# Φεβρουάριος 2013

Επιβλέπων: Αλέξανδρος Παπαγιάννης, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ



Ηγυσώ Χ. Ζαφειράτου

Διπλωματική Εργασία

# Μέτρηση των αιωρούμενων σωματιδίων με επίγειες τεχνικές - συσχέτιση τους με ανεμολογικά δεδομένα – εφαρμογή στο αιολικό πάρκο Λαυρίου

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



Εγκρίθηκε από την Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή

Αλέξανδρος ΠΑΠΑΓΙΑΝΝΗΣ

Μυρσίνη ΜΑΚΡΟΠΟΥΛΟΥ

Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αναπλ. Καθηγήτρια ΕΜΠ

Κώστας ΡΑΠΤΗΣ

Καθηγητής ΕΜΠ

Αφιερώνεται στο παππού μου

Γεώργιο Ι. Περογιαννάκη

# Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αλέξανδρο Παπαγιάννη, Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ γιατί με έκανε να αγαπήσω τον κλάδο της Τηλεπισκόπησης και της μελέτης της ατμόσφαιρας με τη χρήση της τεχνικής lidar, μέσω της διδασκαλίας και της μεταδοτικότητάς του στα σχετικά μαθήματα της ΣΕΜΦΕ. Επιπλέον, έδειξε μεγάλο ενδιαφέρον για τα πρώτα μου βήματα στον τομέα αυτό και μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο αντικείμενο δίνοντάς μου τη δυνατότητα να κάνω τη διπλωματική μου εργασία πάνω σε αυτό το θέμα.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω το Δρ. Γεώργιο Γεωργούση, Διευθύνοντα Σύμβουλο της Εταιρείας Raymetrics A.E., καθώς και τον Αλέξανδρο Λουρίδα, Μηχανολόγο Μηχανικό της ίδιας Εταιρίας, που μας παραχώρησαν το σύστημα του lidar και, φυσικά, για την πολύτιμη βοήθειά τους καθ'όλη τη διάρκεια του πειράματος. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Παναγιώτη Κόκκαλη, για τη πολύ καλή συνεργασία του καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, καθώς και για τη βοήθεια που μου προσέφερε.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ αξίζει η οικογένειά μου, οι γονείς μου Χρήστος και Μαρία και ο αδερφός μου Βαγγέλης. Τους ευχαριστώ γιατί πάντα ήταν και είναι δίπλα μου μέχρι και σήμερα και ό,τι έχω καταφέρει το οφείλω σε αυτούς.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω το σύντροφό μου Θάνο για τη στήριξη και τη βοήθεια που μου προσφέρει και για τα όσα έχουμε καταφέρει μαζί μέχρι σήμερα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Ηλία και Ρόη Παπαδημητρίου για τη στήριξη και την αγάπη που μου έχουν δείξει όλο αυτό το διάστημα.

# Περίληψη

Αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η μελέτη των αιωρούμενων σωματιδίων με χρήση του συστήματος lidar οπισθοσκέδασης και η συσχέτιση αυτών με ανεμολογικά δεδομένα. Η περάτωση του πειράματος πραγματοποιήθηκε στο αιολικό πάρκο του Λαυρίου.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή για την ατμοσφαιρική ρύπανση του πλανήτη μας, η οποία αυξάνεται με τα χρόνια, πράγμα που καθιστά αναγκαίο τη μελέτη των αιωρούμενων σωματιδίων που την προκαλούν. Η μελέτη αυτών γίνεται με τη χρήση των συστημάτων lidar, τα οποία χρησιμοποιούν τεχνικές ανίχνευσης μέσω τηλεπισκόπησης. Έτσι, στη συνέχεια γίνεται μία αναφορά στη χρησιμότητα αυτών των συστημάτων για τη μέτρηση διάφορων παραμέτρων της ατμόσφαιρας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφερόμαστε στα χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων. Πιο συγκεκριμένα, θα αναφερθούμε συνοπτικά στις πηγές των αιωρούμενων σωματιδίων, στις οπτικές τους ιδιότητες, καθώς και στις φυσικο-χημικές ιδιότητες αυτών, όπως το μέγεθος, τη μορφή και την χημική τους σύσταση. Τέλος, παρουσιάζεται ο ρόλος που διαδραματίζουν στην παγκόσμια κλιματική αλλαγή, μέσω της έμμεσης και της άμεσης κατακράτησης ακτινοβολίας και, επιπλέον, οι επιπτώσεις στην υγεία, το περιβάλλον και τα οικοσυστήματα.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναφερόμαστε πιο διεξοδικά στο σύστημα lidar κάνοντας αρχικά μία ιστορική αναδρομή. Περιγράφουμε την αρχή λειτουργίας του συστήματος αυτού και τη βασική του εξίσωση. Στη συνέχεια, περιγράφουμε το Doppler Wind Lidar, αναφέροντας τη τεχνική με την οποία ανιχνεύονται τα αιωρούμενα σωματίδια μέσω του συστήματος αυτού, αλλά και τα πλεονεκτήματά του. Τέλος, αναφερόμαστε στη χρήση αυτού για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών της τύρβης που δημιουργείται στο πίσω μέρος των ανεμογεννητριών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος και γίνεται η συσχέτιση των αερολυμάτων με τα ανεμολογικά δεδομένα. Περιγράφουμε το σύστημα του lidar οπισθοσκέδασης της εταιρίας Raymetrics, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή του πειράματος.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η σύνοψη, τα συνολικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και μελλοντικές προοπτικές της τεχνικής του lidar οπισθοσκέδασης.

#### Abstract

The object of this thesis is the study of aerosols using a lidar backscatter system and their correlation with wind data. The experiment was conducted in the wind park of Lavrio.

The first chapter contains an introduction to atmospheric pollution issues of our planet, which have been growing over the years, making it necessary to study aerosols that cause it. Aerosols can be monitored with the use of LIDAR systems, which use remote sensing techniques. This chapter also includes a reference to the usefulness of these systems for the measurement of various parameters of the atmosphere.

The second chapter presents the characteristics of the aerosols. More specifically, we will mention briefly the sources of aerosols, optical properties, and their physical and chemical properties, such as size, shape and chemical composition. Finally, it presents the role they play in global climate change through indirect and direct radiation retention and also the impact on health, the environment and ecosystems.

In the third chapter we refer in more detail in lidar system initially by making a flashback. We describe the working principle of this system and its basic equation. Then we describe the Doppler Wind Lidar, indicating the technique by which the aerosols are detected through this system, but also its advantages. Finally, we refer to the use of this system for the assessment of the characteristics of the turbulence generated in the back of the wind turbines.

The fourth chapter presents the results of the experiment and the correlation of the aerosols with the wind data. We describe the system of lidar backscatter produced by the company "Raymetrics", which was used for the experiment.

Finally, the fifth chapter presents the summary, the overall conclusions of this thesis and the future prospects of the backscatter lidar technique.

### Résumé

L'objet de cette thèse est l'étude des aérosols en utilisant le système lidar de rétrodiffusion et leur corrélation avec les données de vent. Le déroulement de l'expérience a eu lieu dans le parc éolien de Lavrio.

Le premier chapitre est une introduction à la pollution atmosphérique de notre planète, qui n'a cessé de croître au fil des années, ce qui rend nécessaire d'étudier les aérosols qui la provoquent. L'étude de ces derniers est réalisée avec l'utilisation de systèmes lidar, qui utilisent des techniques de détection par capteur. De plus, nous nous référons à l'utilité de ces systèmes pour la mesure de différents paramètres de l'atmosphère.

Le deuxième chapitre présente les caractéristiques des aérosols. Plus précisément, nous allons évoquer brièvement les sources des aérosols, les propriétés optiques et leurs propriétés physico-chimiques, comme leur taille, leur forme et leur composition chimique. Enfin, leur rôle dans le changement climatique est présenté, qui est le résultat de la rétention de rayonnement direct et indirect, ainsi que les impacts sur la santé, l'environnement et les écosystèmes.

Dans le troisième chapitre, nous referons plus en détail le système lidar en faisant, premièrement, un retour en arrière. Nous décrivons le principe de fonctionnement de ce système et son équation de base. Puis, nous décrivons le Doppler Wind Lidar, indiquant la technique par laquelle les aérosols sont détectés par la biais de ce système, et ses avantages. Enfin, nous nous référons à l'utilisation de celui-ci pour l'évaluation des caractéristiques de la turbulence générée à l'arrière des turbines éoliennes.

Le quatrième chapitre présente les résultats de l'expérience et de la corrélation des aérosols avec les données de vent. Nous décrivons le système de lidar de rétrodiffusion, un produit de l'entreprise "Raymetrics" SA, qui a été utilisé pour l'expérience.

Enfin, le cinquième chapitre présente le résumé, les conclusions générales de cette thèse et les futures perspectives de cette technique de lidar de rétrodiffusion.

### Περιεχόμενα

1	Eic	σαγωγή19				
	1.1	Γενικές πληροφορίες	19			
2	Au	ωρούμενα σωματίδια	23			
	2.1	Τι είναι τα αιωρούμενα σωματίδια	23			
	2.2	Πηγές των αιωρούμενων σωματιδίων και η χημική σύσταση αυτών	23			
	2.3	Ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων	29			
	2.3	3.1 Μέσο ϱοής	29			
	2.3	3.2 Μέγεθος και μορφή των αιωρούμενων σωματιδίων				
	2.4	Οπτικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων				
	2.5	Επίδραση αιωρούμενων σωματιδίων στην παγκόσμια κλιματική αλλαγ	νή35			
	2.5	5.1 Τι είναι κλιματική αλλαγή	35			
	2.5	5.2 Επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα και σ	την			
	τρο	τροπόσφαιρα				
	2.6	Επιπτώσεις αιωρούμενων σωματιδίων στο περιβάλλον και στην υγεία				
	2.6	5.1 Επιπτώσεις στα δάση και τα οικοσυστήματα	41			
3	Η τεχνική του Lidar					
	3.1	Ιστορική αναδρομή	45			
	3.2	Αρχή λειτουργίας και γενική περιγραφή του συστήματος LIDAR	46			
	3.2	2.1 Βασική εξίσωση Lidar	49			
	3.2	2.2 Lidar οπισθοσκέδασης	53			
	3.2	2.3 Επίλυση της εξίσωσης lidar (Αντιστροφή σήματος-Klett)	54			
	3.3	Πηγές θορύβου στην τεχνική Lidar	57			
	3.4	Doppler Wind Lidar	58			
	3.4	4.1 Φαινόμενο Doppler	59			
	3.4	4.2 Ανίχνευση και εντοπισμός σωματιδίων	62			
	3.4	4.3 Πλεονεκτήματα του Doppler Wind Lidar	63			
	3.5	Ανεμογεννήτρια	64			

	3.5.	.1	Χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας	64
	3.5.2 στο πίσ		Εκτίμηση των χαρακτηριστικών της τύρβης του αέρα που δημιουργείτα ω μέρος της ανεμογεννήτριας με τη βοήθεια του Doppler Lidar	n 69
4 Συσχέτιση αερολυμάτων με ανεμολογικά δεδομένα – εφαρμ πάρκο Λαυρίου.		σχέτι Λαυ <u>ρ</u>	ση αεφολυμάτων με ανεμολογικά δεδομένα – εφαφμογή στο αιολικό γίου.	73
Z	1.1	Aιo	λικό πάρκο Λαυρίου	73
Z	1.2	Τεχ	νική περιγραφή συστήματος του lidar	75
Z	1.3	Χά	ρτες βαρομετρικών συστημάτων	78
	4.3.	.1	Χάρτες βαρομετρικών συστημάτων	78
	4.3.	.2	Συσχέτιση αιωρούμενων σωματιδίων και κατεύθυνσης ανέμου	84
5	Σύν	νοψη	και μελλοντικές προοπτικές1	39
5	5.1	Σύν	οψη1	39
5	5.2	Συμ	ιπεφάσματα1	40
5	5.3	Mελ	λοντικές προοπτικές1	41
6	Βιβ	λιογ	οαφία1	43

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Γενικές πληροφορίες

Η ατμοσφαιρική ρύπανση του πλανήτη μας, δηλαδή η προσθήκη ουσιών στην ατμόσφαιρα λόγω της ανθρωπογενής δραστηριότητας που υπό φυσιολογικές συνθήκες δε θα υπήρχαν, αυξάνεται συνεχώς. Η ρύπανση της ατμόσφαιρας αποτελεί ένα φαινόμενο με σοβαρές συνέπειες, όπως η υπερθέρμανση της γης, η τρύπα του όζοντος και τα αναπνευστικά προβλήματα. Γι'αυτό το λόγο, η αντιμετώπισή της είναι πολύ σημαντική.

Έτσι, η μελέτη της ατμόσφαιρας, πλέον, αποτελεί αντικείμενο έρευνας για πολλούς επιστήμονες, οι οποίοι ασχολούνται είτε με τη μετεωρολογία, η οποία ασχολείται με τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα και την συμπεριφορά τους στο χρόνο είτε με τη κλιματολογία, η οποία μελετά τη μακρόχρονη στατιστική συμπεριφορά των ατμοσφαιρικών παραμέτρων. Για την έρευνά τους κρίνεται απαραίτητη η χρήση τεχνικών ανίχνευσης μέσω τηλεπισκόπισης. Ένα όργανο, το οποίο χρησιμοποιεί τέτοιες τεχνικές, είναι το Lidar.

Η εφεύξεση των οξγάνων Lidar αποτελεί σημαντικό κομμάτι για τη μελέτη της φυσικής της ατμόσφαιξας και της χημικής της σύστασης. Λόγω της υψηλής τους ανάλυσης, τη λειτουξγία τους και τη διεξαγωγή πειξαμάτων κάτω από διάφοξες πεξιβαλλοντικές συνθήκες και τη δυνατότητα κάλυψης μέχξι και 100 km πάνω από το έδαφος, το Lidar αποτελεί, αυτή τη στιγμή, ένα από τα σημαντικότεξα όξγανα για τη μελέτη της ατμόσφαιζας.

Τα συστήματα Lidar χρησιμοποιούνται για την καταγραφή των βασικών παραμέτρων της ατμόσφαιρας, όπως η θερμοκρασία, η πίεση, η υγρασία, η ταχύτητα και η διεύθυνση του άνεμου, η μέτρηση των οπτικών ιδιοτήτων των αερολυμάτων και των νεφών. Με τη βοήθεια αυτών των συστημάτων περιγράφονται οι διάφορες αλληλεπιδράσεις μεταξύ της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας(ηλεκτρομαγνητικό κύμα) και των αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας. Με αυτό τον τρόπο έχουμε τη δυνατότητα, χρησιμοποιώντας μία φωτεινή ακτινοβολία, να ανιχνεύσουμε τα διάφορα συστατικά της ατμόσφαιρας (Weitkamp, 2005).

Τα συστήματα Lidar είναι τα πλέον κατάλληλα για την παρακολούθηση των ατμοσφαιρικών φαινομένων που διαρκούν από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι και κάποια χρόνια. Τέτοια ατμοσφαιρικά φαινόμενα είναι οι διάφορες ανατάραξεις σωματιδίων στη τροπόσφαιρα, η μεταβολή του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος (ΑΟΣ), η μεταβολή των υδρατμών, η αύξηση της τρύπας του όζοντος και η μελέτη των νεφών, η ρύπανσης της ατμόσφαιρας και γενικότερα η κλιματικής αλλαγή (Weitkamp, 2005).

# 2 Αιωρούμενα σωματίδια

### 2.1 Τι είναι τα αιωρούμενα σωματίδια

Ως αιωρούμενα σωματίδια(Suspended Particulate Matter, SPM) χαρακτηρίζουμε κάθε σώμα, στερεό ή υγρό, εκτός του ύδατος, που βρίσκεται σε διασπορά και έχει διάμετρο μεγαλύτερη από 0,0002 μm και μικρότερη από 500 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.

Ορισμένα σωματίδια διαφεύγουν απευθείας από τις πηγές τους, όπως οι καπνοδόχοι και τα αυτοκίνητα. Σε άλλες πάλι περιπτώσεις, αέρια όπως CO, SO<sub>2</sub>, NOx 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 τάξεως των 10 μg/m<sup>3</sup>.

# 2.2 Πηγές των αιωρούμενων σωματιδίων και η χημική σύσταση αυτών

Υπάρχουν τρεις κύριες πηγές αιωρούμενων σωματιδίων στη γήινη ατμόσφαιρα: τα σωματίδια, τα οποία εισέρχονται στην ατμόσφαιρα μέσω της επιφάνειας της γης (για παράδειγμα η σκόνη και το θαλάσσιο αλάτι), τα σωματίδια, τα οποία είναι αποτέλεσμα του φυσικού αερίου και, τέλος, τα σωματίδια, τα οποία εισέρχονται από το διάστημα (κοσμικά σωματίδια).

Οι υδρατμοί και τα παγωμένα αερολύματα σχηματίζουν τα νέφη. Τα αιωρούμενα σωματίδια δεν υπάρχουν απομονωμένα στην ατμόσφαιρα, αλλά αντιδρούν με τα σταγονίδια των νεφών, με τους παγωμένους κρυστάλλους και με το φυσικό αέριο που υπάρχει στην ατμόσφαιρα. Τα αιωρούμενα σωματίδια τα οποία προέρχονται από το έδαφος της γης αποτελούν το κύριο τμήμα των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, περίπου το 50% σε παγκόσμια κλίμακα. Τα αιωρούμενα σωματίδια, τα οποία υπάρχουν στην ατμόσφαιρα είναι αυτά που ενθαρρύνουν, κυρίως, τη συγκέντρωση των αερολυμάτων. Τα κοσμικά αερολύματα δεν επηρεάζουν σημαντικά το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα(ΑΟΣ). Ωστόσο, μπορούν να επηρεάσουν τις ιδιότητες του ατμοσφαιρικού αέρα στα ανώτερα ατμοσφαιρικά στρώματα, όπου η συγκέντρωση των επίγειων αερολυμάτων είναι ελάχιστη.

Η ανθρωπογενής δραστηριότητα έχει σημαντικές επιρροές σε παγκόσμια κλίμακα. Η συγκέντρωση των αερίων έχει αυξηθεί σημαντικά λόγω της βιομηχανικής δραστηριότητας και της μεταφοράς. Λόγω της αύξησης των αερολυμάτων, οδηγούμαστε σε σοβαρά προβλήματα υγείας, κυρίως στις πυκνοκατοικημένες, βιομηχανικές περιοχές. Επίσης, η αύξηση αυτή έχει συμβάλλει σημαντικά και στη κλιματική αλλαγή.

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

#### 1)Στερεά σωματίδια:

Άλας : Προέρχεται από τα επίπεδα της θάλασσας, κυρίως των ωκεανών λόγω της σύγκρουσης των κυμάτων. Το μέγεθός τους κατανέμεται από 0.1μm έως 1 μm και έχουν το σχήμα του κύβου. Το χλωριούχο νάτριο (NaCl), το οποίο είναι το κύριο συστατικό του, διαλύεται εύκολα στο νερό και, σαν αποτέλεσμα ,οι κύβοι μετατρέπονται σε σφαιρίδια σε συνθήκες υψηλής υγρασίας.



Εικόνα 2.2.1 Απεικόνιση αποξηραμένων, θαλάσσιων σωματιδίων άλατος, τα οποία συλλέχθηκαν στη δυτική ακτή της Ιρλανδίας (Chamaillard et al., 2003).

Σκόνη: Στερεά σωματίδια ,τα οποία είναι αποτέλεσμα διαφόρων μηχανικών διεργασιών, όπως η θραύση, η λείανση και η γεώτρηση. Το κύριο χημικό συστατικό τους είναι το πυρίτιο (Si). Ο πυρήνας αυτών των σωματιδίων μπορεί να καλυφθεί από νερό ή πάγο κάτω από συνθήκες υψηλής υγρασίας. Αυτό μπορεί να προκαλέσει αλλαγές στις οπτικές ιδιότητες των σωματιδίων. Τα σωματίδια αυτά είναι μικρά αντίγραφα του αρχικού τους υλικού και η διάμετρός τους είναι μεγαλύτερη του 1 μm.



Εικόνα 2.2.2 Απεικόνιση σωματιδίων σκόνης (Kalashnikova and Sokolov, 2004).

Καπνός: Ένα νέφος από σωματίδια, τα οποία παράγονται από διάφορα είδη φωτοχημικών αντιδράσεων, όπως η καύση, η εξάχνωση και η απόσταξη. Γενικά, ο καπνός θεωρείται ότι έχει βιολογική προέλευση και, συνήθως, προέρχεται από άνθρακα, πετρέλαιο, ξύλο, ή από άλλα είδη ανθρακούχων καυσίμων. Τα σωματίδια καπνού συνθέτονται, κυρίως, από νιτρικά και θειικά οξέα. Πρόκειται, επίσης, για σωματίδια που προέρχονται από μέταλλα, όπως PbO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZnO ή από αέρια που εκπέμπονται από τα φυτά. Πιο συγκεκριμένα, το διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>) οξειδώνεται σε θειικό οξύ (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), πράγμα που επηρεάζεται από τη παρουσία των βαρέων μετάλλων (π.χ. Fe, Mn, V). Δύο από αυτές τις αντιδράσεις φαίνονται παρακάτω:

#### $SO_{\mathbf{2}} + H_{\mathbf{2}}O \rightarrow H_{\mathbf{2}}SO_{\mathbf{4}}$

#### $NO + O_2 + H \rightarrow HNO_3$

Πρόκειται για μικροσκοπικά σωματίδια, σφαιρικού σχήματος κατά κύριο λόγο, της τάξης κάτω του 1 μm.

Βιολογικά σωματίδια: Υπάρχουν στην ατμόσφαιρα σε διάφορα μεγέθη και χαρακτηρίζονται για την ετερογένεια τους. Βιολογικά σωματίδια υπάρχουν στην ατμόσφαιρα λόγω της γύρης, των βακτηρίων, των ιών, των εντόμων και των ζώων. Η ογκομετρική συγκέντρωση των βιολογικών αερολυμάτων εξαρτάται από την εποχή, τη θέση και το ύψος τους. Καταλαμβάνει έως και το 30% των συνολικών ατμοσφαιρικών σωματιδίων. Παρατηρείται χαμηλότερη συγκέντρωση αυτών σε υψηλότερα επίπεδα της ατμόσφαιρας και,κυρίως, κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Τα περισσότερα βιολογικά αερολύματα δεν έχουν σφαιρικό σχήμα, αλλά ακανόνιστο.

Ηφαιστειακά σωματίδια: Προέρχονται από τις εκπομπές των πρωτογενών σωματιδίων και αερίων λόγω της ηφαιστειακής δραστηριότητας. Τα περισσότερα σωματίδια που "εκτινάσσονται" από τα ηφαίστεια (σκόνη και τέφρα) δεν διαλύονται στο νερό και αποτελούνται από μεταλλικά στοιχεία, πυριτικά άλατα και μεταλλικά οξείδια όπως το SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> και Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, που παραμένουν ως επί το πλείστον στη τροπόσφαιρα. Η εκτιμώμενη ροή της σκόνης είναι 30 Tg (Teragram) ανά έτος, γεγονός το οποίο αποδεικνύει τη συνεχή ηφαιστειακή δραστηριότητα.



Εικόνα2.2.3 Οι κύριες πηγές παραγωγής αιωρούμενων σωματιδίων(Πηγή : <u>www.nasa.gov</u>).

Ομίχλη: Αποτελείται από αιωφούμενα σωματίδια υγφών σταγονιδίων. Λόγω των σταγονιδίων, συνεπάγεται ότι τα σωματίδια είναι σφαιφικά. Η διάμετφός τους είναι από 1 έως 10 μm. Όταν αυτά τα σταγονίδια ενώνονται για να σχηματίσουν μεγαλύτεφες σταγόνες της τάξης πεφίπου των 100 μm και πάνω, πέφτουν στην επιφάνεια της γης σαν βφοχή.

Αχλύς: Αποτελείται είτε από μικρά σταγονίδια τα οποία προέρχονται από την υγρασία της ατμόσφαιρας, είτε από σωματίδια σκόνης ή καπνού που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα. Διακρίνεται σε δύο κατηγορίες την "υγρή αχλύς" και την "ξηρά αχλύς". Γενικά, η αχλύς περιορίζει την ορατότητα. Η υγρή αχλύς συνοδεύεται από μεγάλη υγρασία. Η ξηρά αχλύς παρατηρούμενη από μακριά είναι σαν ένα σύννεφο σκοτεινού χρώματος που σκεπάζει τη περιοχή στην οποία εκδηλώθηκε.

Αιθαλομίχλη: Αποτελεί ένα μίγμα από καπνού ,ομίχλης και υδρατμών, η οποία συντίθεται, κυρίως, από τα παράγωγα των διάφορων φωτοχημικών αντιδράσεων. Το μέγεθος των σωματιδίων της αιθαλομίχλης είναι λιγότερο από 1 μm σε διάμετρο.

Ανθρωπογενή αερολύματα: Αποτελούνται από πρωτογενή (π.χ. καυσαέρια και σκόνη) και δευτερογενή σωματίδια τα οποία σχηματίζονται από τις ανθρωπογενείς εκπομπές αερίων. Τα δευτερογενή σωματίδια είναι κυρίως μικρά υγρά σωματίδια ,τα οποία έχουν σφαιρικό σχήμα. Ωστόσο, ένας μεγάλο μέρος των ανθρωπογενών αερολυμάτων αποτελείται από σωματίδια μεγάλου μεγέθους με ακανόνιστο σχήμα. Τα ανθρωπογενή αερολύματα αποτελούν το 10% της συνολικής μάζας των αερολυμάτων. Παρακάτω αναφέρονται οι εκπομπές διάφορων αερίων λόγω της ανθρωπογενής δραστηριότητας το έτος 2006 σε σύγκριση με το έτος 1860, του οποίου οι εκπομπές αναγράφονται μέσα σε παρένθεση:

- Άνθρακας: 7.5 (2.1) Τg το χρόνο
- Ανθρωπογενές SO2: 73 (2.4) Τg το χρόνο
- Διοξείδιο του άνθρακα: 1052 (219) Τg το χρόνο
- NOx: 45 (9) Τg το χρόνο
- NH<sub>4</sub>: 44 (7) Τg το χρόνο
- Πτητικές οργανικές ενώσεις (Volatile Organic Compounds): 251 (97) Τg το χρόνο
- Πρωτογενή οργανικά σωματίδια: 44 (29) Tg το χρόνο
- CH<sub>2</sub>O: 19 (2) Τg το χρόνο
- Αρωματικοί υδρογονάνθρακες που περιέχουν πτητικές οργανικές ενώσεις: 14 (0) Τg το χρόνο.

Υπάρχει, επίσης, και κάποιος άλλος τρόπος διάκρισης των σωματιδίων τον οποίο πρέπει να λάβουμε υπ'όψη. Αυτός ο τρόπος διάκρισης οφείλεται στη προέλευσή τους. Έτσι, έχουμε τρεις κατηγορίες αιωρούμενων σωματιδίων:

- Θαλάσσιας προέλευσης
- Ηπειρωτικής προέλευσης
- Πολικής προέλευσης

Σε κάθε περίπτωση, η σύσταση, οι οπτικές και οι μικροφυσικές τους ιδιότητες είναι διαφορετικές. Τα σωματίδια με ηπειρωτική προέλευση διακρίνονται σε τρεις υποκατηγορίες: αστικής (urban aerosols) προέλευσης, τα σωματίδια που προέρχονται από απομακρυσμένες περιοχές (rural aerosols) και αυτά που προέρχονται από τις ερήμους (desert dust aerosols). Οι τυπικές συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων σε μία απομακρυσμένη (αγροτική ή θαλάσσια) περιοχή είναι της τάξης των 100-200 σωματιδίων ανά cm<sup>3</sup>, ενώ οι αστικές περιοχές υπερβαίνουν τα 6000 σωματίδια ανά cm<sup>3</sup>.

Πρέπει να αναφερθεί ότι η πλειοψηφία των αιωρούμενων σωματιδίων παράγεται με φυσικές διαδικασίες. Η χημική σύσταση των γιγάντιων σωματιδίων αντανακλά τις ιδιότητες της πηγής από την οποία αυτά προέρχονται. Η χημική σύσταση των δευτερογενών σωματιδίων (σωματίδια των οποίων η διάμετρος έχει αυξηθεί με τη διαδικασία της συσσώρευσης και της συσσωμάτωσης και έχουν μέγεθος μικρότερο από 0.1 μm) εξαρτάται από τις χημικές αντιδράσεις με τις οποίες αυτά σχηματίζονται.

### 2.3 Ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων

Οι ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων εξαρτώνται από τις ιδιότητες των υλικών από τα οποία σχηματίζονται και από τον αέρα. Ο ατμοσφαιρικός αέρας αποτελείται από μόρια που ταξιδεύουν με πολύ μεγάλη ταχύτητα. Η μέση απόσταση που καλύπτουν τα μόρια πριν να συγκρουστούν μεταξύ τους ονομάζεται μέση ελεύθερη διαδρομή και συμβολίζεται με λ. Η μέση ελεύθερη διαδρομή μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση:

$$\lambda = \frac{(\mu/0.499)\sqrt{\pi/8}}{\sqrt{P\rho}} \quad (2.1)$$

όπου μ είναι το ιξώδες του αέρα το οποίο δίνεται από την εμπειρική σχέση (1.2) συναρτήσει της θερμοκρασίας T(K):

 $\mu(kg m^{-1}s^{-1}) = 1.3554 * 10^{-6} + 0.6738 * 10^{-7} * T - 3.808 * 10^{-11} * T^{2} + 1.183 * 10^{-14} * T^{3}$ (2.2)

όπου Ρ είναι η πίεση και ρ είναι η πυκνότητα της ατμόσφαιρας.

Σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (T=0°C και P= 1 atm) της ατμόσφαιρας έχουμε ότι  $\lambda$ = 0.0667 μm. Αν θεωρήσουμε τον αέρα ως ιδανικό αέριο , τότε ισχύει η σχέση:

 $P=\rho RT$  (2.3)

Τότε η μέση ελεύθερη διαδρομή λ(T,P) σε συνάρτηση της θερμοκρασίας και της πίεσης δίνεται από την εξίσωση:

$$\lambda(T,P) = \lambda_0 \left(\frac{\mu}{\rho_0} \frac{P_0}{P} \sqrt{\frac{T}{T_0}}\right) \quad (2.4)$$

Όπου ο δείκτης 0 αναφέρεται στις κανονικές συνθήκες(Heinsohn, 1999).

#### **2.3.1 Μέσο ροής**

Ένα ρευστό θεωρείται συνεχές εάν τα κινούμενα σωματίδια, που υπάρχουν σε αυτό, είναι μεγαλύτερα από τη μέση ελεύθερη διαδρομή. Εάν το σωματίδιο είναι συγκρίσιμο

σε μέγεθος ή μικρότερο από τη μέση ελεύθερη διαδρομή, τότε αυτό επηρεάζεται από τις συγκρούσεις με τα υπόλοιπα σωματίδια και η αντίστοιχη ροή ονομάζεται ελεύθερη μοριακή ροή ή γενικότερα ροή ολίσθησης.

Η παράμετρος που χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό ενός συνεχούς μέσου από ένα ελεύθερο μοριακό σύστημα είναι ο αριθμός Knudsen (K<sub>n</sub>), ο οποίος για σφαιρικά σωματίδια με διάμετρο D δίνεται από την εξίσωση:

$$K_{n} = \frac{\lambda}{D} = \begin{cases} K_{n} > 10\\ 0.1 < K_{n} < 10\\ K_{n} < 0.1 \end{cases}$$
(2.5)

Τα διαστήματα που μπορούμε να παρατηρήσουμε είναι χαρακτηριστικά για τον αριθμό Knudsen και χαρακτηρίζουν τη ροή στο μέσο. Η πρώτη

περίπτωση αντιστοιχεί στην ελεύθερη μοριακή ροή, η δεύτερη στη ροή μετάβασης και η τρίτη στο συνεχές μέσο. Πολλά από τα αιωρούμενα σωματίδια, όπως ο καπνός, η αιθάλη, η αχλή ή η λεπτή σκόνη, ανήκουν στη πρώτη περίπτωση της ελεύθερης μοριακής ροής ή στη δεύτερη περίπτωση στη ροή μετάβασης. Στα σωματίδια αυτά ασκείται μία δύναμη, η οποία ονομάζεται *αντίσταση του αέρα* και δίνεται από τη σχέση:

$$F = -\frac{c_D \rho}{2C} \frac{\pi D^2}{4} (v - U) |v - U|$$
(2.6)

όπου C είναι ο παράγοντας ολίσθησης ή παράγοντας διόρθωσης του Cunningham, ο οποίος μπορεί να εκφραστεί από της σχέση

$$C = 1 + K_n \left[ 2.514 + 0.8 \exp(\frac{-0.55}{K_n}) \right]$$
(2.7)

όπου v είναι η ταχύτητα του σωματιδίου, U είναι η ταχύτητα του φευστού και  $c_D$  ο συντελεστής της αντίστασης του αέφα. Είναι προφανές ότι για μεγάλα σωματίδια D>>λ, ο παφάγοντας ολίσθησης είναι ουσιαστικά -1 και μποφεί να παφαλειφθεί από τη σχέση (2.6), ενώ γίνεται σημαντικός για τα μικφά σωματίδια. Πφέπει να αναφεφθεί ότι ο παφάγοντας ολίσθησης είναι ανεξάφτητος της ταχύτητας του σωματιδίου και εξαφτάται μόνο από το μέγεθος και από τις φυσικές ιδιότητες του φευστού (De Nevers,2000).

#### 2.3.2Μέγεθος και μορφή των αιωρούμενων σωματιδίων

Ένα αιζούμενο σωματίδιο φαντάζεται, συνήθως, ως σφαιζικό ή σχεδόν σφαιζικό. Είτε η ακτίνα του σωματιδίου είτε η διάμετζός του μποζούν να χρησιμοποιηθούν για να πεζιγραφεί το μέγεθος του σωματιδίου. Όταν αποφασιστεί αν θα χρησιμοποιηθεί η ακτίνα ή η διάμετζος του σωματιδίου σαν τάξη μεγέθους, υπάρχουν πολλοί τζόποι με τους οποίους θα καθοριστεί το μέγεθος, το οποίο μας οδηγεί, επίσης, και στις ιδιότητες των σωματιδίων αυτών. Για ένα μονοδιάσπαρτο αιωρούμενο σωματίδιο, μία μόνο τάξη μεγέθους περιγράφει τη διάμετρο όλων των σωματιδίων. Αντιθέτως, όσον αφορά τα πολυδιάσπαρτα σωματίδια, η μέτρηση της διαμέτρου δεν είναι αρκετή για να περιγράψει όλα τα σωματίδια, και ορισμένες μελέτες πρέπει να γίνουν ως προς τη κατανομή των μεγεθών τους. Δηλαδή θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν και άλλες παράμετροι.

Δύο ορισμοί που συναντώνται συχνά, όσον αφορά το μέγεθος των σωματιδίων, είναι η διάμετρος του Feret και η διάμετρος του Martin (Reist, 1993). Οι διάμετροι που προανέφερα βοηθούν στην εκτίμηση του μεγέθους των σωματιδίων με ακανόνιστο σχήμα. Η διάμετρος του Feret είναι η μέγιστη απόσταση του σχήματος από άκρη σε άκρη κάθε σωματιδίου ξεχωριστά ενώ η διάμετρος του Martin αφορά το μέγεθος της γραμμής που χωρίζει το κάθε σωματίδιο σε δύο ίσα μέρη. Από τη στιγμή που οι μετρήσεις μπορούν να ποικίλουν ανάλογα με το προσανατολισμό των σωματιδίων και οι μετρήσεις γίνουν ταυτόχρονα για κάθε σωματίδιο ξεχωριστά. Τότε, θεωρώντας ένα τυχαίο προσανατολισμό των σωματιδίων, μία μέση διάμετρος μπορεί να υπολογιστεί.

Το πρόβλημα της μέτρησης του μεγέθους των σωματιδίων μπορεί, κάπως, να απλοποιηθεί χρησιμοποιώντας την ισοδύναμη διάμετρο ή, διαφορετικά, διάμετρο ισοδύναμου όγκου. Η ισοδύναμη διάμετρος είναι η διάμετρος ενός κύκλου δύο διαστάσεων, ο οποίος καλύπτει την ίδια περιοχή με την τρισδιάστατη του ερωτηθέντος σωματιδίου.



Εικόνα 2.3.1 Η διάμετρος του Feret, η διάμετρος του Martin και η ισοδύναμη διάμετρος. Παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη εξ'αυτών είναι η διάμετρος του Feret, ενώ ακολουθεί η ισοδύναμη διάμετρος και, τέλος, η διάμετρος του Martin (Reist, 1993).

Μερικές φορές, η διάμετρος ορίζεται με βάση τη ταχύτητα καθίζησης των σωματιδίων. Τα σωματίδια που έχουν παρόμοιες ταχύτητες καθίζησης, θεωρείται ότι έχουν το ίδιο μέγεθος, ασχέτως του πραγματικού μεγέθους, της σύνθεσης και του σχήματός τους. Έτσι, έχουμε τις εξής δύο κατηγορίες:

Αεροδυναμική διάμετρος- Ισοδύναμη διάμετρος : Είναι η διάμετρος σφαίρας με ρ=1 g/mL, η οποία καθιζάνει με τον ίδιο ρυθμό με το υπό εξέταση σωματίδιο σε ακίνητο αέριο (προκύπτει από αεροδυναμικούς ταζινομητές: προσκρουστήρες με διαδοχικές επιφάνειες).

Διάμετρος Stokes : η διάμετρος σφαίρας που έχει ίδια πυκνότητα και ίδιο ρυθμό καθίζησης με το υπό εξέταση σωματίδιο.

Οι διάμετροι των αιωρούμενων σωματιδίων καλύπτουν τέσσερις τάξεις μεγεθών, από 0.01 μm έως και 1000 μm. Το κατώτερο όριο προσεγγίζει περίπου τη μετάβαση από τα μόρια στα σωματίδια. Στη παρακάτω εικόνα βλέπουμε τις τάξεις μεγεθών των διαμέτρων κάποιων αιρούμενων σωματιδίων.

Η μοφφή των αιωφούμενων σωματιδίων μποφεί να ποικίλει ανάλογα με τη διαμόφφωση και το υλικό από το οποίο πφοέφχονται, για παφάδειγμα οι συμπυκνωμένοι ατμοί είναι τέλειες σφαίφες, οι βαμβακεφές ίνες ή ο αμίαντος έχουν το σχήμα κυλινδφικών ή επίπεδων νηματίων στα οποία ο λόγος του μήκους πφος το πλάτος είναι μεγάλος, η μίκα ή ο χαλαζίας μοιάζουν με πετάλια, ενώ υπάφχει και το ακανόνιστο σχήμα (που είναι η συνηθισμένη πεφίπτωση) το οποίο εμφανίζεται στα σωματίδια της σκόνης που δημιουφγούνται από τον άνθφακα, στα σωματίδια της άμμου ή σ'αυτά που έχουν πφοέλθει από την επεξεφγασία μετάλλων. Για να προσομοιώσει τα μη σφαιφικά σωματίδια ο Fuchs (1964) πρότεινε την εισαγωγή του δυναμικού αδιάστατου παφάγοντα σχήματος X που οφίζεται από το λόγο των δυνάμεων αντίστασης ανάμεσα στα μη σφαιφικά και τα σφαιφικά σωματίδια με ίδιο όγκο και ταχύτητα. Τότε, η εξίσωση (2.6) γφάφεται στην μοφφή:

$$F = -X \frac{c_D}{2C} \frac{\pi D_e^2}{4} (v - U) |v - U| \qquad (2.8)$$

όπου D<sub>e</sub> είναι η ισοδύναμη διάμετρος όγκου ή αεροδυναμική διάμετρος και εκφράζεται μέσω του πραγματικού όγκου του σωματιδίου V:

$$D_e = \left(\frac{6V}{\pi}\right)^{0.33} \qquad (2.9)$$

Ο συντελεστής αντίστασης του αέρα εκφράζεται συναρτήσει του αριθμού Reynolds(Re), που δίνεται από τη σχέση:

$$\operatorname{Re} = \frac{\rho D |v - U|}{\mu} \qquad (2.10).$$

Όλα τα παραπάνω πρέπει να υπολογιστούν με βάση την ισοδύναμη διάμετρο ή αεροδυναμική διάμετρο. Η ισοδύναμη διάμετρος μπορεί να αντικατασταθεί πολλές φορές από το μήκος, το πλάτος ή το ύψος των αιωρούμενων σωματιδίων.

Όσον αφορά τη πυκνότητα των σωματιδίων, τα σφαιρικά σωματίδια, για παράδειγμα, έχουν πυκνότητα ίση με την πυκνότητα του νερού. Στις περισσότερες περιπτώσεις, όμως, τα σωματίδια δεν αποτελούνται από ένα συστατικό ,αλλά είναι συνδυασμός δύο ή περισσότερων συστατικών. Σε αυτές τις περιπτώσεις, εάν το υλικό είναι σύνθετο, η πυκνότητά του είναι πολύ δύσκολο να υπολογιστεί.



o izo (inicionity

Εικόνα 2.3.4 Διάμετροι διάφορων αιωρούμενων σωματιδίων (Πηγή: www.tnms.org).

### 2.4 Οπτικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων

Το φως μπορεί να σκεδαστεί ή να απορροφηθεί από τα αιωρούμενα σωματίδια που βρίσκονται στη ατμόσφαιρα. Η σκέδαση του φωτός κυριαρχεί της απορρόφησης του φωτός στο ορατό. Ωστόσο, η απορρόφηση του φωτός δε μπορεί να αγνοηθεί, γιατί επηρεάζει σημαντικά το συνολικό ισοζύγιο της ακτινοβολίας. Η μείωση της έντασης της άμεσης ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της διάδοσής της μέσω ενός αιωρούμενου σωματιδίου καθορίζεται ταυτόχρονα και από την απορρόφηση και από τη σκέδαση του φωτός. Το σύνολο της σκέδασης του φωτός προς όλες τις κατευθύνσεις και της απορρόφησης ονομάζεται εξασθένηση. Η ενέργεια, η οποία απορροφάται από τα σωματίδια, δεν παραμένει μέσα σε αυτά επ'αόριστον, αλλά εκπέμπει σε μεγαλύτερα μήκη κύματος. Η εκπομπή, η οποία είναι πολύ μικρή στα απτικά μήκη κύματος μπορεί να αγνοηθεί. Το φως συνθέτεται από την υπέφθεση ηλεκτφομαγνητικών κυμάτων με πολύ υψηλές συχνότητες. Για την απλοποίηση της διαδικασίας της αντίδφασης ενός επίπεδου ηλεκτφομαγνητικού κύματος με ένα αιωφούμενο σωματίδιο θεωφείται ότι το σωματίδιο έχει σφαιφικό σχήμα. Έτσι, το ηλεκτφομαγνητικό πεδίο μποφεί να υπολογιστεί τόσο στο εσωτεφικό του σωματιδίου (απαφαίτητη διαδικασία για την εκτίμηση ηλεκτφομαγνητικών φαινομένων αποφφόφησης ενέφγειας) όσο και σε μία αυθαίφετη απόσταση από το σκεδαστή. Η σκεδαζόμενη ενέφγεια μποφεί να ενσωματωθεί στη διεύθυνση της σκέδασης αποδίδοντας ,έτσι ,τη διατομή της σκέδασης ενός σωματιδίου:

$$C_{SCA} = \frac{I}{I_0} \int_S I_{SCA} dS \qquad (2.11)$$

όπου I<sub>0</sub> είναι η ένταση του φωτός που προσπίπτει, I<sub>SCA</sub> είναι η ένταση του σκεδαζόμενου φωτός και S είναι η επιφάνεια, η οποία περιβάλλει το σωματίδιο. Όπως προκύπτει η διατομή της σκέδασης μετριέται σε τετραγωνικά μέτρα. Συνήθως, η διατομή της σκέδασης είναι μικρότερη από τη διατομή του σωματιδίου G, η οποία ορίζεται ως η προβολή του σωματιδίου στο επίπεδο που είναι κάθετο στη διεύθυνση διάδοσης της δέσμης. Ο λόγος

$$Q_{SCA} = \frac{C_{SCA}}{G} \tag{2.12}$$

Καλείται ο συντελεστής απόδοσης σκέδασης. Κάποιος μπορεί, επίσης, να εισάγει το συντελεστή απόδοσης της απορρόφησης ως παράγοντα

$$Q_{ABS} = \frac{C_{ABS}}{G} \tag{2.13}$$

Όπου η διατομή της απορρόφησης ορίζεται από την ηλεκτρομαγνητική θεωρία ως εξής

$$C_{ABS} = \frac{k}{\left|\vec{E}_{0}\right|^{2}} \int_{V} \left|\vec{E}\right|^{2} \varepsilon' dV \qquad (2.14)$$

όπου V είναι ο όγκος του σωματιδίου, k=2π/λ, λ είναι το μήκος κύματος,  $\vec{E}_{\bullet}$  είναι το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου του προσπίπτοντος κύματος και  $\vec{E}$  είναι το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου μέσα στο σκεδαστή. Επομένως ,το **Cabs** εξαλείφεται όταν το το φανταστικό μέρος της διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon^{r}$  = 2nχ είναι ίσο με το μηδέν. Για τα περισσότερα αιωρούμενα σωματίδια (με εξαίρεση τα σωματίδια της αιθάλης), το φανταστικό μέρος χ του δείκτη διάθλασης των σωματιδίων m=n-iχ είναι ένα πολύ μικρός αριθμός στο ορατό (μικρότερος του 0.0001). Αυτό εξηγεί τις σχετικά μικρές επιπτώσεις που προκύπτουν κατά την απορρόφηση κατά τη διάρκεια της αντίδρασης του φωτός με το αιωρούμενο σωματίδιο. Το διάνυσμα  $\vec{E}$  και η ένταση του σκεδαζόμενου φωτός δεν εξαρτάται μόνο από το δείκτη διάθλασης του σωματιδίου αλλά και από το μέγεθος, τη δομή και το σχήμα του (Kokhanovsky, 2008).



Εικόνα 2.4.1 Εξάρτηση συντελεστή απορρόφησης από το μέγεθος και το δείκτη διάθλασης των αιωρούμενων σωματιδίων, όπως είναι υπολογισμένη από τη θεωρία του Mie, η οποία περιγράφει τη σκέδαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων των οποίων το μήκος κύματος είναι μικρότερο ή συγκρίσιμο με τη διάμετρο των σκεδαστών. Το θεωρητικό μοντέλο της είναι μια σφαίρα με διαφορετικό συντελεστή διάθλασης από το εξωτερικό περιβάλλον στο οποίο ισχύουν η κυματική και οι εξισώσεις του Maxwell (Kokhanovsky, 2008).

# 2.5 Επίδραση αιωρούμενων σωματιδίων στην παγκόσμια κλιματική αλλαγή

#### 2.5.1 Τι είναι κλιματική αλλαγή

Η κλιματική αλλαγή είναι η αργή και σταθερή μεταβολή του γήινου κλίματος, τόσο μέσω των φυσικών όσο και των ανθρωπογενών επιδράσεων. Η παγκόσμια κλιματική αλλαγή είναι αποτέλεσμα της πολύπλοκης αλληλεπίδρασης εκατοντάδων μεταβλητών που χαρακτηρίζουν από τη μια την κύρια πηγή ενέργειας (την ηλιακή ακτινοβολία) και από την άλλη ένα μεγάλο αριθμό αιωρούμενων σωματιδίων που προανέφερα. Οποιαδήποτε επέμβαση του ανθρώπου στους παράγοντες που διαμορφώνουν το κλίμα μπορεί να οδηγήσει στην αλλαγή του. Τα τελευταία χρόνια πληθαίνουν οι ενδείξεις ότι οι ανθρωπογενείς εκπομπές ρυπογόνων ουσιών στην ατμόσφαιρα ωθούν το κλίμα σε μια νέα κατάσταση αστάθειας (IPCC,2001). Τα δεκατέσσερα θερμότερα έτη, από την εποχή που ξεκίνησαν οι μετρήσεις, συνέβησαν μετά το 1980. Τα τελευταία χρόνια σημαδεύτηκαν από ασυνήθιστα ακραία φαινόμενα σε όλο τον κόσμο. Η μέση στάθμη της θάλασσας έχει ανέβει τα τελευταία 140 χρόνια περίπου 10-25 εκατοστά. Οι παρατηρήσεις αυτές, σε συνδυασμό με τους θεωρητικούς υπολογισμούς, έχουν οδηγήσει σε μια ευρεία επιστημονική συναίνεση ότι η γη έχει ήδη περάσει σε μια περίοδο κλιματικής αστάθειας, η οποία θα έχει ευρείες περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις.

Όσον αφορά τα αιωρούμενα σωματίδια, η μελέτη τους είναι πολύ σημαντική για τις εκτιμήσεις όχι μόνο της μελλοντικής κλιματικής αλλαγής αλλά, επίσης, και για τη κατανόηση του παρελθόντος κλίματος. Οι επιστήμονες μελετώντας τα αποτελέσματα των αερίων του θερμοκηπίου και των θειικών σωματιδίων, μαζί με τα αποτελέσματα της αλλαγής της εκπεμπόμενης προς το διάστημα ακτινοβολίας ,κατόρθωσαν τα κλιματικά μοντέλα να συμφωνήσουν με τις κλιματικές αλλαγές που παρατηρούνται στο πλανήτη. Παρόλο το γεγονός της εισαγωγής των αιωρούμενων σωματιδίων στα μοντέλα της περιγραφής του γήινου κλίματος, ακόμα δεν έχει διευκρινιστεί η ένταση με την οποία επενεργεί το κάθε είδος σωματιδίων (ανάλογα με τη χημική του σύσταση) στο παγκόσμια κλίμα. Έτσι, αρχικά είχε υπερεκτιμηθεί ο ρόλος των θειικών σωματιδίων και είχε υποεκτιμηθεί ο ρόλος των σωματιδίων που σχηματίζουν τα νέφη. Επομένως, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το direct warming effect (αναφέρεται στη παράγραφο 2.5.2) είναι μεγαλύτερο και οδηγεί σε μια σημαντική αρνητική κατακράτηση της ακτινοβολίας.

### 2.5.2 Επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στη στρατόσφαιρα και στην τροπόσφαιρα

Υπάρχουν πολλοί παράγοντες, τόσο φυσικοί όσο και ανθρωπογενείς, οι οποίοι προσδιορίζουν το κλίμα της γης. Κατά βάση, το κλίμα είναι το αποτέλεσμα της απορρόφησης και της αναδιανομής της ηλιακής ακτινοβολίας από το σύστημα ατμόσφαιρας-υδρόσφαιρας-γης. Η ηλιακή ακτινοβολία παρέχει την ενέργεια η οποία κινεί τα καιρικά φαινόμενα και διαμορφώνει το κλίμα. Περίπου το ένα τρίτο της ηλιακής ακτινοβολίας ανακλάται πίσω στο διάστημα ενώ το υπόλοιπο απορροφάται από τις διάφορες συνιστώσες του κλιματικού συστήματος: την ατμόσφαιρα, τους ωκεανούς, την ξηρά και τις διάφορες μορφές ζωής. Εκτός από την ανακλώμενη,
μικρού μήκους κύματος, ηλιακή ακτινοβολία, η γη εκπέμπει υπέρυθρη ακτινοβολία προς το διάστημα.

Η λεπτή ισορροπία ανάμεσα στην εξερχόμενη ακτινοβολία και την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία προσδιορίζει το παγκόσμιο κλίμα (ισοζύγιο της ακτινοβολίας στη ατμόσφαιρα). Οποιαδήποτε αλλαγή στους παράγοντες που επιδρούν τόσο στην εισερχόμενη όσο και την εξερχόμενη ακτινοβολία ή στον μηχανισμό αναδιανομής της ενέργειας οδηγούν σε αλλαγή του κλίματος. Τα αιωρούμενα σωματίδια (αερολύματα) είναι υπεύθυνα για την κλιματική αλλαγή.

Τα σωματίδια, που παίζουν το πιο σημαντικό ρόλο στο ισοζύγιο της ατμόσφαιρας, είναι αυτά που βρίσκονται στη στρατόσφαιρα, αφού ο μέσος χρόνος παραμονής τους είναι περίπου 15 ημέρες. Στην τροπόσφαιρα υπάρχει καλή ανάμειξη των αέριων μαζών και επομένως τα σωματίδια απομακρύνονται σε συντομότερα χρονικά διαστήματα, της τάξης των ημερών, ανάλογα με το μέγεθός τους (Reist, 1993).Οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες δεν εκπέμπουν μεγάλο αριθμό σωματιδίων στη στρατόσφαιρα σε αντίθεση με την ηφαιστειακή δραστηριότητα, λόγω της οποίας ένα μεγάλο μέρος σωματιδίων εκτοξεύονται στη στρατόσφαιρα (βλ. Εικόνα 2.2.3). Σαν αποτέλεσμα, έχουμε μείωση της θερμοκρασίας για τα επόμενα 1 με 2 χρόνια, λόγω σκέδασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Τα αιωρούμενα σωματίδια αυξάνουν την ανακλαστικότητα της ατμόσφαιρας με αποτέλεσμα να φθάνει στην επιφάνεια της γης λιγότερη ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό έχει σαν συνέπεια την μείωση της θερμοκρασίας και την ψύξη της ατμόσφαιρας (direct cooling effect)(Seinfeld ,Pandis 2006).



Εικόνα 2.5.1: Το Ενεργειακό Ισοζύγιο της Γης είναι ισοσκελισμένο όταν η εξερχόμενη από τη Γη θερμότητα ισούται με την εισερχόμενη ηλιακή ενέργεια (Πηγή: <u>www.physics4u.gr</u>).

Λόγω των ανθρωπογενών και φυσικών επιδράσεων παρατηρείται εκπομπή αερίων θερμοκηπίου (CO<sub>2</sub>, CH, CH<sub>4</sub>, N, N<sub>2</sub>O, CFCs, O,O<sub>3</sub>), εκπομπή αερίων που καταστρέφουν το όζον (π.χ. CFCs) και εκπομπή αιωρούμενων σωματιδίων. Τα οργανικά σωματίδια (OC) και αυτά που περιέχουν θειικά άλατα προκαλούν έντονη

σκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας και επομένως, προκαλούν τοπική ψύξη της ατμόσφαιρας. Αντίθετα, τα σωματίδια αιθάλης (BC: black carbon) και αυτά που περιέχουν άλατα πυριτίου και σιδήρου (mineral dust) απορροφούν έντονα την ηλιακή ακτινοβολία με αποτέλεσμα να προκαλούν τοπική θέρμανση της ατμόσφαιρας (direct warming effect) (Παπαγιάννης, 2009). Τα θειικά σωματίδια επηρεάζουν το κλίμα, διότι λειτουργούν ως πυρήνες συμπύκνωσης νεφών. Επομένως, όσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα των διαθέσιμων πυρήνων συμπύκνωσης, τόσα περισσότερα νέφη σχηματίζονται. Επίσης, τα θειικά σωματίδια παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των ιδιοτήτων των πολικών ατμοσφαιρικών σύννεφων, αφού μπορούν να αποτελέσουν επιφάνειες για ετερογενείς αντιδράσεις. Τέλος, όσον αφορά τα σωματίδια καπνού, εκτός του ότι ρυπαίνουν την ατμόσφαιρα, προκαλούν και ισχυρή επίδραση στις τοπικές καιρικές συνθήκες. Περιοχές της γης που καλύπτονται με σωματίδια καπνού δε θερμαίνονται τόσο γρήγορα όσο και οι περιοχές που είναι ελεύθερες από καπνό και, επομένως, ο σχηματισμός νεφών μπορεί να είναι πιο περιορισμένος. Οι περιοχές ,οι οποίες δεν καλύπτονται από καπνό μπορούν να θερμαίνονται γρηγορότερα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία βαθμίδας της θερμοκρασίας στο σύνορο ανάμεσα στις περιοχές που έχουν σωματίδια καπνού και σε αυτές που δεν έχουν. Αυτό το γεγονός μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη καταιγίδας κατά μήκος της θερμοβαθμίδας της ατμόσφαιρας.



Εικόνα 2.5.2: Η ανακλαστικότητα των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα (IPCC, 2007).

Οι επιπτώσεις της παρουσίας των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα χωρίζονται σε έμμεσες και άμεσες. Στις άμεσες επιπτώσεις κατατάσσονται οι έντονες μεταβολές της θερμοκρασίας στο έδαφος, αλλά και καθ'ύψος της ατμόσφαιρας, τα ακραία καιρικά φαινόμενα (ξηρασία, βροχοπτώσεις, χιονοπτώσεις), η τήξη των πάγων και η ανύψωση της στάθμης της θάλασσας. Οι έμμεσες επιπτώσεις είναι οι δασικές πυρκαγιές, η μεταβολή της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας, οι αλλαγές στα οικοσυστήματα και στην βιοποικιλότητα (χλωρίδα, πανίδα, ποτάμια, λίμνες, ωκεανοί), η εξάπλωση ασθενειών και η μετακίνηση πληθυσμών.



Εικόνα 2.5.2 Συστατικά της ατμόσφαιρας του παγκόσμιου γήινου κλίματος, η εξέλιξή τους και οι αντιδράσεις τους (IPCC, 2001).

# 2.6 Επιπτώσεις αιωρούμενων σωματιδίων στο περιβάλλον και στην υγεία

Τις τελευταίες δεκαετίες η προσοχή των επιστημόνων έχει στραφεί στο θέμα των αιωρουμένων σωματιδίων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, τόσο για τα προβλήματα στην υγεία του ανθρώπου, όσο και για την επιπτώσεις στο περιβάλλον και τα οικοσυστήματα.

Τα προβλήματα υγείας, νοσηρότητα και θνησιμότητα, που προκαλούν τα αιωρούμενα εισπνεόμενα σωματίδια, ιδιαίτερα με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερο των 10 μm έχουν τεκμηριωθεί με πρόσφατες επιδημιολογικές έρευνες. Τα αιωρούμενα σωματίδια εκπέμπονται σε σημαντικές ποσότητες από τα τροχοφόρα, τις βιομηχανίες που καίνε ακατέργαστο πετρέλαιο και ντίζελ για θέρμανση και ενέργεια και άλλες διεργασίες σε αστικές περιοχές (τριβή ελαστικών, φθορά κτιρίων, γαιώδης σκόνη, κλπ). Τα μικρά σωματίδια παραμένουν αιωρούμενα, ανάλογα με το μέγεθός τους, και μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις. Η πορώδης επιφάνεια των σωματιδίων μπορεί να εισροφήσει

βαθέα μέταλλα, θειικά και νιτθικά άλατα, πολυκυκλικούς αθωματικούς υδρογονάνθρακες (ΠΑΥ) και άλλες τοξικές και καθκινογόνες χημικές ουσίες. 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 2.6.1: Μια φωτογραφία της Αθήνας που περιγράφει το πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης λόγω των αυξημένων συγκεντρώσεων αιθάλης με την καύση ξυλείας ή άλλης βιομάζας σε τζάκια και ξυλόσομπες για θέρμανση(Πηγή: www.econews.gr).

Οι βασικοί μηχανισμοί δράσης των σωματιδίων έχουν μελετηθεί. Περιλαμβάνουν κυρίως μηχανισμούς οξυγονούχων ελευθέρων ριζών, καταστροφή αντιοξειδωτικών ενζυμικών συστημάτων και οξειδωτικού στρες (όταν τα επίπεδα των ελευθέρων ριζών οξυγόνου υπερβαίνουν τα φυσιολογικά όρια). Οι συνέπειες είναι κυρίως οξειδωτικές βλάβες σε βιομόρια (λιπίδια, πρωτεΐνες, νουκλεϊνικά οξέα) των πνευμονικών ιστών. Σημαντικός αριθμός ερευνών με αιωρούμενα σωματίδια τεκμηριώνουν τις οξειδωτικές θραύσεις και άλλες βλάβες στο DNA των κυττάρων. Τα προβλήματα αυτά μελετούνται από μεγάλης κλίμακας επιδημιολογικές και τοξικολογικές έρευνες.

Όσον αφορά τις επιδράσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης χωρίζονται στις βραχυχρόνιες και τις μακροχρόνιες. Οι βραχυχρόνιες όταν υπάρχει αυξημένη τιμή ατμοσφαιρικής ρύπανσης για μια μέρα ή για μια σύντομη χρονική περίοδο, λόγω των εκπομπών ρύπων αλλά και των ιδιαίτερων μετεωρολογικών συνθηκών. Τις μέρες αυτές παρατηρείται αύξηση της θνησιμότητας κατά μέσο όρο 0,5% ημερησίως και κατά 1,6% εάν για έναν συνεχόμενο μήνα έχουμε υπερβάσεις. Άλλες επιπτώσεις είναι η αύξηση του αριθμού των εισαγωγών των επειγόντων περιστατικών από αναπνευστικά προβλήματα κατά 1% και το ποσοστό αυτό περιλαμβάνει και τις εισαγωγές άσθματος από παιδιά. Επίσης αυξάνονται κατά 0,5% ημερησίως οι εισαγωγές από καρδιακά νοσήματα. Παρατηρούνται 66.000 επιπλέον εισαγωγές στα νοσοκομεία, σε 23 εκατ. υπολογίζονται οι ημέρες χρήσης αναπνευστικών φαρμάκων, ενώ οι ανθρωποημέρες αναγκαστικής περιορισμένης δραστηριότητας υπολογίζονται στα 200 εκατομμύρια ανά έτος. Μακροχρόνια, οι συνέπειες της διαβίωσης σε μια ρυπασμένη πόλη μπορούν να αποβούν πολύ πιο σημαντικές (Katsouyanni, 2008).



Εικόνα 2.6.2: Διαχρονική εξέλιξη ρύπανσης από αιωρούμενα σωματίδια σε τρεις σταθμούς μέτρησης στην Αθήνα (2001-2010) (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2011).

#### 2.6.1 Επιπτώσεις στα δάση και τα οικοσυστήματα

Τα τελευταία χρόνια η προσοχή των επιστημόνων έχει στραφεί και στις επιπτώσεις των αιωρουμένων σωματιδίων και όξινων εναποθέσεων (θειικά και νιτρικά άλατα που

εγκλωβίζονται σωματίδια) φυτικά και ζωικά είδη στα στα και τα οικοσυστήματα(Grantz et al, 2003). Τα σωματίδια μετά από ορισμένο χρονικό διάστημα εναποτίθενται στην επιφάνεια των φυτών και των δένδρων, σε υδατικά συστήματα και στο έδαφος. Οι επιπτώσεις τους στα έμβια όντα και τα οικοσυστήματα είναι ανάλογα του μεγέθους, της σύστασης και της περιεκτικότητας σε προσροφημένα τοξικά μέταλλα, οργανικές ουσίες και θειικά και νιτρικά άλατα. Οι επιπτώσεις στα φυτά ξεκινούν με την παρεμπόδιση της φωτοσύνθεσης, μείωση της αναπνοής των φυτών και πρόσληψη θρεπτικών ουσιών από το έδαφος. Ενώ άλλες επιπτώσεις είναι η ανισορροπία στην εκπομπή θρεπτικών ουσιών από τα φύλλα και στην κατανομή του άνθρακα στους φυτικούς ιστούς. Στα ζώα, τα σωματίδια μπορούν να επιδράσουν στην αναπαραγωγή, στη γενετική ποικιλότητα, στην κατανομή και πυκνότητα του πληθυσμού και στη βιοποικιλότητα. Σε επίπεδο κοινότητας ειδών μπορούν να επιδράσουν στα τροφικά επίπεδα, στην κατανομή των ριζικών συστημάτων φυτών και δένδρων, στην παραγωγικότητα του εδάφους και στη βιομάζα. Στα οικοσυστήματα, οι επιπτώσεις των σωματιδίων μπορεί να εμφανισθούν στους κύκλους των θρεπτικών υλικών, στον υδρολογικό κύκλο και στη ροή της ενέργειας (Sigal, 1987).

Τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν μεγάλη ποικιλία μεγεθών και σύστασης (τοξικές ουσίες, βαρέα μέταλλα, όξινα και αλκαλικά άλατα) με αποτέλεσμα να επηρεάζουν απλούς οργανισμούς, κοινότητες και οικοσυστήματα σε περιοχές όπου οι εναποθέσεις είναι μακροχρόνιες και σε υψηλές συγκεντρώσεις. Αν και οι τοξικές επιδράσεις των αιωρουμένων σωματιδίων σε φυτά, ζώα και οικοσυστήματα είναι σημαντικές δεν έχουν μελετηθεί σε μεγάλο βαθμό όπως με τους άλλους αέριους και στερεούς ρύπους.



Εικόνα 2.6.2: Τα αιωρούμενα σωματίδια τα οποία προέρχονται από τα εργοστάσια μέσω της καύσης προκαλούν σοβαρά προβλήματα στο περιβάλλον και στο οικοσύστημα.

# 3 Lidar

### 3.1 Ιστορική αναδρομή

Το όνομα LIDAR προϋπήρχε λόγω της ύπαρξης άλλων βασικών οπτικών τεχνικών που χρησιμοποιούσαν τη λυχνία έκλαμψης ως μέσο για να αποκτηθεί μια κατακόρυφη κατανομή, το οποίο ξεκίνησε από τη δεκαετία του '30 με τους Synge (1930), Hulbert (1937), Johnson (1939) και Elterman (1954), οι οποίοι χρησιμοποίησαν λυχνίες τόξου άνθρακα, και ακολουθεί ο Friedland (1956) ο οποίος χρησιμοποιεί παλμικό φως. Εκείνη την περίοδο, οι επιστήμονες απέκτησαν αρκετή πληροφορία για το ύψος στην ατμόσφαιρα σαρώνοντας το οπτικό πεδίο ενός απομακρυσμένου τηλεσκοπίου κατά μήκος μιας συνεχής φωτεινής ακτινοβολίας. Το 1938 χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά παλμοί φωτός για να μετρήσουν τα βασικά ύψη των νεφών. Η γενιά αυτή, η οποία χρησιμοποιεί μια διάταξη με απομακρυσμένους 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 την μέτρηση του χρόνου μετ'επιστροφής μεταξύ του παλμού εκπομπής και του σήματος ανίχνευσης. Τα συγκεκριμένα lidar (acronym lidar) που χρησιμοποιούνται για αυτές τις τεχνικές μέτρησης αναπτύχθηκαν αρχικά από τους Middleton xat Spilahaus (1953).

Το 1960 άρχισε η ανάπτυξη της νέας τεχνολογίας lidar με την εφεύρεση του laser και του παλμικού ή, διαφορετικά Q-switched laser (1962). Αργότερα, οι Fiocco και Smullin (1963) δημοσίευσαν εικόνες της ατμόσφαιρας χρησιμοποιώντας το laser ρουβινίου (ruby laser). Σε μια δεκαετία όλες οι βασικές τεχνικές lidar είχαν ήδη διαμορφωθεί. Από εκείνη την εποχή, τα lidar γνώρισαν μεγάλη επιτυχία η οποί συνδέεται έντονα με τη πρόοδο της τεχνολογίας των laser. Οι περισσότερες διατάξεις που σχεδιάστηκαν και χρησιμοποιούν laser σχεδιάστηκαν κυρίως για lidar για να ικανοποιούν τις μεγάλες απαιτήσεις συγκεκριμένων τεχνικών όσον αφορά τη 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 τη γήινη ατμόσφαιρα και να ανιχνεύσουν τα διάφορα είδη αερολυμάτων, αλλά και

μοριακών ρύπων, όπως τα O<sub>3</sub>, NOx, SO<sub>2</sub>, Hg, μεθυλοβενζόλιο, βενζόλιο (Koelsch et al, 1989), και να μετρήσουν τις οπτικές ιδιότητες των αερολυμάτων, όπως το οπτικό βάθος, τους συντελεστές οπισθοσκέδασης και εξασθένησης, διάφορες μετρήσεις το 1992, ο Boesenberg και άλλοι το 2003, οι Kovalev και Eichinger το 2004.

Η ίδουση του Ευρωπαϊκού Δικτύου EARLINET (European Aerolosl Lidar Network) το 2000 (Boesenberg et al., 2003) επέτρεψε την ίδουση μιας τριετής κλιματολογίας για τη κάθετη κατανομή των αερολυμάτων κυρίως στη κεντρική Ευρώπη, στην Ελλάδα, στην Πολωνία και στη Λευκορωσία. Από την ίδουση του EARLINET και μετά, 20.000 κατακόρυφες κατανομές για αερολύματα πάρθηκαν κάτω από ποικίλες μετεωρολογικές καταστάσεις, όσον αφορά τη τοπική αλλά και τη μεγάλης εμβέλειας μεταφορά των αερολυμάτων στη 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 Εtna της δυτικής ακτής της Σικελίας το 2005 και του ηφαιστείου της Ισλανδίας Εγjafjallajökull το 2010 (Papayannis et al, 2010).

# 3.2 Αρχή λειτουργίας και γενική περιγραφή του συστήματος LIDAR

Η τεχνική της τηλεπισκόπησης με χρήση ακτινοβολίας laser (τεχνική LIDAR), έχει καθιερωθεί διεθνώς ως μία αποτελεσματική και αξιόπιστη μέθοδος μελέτης και παρακολούθησης των βασικότερων χαρακτηριστικών της ατμόσφαιρας. Εξαιτίας της υψηλής χωρικής (της τάξης των 15-50 m) και χρονικής (της τάξης των 1-15 min) ακρίβειας των μετρήσεων η τεχνική lidar αποτελεί μια πανίσχυρη και πρωτοποριακή μέθοδο παρατήρησης της μεταβολής των σημαντικότερων μετεωρολογικών και ατμοσφαιρικών παραμέτρων καθύψος, από την επιφάνεια του εδάφους έως τα 10-20 km, περίπου.

Η τεχνική lidar βασίζεται στην εκπομπή παλμικής ακτινοβολίας laser στην ατμόσφαιρα και ακολούθως, στην καταγραφή της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας laser. Η ατμόσφαιρα αποτελούμενη από άτομα, μόρια, αιωρούμενα σωματίδια (αερολύματα), προκαλεί εξασθένηση της διερχόμενης ακτινοβολίας laser. Η σκεδαζόμενη ακτινοβολία συλλέγεται από ένα οπτικό τηλεσκόπιο και οδηγείται στο σύστημα λήψης και καταγραφής των σημάτων lidar (Weitkamp, 2005). Η τεχνική lidar, αναλύοντας τα 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 (~3-7 m) και χρονική ακρίβεια (10-30 s).



Εικόνα 3.2.1 : Τυπική διάταξη συστήματος Lidar (Weitkamp, 2005).

Τα κύρια εξαρτήματα που αποτελούν μία διάταξη τηλεπισκόπησης LIDAR είναι μία ισχυρή παλμική πηγή LASER, ένα οπτικό σύστημα ανίχνευσης της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας (τηλεσκόπιο) και μετατροπής της σε ηλεκτρικό σήμα και ένα σύστημα καταγραφής, που καταγράφει και ψηφιοποιεί το σήμα. 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. Συχνά, ένα μικρό μέρος αυτού του παλμού (περίπου το 1%) λαμβάνεται ως δείγμα για να καθορίσει τα εξής : το χρόνο αρχής της μέτρησης (ορισμός του μηδενικού χρόνου t<sub>0</sub>), το σήμα αναφοράς, το οποίο με το σήμα επιστροφής μπορούν να κανονικοποιηθούν και να δώσουν μια τιμή για την ενέργεια εξόδου, εξαιτίας του γεγονότος ότι η εκπεμπόμενη ενέργεια της δέσμης laser μεταβάλλεται χρονικά, και τον έλεγχο του μήκους κύματος του laser στην περίπτωση χρήσης laser μεταβλητού μήκους κύματος.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές lidar για την τηλεπισκόπιση ατμοσφαιρικών παραμέτρων, οι οποίες βασίζονται σε διαφορετικές αλληλεπιδράσεις της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας και των διάφορων συστατικών της 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 διαφορική σκέδαση / απορρόφηση από τα μόρια και τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας. Μια σύντομη περιγραφή των παραπάνω οπτικών αλληλεπιδράσεων της ακτινοβολίας laser, παρουσιάζεται παρακάτω (Measures,1988).

- 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 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 : 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.

Ανάλογα με το φυσικό μηχανισμό που χρησιμοποιείται για να πραγματο- ποιηθεί μία μέτρηση, τα συστήματα lidar είναι δυνατόν να καταταχθούν σε επιμέρους κατηγορίες τις οποίες αναφέρουμε παρακάτω (Weitkamp 2005) :

- Lidar οπισθοσκέδασης
- Lidar απο<u>ρ</u>οόφησης
- Lidar Raman

- Lidar φθορισμού
- Lidar Doppler

#### 3.2.1 Βασική εξίσωση Lidar

Στις επόμενες παραγράφους θα παρουσιάσουμε τις βασικές εξισώσεις της τεχνικής lidar. Η εξίσωση αυτή εξαρτάται από το είδος της αλληλεπίδρασης μεταξύ της ακτινοβολίας laser και της ατμόσφαιρας. Στην ελαστική σκέδαση (Rayleigh και Mie) το μήκος κύματος της ανιχνευόμενης δέσμης είναι ίδιο με αυτό της εκπεμπόμενης δέσμης laser σε αντίθεση με την μη-ελαστική σκέδαση (Raman).

Στη πιο απλή του μορφή, το ανιχνευόμενο σήμα lidar μπορεί να γραφτεί σαν :

$$P(R) = KG(R) \cdot \beta(R) \cdot T(R) \quad (3.1)$$

όπου P η ισχύς που λαμβάνεται από απόσταση R σχηματίζεται από τέσσερις παράγοντες. Ο πρώτος παράγοντας K περιλαμβάνει την απόδοση του συστήματος, ο δεύτερος G(R) περιγράφει τη γεωμετρία της μέτρησης. Αυτοί οι δύο παράγοντες προσδιορίζονται απόλυτα από τη διάταξη και, επομένως, είναι δυνατόν να ελεγχθούν κατά τη διάρκεια του πειράματος. Η πληροφορία που βρίσκεται στην ατμόσφαιρα και, επομένως, όλες οι υπό μέτρηση ποσότητες περιέχονται στους δύο επόμενους παράγοντες της παραπάνω εξίσωσης. Ο όρος β(R) είναι ο συντελεστής οπισθοσκέδασης σε απόσταση R. Περιγράφει την ικανότητα της ατμόσφαιρας να σκεδάζει το φως πίσω στη διεύθυνση από την οποία προήλθε. Ο παράγοντας T(R) είναι ο όρος εκπομπής και περιγράφει πόσο φως χάνεται κατά τη διαδρομή από και προς το lidar. Τόσο το β(R) όσο και το T(R) είναι αντικείμενα διερεύνησης και άγνωστα για το πειραματιστή.

Πιο λεπτομερώς ο παράγοντας του συστήματος γράφεται ως

$$K = P_0 \frac{c\tau}{2} A\eta \qquad (3.2)$$

όπου  $P_0$  είναι η μέση ισχύς ενός παλμού laser και τ είναι το χωρικό μήκος του παλμού. Επομένως,  $E_0 = P_0 \tau$  είναι η ενέργεια του παλμού και ct είναι το μήκος του όγκου που φωτίζεται από το παλμό laser μία συγκεκριμένη στιγμή. Ο παράγοντας ½ εμφανίζεται εξαιτίας μιας αναδίπλωσης του παλμού laser κατά τη διάρκεια της διαδικασίας οπισθοσκέδασης. Όταν το σήμα του lidar ανιχνεύεται σε μία χρονική στιγμή t μετά το παλμό που εκπέμφθηκε, το οπισθοσκεδαζόμενο φως από το άκρο του παλμού προέρχται από την απόσταση  $R_1 = c\tau/2$ . Ταυτόχρονα, το φως που παράγεται από τα πίσω άκρα έρχεται από απόσταση  $R_2=c(t-\tau)/2$ . Το  $\Delta R=R_1-R_2=ct/2$  είναι το τμήμα του όγκου από το οποίο η οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία λαμβάνεται σε μία χρονική στιγμή και ονομάζεται ενεργό (χωρικό) μήκος παλμού. Α είναι η επιφάνεια του κύριου οπτικού δέκτη, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη συλλογή της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας, και η είναι η συνολική αποδοτικότητα του συστήματος. Περιλαμβάνει την οπτική αποδοτικότητα όλων των στοιχείων τα οποία πρέπει να διασχίσει η εκπεμπόμενη και λαμβανόμενη ακτινοβολία και την αποδοτικότητα ανίχνευσης. Η επιφάνεια του τηλεσκοπίου Α και η ενέργεια του laser  $E_0$ , ή διαφορετικά η μέση ισχύς του laser  $\overline{P} = E_0 \omega_{\varepsilon\pi}$ , όπου  $\omega_{\varepsilon\pi}$  η συχνότητα επανάληψης παλμών, είναι βασικές παράμετροι ενός συστήματος lidar. Ένα άλλο σημείο βελτιστοποίησης για το καλύτερο δυνατό σήμα lidar είναι η συνολική αποδοτικότητα του συστήματος η.



Εικόνα 3.2.2: Απεικόνιση της γεωμετρίας του Lidar (Weitkamp, 2005).

Ο γεωμετρικός παράγοντας

$$G(R) = \frac{O(R)}{R^2}$$
 (3.3)

πεφιλαμβάνει τη συνάφτηση επικάλυψης του πεδίου ανίχνευσης της δέσμης O(R), που πεφιγφάφηκε πφοηγουμένως με τον όφο R<sup>-2</sup>. Η τετφαγωνική μείωση της έντασης του σήματος με την απόσταση οφείλεται στο ότι η πεφιοχή λήψης του τηλεσκοπίου αποτελεί μέφος της επιφάνειας της σφαίφας ακτίνας R, η οποία πεφιβάλλει τον όγκο σκέδασης. Αν φανταστούμε ένα ισοτφοπικό σκεδαστή σε απόσταση R, τότε η επιφάνεια Α του τηλεσκοπίου θα συλλέξει ένα τμήμα:

$$\frac{I_c}{I_s} = \frac{A}{4\pi R^2} \qquad (3.4)$$

της ολικής έντασης Is, η οποία σκεδάζεται στη στερεά γωνία 4π. Με άλλα λόγια, η στερεά γωνία  $\frac{A}{R^2}$  είναι η γωνία 'αντίληψης 'του lidar για ακτινοβολία που έχει σκεδαστεί σε απόσταση R. Ο παράγοντας 4π δεν εμφανίζεται στην εξίσωση lidar καθώς απλοποιείται με τον συντελεστή οπισθοσκέδασης β. Η εξάρτηση R<sup>-2</sup> είναι υπεύθυνη κυρίως για την μεγάλη δυναμική περιοχή του σήματος lidar. Αν συνεχίσουμε ένα σήμα με O(R)=1 σε απόσταση 10 m, τότε το σήμα θα είναι 6 τάξεις μεγέθους μικρότερο σε απόσταση 10 km εξαιτίας του γεωμετρικού φαινομένου. Η γεωμετρική συμπίεση του σήματος σε μικρές αποστάσεις είναι πιθανή (σχήμα 3.2.3 όπου παρουσιάζεται μία αυθαίρετη αλλά *εαλιστι*κή συνάρτηση επικάλυψης, πολλαπλασιασμένη με τη συνάρτηση  $R^{-2}$ ). Το ισχυρό σήμα στο κοντινό πεδίο υποβιβάζεται κατά αρκετές τάξεις μεγέθους. Σε ορισμένες περιστάσεις η ατμόσφαιρα βοηθά στην συμπίεση του σήματος μέσω αύξησης της οπισθοσκέδασης σε μεγάλες αποστάσεις. Συνήθως, η ατμόσφαιρα προκαλεί μία επιπλέον μείωση του σήματος με την απόσταση (ακτίνα).



Εικόνα 3.2.3: Συνάρτηση σχετικής έντασης σήματος με την απόσταση (Weitkamp, 2005).

Ο συντελεστής οπισθοσκέδασης β(R,λ) είναι η κύρια ατμοσφαιρική παράμετρος που καθορίζει την ισχύ του σήματος lidar. Περιγράφει πόσο φως οπισθοσκεδάζεται προς το δέκτη του lidar. Ο συντελεστής οπισθοσκέδασης είναι μία ειδική τιμή του συντελεστή σκέδασης για γωνία σκέδασης θ=180°. Έστω N<sub>j</sub> η συγκέντρωση των σκεδαζόμενων σωματιδίων του είδους j μέσα στον όγκο που φωτίζεται από το παλμό laser, και  $d\sigma_{j,sca}(\pi,\lambda)/d\Omega$  η διαφορική διατομή σκέδασης των σωματιδίων για την κατεύθυνση επιστροφής σε μήκος κύματος λ ο συντελεστής οπισθοσκέδασης μπορεί να γραφεί ως:

$$\beta(R,\lambda) = \sum_{j} N_{j}(R) \frac{d\sigma_{j,sca}}{d\Omega}(\pi,\lambda) \qquad (3.5)$$

Αθροίζοντας όλα τα είδη των σκεδαστών. Επειδή η συγκέντρωση δίνεται σε μονάδες m<sup>-3</sup> και η διαφορική διατομή σκέδασης m<sup>2</sup>sr<sup>-1</sup>, ο συντελεστής οπισθοσκέδασης έχει μονάδες m<sup>-1</sup>sr<sup>-1</sup>.

Αν επιστρέψουμε στην απλοποιημένη ισοτροπική σκέδαση και υποθέσουμε ότι υπάρχει μόνο ένας τύπος σωματιδίων σκέδασης στον όγκο σκέδασης, η σχέση ανάμεσα στο συντελεστή οπισθοσκέδασης και τη διατομή ισότροπης σκέδασης σ<sub>j,sca</sub> είναι 4πβ=N  $\sigma_{sca}$ . Η ένταση σκεδαζόμενου φωτός από τον ακτινοβολημένο όγκο V=A<sub>L</sub>ΔR=A<sub>L</sub>cτ/2, με A<sub>L</sub> τη διατομή της δέσμης laser, είναι ανάλογο της επιφάνειας A<sub>s</sub>=N  $\sigma_{sca}$ V, δηλαδή τη διατομή σκέδασης όλων των σωματιδίων στον όγκο V. Επομένως, η σχετική ένταση του σκεδαζόμενου φωτός είναι:

$$\frac{I_S}{I_0} = \frac{A_S}{A_L} = \frac{N\sigma_{sca}c\tau}{2} = \frac{4\pi\beta c\tau}{2} \qquad (3.6)$$

Μέσω της εξίσωσης, καταλήγουμε στη σχέση μεταξύ της συλλεγόμενης και εκπεμπόμενης έντασης του φωτός:

$$\frac{I_C}{I_0} = \frac{A\beta c\tau}{2R^2} \tag{3.7}$$

Το δεξί μέρος της παραπάνω εξίσωσης περιγράφει γεωμετρική σκέδαση, δηλαδή περιέχει το μέγεθος και τις ιδιότητες οπισθοσκέδασης του σκεδαζόμενου όγκου και τη γωνία ' αντίληψης ' του lidar.

Στην ατμόσφαιρα, η σκέδαση προκαλείται από αιωρούμενα σωματίδια (aer) και από την μοριακή ατμόσφαιρα (mol). Έτσι γράφουμε τον συνελεστή οπισθοσκέδαση ως εξής:

$$\beta(R,\lambda) = \beta_{mol}(R,\lambda) + \beta_{aer}(R,\lambda) \quad (3.8)$$

όπου με β<sub>mol</sub> και β<sub>aer</sub> αναφερόμαστε στη σκέδαση που οφείλεται στη μοριακή ατμόσφαιρα και στα αιωρούμενα σωματίδια, αντίστοιχα. Όσον αφορά την σκέδαση από την μοριακή ατμόσφαιρα, οφείλεται κυρίως από τα μόρια του αζώτου και του οξυγόνου και εξαρτάται από την πυκνότητα της ατμόσφαιρας για αυτό και μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια της γης.

Ο τελευταίος παράγοντας στην εξίσωση lidar είναι η διαπερατότητα και ισχύει:

$$T(R,\lambda) = e^{-2\int_0^R d(r,\lambda)dr} \qquad (3.9)$$

Όπου α(λ,r) είναι ο συντελεστής εξασθένησης, ο οποίος ορίζεται όπως και ο συντελεστής οπισθοσκέδασης:

$$\alpha(R,\lambda) = \sum_{j} N_{j}(R) \sigma_{j,ext}(\lambda) \qquad (3.10)$$

Ο παφάγοντας 2 υπάφχει όπως έχει πφοαναφεφθεί λόγω της διπλής διαδφομής του σήματος laser. Η εξασθένιση οφείλεται λόγω της σκέδασης και της αποφρόφησης της ακτινοβολίας από τα μόφια και τα αιωφούμενα σωματίδια που υπάφχουν στην ατμόσφαιφα (Weitkamp, 2005).

Έτσι ορίζουμε το συντελεστή εξασθένησης με τη παρακάτω μορφή:

$$\alpha(R,\lambda) = \alpha_{mol,sca}(R,\lambda) + \alpha_{mol,abs}(R,\lambda) + \alpha_{aer,sca}(R,\lambda) + \alpha_{aer,abs}(R,\lambda)$$
(3.11)

Με τους δείκτες sca και abs αναφερόμαστε στην εξασθένηση που συμβαίνει λόγω της σκέδασης και της απορρόφησης αντίστοιχα.

Επίσης, ορίζουμε και την ενεργό διατομή εξασθένησης ως εξής:

$$\sigma_{ext}(\lambda) = \sigma_{sca}(\lambda) + \sigma_{abs}(\lambda) \tag{3.12}$$

Τελικά η εξίσωση lidar μπορεί να γραφεί στη γενική της μορφή ως εξής:

$$P(R) = P_0 \frac{c\tau}{2} A\eta \frac{O(R)}{R^2} \beta(R,\lambda) e^{-2\int_0^R a(r,\lambda)dr}$$
(3.13)

#### 3.2.2 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 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 τα 0.11– Joule/παλμό. Το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας εξαρτάται από το είδος των ατμοσφαιρικών συστατικών που θέλουμε να ανιχνεύσουμε και κυμαίνεται από το υπεριώδες (0.26μm) έως το μέσο υπέρυθρο (12μm). 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 κατά συνέπεια μεγάλη ακρίβεια και ευαισθησία στις λαμβανόμενες μετρήσεις.

Ακολούθως, η εκπεμπόμενη δέσμη laser κατευθύνεται μέσω ενός οπτικού συστήματος κατόπτρων στον υπό εξέταση ατμοσφαιρικό στόχο. Συνήθως, ένα μικρό μέρος της δέσμης laser χρησιμοποιείται πριν εγκαταλείψει το σύστημα για την συνεχή καταγραφή της ενέργειας του εκπεμπόμενου παλμού, του μήκους κύματος, καθώς και για να σηματοδοτήσει την χρονική έναρξη του καταγραφικού συστήματος των σημάτων lidar (trigger). Το σύστημα λήψης συλλέγει την ακτινοβολία laser που οπισθοσκεδάζεται από τον ατμοσφαιρικό στόχο μέσω ενός οπτικού συστήματος (συνήθως ένα οπτικό τηλεσκόπιο). Η ακτινοβολία αυτή οδηγείται, ακολούθως, σε ένα φασματικό αναλυτή ο οποίος αναλύει το σήμα στα διάφορα μήκη κύματος από τα οποία αποτελείται, με τελικό σκοπό να επιλεγεί εκείνο το μήκος κύματος που περιέχει πληροφορίες και να αποκοπεί οποιαδήποτε άλλη ανεπιθύμητη ακτινοβολία (πγ. ακτινοβολία ατμοσφαιρικού υποβάθρου). Το επιλεγμένο οπτικό σήμα, στη συνέχεια, οδηγείται με ένα σύστημα φακών σε ένα φωτοανιχνευτή για να μετατραπεί σε ηλεκτρικό σήμα και να ακολουθήσει η κατάλληλη επεξεργασία του για την εξαγωγή των πληροφοριών που αυτό εμπεριέχει.

### 3.2.3 Επίλυση της εξίσωσης lidar (Αντιστροφή σήματος-Klett)

Η βασική εξίσωση lidar μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$P(R) = \frac{E_0 \eta_L}{R^2} O(R) \beta(R) e^{-2 \int_0^{\pi} a(r) dr}$$
(3.14)

όπου  $E_0$  είναι η εκπεμπόμενη ενέργεια παλμού, ο παράγοντας  $\eta_L$  περιέχει όλες τις παραμέτρους του lidar όσον αφορά την οπτοηλεκτρονική απόδοση του συστήματος και όπου  $\beta(r) \ (km^{-1})(sr^{-1})$  και  $\alpha(r)(km^{-1})$  είναι ο συντελεστής οπισθοσκέδασης και εξασθένισης αντίστοιχα.

Η οπισθοσκέδαση και η απορρόφηση συμβαίνει λόγω των μορίων (mol) και των σωματιδίων (aer) που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα οπότε γράφουμε τους αντίστοιχους συντελεστές στην παρακάτω μορφή:

$$\beta(R) = \beta_{mol}(R) + \beta_{acr}(R) \qquad (3.15)$$
$$\alpha(R) = a_{mol}(R) + a_{acr}(R) \qquad (3.16)$$

Η συμμετοχή της μοριακής ατμόσφαιρας αγνοείται η οποία αφαιρείται κατά την επεξεργασία των μετρήσεων σαν θόρυβος του ατμοσφαιρικού υποβάθρου, και ο γεωμετρικός συντελεστής επικάλυψης θεωρείται ίσος με τη μονάδα εφόσον υπάρχει πλήρης επικάλυψη μεταξύ του οπτικού πεδίου του τηλεσκοπίου και της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας δέσμης laser. Οι παραπάνω εξισώσεις (3.14), (3.15) και (3.16) συνοψίζονται στην παρακάτω:

$$P(R)R^{2} = E_{0}\eta_{L}[\beta_{mol}(R) + \beta_{acr}(R)]e^{-2\int_{0}^{R}a_{mol}(R) + a_{aer}(R)dr}$$
(3.17)

στην οποία εισάγοντας την έννοια του διορθωμένου σήματος lidar με την απόσταση (Range-corrected lidar signal):

$$S(R) = R^2 P(R) \quad (3.18)$$

η (3.17) γίνεται:

$$S(R) = E_0 \eta_L [\beta_{mol}(R) + \beta_{acr}(R)] e^{-2 \int_0^R a_{mol}(R) + a_{aer}(R) dr}$$
(3.19)

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

Στην επόμενη φάση εισάγουμε τον σωματιδιακό λόγο lidar:

$$L_{aer}(R) = \frac{a_{mol}(R)}{\beta_{mol}(R)} \quad (3.20)$$

και ανάλογα τον μοριακό λόγο lidar:

$$L_{mol}(R) = \frac{a_{mol}(R)}{\beta_{mol}(R)} = \frac{8\pi}{3} sr \quad (3.21)$$

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:

$$Y(R) = L_{aer}(R)(\beta_{acr}(R) + \beta_{mol}(R)) \quad (3.22)$$

Από τις εξισώσεις (3.20), (3.21) και (3.22) προκύπτει:

$$S(R)L_{acr}(R)e^{-2\int_{0}^{R}[L_{acr}(r)-L_{mol}(r)]\beta_{mol}(r)dr} = E_{0}\eta_{L}Y(R)e^{-2\int_{0}^{R}Y(r)dr}$$
(3.23)

Λογαριθμίζοντας και διαφορίζοντας ως προς την απόσταση R έχουμε:

$$\frac{dln(S(R)L_{acr}(R)e^{-2\int_{0}^{R}[L_{acr}(r)-L_{mol}(r)]\beta_{mol}dr)}}{dR} = \frac{1}{Y(R)}\frac{dY(R)}{dR} - 2Y(R)$$
(3.24)

Η εξίσωση (3.24) είναι μία εξίσωση της μορφής Bernoulli και την επιλύουμε με οριακή συνθήκη:

$$Y(R_0) = L_{aer}((R_0)(\beta_{aer}((R_0) + \beta_{mol}((R_0))))$$
(3.25)

Οπότε η λύση θα είναι η ακόλουθη:

$$\beta_{aer}(R) = \frac{S(R)e^{-2\int_{R_0}^{R} [L_{acr}(r) - L_{mol}(r)]\beta_{mol}(r)dr}}{\frac{S(R_0)}{\beta_{aer}((R_0) + \beta_{mol}((R_0))} - 2\int_{R_0}^{R} L_{aer}(r)S(r)T(r,R_0)dr} - \beta_{mol}(R)$$
(3.26)  
$$T(r,R_0) = e^{-2\int_{R_0}^{r} [L_{acr}(r') - L_{mol}(r')]\beta_{mol}(r')dr'}$$
(3.27)

(3.27)

με

иан 
$$a_{aer}(R) = L_{aer}(R)\beta_{aer}(R)$$
 (3.28)

Σε γενικές γραμμές η εξίσωση (3.26) μπορεί να λυθεί ολοκληρώνοντας προς τα εμπρός ( $R > R_0$ ) ή ολοκληρώνοντας προς τα πίσω ( $R < R_0$ ). Συνήθως αριθμητική σταθερότητα επιτυγχάνεται με την προς τα πίσω ολοκλήρωση και προτάθηκε από τον Klett (Klett 1981 xai Klett, 1985).

Το ύψος αναφοράς R<sub>0</sub> 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).

# 3.3 Πηγές θορύβου στην τεχνική Lidar

Ως θόρυβος στην τεχνική lidar μπορούν να θεωρηθούν τα λανθασμένα σήματα, τα οποία μειώνουν τη ακρίβεια μίας μέτρησης ή ακόμα μπρούν και να καλύπτουν πλήρως το πραγματικό σήμα. Ο θόρυβος στα συστήματα lidar μπορεί να έχει οπτική ή και θερμική προέλευση. Στην τεχνική lidar, τέσσερα είναι τα σημαντικότερα είδη θορύβου:

-Ο θόρυβος του σήματος (κβαντικός θόρυβος ) που οφείλεται στις στατιστικές διακυμάνσεις του σήματος της λαμβανόμενης ακτινοβολίας laser,

-Ο θόρυβος υποβάθρου που οφείλεται στις στατιστικές διακυμάνσεις της ακτινοβολίας του ατμοσφαιρικού υποβάθρου

-Ο θόρυβος λόγω του ρεύματος σκότους που οφείλεται στη θερμική δημιουργία των ρευμάτων μεταφοράς στα ηλεκτρονικά μέρη της διάταξης μας, με την απουσία οπτικού σήματος,

-Ο θερμικός θόρυβος που οφείλεται στη θερμική διαταραχή των ρευμάτων μεταφοράς.

Η ακτινοβολία υποβάθρου, συνήθως κυριαρχεί στα άλλα είδη θορύβου, κάτι που συμβαίνει στις περισσότερες των περιπτώσεων. Είναι επίσης σημαντικό να αντιληφθούμε ότι για μετρήσεις Raman και φθορισμού η ακτινοβολία υποβάθρου μπορεί να περιέχει μια συνιστώσα, που να προέρχεται από τη σκέδαση της δέσμης laser, αν η φασματική απόρριψη της συνιστώσας της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας laser δεν είναι ικανοποιητική.

Η ακτινοβολούμενη ενέργεια, που προέρχεται από φυσικές πηγές και καταγράφεται σε χρονικό διάστημα ανίχνευσης τ<sub>d</sub> μπορεί να εκφραστεί μέσω του τύπου:

$$E_b^N(\lambda) = \int_{\Delta\lambda_0} S_b(\lambda')\eta(\lambda')\Omega_0 A_0 \tau_d d\lambda' \qquad (3.29)$$

όπου  $S_b(\lambda')$  αναπαριστά τη φασματική ακτινοβολία του ουρανού (Wcm<sup>-2</sup>nm<sup>-1</sup> sr<sup>-1</sup>) και όπως έχουμε προαναφέρει, το η(λ') είναι η οπτική απόδοση του συστήματος

ανίχνευσης στο μήκος κύματος λ'. Το  $\Delta\lambda_0$  είναι το φασματικό παράθυρο του συστήματος λήψης και  $\Omega_0$  είναι η στερεά γωνία υποδοχής της ανιχνευόμενης ακτινοβολίας.

### 3.4 Doppler Wind Lidar

Η αλλαγή στη συχνότητα της ακτινοβολίας όπως την αντιλαμβανόμαστε όταν η πηγή ή ο δέκτης κινούνται ο ένας προς τον άλλον είναι ένα γνωστό φαινόμενο. Το φαινόμενο αυτό πρώτα περιγράφηκε από τον αυστριακό φυσικό Christian Doppler (1803-1853) για τα ακουστικά κύματα, το οποίο ισχύει και για ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Αν η αλλαγή της συχνότητας μπορεί να μετρηθεί, τότε μπορεί να διευκρινιστεί και η σχετική ταχύτητα ως προς το δέκτη, με γνωστή τη ταχύτητα ομάδας της ακτινοβολίας στο αντίστοιχο μέσο. Από τη στιγμή που είναι γνωστή η ταχύτητα του φωτός στον αέρα και στο κενό με μεγάλη ακρίβεια, το οπτικό φαινόμενο Doppler καθίσταται ιδανικό για την απομακρυσμένη μέτρηση της ταχύτητας μακρινών αντικειμένων. Αν το αυτόν, τότε η χρήση του οπτικού φαινομένου Doppler παρέχει ένα παράγοντα της ταχύτητας του αντικειμένου κατά μήκος του πεδίου ορατότητας.

Είναι φανερό ότι για τη μέτρηση της ταχύτητας του αντικειμένου πρέπει να εκπεμφθεί ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Αυτή είναι η περίπτωση των αστέρων και των γαλαξιών (ίσως η πιο εντυπωσιακή εφαρμογή του οπτικού φαινομένου Doppler είναι ο προσδιορισμός της μετατόπισης του φωτός των απομακρυσμένων αστέρων, πηγαίνοντας προς όλο και μεγαλύτερα μήκη κύματος, που οδήγησαν στη τωρινή αντίληψη του ότι το σύμπαν διαστέλλεται). Λόγω του ότι η σχετική μετατόπιση των οπτικών συχνοτήτων, Δf/f, είναι ανάλογο του v/c, δηλαδή ο λόγος της ταχύτητας ν του αντικειμένου προς τη ταχύτητα του φωτός c, και λόγω του ότι οι πολύ απομακρυσμένοι αστέρες απομακρύνονται γρήγορα, αυτές οι μετρήσεις ήταν σχετικά εύκολο να πραγματοποιηθούν.

Ο προσδιορισμός των ταχυτήτων στη Γη και στη γήινη ατμόσφαιρα είναι πιο δύσκολος για δύο λόγους. Πρώτον, τα αντικείμενα των οποίων η ταχύτητα πρέπει να μετρηθεί πρέπει να εξαναγκαστούν να εκπέμψουν ακτινοβολία. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί ρίχνοντας πάνω τους φως. Δεύτερον, η μετατόπιση της ακτινοβολίας που επιστρέφει ως προς την ακτινοβολία που μεταδίδεται πρέπει να προσδιοριστεί. Οι ταχύτητες που μας απασχολούν στη Γη ποικίλουν σημαντικά ανάλογα με το αντικείμενο και το σκοπό. Οι ταχύτητες μεταξύ του 0.1 έως 100 m/s της κίνησης των αέριων παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον, σε σχέση με τη ταχύτητα του φωτός 3x10<sup>8</sup> m/s, .. Αυτό δεν είναι εύκολο να μετρηθεί εκτός αν χρησιμοποιηθούν πολύ στενές φασματικές γραμμές και εξειδικευμένος εξοπλισμός.

Παρόλο που οι μετρήσεις του οπτικού φαινομένου Doppler ασχολούνται με μία πληθώρα επίγειων εφαρμογών, εδώ θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με τη μέτρηση της μετακίνησης των αέριων μαζών, ή του αέρα και των αναταράξεων, ως αποτέλεσμα της παρατήρησης των αιωρούμενων σωματιδίων. Σε σύγκριση με άλλες μετρήσεις Doppler, οι μετρήσεις Doppler για τον άνεμου έχουν το εξής πρόβλημα: ο φωτισμός του αέρα ακόμα και από πολύ δυνατές πηγές επιστρέφει πολύ αδύναμα σήματα και γι'αυτό το λόγο θα πρέπει να αναλυθούν όχι μόνο ως προς το μήκος κύματός τους αλλά και ως προς την απόσταση.

#### 3.4.1 Φαινόμενο Doppler

Στο οπτικό φαινόμενο Doppler, δεν υπάρχει καμία διάκριση μεταξύ της περίπτωσης του μετακινούμενου πομπού-ακίνητου δέκτη και του μετακινούμενου δέκτη-ακίνητου πομπού, και του ταυτόχρονα μετακινούμενου πομπού και δέκτη ως προς ένα μέσο. Αν το εκπεμπόμενο φως έχει μήκος κύματος  $\lambda_0$  και η συχνότητα f<sub>0</sub> = c/ $\lambda_0$  και η σχετική ταχύτητα κατά μήκος του πεδίου ορατότητας είναι v, τότε η συχνότητα που παρατηρείται είναι

$$f = f_0(1 + v/c)$$
 (3.30)

Ο αέρας και τα αιωρούμενα σωματίδια, τα οποία δεν εκπέμπουν φως, για να είναι δυνατό να μετρηθεί η ταχύτητά τους φωτίζονται από το lidar. Αν το φως αυτό έχει συχνότητα  $f_0$ , τότε η αντίστοιχη συχνότητα των αιωρούμενων σωματιδίων δίνεται από τη σχέση (3.30). Το φως επανεκπέμπεται, ή οπισθοσκεδάζεται, με μετατοπισμένη συχνότητα (σχέση 3.31) λόγω του ότι τα σωματίδια κινούνται κατά τη σκέδαση:

$$f = f_0 + \Delta f = f_0 (1 + \frac{2\nu}{c})$$
 (3.31)

Χαρακτηρίζουμε τη ταχύτητα του σωματιδίου (ή του αέρα) με τέτοιο τρόπο ώστε η κίνηση προς το lidar, η οποία καταλήγει σε θετική μετατόπιση συχνότητας, να χαρακτηρίζεται από μία θετική ταχύτητα πεδίου ορατότητας, και αντίστροφα. Αντί της ταχύτητας του πεδίου ορατότητας  $v_{LOS}$  ή της συνιστώσας της ταχύτητας κατά μήκος του πεδίου ορατότητας, χρησιμοποιούμε περιστασιακά τον όρο ' ακτινική ταχύτητα ' (radial velocity)  $v_r$  ή την ακτινική συνιστώσα της ταχύτητας, η οποία δεν είναι παράλληλη στο πεδίο ορατότητας.

Όσον αφορά τη κίνηση των αέριων μαζών, εξαρτάται από την ατομική, θερμική, τυχαία κίνηση των μορίων. Τα μόρια, υπό φυσιολογικές συνθήκες κινούνται πιο γρήγορα από τη ταχύτητα του ανέμου και όσο πιο γρήγορα κινούνται τόσο μεγαλύτερη γίνεται και η θερμοκρασία τους. Η σχετική μετατόπιση της κατανομής των ταχυτήτων ως προς τη ταχύτητα του ανέμου είναι μικρή. Τα αιωρούμενα σωματίδια εξαιτίας της μάζας τους, κινούνται πιο αργά στην ίδια θερμοκρασία. Οι ταχύτητές τους κατανέμονται με τον ίδιο τρόπο, αλλά όσον αφορά το πλάτος της κατανομής, η μετατόπιση είναι πολύ μεγαλύτερη και επιδεικτική στη μέτρηση.



Εικόνα 3.4.1: Σχηματική αναπαφάσταση της κατανομής της κανονικής και της μετατοπισμένης λόγω της κίνησης των αιωφούμενων σωματιδίων της συχνότητας. Αν υπάφχουν αιωφούμενα σωματίδια, παφατηφείται μία πολύ στενή κοφυφή. Το σήμα που επιστφέφει είναι μετατοπισμένο πφος τις υψηλότεφες τιμές, το οποίο σημαίνει ότι ο αέφας κατευθύνεται πφος το lidar (Weitkamp, 2005).



Εικόνα 3.4.2: Η σχέση του μήκους κύματος, της συχνότητας και του μετατοπισμένου μήκους κύματος με τη ταχύτητα του ανέμου για μετρήσεις με το Doppler Wind Lidar.

Η βασική αρχή λειτουργίας των συσκευών αυτών είναι η εξής. Το Lidar εκπέμπει μια δέσμη laser λοιπόν, σε ένα σημείο εστίασης και μετράει τις ακτίνες που ανακλώνται. Η δέσμη θα προσπέσει πάνω στα σωματίδια και τα περισσότερα από αυτά θα απομακρυνθούν. Συγκρίνοντας λοιπόν εισερχόμενη και την εξερχόμενη ακτίνα laser, υπολογίζεται το μέγεθος της επίδρασης του φαινομένου Doppler στη συχνότητα της ακτίνας και συνεπώς, μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα του αέρα, στην προκειμένη περίπτωση, του παρατηρητή. Το Lidar απαιτεί την εντόπιση ενός φωτονίου για κάθε 10^12 φωτόνια που διαδίδονται ώστε να μπορεί να μετρήσει την ταχύτητα του ανέμου.



Εικόνα 3.4.3: Η μεταβολή του μήκους κύματος της ακτίνας λόγω του φαινομένου Doppler.

Εδώ, θα γίνει η παρατήρηση ότι στην περίπτωση που δεν υπήρχαν σωματίδια στον αέρα (δηλαδή αν ήμαστε στο κενό) ή η πραγματική ταχύτητα του ανέμου ήταν μηδενική, δεν θα υπήρχε μεταβολή στο μήκος κύματος της ακτίνας. Τέλος, θεωρούμε ότι τα στοιχεία της ατμόσφαιρας έχουν πάντα την ταχύτητα του αέρα, κάτι που δεν μας οδηγεί σε σημαντικές αποκλίσεις, καθώς είναι πολύ μικρά. Η σχέση μεταξύ της μεταβολής του μήκους κύματος και της πραγματικής ταχύτητας του ανέμου είναι:

$$\Delta \lambda = \frac{2\nu_{wind}\lambda}{c} \quad (3.32)$$

, όπου

c είναι η ταχύτητα του φωτός (3\*10^8 m/s)

λ είναι το μήκος κύματος της ακτίνας.

#### 3.4.2 Ανίχνευση και εντοπισμός σωματιδίων

Οι αισθητήφες του Doppler lidar έχουν μία μοναδική ικανότητα να παφάγουν υψηλής ανάλυσης 3D κατανομές των δεδομένων του ανέμου και των αιωφούμενων σωματιδίων από επίγειες ή, ακόμα, και από αεφομεταφεφόμενες εφαφμογές. Με τη κατάλληλη επεξεφγασία, τα δεδομένα αυτά μποφούν να φανούν πολύ χφήσιμα για την ανίχνευση και τον εντοπισμό και να μας δώσουν διάφοφες πληφοφοφίες για την έκταση και τη πυκνότητα των πολύ επικίνδυνων αεφολυμάτων. Τα δεδομένα των αεφολυμάτων αναλύονται για να ανιχνεύσουν ανομοιομοφφίες, και τα δεδομένα του ανέμου και των αναταφάξεων χφησιμοποιούνται για τη παφοχή βφαχυπφόθεσμων πφοβλέψεων της διάδοσης των νεφών. Χφησιμοποιώντας αυτά τα δεδομένα στα μοντέλα της διασποφάς των νεφών μποφούμε να πφοβλέψουμε τη διασποφά και τη διάδοσή τους σε μεγαλύτεφες χφονικές πεφιόδους (Fuzzi, 2005).

Η εταιφία Coherent Technologies ανέπτυξε και έβαλε σε λειτουφγία ένα Doppler Lidar το λεγόμενο "WindTracer" στο Dugway Proving Ground, ένα στφατόπεδο της πόλης Utah των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμεφικής, το Σεπτέμβφιο του 2000. Ο πφωταφχικός σκοπός του πφογφάμματος του συγκεκφιμένου lidar ήταν να μποφεί να εντοπίζει και να παφακολουθεί εξαποστάσεως τα αεφολύματα και τα χημικά νέφη, ενώ, ταυτόχρονα, θα μπορούσε να μετράει τη κατάσταση του τοπικού ανέμου με τέτοιο τρόπο ώστε οι προβλέψεις για τη διασπορά του νέφους και της μεταφοράς να βελτιώνονται. Παρακάτω παρουσιάζονται δείγματα των αποτελεσμάτων των μετρήσεων αυτών. Οι εικόνες αριστερά μας δείχνουν την ακτινική ταχύτητα, ενώ οι εικόνες δεξιά μας δείχνουν τον συντελεστή οπισθοσκέδασης. Τα βέλη του αριστερού διαγράμματος αντιπροσωπεύουν το διάνυσμα της οριζόντιας ταχύτητας του ανέμου. Η εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας, η οποία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του διανύσματος της ταχύτητας, υπολογίστηκε από τον εντοπισμό της ταχύτητας στροβιλισμού. Τα αντικείμενα τα οποία φαίνονται στα διαγράμματα και έχουν το σχήμα του διαμαντιού είναι οι θέσεις των αισθητήρων. Με αυτά τα δεδομένα, το συγκεκριμένο lidar δείχνει την ικανότητά του να ανιχνεύει και να παρακολουθεί τα νέφη των αερολυμάτων. Τα δεδομένα αυτά δείχνουν, επίσης, τη μοναδική λειτουργία που προσφέρει η τεχνολογία του παλμικού Wind Doppler Lidar (Fujji, 2005).

### 3.4.3 Πλεονεκτήματα του Doppler Wind Lidar

Η Αιολική Ενέργεια είναι μια από τις πιο παλιές φυσικές πηγές ενέργειας που αξιοποιήθηκε σε μηχανική μορφή. Η πρωτογενής αυτή μορφή ενέργειας που παρέχεται άμεσα από τη φύση, έπαιξε αποφασιστικό ρόλο στην εξέλιξη της ανθρωπότητας ιδιαίτερα με τη χρήση της στην ναυτιλία για συγκοινωνίες αλλά και την άλεση σιτηρών.

Ο βασικός λόγος για τον οποίο τα Doppler Lidar έχουν αρχίσει και καθιερώνονται στον τομέα του αιολικού δυναμικού τα τελευταία 5 χρόνια και όχι νωρίτερα είναι διότι πολύ απλά, η αξιοποίηση τους, έως τότε, δεν ήταν οικονομικά συμφέρουσα, λόγω του υψηλού κόστους επένδυσης αλλά και της αδυναμίας της τότε τεχνολογίας να μετρήσει ταχύτητες σε ύψη που σχετίζονται με την αιολική ενέργεια. Εν σχέση με τους ιστούς, τα Lidar φέρουν το πλεονέκτημα της πιο εύκολης αλλά και πιο φθηνής εγκατάστασης, της πιο απλής συντήρησης και της απόλυτης εγγύησης ότι δεν είναι ευάλωτα σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες (κρύο, βροχή, χιόνι, αέρας). Εν αντιθέσει, οι ιστοί συχνά χρειάζονται άμεση συντήρηση λόγω δημιουργίας πάγου στην επιφάνεια τους, άλλα και λόγω σχήματος τους, είναι ευάλωτοι σε καιρικές συνθήκες στις οποίες κυριαρχούν δυνατοί άνεμοι κάτι που καθιστά αναγκαία τη μελέτη για αντοχή σε ταλαντώσεις και μηχανικά και δυναμικά φορτία και τη χρήση πιο ακριβών υλικών. Το πιο βασικό όμως, είναι πως τα Lidar μας δίνουν στις περισσότερες περιπτώσεις πιο ακριβείς μετρήσεις. Δεδομένου ότι λόγω μηχανικών και δυναμικών δυσκολιών, οι ιστοί έχουν περιορισμούς στο ύψος κατασκευής, με τους ιστούς χρησιμοποιούμε μοντέλα τα οποία δεν μας δίνουν την ακριβή τιμή της ταχύτητας σε ύψη πάνω από τον ιστό.

Οι μετρήσεις με τις συσκευές Lidar έχουν σχεδιαστεί για την αντιμετώπιση πολλών από τις απαιτήσεις της βιομηχανίας αιολικής ενέργειας όπως :

- Ανάγκη για αρχικές έρευνες εύρεσης τοποθεσίας
- Ποσοτικοποίηση δεδομένων πάνω από το ύψος του ιστού
- Χαρακτηρισμός σύνθετων τοπογραφιών
- Επιβεβαίωση χαρακτηριστικών ανέμου
- Micrositing ιστών / ανεμογεννητοιών
- Μακροπρόθεσμη αξιολόγηση των φυσικών πόρων
- Προσδιορισμός καθ'ύψος μεταβολής του ανέμου
- Μετρήσεις καμπύλης ισχύος

# 3.5 Ανεμογεννήτρια

### 3.5.1 Χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας

Γενικά, ο άνεμος περιστρέφει τα πτερύγια μιας *ανεμογεννήτριας*, τα οποία είναι συνδεδεμένα με ένα περιστρεφόμενο άξονα. Ο άξονας περνάει μέσα σε ένα κιβώτιο μετάδοσης της κίνησης όπου αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής. Το κιβώτιο συνδέεται με έναν άξονα μεγάλης ταχύτητας περιστροφής ο οποίος κινεί μια γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Είναι δηλαδή ένας ανεμόμυλος ο οποίο παράγει ρεύμα.

Η επιλογή τοποθέτησης της ανεμογεννήτριας εξαρτάται από τα εξής χαρακτηριστικά:

- Ταχύτητα του ανέμου.
- Διεύθυνση του ανέμου.

- Επικρατούσα στην περιοχή ανατάραξη.
- Στροβιλισμός.
- Μεταβολή με το ύψος ταχύτητας του ανέμου (κατανομή του ανέμου).

Οι σύγχρονες τουρμπίνες αιολικής ενέργειας (Ανεμογεννήτριες) εμπίπτουν σε δύο βασικές ομάδες βάσει του άξονα περιστροφής των πτερυγίων:

- Την κατηγορία του οριζόντιου άξονα
- Την κατηγορία του κατακόρυφου άξονα

Н INDUSTRIE ναλλική εταιρεία GUAL κατασκεύασε μια ανεμογεννήτρια διαφορετικού τύπου (καθέτου άξονα) η οποία είναι κατάλληλη και για κατοικημένες περιοχές. Η συμμετρία της ανεμογεννήτριας καθέτου άξονα, της παρέχει τη δυνατότητα να είναι ανεξάρτητη από τη κατεύθυνση του ανέμου, γεγονός που συντελεί στην χρήση της σε οικιστικές περιοχές όπου οι αλλαγές στην διεύθυνση του ανέμου είναι συχνές. Η κατασκευή είναι τέτοια που επιτρέπει τον εγκιβωτισμό της σε σωληνωτό πλαίσιο, με αποτέλεσμα να γίνεται ιδιαίτερα ανθεκτική σε ισχυρούς ανέμους. Παρουσιάζει ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα θορύβου. Αντίθετα με τις κλασσικές ανεμογεννήτριες η STATOEOLIEN συνεχίζει να παράγει ενέργεια με σχεδόν σταθερό ρυθμό αύξησης μέχρι και τα 40m/s ταχύτητας ανέμου.



Εικόνα 3.5.1: Η ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα STATOEOLIEN.

Οι τουρμπίνες οριζόντιου άξονα συνήθως έχουν δύο ή τρία πτερύγια. Αυτές με τα τρία πτερύγια λειτουργούν με πνοή ανέμου προς τα πάνω, "upwind" (ανάντι), με τα πτερύγια να είναι στραμμένα προς τη φορά του ανέμου. Οι τουρμπίνες εμπορικής κλίμακας κυμαίνονται σε μέγεθος από 100 kW έως αρκετά MW. Οι μεγαλύτερες τουρμπίνες τοποθετούνται σε ομάδες στα αιολικά πάρκα, τα οποία παρέχουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας στο δίκτυο ηλεκτροδότησης.

Οι μικρές, μονές τουρμπίνες, κάτω των 100 kw, χρησιμοποιούνται για σπίτια και για κεραίες τηλεπικοινωνιών, ή για άντληση νερού. Οι μικρές τουρμπίνες μερικές φορές χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με γεννήτριες πετρελαίου, μπαταρίες και φωτοβολταϊκά συστήματα. Αυτά τα συστήματα ονομάζονται υβριδικά αιολικά συστήματα και συνήθως χρησιμοποιούνται σε μακρινές περιοχές, εκτός δικτύου ηλεκτροδότησης.

Τα μέρη μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα είναι τα εξής (Παπαδόπουλος, 1997):

- Κατεύθυνση του ανέμου(Wind direction): Λειτουργεί στραμμένη προς τον άνεμο.
- Ανεμομετρητής (Anemometer): Μετρά την ταχύτητα του ανέμου και μεταφέρει δεδομένα για την ταχύτητα του ανέμου στον ελεγκτή.
- Φρένο (Brake): Ένας δίσκος φρένου, ο οποίος μπορεί να εφαρμοστεί κατά τρόπο μηχανικό, ηλεκτρικό ή υδραυλικό, ώστε να σταματά ο ρότορας (ηλεκτρικός κινητήρας) σε περιπτώσεις επείγουσας ανάγκης.
- Ελεγκτής (Controller): Ο ελεγκτής ξεκινά τη μηχανή για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες από 13 με 25,75 km/h και την κλείνει όταν φτάσουν στα 88,51 km/h περίπου. Οι τουρμπίνες δεν λειτουργούν για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες των 88,51 km/h γιατί κινδυνεύουν να καταστραφούν.
- Κιβώτιο ταχυτήτων (Gear box): Τα γρανάζια συνδέουν τον άξονα χαμηλής ταχύτητας με τον άξονα υψηλής ταχύτητας και αυξάνουν τις ταχύτητες περιστροφής από περίπου 30 έως 60 περιστροφές το λεπτό (rpm= περιστροφή ανά λεπτό) σε 1000 έως 1800 περιστροφές το λεπτό, που είναι η ταχύτητα περιστροφής που οι περισσότερες ανεμογεννήτριες απαιτούν ώστε να παραγάγουν ηλεκτρισμό.
- Γεννήτρια (Generator): Συνήθως μια γεννήτρια εισαγωγής που εύκολα βρίσκει κανείς στο εμπόριο και παράγει ηλεκτρισμό 60Hz AC.
- Άξονας υψηλής ταχύτητας (High-speed shaft): Θέτει τη γεννήτρια σε κίνηση.
- 'Αξονας χαμηλής ταχύτητας (Low-speed shaft): Ο ρότορας (ηλεκτρικός κινητήρας) στρέφει τον άξονα χαμηλής ταχύτητας σε περίπου 30 έως 60 περιστροφές το λεπτό.
- Ατρακτίδιο (Nacelle): Το ατρακτίδιο βρίσκεται στην κορυφή του πύργου και περιέχει το κιβώτιο ταχυτήτων, τους άξονες χαμηλής και υψηλής ταχύτητας, τη γεννήτρια, τον ελεγκτή και το φρένο. Μερικά ατρακτίδια είναι τόσο μεγάλα, ώστε ακόμη και ένα ελικόπτερο μπορεί να προσγειωθεί πάνω τους.

- Έλεγχος βήματος κλίσης πτερυγίων (Pitch Control): Οι λεπίδες στρέφονται, ή στρίβουν γύρω από τον άξονά τους, ανεξάρτητα από τον άνεμο, ώστε να ελέγχουν την ταχύτητα του ρότορα (ηλεκτρικού κινητήρα) και να εμποδίζουν τον ρότορα από το να στρίβει σε ανέμους οι οποίοι είναι υπερβολικά ισχυροί ή υπερβολικά ασθενείς για να παραγάγουν ηλεκτρισμό.
- Ηλεκτρικός κινητήρας/ρότορας (Rotor): Οι λεπίδες και η πλήμνη (το κέντρο του άξονα) μαζί ονομάζονται ρότορας.
- Πυλώνας/Πύργος (Tower): Οι πύργοι κατασκευάζονται από ατσάλι σε σωληνοειδή μορφή (όπως φαίνεται εδώ), τσιμέντο, ή από ατσάλι σε καφασωτή μορφή, σαν πλέγμα. Επειδή η ταχύτητα του ανέμου αυξάνει με το ύψος, οι ψηλότεροι πύργοι δίνουν τη δυνατότητα στις τουρμπίνες να κινούνται με περισσότερη ενέργεια και να παραγάγουν περισσότερο ηλεκτρισμό.
- Ανεμοδείκτης (Wind vane): Δείχνει την κατεύθυνση του ανέμου και επικοινωνεί με το yaw drive για να προσανατολίσει την ανεμογεννήτρια σωστά, όσον αφορά στον άνεμο.
- Οδηγός παροιακίσματος (παρατιμονιάς) [ατρακτιδίου] (Yaw drive): Οι ανεμογεννήτριες που λειτουργούν με πνοή ανέμου προς τα πάνω, "upwind« (ανάντι), είναι στραμμένες προς τον άνεμο. Το yaw drive χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσει ότι ο ρότορας θα είναι στραμμένος προς τον άνεμο καθώς ο άνεμος αλλάζει κατεύθυνση. Οι ανεμογεννήτριες που είναι σχεδιασμένες να λειτουργούν με πνοή ανέμου προς τα κάτω, "downwind« (κατάντι), δεν χρειάζονται yaw drive, διότι ο άνεμος φυσά και στρέφει τον ρότορα προς τα κάτω.
- Κινητήρας [ελέγχου] παροιαχίσματος (παρατιμονιάς) (Yaw motor): Δίνει ενέργεια στο yaw drive.
- Η ενέργεια του ανέμου (αιολική ενέργεια) μπορεί να ληφθεί αν επιτραπεί η διέλευσή του από κινούμενα πτερύγια τα οποία κατά την περιστροφή τους εξασκούν ροπή σε έναν ρότορα.



Εικόνα 3.5.2: Χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας (Πηγή: <u>www.cres.gr</u>)

Η ενέργεια του ανέμου (αιολική ενέργεια) μπορεί να ληφθεί αν επιτραπεί η διέλευσή του από κινούμενα πτερύγια τα οποία κατά την περιστροφή τους εξασκούν ροπή σε έναν ρότορα. Το ποσό της ενέργειας που μεταφέρεται είναι απευθείας ανάλογο της πυκνότητας του αέρα, της επιφάνειας που σαρώνει ο ρότορας και του κύβου της ταχύτητας του ανέμου.

Η διαθέσιμη ισχύς του ανέμου είναι:

$$P = a\rho\pi r^2 u^{3/2} \quad (3.33)$$

Όπου P η ισχύς σε watt,

α μια σταθερά απόδοσης,

- ρ η πυκνότητα του αέρα σε kg ανά κυβικό μέτρο,
- r η ακτίνα της ανεμογεννήτριας σε μέτρα και
- υ η ταχύτητα του ανέμου σε m/s.

Μια ανεμογεννήτρια που έχει τοποθετηθεί σε σωστή θέση θα έχει παράγοντα χωρητικότητας περίπου 35%. Αυτός μπορεί να συγκριθεί με τον παράγοντα χωρητικότητας των πυρηνικών εργοστασίων 90%, των εργοστασίων που λειτουργούν με λιγνίτη 70% και των εργοστασίων πετρελαίου 30%. Όταν γίνεται σύγκριση του

μεγέθους των τουρμπινών των ανεμογεννητριών με εκείνες που λειτουργούν με καύσιμα, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι μια ανεμογεννήτρια 1000 kW αναμένεται να παράγει σε ένα έτος τόση ενέργεια όση παράγει μια γεννήτρια που λειτουργεί με λιγνίτη 500 kW (Μπεργελές, 2005).

Η σημερινή τεχνολογία βασίζεται σε ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα 2 ή 3 πτερυγίων, με αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύ 200 - 400 kW. Όταν εντοπιστεί μια ανεμώδης περιοχή - και εφόσον βέβαια έχουν προηγηθεί οι απαραίτητες μετρήσεις και μελέτες - για την αξιοποίηση του αιολικού της δυναμικού τοποθετούνται μερικές δεκάδες ανεμογεννήτριες, οι οποίες απαρτίζουν ένα «αιολικό πάρκο».

### 3.5.2 Εκτίμηση των χαρακτηριστικών της τύρβης του αέρα που δημιουργείται στο πίσω μέρος της ανεμογεννήτριας με τη βοήθεια του Doppler Lidar

Τα ελλείματα ταχυτήτων και οι ισχυρές αναταραχές που δημιουργούνται λόγω του της περιστροφής των λεπίδων της ανεμογεννήτριας είναι οι δύο κύριες αιτίας δημιουργίας της τύρβης του αέρα στο πίσω μέρος της ανεμογεννήτριας. Η μέτρηση της τύρβης του αέρα είναι πολύ σημαντική για τη βελτιστοποίηση της τοποθέτησης των ανεμογεννητριών σε ένα αιολικό πάρκο και, επίσης, είναι σημαντική για τη βελτίωση του σχεδιασμού της.

Ένας τρόπος για τη μελέτη αυτού του φαινομένου είναι η χρήση ενός υψηλής ανάλυσης Doppler Lidar. Η ικανότητα ενός τέτοιου lidar να σαρώνει την ατμόσφαιρα οριζοντίως με σταθερή γωνία και με γωνία η οποία μπορεί να αλλάζει κινώντας το lidar προς τα πάνω χρησιμοποιείται για να παρέχει μία ποικιλία πληροφοριών υψηλής ανάλυσης για τα οριακά στρώματα.

Τα lidar σάφωσης μποφούν να πφοσδιοφίσουν τα χωφικά και χφονικά χαφακτηφιστικά της λεπίδας μιας ανεμογεννήτφιας και της τύφβης του αέφα που δημιουφγείται στο πίσω μέφος της ανεμογεννήτφιας. Αυτό μποφεί να επιτευχθεί τοποθετώντας για παφάδειγμα το lidar στο ατφακτίδιο της ανεμογεννήτφιας ή τοποθετώντας το lidar πίσω από την ανεμογεννήτφια (Pichugina et al, 2012).



Εικόνα 3.5.3: Στη παραπάνω εικόνα απεικονίζεται το έλλειμα της ταχύτητας (πράσινο χρώμα) της ανεμογεννήτριας. Η τοποθέτηση της ανεμογεννήτριας φαίνεται από τη κάθετη λευκή γραμμή. Οι μαύρες γραμμές δείχνουν το σήμα επιστροφής από τις λεπίδες της ανεμογεννήτριας (Pichugina et al, 2012).



Εικόνα 3.5.2: Παραπάνω παρουσιάζονται σαρώσεις 4 διαφορετικών γωνιών από 115° έως 145°. Ο οριζόντιος και κάθετος άξονας απεικονίζουν τις αποστάσεις του lidar. Η ταχύτητα του ανέμου απεικονίζεται με χρώματα από 0 έως 12 m/sec(Pichugina et al, 2012).
## 4 Συσχέτιση αερολυμάτων με ανεμολογικά δεδομένα – εφαρμογή στο αιολικό πάρκο Λαυρίου.

#### 4.1 Αιολικό πάρκο Λαυρίου

Το επιδεικτικό Αιολικό Πάρκο του ΚΑΠΕ ισχύος 3,01MW βρίσκεται στην περιοχή του Λαυρίου στην Αττική και αποτελείται από πέντε Α/Γ, εκ των οποίων οι τρεις αγοράστηκαν από το εξωτερικό (NEG-Micon 750kW, Enercon E-40 500kW και Vestas V47/660kW) και οι δύο είναι ελληνικής προέλευσης (AOA 500kW και AOA 600kW, κατασκευής ΠΥΡΚΑΛ). Το Α/Π χρηματοδοτήθηκε από το Β'ΚΠΣ στα πλαίσια του ΕΠΕ-3.3. Σε πλήρη λειτουργία αναμένεται να παράγει 7.9GWh/έτος (Πηγή: www.cres.gr).



Εικόνα 4.1.1: Το πάρκο σε κάτοψη με σημειωμένες τις θέσεις των μηχανών και των μετρητικών οργάνων.

Βασικός στόχος του πάρκου είναι η αξιολόγηση ανεμογεννητριών με διαφορετικές αρχές λειτουργίας, σε συνθήκες σύνθετης τοπογραφίας, που είναι οι κατ' εξοχήν χώροι εγκατάστασης αιολικών πάρκων στην χώρα μας. Συγκεκριμένα υπάρχουν οι εξής τύποι ανεμογεννητριών:

α) με έλεγχο ισχύος λόγω αεροδυναμικής αποκόλλησης (stall) ή λόγω μεταβλητής γωνίας πτερυγίου,

β) με σταθερές ή μεταβαλλόμενες στροφές δρομέα

γ) με σύγχρονες ή ασύγχρονες ηλεκτρογεννήτριες.



Εικόνα 4.1.2: Παραπάνω βλέπουμε την ανεμογεννήτρια πίσω από την οποία στήθηκε το σύστημα lidar. Στο βάθος παρατηρούμε, επίσης και τον ιστό του αιολικού πάρκου.

### 4.2 Τεχνική περιγραφή συστήματος του lidar

Η διάταξη του lidar οπισθοσκέδασης που χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής εργασίας στο Αιολικό Πάρκο Λαυρίου ανήκει στην εταιρία Raymetrics Α. Ε.. Εγκαταστάθηκε στο αιολικό πάρκο, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.1.2. παρακάτω.



Εικόνα 4.2.1: Η θέση του ιστού και του συστήματος lidar.

Το σύστημα αυτό σχεδιάστηκε για την μελέτη των αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας laser από τα μόρια και τα αερολύματα.

Η διάταξη αποτελείται από τα ακόλουθα βασικά μέρη:

- Παλμική πηγή ακτινοβολίας laser (Nd:YAG)
- Οπτική διάταξη εκπομπής ακτινοβολίας laser (355 nm)

- Διάταξη ανίχνευσης της ακτινοβολίας laser (355 nm)
- Σύστημα καταγραφής και αποθήκευσης των δεδομένων lidar



Εικόνα 4.2.2: Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε εγκατεστημένη στο Αιολικό Πάρκο Λαυρίου.

Το Nd:YAG laser παφάγει μία δέσμη φωτός στα 1064 nm με ενέφγεια παλμού 400 mJ. Με χφήση δύο ηλεκτφοοπτικών κφυστάλλων παφάγουμε τη δεύτεφη αφμονική (532nm με ενέφγεια παλμού 80 mJ), τη τφίτη αφμονική (355nm με ενέφγεια παλμού 80 mJ) και τη τέταφτη αφμονική (266 nm με ενέφγεια παλμού 16 mJ). Η δεύτεφη και η τφίτη αφμονική είναι αυτές που χφησιμοποιούνται για τη μελέτη των αιωφούμενων σωματιδίων, ενώ η τέταφτη αφμονική χφησιμοποιείται στη μελέτη του τφοποσφαιφικού όζοντος.

Η διάταξη πεφιλαμβάνει, επίσης, ένα οπτικό τηλεσκόπιο, που χρησιμεύει στη συλλογή της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας laser από την ατμόσφαιρα που μελετάται. Το τηλεσκόπιο που χρησιμεύει στην ανίχνευση των αιωρούμενων σωματιδίων είναι αυτό που είναι τοποθετημένο κάτω από το Laser. Τα χαρακτηριστικά του οπτικού τηλεσκοπίου είναι: D=300 mm, εστιακή απόσταση f=600 mm και οπτικό πεδίο όρασης 2,5 mrad.

Η οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία αφού λοιπόν συλλεχθεί από το οπτικό τηλεσκόπιο με χρήση οπτικών ινών μεταφέρεται στον οπτικό διαχωριστή, όπου διαχωρίζεται στα

μήκη κύματος 355 nm και 387 nm. Μετά το διαχωρισμό των διαφορετικών συστημάτων lidar η κάθε δέσμη ανιχνεύεται από ένα φωτοπολλαπλασιαστή με μέγιστη ευαισθησία στη αντίστοιχη φασματική περιοχή.

Στην περίπτωση ανίχνευσης των αιωρούμενων σωματιδίων ο οπτικός διαχειριστής δέχεται την οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία laser μέσω μιας οπτικής ίνας. Στην έξοδο της οπτικής ίνας τοποθετείται ένας φακός L που χρησιμοποιείται για να μετατρέψει την εισερχόμενη δέσμη σε παράλληλη. Ο φακός L έχει εστιακή απόσταση f=1m. Κατόπιν η παράλληλη δέσμη προσπίπτει στον πρώτο διαχωριστή δέσμης, οποίος έχει μέγιστη ανακλαστικότητα στα 355 nm και μέγιστη διαπερατότητα στην περιοχή 387 nm. Εδώ πρέπει να εξηγήσουμε γιατί χρειαζόμαστε το μήκος κύματος 387 nm. Καθώς η δέσμη laser διαδίδεται στη ατμόσφαιρα η ακτινοβολία στα 355 nm οπισθοσκεδάζεται από το ατμοσφαιρικό άζωτο (μη ελαστικά ή σκέδαση Raman) και παράγεται ακτινοβολία στα 387 nm. Γνωρίζοντας τη συγκέντρωση του αζώτου στην ατμόσφαιρα και ανιχνεύοντας τα σήματα lidar στα 355 – 387 nm, υπολογίζουμε τους συντελεστές απορρόφησης και οπισθοσκέδασης των αερολυμάτων στα 355 nm, με χρήση της εξίσωσης του lidar οπισθοσκέδασης (βλ. κεφάλαιο 3.2.2).



Εικόνα 4.2.3: Παραπάνω παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη του lidar οπισθοσκέδασης και η διαδικασία από την εκπομπή της ακτίνας μέχρι την επεξεργασία των δεδομένων.



Εικόνα 4.2.4: Το τηλεσκόπιο του lidar που χρησιμοποιήθηκε κατά την διαδικασία του πειράματος.

#### 4.3 Χάρτες βαρομετρικών συστημάτων.

#### 4.3.1 Χάρτες βαρομετρικών συστημάτων

Οι μετεωρολογικοί χάρτες επιφανείας αποτελούν αναμφισβήτητα ένα βασικό εργαλείο για την πρόγνωση του καιρού. Στην πραγματικότητα, αποτελούν το σημείο από το οποίο ξεκινάει η διαδικασία της πρόγνωσης, αφού σε αυτούς τους χάρτες συνοψίζεται η λεγόμενη συνοπτική κατάσταση του καιρού. Η δημιουργία τους στηρίζεται στη συλλογή πραγματικών δεδομένων παρατήρησης του καιρού από το δίκτυο των επίγειων σταθμών του Παγκόσμιου Μετεωρολογικού Οργανισμού (ΠΟΜ). Παρόλα αυτά, τέτοιοι χάρτες είναι δυνατόν να παραχθούν και με βάση τα αποτελέσματα αριθμητικών προσομοιώσεων (προγνωστικοί χάρτες). Παραδοσιακά, η παραγωγή αυτών των χαρτών λαμβάνει χώρα 4 φορές κατά τη διάρκεια της ημέρας, στις 00, 06, 12 και 18 UTC.

Σε έναν μετεωρολογικό χάρτη επιφανείας το κύριο χαρακτηριστικό είναι οι γραμμές που ενώνουν περιοχές με ίσες τιμές ατμοσφαιρικής πίεσης (αναχθείσας στην μέση στάθμη της θάλασσας). Οι γραμμές αυτές ονομάζονται ισοβαρείς. Η χρησιμότητα των ισοβαρών γραμμών, και κατ' επέκταση των χαρτών επιφανείας, έγκειται στο γεγονός πως επιτρέπουν την αναγνώριση συνοπτικών μετεωρολογικών χαρακτηριστικών όπως οι υφέσεις (lows), τα σκάφη ή οι αυλώνες (trough) και οι ράχες ή οι αντικυκλώνες (high). Τέτοιου είδους χαρακτηριστικά συνδέονται, άμεσα ή έμμεσα, με συγκεκριμένους τύπους καιρού. Παρακάτω, δίνονται σύντομες περιγραφές των συνοπτικών χαρακτηριστικών του καιρού που μπορεί κάποιος να αναγνωρίσει σε έναν μετεωρολογικό χάρτη επιφανείας.



Εικόνα 4.3.1: Χάρτες βαρομετρικών συστημάτων κατά τη διάρκεια του πειράματος στις 8 Νοεμβρίου 2011.

Στο παραπάνω χάρτη ανάλυσης των βαρομετρικών συστημάτων μπορούμε καταρχήν να παρατηρήσουμε την παρουσία ενός αντικυκλώνα (Η) βορειοδυτικά της Β. Ευρώπης και ενός αντικυκλώνα στη νοτιοανατολική Ευρώπη, δηλαδή μία περιοχή υψηλών πιέσεων, στην οποία οι άνεμοι είναι κατά κανόνα ασθενείς και πνέουν γύρω από το κέντρο των υψηλών πιέσεων με φορά αυτή του ρολογιού (δεξιόστροφα). Σε αυτή τη περιοχή ο ατμοσφαιρικός αέρας κατέρχεται δημιουργώντας υψηλές πιέσεις και εμποδίζοντας τη δημιουργία νεφών, άρα πρόκειται για αίθριες συνθήκες. Πέρα από τον αντικυκλώνα, στον εξεταζόμενο χάρτη είναι εμφανής και η επικράτηση περιοχών σκάφους (Τ), κυρίως στη Νότια και Δυτική Ευρώπη, δηλαδή περιοχή επικράτησης σχετικά χαμηλών πιέσεων, οι οποίες συνδέονται συνηθέστερα με την παρουσία κάποιου μετώπου. Σε μία σκάφη οι άνεμοι μπορεί να είναι ισχυροί χωρίς ωστόσο αυτοί να έχουν εκτεταμμένο και διαρκή χαρακτήρα. Αιτία των χαμηλών πιέσεων είναι η ανοδική κίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα, η οποία συνεπάγεται επίσης τη δημιουργία νεφών. Εξαιτίας αυτής της διάταξης ο καιρός στη χώρα μας γαρακτηρίζεται αίθριος. Μπορούμε επίσης να παρατηρήσουμε πως οι συγκεκριμένες σκάφες συνοδεύονται από μετωπικές επιφάνειες (μέτωπα). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το συνεσφιγμένο μέτωπο (συνδυασμός ψυχρού και θερμού μετώπου) που εκτείνεται κατά μήκος της Βόρειας Ρωσίας και των Σκανδιναβικών χωρών, το οποίο οδηγεί σε εκδήλωση νεφικού σχηματισμού. Επισημαίνεται, επίσης, μία περιοχή σύγκλισης των ισοβαρών γραμμών στη περιοχή της βορειοδυτικής Ευρώπης. Αυτό συνεπάγεται την παρουσία ισχυρών ανέμων στη συγκεκριμένη περιοχή. Στην περιοχή ανατολικά της Μ. Βρετανίας παρατηρείται επίσης η παρουσία κάποιου νεφικού σχηματισμού, η οποία συνδέεται μάλλον με την ύπαρξη συνεσφιγμένου μετώπου στην ευρύτερη περιοχή. Ενώ στη περιοχή της Ελλάδας παρατηρείται μία περιοχή απόκλισης των ισοβαρών γραμμών. Με άλλα λόγια, όσο πιο πυκνές είναι οι ισοβαρείς σε μία περιοχή, τόσο πιο ισχυρός αναμένεται να είναι ο συνοπτικός άνεμος. Αυτό συνεπάγεται την παρουσία ασθενέστερων ανέμων στη συγκεκριμένη περιοχή. Αυτό παρατηρείται και στη πρώτη εικόνα, σύμφωνα με την οποία οι άνεμοι είναι ασθενείς και είναι αποτέλεσμα του βορειοδυτικού και του ανατολικού ανέμου. Ενώ βορειότερα και δυτικότερα της Ευρώπης που παρατηρείται ύφεση, οι ταχύτητες του ανέμου είναι πιο ισχυρές παρατηρώντας τις περιοχές με κόκκινο χρώμα, αφού και οι γραμμές είναι περισσότερες και πιο πυκνές.

Στις 9 του Νοεμβρίου 2011 (Εικόνα 4.3.2), παρατηρούμε ότι ο καιρός στην Ελλάδα είναι ακόμα αίθριος με λίγο περισσότερους ανέμους οι οποίοι σιγά σιγά πλησιάζουν τη περιοχή από τη Βόρεια και δυτική Ευρώπη. Στην Βόρεια και Δυτική Ευρώπη παρατηρούμε ότι οι ταχύτητες των ανέμων έχουν μειωθεί κατά ένα μικρό ποσοστό και είναι πιο ασθενείς. Επίσης, επισημαίνεται και ένα ψυχρό μέτωπο, το οποίο σιγά σιγά περικυκλώνει την Ελλάδα.



Εικόνα 4.3.2: Χάρτες βαρομετρικών συστημάτων κατά τη διάρκεια του πειράματος στις 9 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.3: Χάρτες βαρομετρικών συστημάτων κατά τη διάρκεια του πειράματος στις 22 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.4: Χάρτες βαρομετρικών συστημάτων κατά τη διάρκεια του πειράματος στις 23 Νοεμβρίου 2011.

Στους χάρτες 4.3.3 μπορούμε να παρατηρήσουμε την παρουσία ενός αντικυκλώνα (Η) στη περιοχή της Ελλάδας και νοτιοανατολικότερα αυτής, στην οποία οι άνεμοι είναι κατά κανόνα ασθενείς και πνέουν γύρω από το κέντρο των υψηλών πιέσεων με φορά αυτή του ρολογιού (δεξιόστροφα), με αποτέλεσμα να εμποδίζεται η παρουσία νεφών. Πέρα από τον αντικυκλώνα, στον εξεταζόμενο χάρτη είναι εμφανής και η επικράτηση περιοχών σκάφης (Τ) σε όλη την υπόλοιπη Ευρώπη, δηλαδή περιοχή επικράτησης χαμηλών πιέσεων και ισχυρών ανέμων. Αιτία των χαμηλών πιέσεων είναι η ανοδική κίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα, η οποία συνεπάγεται επίσης τη δημιουργία νεφών. Εξαιτίας αυτής της διάταξης ο καιρός στη χώρα μας χαρακτηρίζεται αίθριος. Μπορούμε επίσης να παρατηρήσουμε πως οι συγκεκριμένες σκάφες συνοδεύονται από μετωπικές επιφάνειες (μέτωπα). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το συνεσφιγμένο και το ψυχρό μέτωπο που εκτείνεται κατά μήκος της Δυτικής Ευρώπης και νοτιότερα της Ελλάδας, το οποίο οδηγεί σε εκδήλωση νεφικού σχηματισμού. Επισημαίνεται, επίσης, μία περιοχή σύγκλισης των ισοβαρών γραμμών στη περιοχή της βόρειας Ευρώπης. Αυτό συνεπάγεται την παρουσία ισχυρών ανέμων στη συγκεκριμένη περιοχή. Ενώ στη περιοχή της Ελλάδας παρατηρείται μία περιοχή απόκλισης των ισοβαρών γραμμών. Αυτό συνεπάγεται την παρουσία ασθενέστερων ανέμων στη συγκεκριμένη περιοχή. Αυτό παρατηρείται και στη πρώτη εικόνα, σύμφωνα με την οποία οι άνεμοι είναι ασθενείς και είναι αποτέλεσμα του δυτικού και του ανατολικού ανέμου. Ενώ βορειότερα και δυτικότερα της Ευρώπης όπου παρατηρείται ύφεση, οι ταχύτητες του ανέμου είναι πιο ισχυρές παρατηρώντας τις περιοχές με κόκκινο χρώμα, αφού και οι γραμμές είναι περισσότερες και πιο πυκνές. Στις 23 του Νοεμβρίου 2011 (Εικόνα 4.3.4), παρατηρούμε ότι ο καιρός στην Ελλάδα είναι ακόμα πιο αίθριος με λιγότερους ανέμους οι οποίοι σιγά σιγά υποχωρούν. Στην Βόρεια και Δυτική Ευρώπη παρατηρούμε ότι οι ταχύτητες των ανέμων έχουν μειωθεί κατά ένα μικρό ποσοστό και είναι πιο ασθενείς. Επίσης, επισημαίνεται ότι το ψυχρό μέτωπο το οποίο παρατηρήθηκε στις 22 Νοεμβρίου, έχει αρχίσει να υποχωρεί προς τα βόρεια και δυτικά της Ευρώπης.

# 4.3.2 Συσχέτιση αιωρούμενων σωματιδίων και κατεύθυνσης ανέμου

Η διεύθυνση του ανέμου παίζει καθοριστικό ρόλο αφού είναι ικανή να μεταφέρει αερολύματα από συγκεκριμένες περιοχές και να επιτρέψει την συσσώρευση τους σε κάποιες άλλες περιοχές. Επιπλέον η ταχύτητα του ανέμου παίζει πρωτεύοντα ρόλο στη διάχυση των αερολυμάτων. Μεγάλες ταχύτητες βοηθούν στη διάχυση των αέριων ρύπων συντελώντας στη μείωση των επιπέδων συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων. Αντίθετα μικρές ταχύτητες ανέμου ή η πολύωρη άπνοια οδηγούν στην αύξηση των τιμών συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων. Ταχύτητες μεγαλύτερες των 2 m/s βοηθούν στην αποσυμφόρηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Chaloulakou A et al., 2003).



Εικόνα 4.3.5: Ροδόγραμμα της κατεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου το μήνα Νοέμβριο στα 76 m.



Εικόνα 4.3.6: Ροδόγραμμα της κατεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου το μήνα Νοέμβριο στα 100 m.

Στις εικόνες 4.3.5 και 4.3.6 παρουσιάζονται τα ροδογράμματα της κατεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου στη περιοχή του αιολικού πάρκου του Λαυρίου από 8/11/2011 έως 23/11/2011. Ο άξονας αριστερά μας δείχνει το ποσοστό επί τις εκατό των ταχυτήτων που ανήκουν σε κάθε μία από τις 5 ομάδες που φαίνονται στο κουτάκι πάνω δεξιά. Οι τιμές που αναφέρονται κυκλικά είναι σε μοίρες από 0-360 και έχουν να κάνουν με τη διεύθυνση του ανέμου. Οι μεγαλύτερες ταχύτητες σημειώνονται κυρίως από τη βορειοδυτική κατεύθυνση στα 76 m και βορειοανατολική κατεύθυνση του ανέμου στα 100 m, όπου συναντώνται ταχύτητες μεγαλύτερες των 22.4 m/s σε ποσοστό περίπου 6% στα 76 m και 10% στα 100 m. Οι ταχύτητες που παρατηρήθηκαν είναι αρκετά μεγάλες και ικανές να προκαλέσουν διάχυση των ρύπων κυρίως από τη βόρεια κατεύθυνση. Παρόλο το μικρό ποσοστό άπνοιας ωστόσο, οι ταχύτητες του ανέμου είναι σχετικά μικρές συντελώντας στη συσσώρευση αέριων ρύπων.



Εικόνα 4.3.6: Ροδογράμματα της κατεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου στις 8 και 9 Νοεμβρίου στα 76 m (αριστερά) και στα 100 m (δεξιά).







Εικόνα 4.3.7: Ροδογράμματα της κατεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου στις 22 και 23 Νοεμβρίου στα 76 m (αριστερά) και στα 100 m (δεξιά).



Εικόνα 4.3.8: Διαγράμματα τριών διαστάσεων σάρωσης και λήψης του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό γωνία 10 μοιρών προς τον οριζόντιο άξονα, στις 8 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.9: Διαγράμματα τριών διαστάσεων σάρωσης και λήψης του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό γωνία 10 μοιρών προς τον οριζόντιο άξονα, στις 8 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.10: Διάγραμμα τριών διαστάσεων σάρωσης και λήψης του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό γωνία 10 μοιρών προς τον οριζόντιο άξονα, στις 8 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.11: Διάγραμμα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 10 μοιρών προς τον οριζόντιο άξονα, στις 8 Νοεμβρίου 2011.



4.3.11: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 10 μοιρών προς τον οριζόντιο άξονα, στις 8 Νοεμβρίου 2011.

1400 8998 -7.27E+6 6500--3.13E+6 E 1200 6000 -1.01E+6 5500 1000 5000-4500 800 Height (m) 4000 Ê \$ 3500-600 3000-2500-400 2000-1500-1000-200 500-0 3:16:10 PM 3:20:00 PM 3:25:00 PM 3:30:00 PM 3:35:00 PM 3:40:00 PM 3:45:00 PM 351.0 11/8/2011 11/8/2011 11/8/2011 11/8/2011 11/8/2011 11/8/2011 11/8/2011 11/8/. Time (m) 1400 10008 -1.78E+8 6500--8.80E+7 € 1200 6000--1.98E+6 5500-1000 5000 4500-800 Height (m) 4000-\$ 3500· 600 3000-2500-400 2000-1500-200 1000 500-0 3:25:00 PM 3:30:00 PM 3:40:00 PM 3:20.55 PM 3:35:00 PM 3.45.5

226 μοίρες(πάνω) και 228(κάτω) (οριζόντιος άξονας)

Εικόνα 4.3.12: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 10 μοιρών προς τον οριζόντιο άξονα, στις 8 Νοεμβρίου 2011.

Time (m)

11/8/2011

11/8/2011

11/8/.

11/8/2011

11/8/2011

11/8/2011



Εικόνα 4.3.13: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 10 μοιρών προς τον οριζόντιο άξονα, στις 8 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.14: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 10 μοιρών προς τον οριζόντιο άξονα, στις 8 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.15: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 10 μοιρών προς τον οριζόντιο άξονα, στις 8 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.16: Διαγράμματα τριών διαστάσεων σάρωσης και λήψης του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό γωνία 5 μοιρών προς τον οριζόντιο άξονα, στις 9 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.17: Διαγράμματα τριών διαστάσεων σάρωσης και λήψης του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό γωνία 5 μοιρών προς τον οριζόντιο άξονα, στις 9 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.18: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 5 μοιρών προς τον οριζόντιο άξονα, στις 9 Νοεμβρίου 2011.





Εικόνα 4.3.19: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 5 μοιρών προς τον οριζόντιο άξονα, στις 9 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.20: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 5 μοιρών προς τον οριζόντιο άξονα, στις 9 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.21: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 5 μοιρών προς τον οριζόντιο άξονα, στις 9 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.22: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 5 μοιρών προς τον οριζόντιο άξονα, στις 9 Νοεμβρίου 2011.

#### 240 μοίρες(οριζόντιος άξονας)



Εικόνα 4.3.23: Διάγραμμα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 5 μοιρών προς τον οριζόντιο άξονα, στις 9 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.24: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 90 μοιρών προς τον οριζόντιο άξονα, στις 9 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.25: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 5 μοίρες προς τον οριζόντιο άξονα και περιστρεφόταν υπό σταθερά μεταβαλλόμενη γωνία ανά 2 μοίρες από 220-240 στον οριζόντιο άξονα, στις 22 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.26: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 5 μοίρες προς τον οριζόντιο άξονα και περιστρεφόταν υπό σταθερά μεταβαλλόμενη γωνία ανά 2 μοίρες από 220-240 στον οριζόντιο άξονα, στις 22 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.27: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 5 μοίρες προς τον οριζόντιο άξονα και περιστρεφόταν υπό σταθερά μεταβαλλόμενη γωνία ανά 2 μοίρες από 220-240 στον οριζόντιο άξονα, στις 22 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.28: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 5 μοίρες προς τον οριζόντιο άξονα και περιστρεφόταν υπό σταθερά μεταβαλλόμενη γωνία ανά 2 μοίρες από 220-240 στον οριζόντιο άξονα, στις 22 Νοεμβρίου 2011.


Εικόνα 4.3.29: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 5 μοίρες προς τον οριζόντιο άξονα και περιστρεφόταν υπό σταθερά μεταβαλλόμενη γωνία ανά 2 μοίρες από 220-240 στον οριζόντιο άξονα, στις 22 Νοεμβρίου 2011.





Εικόνα 4.3.30: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 5 μοίρες προς τον οριζόντιο άξονα και περιστρεφόταν υπό σταθερά μεταβαλλόμενη γωνία ανά 2 μοίρες από 220-240 στον οριζόντιο άξονα, στις 22 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.31: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 5 μοίρες προς τον οριζόντιο άξονα και περιστρεφόταν υπό σταθερά μεταβαλλόμενη γωνία ανά 2 μοίρες από 220-240 στον οριζόντιο άξονα, στις 22 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.32: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 5 μοίρες προς τον οριζόντιο άξονα και περιστρεφόταν υπό σταθερά μεταβαλλόμενη γωνία ανά 2 μοίρες από 220-240 στον οριζόντιο άξονα, στις 22 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.33: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 5 μοίρες προς τον οριζόντιο άξονα και περιστρεφόταν υπό σταθερά μεταβαλλόμενη γωνία ανά 2 μοίρες από 220-240 στον οριζόντιο άξονα, στις 22 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.34: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 90 μοιρών προς τον οριζόντιο άξονα, στις 22 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.35: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 5 μοίρες προς τον οριζόντιο άξονα και υπό σταθερή γωνία 220(πάνω) και 222(κάτω) μοιρών στον οριζόντιο άξονα, στις 22 Νοεμβρίου 2011.





Εικόνα 4.3.36: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 5 μοίρες προς τον οριζόντιο άξονα και υπό σταθερή γωνία 224(πάνω) και 226(κάτω) μοιρών στον οριζόντιο άξονα, στις 22 Νοεμβρίου 2011.





3:10:00 PM

11/22/2011

3:20:00 PM

11/22/2011

3313

11/22/

3:00:00 PM

11/22/2011

Tirre (m)

500

2:29:17 PM

11/22/2011

2:40:00 PM

11/22/2011

2:50:00 PM

11/22/2011

0



Εικόνα 4.3.38: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 5 μοίρες προς τον οριζόντιο άξονα και υπό σταθερή γωνία 232(πάνω) και 234(κάτω) μοιρών στον οριζόντιο άξονα, στις 22 Νοεμβρίου 2011.





Εικόνα 4.3.39: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 5 μοίρες προς τον οριζόντιο άξονα και υπό σταθερή γωνία 236(πάνω) και 238(κάτω) μοιρών στον οριζόντιο άξονα, στις 22 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.40: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 5 μοίρες προς τον οριζόντιο άξονα και υπό σταθερή γωνία 240 μοιρών στον οριζόντιο άξονα, στις 22 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.41: Διαγράμματα τριών διαστάσεων σάρωσης και λήψης του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό γωνία 5 μοιρών προς τον οριζόντιο άξονα, στις 23 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.42: Διαγράμματα τριών διαστάσεων σάρωσης και λήψης του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό γωνία 5 μοιρών προς τον οριζόντιο άξονα, στις 23 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.43: Διαγράμματα τριών διαστάσεων σάρωσης και λήψης του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό γωνία 5 μοιρών προς τον οριζόντιο άξονα, στις 23 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.44: Διαγράμματα τριών διαστάσεων σάρωσης και λήψης του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό γωνία 5 μοιρών προς τον οριζόντιο άξονα, στις 23 Νοεμβρίου 2011.

220 μοίρες(πάνω) και 222(κάτω) (οριζόντιος άξονας) 6996 -2.65年+7 600 6500 1.25E+7 È 5000 -1.51E+6 500 5500-5000 Height(m) 4500 400 4000 Ê () a 3500-300 3000 2500 200 2000 1500 100 1000 500 0 2:00:00 AM 11/11/2011 2:0000 AM 11/17/2011 2:00:00 AM 11/20/2011 2:28:51 PM 11/9/2011 2:00:00 AM 11:57:2 11/23/ 11/14/2011 Tirre (m) 6598 6.87E+7 600 6500 -3.37E+7 ≧ 6000 1.338+6 500 5500-5000-Height(m) 400 4500 4000 Ê 10 3500-300 3000-2500 200 2000 1500 100 1000 500 0 8-1 95931 AM

Εικόνα 4.3.45: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 5 μοιρών προς τον οριζόντιο άξονα, στις 23 Νοεμβρίου 2011.

11:00:00 AM

11/23/2011

Tirre (m)

11:20:00 AM

11/23/2011

11:40:00 AM

11/23/2011

12:063

11/23/

10:20:00 AM

11/23/2011

11/23/2011

10:40:00 AM

11/29/2011



Εικόνα 4.3.46: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 5 μοιρών προς τον οριζόντιο άξονα, στις 23 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.47: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 5 μοιρών προς τον οριζόντιο άξονα, στις 23 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.48: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 5 μοιρών προς τον οριζόντιο άξονα, στις 23 Νοεμβρίου 2011.

6996 -2.50E+7 600 6500 -1.18E+7 È 5000-1,402+6 500 5500-5000 Height(m) 4500 400 4000 î 10 3500-300 3000 2500 200 2000 1500 100 1000 500 0 11:20:00 AM 10:03:45 AM 11/23/2011 10:20:00 AM 10:40:00 AM 11:00:00 AM 11:40:00 AM 12:00:00 PM 12:12:0 11/23/2011 11/23/2011 11/23/2011 11/23/2011 11/23/2011 11/23/2011 11/23/ Time (m)

236 μοίρες(πάνω) και 238(κάτω) (οριζόντιος άξονας)



Εικόνα 4.3.49: Διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 5 μοιρών προς τον οριζόντιο άξονα, στις 23 Νοεμβρίου 2011.

240 μοίρες (οριζόντιος άξονας)



Εικόνα 4.3.50: Διάγραμμα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 5 μοιρών προς τον οριζόντιο άξονα, στις 23 Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 4.3.51: Διάγραμμα συναρτήσει του χρόνου του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του lidar, το οποίο ήταν τοποθετημένο υπό σταθερή γωνία 90 μοιρών προς τον οριζόντιο άξονα, στις 23 Νοεμβρίου 2011.

Παραπάνω παρουσιάζονται τα ροδογράμματα, τα οποία μας δίνουν στοιχεία πιο συγκεκριμένα για τη διεύθυνση και τη ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια του πειράματος. Παρατηρούμε ότι τη πρώτη μέρα του πειράματος, στις 8 Νοεμβρίου 2011, ο άνεμος είναι πυρίως βόρειος στα 76 m παι βορειοανατολιπός στα 100 m. Επίσης, τη συγκριμένη μέρα του πειράματος παρατηρείται και η μεγαλύτερη ταχύτητα του ανέμου η οποία κυμαίνεται μεταξύ των 8.8 m/s και 11.8 m/s, η οποία σε γενικές γραμμές είναι σχετικά ασθενής, πράγμα το οποίο σημειώνεται και στους χάρτες βαρομετρικών πιέσεων. Αντίθετα, στις 9 Νοεμβρίου 2011 παρατηρήθηκε η χαμηλότερη ταχύτητα του ανέμου, η οποία κυμαίνεται από 0.0 m/s έως 3.6 m/s και ο άνεμος είναι ανατολικός κυρίως στα 76 m και νοτιοδυτικός στα 100 m. Επίσης, όταν ξεκίνησε το πείραμα, επικρατούσε αραιή συννεφιά, η οποία μετά τις 15:30 αυξήθηκε ελάχιστα και ο καιρός ήταν, γενικά, αίθριος. Οι ίδιες καιρικές συνθήκες επικράτησαν και στις 22 Νοεμβρίου 2011, τη τρίτη μέρα του πειράματος, με τον άνεμο να πνέει ανατολικά στα 76 m και νοτιοανατολικά στα 100 m. Τη τελευταία μέρα του πειράματος, στις 23 Νοεμβρίου 2011, η ταχύτητα του ανέμου κυμαινόταν μεταξύ των 3.6 m/s και 8.8 m/s. Ο άνεμος είναι κυρίως βορειοανατολικός και στα 76 m και στα 100 m και επικρατούσε γενικά αραιή συννεφιά.

Από τα διαγράμματα τα οποία είναι αποτέλεσμα του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος μας δίνουν πληροφορίες για τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας. Τα διαγράμματα αυτά παρουσιάζουν τα δεδομένα ανάλογα με το ύψος και το χρόνο. Το μπλε σκούρο χρώμα μεταφράζεται ως καθαρά μοριακό ενώ από το μπλε ανοιχτό έως και το κόκκινο χρώμα αρχίζει η ύπαρξη αιωρούμενων σωματιδίων. Παρατηρούμε ότι από τα 200 m, κάτω από το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, και κάτω, κάτω από το ΑΟΣ, είναι πιο έντονη η παρουσία των αιωρούμενων σωματιδίων και ειδικότερα στις 8 και 9 Νοεμβρίου 2011, κατά τη διάρκεια των οποίων η παρουσία των νεφών ήταν πιο έντονη και, επίσης, η ταχύτητα του ανέμου πολύ χαμηλή πράγμα που ενθαρρύνει την υψηλή συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων εξαιτίας της ανθρωπογενής δραστηριότητας. Στις 22 και στις 23 Νοεμβρίου 2011, μπορούμε, επίσης να παρατηρήσουμε τη παρουσία νεφών στα 400 με 600 μέτρα, τα οποία αποτελούνται και από αιωρούμενα σωματίδια. Επίσης, στην περιοχή του ΑΟΣ, του κατώτερου τμήματος της τροπόσφαιρας, το οποίο επηρεάζεται άμεσα από τη γήινη επιφάνεια, παρατηρείται το μπλε ανοιχτό χρώμα το οποίο αποδεικνύει την όχι έντονη παρουσία αιωρούμενων σωματιδίων. Η παρουσία αιωρούμενων σωματιδίων στη περιοχή του ΑΟΣ είναι αποτέλεσμα των αέριων ρύπων που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα πάνω από τη βιομηχανική περιοχή του Λαυρίου, αλλά και αποτέλεσμα των μετεωρολογικών συνθηκών (ύπαρξη νεφών) που επικρατούσαν κατά τη διάρκεια του πειράματος. Τα παραπάνω συμπεράσματα σημειώνονται, επίσης, και από τα τρισδιάστατα διαγράμματα τα οποία είναι αποτέλεσμα της σάρωσης της ατμόσφαιρας με τη χρήση

του lidar, τοποθετώντας το lidar σε γωνία 10 μοιρών ως προς τον οριζόντιο. Στις 22 Νοεμβρίου δεν ήταν δυνατή η παραγωγή τρισδιάστατων διαγραμμάτων λόγω του ότι το πείραμα έγινε χειροκίνητα. Τέλος, στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούνται και κάποια τμήματα με μοβ χρώμα τα οποία αποτελούν κενά αρχεία, αρχεία δηλαδή στα οποία δε καταγράφηκαν μετρήσεις.





Εικόνα 4.3.52: Διαδρομή αέριων μαζών 8 Νοεμβρίου(πάνω) και 9 Νοεμβρίου(κάτω).



Εικόνα 4.3.53: Διαδρομή αέριων μαζών 22 Νοεμβρίου(πάνω) και 23 Νοεμβρίου(κάτω).

Από τους τέσσερις τελευταίου χάρτες μπορούμε να πάρουμε στοιχεία για τη διαδρομή των αέριων μαζών και για τα αιωρούμενα σωματίδια που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος. Σημειώνεται, λοιπόν, από το πρώτο χάρτη, στον οποίο καταγράφεται η πορεία των αέριων μαζών από τις 30 Οκτωβρίου μέχρι τις 8 Νοεμβρίου, τη μέρα που ξεκίνησε το πείραμα, ότι οι αέριες μάζες κάτω του ύψους των 500 m ξεκινούν από το Βόρειο Πόλο και κατευθύνονται νοτιότερα προς τη βόρεια και δυτική Ευρώπη, όπου τα αιωρούμενα σωματίδια οφείλονται κυρίως σε ανθρωπογενείς βιομηχανικές εκπομπές, όπως τη καύση ορυκτών καυσίμων. Τέλος, παιρνόντας πάνω από τη Τουρκία και τη Μαύρη Θάλασσα φτάνουν στην ατμόσφαιρα της Ελλάδας. Η Μαύρη Θάλασσα είναι πηγή αερολυμάτων λόγω του ότι υπάρχει έντονη βιομηχανική δραστηριότητα. Έτσι μπορούμε να κατανοήσουμε ότι η ρύπανση και η παρουσία αερολυμάτων στη ατμόσφαιρα της Ελλάδας οφείλεται στη Μαύρη Θάλασσα. Το ίδιο συμβαίνει και στις 9 Νοεμβρίου 2011, κατά τη διάρκεια της οποίας παρατηρούμε μία μάζα η οποία παραμένει πάνω από τη Μαύρη Θάλασσα για 3-4 μέρες (πράσινο χρώμα), το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα τη συγκέντρωση μεγάλου αριθμού αιωρούμενων σωματιδίων. Επίσης, παρατηρούμε τη κόκκινη πορεία μαζών, η οποία μας δείγνει ότι ο αέρας που καταφθάνει στην Ελλάδα είναι αρκτικός, ο οποίος κατά κύριο λόγο είναι καθαρός. Αρά, η ρύπανση οφείλεται στη Μαύρη Θάλασσα.

Τέλος, στους δύο τελευταίους χάρτες παρατηρείται η πορεία των αέριων μάζων κάτω του ύψους των 500 μέτρων. Οι αέριες μάζες ξεκινούν από το Βόρειο Πόλο και κατευθύνται προς τη βόρεια και την ανατολικά Ευρώπη και Δυτική Ασία. Αφού περάσουν πάλι από την ατμόσφαιρα της Μαύρης Θάλασσας και φτάσουν στην ατμόσφαιρα της Ελλάδας.

Η παρουσία αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα οφείλεται, πυρίως, στην ανθρωπογενή δραστηριότητα, αλλά και στη κλειστή τοπογραφία του λεκανοπεδίου της Αθήνας, πράγμα το οποίο δυσχεραίνει την κυκλοφορία και τον αερισμό, συνεπώς και τη διάχυση των ρύπων λόγω της ύπαρξης ορεινών όγκων που περικλείουν την περιοχή της πρωτεύουσας. Οι επικρατούσες διευθύνσεις του ανέμου, επηρεάζουν, επίσης, τη μεταφορά και τη διασπορά των ρύπων σε συγκεκριμένες περιοχές, όπως και η ταχύτητα του ανέμου η οποία βοηθά σημαντικά στη διάχυση των αέριων ρύπων. Τέλος, κατά τη διάρκεια του Νοεμβρίου ήταν έντονες και οι βροχοπτώσεις, ένας άμεσος τρόπος απομάκρυνσης αιωρούμενων σωματιδίων από την ατμόσφαιρα.

# 5 Σύνοψη και μελλοντικές προοπτικές

## **5.1 Σύνοψη**

Αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάλυση της τεχνικής lidar οπισθοσκέδασης και η εφαρμογή της στη μελέτη των αέριων μαζών και στη μελέτη της παρουσίας αιωρούμενων σωματιδίων στον Ελλαδικό χώρο και κυρίως στη περιοχή του Λαυρίου Αττικής. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν και τα δεδομένα του Ιστού του Αιολικού Πάρκου του Λαυρίου για τη καταγραφή των διαυθύνσεων και των ταχυτήτων του ανέμου στα 76 m και στα 100 m.

Αρχικά στο πρώτο κεφάλαιο εισαγάγουμε το πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και τη χρησιμότητα των μεθόδων τηλεπισκόπησης της ατμόσφαιρας. Κάνουμε μία αναφορά στα συστήματα Lidar και στη απαραίτητη χρήση τους όσον αφορά τη μέτρηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και των αερολυμάτων. Επίσης, χρησιμοποιούνται για την καταγραφή των βασικών παραμέτρων της ατμόσφαιρας, όπως η θερμοκρασία, η πίεση, η υγρασία, η ταχύτητα και η διεύθυνση του άνεμου, η μέτρηση των οπτικών ιδιοτήτων των αερολυμάτων και των νεφών.

Στη συνέχεια στο δεύτερο κεφάλαιο αναφερθήκαμε στα αιωρούμενα σωματίδια. Παρουσιάστηκαν οι φυσικές και οι ανθρωπογενείς πηγές των αερολυμάτων, εξετάζεται η χημική σύστασή τους και οι φυσιοκές τους ιδιότητες, όπως είναι το μέγεθος και η μορφή τους. Στη συνέχεια αναφερθήκαμε στις οπτικές ιδιότητες των σωματιδίων και την αλληλεπίδρασή τους με την ηλιακή ακτινοβολία. Τέλος, επισημάνθηκαν οι τρόποι κατά τους οποίους τα αιωρούμενα σωματίδια επηρεάζουν το τοπικό κλίμα και η άμεση και έμμεση επίδρασή τους στη παγκόσμια κλιματική αλλαγή, όπως οι επιπτώσεις που έχουν στο φυσικό περιβάλλον, και στην ανθρώπινη υγεία.

Στο τρίτο κεφάλαιο έγινε, αρχικά, μία ιστορική αναδρομή στις μεθόδους τηλεπισκόπησης και στα Lidar. Στη συνέχεια, παρουσιάσθηκε μία εισαγωγή στις αρχές λειτουργίας και στη διάταξη ενός τυπικού συστήματος Lidar και, επίσης, αναφέρθηκαν οι διάφορες τεχνικές χρήσης ενός τέτοιου συστήματος. Περιγράφηκε η εξίσωση Lidar και η επίλυση αυτής. Τέλος, αναφερθήκαμε στο φαινόμενο Doppler, στο πως λειτουργεί ένα Wind Lidar και στη χρήση του για την εύρεση της απόδοσης μιας ανεμογεννήτριας μελετώντας το φαινόμενο της τύρβης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο έγινε μία συνοπτική περιγραφή του συστήματος Lidar οπισθοσκέδασης της εταιρίας Raymetrics, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή του πειράματος. Παρουσιάζονται σε χάρτες το Αιολικό Πάρκο του Λαυρίου και η τοποθεσία του συστήματος Lidar. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα ροδογράμματα και διαγράμματα του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος που αφορούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε σύγκριση με τους χάρτες βαρομετρικών πιέσεων για τις αντίστοιχες μέρες, αλλά και τους χάρτες που δείχνουν τη πορεία των αέριων μαζών. Οι εφαρμογές που περιγράφηκαν πραγματεύονται τη συγκέντρωση και τη προέλευση των αιωρούμενων σωματιδίων, τη ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάσθηκε μία σύνοψη όλων των παραπάνω και καταγράφονται τα συνολικά αποτελέσματα και συμπεράσματα της έρευνας, με παράλληλη παρουσίαση των μελλοντικών προοπτικών.

### 5.2 Συμπεράσματα

Από την επεξεργασία των μετρήσεων που ελήφθησαν με το σύστημα lidar οπισθοσκέδασης στις 8,9,22 και 23 Νοεμβρίου 2011 εντοπίσθηκαν στρωματώσεις αιωρούμενων σωματιδίων. Συμπεραίνουμε λοιπόν, πως η τεχνική αυτή προσφέρεται για τον εντοπισμό τέτοιων στρωματώσεων αφού τα αιωρούμενα σωματίδια οπισθοσκεδάζουν σημαντικό ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Συγκρίνοντας τα δεδομένα αυτά με τη διεύθυνση και τη ταχύτητα του ανέμου, αλλά και τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν από τους χάρτες βαρομετρικών πιέσεων που καταλήγουν στη Ελλάδα καταλήγουμε στο γεγονός ότι η προέλευση των στρωματώσεων αυτών οφείλεται κυρίως στην ατμόσφαιρα της Μαύρης Θάλασσας και στην ανθρωπογενή δραστηριότητα η οποία επηρεάζει το Λεκανοπέδιο της Αττικής, πράγμα το οποίο επηρεάζει σημαντικά τις τιμές συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων.

Στη συνέχεια, με την ανάλυση των φοδογφαμμάτων και των χαφτών είδαμε πως οι τιμές των συγκεντφώσεων των αιωφούμενων σωματιδίων στο Λεκανοπέδιο Αττικής είναι ένας συνδυασμός πολλών παφαγόντων, όπως είναι οι μετεωφολογικές και ανεμολογικές συνθήκες που επικφατούν, η γεωμοφφία του εδάφους.

Οι επικρατούσες διευθύνσεις του ανέμου, οι οποίες είναι κυρίως βορειοανατολικές και νοτιοανατολικές, επηρεάζουν, επίσης, τη μεταφορά και τη διασπορά των ρύπων σε συγκεκριμένες περιοχές, όπως και η ταχύτητα του ανέμου η οποία βοηθά σημαντικά στη διάχυση των αέριων ρύπων.Τέλος, κατά τη διάρκεια του Νοεμβρίου ήταν έντονες και οι βροχοπτώσεις, ένας άμεσος τρόπος απομάκρυνσης αιωρούμενων σωματιδίων από την ατμόσφαιρα.

## 5.3 Μελλοντικές προοπτικές

Το φαινόμενο της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής και οι σημαντικές επιπτώσεις της στο πλανήτη Γη, στη παγκόσμια χλωρίδα και πανίδα και κατά συνέπεια και στην ανθρωπότητα ορίζει ως επιτακτική ανάγκη την μελέτη της ατμόσφαιρας η οποία είναι και η άμεσα εμπλεκόμενη στο φαινόμενο αυτό. Έτσι σημαντικό κομμάτι της επιστημονικής κοινότητας της έρευνας έχουν στραφεί στη μελέτη της για τη καλύτερη κατανόηση των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα και των παραγόντων που συμμετέχουν στο παγκόσμιο αυτό φαινόμενο.

Η τεχνική Lidar μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα και για την ανίχνευση από απόσταση των δασικών πυρκαγιών εντοπίζοντας υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων καπνού πάνω από δασικές εκτάσεις. Σε μια χώρα σαν την Ελλάδα η εφαρμογή ενός τέτοιου προγράμματος θα βοηθούσε σημαντικά στον άμεσο εντοπισμό των δασικών πυρκαγιών και τη έγκαιρη αντιμετώπιση για τη κατάσβεσή τους.

Το σύστημα Lidar οπισθοσκέδασης της εταιρίας Raymetrics είναι φορητό και μας δίνει τη δυνατότητα να το εκμεταλλευτούμε ώστε να μελετήσουμε χαρτογραφικά την συγκέντρωση διάφορων αέριων ρύπων σε διάφορες περιοχές της χώρας και σε μεγάλα ύψη ώστε να επιτευχθεί μια πλήρη καταγραφή των διάφορων φαινομένων που επηρεάζουν την συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων.

Ομοίως, πολλοί σταθμοί που θα έχουν τη δυνατότητα να συλλέξουν μετεωρολογικά και ανεμολογικά δεδομένα μπορούν να εγκατασταθούν σε καίρια σημεία στο Λεκανοπέδιο Αττικής θα είναι εξοπλισμένοι με κατάλληλα όργανα για την καταγραφή των αιωρούμενων σωματιδίων. Μια συστηματική καταγραφή τέτοιων δεδομένων θα οδηγούσε σε μία ολοκλήρωση και πλήρης αναφορά των διάφορων φαινομένων που εμπλέκονται στην εισαγωγή αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα. Συνεπώς, η αντιμετώπιση πιθανών επεισοδίων υψηλών συγκεντρώσεων αέριων ρύπων θα ήταν πιο εύκολη, σε συνδυασμό με ένα πρόγραμμα πρόγνωσης ή μοντελοποίησης της συγκέντρωσης των διάφορων αέριων ρύπων.

### 6 Βιβλιογραφία

- 1. Ansmann A. et al, "Advances in Atmospheric Remote Sensing with Lidar", Εκδόσεις Springer, 1996.
- 2. Cezard N. et al., "Development of a short-range 355-nm Rayleigh-Mie lidar using a Michelson interferometer for wind speed measurements", Proc. of SPIE Vol. 6750, 6750 08, 2007.
- 3. Chaloulakou A. et al., "Measurements of PM10 and PM2.5 particle concentrations in Athens, Greece", Atmospheric Environment, Vol. 37, 649–660, 2003.
- 4. Congalton R. and Green K, "Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices, Second Edition", Εκδόσεις CRC Press, 2008.
- 5. David R. et al., "Doppler lidar atmospheric wind sensor: reevaluation of a 355nm incoherent Doppler lidar", Appl. Opt., Vol. 29, 4133-4414, 1990.
- 6. De Nevers, "Air Pollution Control Engineering", Εκδόσεις McGraw-Hill Professional, 2000.
- 7. Esselborn M. et al., "Airborne high spectral resolution lidar for measuring aerosol extinction and backscatter coefficients", Appl. Phys., Vol.47, 346-358, 2008.
- 8. Freeman F. et al., "Wind measurement accuracy of the NOAA pulsed infrared Doppler lidar", Appl. Opt., Vol. 23, 2503-2506, 1984.
- 9. Fujii T., "Laser Remote Sensing", Εκδόσεις CRC Press, 2005.
- 10. Grantz D. et al., "Ecological effects of particulate matter", Environ Int., Vol. 29, 213-239, 2003.
- 11. Imaki M. et al., "Ultraviolet high-spectral-resolution Doppler lidar measuring wind field and aerosol optical properties", Appl. Opt., Vol. 44, 6023-6030, 2005.

- 12. Intergovernmental Panel on Climate Change, "Climate Change 2007 The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC", Εκδόσεις Cambridge University Press, 2007.
- 13. Intergovernmental Panel on Climate Change, "Climate Change 2007 The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC", Εκδόσεις Cambridge University Press, 2007.
- 14. Katsouyanni K. et al., "Risk assessment of diesel exhaust and lung cancer: combining human and animal studies after adjustment for biases in epidemiological studies", Environ Health, Vol. 10, 30, 2011.
- 15. Katsouyanni K. et al., "Ethanol and breast cancer: An association that may be both confounded and causal", International Journal of Cancer, Vol. 58, 356– 361,1994.
- 16. Koelsch H. et al., "Remote measurement of the aerosols size distribution by lidar", J. Aerosol Sci., Vol. 20, 1213–1216, 1989.
- 17. Kokhanovsky A., "Aerosol Optics: Light Absorption and Scattering by Particles in the Atmosphere", Εκδόσεις Springer, 2007.
- 18. Measures R., "Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications", Εκδόσεις John Wiley & Sons Inc, 1984.
- Pichugina Y. et al., "Estimation of wind turbine wake characteristics from Doppler lidar measurements", 26th International Laser Radar Conference, Vol. 2, 183-186, 2012.
- 20. Radlach M. et al., "Scanning rotational Raman lidar at 355nm for the measurement of tropospheric temperature fields", Atmos. Chem. Phys., Vol. 8, 159-169, 2008.
- 21. Reist P., "Aerosol Science and Technology", Εκδόσεις McGraw-Hill Professional, 1992.
- 22. Ruzer L. and Harley N., "Aerosols Handbook: Measurement, Dosimetry, and Health Effects", Εκδόσεις CRC Press, 2004.
- 23. Seinfeld J. and Pandis S., "Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change", Εκδόσεις Wiley-Interscience, 2006.
- 24. Shimizu H. et al., "Atmospheric temperature measurement by a high spectral resolution lidar", Appl. Opt., Vol.25, 1460-1466, 1985.
- 25. Sigal L. and Suter G., "Evaluation of methods for determining adverse impacts of air pollution on terrestrial ecosystems", Εκδόσεις Environ Manage, 1987.
- 26. Signorell R. and Reid J., "Fundamentals and Applications in Aerosol Spectroscopy", Εκδόσεις CRC Press, 2010.
- 27. Su W. et al., "Aerosol and cloud interaction observed from high spectral resolution lidar data", J. Geophys. Res., Vol. 113, D24202, 2008.
- 28. Tesche M. et al., "Retrieval of microphysical properties of aerosol particles from one-wavelength Raman lidar and multiwavelength Sunphotometer observations", Atmos. Environ., Vol.42, 6398–6404, 2008.
- 29. Tesche M. et al., "Particle backscatter, extinction, and lidar ratio profiling with Raman lidar in south and north China", Appl. Opt., Vol. 46, 6302-6308, 2007.
- 30. Weitkamp C., "Lidar Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere", Εκδόσεις Springer, 2005.
- 31. Wynn L. et al., "Dual-frequency Doppler-lidar method of wind measurement", Appl. Opt., Vol. 19, 2967-2967, 1980.
- 32. Μακροπούλου Μ. και Παπαγιάννης Α., "Εφαρμογές των Lasers στη Βιοιατρική και το Περιβάλλον", Εκδόσεις ΕΜΠ, 2005.
- 33. Οξεκιούν-Πετροπούλου et al., "Περιβάλλον, Ατμοσφαιρική Ρύπανση, Στερεά Απόβλητα-Ανακύκλωση", Εκδόσεις ΕΜΠ, 1996.
- 34. Παπαγιάννης Α., "Φυσική Περιβάλλοντος", Εκδόσεις ΕΜΠ, 2004.
- 35. Σαχσαμάνογλου Χ. και Μακρογιάννης Τ., "Γενική Μετεορολογία", Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 1998.