές τους μεταβάλλονται από τοποθεσία σε τοποθεσία. Ο υπολογισμός κι άλλων ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων, όπως είναι οι μικροφυσικές, ίσως να μπορεί να αποφέρει καλύτερα αποτελέσματα στο χαρακτηρισμό των ειδών των αιωρούμενων σωματιδίων.

Λόγω των υψηλών συγκεντρώσεων σωματιδίων που καταγράφονται κατά τα έτη 2020-2021, κρίνουμε απαραίτητο να συνεχισθεί η λήψη και ανάλυση παρόμοιων μετρήσων κατά τα επόμενα έτη, καθώς, μια συστηματική καταγραφή τέτοιων δεδομένων θα οδηγούσε στην απόκτηση μιας ολοκληρωμένης εικόνας αναφορικά με τα διάφορα φαινόμενα που σχετίζονται με την εισαγωγή αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα. Συνεπώς, για την αντιμετώπιση πιθανών επεισοδίων υψηλών συγκεντρώσεων αέριων ρύπων, είναι απαραίτητη η μελέτη της αλληλεπίδρασης των διάφορων ειδών των αιωρούμενων σωματιδίων, συνδυαστικά με άλλους τομείς, όπως είναι η χημεία της ατμόσφαιρας και η πρόγνωση του κλίματος στο πλαίσιο της ΠΚΑ.

Βιβλιογραφία

Ackerman, J., The extinction-to-backscatter ratio of tropospheric aerosol: A numerical study, J. Atmos. Ocean. Tech., 15, 1043-1050 (1998).

Ackerman, A.S., O.B. Toon, J.P. Taylor, D.W. Johnson, P.V. Hobbs, and R.J. Ferek, Effects of aerosols on cloud albedo: Evaluation of Twomey's parameterization of cloud susceptibility using measurements of ship tracks. J. Atmos. Sci., 57, 2684-2695 (2000).

Ancellet, G., Mégie, G., Pelon, J., Capitini, R., and Renaut, D., Lidar measurements of sulfur dioxide and ozone in the boundary layer during the 1983 Foss Berre campaign, Atmos. Environ., 21, 2215-2226 (1987).

Andersson, S.M., Martinsson, B.G., Friberg, J., Brenninkmeijer, C.A.M., Rauthe-Schöch, A., Hermann, M., van Velthoven, P.F.J., Zahn, A., Composition and evolution of volcanic aerosol from eruptions of Kasatochi, Sarychev and Eyjafallajokull in 2008–2010 based on CARIBIC observations. Atmos. Chem. Phys., 13, 1781–1796 (2013).

Ansmann, A. et al., Combined raman elastic-backscatter lidar for vertical profiling of moisture, aerosol extinction, backscatter, and lidar ratio, Appl. Phys. B 55, 18–28 (1992).

Ansmann, A., Wandinger, U., Riebesell, M., Weitkamp, C. & Michaelis, W., Independent measurement of extinction and backscatter profiles in cirrus clouds by using a combined Raman elastic-backscatter lidar, Appl. Opt. 31, 7113–7131 (1992).

Basart, S., Perez, C., Nickovic, S., Cuevas, E., Baldasano, J.M., Development and evaluation of the BSC-DREAM8b dust regional model over northern Africa, the mediterranean and the middle east, Tellus Ser. B Chem. Phys. Meteorol. 64 (2012).

Böckmann, C. et al., Aerosol lidar intercomparison in the framework of the EARLINET project. 2. Aerosol backscatter algorithms, Appl. Opt. 43, 977–989 (2004).

Bove H., Bongaerts E., Slenders E., Bijnens E.M., Saenen N.D., Gyselaers W., Van Eyken P., Plusquin M., Roeffaers M.B.J., Ameloot M., et al., Ambient black carbon particles reach the fetal side of human placenta, Nat. Commun. 10, 3866 (2019).

Buseck, P.R., Posfai, M., Airborne minerals and related aerosol particles: effects on climate and the environment, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 96: National Academy of Sciences, USA, 3372–3379 (1999).

Campbell, J. R., D. L. Hlavka, E. J. Welton, C. J. Flynn, D. D. Turner, J. D. Spinhirne, V. S. Scott, and I. H. Wang, Full-time, eye-safe cloud and aerosol lidar observation at Atmospheric Radiation Measurement Program sites: Instruments and data processing, J. Atmos. Oceanic Tech., 19, 431–442 (2002).

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

Chang, F., and Z. Li, A near-global climatology of single-layer and overlapped clouds and their optical properties from Terra/MODIS data using a new algorithm, J. Clim., 18, 4752–4771 (2005).

Clothiaux, E. E., Mace, G. G., Ackerman, T. P., Kane, T. J., Spinhirne, J. D., and Scott, V. S., An automated algorithm for detection of hydrometeor returns in micro pulse lidar data, J. Atmos. Oceanic Tech., 15, 1035–1042 (1998).

Ćurić, M., and Janc, D., Predictive capabilities of a one-dimensional convective cloud model with forced lifting and a new entrainment formulation, J. Appl. Meteorol., 32, 1733–1740 (1993).

Ćurić, M., D. Janc, and V. Vučković, Precipitation change from a cumulonimbus cloud downwind of a seeded target area, J. Geophys. Res., 113, D11215 (2008).

D'Amico, G. et al. EARLINET Single Calculus Chain – overview on methodology and strategy, Atmos. Meas. Tech., 8, 4891–4916 (2015).

Davies, D. K., Ilavajhala, S., Wong, M. M. and Justice, C. O., Fire information for resource management system: Archiving and distributing MODIS active fire data, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 47, 72–79 (2009).

Deepthi Y., Nagendra S.M.S., Gummadi S.N., Characteristics of indoor air pollution and estimation of respiratorydosage under varied fuel-type and kitchen-type in the rural areas of Telangana state in India. Sci. Total Environ., 650, 616–625 (2019).

Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe OJ L 152, p. 1–44 (2008).

Draxler, R. and Hess, G., An overview of the HYSPLIT$_4$ Modelling system for trajectories, dispersion, and deposition, Australian Meteor. Magazine, 47, 295-308 (1998).

Ferm, M. and Svanberg, P.-A.: Cost-efficient techniques for urban and background measurements of SO_2 and NO_2, Atmos. Environ., 32, 1377-1381 (1998).

Ferrare, R. A. et al., Raman lidar measurements of the aerosol extinction-to-backscatter ratio over the Southern Great Plains, J. Geophys. Res. Atmospheres 106, 20333–20347 (2001).

Fitzgerald, J. W., Marine aerosols: A review, Atmospheric Environment. Part A. General Topics, Volume 25, Issues 3–4, Pages 533-545, ISSN 0960-1686 (1991).

Freudenthaler, V., About the effects of polarising optics on lidar signals and the $\Delta 90$ calibration, Atmos. Meas. Tech., 9, 4181–4255 (2016).

Freudenthaler, V., Optimized background suppression in near field lidar telescopes, Proc. of international symposium on tropospheric profiling needs and technologies, Leipzig, 14-20 September (2003).

Freudenthaler, V., The telecover test: A quality assurance tool for the optical part of a lidar system, Proceedings of the 24th International Laser Radar Conference, Boulder, Colorado, 145-146 (2008).

Grattan, J., M. Durand, and S. Taylor, Illness and elevated human mortality in Europe coincident with the Laki fissure eruption, in volcanic degassing, Geol. Soc. Lond. Spec. Pub., 213, 401-414 (2003).

Groß, S., Esselborn, M., Weinzierl, B., Wirth, M., Fix, A., and Petzold, A., Aerosol classification by airborne high spectral resolution lidar observations, Atmos. Chem. Phys., 13, 2487–2505 (2013).

Groß, S., Freudenthaler, V., Schepanski, K., Toledano, C., Schäfler, A., Ansmann, A., and Weinzierl, B., Optical properties of long-range transported Saharan dust over Barbados as measured by dual-wavelength depolarization raman lidar measurements, Atmos. Chem. Phys., 15, 11067–11080 (2015).

Holzer-Popp, T., de Leeuw, G., Griesfeller, J., Martynenko, D., Klüser, L., Bevan, S., Davies, W., Ducos, F., Deuzé, J. L., Graigner, R. G., Heckel, A., von Hoyningen-Hüne, W., Kolmonen, P., Litvinov, P., North, P., Poulsen, C. A., Ramon, D., Siddans, R., Sogacheva, L., Tanre, D., Thomas, G. E., Vountas, M., Descloitres, J., Griesfeller, J., Kinne, S., Schulz, M., and Pinnock, S., Aerosol retrieval experiments in the ESA Aerosol-cci project, Atmos. Meas. Tech., 6, 1919–1957 (2013).

Illingworth, A.J. et al., The EarthCARE Satellite: The next step forward in global measurements of clouds, aerosols, precipitation, and radiation, Bull. Amer. Meteor. Soc. (2014).

IPCC, Fifth Assessment Report: Climate Change 2013 (AR5), Working Group I Report, The physical science basis, WMO, Geneva, Switzerland (2014).

Kaufman, Y., Tanré, D., Boucher, O., A satellite view of aerosols in the climate system, Nature 419, 215–223 (2002).

Kelly F.J., Fussell J.C., Air pollution and public health: Emerging hazards and improved understanding of risk, Environ. Geochem. Health., 37, 631–649 (2015).

Kovalev, V. A. , and Eichinger, W. E., Elastic lidar: theory, practice, and analysis methods, John Wiley & Sons (2004).

Liu F., Huang Y., Zhang F., Chen Q., Wu B., Rui W., Zheng J.C., Ding W., Macrophages treated with particulate matter $PM_{2.5}$ induce selective neurotoxicity through glutaminase-mediated glutamate generation, J. Neurochem., 134, 315–326 (2015).

Mamouri, R. E., Amiridis, V., Papayannis, A., Giannakaki, E., Tsaknakis, G., and Balis, D. S., Validation of CALIPSO space-borne-derived attenuated backscatter coefficient profiles using a ground-based lidar in Athens, Greece, Atmos. Meas. Tech., 2, 513–522 (2009).

Mannucci P.M., Franchini M., Health effects of ambient air pollution in developing countries, Int. Environ. Res. Public Health., 14, 1048 (2017).

Mattis, I. et al., EARLINET Single Calculus Chain – technical – Part 2: Calculation of optical products. Atmos. Meas. Tech., 9, 3009–3029 (2016).

Mégie, G., Allain, J., Chanin, M., Blamont, J., Vertical profile of stratospheric ozone by lidar sounding from the ground, Nature, 270, 329-331 (1977).

Mégie, G., Ancellet, G., and Pelon, J., Lidar measurements of ozone profiles, Appl. Opt., 24, 3454 (1985).

Mylonaki, M., Giannakaki, E., Papayannis, A., Papanikolaou, C.-A., Komppula, M., Nicolae, D., Papagiannopoulos, N., Amodeo, A., Baars, H., and Soupiona, O., Aerosol type classification analysis using EARLINET multiwavelength and depolarization lidar observations, Atmos. Chem. Phys., 21, 2211–2227 (2021).

Mylonaki, M., Papayannis, A., Papanikolaou, C.A., Foskinis, R., Soupiona, O., Maroufidis, G., Anagnou, D., Kralli, E., Tropospheric vertical profiling of the aerosol backscatter coefficient and the particle linear depolarization ratio for different aerosol mixtures during the PANACEA campaign in July 2019 at Volos, Greece, Atmos. Environ., 247, 118184, ISSN 1352-2310 (2021).

Niemeier, U., Timmreck, C., Graf, H.F., Kinne, S., Rast, S., Self, S., Initial fate of fine ash and sulphur from large volcanic eruptions, Atmos. Chem. Phys., 9, 9043–9057 (2009).

Oh, H. J., Ma, Y., & Kim, J., Human inhalation exposure to aerosol and health effect: Aerosol monitoring and modelling regional deposited doses, Int. J. Environ. Res. Public Health, 17 (2020).

Pappalardo, G., et al., Aerosol lidar intercomparison in the framework of the EARLINET project. 3. Raman lidar algorithm for aerosol extinction, backscatter, and lidar ratio, Appl. Opt., 43, 5370–5385 (2004).

Papayannis, A., Kokkalis, P., Mylonaki, M., Soupiona, R., Papanikolaou, C. A., Foskinis, R., Giakoumaki, A., Recent upgrades of the EOLE and AIAS lidar systems of the National Technical University of Athens operating since 2000 in Athens , Greece, EPJ Web of Conferences, 237, 02030, 4–7 (2020).

Pelon, J., and Mégie G., Ozone monitoring in the troposphere and the lower stratosphere: Evaluation and operation of a ground based lidar station, J. Geophys. Res., 87, C7, 4947 (1982).

Ritz B., Wilhelm M., Ambient air pollution and adverse birth outcomes: Methodologic issues in an emerging field, Basic Clin. Pharmacol. Toxicol., 102, 182–190 (2008).

Robock, A., Volcanic eruptions and climate, Rev. Geophys., 38, 191–219 (2000).

Rose, W.I., Bluth, G.J.S., Watson, I.M., Ice in volcanic clouds: When and where?: Proceedings of the 2nd International Conference on Volcanic Ash and Aviation Safety, Washington, DC (2004).

Sah D., Verma P.K., Kandikonda M.K., Lakhani A., Pollution characteristics, human health risk through multiple exposure pathways, and source apportionment of heavy metals in PM10 at Indo-Gangetic site, Urban Clim., 27, 149–162 (2019).

Seinfeld, J. H. and Pandis S., Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change, 2nd Edition John Wiley, New York (2006).

Shi, Y., Ji, Y., Sun, H. et al., Nanoscale characterization of PM2.5 airborne pollutants reveals high adhesiveness and aggregation capability of soot particles, Sci Rep 5, 11232 (2015).

Simkin, T., Siebert, L., Volcanoes of the World, 2nd ed. Tucson: Geoscience Press, 369 pp. (1994).

Sjöholm, M., Weibring, P., Edner, H., Svanberg, S., Atomic mercury flux monitoring using an optical parametric oscillator based lidar system, Optics Express, 12, pp. 551–556 (2004).

Soupiona, O., et al., EARLINET observations of Saharan dust intrusions over the northern Mediterranean region (2014–2017): properties and impact on radiative forcing, Atmos. Chem. Phys., 20, 15147–15166 (2020).

Stenchikov, G.L., Kirchner, I., Robock, A., Graf, H.F., Antuna, J.C., Grainger, R.G., Lambert, A., Thomason, L., Radiative forcing from the 1991 Mount Pinatubo volcanic eruption, J. Geophys. Res. Atmos., 103, 13837–13857 (1998).

Svanberg, P.-A., Grennfelt, P., and Lindskog, A.: The swedish urban air quality network: A cost efficient long-term program, Atmos. Environ., 32, 1407-1418 (1998).

Wandinger, U., Ansmann, A., Experimental determination of the lidar overlap profile with raman lidar, Appl. Opt., 41, 511-514 (2002).

Wandinger, U., et al., HETEAC: The aerosol classification model for EarthCARE, EPJ web of conferences, 119, ILRC 27, New York City, USA, 01004 (2016).

Wang, Z., and Sassen, K., Cloud type and microphysical property retrieval using multiple remote sensors, J. Appl. Meteorol., 40, 1665–1682 (2001).

Hahn, C. J., Warren, S. G., London, J., Chervin, R. M., & Jenne, R., Atlas of simultaneous occurrence of different cloud types over land, University Corporation for Atmospheric Research (1984).

Weitkamp C., Lidar; Range-resolved optical remote sensing of the atmoshpere, Springer series in optical sciences, 102 (2005).

Williams, B. G., Compton scattering: The investigation of electron momentum distributions, New York: McGraw-Hill International (1977).

World Health Organization, Occupational and environmental health team, WHO air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide : global update 2005 : summary of risk assessment, World Health Organization (2006).

Zhang, R. J., Ho K. F., Shen Z. X., The role of aerosol in climate change, the environment, and human health, Atmos. Ocean. Sci. Lett., 5, 2, 156-161 (2012).

Παπαγιάννης Α., Lasers και Εφαρμογές τους στο Περιβάλλον, Ε.Μ.Π., Αθήνα (2020).

Παπαγιάννης Α. και Μακροπούλου Μ., Εφαρμογές Lasers στη Βιοϊατρική και το Περιβάλλον, Ε.Μ.Π., Αθήνα (2008).

Παράρτημα Α΄

Στοιχεία της γήινης ατμόσφαιρας

Σύσταση της ατμόσφαιρας

Η ατμόσφαιρα της γης αποτελείται από ένα μείγμα αερίων και σωματιδίων, το οποίο την περιβάλλει και συγκρατείται σε αυτή λόγω της βαρυτικής έλξης. Πιο συγκεκριμένα, η γήινη ατμόσφαιρα αποτελείται από τον ξηρό αέρα, το νερό (στερεό-υγρό-αέριο) και τα στερεά ή υγρά αιωρούμενα σωματίδια. Ο ξηρός αέρας είναι ένα μείγμα διαφόρων αερίων σταθερής ή μεταβλητής συγκέντρωσης. Τα κυριότερα αέρια από τα οποία αποτελείται ο ατμοσφαιρικός αέρας παρουσιάζονται στον Πίνακα Α.1.

Αέριο	Ογκομετρική Σύνθεση (%)	Σταθερή/Μεταβλητή Συγκέντρωση	Μέσος Χρόνος Παραμονής στην Ατμόσφαιρα
Άζωτο (N_2)	78.084	Σ	15106 χρόνια
Οξυγόνο (O_2)	20.95	Σ	81013 χρόνια
Αργόν (Ar)	0.934	Σ	άπειρος
Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)	0.0395	Μ	15 χρόνια
Νέον (Ne)	$1.8\ 10^{-3}$	Σ	άπειρος
Υποξείδιο του αζώτου (N_2O)	$3.1\ 10^{-5}$	Μ	150 χρόνια
Υδρογόνο (H_2)	$5.0\ 10^{-5}$	Σ	10 χρόνια
Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)	$1.2\ 10^{-5}$	Μ	2 μήνες
Όζον (O_2)	$1\ 10^{-6}$	Μ	1-2 μήνες
Μεθάνιο (CH_4)	$1.7\ 10^{-4}$	Μ	9 χρόνια
Υδρατμοί (H_2O)	0-4	Μ	6-15 μέρες

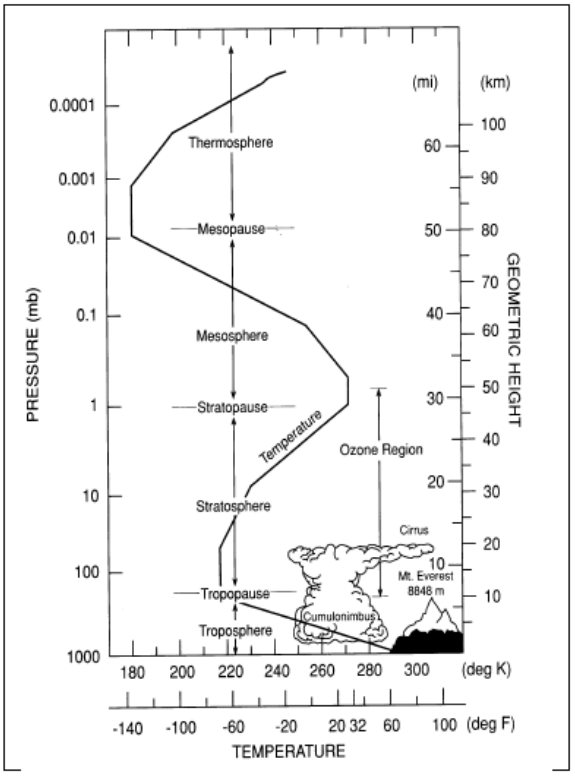
Πίνακας Α.1: Σύνθεση του γήινου ατμοσφαιρικού αέρα (Junge, 1963; Andrews et al., 1966; IPCC, 2001).

Στον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι το 99 % σε ποσοστό όγκου του ατμοσφαιρικού αέρα αποτελείται από άζωτο, οξυγόνο ενώ το υπόλοιπο 1 % αποτελείται από τα υπόλοιπα αέρια. Η αναλογία αυτή του ξηρού αέρα παραμένει σταθερή από την επιφάνεια της Γης μέχρι το ύψος των 100 km.

Δομή της ατμόσφαιρας

Ως ατμόσφαιρα ορίζεται το αέριο στρώμα που περιβάλλει τη Γη και συγκρατείται λόγω της βαρύτητάς της, φτάνοντας πρακτικά στο ύψος των 3.500 χιλιομέτρων. Το όριο ανάμεσα στην ατμόσφαιρα και το διάστημα δεν είναι αυστηρά καθορισμένο.

Η ατμόσφαιρα της Γης μπορεί να χωριστεί σε διάφορα στρώματα βάσει των διαφορετικών φυσικών και χημικών ιδιοτήτων που τα χαρακτηρίζουν. Η διαίρεση της ατμόσφαιρας γίνεται σύμφωνα με τις μεταβολές της θερμοκρασίας καθ' ύψος, απ' όπου προκύπτουν τέσσερις ατμοσφαιρικές περιοχές: η Τροπόσφαιρα, η Στρατόσφαιρα, η Μεσόσφαιρα και η Θερμόσφαιρα. Στην παρακάτω Εικόνα Α.1 παριστάνεται η κατακόρυφη κατανομή της μέσης θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας και οι περιοχές που χαρακτηρίζονται από τις μεταβολές της.



Εικόνα Α.1: Κατακόρυφη δομή της γήινης θερμοκρασίας (Brasseur et al., 1999).

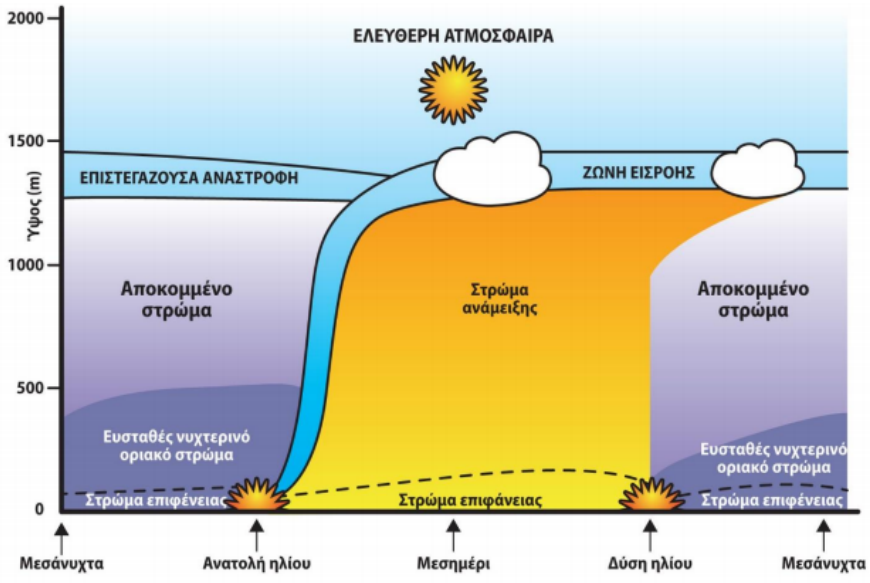
Η τροπόσφαιρα αποτελεί το κατώτερο στρώμα της ατμόσφαιρας στο οποίο παρατηρείται συνεχής πτώση της θερμοκρασίας με το ύψος. Εκτείνεται από το έδαφος μέχρι την τροπόπαυση που βρίσκεται στο ύψος των 10-18 km, ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και την εποχή του έτους. Χαρακτηρίζεται από την μείωση της θερμοκρασίας με το ύψος, με τυπική τιμή θερμοβαθμίδας (dT / dz) για τον ξηρό αέρα να είναι τα -9.7 K / km. Το αμέσως επόμενο ατμοσφαιρικό στρώμα ονομάζεται στρατόσφαιρα και εκτείνεται από την τροπόπαυση έως την στρατόπαυση σε ύψος 50-55 km. Στα πρώτα χιλιόμετρα της στρατόσφαιρας, η θερμοκρασία παραμένει σταθερή με το ύψος, ενώ από τα 20 km και μετά, η θεμροκρασία αυξάνεται με το ύψος και φθάνει την τιμή των 0° C περίπου.

Κατώτερη Τροπόσφαιρα και Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα

Το κατώτερο στρώμα της τροπόσφαιρας επηρεάζεται πολύ πιο έντονα από την επιφάνεια της Γης. Το ύψος του στρώματος αυτού είναι περίπου 1 km και μεταβάλλεται σημαντικά κατά τη διάρκεια της ημέρας αλλά και λόγω μετεωρολογικών φαινομένων. Ορίζουμε λοιπόν ως ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (ΑΟΣ) το κατώτερο τμήμα της τροπόσφαιρας, το οποίο επηρεάζεται άμεσα από την επιφάνεια της Γης και αντιδρά στις επιφανειακές μεταβολές σε χρονικό διάτημα μιας ώρα ή και λιγότερο.

Οι μεταβολές που λαμβάνουν χώρα στο ΑΟΣ προκαλούνται από τυρβώδεις δυνάμεις, εξάτμιση, μεταφορά θερμότητας, εκπομπές αέριων ρύπων καθώς επίσης και από την τοπογραφία της κάθε περιοχής. Το υπόλοιπο τμήμα της τροπόσφαιρας επηρεάζεται με τη σειρά του από τις μεταβολές που υφίσταται το οριακό στρώμα αλλά σε μεγαλύτερη χρονική κλίμακα.

Εντός του ΑΟΣ σημειώνονται οι περισσότερες ημερήσεις μεταβολές της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας, η οποία επηρεάζεται σημαντικά από τα αποτελέσματα της τριβής που αναπτύσσεται εξαιτίας των ανωμαλιών και του ανάγλυφου της επιφάνειας της Γης. Στο ΑΟΣ κυριαρχεί η τυρβώδης ροή, η οποία είναι αρκετές τάξεις μεγέθους πιο αποτελεσματική στη μεταφορά θερμότητας, υγρασίας και ορμής σε σχέση με τη μοριακή διάχυση. Η ύπαρξη της τυρβώδους ροής επιτρέπει στο οριακό στρώμα να ανταποκρίνεται σχετικά γρήγορα σε μεταβολές που πραγματοποιούνται στην επιφάνεια του εδάφους.



Εικόνα Α.2: Ημερήσια μεταβολή του ΑΟΣ πάνω από την ξηρά σε αίθριες συνθήκες (Melas, 2009).

Το ύψος του ΑΟΣ δεν είναι σταθερό και κυμαίνεται από μερικές δεκάδες μέτρα έως και λίγα χιλιόμετρα καθώς σχετίζεται με την ικανότητα της κατακόρυφης κίνησης των αέριων μαζών μέσα σε αυτό και τους παράγοντες που την επηρεάζουν (θέρμανση επιφάνειας, μορφολογία εδάφους, συνοπτικές και τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες κλπ.). Το ύψος εκείνο όπου οι κατακόρυφες κινήσεις σταματούν λόγω της θερμοκρασιακής αναστροφής, ορίζεται ως το ύψος του ΑΟΣ. Πάνω από την ξηρά σε περιοχές υψηλών πιέσεων το ΑΟΣ έχει μια πολύ καλά καθορισμένη δομή που αναπτύσσεται στην διάρκεια της ημέρας. Η τυπική μεταβολή της δομής του ΑΟΣ παρουσιάζεται στην Εικόνα Α.2.

Τα τέσσερα βασικά μέρη του ΑΟΣ που διακρίνουμε ανάλογα με την ώρα της ημέρα είναι τα εξής:

- Επιφανειακό Στρώμα (Surface Layer)

Είναι το κατώτερο στρώμα του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος (το 10 % του ολικού παχούς του ΑΟΣ) (20-200 m), όπου η τυρβώδης ροή είναι σε χαμηλά επίπεδα και μπορούν να εφαρμοστούν νόμοι που σχετίζονται με την μοριακή διάχυση σε στρωτή ροή.

- Στρώμα Ανάμειξης (Mixed Layer)

Σχηματίζεται κατά τη διάρκεια της ημέρας όπου η συνεχής θέρμανση της επιφάνειας της Γης προκαλεί θερμική ανάμειξη, με αποτέλεσμα το ύψος του ΑΟΣ να αυξάνει σταθερά όσο

προχωρά η μέρα με μια μέγιστη τιμή 2.5 κμ το μεσημέρι. Χαρακτηρίζεται από τυρβώδεις ροές και ασταθείς ατμοσφαιρικές συνθήκες.

- Ευσταθές Οριακό Στρώμα (Stable Boundary Layer)

Σχηματίζεται την νύχτα όπου η σταδιακή ψύξη του εδάφους συνεπάγεται την εμφάνιση αναστροφής σε χαμηλότερο ύψος και το ύψος του ΑΟΣ συρρικνώνεται ως και τα 0.2 km. Χαρακτηρίζεται από εξασθένηση της τυρβώδους ανάμιξης.

- Αποκομμένο Στρώμα (Residual Layer)

Δημιουργείται την νύχτα πάνω από το ευσταθές οριακό στρώμα. Κρατάει τα χαρακτηριστικά (θερμοκρασία, συγκεντρώσεις ρύπων κλπ.) του στρώματος ανάμειξης καθώς είναι ουδέτερα στρωματωμένο με μια τύρβη που είναι ίδιας έντασης σε όλες τις διευθύνσεις.

Η σημασία του ΑΟΣ

Η σημασία του ΑΟΣ στην καθημερινότητά μας γίνεται εμφανής από τα παρακάτω γεγονότα που διαδραματίζονται σε αυτό:

- Η ατμοσφαρική ρύπανση παγιδεύεται και διαχέεται στο ΑΟΣ
- Οι εμπορικές και μεταφορικές πτήσεις λαμβάνουν χώρα στο ΑΟΣ
- Τα αποτελέσματα και οι προβλέψεις των καιρικών φαινομένων παρουσιάζονται στο ΑΟΣ (βροχή, νέφωση, ομίχλη, χιόνι, κ.α)
- Το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας απορροφάται από το έδαφος και έπειτα μεταφέρεται στην ατμόσφαιρα μέσω διεργασιών του ΑΟΣ
- Οι πυρήνες συμπύκνωσης των νεφών δημιουργούνται από διαδικασίες του ΑΟΣ
- Οι ανεμογεννήτριες παράγουν ενέργεια από τους ανέμους του ΑΟΣ

Παράρτημα Β΄

Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης και χαρακτηρισμού στρωματώσεων αερολυμάτων (2020-2021) στην περιοχή της Αθήνας

Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας μελετήθηκαν 24 περιπτώσεις στρωματώσεων αιωρούμενων σωματιδίων και διαχωρίσαμε αυτές τις περιπτώσεις σε 4 κατηγορίες: Biomass, PBL(ΑΟΣ), Black Sea, Dust.

Οι ημερομηνίες των 24 περιπτώσεων παρουσιάζονται, αναλυτικά, στον Πίνακα Β.1.

Κάθε γραμμή αποτελεί μία διαφορετική περίπτωση. Δίπλα σε κάθε ημερομηνία αναγράφεται η κατηγορία στην οποία κατατάχθηκε η περίπτωση ανάλογα με το είδος της πρόσμιξης που τη χαρακτηρίζει (PC: ρυπασμένα ηπειρωτικά αερολύματα BB+PC: καύση βιομάζας και ρυπασμένα ηπειρωτικά αερολύματα, S: καπνός, BB+M: καύση βιομάζας και θαλάσσια αερολύματα, BB+S: καύση βιομάζας και σκόνη, PC+M: ρυπασμένα ηπειρωτικά και θαλάσσια αερολύματα, PC+M+S: ρυπασμένα ηπειρωτικά αερολύματα, θαλάσσια αερολύματα και καπνός, D+PC: ερημικά και ρυπασμένα ηπειρωτικά αερολύματα).

Case number	Date	Types	b_{355} [Mm^{-1} sr^{-1}]	b_{532} [Mm^{-1} sr^{-1}]	b_{1064} [Mm^{-1} sr^{-1}]	$A_{b355/532}$	$A_{b532/1064}$	$A_{e355/532}$	e_{355} [Mm^{-1}]	e_{532} [Mm^{-1}]	LR_{355} [sr]	LR_{532} [sr]	LR_{355}/ LR_{532}	PLDR (%)
1	15/7/2020	BB+M	1.28	0.61	0.3	1.81	1.03							4.2
2	15/7/2020	BB+S	1.84	0.92	0.53	1.68	0.82							4.1
3	15/7/2020	BB+S	0.55	0.56	0.38	0.09	0.61							nan
4	16/7/2020	BB+S	1.94	1.24	0.59	1.16	1.07							2.5
5	16/7/2020	S	1.7	1.06	0.55	1.19	0.98							2.2
6	16/7/2020	NT	0.41	0.28	0.19	0.82	0.72							9.7
7	16/7/2020	BB+M	3.34	1.94	1.01	1.25	1.01	2.48	153.77	58.58	45.12	28.13	1.6039815	4.04
8	16/7/2020	BB+PC	3.02	1.75	1.01	1.31	0.85	2.34	166.65	64.93	54.46	36.87	0.7385408	3.48
9	20/7/2020	PC	3.99	2.34	1.3	1.35	0.85							-
10	20/7/2020	PC	2.73	1.89	0.83	1	1.17	2.44	134.72	51.18	49.14	28.6	1.7181818	2.53
11	27/7/2020	PC	2.82	1.82	0.74	1.06	1.32							-
12	27/7/2020	PC	2.16	1.5	0.57	0.93	1.39							-
13	31/8/2020	PC	1.39	0.83	0.43	1.3	0.95							8.62
14	14/9/2020	PC+M	1.13	0.8	0.4	0.82	1.06							7.84
15	14/9/2020	PC+M	1.3	0.92	0.5	0.85	0.98							6.18
16	17/9/2020	PC	1.51	0.89	0.46	1.41	0.97	1.64	76.07	37.61	48.38	41.45	1.1671894	1.02
17	17/9/2020	PC	0.91	0.51	0.26	1.54	0.97	2.1	45.51	20.52	51.01	42.13	1.2107762	0.98
18	21/9/2020	PC+M	0.87	0.55	0.21	1.14	1.36							4.01
19	21/9/2020	D+PC	0.92	0.51	0.1	1.41	2.33							12.9
20	21/9/2020	D+PC	0.64	0.4	0.08	0.87	2.28							14.82
21	21/9/2020	PC+M+S	0.86	0.38	0.15	1.7	1.46	2.09-0.14i	50.86	24.1	61.47	61	1.0077049	3.82
22	12/4/2021	D+PC	1.28	1.26	0.64	0.04	0.97							19.41
23	12/4/2021	D+PC	0.76	0.65	0.3	0.45	1.12							13.97
24	12/4/2021	D+PC	1.42	1.53	0.91	-0.21	0.76	0.07	60.85	57.81	44.5	39.63	1.1228867	-

Πίνακας Β.1: Κατηγοριοποίηση και τιμές των οπτικών ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων για τις 24 περιπτώσεις στρωματώσεων.

Case number	Date	Types	$errb_{355}$ [Mm^{-1} sr^{-1}]	$errb_{532}$ [Mm^{-1} sr^{-1}]	$errb_{1064}$ [Mm^{-1} sr^{-1}]	$errA_{355/532}$	$errA_{532/1064}$	$errA_{e355/532}$	$erre_{355}$ [Mm^{-1}]	$erre_{532}$ [Mm^{-1}]	$errLR_{355}$ [sr]	$errLR_{532}$ [sr]	$errLR_{355}$/ LR_{532}	errPLDR (%)
1	15/7/2020	BB+M	0.06	0.06	0.04	0.11	0.06							0.33
2	15/7/2020	BB+S	0.16	0.14	0.08	0.13	0.03							0.43
3	15/7/2020	BB+S	0.09	0.07	0.12	0.17	0.09							nan
4	16/7/2020	BB+S	0.08	0.01	0.01	0.07	0.0004							0.2
5	16/7/2020	S	0.16	0.08	0.05	0.04	0.05							0.4
6	16/7/2020	NT	0.05	0.01	0.03	0.09	0.12							2
7	16/7/2020	BB+M	0.25	0.17	0.09	0.02	0.07	0.55	9.84	9.58	0.8	3.96	0.202020202	0.34
8	16/7/2020	BB+PC	0.32	0.14	0.09	0.05	0.04	1	25.04	13.89	6.67	11.1	0.600900901	0.34
9	20/7/2020	PC	0.46	0.2	0.12	0.08	0.02							-
10	20/7/2020	PC	0.7	0.42	0.19	0.05	nan	0.44	36.26	12.57	3.92	6.57	0.596651446	0.35
11	27/7/2020	PC	0.16	0.09	0.04	0.08	0.03							-
12	27/7/2020	PC	0.16	0.06	0.02	0.06	0.02							-
13	31/8/2020	PC	0.12	0.06	0.03	0.05	0.01							0.52
14	14/9/2020	PC+M	0.04	0.04	0.02	0.03	0.04							1.31
15	14/9/2020	PC+M	0.15	0.01	0.07	0.05	0.06							0.96
16	17/9/2020	PC	0.25	0.05	0.05	0.04	0.02	0.4	12.21	8.42	4.72	4.6	1.026086957	0.1
17	17/9/2020	PC	0.06	0.1	0.01	0.15	0.05	0.54	4.39	2.37	3	9.73	0.308324769	0.2
18	21/9/2020	PC+M	0.13	0.03	0.01	0.37	0.03							0.44
19	21/9/2020	D+PC	0.25	0.11	0.03	0.34	0.1							3.91
20	21/9/2020	D+PC	0.12	0.08	0.02	0.88	0.1							3.65
21	21/9/2020	PC+M+S	0.1	0.02	0.01	0.16	0.04	0.59	12.34	4.25	9.48	13.29	0.713318284	0.49
22	12/4/2021	D+PC	0.14	0.15	0.11	0.08	0.03							1.09
23	12/4/2021	D+PC	0.12	0.11	0.09	0.12	0.08							2.32
24	12/4/2021	D+PC	0.26	0.21	0.15	0.09	0.07	1.03	16.67	9.2	11.4	7	1.628571429	-

Πίνακας Β.2: Κατηγοριοποίηση και τυπική απόκλιση των τιμών των οπτικών ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων για τις 24 περιπτώσεις στρωματώσεων.