



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΕΩΝ  
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

**‘Μελέτη των αιωρούμενων σωματιδίων με  
χρήση της τεχνικής της αποπόλωσης lidar  
και επιτόπιων μετρήσεων’**

Διπλωματική Εργασία

Βεργυρή Παναγιώτη

Επιβλέπων: Αλέξανδρος Παπαγιάννης

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π

Ιούλιος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ  
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

**‘Μελέτη των αιωρούμενων σωματιδίων με  
χρήση της τεχνικής της αποπόλωσης lidar  
και επιτόπιων μετρήσεων’**

Διπλωματική Εργασία

Βεργυρή Παναγιώτη

Επιβλέπων: Αλέξανδρος Παπαγιάννης

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ιούλιος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ  
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

**‘Μελέτη των αιωρούμενων σωματιδίων με  
χρήση της τεχνικής της αποπόλωσης lidar  
και επιτόπιων μετρήσεων’**

Διπλωματική Εργασία

Βεργυρή Παναγιώτη

Επιβλέπων: Αλέξανδρος Παπαγιάννης

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Μακροπούλου Μ.

Αναπλ. Καθηγήτρια

Παπαγιάννης Αλ.

Αναπλ. Καθηγητής

Φωκίτης Εμ.

Καθηγητής

Ιούλιος 2011

**Η εργασία αυτή αφιερώνεται στους γονείς μου**

**Γιώργο – Λυγερή,**

**και εις μνήμην ενός αγαπημένου μου προσώπου.**

## Πρόλογος – Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο των σπουδών μου στη Σχολή των Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στον τομέα Φυσικής και ειδικότερα, στο Έργαστήριο Laser και Εφαρμογών τους'. Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν η μελέτη των αιωρούμενων σωματιδίων με την χρήση της τεχνικής lidar αποπόλωσης καθώς και με επιτόπιες μετρήσεις στην περιοχή της Πολυτεχνειούπολης.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα κ. Παπαγιάννη Αλέξανδρο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Ε.Μ.Π., που με εμπιστεύθηκε για την εκπόνηση της εν λόγω διπλωματικής εργασίας, καθώς και για την καθοδήγηση και τις συμβουλές που μου προσέφερε, και να αναφέρω πως χωρίς την συμβολή του η άρτια ολοκλήρωση του παρόντος κειμένου δεν θα ήταν δυνατή. Επίσης σημαντικοί αρωγοί στην προσπάθειά μου αυτή ήταν ο υποψήφιος διδάκτορας Παναγιώτης Κόκκαλης και η Δ. Ρ. Μαμούρη. Οι προαναφερθέντες ήταν πάντα πρόθυμοι να μου προσφέρουν βοήθεια κάθε φορά που προέκυπτε οποιοδήποτε πρόβλημα. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα μέλη της τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής κ. Αλέξανδρο Παπαγιάννη, κ. Μυρσίνη Μακροπούλου και κ. Εμμανουήλ Φωκίτη για τα σχόλια και τις χρήσιμες παρατηρήσεις τους, πάνω στην εργασία αυτή.





# Περιεχόμενα

Περίληψη.....7

Abstract.....9

## **Κεφάλαιο 1: Αιωρούμενα σωματίδια**

1.1 Εισαγωγή .....13

1.2 Πηγές.....13

1.2.1 Φυσικές πηγές.....14

1.2.2 Ανθρωπογενείς πηγές.....16

1.3 Χημική σύσταση αιωρούμενων σωματιδίων.....17

1.4 Φυσικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων.....18

1.4.1 Μέγεθος και σχήμα αιωρούμενων σωματιδίων.....18

1.4.2 Δυναμική αιωρούμενων σωματιδίων.....20

1.4.2.1 Η κίνηση των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα.....20

1.4.2.2 Μηχανισμοί απομάκρυνσης των αιωρούμενων σωματιδίων.....21

1.5 Αλληλεπίδραση φωτεινής ακτινοβολίας και σωματιδίων.....22

1.6 Επιπτώσεις αιωρούμενων σωματιδίων.....24

1.6.1 Μηχανισμοί που επηρεάζουν το κλίμα.....24

1.6.2 Επιπτώσεις στην παγκόσμια κλιματική αλλαγή.....26

1.6.3 Επιπτώσεις στον άνθρωπο και στην υγεία.....28

1.6.4 Άλλες επιπτώσεις.....28

## **Κεφάλαιο 2: Η τεχνική lidar**

2.1 Εισαγωγή.....33

2.2 Αρχή λειτουργίας και διάταξη ενός συστήματος Lidar.....33

2.3 Τεχνικές τηλεπισκόπησης lidar.....36

2.4 Διάδοση μονοχρωματικής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα.....38

2.5 Βασική εξίσωση lidar.....	40
2.6 Επίλυση της εξίσωσης lidar (Αντιστροφή σήματος- Klett) .....	45

### **Κεφάλαιο 3: Lidar αποπόλωσης**

3.1 Εισαγωγή .....	51
3.2 Λόγος αποπόλωσης.....	51
3.3 Αιτίες αποπόλωσης στην ατμόσφαιρα.....	53
3.4 Εφαρμογές της τεχνικής lidar αποπόλωσης.....	54
3.4.1 Πείραμα SAMUM (Μελέτη των επεισοδίων σκόνης από την έρημο Σαχάρα).....	54
3.4.2 Πολικά στρατοσφαιρικά σύννεφα (PSCs) .....	57
3.4.3 Θύσανοι (Cirrus Clouds) .....	60
3.4.4 Νέφη νερού-παγοκρυστάλλων (water-ice clouds) .....	63

### **Κεφάλαιο 4: Lidar αποπόλωσης Ε.Μ.Π.**

4.1 Τεχνική περιγραφή συστήματος του lidar του ΕΜΠ.....	69
4.2 Διαδικασία βαθμονόμησης.....	70
4.3 Εφαρμογή στη μελέτη του φαινομένου μεταφοράς ερημικής σκόνης από την έρημο Σαχάρα πάνω από το Λεκανοπέδιο της Αττικής.....	74

### **Κεφάλαιο 5: Χρήση του οργάνου DustTrak για την μέτρηση της συγκέντρωσης των αερολυμάτων**

5.1 Εισαγωγή.....	81
5.2 Περιγραφή του οργάνου DustTrak.....	81
5.3 Αρχή λειτουργίας DustTrak.....	82
5.4 Μετρήσεις και επεξεργασία ατμοσφαιρικών παραμέτρων και αιωρούμενων σωματιδίων .....	84
5.4.1 Συγκέντρωση των PM <sub>10</sub> στην ευρύτερη περιοχή του Ζωγράφου.....	84
5.4.2 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων μέτρησης της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων PM <sub>10</sub> στην περιοχή του Ζωγράφου.....	86
5.4.2.1 Συσχέτιση της συγκέντρωσης των PM <sub>10</sub> και της σχετικής υγρασίας.....	88

5.4.2.2 Στατιστική ανάλυση ανά ημέρα εβδομάδας.....	94
5.4.2.3 Συσχέτιση συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων PM <sub>10</sub> και κατεύθυνσης ανέμου .....	96
5.4.2.4 Ανάλυση μετεωρολογικών ανεμολογικών δεδομένων.....	103
5.5 Περιγραφή επιλεγμένων περιόδων ή ημερών.....	105
5.5.1 Μεταφορά σκόνης από την έρημο Σαχάρα.....	106
5.5.2 Μείωση συγκέντρωσης των PM <sub>10</sub> λόγω βροχόπτωσης.....	108
5.6 Σύνοψη και Συμπεράσματα.....	109

## **Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και μελλοντικές προοπτικές**

6.1 Σύνοψη.....	113
6.2 Συμπεράσματα.....	114
6.3 Μελλοντικές προοπτικές.....	116
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>117</b>



## Περίληψη

Αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η μελέτη των αιωρούμενων σωματιδίων με τη χρήση της τεχνικής lidar αποπόλωσης καθώς και με επιτόπιες μετρήσεις στην περιοχή της Πολυτεχνειούπολης.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναφερόμαστε στα χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων. Πιο συγκεκριμένα θα αναφερθούμε συνοπτικά στις πηγές των αιωρούμενων σωματιδίων και στους μηχανισμούς απομάκρυνσής τους από την ατμόσφαιρα, στις οπτικές ιδιότητές τους, 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 που έχουν στην ανθρώπινη υγεία.

Το δεύτερο κεφάλαιο περιγράφει τις αρχές λειτουργίας της τεχνικής lidar και επίσης παρουσιάζονται οι διάφοροι τύποι lidar που υπάρχουν. Επίσης, περιγράφεται και επλύεται η βασική εξίσωση lidar για την περίπτωση των αιωρούμενων σωματιδίων αφού πρώτα αναφερόμαστε στη διαδικασία διάδοσης μιας μονοχρωματικής ακτινοβολίας laser στην ατμόσφαιρα.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναφερόμαστε πιο διεξοδικά στη τεχνική lidar αποπόλωσης. Περιγράφουμε τα μετρούμενα μεγέθη και επιχειρούμε μια εισαγωγή στις εφαρμογές της τεχνικής αυτής. Πιο συγκεκριμένα θα αναφερθούμε στην εφαρμογή της στο διαχωρισμό σκόνης από καπνό και για την ικανότητα αυτής της τεχνικής να προσδιορίζει την θερμοδυναμική κατάσταση των αιωρούμενων σωματιδίων και των νεφών.

Το τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται στο σύστημα lidar αποπόλωσης του ΕΜΠ και επιχειρείται η μελέτη του φαινομένου μεταφοράς ερημικής σκόνης από την έρημο Σαχάρα πάνω από το Λεκανοπέδιο της Αττικής. Προσέτι, περιγράφεται η διαδικασία βαθμονόμησης του συστήματος γενικά και ειδικά, ο προσδιορισμός των απαραίτητων παραμέτρων για την επίτευξη βαθμονομημένων μετρήσεων με το σύστημα αυτό.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναφερόμαστε στη χρήση του οργάνου DustTrak για την επιτόπια μέτρηση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων. Περιγράφεται το ίδιο το όργανο καθώς και η αρχή λειτουργίας του. Ολοκληρώθηκε η ενδεδειγμένη και συστηματική καταγραφή των ανεμολογικών, μετεωρολογικών δεδομένων της περιοχής του Ζωγράφου όπως και η καταγραφή της συγκέντρωσης των αερολυμάτων για την περίοδο από 2 Σεπτεμβρίου έως 4 Οκτωβρίου του έτους 2010. Στη συνέχεια γίνεται η προσπάθεια μελέτης και κατανόησης των διαφόρων φαινομένων που επηρεάζουν την συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων και παρουσιάζονται τα αντίστοιχα συμπεράσματα.

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



## **Abstract**

The purpose of the current thesis is the study of aerosols using lidar depolarization technique and in situ measurements at the campus of Polytechnioupolis.

The first chapter refers to the characteristics of suspended particles. In particular, a brief reference is made to the sources of aerosols and mechanisms of elimination from the atmosphere, the optical properties and the physico-chemical properties such as size, shape and chemical composition. Furthermore, the role they play in the global climate change through indirect and direct effect as well as the impact they have on human health.

The second chapter describes the operating principles of lidar technique and presents some of the available types of lidar. A reference is made not only to the transmitting monochromatic laser radiation through the atmosphere but also to the light interaction between the latter and the particulate matters. In this regard, the elastic back scattering lidar equation is analyzed and solved.

The third chapter pertains meticulously to the lidar depolarization technique. All mensuration data is provided in order to achieve an introduction to the applications of the mentioned technique. To this extend, a reference is made to the implementation of the separation of dust from smoke and the ability of this technique to determine the thermodynamic state of suspended particles and clouds.

At the fourth chapter a reference is made to the system of lidar depolarization of NTUA by studying the phenomenon of the transportation of Sahara desert dust through sand clouds in the area of Attica. Moreover, a description of the process of calibration system is presented, particularly by identifying the necessary elements to achieve calibration.

The fifth chapter refers to the use of the instrument DustTrak for the in situ mensuration of suspended particles in the air. In lieu of the above, a thorough and systematic recording of wind and meteorological data as well as aerosol concentration at Zografou region is presented for the period from September 2 to October 4, 2010. Additionally, we studied the various phenomena that affect the concentration of particulate matter and presented the respective conclusions that depict the present situation concerning the air pollution of the prementioned area.

At the sixth chapter we present a synopsis of conclusions of the current thesis as well as the future prospects of the lidar depolarization technique.





# Κεφάλαιο 1

## ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ





## 1.1 Εισαγωγή

Τα αιωρούμενα σωματίδια (Particulate matter) είναι μικρά σε μέγεθος αερομεταφερόμενα σωματίδια σε υγρή ή στερεά μορφή (όπως είναι η σκόνη, ο καπνός, η ομίχλη, τα νέφη, τα υδροσταγονίδια κ.τ.λ.) και διαφέρουν πολύ ως προς το χρώμα, την πυκνότητα, το μέγεθος, το σχήμα, τις φυσικές και χημικές τους ιδιότητες από τόπο σε τόπο και από χρόνο σε χρόνο. Συχνά προκύπτουν από συσσωματώματα πολλών άλλων σωματιδίων όμοιων η ανόμοιων και οι πηγές εκπομπής τους είναι φυσικές όσο και ανθρωπογενείς. Συνεπώς τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούν βασικό συστατικό της γήινης ατμόσφαιρας, αν και σπάνια αναφέρονται μαζί με τα υπόλοιπα αέρια στους διάφορους πίνακες με τα συστατικά της. Οφείλουμε να επισημάνουμε ότι η βασική διαφορά τους με τα αέρια είναι ότι ένα αέριο αρχικά αποτελείται από ξεχωριστά άτομα ή μόρια τα οποία είναι διασκορπισμένα, ενώ ένα σωματίδιο αποτελείται από μια συνάθροιση μορίων και ατόμων δεσμευμένων μεταξύ τους. Η παραμονή τους στην ατμόσφαιρα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες καθιστώντας την εισαγωγή και αποβολή των αιωρημάτων αυτών στην ατμόσφαιρα μία απόλυτα δυναμική διαδικασία. Οι επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στο περιβάλλον, αλλά και στον άνθρωπο είναι σημαντικές χωρίς όμως πάντα να προκαλούν αρνητικές επιπτώσεις.

Πιο συγκεκριμένα:

- η παρουσία τους είναι απαραίτητη για τη συμπύκνωση των υδρατμών (πυρήνες συμπυκνώσεως) και τη δημιουργία των νεφών.
- συμμετέχουν σε πλήθος χημικών αντιδράσεων στην ατμόσφαιρα και ανάλογα με τη χημική τους σύσταση μπορεί να είναι επιβλαβή για τους ζωντανούς οργανισμούς.
- επηρεάζουν την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης μέσω των διαδικασιών της σκέδασης και της απορρόφησης.
- σε μεγάλες συγκεντρώσεις μειώνουν σημαντικά την ορατότητα και την θερμοχωρητικότητα της ατμόσφαιρας.
- προκαλούν μεταβολές κλιματολογικών συνθηκών, συμβάλλοντας στην παγκόσμια κλιματική αλλαγή.
- η είσοδος τους στον ανθρώπινο οργανισμό επιβαρύνει σημαντικά την υγεία του ανθρώπου (κυρίως τα αναπνεύσιμα σωματίδια διαμέτρου <math><2.5\mu\text{m}</math> ( $\text{PM}_{2.5}$ )).

## 1.2 Πηγές

Οι πηγές των αιωρούμενων σωματιδίων είναι, είτε ανθρωπογενείς, είτε φυσικές. Φυσικές πηγές είναι οι ηφαιστειακές εκρήξεις, η παρασυρόμενη σκόνη από ανέμους ή σωματιδίων από τις κορυφές των κυμάτων, η καύση βιομάζας (πυρκαγιές που έχουν προκληθεί από φυσικά αίτια) ή παράγωγα βιολογικών διαδικασιών (π.χ. αναπνοή). Οι φυσικές πηγές μάλιστα σε παγκόσμια κλίμακα είναι υπεύθυνες για το 70%-90% του συνόλου των αιωρούμενων σωματιδίων. Κύριες ανθρωπογενείς είναι η σκόνη η οποία εισέρχεται στην ατμόσφαιρα λόγω της κίνησης των οχημάτων στο αυτοκινητόδρομο,

τα γεωργικά μηχανήματα και όλες τις γεωργικές δραστηριότητες, οι βιομηχανικές κατασκευές κτιρίων ή κατεδαφίσεις κτιρίων με βίαιο τρόπο, η καύση ορυκτών καυσίμων ή βιομάζας (πυρκαγιές που προκλήθηκαν από τον άνθρωπο, εμπρησμός ή αποψίλωση) σε παγκόσμιο επίπεδο μεγάλο μέρος των εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων οφείλεται στον άνθρωπο.

### 1.2.1 Φυσικές πηγές

#### Ωκεανοί

Τα σταγονίδια που δημιουργούνται στις κορυφές των κυμάτων στους ωκεανούς παρασύρονται από τον άνεμο και απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα. Περίπου το 96.8% των αιωρημάτων θαλασσιάς προελεύσεως είναι νερό και το 3,2 % είναι άλατα το μεγαλύτερο μέρος του οποίου είναι χλωριούχο νάτριο. Το μέγεθος τους εξαρτάται και από την αφυδάτωση που υφίστανται τα σωματίδια σε σχετικά μικρό ύψος πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας.

#### Εδαφος

Οι εκπομπές σωματιδιακών ρύπων από το έδαφος μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την ποιότητα του αέρα μιας περιοχής. Γενικότερα το έδαφος αποτελεί μια σημαντική πηγή αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα λόγω της επαναιώρησης της σκόνης εξ' αιτίας της μηχανικής καταπόνησης του και φυσικά λόγω της διάβρωσης του από τον άνεμο.

Το μέγεθος των σωματιδίων ποικίλει όπως το σχήμα και η σύνθεσή τους. Τα περισσότερα σωματίδια σκόνης που ανέρχονται είναι μεγαλύτερα από 1μm, ενώ σε βιομηχανικές περιοχές με έντονη γεωργική δραστηριότητα υπάρχουν και σωματίδια μεγαλύτερα των 10μm τα οποία λόγω βάρους κατακρημνίζονται γρήγορα στο έδαφος.



**Εικόνα 1.1** Εκπομπή σκόνης από το ορυχείο νοτίου πεδίου κοντά στον Άγιο Δημήτριο του νομού Κοζάνης.

#### Ηφαίστεια

Περισσότερα από 500 ηφαίστεια στην επιφάνεια της γης είναι ενεργά. Οι ηφαιστειακές εκρήξεις απελευθερώνουν τεράστιες ποσότητες αιωρούμενων

σωματιδίων μαζί με διοξείδιο του θείου, υδρόθειο και μεθάνιο επηρεάζοντας την ατμόσφαιρα ακόμα και σε πολύ μεγάλες αποστάσεις. Οι εκρήξεις αυτές τροφοδοτούν την ανώτερη τροπόσφαιρα και την στρατόσφαιρα με σωματίδια τα οποία παραμένουν εκεί για πολλά χρόνια μέχρι να κατακρημνιστούν λόγω της απώλειας κατακόρυφων μετακινήσεων αέριων μαζών σε αυτά τα ύψη.



**Εικόνα 1.2** Έκρηξη του ηφαιστείου Cleveland στην Αλάσκα(23-5-2006).

( <http://earthobservatory.nasa.gov/>)

### Ερημοι

Οι μεγάλες έρημοι στη γη όπως η γειτονική μας Σαχάρα είναι άλλη μία σημαντική πηγή αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Καταιγίδες σκόνης είναι ικανές να παρασύρουν μεγάλες ποσότητες σκόνης από αυτές της ερήμους σε πολύ μεγάλες αποστάσεις δημιουργώντας πολλά προβλήματα σε αεροδρόμια αυτοκινητόδρομους αφού μειώνουν έντονα την ορατότητα. Η σωματιδιακή ύλη που μεταφέρεται μέσω ανέμων από τις ερήμους προκαλεί σοβαρά προβλήματα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα για την Ελλάδα είναι ο άνεμος με την επωνυμία Σορόκος που προκαλεί συχνά έντονη μείωση της ορατότητας λόγω της σκόνης που μεταφέρει από την έρημο της Σαχάρας.



**Εικόνα 1.3** Σκόνη από την έρημο Σαχάρα πάνω από τον ελλαδικό χώρο.(10-10-2010) από δορυφόρο MODIS. ( <http://earthobservatory.nasa.gov/>)

## Άλλες πηγές

Άλλες φυσικές πηγές οι οποίες διοχετεύουν στην ατμόσφαιρα αιωρούμενα σωματίδια είναι σωματίδια βιολογικής προελεύσεως όπως είναι τα σπόρια, φυτικά υπολείμματα από φυτά όπως και ιοί ή βακτήρια και άλλοι μικροοργανισμοί οι οποίοι αφθονούν στο περιβάλλον γύρω μας.

Επίσης τα υπολείμματα μετεωριτών μετά την είσοδό τους στην γήινη ατμόσφαιρα. Οι περισσότεροι μετεωρίτες κονιορτοποιούνται από την ασπίδα προστασίας που προσφέρει η γήινη ατμόσφαιρα πριν φτάσουν στο ύψος των 80 km και συνεχίζουν την κάθοδό τους προς την επιφάνεια της γης με τη μορφή σκόνης. Μια διαδικασία που πολλές φορές, απαιτεί για την ολοκλήρωσή της πολλά χρόνια.

### **1.2.2 Ανθρωπογενείς πηγές**

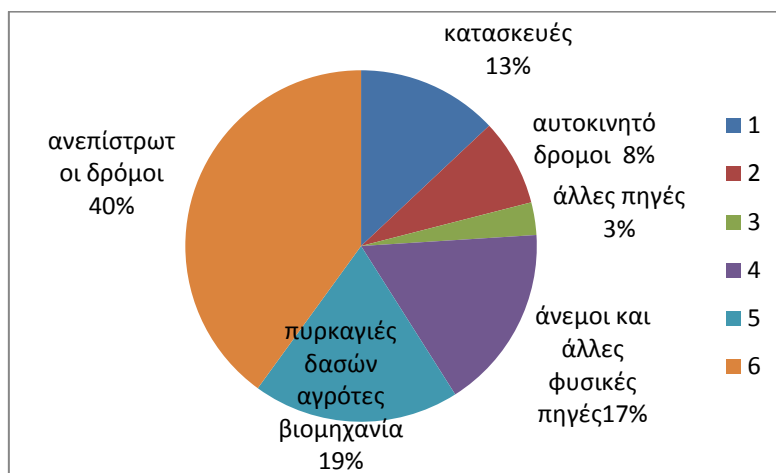
Οι ανθρωπογενείς πηγές των αερολυμάτων ποικίλουν. Μια από τις κύριες πηγές είναι η καύση των ορυκτών καυσίμων προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή μετακίνησης και ακόμα η καύση των ανθρώπινων απορριμμάτων με στόχο την μείωση του όγκου τους ή την παραγωγή ενός άλλου είδους καυσίμου το RDF. Ανθρώπινες δραστηριότητες που θεωρούνται ως μηχανική καταπόνηση του εδάφους και μπορούν να προκαλέσουν την εκπομπή μεγάλων ποσοτήτων σκόνης είναι η κυκλοφορία των οχημάτων, οι βιομηχανικές διεργασίες και οι κατασκευαστικές εργασίες.

Η σκόνη που επαναιωρείται από δρόμους εξαιτίας της κίνησης οχημάτων θεωρείται σημαντικός παράγοντας καθορισμού των ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων σωματιδίων και οφείλεται κυρίως από τη φθορά των ελαστικών και των φρένων των οχημάτων, τη διάβρωση της επιφάνειας του δρόμου, τα οργανικά υπολείμματα, το χώμα στην επιφάνεια του και τις αποθέσεις συστατικών από τα καυσαέρια των οχημάτων. Όπως θα γίνει φανερό στο Κεφάλαιο 5 της παρούσας εργασίας οι διαδικασίες αυτές -σε τοπικό επίπεδο- είναι ικανές να επηρεάσουν σημαντικά την συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων. Οι εκπομπές σωματιδίων λόγω οδικής κυκλοφορίας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με τον τύπο δρόμου από τον οποίο προέρχονται: εκπομπές από ασφαλτοστρωμένους και μη δρόμους. Είναι σαφές πως σωματίδια προερχόμενα από ανεπίστρωτους δρόμους επιβαρύνουν κατά πολύ περισσότερο την ατμόσφαιρα από ότι αυτά που προέρχονται από τους ασφαλτοστρωμένους.

Επίσης οι πυρκαγιές που προκαλούνται από ανθρώπινους παράγοντες είτε σε δάση είτε σε αγροτικές περιοχές προς την δημιουργία καλλιεργήσιμων εκτάσεων η ακόμα και από εμπρησμό είναι μια σημαντική πηγή αερολυμάτων. Τέτοιες πυρκαγιές απελευθερώνουν στον αέρα τεράστιες ποσότητες αιθάλης οργανικών υπολειμμάτων και στάχτης και καλύπτουν την ατμόσφαιρα σε μεγάλες οριζόντιες αποστάσεις.

Επιπλέον άλλος ένας τρόπος με τον οποίο ο άνθρωπος επιβαρύνει την ατμόσφαιρα με αιωρούμενα σωματίδια είναι οι χωματουργικές εργασίες. Ορυχεία, καλλιεργήσιμες εκτάσεις, ανέγερση και κατεδάφιση κτιρίων, μεγάλα κατασκευαστικά έργα όπως

οδικού δικτύου μεγάλης εκτάσεως κ.τ.λ. έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία μεγάλων ποσοτήτων αιωρούμενων σωματιδίων που ρυπαίνουν την ατμόσφαιρα.



Εικόνα 1.4 Εκπομπή αιωρούμενων σωματιδίων σε αστικές περιοχές.  
(<http://www.environment.gov.au>)

### 1.3 Χημική σύσταση αιωρούμενων σωματιδίων

Η χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων ποικίλει έντονα και γενικά όσον αφορά τα πρωτογενή σωματίδια εξαρτάται από την πηγή προελεύσεώς τους. Στα δευτερογενή σωματίδια εκτός από το μέγεθός τους, όπως θα δούμε παρακάτω, μπορεί να αλλάξει και η χημική τους σύσταση. Συνεπώς είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε την χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων, εφ' όσον μπορεί πολλές φορές να αποτελούν και απειλή για την ανθρώπινη υγεία.

Γενικά τα σωματίδια μπορεί να είναι παράγωγα καύσης διαφόρων ειδών και τα κύρια συστατικά τους να είναι ο άνθρακας και απλά ανόργανα και οργανικά στοιχεία όπως αμμωνιακά, θειικά και νιτρικά ιόντα, αλλά και διάφορες οργανικές ενώσεις από προϊόντα ημιτελών καύσεων. Μπορεί να είναι ορυκτογενή μέταλλα από επαναίωση σκόνης που συνήθως είναι γιγαντιαίοι κρύσταλλοι που περιέχουν σίδηρο, αλουμίνιο, πυρίτιο ή και τιτάνιο. Στις αστικές περιοχές εντοπίζονται σωματίδια που περιέχουν άλατα του ασβεστίου που προέρχονται κυρίως από οικοδομικά υλικά και σκόνη. Πάνω από τη υδάτινη επιφάνεια της γης και σε παράκτιες περιοχές υπάρχουν αιωρήματα αλάτων προερχόμενα από το θαλασσίνο νερό, ενώ οι ηφαιστειακές εκρήξεις διοχετεύουν στην ατμόσφαιρα τεράστιες ποσότητες θεικών αλάτων ενώ έρημοι άλατα του πυριτίου και του σιδήρου.

Επιπλέον, η χημική σύσταση τους μπορεί να αλλάξει κατά την παραμονή τους στην ατμόσφαιρα λόγω της αλληλεπίδρασής τους με άλλα συστατικά της ατμόσφαιρας, όπως είναι τα άλατα του αμμωνίου που είναι προϊόντα εξουδετέρωσης όξινων ουσιών στην ατμόσφαιρα από την αμμωνία. Επιπλέον, όλα αυτά τα σωματίδια μπορούν να υπάρχουν στην ατμόσφαιρα, είτε σαν στερεή μορφή, είτε σαν διαλυμένα άλατα λόγω της απορρόφησης νερού που υπάρχει στην ατμόσφαιρα.

## 1.4 Φυσικές ιδιότητες σωματιδίων

### 1.4.1 Μέγεθος και σχήμα σωματιδίων.

Τα αιωρούμενα σωματίδια κατηγοριοποιούνται είτε ως προς το μέγεθός τους είτε ως προς την προέλευσή τους ή και ως προς την σύνθεσή τους. Τα αιωρήματα που φτάνουν στην ατμόσφαιρα απευθείας λόγω εκπομπών χαρακτηρίζονται ως πρωτογενή ενώ αν δημιουργούνται μέσω μετατροπής μορίων αερίων σε σωματίδια χαρακτηρίζονται ως δευτερογενή. Ιδιαίτερα εξυπηρετικό όμως για τους επιστήμονες είναι η διάκρισή τους ως προς το μέγεθος τους η οποία και επικρατεί. Γενικά τα σωματίδια έχουν ποικίλα σχήματα (σφαιρικά, κυλινδρικά, παραλληλεπίπεδα, επίπεδα η και συνδυασμός των παραπάνω) αλλά τα αντιμετωπίζουμε ως σφαιρικά για λόγους απλοποίησης των υπολογισμών μας. Συνεπώς ένα σωματίδιο χαρακτηρίζεται από την διάμετρο του  $d$ . Η διάμετρος αυτή ισούται με την ισοδύναμη διάμετρο που έχει ένα σφαιρικό σωματίδιο που παρουσιάζει την ίδια αντίσταση στον αέρα κατά την κίνηση του με το εξεταζόμενο σωματίδιο. Έτσι, όποτε συζητάμε για διάμετρο ενός σωματιδίου αναφερόμαστε στην ισοδύναμη διάμετρο.

Τα αιωρούμενα σωματίδια διακρίνονται ως προς το μέγεθός τους σε δύο βασικές κατηγορίες: τα λεπτόκοκκα (fine) και τα χονδρόκοκκα (coarse).

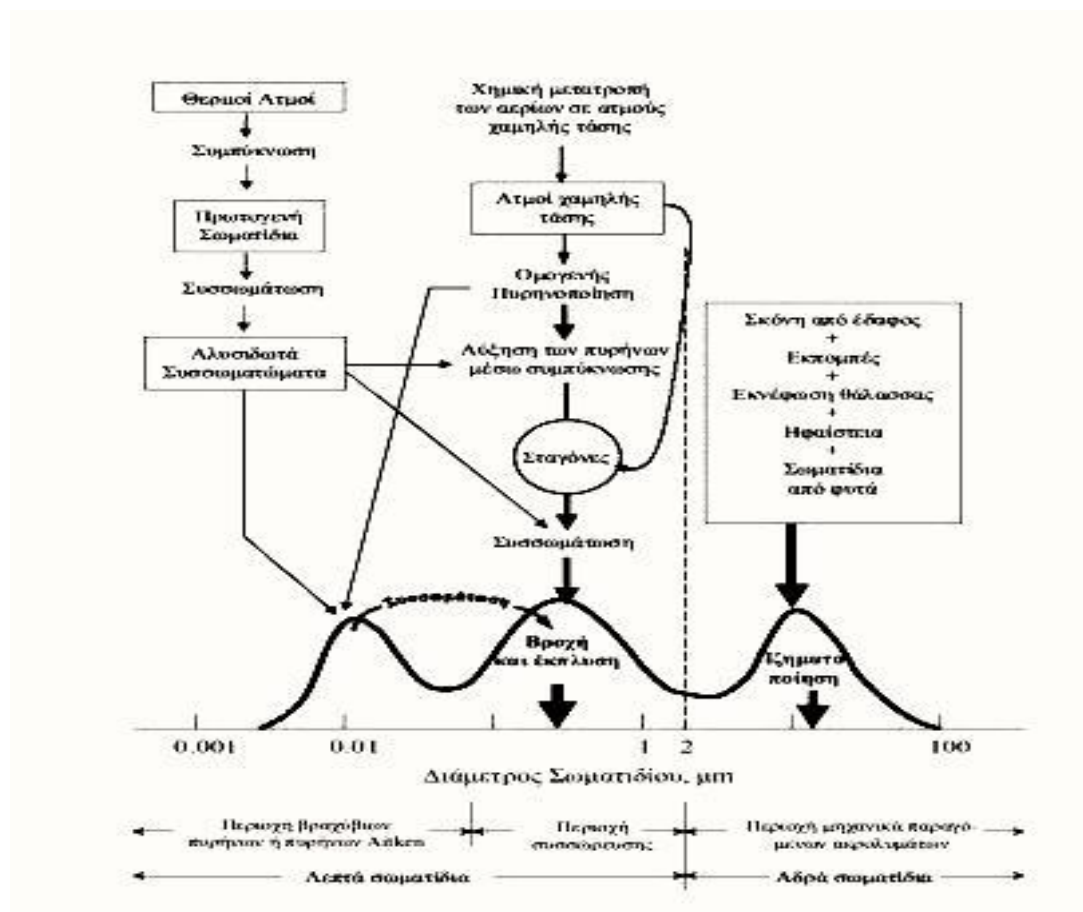
Λεπτόκοκκα σωματίδια είναι αυτά με διάμετρο μικρότερη από  $2.5\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ) ενώ χονδρόκοκκα είναι αυτά με διάμετρο μεγαλύτερη από  $2.5\mu\text{m}$ . Τα λεπτόκοκκα σωματίδια χωρίζονται σε αυτά που βρίσκονται στη φάση πυρηνοποίησης (nucleation mode) και σε αυτά που βρίσκονται στη φάση συσσώρευσης (accumulation mode). Στη φάση πυρηνοποίησης  $d < 0.1\mu\text{m}$  βρίσκονται τα μόλις εκπεμπόμενα σωματίδια η προσφάτως δημιουργημένα σωματίδια με τη διαδικασία της πυρηνοποίησης η της συμπύκνωσης κατ' ευθείαν από την αέρια φάση και απομακρύνονται κυρίως με την συσσωμάτωσή (coagulation) τους σε μεγαλύτερα σωματίδια. Στη φάση συσσώρευσης βρίσκονται σωματίδια από  $0.1\mu\text{m}$  με  $2.5\mu\text{m}$  διάμετρο και προέρχονται κυρίως από την συμπύκνωση η την συσσωμάτωση σωματιδίων στη φάση της πυρηνοποίησης. Οι διαδικασίες αυτές επιτυγχάνονται είτε όταν σωματίδια λειτουργούν σαν πυρήνες πάνω στους οποίους συμπυκνώνονται μόρια νερού και σχηματίζοντας σφαιρικά σωματίδια. Είτε αντιδρώντας χημικά με ατμοσφαιρικά αέρια ή υδρατμούς παράγοντας διαφορετικές ενώσεις. Στη φάση της συσσώρευσης κατά την σύγκρουση δύο σωματιδίων στον αέρα αυτά προσκολλώνται λόγω των ισχυρών ελκτικών δυνάμεων επιφανείας σε σχέση με το βάρος τους και καταλήγουν σε ένα όλο και μεγαλύτερο σωματίδιο που όσο πιο βαρύ γίνεται τόσο πιο πιθανό είναι επιστρέψει πάλι στο έδαφος λόγω της βαρύτητας.

Αξίζει να σημειωθεί πως λίγα μόνο αέρια όπως είναι το θειικό οξύ το νερό και κάποια βαριά οργανικά αέρια έχουν την ικανότητα να συμπυκνώνονται σε σωματίδια. Το οξυγόνο και το άζωτο που αποτελούν και το μεγαλύτερο μέρος της ατμόσφαιρας δεν συμπυκνώνονται. Στη φάση της συσσώρευσης η μηχανισμοί απομάκρυνσης των σωματιδίων από την ατμόσφαιρα είναι λιγότερο αποτελεσματικοί με αποτέλεσμα να παρατηρούνται μεγάλοι χρόνοι παραμονής τους. Επιπλέον αυτά τα σωματίδια είναι



ικανά να διεισδύουν στο ανθρώπινο οργανισμό μέσω του αναπνευστικού συστήματος καθιστώντας τα ιδιαίτερα επικίνδυνα για τον άνθρωπο σε μεγάλες συγκεντρώσεις.

Σωματίδια μεγέθους μεγαλύτερου από 2,5 $\mu\text{m}$  σε διάμετρο ονομάζονται γιγάντια σωματίδια (coarse mode) και είναι κυρίως σκόνη παρασυρόμενη από τον άνεμο, σωματίδια από τις κορυφές των κυμάτων στην θάλασσα, ηφαιστειακές εκρήξεις η ακόμα και οργανική ύλη από φυτά. Αυτά τα σωματίδια είναι τόσο βαριά με αποτέλεσμα η παραμονή τους στην ατμόσφαιρα να είναι από μερικές ώρες έως μέρες το πολύ το οποίο εξαρτάται κυρίως από το ύψος της αρχικής εναπόθεσης (π.χ. η εναπόθεση τους από ηφαίστεια γίνεται σε μεγάλα ύψη) και απομακρύνονται από αυτήν με τον μηχανισμό της καθίζησης. Τα λεπτά σωματίδια συνήθως δεν μεγαλώνουν με καμία διαδικασία σε μεγέθη μεγαλύτερα του 1  $\mu\text{m}$ . Συνεπώς τα γιγάντια σωματίδια είναι πρωτογενή σωματίδια.



**Εικόνα 1.5** Κατανομή σωματιδίων ως προς το μέγεθος τους (Seinfeld and Pandis, 1998).

Γενικά στη φάση πυρηνοποίησης έχουμε την υψηλότερη αριθμητική συγκέντρωση, στη φάση συσσωρευσης την μεγαλύτερη συγκέντρωση επιφανείας και στην τελευταία την μεγαλύτερη συχνότητα μάζας.

Η μορφολογία και το σχήμα των αιωρούμενων σωματιδίων ποικίλει σύμφωνα με τη σύνθεσή τους, το χρόνο παραμονής τους στην ατμόσφαιρα, τη χημική τους σύσταση

και τις χημικές και φυσικές ιδιότητές τους. Όσο μεγαλύτερο είναι σε ηλικία ένα σωματίδιο τόσο περισσότερες είναι οι σαρκωμάτωσεις και οι πτυχές στην επιφάνεια του. Εάν το σωματίδιο είναι υγροσκοπικό\* απορροφά έντονα τα μόρια νερού και έτσι γίνονται σφαιρικά. Κάποια άνυδρα σωματίδια μπορεί να είναι επίπεδα ή σφαιροειδή, άλλα να αποτελούνται από στρώματα και άλλα να είναι ινώδη.

## 1.4.2 Δυναμική των σωματιδίων

### 1.4.2.1 Η κίνηση των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα

Η κίνηση και η μεταφορά των σωματιδίων εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από το μέγεθός τους. Σωματίδια με μέγεθος μεγαλύτερο από τη μέση ελεύθερη διαδρομή των μορίων του αέρα αποκτούν γρήγορα σταθερή ταχύτητα καθίζησης. Σωματίδια με μέγεθος ίσο ή μικρότερο από τη μέση ελεύθερη διαδρομή των μορίων του αέρα αποκτούν σχετικά μικρή οριακή ταχύτητα (καθίζησης) και εκτελούν ταυτόχρονα και τυχαία κίνηση (κίνηση Brown\*\*).

Ένα σωματίδιο μεγαλύτερο από τη μέση ελεύθερη διαδρομή των μορίων του αέρα, όταν κινείται μέσα στην ατμόσφαιρα, υφίσταται αντίσταση από τον αέρα που δίνεται από το νόμο του Stokes:

$$F = 6\pi\eta vr \quad (1.1)$$

όπου  $\eta$  είναι το ιξώδες του αέρα  $v$  η ταχύτητα του σωματιδίου και  $r$  η ακτίνα του σωματιδίου. Συνεπώς όταν το βάρος του σωματιδίου είναι ίσο με τη δύναμη Stokes τότε το σωματίδιο πέφτει με σταθερή ταχύτητα.

Παρ' όλα αυτά η γήινη ατμόσφαιρα παρουσιάζει έντονη δραστηριότητα και η δημιουργία ανέμων είναι η κύρια αιτία μετακίνησης των ρυπασμένων αερίων μαζών με αιωρούμενα σωματίδια ακόμα και σε αποστάσεις αρκετά μεγάλες ώστε να καλύπτουν ολόκληρες ηπείρους. Οι οριζόντιοι άνεμοι είναι η κύρια αιτία μεταφοράς των αερίων ρύπων, αλλά ταυτόχρονα συμβάλουν στην μείωση της συγκέντρωσης τους και στην ανακούφιση των αστικών περιοχών. Επίσης, κατακόρυφοι άνεμοι συμβάλλουν στην μεταφορά των αιωρούμενων σωματιδίων οι οποίοι εάν είναι ανοδικοί επιβραδύνουν την απομάκρυνσή τους από αυτήν.

\* Υγροσκοπικά είναι τα σωματίδια που περιέχουν υγροσκοπικές ουσίες. Δηλαδή ουσίες που δεσμεύουν μόρια νερού που υπάρχουν γύρω τους λόγω της ανάπτυξης δεσμών υδρογόνου με τα υδροξύλια στα μόρια του νερού.

\*\* Η κίνηση Brown είναι τυχαία διαδρομή που ακολουθούν τα σωματίδια όταν εντοπίζονται μέσα σε ένα ρευστό.

### 1.4.2.2 Μηχανισμοί απομάκρυνσης

Οι μηχανισμοί απομάκρυνσης των αιωρούμενων σωματιδίων ποικίλουν. Οι βασικότεροι είναι η καθίζηση, η ξηρή εναπόθεση και η υγρή εναπόθεση ή έκπλυση.

Κατά την καθίζηση σωματίδια απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα λόγω της βαρυτικής έλξης από την γη και για μικρά αιωρούμενα σωματίδια η διαδικασία αυτή μπορεί να διαρκεί πολλά χρόνια.

Η ξηρή εναπόθεση είναι μια διαδικασία κατά την οποία τα σωματίδια εναποτίθενται πάνω σε δέντρα, κτίρια φυτά, επιφάνεια της θάλασσας και γενικά σε εμπόδια που βρίσκουν στο έδαφος όπως ακόμα βουνά και λόφοι. Σημαντική καταβόθρα των σωματιδίων είναι οι ωκεανοί οι οποίοι συγκρατούν εύκολα τα σωματίδια που προσκρούουν σε αυτούς χωρίς να επιτρέπουν την επαναιώρηση τους.

Καταβόθρα μπορεί να θεωρηθεί και η στρατόσφαιρα αφού επιτρέπει την παραμονή των αιωρούμενων σωματιδίων που θα εισέλθουν σε αυτήν για πολλά χρόνια λόγω της σταθερότητας που επικρατεί. Μάλιστα τα μόρια των χλωροφθορανθράκων (CFCs) όσο παραμένουν στην τροπόσφαιρα έχουν χρόνο ζωής από μερικές δεκάδες χρόνια έως και πάνω από 100 χρόνια όντας πολύ σταθερές χημικές ενώσεις. Με την εισαγωγή τους στη στρατόσφαιρα φωτοδιασπώνται από την υπεριώδη ακτινοβολία και παράγουν μόρια Cl που είναι υπεύθυνα για την μείωση του στρατοσφαιρικού όζοντος.

### Πίνακας 1.1

#### Διάμετρος αιωρούμενων σωματιδίων και μέσος χρόνος καθίζησης

Διάμετρος σωματιδίων(μm)	Χρόνος καθίζησης( χρόνος/km)
0.02	228 χρόνια
0,1	36 χρόνια
1,0	328 μέρες
10,0	3.6 μέρες
100,0	1,1 ώρες
1000,0	4 λεπτά
5000,0	1.8 λεπτά

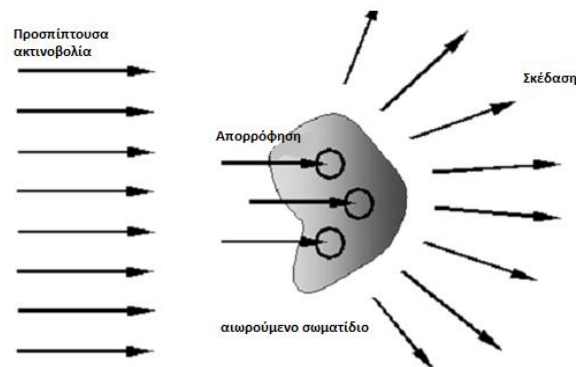
Η έκπλυση είναι μια διαδικασία κατά την οποία τα σωματίδια συσσωματώνονται με σταγονίδια νερού ή παγοκρυστάλλων και παρασύρονται μαζί τους στο έδαφος. Είναι ένα φαινόμενο που μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί συγκρίνοντας την ορατότητα της ατμόσφαιρας πριν και μετά από ένα επεισόδιο χιονόπτωσης, βροχόπτωσης, χαλαζόπτωσης ή και ακόμα ομίχλης. Η έκπλυση είναι ένας άμεσος μηχανισμός απομάκρυνσης με εμφανή αποτελέσματα στην τροπόσφαιρα, μιας και μόνο εκεί έχουμε νέφη βροχής.



**Εικόνα 1.6** Άποψη της πόλης της Σαγκάης πριν και μετά από επεισόδιο βροχής.

## 1.5 Αλληλεπίδραση φωτεινής ακτινοβολίας και σωματιδίων

Η σχέση ανάμεσα στη φωτεινή ακτινοβολία και τα αιωρούμενα σωματίδια είναι περίπλοκη και εξαρτάται κάθε φορά από πλήθος ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων (μέγεθος, σχήμα, μορφολογία, διάσταση κ.α.), όπως και από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Όταν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αλληλεπιδράσει με ένα σωματίδιο τότε ηλεκτρόνια του σωματιδίου μπορεί να διεγερθούν και να αποδιεγερθούν εκπέμποντας στο ίδιο ή σε διαφορετικό μήκος κύματος, είτε μέρος της ενέργειας αυτής να μετατραπεί σε θερμότητα με τη διαδικασία της απορρόφησης.



**Εικόνα 1.7** Απορρόφηση και σκέδαση από αιωρούμενο σωματίδιο.

Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε πως η ακτινοβολία κατά την διάδοσή της στην ατμόσφαιρα εξασθενεί λόγω φαινομένων σκέδασης και απορρόφησης. Το ποσοστό εμφάνισης του κάθε φαινομένου εξαρτάται από το μήκος κύματος  $\lambda$  της προσπίπτουσας στο σωματίδιο ακτινοβολία, το μέγεθος του σωματιδίου (διάμετρο  $d$ ) και τις οπτικές ιδιότητες που σχετίζονται με τον δείκτη διάθλασης τους:

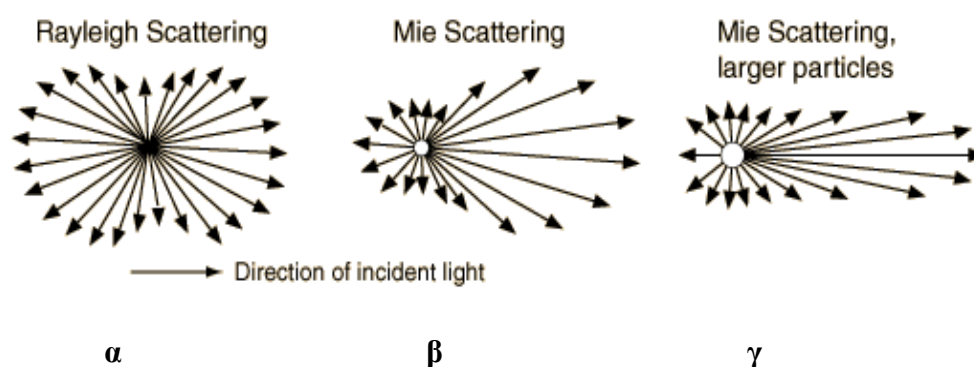
$$m = n + ik \quad (1.2)$$

όπου  $n$  και  $k$  είναι το πραγματικό και το φανταστικό μέρος αντίστοιχα του δείκτη διάθλασης ο οποίος είναι συνάρτηση του μήκους κύματος. Ο δείκτης  $n$  καταδεικνύει την ταχύτητα διάδοσης του φωτός στο υλικό μέσο, ενώ ο δείκτης  $k$  είναι ένδειξη της απορροφητικότητας του υλικού του σωματιδίου αυτού.

Ορίζουμε και τη παράμετρο μεγέθους  $a$  που είναι μια αδιάστατη παράμετρος που συχνά χρησιμοποιείται για να περιγράψει την σχέση μεταξύ του μεγέθους του σωματιδίου και της προσπίπτουσας ακτινοβολίας μήκους  $\lambda$ .

$$a = \frac{\pi d}{\lambda} \quad (1.3)$$

Στη σκέδαση Mie οι σκεδαστές έχουν συγκρίσιμο μέγεθος με το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, οπότε  $a \sim 1$ . Στην περίπτωση που το μέγεθος του σωματιδίου είναι πολύ μεγαλύτερο από το μήκος κύματος  $\lambda$  ( $a \gg 1$ ) τότε έχουμε φαινόμενα πολλαπλής σκέδασης που αναφέρονται στην γεωμετρική οπτική. Για σωματίδια με  $d > \lambda$  υπερτερεί η εμπρόσθια σκέδαση (Εικόνα 1.7γ).



**Εικόνα 1.8** α) Σκέδαση Rayleigh, β) σκέδαση Mie, γ) σκέδαση Mie από σωματίδιο πολύ μεγαλύτερο από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Το ποσό ενέργειας που σκεδάζεται ή απορροφάται είναι ανάλογο της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας  $Q_0$  ( $\text{Wm}^{-2}$ ) και της ενεργού διατομής απλής σκέδασης  $\sigma_{scat}$  ( $\text{m}^2$ ) και απορρόφησης  $\sigma_{abs}$  ( $\text{m}^2$ ), αντίστοιχα. Έτσι τα σωματίδια σκεδάζουν και απορροφούν ενέργεια  $Q_{scat}$  (W) και  $Q_{abs}$  (W), αντίστοιχα, ενώ η ενέργεια που χάνεται θα είναι το άθροισμα αυτών. Έτσι ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$Q_{scat} = Q_0 \sigma_{scat} \quad (1.4)$$

$$Q_{abs} = Q_0 \sigma_{abs} \quad (1.5)$$

$$Q_{ext} = Q_{scat} + Q_{abs} = (\sigma_{scat} + \sigma_{abs}) Q_0 \quad (1.6)$$

Επίσης, ορίζουμε και την ενεργό διατομή εξασθένησης και ισχύουν τα παρακάτω:

$$\sigma_{ext} = \sigma_{scat} + \sigma_{abs} \quad (1.7)$$

$$Q_{ext} = \sigma_{ext} Q_0 \quad (1.8)$$

Ορίζουμε σαν λευκότητα μεμονωμένης σκέδασης  $\omega$  το λόγο:

$$\omega = \frac{\sigma_{scat}}{\sigma_{ext}} \quad (1.9)$$

Από τις σχέσεις 1.7 και 1.9 καταλήγουμε στην εξίσωση:

$$1 - \omega = \frac{\sigma_{abs}}{\sigma_{ext}} \quad (1.10)$$

Επομένως μεγάλες τιμές του  $\omega$  καταδεικνύουν αερολύματα που σκεδάζουν έντονα, ενώ μεγάλες τιμές του  $1-\omega$  καταδεικνύουν αερολύματα που απορροφούν έντονα.

Στη σκέδαση Rayleigh τα σκεδάζοντα σωμάτια (συνήθως μόρια) της ατμόσφαιρας έχουν διάμετρο μικρότερη από το μήκος κύματος  $\lambda$  της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ( $a \ll \lambda$ ). Στη μοριακή σκέδαση ορίζουμε την διαφορική ενεργό διατομή σκέδασης  $\frac{d\sigma_R}{d\Omega}$  για μονοχρωματικό πολωμένο φως και για οπτικά ισοτροπικά μόρια:

$$\frac{d\sigma_R}{d\Omega} = \frac{\pi^2 (n^2 - 1)^2}{N^2 \lambda^4} (\cos^2 \varphi \cos^2 \theta + \sin^2 \varphi) \quad (1.11)$$

όπου,  $n$  είναι το πραγματικό μέρος του δείκτη διάθλασης της ατμόσφαιρας,  $N$  η αριθμητική πυκνότητα ( $\text{mol cm}^{-3}$ ) των αερίων της ατμόσφαιρας και  $\theta, \varphi$  οι γωνίες (σε σφαιρικές συντεταγμένες) που σχηματίζουν η προσπίπτουσα και η σκεδαζόμενη πολωμένη ακτινοβολία μήκους κύματος  $\lambda$  (σε cm).

Με βάση την εξίσωση (1.11) η σκέδαση από την μοριακή ατμόσφαιρα είναι ανάλογη του  $\lambda^{-4}$ , έτσι η ηλιακή ακτινοβολία με μικρότερο μήκος κύματος σκεδάζεται εντονότερα κάτι που εξηγεί το μπλε χρώμα του καθαρού ουρανού.

Ολοκληρώνοντας την (1.11) σε μια στερεά γωνία  $4\pi$  καταλήγουμε στην εξίσωση:

$$\sigma_{R(\text{ολικό})} = \frac{8\pi}{3} \frac{\pi^2 (n^2 - 1)^2}{N^2 \lambda^4} \text{ (cm}^2\text{)} \quad (1.12)$$

όπου  $\sigma_{R(\text{ολικό})}$  είναι η ολική ενεργός διατομή σκέδασης Rayleigh.

## 1.6 Επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων

### 1.6.1 Μηχανισμοί που επηρεάζουν το κλίμα

Παρ' όλο που όλα τα αέρια του θερμοκηπίου θερμαίνουν την ατμόσφαιρα, κάποια σωματίδια έχουν την ικανότητα να θερμαίνουν και άλλα να ψύχουν την ατμόσφαιρα. Τα σωματίδια που θερμαίνουν την ατμόσφαιρα είναι η αιθάλη (**Black Carbon BC**),

εκείνα που περιέχουν ενώσεις του αργιλίου, οι πολυκυκλικές αρωματικές ενώσεις και οι νιτρικές αρωματικές ενώσεις. Αυτές οι ενώσεις θερμαίνουν την ατμόσφαιρα κυρίως απορροφώντας την ηλιακή ακτινοβολία και την υπέρυθη ακτινοβολία που εκπέμπει η γη. Τα υπόλοιπα σωματίδια που περιλαμβάνουν νερό, νιτρικά και θειικά άλατα και οι περισσότερες οργανικές ενώσεις ψύχουν τις κοντινές στην επιφάνεια της γης αέριες μάζες με την οπισθοσκέδαση πίσω στο διάστημα της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολία περισσότερο από ό,τι απορροφούν την υπέρυθη ακτινοβολία εκπεμπόμενη από τη γη. Αν λάβουμε υπ όψιν μας μόνο τις στιγμιαίες επιδράσεις των αιωρημάτων στην ανταλλαγή ακτινοβολίας της γης και αγνοήσουμε τα αποτελέσματα στην ατμόσφαιρα που απαιτούν κάποιο χρόνο για να γίνουν αντιληπτά, η ψύξη που προκαλείται από όλα τα ανακλαστικά σωματίδια φαίνεται να υπερέχει της θέρμανσης που προκαλείται από όλα τα απορροφητικά σωματίδια σε παγκόσμιο επίπεδο. Μια πραγματική και αντικειμενική προσέγγιση του γενικού φαινομένου απαιτεί χρόνια παρατήρησης και μελέτης των μακροπρόθεσμων αποτελεσμάτων των αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα. Μερικοί από τους τρόπους που επηρεάζεται το κλίμα από τα αιωρούμενα σωματίδια αναφέρονται ακολούθως:

#### Φαινόμενο αυτό-ανάδρασης ( The self feedback effect )

Όταν σωματίδια βρεθούν στην ατμόσφαιρα είναι ικανά να αλλάξουν την θερμοκρασία της, τη σχετική υγρασία και την έκταση συμπύκνωσης των αερίων. Όλα αυτά εξαρτώνται από την σύνθεση, την περιεκτικότητα σε νερό των σωματιδίων, το μέγεθος και τις οπτικές τους ιδιότητες. Για παράδειγμα όταν σωματίδια αιθάλης (BC) βρεθούν στην ατμόσφαιρα μειώνουν την σχετική υγρασία μειώνοντας την περιεκτικότητα σε νερό των σωματιδίων όπως και την ανακλαστικότητα των νιτρικών και θεικών ενώσεων, θερμαίνοντας έτσι τοπικά την ατμόσφαιρα.

#### Το φωτοχημικό φαινόμενο( photochemistry effect )

Η ύπαρξη των αιωρούμενων σωματιδίων επηρεάζει τους φωτολυτικούς συντελεστές των αερίων, επηρεάζοντας την συγκέντρωσή τους αλλά και των παραγώγων τους. Η διαδικασία κατά την οποία τα σωματίδια αλλάζουν της φωτοχημικές ιδιότητες των αερίων ονομάζεται φωτοχημικό φαινόμενο. Απορροφούν την προσπίπτουσα ακτινοβολία πιο έντονα και θερμαίνουν τοπικά την ατμόσφαιρα.

#### Θόλος καπνού ( Smudge-pot effect )

Κατά την διάρκεια της νύχτας αιωρούμενα σωματίδια παγιδεύουν την εκπεμπόμενη από την γη υπέρυθη ακτινοβολία θερμαίνοντας έτσι την ατμόσφαιρα. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται έντονα σε βιομηχανοποιημένες και αστικές περιοχές που η ατμόσφαιρα είναι πλούσια σε σωματίδια παραγόμενα από καύσεις ορυκτών καυσίμων. Η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα αυξάνει την σταθερότητα των κατώτερων στρωμάτων με αποτέλεσμα να μειώνονται οι ταχύτητες των ανέμων και να παγιδεύονται έτσι τα εκπεμπόμενα σωματίδια.

Είναι ένα φαινόμενο που συχνά εκμεταλλεύονται καλλιεργητές εσπεριδοειδών και ευπαθών στο κρύο φυτά, οι οποίοι καίγοντας αργό πετρέλαιο σε μεταλλικές θήκες ή παλιά ελαστικά αυτοκινήτων προκαλούν την δημιουργία ενός θόλου καπνού που

παγιδεύει την υπέρυθρη ακτινοβολία της γης και αποφεύγεται η ψύξη των καλλιερχειών.

#### Ημερήσιας σταθερότητας (The daytime stability effect)

Τα αιωρήματα που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα κατά την διάρκεια της ημέρας απορροφούν και σκεδάζουν μεγάλο μέρος της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας εμποδίζοντας την, κατά αυτόν τον τρόπο, να φτάσει στην επιφάνεια της γης. Θερμαίνουν έτσι τα ανώτερα στρώματα και ψύχουν τα κατώτερα δημιουργώντας έτσι μία σταθερότητα στις αέριες μάζες και εμποδίζεται η μεταφορά αέριων ρύπων και ενέργειας.

#### Δυνητική επίδραση των αερολυμάτων (The particle effect through surface )

Κατά την διάρκεια της ημέρας η αιθάλη μειώνει την ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος αυξάνοντας την διάρκεια ζωής του υπάρχοντος χιονιού. Αντιστρόφως χιόνι που περνά από στρώμα αιθάλης κατά την πτώση του λιώνει πιο γρήγορα. Τη νύχτα η αιθάλη παγιδεύει την υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπει η γη επιταχύνοντας έτσι την διαδικασία τήξης του χιονιού. Αλλάζοντας έτσι την λευκότητα του εδάφους συμβάλλει στην παγκόσμια κλιματική αλλαγή.

### **1.6.2 Επιπτώσεις στην παγκοσμία κλιματική αλλαγή**

Η επίδραση των σωματιδίων στην παγκόσμια κλιματική αλλαγή είναι σίγουρη αλλά είναι αρκετά δύσκολο να καθοριστεί ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζεται. Τα σωματίδια είτε άμεσα είτε έμμεσα επηρεάζουν το ενεργειακό ισοζύγιο της γης. Υπολογίζεται ότι μια μεγάλη ηφαιστειακή έκρηξη μπορεί να προκαλέσει ελάττωση της θερμοκρασία από 0.2 έως 0.5 C<sup>0</sup>. Εκτιμάται ότι αυτή η μεταβολή θερμοκρασίας θα γίνει αντιληπτή στο ημισφαίριο της γης όπου έγινε η έκρηξη έπειτα από 1 με 3 έτη. Είναι ένα φαινόμενο που έχει παρατηρηθεί μετά την έκρηξη του ηφαιστείου του Pinatubo το 1991.

Οι κυριότεροι τρόποι με τους οποίους επιδρούν τα αιωρούμενα σωματίδια στο παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο αναφέρονται παρακάτω:

#### Άμεσο φαινόμενο των αερολυμάτων ( Direct aerosol effect )

Μέσω της σκέδασης και απορρόφησης της προσπίπτουσας ηλιακής και της εκπεμπόμενης γήινης ακτινοβολίας, γεγονός που εξαρτάται από την χημική τους σύσταση.

#### Έμμεσο φαινόμενο των αερολυμάτων ( Indirect aerosol effect )

Τα αερολύματα ενεργούν σαν πυρήνες συμπύκνωσης (cloud condensation nuclei: CCN) των υδρατμών και επομένως, καθορίζουν τη συγκέντρωση των υδροσταγονιδίων, επηρεάζουν τις βροχοπτώσεις και το χρόνο ζωής των θερμών νεφών.

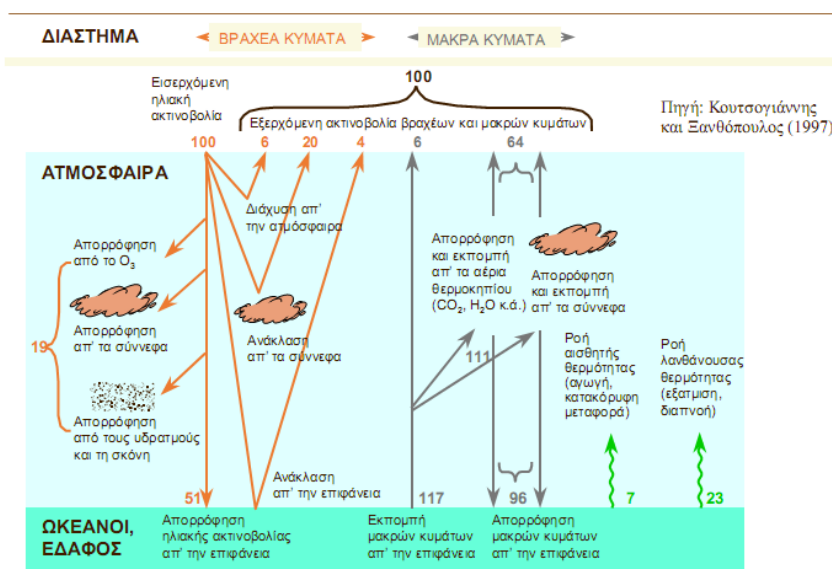
Περαιτέρω επέκταση του φαινομένου περιλαμβάνει και την επίδραση των σύννεφων στο παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο. Η μεγάλη αδιαφάνεια της ατμόσφαιρας λόγω



της ύπαρξης των σύννεφων αυξάνει το οπτικό βάθος της και κατά συνέπεια ενισχύει το φαινόμενο του θερμοκηπίου με αποτέλεσμα να αυξάνεται η θερμοκρασία της γης. Ωστόσο, οι ψυχροί θύσανοι ψύχουν τα κατώτερα επίπεδα της στρατόσφαιρας.

Τα σύννεφα καθημερινά καλύπτουν το 50% της γήινης επιφάνειας και αντιστοιχούν σχεδόν στο μισό του συνολικού albedo (λευκότητα) της γης. Οι στρωματοσφωρείτες πάνω από τη επιφάνεια των ωκεανών είναι εξαιρετικά σημαντικοί γιατί καλύπτουν μεγάλο μέρος της γήινης επιφάνειας και ανακλούν μεγάλο μέρος της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Ωστόσο δεν επιτρέπουν να διαφύγει η υπέρυθρη ακτινοβολία της γης. Επίσης η θερμοκρασία τους βρίσκεται συνήθως στην ίδια θερμοκρασία με την επιφάνεια από κάτω τους με αποτέλεσμα να μην επηρεάζουν το ποσοστό της γήινης ακτινοβολίας που διαφεύγει στο διάστημα. Σε αντίθεση με τα σύννεφα πάνω από τις ηπειρωτικές περιοχές που συνήθως βρίσκονται σε θερμοκρασίες μέχρι και  $100\text{ C}^0$  μικρότερες από την επιφάνεια που καλύπτουν και έτσι η εκπεμπόμενη υπέρυθρη γήινη ακτινοβολία μειώνεται σε μεγάλο βαθμό.

### ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΤΗΣ ΓΗΣ



Εικόνα 1.9 Ενεργειακό ισοζύγιο γης. (Παπαγιάννης, 2006)

Ειδικότερα μπορούμε να αναφερθούμε στους μηχανισμούς με τους οποίους επιδρούν τα αιωρούμενα σωματίδια στην ατμόσφαιρα:

#### Άμεσο φαινόμενο ψύξης ( Direct cooling effect )

Τα οργανικά σωματίδια ( Organic Carbon: OC) και αυτά που περιέχουν θειικά άλατα προκαλούν έντονη σκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας και επομένως τοπική ψύξη της ατμόσφαιρας.

### Άμεσο φαινόμενο θέρμανσης ( Direct warming effect )

Αντίθετα, τα σωματίδια που περιέχουν κυρίως αιθάλη και άλατα πυριτίου και σιδήρου (ερημική σκόνη) απορροφούν έντονα την ηλιακή και τη γήινη υπέρυθρη ακτινοβολία με αποτέλεσμα να προκαλούν τοπική θέρμανση της ατμόσφαιρας.

#### **1.6.3 Επιπτώσεις στον άνθρωπο και στην υγεία**

Ένας ενήλικας αναπνέει περίπου 10.000 lt αέρα την ημέρα, άρα η ποιότητα του αέρα που αναπνέουμε διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην υγεία και την ποιότητα της ζωής. Η κυριότερη πύλη εισόδου των αιωρούμενων σωματιδίων στον οργανισμό είναι το αναπνευστικό σύστημα (εισπνοή). Αναπόφευκτα λοιπόν οι πνεύμονες είναι το κύριο όργανο που συνδέει τον οργανισμό με το περιβάλλον και το πρώτο όργανο που δέχεται τις δυσμενείς επιδράσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Τα σωματίδια όσον αφορά την σχέση τους με την ανθρώπινη υγεία χωρίζονται σε 2 κατηγορίες ως προς το μέγεθός τους. Στα PM<sub>10</sub> (με ακτίνα έως 10μm) και στα PM<sub>2,5</sub> (με ακτίνα μικρότερη των 2.5μm). Σωματίδια και από τις δύο αυτές κατηγορίες είναι ικανά να εισέλθουν στον ανθρώπινο οργανισμό.

Δεκάδες έρευνες σε όλο τον κόσμο ενοχοποιούν τα μικροσωματίδια όχι μόνο για την αύξηση της θνησιμότητας αλλά και για σημαντικές μακροχρόνιες βλάβες στην υγεία. (<http://www.european-lung-foundation.org>)

Οι άνθρωποι που ζουν για πολλά έτη σε περιοχές που παρουσιάζουν υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων, έχουν συνδεθεί με διάφορα προβλήματα υγείας, όπως μειωμένη λειτουργία των πνευμόνων, ανάπτυξη χρόνιας βρογχίτιδας ή και ακόμη πρόωρο θάνατο. Υψηλές συγκεντρώσεις μικροσωματιδίων είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες για τα παιδιά, τους ηλικιωμένους και τα άτομα που πάσχουν από άσθμα ή καρδιολογικά προβλήματα. Επιπλέον, μπορούν να επιδεινώσουν ή να ενεργοποιήσουν αναπνευστικές παθήσεις ή και να αυξήσουν το κίνδυνο της καρδιακής ανακοπής.

Κίνδυνος ελλοχεύει και για την κυοφορούσα γυναίκα, μιας και στο έμβρυο προκαλούνται βλάβες που δεν γίνονται άμεσα αντιληπτές. Υπάρχουν έρευνες που αποδεικνύουν πως η μακροχρόνια έκθεση σε περιβάλλον με μεγάλες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων είναι ικανή να αφήσει αποτυπώματα στο γενετικό υλικό του ανθρώπου και να επιβαρύνει το ανοσοποιητικό σύστημα δημιουργώντας τις προϋποθέσεις να δημιουργηθούν κι άλλοι νόσοι στον άνθρωπο όπως ο καρκίνος.

#### **1.6.4 Άλλες επιπτώσεις**

Επιπλέον τα σωματίδια είναι ικανά να επηρεάσουν και τα υλικά τα οποία βρίσκονται εκτεθειμένα σε αυτά. Οι επιδράσεις αυτές εντοπίζονται κυρίως στη καταστροφή χρωμάτων με τα οποία έχουν επικαλυφθεί διάφορες επιφάνειες όπως κτισμάτων και αυτοκινήτων. Άλλη σημαντική επίδραση είναι η εξάλειψη λεπτομερειών από μνημεία που βρίσκονται σε ανοιχτούς χώρους (π.χ. η ακρόπολη). Αυτό συμβαίνει και εξ' αιτίας της εναπόθεσης αιωρούμενων σωματιδίων στα μνημεία

αλλά κυρίως λόγω της πρόσκρουσης πάνω στα μνημεία ταχύτατα κινουμένων σωματιδίων που παρασύρονται από ισχυρούς ανέμους. Επίσης η επίδραση θεϊκών ενώσεων οι οποίες επικάθονται είτε λόγω βάρους είτε συμπαρασυρόμενες από το νερό της βροχής δημιουργούν όξινο περιβάλλον (όξινη βροχή) που έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη φθορά οικοδομικών κυρίως κατασκευών και μαρμάρινων μνημείων.

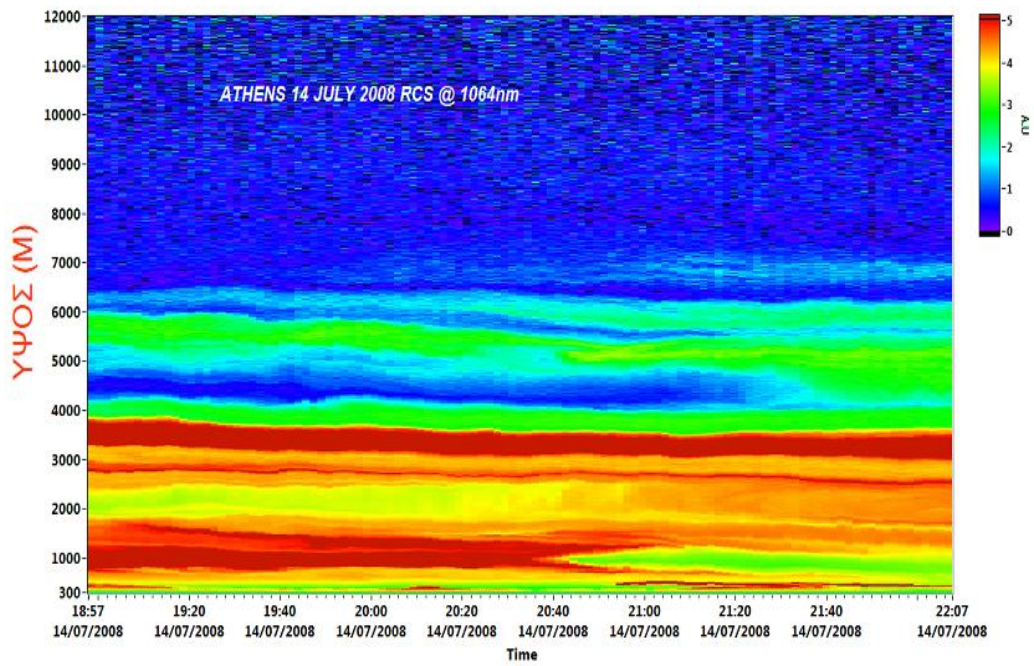
Επίσης η όξινη βροχή μπορεί να καταστρέψει τεράστιες εκτάσεις με φυτική ζωή. Ακόμα η επικάθιση σωματιδίων στα φύλλα των φυτών προκαλεί απόφραξη των στομάτων τους οπότε δυσχεραίνεται η διαδικασία της αναπνοής και ακολούθως η σωστή ανάπτυξη του φυτού.

Άλλη μία ιδιότητα των αιωρούμενων σωματιδίων είναι να απορροφούν και να διαχέουν την ορατή ακτινοβολία περιορίζοντας σημαντικά την ορατότητα της ατμόσφαιρας και συμβάλλοντας αρνητικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Πολλές φορές τα επίπεδα ορατότητας μπορεί αν είναι τόσο χαμηλά ώστε δημιουργούν σημαντικά προβλήματα στην οδική κυκλοφορία και καθιστούν αδύνατη την προσέγγιση ή την απογείωση αεροπλάνων προς και από τα αεροδρόμια.



# Κεφάλαιο 2

## Η ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ LIDAR





## 2.1 Εισαγωγή

Το lidar είναι ακρωνύμιο του όρου «light detection and ranging» και εφαρμόστηκε αρχικά το 1963 από τους Fiocco και Smullin για την ανίχνευση στρωματώσεων αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Έκτοτε η ραγδαία ανάπτυξη στην τεχνολογία των laser οδήγησε στην υλοποίηση σύγχρονων πειραματικών διατάξεων οι οποίες βασίζόμενες στην αλληλεπίδραση του φωτός που εκπέμπεται από μια πηγή laser με τα διάφορα συστατικά της ατμόσφαιρας συλλέγουν πληθώρα πληροφοριών για την σύσταση της ατμόσφαιρας με μεγάλη χωρική και χρονική ακρίβεια. Η τεχνική lidar χρησιμοποιείται για να μελετήσει την ύπαρξη των αιωρούμενων σωματιδίων στην τροπόσφαιρα, στρατόσφαιρα και μεσόσφαιρα, καθώς και το θερμοκρασιακό προφίλ της καθαρής ατμόσφαιρας (για ύψη μεγαλύτερα από 30 km από την επιφάνεια της γης). Τα lidar αποπόλωσης μπορούν να καθορίσουν την φάση στην οποία βρίσκονται τα σύννεφα στη τροπόσφαιρα και την στρατόσφαιρα( υγρή –στερεά).

Γενικά με τη μέθοδο lidar επιτυγχάνουμε:

- Την παρακολούθηση της παραγωγής και της εξελικτικής πορείας διαφόρων ρύπων στην ατμόσφαιρα. Δηλαδή την χωρική και την χρονική εξέλιξη διαφόρων φαινομένων όπου εμπλέκονται τα αιωρούμενα σωματίδια,
- την ανίχνευση και την μέτρηση της συγκέντρωσης διαφόρων ρύπων ιδιαίτερα εκείνων που είναι επικίνδυνοι, που στην περίπτωσή τους επιβάλλεται η μη-επαφή του παρατηρητή με το περιβάλλον τους,
- την παρακολούθηση φαινομένων και μεγεθών στην ατμόσφαιρα και την δυναμική τους συμπεριφορά (χρονική εξέλιξη) με σκοπό την συγκέντρωση στοιχείων που θα οδηγήσουν στην ανάπτυξη εξελιγμένων μοντέλων μετεωρολογικής πρόβλεψης,
- την παρακολούθηση ρύπων σε σημεία και θέσεις με μεγάλη δυσχέρεια ή μη-δυνατότητα πρόσβασης για την εφαρμογή άλλων μεθόδων μέτρησης.

Επιτυγχάνουμε λοιπόν την τρισδιάστατη χωροταξική παρακολούθηση της κατανομής των ρύπων και μάλιστα με τρόπο που δεν επιφέρει την διατάραξη του δείγματος που μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένες μετρήσεις.

## 2.2 Αρχή λειτουργίας και πειραματική διάταξη ενός συστήματος lidar

Η αρχή λειτουργίας μίας διάταξης lidar συνίσταται στην εκπομπή και διάδοση ενός παλμού laser στην ατμόσφαιρα, την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με τα συστατικά της ατμόσφαιρας και την ανίχνευση ενός μέρους της ακτινοβολίας που επιστρέφει από ένα κατάλληλο ανιχνευτικό σύστημα. Με την επεξεργασία του ανιχνεύσιμου σήματος lidar, συγκεντρώνονται πληροφορίες για το είδος του στόχου, τη σύστασή του, την απόσταση του από το σημείο εκπομπής των παλμών laser, καθώς και την κατανομή του στο χώρο.

Ένα σύστημα lidar συνεπώς αποτελείται από:

- (1) μια ισχυρή παλμική πηγή laser, με κύρια χαρακτηριστικά της να είναι η μεγάλη ισχύ κορυφής, στενό εύρος ζώνης και μικρή απόκλιση δέσμης,
- (2) ένα οπτικό σύστημα ανίχνευσης της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας που περιλαμβάνει το τηλεσκόπιο και το ανιχνευτικό μέρος της διάταξης (φωτοπολλαπλασιαστές), και μετατροπής της σε ηλεκτρικό σήμα και
- (3) ένα σύστημα καταγραφής που καταγράφει και ψηφιοποιεί το ηλεκτρικό σήμα σαν συνάρτηση του χρόνου (ή, ισοδύναμα, σαν συνάρτηση της απόστασης από το σημείο εκπομπής των παλμών laser).

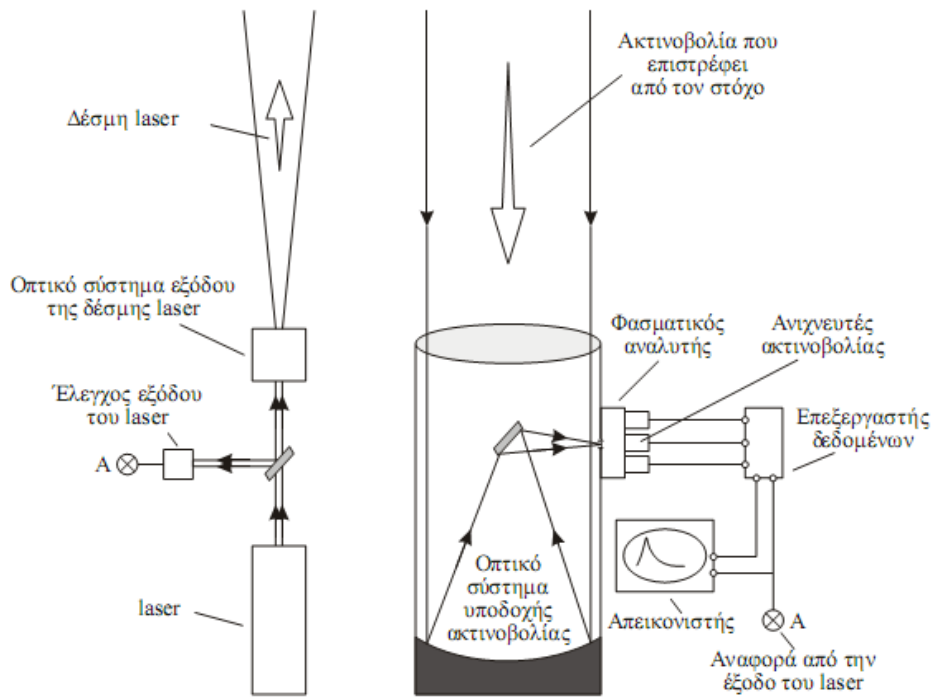
Ο πομπός είναι ένα ισχυρό παλμικό laser με παλμούς πλάτους από μερικά nanosecond έως μερικές εκατοντάδες nanosecond. Πολλά συστήματα εφαρμόζουν ένα διαστολέα δέσμης (beam expander) μετά την έξοδο της δέσμης από το laser για να μειώσουν την απόκλιση της, πριν αυτή αρχίσει να διαδίδεται στην ατμόσφαιρα. Ένα τηλεσκόπιο ανιχνεύει τα φωτόνια που οπισθοσκεδαζονται από την ατμόσφαιρα και η συλλεγόμενη ακτινοβολία οδηγείται σε ένα ανιχνευτή όπου το ανιχνευόμενο οπτικό σήμα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα.

Το μήκος κύματος που εκπέμπει ένα lidar εξαρτάται από τον λόγο εφαρμογής του και εκτείνεται από 250nm έως 11μm. Τα τελευταία χρόνια τα Nd:YAG laser είναι ευρέως διαδεδομένα στα συστήματα lidar, όπως και η χρήση των διεγερμένων διμερών που εκπέμπουν στη περιοχή του υπεριώδους. Το Nd:YAG εκπέμπει στα 1064nm και εκμεταλλευόμαστε την 1<sup>η</sup> και 2<sup>η</sup> αρμονική του στα 532nm και 355nm, αντίστοιχα.

Το οπτικό πεδίο του συλλέγοντος τηλεσκοπίου μπορεί να επιλεγεί να είναι τόσο μικρό όσο μερικές εκατοντάδες μrad. Αυτό έχει μερικά πλεονεκτήματα με κυριότερο το γεγονός ότι το φως του υποβάθρου που ανιχνεύεται από το τηλεσκόπιο μειώνεται σημαντικά. Επιπλέον ανιχνεύονται λιγότερα φωτόνια τα οποία καταλήγουν στο τηλεσκόπιο μετά από πολλαπλές σκεδάσεις. Ανάλογα όμως με το σκοπό του lidar η διάμετρος του τηλεσκοπίου μπορεί να είναι από 0.1 έως μερικά μέτρα.

Η γεωμετρική διάταξη του lidar καθορίζει την απόσταση που απαιτείται να κάνει η δέσμη ώστε να έχουμε πλήρη επικάλυψη. Σε μερικές αποστάσεις τα οπισθοσκεδαζόμενα φωτόνια δεν μπορούν να ανιχνευθούν σε όλο το σύνολό τους, για αυτό και μόνο ένα μέρος του ενεργού λαμβανόμενου σήματος μπορεί να μετρηθεί. Η απόσταση που απαιτείται για πλήρη επικάλυψη εξαρτάται από την διάμετρο της δέσμης laser, το σχήμα της, την απόκλιση της, τις οπτικές ιδιότητες του τηλεσκοπίου και από την γεωμετρία του συστήματος.





**Εικόνα 2.1** Διάταξη συστήματος lidar (Weitkamp, 2005)

Οι μετρήσεις lidar μπορούν να πραγματοποιηθούν από επίγεια συστήματα, ή φορητά συστήματα εγκατεστημένα σε πλοία, αεροπλάνα ή μεγάλα οχήματα, και μπορούν να αφορούν μετρήσεις στην ατμόσφαιρα, τη θάλασσα, ή και την ξηρά. Το είδος των μετρήσεων είναι ευρύτατο και μπορεί να αφορά μετρήσεις της συγκέντρωσης διαφόρων συστατικών της ατμόσφαιρας, όπως είναι οι ατμοσφαιρικοί ρύποι ( $O_3$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $Hg$ ,  $VOCs$ ,  $HCs$ , κ.λ.π.) και τα αιωρούμενα σωματίδια (αερολύματα). Είναι επίσης δυνατή η μέτρηση κατακόρυφων κατανομών διάφορων ατμοσφαιρικών παραμέτρων όπως η ατμοσφαιρική πυκνότητα, η θερμοκρασία, ο άνεμος, η συγκέντρωση των υδρατμών και η σχετική υγρασία.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές τηλεπισκόπησης lidar για την τηλεπισκόπηση 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, στη διαφορική σκέδαση/απορρόφηση, όπως και στην αποπόλωση που μπορεί να υποστεί η δέσμη laser από τα μόρια και τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας. Ανάλογα με το φυσικό μηχανισμό που χρησιμοποιείται για να πραγματοποιηθεί μία μέτρηση, τα συστήματα lidar είναι δυνατόν να καταταχθούν σε επιμέρους κατηγορίες τις οποίες περιγράφουμε συνοπτικά στην επόμενη παράγραφο.

## 2.3 Τεχνικές τηλεπισκόπησης lidar

Η αναγκαιότητα μελέτης της ατμόσφαιρας συνέβαλλε τόσο στην εξέλιξη του συστήματος lidar όσο και στην ανάπτυξη διαφόρων τεχνικών lidar για τη τηλεπισκόπηση διαφόρων ατμοσφαιρικών παραμέτρων. Αυτές οι τεχνικές βασίζονται στις διάφορες αλληλεπιδράσεις της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας και των διαφόρων συστατικών της ατμόσφαιρας.

### Lidar Οπισθοσκέδασης (elastic-backscatter lidar)

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 0.1-1J/παλμό. Το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας εξαρτάται από το είδος των ρυπαντών ή των ατμοσφαιρικών συστατικών που θέλουμε να ανιχνεύσουμε και κυμαίνεται από το υπεριώδες (0.26 μm) έως το μέσο υπέρυθρο (12 μm). Ορισμένα συστήματα lidar απαιτούν όχι σταθερό, αλλά μεταβλητό μήκος κύματος, για την πραγματοποίηση μετρήσεων σε διαφορετικά μήκη κύματος (διαφορικής απορρόφησης) 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 απαιτεί ακτινοβολία laser υψηλής μονοχρωματικότητας και κατά συνέπεια εξασφαλίζεται 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 (πχ. 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.

### Lidar Φθορισμού (fluorescence lidar)

Η δομή και ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος αυτού δεν έχει ουσιαστικές διαφορές με το βασικό σύστημα που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο μέρος. Τα μόρια του ατμοσφαιρικού στόχου απορροφούν την ακτινοβολία laser, διεγείρονται και στη συνέχεια αποδίδουν την ενέργεια που προσέλαβαν ως οπτική ακτινοβολία σε διάφορα μήκη κύματος κατά κανόνα μεγαλύτερα από το μήκος κύματος του laser μέσω της διαδικασίας του ατμοσφαιρικού φθορισμού. Το φάσμα φθορισμού είναι διαφορετικό για κάθε μόριο και αποτελεί την "ταυτότητα" του. Με προσεκτική ανάλυση του φάσματος αυτού μπορούμε να συνάγουμε συμπεράσματα για το είδος των μορίων.

### Lidar Raman

Το Raman lidar στηρίζεται στην μη ελαστική σκέδαση από τα συστατικά της ατμόσφαιρας λόγω των ενεργειών περιστροφής και δόνησης των μορίων. Συνεπώς η αλλαγή στο μήκος κύματος της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας οφείλεται στην ενεργειακή διαφορά της αρχικής και τελικής κατάστασης του συμμετέχοντος μορίου-σκεδαστή και είναι χαρακτηριστική για κάθε μόριο. Η φασματική αυτή μετατόπιση χαρακτηρίζει το είδος των αλληλεπιδρώντων μορίων και η ένταση της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας τη συγκέντρωση τους επειδή το πλήθος των ενεργειακών καταστάσεων ακολουθούν το νόμο του Boltzmann η κατανομή της έντασης μέσα στις ζώνες Raman περιέχει πληροφορίες για την θερμοκρασία όλου του όγκου των σκεδαστών που μετράμε. Συνεπώς μπορούμε να πάρουμε μια κατανομή της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας. Η μέθοδος αυτή απαιτεί συστήματα laser μεγαλύτερης ισχύος σε σύγκριση με το lidar φθορισμού, γιατί το οπτικό σήμα που επιστρέφει είναι εξαιρετικά ασθενές, λόγω της μικρής ενεργούς διατομής της σκέδασης Raman (περίπου τρεις τάξεις μεγέθους ασθενέστερη από την σκέδαση Rayleigh).

### Lidar Doppler

Το σύστημα αυτό μετρά τη σκεδαζόμενη ακτινοβολία του laser από ατμοσφαιρικά μόρια, αλλά το ενδιαφέρον στην περίπτωση αυτή επικεντρώνεται στη μετατόπιση του μήκους κύματος λόγω του φαινομένου Doppler. Η εκπεμπόμενη δέσμη laser που σκεδάζεται από τα κινούμενα μόρια, υφίσταται μία μετατόπιση συχνότητας που εξαρτάται από την ταχύτητα κίνησης των μορίων της ατμόσφαιρας. Μετρώντας τη μετατόπιση αυτή μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για τη διεύθυνση και το μέτρο της ταχύτητας κίνησης των μορίων της ατμόσφαιρας. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για την μελέτη της κίνησης των αερίων μαζών στην ατμόσφαιρα, καθώς και για μετρήσεις που αφορούν την ταχύτητα και τη φορά του ανέμου σε τοπική κλίμακα (π.χ. σε αεροδρόμια).

### Lidar απορρόφησης (absorption lidar)

Το σύστημα αυτό διαφέρει από τα άλλα στο ότι το μετρούμενο μέγεθος είναι η ένταση της ακτινοβολίας που επιστρέφει και όχι το μήκος κύματος της. Πιο συγκεκριμένα μετράται η εξασθένηση της δέσμης του laser κατά τη διάδοσή της στην ατμόσφαιρα και εξάγονται συμπεράσματα για τις συγκεντρώσεις των διαφόρων ρυπαντών που υπάρχουν σ' αυτήν. Δεδομένου ότι ακτινοβολία ορισμένου μήκους κύματος μπορεί να απορροφάται ισχυρά από έναν μοριακό ρυπαντή και λιγότερο ή καθόλου από έναν άλλο, η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο να μετρηθεί με μεγάλη ακρίβεια η ύπαρξη ενός ρυπαντή στην ατμόσφαιρα. Μια άλλη διαφοροποίηση του συστήματος αυτού είναι ότι το laser εκπομπής και ο δέκτης βρίσκονται ξεχωριστά τοποθετημένα σε δύο διαφορετικούς σταθμούς, αλλά είναι οπτικά ευθυγραμμισμένα μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να καταγράφεται η μέση συγκέντρωση ενός ρυπαντή που αντιστοιχεί σε όλη την οπτική διαδρομή.

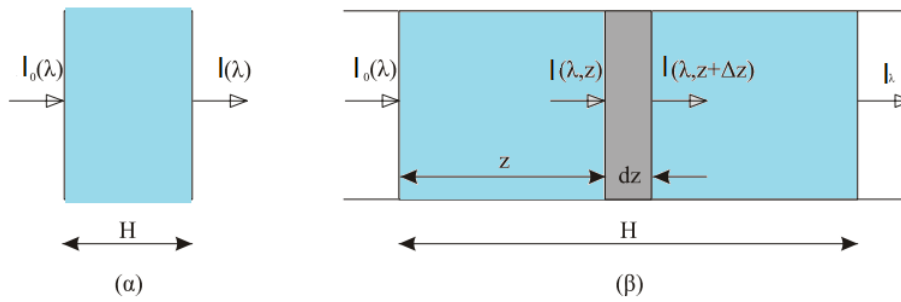
### Lidar Διαφορικής Απορρόφησης (differential-absorption lidar or DIAL)

Το σύστημα αυτό εκμεταλλεύεται τη μεταβολή του συντελεστή απορρόφησης ενός μορίου ανάλογα με το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Χρησιμοποιούνται δύο δέσμες laser με μήκη κύματος που διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ τους (πχ. μερικά nm), οι οποίες εκπέμπονται διαδοχικά ή ταυτόχρονα και διατρέχουν την ίδια οπτική διαδρομή μέσα στην ατμόσφαιρα. Η ενεργός διατομή σκέδασης της ακτινοβολίας laser από κάποιο μόριο είναι παρόμοια και για τις δύο δέσμες, αφού τα μήκη κύματος διαφέρουν μεταξύ τους ελάχιστα, αλλά ο συντελεστής (ή η ενεργός διατομή) απορρόφησης μπορεί να αλλάζει δραματικά για τις δύο αυτές δέσμες. Συγκρίνοντας τα οπισθοσκεδαζόμενα σήματα lidar μπορούν να εξαχθούν πληροφορίες για το είδος και τη συγκέντρωση των μοριακών ρυπαντών της ατμόσφαιρας.

## **2.4 Διάδοση μονοχρωματικής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εξασθενεί κατά την διάδοσή της στην ατμόσφαιρα, λόγω απορρόφησης και σκέδασης της από τα μόρια και τα αιωρούμενα σωματίδια. Στις εφαρμογές lidar χρησιμοποιούνται πηγές laser που εκπέμπουν παλμούς με πολύ στενό εύρος μήκους κύματος (της τάξης των  $10^{-1}$  έως  $10^{-3}$  nm). Έτσι, στις εφαρμογές lidar μπορούμε να θεωρήσουμε ότι έχουμε την εκπομπή και διάδοση μονοχρωματικής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα.

Στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 2.2), συνοψίζεται η διάδοση του φωτός από ένα ατμοσφαιρικό στρώμα που έχει την ιδιότητα να σκεδάζει ή/και να απορροφά την διερχόμενη ακτινοβολία (νόμος Beer-Lambert):



**Εικόνα 2.2** Διάδοση μονοχρωματικής ακτινοβολίας σε ένα ατμοσφαιρικό στρώμα.

Θεωρούμε μονοχρωματική ακτινοβολία μήκους κύματος  $\lambda$  που προσπίπτει και διαδίδεται κάθετα σε ένα ομοιόμορφο ατμοσφαιρικό στρώμα γεωμετρικού πάχους  $H$ . Η ισχύς της εισερχόμενης ακτινοβολίας είναι  $I_0(\lambda)$ . Θεωρούμε ότι η ισχύς της εξερχόμενης ακτινοβολίας είναι ίση με  $I(\lambda)$  όταν αυτή διαπεράσει το ατμοσφαιρικό στρώμα. Λόγω της εξασθένησης που θα υποστεί η ακτινοβολία αυτή, θα ισχύει:  $I(\lambda) < I_0(\lambda)$ . Το ποσοστό της ενέργειας ακτινοβολίας που διαπερνά το ατμοσφαιρικό στρώμα εκφράζεται από την διαπερατότητα  $T$  του στρώματος, που ορίζεται από την σχέση:

$$T = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} \quad (2.1)$$

Η διαπερατότητα ενός στρώματος θα είναι ίση με μηδέν για την περίπτωση που μια ακτινοβολία δεν διαπεράσει το στρώμα αυτό, ενώ θα είναι ίση με την μονάδα όταν δεν λαμβάνει χώρα καμία διεργασία σκέδασης ή απορρόφησης της ακτινοβολίας μέσα στο στρώμα. Η διαπερατότητα ενός οπτικού μέσου για μία μονοχρωματική ακτινοβολία είναι μία ιδιότητα του ίδιου του μέσου για το συγκεκριμένο μήκος κύματος. Για να εκφράσουμε τη διαπερατότητα ενός ατμοσφαιρικού στρώματος που παρουσιάζει διαφορετικές ιδιότητες σκέδασης και απορρόφησης κατά τον οπτικό δρόμο που διανύει η μονοχρωματική ακτινοβολία μέσα σε αυτό, θεωρούμε ένα στοιχειώδες τμήμα του ατμοσφαιρικού στρώματος, πάχους  $dz$ , σε θέση που απέχει απόσταση  $z$  από την αρχή του στρώματος αυτού (Εικόνα 2.2 (β)). Θεωρούμε ότι σε αυτό το στοιχειώδες τμήμα του στρώματος, οι ιδιότητες της σκέδασης ή/και της απορρόφησης του μέσου παραμένουν σταθερές, δηλαδή ότι το μέσον είναι ομοιογενές. Αν  $I(\lambda, z)$  είναι η ισχύς της εισερχόμενης ακτινοβολίας στο στοιχειώδες ατμοσφαιρικό στρώμα, τότε η μείωση της ισχύος της ακτινοβολίας σε αυτό, θα δίδεται από την σχέση :

$$dI(\lambda, z) = -a(\lambda, z)I(\lambda, z)dz \quad (2.2)$$

Ως  $a(\lambda, z)$ , ορίζεται ο συντελεστής εξασθένησης του μέσου (σε  $\text{cm}^{-1}$ ) στο μήκος κύματος  $\lambda$  και στη θέση  $z$ , και εκφράζει την πιθανότητα ανά μονάδα οπτικής διαδρομής, να αφαιρεθεί ένα φωτόνιο από την αρχική ακτινοβολία λόγω σκέδασης ή απορρόφησης από το οπτικό μέσο. Διαιρώντας τα δύο μέλη της εξίσωσης (2.2) με

$I(\lambda, z)$  και ολοκληρώνοντας από 0 έως  $H$  για όλο το ατμοσφαιρικό στρώμα, καταλήγουμε στην εξίσωση (2.3):

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) e^{-\int_0^H a(\lambda, z) dz} \quad (2.3)$$

Η εξίσωση (2.3) είναι γνωστή στη βιβλιογραφία ως ο νόμος των Beer-Lambert, ο οποίος περιγράφει την ολική εξασθένηση μονοχρωματικής ακτινοβολίας από ένα ετερογενές οπτικό μέσο. Έτσι, η διαπερατότητα ενός ατμοσφαιρικού στρώματος πάχους  $H$  για μονοχρωματική ακτινοβολία μήκους κύματος  $\lambda$ , μπορεί σύμφωνα με τον νόμο των Beer-Lambert να γραφεί:

$$T(\lambda, H) = e^{-\int_0^H a(\lambda, z) dz} \quad (2.4)$$

## 2.5 Βασική εξίσωση lidar

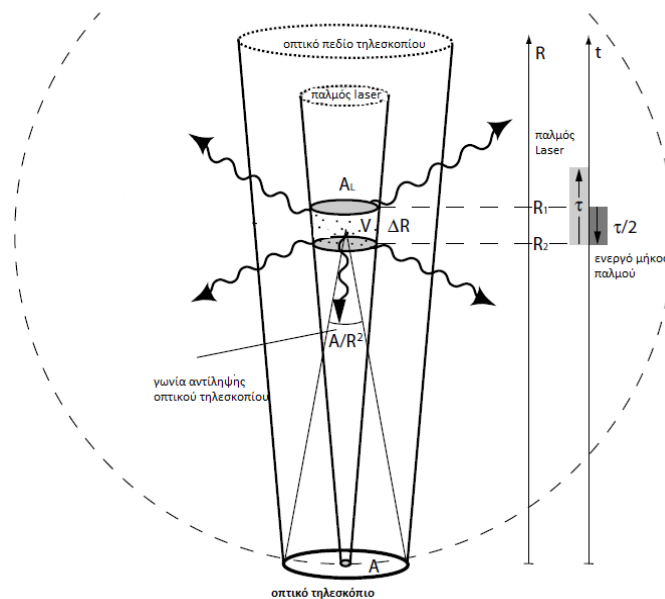
Η βασική εξίσωση lidar στην πιο απλή της μορφή είναι η (Weitkamp, 2005):

$$P(R) = KG(R)\beta(R)T(R) \quad (2.5)$$

όπου  $P$  είναι η λαμβανόμενη ισχύς από απόσταση  $R$ . Οι παράγοντες  $K$  και  $G(R)$  εξαρτώνται κάθε φορά καθαρά από την γεωμετρία του συστήματος και για αυτό μπορούν να προσδιοριστούν. Ο όρος  $\beta(R)$  είναι ο συντελεστής οπισθοσκέδασης και  $T(R)$  είναι η διαπερατότητα της ατμόσφαιρας. Αναλύοντας επιπλέον μπορούμε να γράψουμε την σταθερά του συστήματος lidar ως εξής:

$$K = P_o \frac{c\tau}{2} A \eta_{(\lambda)} \quad (2.6)$$

όπου  $P_o$  και  $\tau$  είναι η μέση ισχύς και η διάρκεια του παλμού laser αντίστοιχα. Συνεπώς  $E_o = P_o \tau$  θα είναι η ενέργεια ενός παλμού του laser. Ο παράγοντας  $\frac{1}{2}$  εμφανίζεται λόγω της εμφανούς αναδίπλωσης του παλμού του laser λόγω της οπισθοσκέδασης. Κατά συνέπεια όπως θα γίνει φανερό παρακάτω  $\frac{c\tau}{2}$  είναι η χωρική ακρίβεια μέτρησης του συστήματος lidar.  $A$  είναι η επιφάνεια συλλογής της ακτινοβολίας laser που ορίζεται ως  $A = \pi(r_m^2 - r_s^2)$ , όπου,  $r_m$  και  $r_s$  είναι οι γεωμετρικές ακτίνες του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος κατόπτρου του τηλεσκοπίου αντίστοιχα, ενώ  $\eta_{(\lambda)}$  είναι ο συντελεστής οπτοηλεκτρονικής απόδοσης του συστήματος lidar.



**Εικόνα 2.3** Απεικόνιση γεωμετρίας ενός ομοαξονικού συστήματος lidar. (Weitkamp, 2005)

Σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή  $t$  η αρχή του μετώπου του παλμού οπισθοσκεδάζεται από απόσταση  $R_1 = \frac{ct}{2}$  ενώ την ίδια στιγμή μετράμε το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα από το τελευταίο μέτωπο του παλμού που σκεδάζεται από απόσταση  $R_2 = \frac{c(t-\tau)}{2}$  έτσι ο όγκος της ατμόσφαιρας που σκεδάζει το λαμβανόμενο σήμα έχει μήκος :

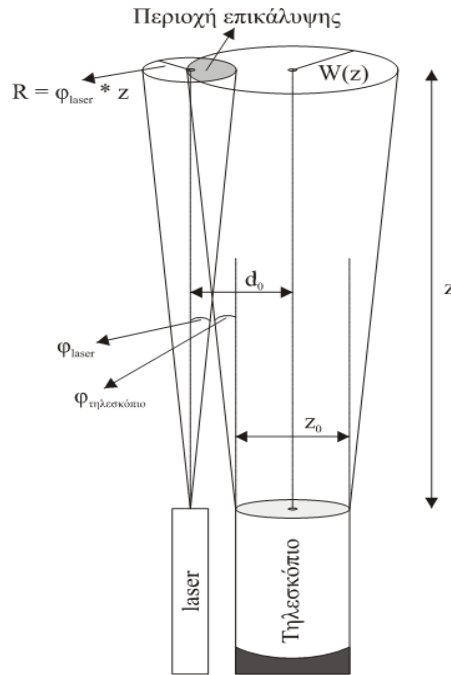
$$\Delta R = R_1 - R_2 = \frac{ct}{2} - \frac{ct}{2} + \frac{c\tau}{2} = \frac{c\tau}{2} \quad (2.7)$$

και ονομάζεται ενεργό μήκος του παλμού που είναι και η χωρική ακρίβεια μέτρησης της τεχνικής.

Ο γεωμετρικός συντελεστής ή συντελεστής αλληλοεπικάλυψης  $G(R)$  αντιπροσωπεύει την πιθανότητα ανίχνευσης ακτινοβολίας από κάποια απόσταση  $R$  και εξαρτάται αποκλειστικά από γεωμετρικούς παραμέτρους του συστήματος lidar και περιλαμβάνει την συνάρτηση επικάλυψης  $O(R)$ . Ισχύει μάλιστα:

$$G(R) = \frac{O(R)}{R^2} \quad (2.8)$$

Η ελλειψής επικάλυψη μεταξύ της δέσμης και του οπτικού πεδίου του δέκτη έχει σημαντικές επιπτώσεις στις μετρήσεις lidar, κυρίως στις κοντινές αποστάσεις (τυπικά στις πρώτες εκατοντάδες μέτρα). Για μια ορθή ανάλυση και ερμηνεία των δεδομένων lidar που έχουν συλλεχθεί από την περιοχή μη πλήρης επικάλυψης, είναι απαραίτητο να γίνουν γεωμετρικές εκτιμήσεις και διορθώσεις των λαμβανόμενων σημάτων lidar.



**Εικόνα 2.4** Επικάλυψη δέσμης laser με το οπτικό πεδίο του τηλεσκοπίου για ένα διαξονικό σύστημα lidar. (Weitkamp, 2005)

Σε συνήθεις συνθήκες μετρήσεων lidar, οι πληροφορίες που χρειάζονται για τον αναλυτικό προσδιορισμό της συνάρτησης επικάλυψης δεν είναι γνωστές. Μεγάλη αβεβαιότητα στις αναλυτικές μεθόδους εισάγει η γωνία  $\theta$  μεταξύ της διεύθυνσης διάδοσης της δέσμης του laser και της διεύθυνσης παρατήρησης του τηλεσκοπίου. Η γωνία  $\theta$  για ένα καλά ευθυγραμμισμένο σύστημα lidar θα πρέπει να είναι μηδέν, συνθήκη που δεν ισχύει σε όλες των περιπτώσεων ευθυγράμμισης. Είναι επίσης πιθανό η γωνία  $\theta$  να μεταβάλλεται και κατά την διάρκεια μιας μέτρησης λόγω σταδιακής απευθυγράμμισης του συστήματος. Μεγάλη αβεβαιότητα, επίσης, εισάγεται και από την κατανομή της ενέργειας της δέσμης του laser, η οποία για την εξαγωγή αναλυτικών εξισώσεων υπολογισμού πρέπει να είναι γνωστή.

Αν θεωρήσουμε την ομοιόμορφη σκέδαση από την ατμόσφαιρα το τηλεσκόπιο θα συλλέξει ακτινοβολία έντασης  $I_c$ . Και εάν η συνολική προσπίπτουσα ακτινοβολία έχει ένταση  $I_s$  τότε θα ισχύει :

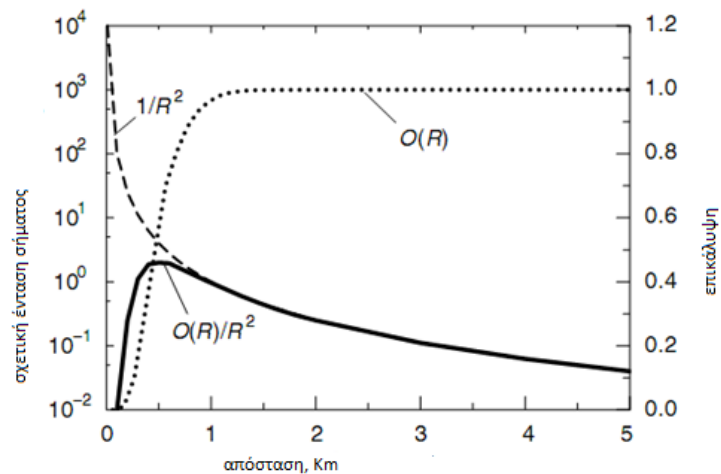
$$\frac{I_c}{I_s} = \frac{A}{4\pi R^2} \quad (2.9)$$

Ονομάζουμε τον λόγο  $\frac{A}{R^2}$  ως γωνία λήψης (perception angle) του τηλεσκοπίου.

Εν συνεχεία η συνάρτηση επικάλυψης  $O(R)$  είναι η συνάρτηση που μας δίνει το ποσοστό ακτινοβολίας που έχει εισέλθει στο οπτικό πεδίο του τηλεσκοπίου και είναι



ίση με τη μονάδα στην περιοχή πλήρους επικάλυψης. Έτσι σε μία τυπική διάταξη lidar η  $O(R)$  μπορεί να έχει τη μορφή που παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.5.



**Εικόνα 2.5** Συνάρτηση σχετικής έντασης σήματος σε σχέση με την απόσταση. (Weitkamp, 2005)

Ο συντελεστής οπισθοσκέδασης  $\beta(R, \lambda)$  είναι ο πρωταρχικός παράγοντας που καθορίζει την ένταση του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος. Αν ορίσουμε  $N_j$  τη συγκέντρωση των σκεδαστών τύπου  $j$  και  $\frac{d\sigma_{j,sca}(\pi, \lambda)}{d\Omega}$  την διαφορική ενεργό διατομή οπισθοσκέδασης στο μήκος κύματος  $\lambda$ , τότε ο συντελεστής οπισθοσκέδασης μπορεί να γραφεί:

$$\beta(R, \lambda) = \sum_j N_j(R) \frac{d\sigma_{j,sca}(\pi, \lambda)}{d\Omega} \quad (2.10),$$

αθροίζοντας όλους τους τύπους σκεδαστών. Αφού η αριθμητική πυκνότητα δίνεται σε μονάδες  $m^{-3}$  και η ενεργός διατομή σε  $m^2 sr^{-1}$  ο συντελεστής οπισθοσκέδασης θα έχει μονάδα μέτρησης τα  $m^{-1} sr^{-1}$ .

Εάν θεωρήσουμε πως συμβαίνει σκέδαση ισοτροπικά και έχουμε μόνο ένα τύπο σκεδαστών τότε η σχέση μεταξύ του συντελεστή οπισθοσκέδασης και την ενεργούς διατομής θα είναι  $4\pi\beta = N\sigma_{sca}$ . Έστω  $A_L$  είναι η ενεργός διατομή του παλμού laser σε όγκο  $V = A_L \Delta R = A_L \frac{c\tau}{2}$  και  $A_s$  η ενεργός διατομή σκέδασης όλων των σκεδαστών στον όγκο αυτό (Εικόνα 2.3). Τότε θα ισχύει  $A_s = N\sigma_{sca} V$ .

Έτσι έχουμε :

$$\frac{I_s}{I_0} = \frac{A_s}{A_L} = \frac{N\sigma_{sca} V}{\frac{2V}{c\tau}} = \frac{N\sigma_{sca} c\tau}{2} = \frac{4\pi\beta c\tau}{2} \quad (2.11)$$

Άρα ο λόγος της έντασης της συλλεγόμενης και της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από τις (2.9) και (2.11) θα είναι :

$$\frac{I_c}{I_0} = \frac{A\beta c\tau}{2R^2} \quad (2.12)$$

Στην ατμόσφαιρα η σκέδαση προκαλείται από αιωρούμενα σωματίδια (aer) και από την μοριακή ατμόσφαιρα (mol). Έτσι γράφουμε τον συντελεστή οπισθοσκέδασης με την παρακάτω μορφή:

$$\beta(R, \lambda) = \beta_{mol}(R, \lambda) + \beta_{aer}(R, \lambda) \quad (2.13)$$

Όπου με  $\beta_{mol}$  και  $\beta_{aer}$  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 έντονα 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:

$$T(R, \lambda) = e^{-2 \int_0^R a(r, \lambda) dr} \quad (2.14)$$

όπου  $a(r, \lambda)$  είναι ο συντελεστής εξασθένησης, ο οποίος ορίζεται όπως και ο συντελεστής οπισθοσκέδασης:

$$\alpha(R, \lambda) = \sum_j N_j(R) \sigma_{j,ext}(\lambda) \quad (2.15)$$

Ο παράγοντας 2 υπάρχει όπως έχει προαναφερθεί λόγω της διπλής διαδρομής του σήματος laser. Η εξασθένηση οφείλεται λόγω της σκέδασης και της απορρόφησης της ακτινοβολίας από τα μόρια και τα αιωρούμενα σωματίδια που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα.

Έτσι με όπως και πριν ορίζουμε τον συντελεστή εξασθένησης με τη παρακάτω μορφή:

$$\begin{aligned} a(R, \lambda) = & a_{mol,sca}(R, \lambda) + a_{mol,abs}(R, \lambda) \\ & + \alpha_{aer,sca}(R, \lambda) + \alpha_{aer,abs}(R, \lambda) \end{aligned} \quad (2.16)$$

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 :

$$\sigma_{ext}(\lambda) = \sigma_{sca}(\lambda) + \sigma_{abs}(\lambda) \quad (2.17)$$

Τελικά, η εξίσωση lidar μπορεί τώρα να γραφεί στη πιο γενική της μορφή :

$$P(R, \lambda) = P_o \frac{c\tau}{2} A \eta \frac{O(R)}{R^2} \beta(R, \lambda) e^{-2 \int_0^R a(r, \lambda) dr} \quad (2.18)$$

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

Η βασική εξίσωση lidar μπορεί επίσης να γραφεί:

$$P(R) = \frac{E_o \eta_L}{R^2} O(R) \beta(R) e^{-2 \int_0^R a(r) dr} \quad (2.19)$$

Όπου  $E_o$  είναι η εκπεμπόμενη ενέργεια παλμού, ο παράγοντας  $\eta_L$  περιέχει όλες τις παραμέτρους του lidar όσον αφορά την οπτοηλεκτρονική απόδοση του συστήματος και όπου  $\beta(r)$  ( $\text{km}^{-1}\text{sr}^{-1}$ ) και  $a(r)$  ( $\text{km}^{-1}$ ) είναι ο συντελεστής οπισθοσκέδασης και εξασθένησης 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:

$$\begin{aligned} \beta(R) &= \beta_{mol}(R) + \beta_{aer}(R) \\ a(R) &= a_{mol}(R) + a_{aer}(R) \end{aligned} \quad (2.20)$$

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 εφ' όσον υπάρχει πλήρης επικάλυψη μεταξύ του οπτικού πεδίου του τηλεσκοπίου και της εκπεμπόμενης δέσμης laser.

Οι παραπάνω εξισώσεις ( (2.19) και (2.20) ) συνοψίζονται στην παρακάτω:

$$P(R)R^2 = E_o \eta_L [\beta_{mol}(R) + \beta_{aer}(R)] e^{-2 \int_0^R [a_{mol}(R) + a_{aer}(R)] dr} \quad (2.21)$$

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

$$S(R) = R^2 P(R) \quad (2.22)$$

η (2.21) γίνεται:

$$S(R) = E_0 \eta_L [\beta_{mol}(R) + \beta_{aer}(R)] e^{-2 \int_0^R [a_{mol}(R) + a_{aer}(R)] dr} \quad (2.23)$$

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

Στην επόμενη φάση εισάγουμε τον σωματιδιακό λόγο lidar:

$$L_{aer}(R) = \frac{\alpha_{aer}(R)}{\beta_{aer}(R)} \quad (2.24)$$

και ανάλογα τον μοριακό λόγο lidar:

$$L_{mol}(R) = \frac{\alpha_{mol}(R)}{\beta_{mol}(R)} = \frac{8\pi}{3} sr \quad (2.25)$$

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:

$$Y(R) = L_{aer}(R) [\beta_{aer}(R) + \beta_{mol}(R)] \quad (2.26)$$

Από τις εξισώσεις (2.24), (2.25) και (2.26) προκύπτει:

$$\begin{aligned} S(R) L_{aer}(R) e^{-2 \int_0^R [L_{aer}(r) - L_{mol}] \beta_{mol}(r) dr} \\ = E_0 \eta_L Y(R) e^{-2 \int_0^R Y(r) dr} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Λογαριθμίζοντας και διαφορίζοντας ως προς την απόσταση R έχουμε :

$$\frac{d \ln \left( S(R) L_{aer}(R) e^{-2 \int_0^R [L_{aer}(r) - L_{mol}] \beta_{mol}(r) dr} \right)}{dR} = \frac{1}{Y(R)} \frac{dY(R)}{dR} - 2Y(R) \quad (2.28)$$

Η εξίσωση (2.28) είναι μία εξίσωση της μορφής Bernoulli και την επιλύουμε με οριακή συνθήκη :

$$Y(R_0) = L_{aer}(R_0)[\beta_{aer}(R_0) + \beta_{mol}(R_0)] \quad (2.29)$$

Οπότε η λύση θα είναι η ακόλουθη:

$$\beta_{aer}(R) = \frac{S(R) \exp\{-2 \int_{R_0}^R [L_{aer}(r) - L_{mol}] \beta_{mol}(r) dr\}}{\frac{S(R_0)}{\beta_{aer}(R_0) + \beta_{mol}(R_0)} - 2 \int_{R_0}^R L_{aer}(r) S(r) T(r, R_0) dr} - \beta_{mol}(R), \quad (2.30)$$

$$\text{με } T(r, R_0) = \exp\{-2 \int_{R_0}^r [L_{aer}(r') - L_{mol}] \beta_{mol}(r') dr'\}.$$

$$\text{Και } a_{aer}(R) = L_{aer}(R) \beta_{aer}(R) \quad (2.31)$$

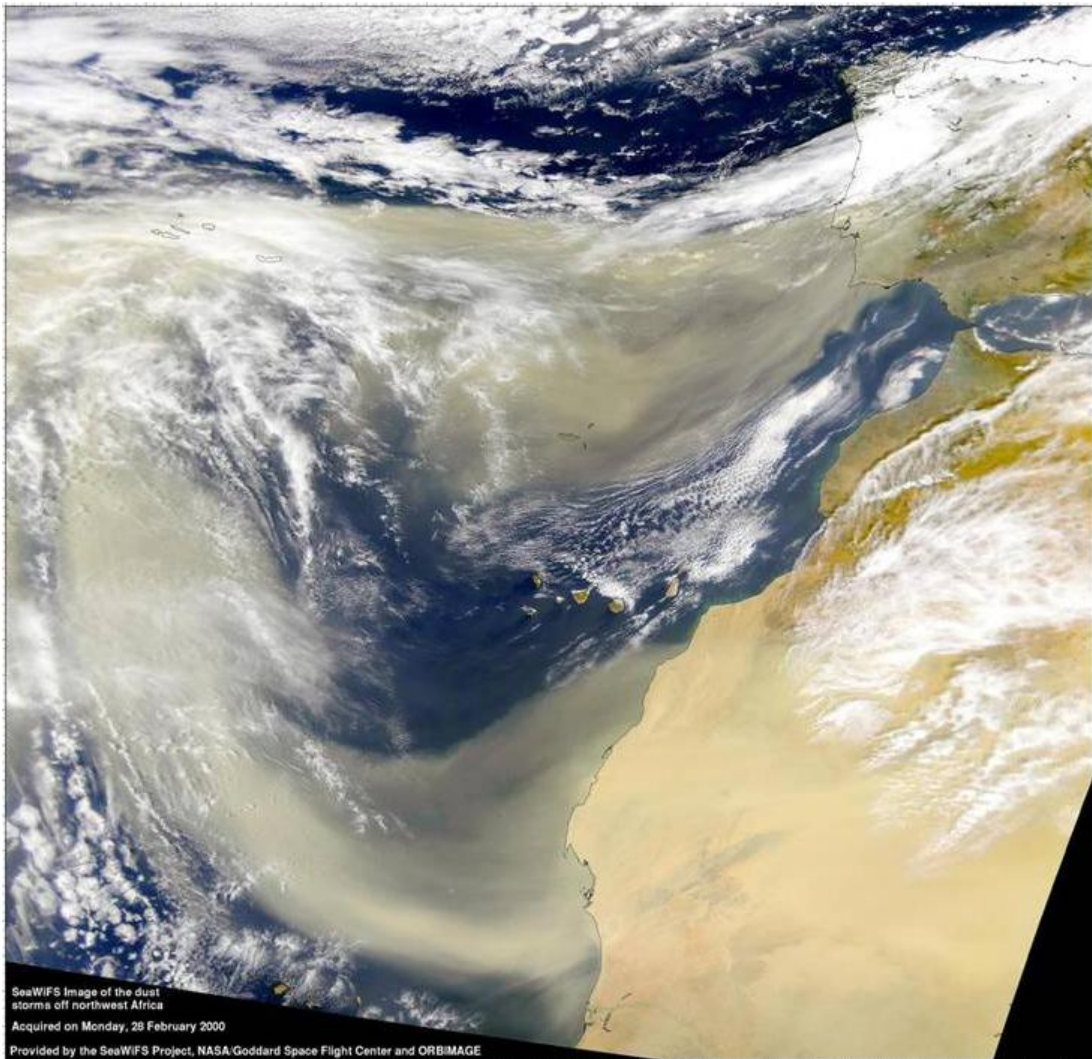
Σε γενικές γραμμές η εξίσωση (2.30) μπορεί να λυθεί ολοκληρώνοντας προς τα εμπρός ( $R > R_0$ ) ή ολοκληρώνοντας προς τα πίσω ( $R < R_0$ ). Συνήθως αριθμητική σταθερότητα επιτυγχάνεται με την προς τα πίσω ολοκλήρωση και προτάθηκε από τον Klett (Klett, 1981 και Klett, 1985).

Το ύψος αναφοράς  $R_0$  επιλέγεται έτσι ώστε η σκέδαση από τα αιωρούμενα σωματίδια να είναι αμελητέα σε σχέση με τη σκέδαση από την μοριακή ατμόσφαιρα (απουσία αιωρούμενων σωματιδίων). Τέτοιες συνθήκες συνήθως προσφέρονται στην ανώτερη τροπόσφαιρα (περίπου 7-10km ύψος).



# Κεφάλαιο 3

## ΛΙΔΑΡ ΑΠΟΠΟΛΩΣΗΣ







### 3.1 Εισαγωγή

Μια βασική αρχή του φωτός είναι η πόλωση την οποία μπορούμε να εκμεταλλευτούμε στη τεχνική lidar για να πάρουμε πλήθος πληροφοριών για την ατμόσφαιρα. Η πηγή ακτινοβολίας σε ένα σύστημα lidar είναι ένα laser το οποίο γενικώς έχει την ιδιότητα να παράγει γραμμικά πολωμένο φως. Συνεπώς μπορούμε να μετρήσουμε στη συνέχεια το ποσοστό της ακτινοβολίας που συλλέγει το τηλεσκόπιο και διατηρεί την αρχική πόλωση και παράλληλα το ποσοστό της ακτινοβολίας που έχει υποστεί αποπόλωση (μετράμε το παράλληλο και το κάθετο πολωμένο λαμβανόμενο σήμα σε σχέση πάντα με την διεύθυνση πόλωσης του εκπεμπόμενου σήματος). Ωστόσο πλήθος άλλων μετρήσεων είναι πιθανές, και εξαρτώνται από διάφορες τροποποιήσεις που είναι εφικτό να γίνουν στο εκπεμπόμενο σήμα και από την χρήση επιπλέον καναλιών ανίχνευσης διαφορετικών πολώσεων.

Η τεχνική έχει την ικανότητα να ανιχνεύσει ακόμα και πολύ λεπτά στρώματα μη-σφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων λόγω της έντονης αποπόλωσης που υφίσταται η ακτινοβολία laser από τα σωματίδια αυτά.

### 3.2 Λόγος αποπόλωσης

Η βασική εξίσωση lidar στη περίπτωση του lidar αποπόλωσης γράφεται ως εξής:

για την παράλληλη συνιστώσα πόλωσης:

$$P_{//}(R, \lambda) = P_o \frac{c\tau}{2} A\eta \frac{O(R)}{R^2} \beta_{//}(R, \lambda) e^{-2 \int_0^R a_{//}(r, \lambda) dr} \quad (3.1)$$

και για την κάθετη συνιστώσα πόλωσης:

$$P_{\perp}(R, \lambda) = P_o \frac{c\tau}{2} A\eta \frac{O(R)}{R^2} \beta_{\perp}(R, \lambda) e^{-2 \int_0^R a_{\perp}(r, \lambda) dr} \quad (3.2)$$

Επίσης, το οπτικό πάχος των αερολυμάτων ορίζεται:

$$\tau_{//\perp}(0, R) = \int_0^R a_{//\perp}(r, \lambda) dr \quad (3.3)$$

Ως λόγο αποπόλωσης ορίζουμε το κλάσμα :

$$\delta(R) = \frac{P_{\perp}}{P_{//}} \quad (3.4)$$

Από την (3.1) και την (3.2) προκύπτει:

$$\delta(R) = \frac{\beta_{\perp}(R)}{\beta_{//}(R)} e^{2(\tau_{//} - \tau_{\perp})}, \quad (3.5)$$

όπου  $\beta$  και  $\tau$  είναι ο συντελεστής εξασθένησης και το οπτικό πάχος, αντίστοιχα, για την κάθετη και την παράλληλη πόλωση. Πρακτικά ο εκθετικός όρος θεωρείται αμελητέος, αλλά περιλαμβάνεται αρχικά για να δηλώσει την πιθανότητα πως μερικοί συγκεκριμένοι στόχοι όπως είναι οι ομοιόμορφα προσανατολισμένοι παγοκρύσταλλοι ή σταγόνες νερού είναι ικανοί να επηρεάσουν την διάδοση του φωτός ανάλογα με την κατάσταση πόλωσης του.

Η γενική αυτή μορφή της παραπάνω εξίσωσης αντιπροσωπεύει την αποπόλωση που προκαλείται στο σήμα του lidar από τα μόρια, τα αιωρούμενα σωματίδια και τα υδροσταγονίδια που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα για αυτό και μερικές φορές αναφέρεται ως ο συνολικός λόγος γραμμικής αποπόλωσης. Στα σύγχρονα όμως συστήματα lidar που βασίζονται σε προηγμένες φασματοσκοπικές μεθόδους είναι εφικτό να μετρηθεί η συνεισφορά των μορίων, των αιωρούμενων σωματιδίων και των υδροσταγονιδίων στο λόγο αποπόλωσης χωριστά. Θα πρέπει όμως να αναφέρουμε πως η συνεισφορά των υδροσταγονιδίων είναι συνήθως ισχυρότερη των άλλων και για αυτό είναι δύσκολο να καθορίσουμε το ποσοστό συνεισφοράς των άλλων δύο όταν αντιμετωπίζουμε στρωματώσεις στην ατμόσφαιρα οι οποίες περιέχουν και αερολύματα. Γεγονός όμως που μας διευκολύνει στη μελέτη των νεφών αποτελούμενων από υδροσταγονίδια.

Συνεπώς, άλλες μορφές που μπορεί να πάρει ο λόγος αποπόλωσης είναι οι παρακάτω:

$$\delta(R) = \frac{\beta_{\perp}(R)}{\beta_{//}(R)} \quad (3.6)$$

και η

$$\delta'(R) = \frac{\beta_{\perp}(R)}{\beta_{//}(R) + \beta_{\perp}(R)} \quad (3.7)$$

Επίσης, αν και πιο σπάνια είναι εύχρηστο, στα πλαίσια της μελέτης της ατμόσφαιρας με τη χρήση lidar χρησιμοποιείται κυκλικά πολωμένο φως και μετράται ο λόγος κυκλικής αποπόλωσης ο οποίος σύμφωνα με τη βιβλιογραφία συνδέεται με τον λόγο γραμμικής αποπόλωσης με την παρακάτω σχέση (Weitkamp, 2005):

$$\delta_c = \frac{2\delta}{1-\delta} \quad (3.8)$$

Άλλο ένα πρόβλημα που συναντάται κατά τον καθορισμό του λόγου αποπόλωσης είναι το γεγονός πως στο λαμβανόμενο σήμα δεν ανιχνεύεται μόνο παράλληλα και κάθετα πολωμένο φως, αλλά και τυχαία πολωμένο φως το οποίο μπορεί να προέρχεται από πολλαπλές σκεδάσεις, είτε στην περίπτωση των παγοκρυστάλλων από διαφορετικά σχήματα, μεγέθη και τυχαία προσανατολισμένων παγοκρυστάλλων. Επίσης η εκπεμπόμενη ακτινοβολία είναι δυνατό να υποστεί αποπόλωση και από στρώματα σφαιρικών σωματιδίων λόγω της πολλαπλής σκεδάσεως, παράγοντας ο οποίος πρέπει να συνυπολογιστεί στην επεξεργασία των μετρήσεων. Αυτό έχει

σημαντικές επιπτώσεις και πρέπει να ληφθούν υπόψιν για την καλύτερη ερμηνεία των μετρήσεων.

Άλλοι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν σημαντικά τον λόγο αποπόλωσης είναι η απόδοση των ηλεκτρονικών και οπτικών μέρων του συστήματος, η καθαρότητα πόλωσης του παλμού του laser, καθώς και η ευθυγράμμιση των καναλιών ανίχνευσης της πόλωσης με την διεύθυνση πόλωσης του παλμού.

### **3.3 Αιτίες αποπόλωσης στην ατμόσφαιρα**

Στα πρώτα βήματα της έρευνας πάνω στη αποπόλωση που υφίσταται η ακτινοβολία laser κατά την διάδοση της στην ατμόσφαιρα έγινε αμέσως εμφανές ότι νέοι ορίζοντες ανοίγονται για την μελέτη της. Σύμφωνα με την θεωρία Lorenz-Mie, τα ομοιογενή (όσον αφορά τον δείκτη διάθλασης του υλικού) σφαιρικά σωματίδια οπισθοσκεδάζουν πάντα το φως στην ίδια διεύθυνση πόλωσης με αυτήν που είχε το προσπίπτον. Πλήθος άλλων θεωριών αποδεικνύουν την αποπόλωση που μπορεί να υποστεί η προσπίπτουσα ακτινοβολία από ανομοιογενή μη σφαιρικά σωματίδια. Συνεπώς το lidar αποπόλωσης είναι μοναδικό στα πλαίσια της τηλεπισκόπησης λόγω της δυνατότητας του να καθορίζει την θερμοδυναμική φάσης των σύννεφων.

#### Μοριακή σκέδαση

Επειδή το μέγεθος των μορίων στην ατμόσφαιρα είναι κατά πολύ μικρότερο του μήκους κύματος της ακτινοβολίας lidar το φως σκεδάζεται σύμφωνα με τη θεωρία Rayleigh και συνεπώς καταλληλότερα laser είναι αυτά που εκπέμπουν στο ορατό και στο κοντινό υπεριώδες. Ως εκ τούτου το ποσοστό αποπόλωσης που εισάγει η μοριακή ατμόσφαιρα μπορεί να υπολογιστεί και είναι αρκετά μικρό ώστε να θεωρείται αμελητέο στις περισσότερες στρωματώσεις αιωρούμενων σωματιδίων που ανιχνεύονται και μελετούνται στην ατμόσφαιρα.

#### Αιωρούμενα σωματίδια

Μια ποικιλία αιωρούμενων σωματιδίων μπορεί αν ανιχνευτεί στην ατμόσφαιρα όπως είναι τα υδροσταγονίδια, οι παγοκρύσταλλοι, η σκόνη, και παράγωγα των ηφαιστειακών εκρήξεων ή δασικών πυρκαγιών ακόμα και της ανθρώπινης δραστηριότητας. Στο πρώτο κεφάλαιο έχουμε αναφερθεί επαρκώς σε αυτό όπως και στο γεγονός ότι το μέγεθος τους ποικίλλει. Το γεγονός αυτό αποτελεί μία πρόκληση για την έρευνα της ατμόσφαιρας με τη χρήση ενός lidar αποπόλωσης,

Από σωματίδια όπως σταγονίδια θειικού οξέος η άλλα ομοιογενή σφαιρικά σωματίδια το ποσοστό αποπόλωσης που μετράται είναι σχετικά μικρό έως μηδαμινό. Για σωματίδια όμως ακανόνιστου σχήματος όπως είναι η ηφαιστειακή τέφρα, η σκόνη της ερήμου τα οποία επίσης είναι ανομοιογενή ως προς το υλικό ο λόγος αποπόλωσης παίρνει σχετικά μεγάλες τιμές και μπορεί να μας δώσει πολλές πληροφορίες.

### Πολικά στρατοσφαιρικά σύννεφα (PCSs).

Η μελέτη των πολικών στρατοσφαιρικών νεφών έχει πάρει μεγάλες διαστάσεις τα τελευταία χρόνια λόγω των ενδιαφέροντων χημικών διαδικασιών που συμβαίνουν σε αυτά σε τόσο χαμηλές θερμοκρασίες. (Santacesaria, 2001)

Ένας ακόμα λόγος για την μελέτη αυτών των νεφών που μοιάζουν πολύ περισσότερο μάλλον με στρωματώσεις σωματιδίων είναι η στενή σύνδεσή τους με την καταστροφή του στρατοσφαιρικού όζοντος κατά τον πολικό χειμώνα. Συνίσταται δε για αυτή τη μελέτη το lidar αποπόλωσης. (Gobbi, 1998)

Τα PSCs αποτελούνται από νερό, θειικά και νιτρικά παράγωγα και εντοπίζονται είτε σε υγρή είτε σε στερεά μορφή. Λόγω της ανομοιογένειας που παρουσιάζουν τα σωματίδια που τα αποτελούν, μας δίνουν μεγάλες τιμές του λόγου αποπόλωσης και μετά από έρευνα χρόνων είμαστε ικανοί να προσδιορίσουμε αρκετά χαρακτηριστικά και ιδιότητές τους από αυτές τις μετρήσεις. (Gobbi, 1998)

### **3.4 Εφαρμογές της τεχνικής lidar αποπόλωσης**

Ακολούθως, θα αναφέρουμε συνοπτικά ορισμένα παραδείγματα εφαρμογής της τεχνικής lidar-αποπόλωσης για τον καθορισμό του σχήματος (σφαιρικό ή μη σφαιρικό) των σκεδαζόντων αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα.

#### **3.4.1 Πείραμα SAMUM (Μελέτη των επεισοδίων σκόνης από την έρημο Σαχάρα)**

Στην Praia στο Cape Verde (14.9<sup>0</sup>N, 23,5<sup>0</sup>W) χρησιμοποιήθηκε ένα Raman lidar σε συνδυασμό με lidar αποπόλωσης, για τον προσδιορισμό των οπτικών ιδιοτήτων και την διάκριση της σκόνης της ερήμου από τα σωματίδια που προέρχονται από την καύση βιομάζας σαν συνάρτηση του ύψους πάνω από τον τροπικό νότιο ατλαντικό ωκεανό δυτικά από την αφρικανική ήπειρο. Η προηγμένη τεχνική του lidar επέτρεψε την διάκριση της προέλευσης των σωματιδίων συγκρίνοντας την οπισθοσκέδαση τους, την λευκότητα και τις μικροφυσικές τους ιδιότητες. Οι παρατηρήσεις έγιναν κατά την διάρκεια του πειράματος SAMUM (**S**aharan **M**ineral **D**ust **E**xperiment) τον Ιανουάριο και Φεβρουάριο του 2008. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά του AERONET (**A**erosol **R**obotic **N**etwork) όπου βρέθηκαν σε μεγάλη συμφωνία. (Tesché et al., 2009, Kardas et al., 2010)

Το πείραμα SAMUM μελέτησε τις τροπικές στρωματώσεις αιωρούμενων σωματιδίων που ανιχνεύονται κατά την χειμερινή περίοδο στις τροπικές περιοχές της δυτικής Αφρικής. Πάνω από ένα πυκνό στρώμα σκόνης (με οπτικό πάχος από 0.25 στα 532nm) που φτάνει μέχρι το ύψος των 1500 m υπάρχει ένα λιγότερο πυκνό στρώμα σωματιδίων που αποτελείται από σκόνη της ερήμου (με οπτικό πάχος 0.08) και σωματίδια που προέρχονται από την καύση βιομάζας (με οπτικό πάχος 0.24) και εκτείνεται από το ύψος των 1500m έως 5000m.

Το πείραμα SAMUM επίσης επέτρεψε την παρατήρηση των διηπειρωτικών μετακινήσεων των σωματιδίων αυτών και την επίδρασή τους στο παγκόσμιο κλίμα. Κύριος στόχος όμως του πειράματος είναι ο καθορισμός της κατακόρυφης κατανομής

των φυσικών, χημικών και οπτικών ιδιοτήτων των σωματιδίων της καθαρής σκόνης της ερήμου και των μικτών στρωματώσεων καπνού και σκόνης ερήμου, συμβάλλοντας κατά αυτόν τον τρόπο στην δημιουργία καλύτερων σεναρίων όσον αφορά στα ατμοσφαιρικά μοντέλα που εκτιμούν την παγκόσμια κλιματική αλλαγή.

Το πείραμα SAMUM είναι μία από τις σημαντικότερες μελέτες που έγιναν με αντικείμενο την μελέτη των αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα. Η σκόνη που διοχετεύεται στην ατμόσφαιρα από την έρημο Σαχάρα επιδρά έντονα στην διαμόρφωση του τοπικού αλλά και του παγκόσμιου κλίματος. Ο τρόπος που επηρεάζει το παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο της γης είναι δύσκολο να διευκρινιστεί αφού πρέπει πρώτα να διερευνηθούν όλες οι παράμετροι (δείκτης διάθλασης, μέγεθος και σχήμα σωματιδίων, χημική σύσταση, προέλευση κ.α.).

Το κλειδί για την διάκριση των σωματιδίων είναι ο λόγος αποπόλωσης (3.6). Έτσι ορίζουμε το λόγο αποπόλωσης που οφείλεται στα αιωρούμενα σωματίδια σκόνης:

$$\delta_p = \frac{\beta_p^\perp}{\beta_p^{\prime\prime}} \quad (3.9)$$

και τον μοριακό λόγο αποπόλωσης:

$$\delta_m = \frac{\beta_m^\perp}{\beta_m^{\prime\prime}} \quad (3.10)$$

ο οποίος μπορεί να προσδιοριστεί με δεδομένα ραδιοβολίσεων.

Η διαδικασία που ακολουθείται για τον διαχωρισμό των νεφών σκόνης και αυτών που αποτελούνται από οποιοδήποτε άλλο σωματίδιο διαφορετικής προελεύσεως περιγράφεται παρακάτω.

Αρχικά ορίζεται ο συνολικός λόγος αποπόλωσης:

$$\delta_v = \frac{\beta_m^\perp + \beta_p^\perp}{\beta_v^{\prime\prime} + \beta_p^{\prime\prime}} \quad (3.11)$$

Σε αρχική φάση η συμβολή των σωματιδίων και των μορίων στο λόγο αποπόλωσης διαχωρίζεται με τις παρακάτω σχέσεις:

$$\beta_\chi = \beta_\chi^\perp + \beta_\chi^{\prime\prime} \quad (3.12)$$

$$\beta_\chi^{\prime\prime} = \frac{\beta_\chi}{1 + \delta_\chi} \quad (3.13)$$

$$\beta_\chi^\perp = \frac{\beta_\chi \delta_\chi}{1 + \delta_\chi} \quad (3.14)$$

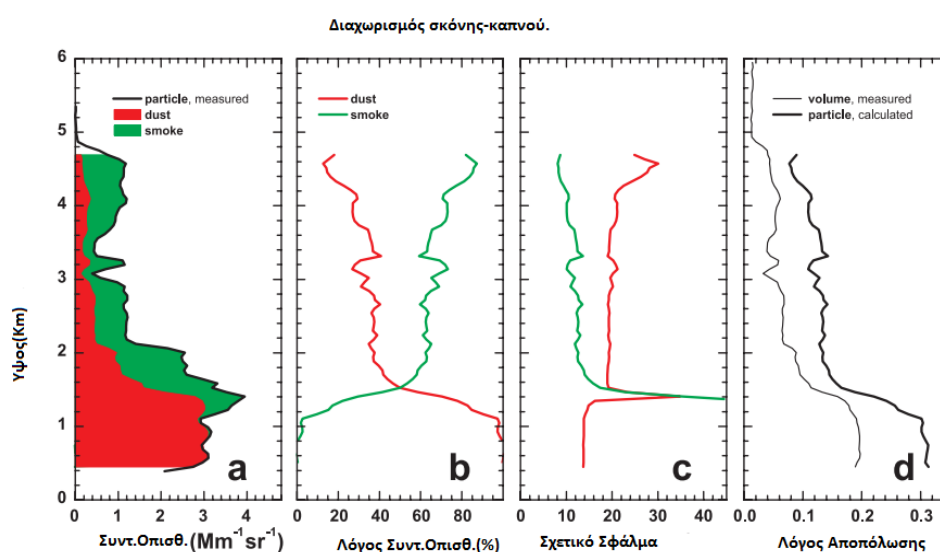
όπου  $\chi = m, p$ , με το  $m$  να αναφέρεται στη μοριακή ατμόσφαιρα και το  $p$  στα σωματίδια.

Αντικαθιστώντας τις (3.12), (3.13) και την (3.14) στην (3.11) προκύπτει:

$$\delta_v = \frac{\beta_m \delta_m (1 + \delta_p) + \beta_p \delta_p (1 + \delta_m)}{\beta_m (1 + \delta_p) + \beta_p (1 + \delta_m)} \quad (3.15)$$

και από την (3.15) συνεπάγεται:

$$\delta_p = \frac{\beta_m (\delta_v - \delta_m) + \beta_p \delta_v (1 + \delta_m)}{\beta_m (\delta_m - \delta_v) + \beta_p (1 + \delta_m)} \quad (3.16)$$



**Εικόνα 3.1** Διαχωρισμός ερημικής σκόνης-καπνού (a) Κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης για την σκόνη και το καπνό στα 532nm. (b) Ποσοστό συμμετοχής της σκόνης και του καπνού στον συνολικό συντελεστή οπισθοσκέδασης (c) Σχετικό σφάλμα για τους συντελεστές οπισθοσκέδασης σκόνης(κόκκινο)-καπνού(πράσινο) (d) Συνολικός και σωματιδιακός λόγος αποπόλωσης. (Teschke et al., 2009)

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για να καθοριστεί η συμβολή των σωματιδίων σκόνης(dust:d) και των σωματιδίων άλλης προελεύσεως(nondust:nd). Έτσι προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\delta_p = \frac{\beta_{nd}^\perp + \beta_d^\perp}{\beta_{nd}^{\parallel} + \beta_d^{\parallel}} \quad (3.17)$$

$$\delta_p = \frac{\beta_{nd} \delta_{nd} (1 + \delta_d) + \beta_d \delta_d (1 + \delta_{nd})}{\beta_{nd} (1 + \delta_d) + \beta_d (1 + \delta_{nd})} \quad (3.18)$$

και αφού αντικατασταθεί το  $\beta_{nd} = \beta_p - \beta_d$  προκύπτει:

$$\beta_d = \beta_p \frac{(\delta_p - \delta_{nd})(1 + \delta_d)}{(\delta_d - \delta_{nd})(1 + \delta_p)} \quad (3.19)$$

Για να υπολογισθεί ο συντελεστής οπισθοσκέδασης  $\beta_d$  των σωματιδίων σκόνης από την (3.19) πρέπει αρχικά να υπολογιστεί ο σωματιδιακός λόγος αποπόλωσης  $\delta_p$  από την (3.16).

Στο επόμενο βήμα υπολογίζουμε τον συντελεστή εξασθένησης των σωματιδίων σκόνης  $a_d$  από τον λόγο lidar  $L_d$  και τον συντελεστή οπισθοσκέδασης  $\beta_d$  για τα σωματίδια σκόνης από την σχέση (2.24). Συνεπώς ισχύει:

$$a_d = L_d \beta_d \quad (3.20)$$

Χρησιμοποιώντας τον εκθέτη Angstrom οπισθοσκέδασης  $\overset{0}{a}_{\beta,d}(\lambda_1, \lambda_2)$  και τον εκθέτη Angstrom εξασθένησης  $\overset{0}{a}_{\alpha,d}(\lambda_1, \lambda_2)$  υπολογίζουμε:

$$\beta_d(\lambda) = \beta_{532,d} \left( \frac{532}{\lambda} \right)^{\overset{0}{a}_{\beta,d}(\lambda, \lambda_{532})} \quad (3.21)$$

Με το μήκος κύματος  $\lambda$  να είναι 355 ή 1064 nm, και

$$a_{355,d} = a_{532,d} \left( \frac{532}{355} \right)^{\overset{0}{a}_{\alpha,d}(355,532)} \quad (3.22)$$

Τελικά, μπορούμε να υπολογίσουμε τους συντελεστές οπισθοσκέδασης και εξασθένησης για τα σωματίδια εκτός σκόνης:

$$\beta_{nd} = \beta_p - \beta_d \quad (3.23)$$

$$a_{nd} = a_p - a_d \quad (3.24)$$

### 3.4.2 Πολικά στρατοσφαιρικά σύννεφα (PSCs)

Έχουμε ήδη αναφέρει ότι η σύσταση των PSCs αποτελείται από νερό, θειικά και νιτρικά παράγωγα που εντοπίζονται είτε σε υγρή, είτε σε στερεά μορφή. Λόγω της ανομοιογένειας που παρουσιάζουν τα σωματίδια που τα αποτελούν μας δίνουν μεγάλες τιμές του λόγου αποπόλωσης και μετά από έρευνα χρόνων είμαστε ικανοί να προσδιορίσουμε αρκετά χαρακτηριστικά και ιδιότητες τους από αυτές τις μετρήσεις.

Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι τα σύννεφα παγοκρυστάλλων εισάγουν ένα ποσοστό αποπόλωσης στο σήμα lidar περίπου 40% με 70% (Gobbi, 1998). Υπάρχουν ωστόσο ειδικές περιπτώσεις που μετράμε μηδενική αποπόλωση στο σήμα lidar, όπως όταν υπάρχουν προσανατολισμένα σωματίδια πάγου.

Τα πολικά στρατοσφαιρικά σωματίδια είναι κυρίως υπερψυγμένα νιτρικά σταγονίδια τα οποία παρουσιάζουν μέγεθος πολύ μικρότερο και σύνθεση πολύ απλούστερη από αυτά που βρίσκονται στην τροπόσφαιρα. Η συμπεριφορά τους μελετάται από τα lidar αποπόλωσης για τον καθορισμό των αλλαγών στη θερμοδυναμική φάση των νεφών, όταν το νιτρικό οξύ και το νερό συμπυκνώνονται για να σχηματίσουν τα πολικά στρατοσφαιρικά σύννεφα PSCs.

Επίσης, ορίζουμε το παράλληλο λόγο οπισθοσκέδασης(parallel backscatter ratio):

$$R = \frac{\beta_m'' + \beta_a''}{\beta_m''} \quad (3.25)$$

και τον λόγο αποπόλωσης:

$$\delta = \frac{S^\perp}{S''} = \frac{\beta_m^\perp + \beta_a^\perp}{\beta_m'' + \beta_a''} \quad (3.26)$$

όπου  $\beta_m$  και  $\beta_a$  αντιστοιχούν στους συντελεστές οπισθοσκέδασης των μορίων και των σωματιδίων, αντίστοιχα. Η τιμή του μοριακού συντελεστή οπισθοσκέδασης υπολογίζεται είτε με την μέθοδο των ραδιοβολίσεων είτε από έτοιμα ατμοσφαιρικά μοντέλα. Η καθαρή ατμόσφαιρα χαρακτηρίζεται με  $R=1$  και  $\delta=1.4\%$ .

Ο ολικός συντελεστής οπισθοσκέδασης των σωματιδίων εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\beta_a = \beta_s + \beta_c = \beta_s + \beta_c'' + \beta_c^\perp \quad (3.27)$$

όπου με τον δείκτη s αναφερόμαστε στα σφαιρικά σωματίδια και με τον δείκτη c στους παγοκρυστάλλους.

Θεωρείται ότι η αποπόλωση που εισάγεται από τους παγοκρυστάλλους σε ένα PSC σε κανονικές συνθήκες είναι σταθερή και ίση με 50% (Gobbi, 1998). Συνεπώς :

$$\delta_c = \frac{\beta_c^\perp}{\beta_c''} = k = \text{σταθ.} \quad (3.28)$$

Από τις 3.27 και 3.28 προκύπτει :

$$\beta_c^\perp = \beta_c \frac{k}{1+k} \quad (3.29)$$

Οι εξισώσεις 3.25 και 3.26 από τις 3.27, 3.28 και 3.29 γίνονται:

$$R = \frac{\beta_m'' + \beta_s + \beta_c''}{\beta_m''} \quad (3.30)$$



$$\delta = \frac{\beta_c^\perp + 0,014\beta_c'''}{\beta_m'' + \beta_s + \beta_c''} = \frac{(k \frac{\beta_c'''}{\beta_m''}) + 0,014}{R} = \frac{0,014 + k(R-1 - \frac{\beta_c}{\beta_m''})}{R} \quad (3.31)$$

Η σχέση 3.31 περιγράφει δύο πολύ ενδιαφέρουσες ιδιότητες του λόγου αποπόλωσης:

- όταν έχουμε παρουσία μόνο υγρών σφαιρικών σωματιδίων ( $\beta_c^\perp = \beta_c^\perp = 0$ ) τότε  $\delta = \frac{0,014}{R}$  οπότε ο λόγος αποπόλωσης μειώνεται κάτω του 1,4% για αυξανόμενες τιμές του R.
- και με επιπλέον απουσία των υγρών σωματιδίων ( $\beta_s=0$ ) τότε το R τείνει στο 1 και  $\delta=0,014$ .

Επιπλέον η συνολική οπισθοσκέδαση που μετράμε στο οπισθοσκεδαζόμενο σήμα μπορεί αν συσχετιστεί με τους συντελεστές οπισθοσκέδασης της μοριακής ατμόσφαιρας, των υγρών-σφαιρικών και στερεών σωματιδίων παγοκρυστάλλων.

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι ο ολικός συντελεστής οπισθοσκέδασης των σωματιδίων συνδέεται άμεσα με τον όγκο και την επιφάνεια που προκαλεί την οπισθοσκέδαση και τον συντελεστή οπισθοσκέδασης των στερεών και υγρών σωματιδίων μπορεί να εισάγει τις πρώτες εικασίες όσον αφορά στην συνεισφορά των διάφορων φάσεων στη σύσταση του νέφους. ( Santacesaria et al., 2001)

Από την 3.31 βρίσκουμε τον λόγο των συντελεστών οπισθοσκέδασης των υγρών και στερεών σωματιδίων:

$$\frac{\beta_s}{\beta_m''} = R - 1 - \frac{R\delta - 0,014}{k} \quad (3.32)$$

Εισάγοντας την σχέση  $\beta_c'' = \frac{\beta_c}{1+k}$  στην 3.30 έχουμε τον αντίστοιχο λόγο για τα στερεά σωματίδια:

$$\frac{\beta_c}{\beta_m''} = \frac{1+k}{k} (R\delta - 0,014) \quad (3.33)$$

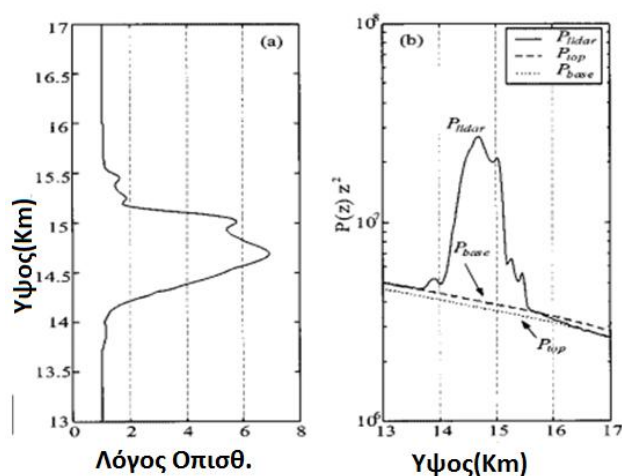
Και από τις 3.32 και 3.33 προκύπτει:

$$\frac{\beta_s}{\beta_c} = \left( \frac{1}{1+k} \right) \left( \frac{k(R-1)}{R\delta - 0,014} - 1 \right) \quad (3.34)$$

### 3.4.3 Θύσανοι (Cirrus Clouds)

Η μελέτη των θυσάνων και των οπτικών τους ιδιοτήτων αποτελεί επιτακτική ανάγκη λόγω της σημαντικής συνεισφοράς τους στο ενεργειακό ισοζύγιο της γης. Οι θύσανοι (cirrus clouds) είναι νέφη τα οποία αποτελούνται κυρίως από παγοκρυστάλλους και εντοπίζονται σε ύψη μεγαλύτερα των 8.000 m. Δορυφορικά δεδομένα δείχνουν ότι η κάλυψη της γήινης επιφάνειας από θυσάνους ξεπερνά το 30%. Συνεπώς το γεγονός αυτό είναι ικανό να επηρεάσει σημαντικά το γήινο κλίμα, είτε τοπικά, είτε σε τέτοιο μέγεθος ώστε να φέρουν μερίδιο ευθύνης για την κλιματική αλλαγή. Τα νέφη αυτά έχουν την ικανότητα να απορροφούν την μεγάλη μήκους κύματος ακτινοβολία που εκπέμπεται από τη γη και να αντανακλούν την μικρού μήκους κύματος ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται σε αυτήν. Η τεχνική lidar επιτρέπει τον σχετικά εύκολο καθορισμό των οπτικών τους ιδιοτήτων, η γνώση των οποίων είναι απαραίτητη για την καλύτερη κατανόηση της αλληλεπίδρασης τους με την ακτινοβολία.

Γενικά η τεχνική lidar επιτρέπει την άμεση ανίχνευση των νεφών από το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα. Ο καθορισμός του οπτικού βάθους, του λόγου lidar και του λόγου αποπόλωσης σχετίζονται άμεσα με την σύσταση του νέφους και την περιεκτικότητα του σε παγοκρυστάλλους. Συνεπώς, η κατανομή του λόγου lidar, του λόγου αποπόλωσης και της θερμοκρασίας σε σχέση με το ύψος, η μεταξύ τους εξάρτηση, όπως και η σχέση τους με το οπτικό βάθος είναι απαραίτητα στοιχεία για την διεξαγωγή συμπερασμάτων, σχετικών με τις φυσικές τους ιδιότητες.



**Εικόνα 3.2** (α) Κατακόρυφη κατανομή του λόγου οπισθοσκέδασης, (β) Το διορθωμένο σήμα lidar ( $P_{lidar}$ ) με την απόσταση σαν συνάρτηση του ύψους (όπου  $P_{base}$  και  $P_{top}$  είναι το προσαρμοσμένο σήμα στη βάση και στη κορυφή του νέφους (διακεκομμένη και εστιγμένη γραμμή, αντίστοιχα)(Chen Wei-Nai. et al., 2002).

Στην Εικόνα 3.2 παρατηρούμε το σήμα lidar που λαμβάνουμε από ένα νέφος που βρίσκεται σε ύψος 14.000 m. Οι μετρήσεις έχουν γίνει από ένα σύστημα Lidar που τοποθετείται στη Chung-Li στη Taiwan.(25 N<sup>0</sup>, 121 E<sup>0</sup>) και μελετά τους θυσάνους από το 1996.

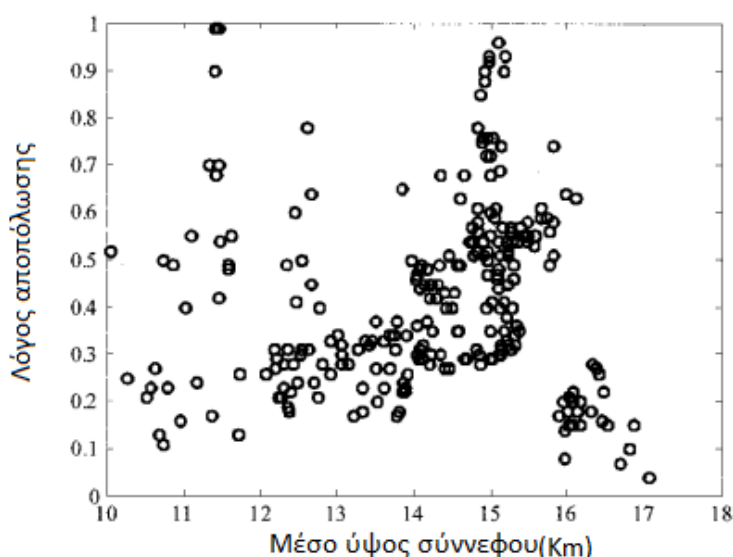
Γενικώς, η απώλεια σκέδασης μέσα σε ένα νέφος μπορεί να καθοριστεί συγκρίνοντας το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα ακριβώς πριν και ακριβώς μετά από την αρχή και το τέλος του νέφους, εφόσον το σήμα αντιπροσωπεύει σωστά το μέσο σκέδασης. Αυτή η προϋπόθεση συχνά, δεν τηρείται λόγω προβλημάτων που παρουσιάζονται στο σύστημα λήψης, όπως είναι ο κορεσμός του ανιχνευτή, ηλεκτρονικοί θόρυβοι στο ηλεκτρονικό σύστημα, ή και ακόμα η παρουσία αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Οι συνθήκες έξω από το σύννεφο είναι ιδιαίτερα σημαντικές και η παρουσία τροποσφαιρικών και στρατοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων μπορούν να αλλοιώσουν σημαντικά το σήμα του lidar.

Εάν, το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα στη κορυφή του νέφους είναι  $P_{top}$  και στη βάση του  $P_{base}$  έτσι μπορούμε να εκφράσουμε την διαπερατότητα του νέφους ως :

$$T_{fit} = \sqrt{\frac{P_{top}}{P_{base}}} \quad (3.34)$$

Στη συγκεκριμένη περίπτωση η διαπερατότητα μετρήθηκε να είναι  $T_{fit} = 0.964 \pm 0.038$  και ο λόγος lidar περίπου 28.5 sr.

Σημαντικές πληροφορίες για την σύσταση του νέφους μας δίνει και ο λόγος αποπόλωσης. Στην Εικόνα 3.3 παρουσιάζεται η σχέση του λόγου αποπόλωσης στο εσωτερικό του νέφους σε σχέση με το ύψος. Παρατηρείται η τάση να αυξάνεται ο λόγος αποπόλωσης μεταξύ των υψών 11 και 16 km εκτός από σύννεφα που βρίσκονται σε ύψη μεγαλύτερα των 16-17 km ο λόγος αποπόλωσης αυξάνεται κατά 0.2 έως 0.5. Μεταξύ των 16-17 km ο λόγος αποπόλωσης παρουσιάζει ελάχιστο πολύ μικρότερο από 0.3. Οι παρατηρήσεις αυτές συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1.

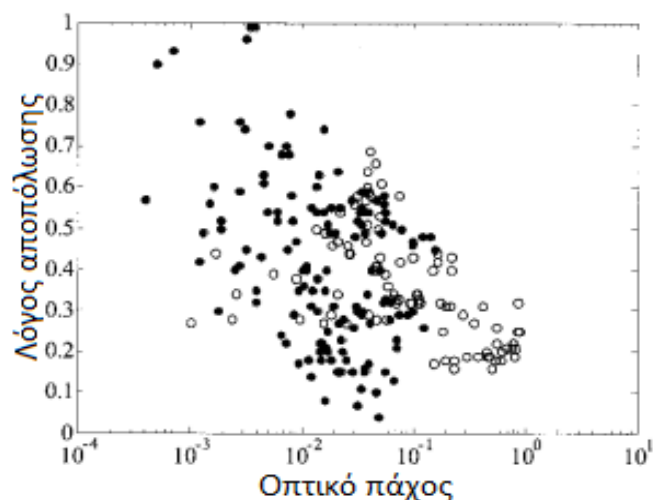


**Εικόνα 3.3** Σχέση λόγου αποπόλωσης και ύψους στο εσωτερικό του νέφους. (Chen Wei-Nai. et al., 2002).

**Πίνακας 3.1** Σχέση ύψους και θερμοκρασίας με το λόγο αποπόλωσης. (Chen Wei-Nai. et al., 2002).

Υψος (km)	Θερμοκρασία (°C)	Λόγος αποπόλωσης $\delta$
10–11	–33.1 to –41.2	$0.28 \pm 0.15$
11–12	–40.4 to –47.7	$0.54 \pm 0.26$
12–13	–47.9 to –58.1	$0.33 \pm 0.14$
13–14	–53.8 to –64.4	$0.29 \pm 0.10$
14–15	–62.5 to –72.7	$0.50 \pm 0.18$
15–16	–70.1 to –77.9	$0.48 \pm 0.18$
16–17	–75.6 to –78.0	$0.20 \pm 0.11$

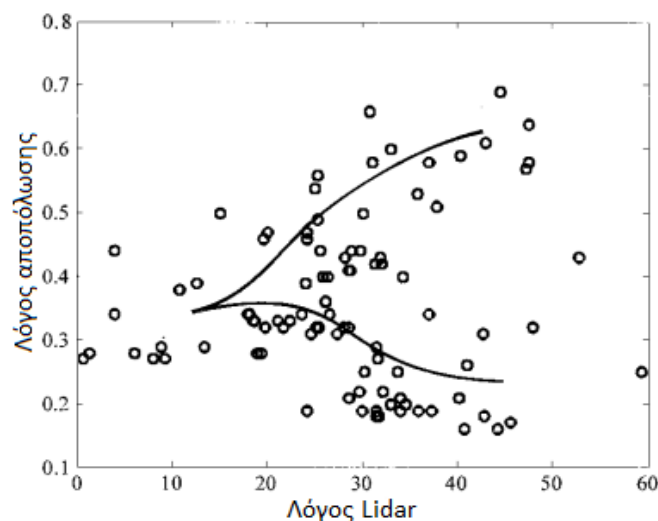
Στην Εικόνα 3.4 φαίνεται η σχέση μεταξύ του λόγου αποπόλωσης και του οπτικού πάχους. Για πυκνά νέφη ( $0.1 < \tau < 1$ ) ο λόγος αποπόλωσης λαμβάνει τιμές μικρότερες από 0.3, τα νέφη με μεγάλους λόγους αποπόλωσης έχουν μικρό οπτικό πάχος και μερικά από τα μη ανιχνεύσιμα με ορατό μάτι σύννεφα έχουν λόγο αποπόλωσης σχεδόν ίσο με τη μονάδα.



**Εικόνα 3.4** Σχέση λόγου αποπόλωσης και οπτικού πάχους. (Chen Wei-Nai. et al., 2002).

Επίσης από το λόγο lidar και το λόγο αποπόλωσης μπορούμε να πάρουμε επιπλέον πληροφορίες για την μορφή των παγοκρυστάλλων που αποτελούν ένα νέφος θυσάνου. Ένας θύσανος αποτελείται από παγοκρυστάλλους οι οποίοι σχηματίζουν λεπτά φύλλα (thin plates) παχιά φύλλα (thick plates) η και στήλες (columns) και σημειώνουν σύμφωνα με τη βιβλιογραφία τιμές για το λόγο αποπόλωσης 0.4, 0.5 και 0.6 αντίστοιχα. Επιπλέον, θύσανοι που αποτελούνται από παγοκρυστάλλους σε μορφή στήλης παρατηρούνται σε ύψη μεγαλύτερα των 14.5 km. Ενώ οι άλλες μορφές παρατηρούνται σε ύψη μικρότερα των 14.5 km.

Στην πραγματικότητα πολλές άλλες μορφές κρυστάλλων είναι δυνατό να βρεθούν στα νέφη σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των  $-50\text{ C}^0$ . Συνεπώς η μελέτη των θυσάνων γίνεται ακόμα πιο δύσκολη.



**Εικόνα 3.5** Σχέση λόγου αποπόλωσης και λόγου lidar (Chen Wei-Nai. et al., 2002).

Η Εικόνα 3.5 δείχνει την σχέση μεταξύ του λόγου αποπόλωσης και του λόγου lidar. Παρατηρούμε πως χωρίζεται σε δύο κλάδους, οι οποίοι αρχίζουν από ένα λόγο lidar 10 με 30 sr και ο λόγος αποπόλωσης να ακολουθεί μια διαδρομή με μέγιστο το 0.6 και μία άλλη ανάμεσα από το 0.2 και το 0.3. Αυτό μάλλον οφείλεται στο γεγονός μπορεί να μετράμε σήματα από θυσάνους που έχουν τον ίδιο λόγο lidar αλλά διαφορετικό λόγο αποπόλωσης λόγω της περιεκτικότητάς τους σε διαφορετική μορφή παγοκρυστάλλων.

#### 3.4.4 Νέφη νερού-παγοκρυστάλλων (water-ice clouds)

Ακολουθώντας, θα περιγράψουμε την τεχνική για το καθορισμό της φάσης στην οποία βρίσκονται τα διάφορα με βάση την τεχνική lidar αποπόλωσης. Θα μελετηθούν νέφη που έχουν τον ίδιο λόγο αποπόλωσης και διαφέρουν ως προς τον ενεργό λόγο αποπόλωσης ο οποίος θα οριστεί στη συνέχεια. Συγκεκριμένα ο ενεργός λόγος αποπόλωσης είναι πολύ μικρότερος στα νέφη νερού από ό,τι στα νέφη πάγου που αποτελούνται από τυχαία προσανατολισμένους παγοκρυστάλλους. Ενώ η διακύμανση του λόγου αποπόλωσης είναι σημαντικά μεγαλύτερη στα νέφη νερού από ό,τι στα σύννεφα με παράλληλα προσανατολισμένους παγοκρυστάλλους. Ο λόγος αποπόλωσης και ο ενεργός λόγος αποπόλωσης για τα νέφη νερού είναι ανάλογοι ενώ για τα νέφη πάγου είναι αντιστρόφως ανάλογοι.

Τα επίγεια και τα αερομεταφερόμενα lidar μπορούν εύκολα να καθορίσουν σε τι φάση βρίσκεται ένα νέφος μετρώντας το λόγο αποπόλωσης. Όπως προαναφέρθηκε τα σφαιρικά σωματίδια νερού στα σύννεφα υδροσταγονιδίων δεν προκαλούν αποπόλωση στο σήμα του lidar ενώ τα σύννεφα πάγου προκαλούν σημαντική αποπόλωση η οποία μετράται στο λαμβανόμενο σήμα λόγω των τυχαίων προσανατολισμένων σωματιδίων παγοκρυστάλλων.

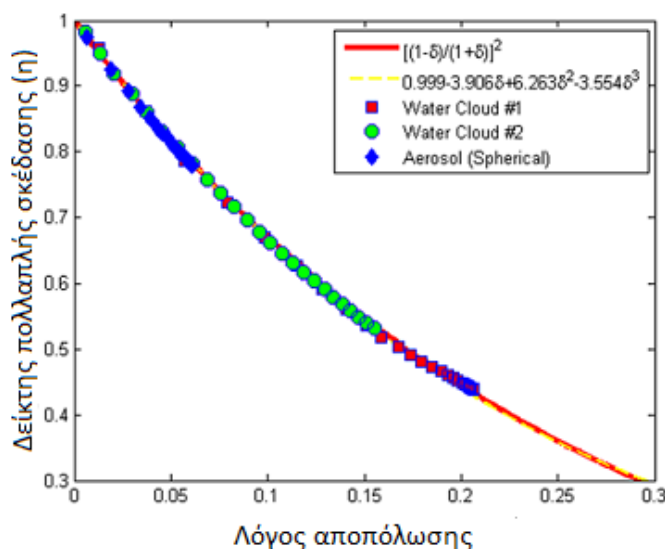
Ωστόσο τα διαστημικά lidars όπως είναι το CALIPSO μετρούν ένα μεγάλο σήμα αποπόλωσης λόγω της ύπαρξης πολλαπλών σκεδάσεων. Οι πολλαπλές σκεδάσεις λοιπόν μπορούν να εισάγουν ένα σημαντικό σφάλμα όσον αφορά στο καθορισμό της φάσης των στρωματώσεων των νεφών όταν γίνονται μέσω δορυφορικών μετρήσεων.

Προηγούμενες μελέτες (Monte Carlo simulation) έχουν δείξει πως ο λόγος αποπόλωσης  $\delta$  και ο δείκτης πολλαπλής σκέδασης  $\eta$  για σφαιρικά σωματίδια νερού και αρκετούς άλλους τύπους σωματιδίων συνδέονται με την παρακάτω σχέση:

$$\eta = 0,999 - 3,906\delta + 6,263\delta^2 - 3,554\delta^3 \quad (3.35)$$

ενώ μία άλλη πιο απλή και πιο ακριβής μορφή της σχέσης αυτής είναι:

$$\eta = \left(\frac{1-\delta}{1+\delta}\right)^2 \quad (3.36)$$



**Εικόνα 3.6** Σχέση δείκτη πολλαπλής σκέδασης και λόγου αποπόλωσης (Hu Yongiang, et al., 2007)

Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.6 αυτές οι δύο εκφράσεις δίνουν τα ίδια αποτελέσματα για όλα τα νέφη νερού που μετρήθηκαν με τον CALIPSO για τιμές του λόγου αποπόλωσης μικρότερες του 0,45.

Βέβαια δεν είναι πάντα εφικτό να υπολογιστεί ο λόγος lidar των νεφών απ' ευθείας από τις μετρήσεις του CALIPSO. Ωστόσο μπορούμε να μετρήσουμε το ενεργό λόγο του lidar  $L_{eff}$  και ισχύει (όπου  $L$  ο λόγος lidar):

$$L_{eff} = \frac{1-T^2}{2\gamma'} = \eta L \quad (3.37)$$

Εδώ το  $\gamma'$  είναι ο ολοκληρωμένος εξασθενημένος συντελεστής οπισθοσκέδασης στο συγκεκριμένο στρώμα (layer integrated attenuated backscatter) και  $T$  η διαπερατότητα της ατμόσφαιρας (PICASSO-CENA). Η ποσότητα  $\gamma'$  είναι ίση με:

$$\gamma'(r) = \int_0^r \beta'(r) dr \quad (3.38)$$

όπου 
$$\beta'(r) = \beta(r)T^2(r) \quad (3.39)$$

Για αδιαφανή στρώματα η διαπερατότητα είναι μηδέν, ενώ για ημιδιαφανή στρώματα η διαπερατότητα υπολογίζεται με τη βοήθεια του λόγου οπισθοσκέδασης της καθαρής ατμόσφαιρας κάτω από αυτό. Για τα νέφη νερού ο λόγος lidar  $L$  παίρνει τιμές πάντα πολύ κοντά στα 19 sr για μήκος κύματος 532nm. Συνεπώς από τις 3.36 και 3.37 συνεπάγετε πως ο λόγος αποπόλωσης και ο ενεργός λόγος lidar συνδέονται με την παρακάτω σχέση.

$$L_{eff} = 19 \left( \frac{1-\delta}{1+\delta} \right)^2 \quad (3.40)$$

Για τα νέφη νερού το φαινόμενο πολλαπλής σκέδασης είναι αρκετά ισχυρό και ο λόγος αποπόλωσης παίρνει τιμές  $\delta=0,2$  και δείκτης πολλαπλής σκέδασης τιμές μικρότερες του 0,45 ( $\eta < 0,45$ ). Οπότε ο ενεργός λόγος lidar θα παίρνει τιμές μικρότερες των 9sr πάντα με μετρήσεις στο ίδιο μήκος κύματος. Τα σύννεφα πάγου όμως παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές και για το λόγο αποπόλωσης ( $\delta=0,4$ ) και για τον ενεργό λόγο lidar ( $L_{eff}=17sr$ ). Τιμές του λόγου αποπόλωσης μεγαλύτερες από 0,7 είναι συνήθως χαρακτηριστικές τιμές για τις νιφάδες χιονιού.

Ωστόσο στα νέφη που υπάρχουν στρωματώσεις οριζοντίων προσανατολισμένων παγοκρυστάλλων ο λόγος αποπόλωσης και ο ενεργός λόγος lidar παίρνουν τιμές σημαντικά μικρότερες. Αυτό συμβαίνει επειδή η οπισθοσκέδαση από της στρωματώσεις αυτές είναι κυρίως κατοπτρική ανάκλαση και συνεπώς η πόλωση που έχει το προσπίπτον σήμα διατηρείται και προφανώς το μετρούμενο οπισθοσκεδαζόμενο σήμα δεν είναι αποπολωμένο. Ομοίως και ο λόγος lidar πλησιάζει την τιμή της μονάδας. Για τον συνδυασμό του εξαιρετικά πολωμένου οπισθοσκεδαζόμενου σήματος και του μικρού λόγου lidar αρκεί η παρουσία ενός μικρού ποσοστού προσανατολισμένων παγοκρυστάλλων. Η ύπαρξη αυτών των συνθηκών είναι ικανές να προκαλέσουν μεγάλη πτώση στις τιμές του λόγου αποπόλωσης και του ενεργού λόγου lidar στα νέφη πάγου. Οπότε για την διάκριση των σύννεφων πάγου και των νεφών νερού απαιτούνται περισσότερες πληροφορίες. Αυτές οι επιπλέον πληροφορίες μπορεί αν είναι το προφίλ του λόγου αποπόλωσης στο νέφος και η σχέση του με τον ενεργό λόγο lidar στην αρχή και το τέλος του.





## Κεφάλαιο 4

LIDAR ΑΠΟΠΟΛΩΣΗΣ ΕΜΠ





## 4.1 Τεχνική περιγραφή συστήματος του lidar του ΕΜΠ

Η διάταξη αποπόλωσης lidar που χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αγοράστηκε από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο στο πλαίσιο διασχολικών αναπτυξιακών προγραμμάτων του έτους 2010 από την εταιρεία Raymetrics A.E. Ανήκει στο Εργαστήριο Laser και Εφαρμογών τους, του Τομέα της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου[ΣΕΜΦΕ-ΕΜΠ]. Είναι εγκατεστημένη στις καινούργιες εγκαταστάσεις που δημιουργήθηκαν με σκοπό να φιλοξενήσουν τα συστήματα τηλεπισκόπησης laser του ΕΜΠ στον τέταρτο όροφο του κτιρίου Φυσικής του ΕΜΠ στην Αθήνα [37.5<sup>0</sup>N, 24.8<sup>0</sup>E, υψόμετρο 200m]. Το σύστημα αυτό σχεδιάστηκε για την μελέτη των αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες της αποπόλωσης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας laser από τα μόρια και τα αερολύματα. Τέθηκε σε λειτουργία για πρώτη φορά το φθινόπωρο του 2010.

Η διάταξη αποτελείται από τα ακόλουθα βασικά μέρη (Εικόνα 4.1):

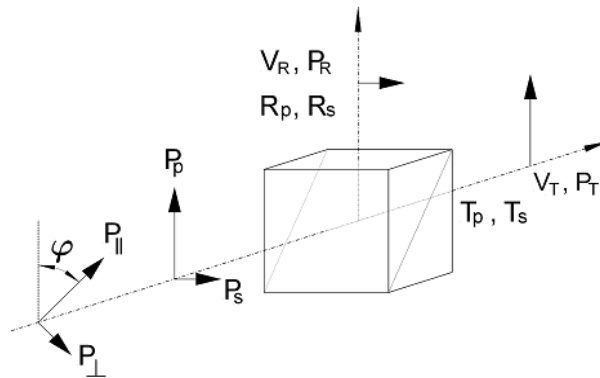
- Παλμική πηγή ακτινοβολίας laser (ND:YAG),
- Οπτική διάταξη εκπομπής της ακτινοβολίας laser (1064nm και 532nm),
- Διάταξη ανίχνευσης της ακτινοβολίας laser (532nm, πόλωση, αποπόλωση),
- Σύστημα καταγραφής και αποθήκευσης των δεδομένων lidar.



**Εικόνα 4.1** Φορητό σύστημα τηλεπισκόπησης laser (σύστημα lidar) μέτρησης/καταγραφής αερολυμάτων στο Εργαστήριο Φυσικής του ΕΜΠ. (Αριστερά εξωτερική άποψη, δεξιά το εσωτερικό της συσκευής)

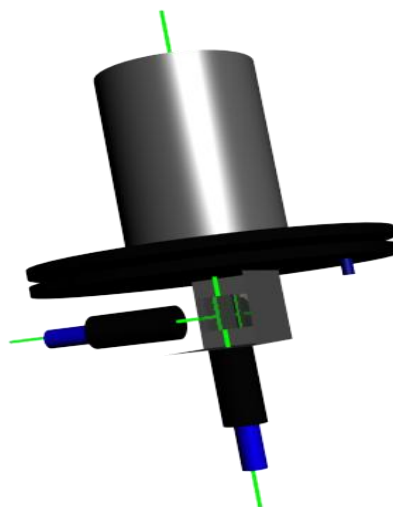
## 4.2 Διαδικασία βαθμονόμησης

Για τον προσδιορισμό του λόγου αποπόλωσης στη παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν δύο κανάλια ανίχνευσης, ένα για το παράλληλα πολωμένο φως και ένα για το κάθετα πολωμένο φως. Για τον διαχωρισμό της δέσμης χρησιμοποιήθηκε ένας πολωτικός διαχωριστής δέσμης (polarized beamsplitter cube PBC) ο οποίος όμως απαιτεί μια μικρή βαθμονόμηση. Ο PBC θα πρέπει να είναι «ευθυγραμμισμένος» με το επίπεδο πόλωσης της εκπεμπόμενης δέσμης και συνεπώς με την περιστροφή του κατά ένα επίπεδο πόλωσης θα μπορούσαμε να επιτύχουμε την τελική βαθμονόμηση του συστήματος.



**Εικόνα 4.2** Πολωτικός διαχωριστής δέσμης. (Freudenthaler .et. al., 2009)

Πρακτικά αυτό στο εργαστήριο επετεύχθη ως εξής: Οι φωτοπολλαπλασιαστές είναι τοποθετημένοι στο κάτω δίσκο όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3 και ο PBC βρίσκεται στο εσωτερικό του κάτω δίσκου. Οι δύο δίσκοι αυτοί εφάπτονται και ο κάτω έχει την δυνατότητα να περιστρέφεται. Αυτό μας δίνει την δυνατότητα να περιστρέφουμε μαζί με τον δίσκο και τον PBC για όσες μοίρες θέλουμε το οποίο μας επιτρέπει να επιτύχουμε την διαδικασία βαθμονόμησης -η οποία θα περιγραφεί παρακάτω- πολύ εύκολα (Εικόνα 4.3).



**Εικόνα 4.3** Μηχανισμός περιστροφής της διάταξης του PBC στο σύστημα lidar-αποπόλωσης στο ΕΜΠ.

Για την καλύτερη κατανόηση του τρόπου βαθμονόμησης του συστήματος lidar αποπόλωσης είναι σημαντικό να συσχετίσουμε την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος στην παράλληλη πόλωση και στην κάθετη πόλωση αναφορικά με το επίπεδο πόλωσης της εκπεμπόμενης δέσμης laser, με την γωνία  $\varphi$  που φαίνεται στην Εικόνα 4.2.

Έτσι θα έχουμε :

$$P_s(\varphi) = P_{//} \sin^2(\varphi) + P_{\perp} \cos^2(\varphi) \quad (4.1)$$

$$P_p(\varphi) = P_{//} \cos^2(\varphi) + P_{\perp} \sin^2(\varphi) \quad (4.2)$$

Οι δείκτες  $p$  και  $s$  αναφέρονται στην παράλληλη και στην κάθετη πόλωση στην εισερχόμενη δέσμη.

Ο PBC επιτρέπει στη παράλληλα πολωμένη δέσμη να περάσει και ανακλά την κάθετα πολωμένη δέσμη. Σε σχέση με αυτή την γωνία το κάθετα πολωμένο φως μπορεί να μετρηθεί στην ανακλώμενη δέσμη για  $\varphi=0^\circ$  ενώ για  $\varphi=90^\circ$  στην διερχόμενη δέσμη. Με τους δείκτες  $R$  και  $T$  αναφερόμαστε στην ανακλώμενη και στην διερχόμενη δέσμη, αντίστοιχα.

Ισχύει :

$$P_R(\varphi) = [P_p(\varphi)R_p + P_s(\varphi)R_s]V_R \quad (4.3)$$

$$P_T(\varphi) = [P_p(\varphi)T_p + P_s(\varphi)T_s]V_T \quad (4.4)$$

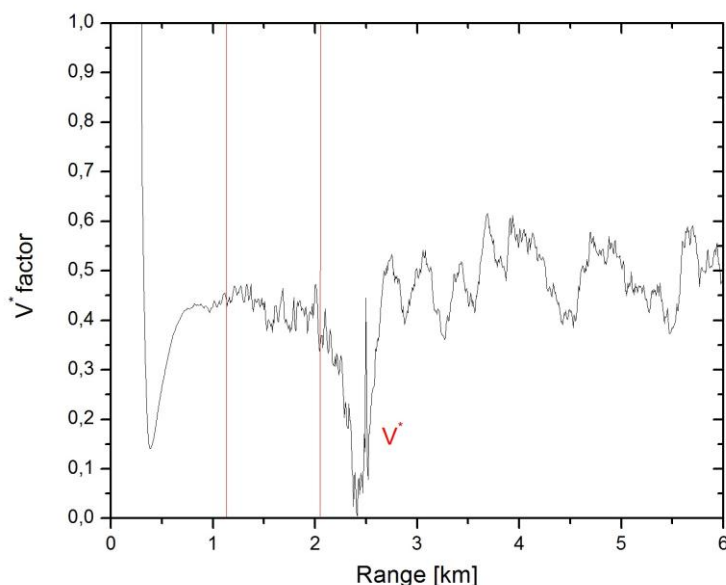
όπου  $V_R$  και  $V_T$  είναι οι παράγοντες ενίσχυσης στο κάθε κανάλι. Τα  $P_R$  και  $P_T$  είναι οι πραγματικές ποσότητες που μετράμε κατά την συλλογή των δεδομένων. Οι  $R_p$ ,  $R_s$ ,  $T_p$ ,  $T_s$ , είναι οι συντελεστές διαπερατότητας και ανακλαστικότητας για το παράλληλα και το κάθετα πολωμένο φως, αντίστοιχα. Οι συντελεστές αυτοί ορίζονται από τον κατασκευαστή και για το σύστημα lidar του ΕΜΠ οι τιμές των σταθερών αυτών έχουν τις τιμές:  $R_p=0.0500$ ,  $R_s=0.9900$   $T_p=0.9500$  και  $T_s=0.0100$ .

Στην συνέχεια ορίζουμε τα  $P^*$  και  $V^*$  ως εξής:

$$P^* = \frac{P_R(\varphi)}{P_T(\varphi)}, \quad (4.5)$$

$$V^* = \frac{V_R}{V_T} \quad (4.6)$$

Από την επεξεργασία των μετρήσεων που πήραμε στις 3 Μαΐου του 2011 με βάση ειδικό αλγόριθμο που έχει δημιουργηθεί από τον υποψήφιο διδάκτορα Κόκκαλη Παναγιώτη σε γλώσσα MatLab ορίσαμε την τιμή  $V^*$ .



**Εικόνα 4.4** Υπολογισμός τις τιμές του  $V^*$  για το σύστημα lidar-αποπόλωσης στο ΕΜΠ.

Έτσι ορίσαμε το  $V^*$  που μπορούμε να το δούμε στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 4.4). Το  $V^*$  υπολογίστηκε σύμφωνα με τις τιμές που παίρνει από το υψόμετρο των 1100m έως και ύψος λίγο μεγαλύτερο των 2000m (κατακόρυφες κόκκινες γραμμές στα αντίστοιχα ύψη). Σε αυτό το στρώμα της ατμόσφαιρας η τιμή του  $V^*$  έχει τη μικρότερη απόκλιση και παραμένει σχετικά σταθερή. Αυτό συμβαίνει, γιατί σε αυτό το ύψος η ατμόσφαιρα στη προκειμένη περίπτωση είναι λιγότερο επιβαρυνμένη από αιωρούμενα σωματίδια και πλησιάζει αρκετά την μοριακή ατμόσφαιρα. Μετά το ύψος των 2 km υπάρχει μία μικρή στρωμάτωση από αιωρούμενα σωματίδια (Εικόνα 4.5) που πιθανώς να είναι κάποιο μικρό σύννεφο το οποίο προκαλεί αυτή την πτώση της τιμής του  $V^*$ . Σε μεγαλύτερα ύψη οι τιμές του  $V^*$  κυμαίνονται από 0.4 έως 0.6 και αυτή η μεγάλη απόκλιση οφείλεται στην ύπαρξη της στρωμάτωσης των αιωρούμενων σωματιδίων στο ύψος των 2 km η οποία προκαλεί μείωση της ισχύς του λαμβανόμενου σήματος από ύψη μεγαλύτερα αυτής.

Από τις παραπάνω εξισώσεις παίρνουμε :

$$\delta^*(\varphi) = V^* \frac{[1 + \delta^v \tan^2(\varphi)]R_p + [\tan^2(\varphi) + \delta^v]R_s}{[1 + \delta^v \tan^2(\varphi)]T_p + [\tan^2(\varphi) + \delta^v]T_s} \quad (4.7)$$

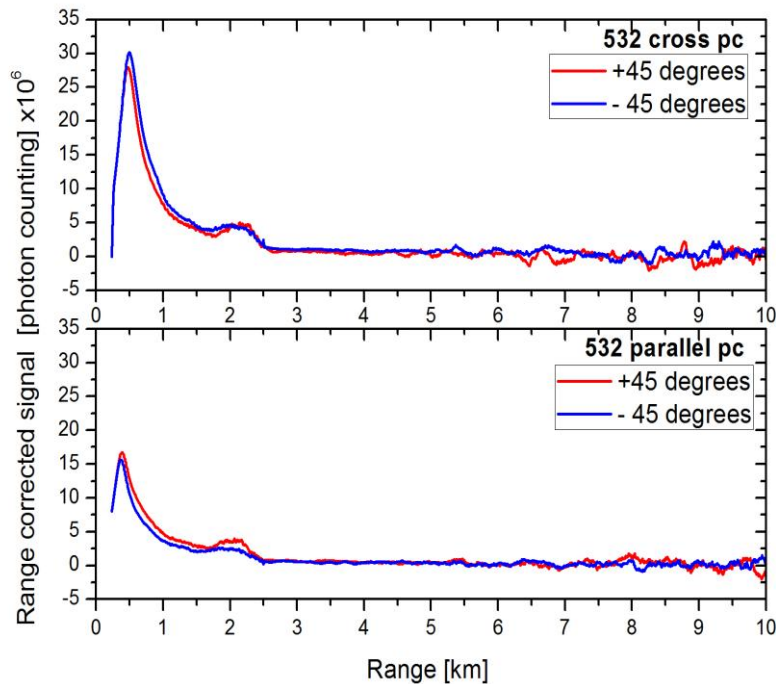
Συνεπώς θα ισχύει:

$$V^* = \frac{[1 + \delta^v \tan^2(\varphi)]T_p + [\tan^2(\varphi) + \delta^v]T_s}{[1 + \delta^v \tan^2(\varphi)]R_p + [\tan^2(\varphi) + \delta^v]R_s} \delta^*(\varphi) \quad (4.8)$$

Για  $\varphi=0^\circ$  από την εξίσωση 4.8 θα πάρουμε:

$$V^* = \frac{(T_p + \delta^v T_s)}{(R_p + \delta^v R_s)} \delta^*(0^\circ) \quad (4.9)$$

Με γνωστό το  $\delta^v$  σε κάποιο ύψος του σήματος lidar μπορούμε να υπολογίσουμε το  $V^*$  από την 4.9 και αυτό το ονομάζουμε 'βαθμονόμηση στις  $0^\circ$ ' (Freudenthaler .et. al., 2009). Αυτό μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας ως τιμή του  $\delta^v$  την τιμή του  $\delta^m$  (όπου  $\delta^m$  είναι ο λόγος αποπόλωσης για την μοριακή ατμόσφαιρα) σε ένα στρώμα της ελεύθερης τροπόσφαιρας που είναι καθαρό από αιωρούμενα σωματίδια ή παγοκρυστάλλους. Κατά την διαδικασία αυτή θα πρέπει να είμαστε ιδιαίτερα προσεκτικοί γιατί ακόμα και μία μικρή ποσότητα σκόνης ή παγοκρυστάλλων μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την τιμή του  $\delta^v$  και κατά συνέπεια και του  $V^*$ .



**Εικόνα 4.5** Το σήμα lidar για το κάθετα πολωμένο λαμβανόμενο σήμα (επάνω) και για το παράλληλα πολωμένο (κάτω).

Ένας άλλος τρόπος βαθμονόμησης είναι να περιστρέφουμε το PBC στις  $-45^\circ$  και στις  $+45^\circ$  και με παρόμοιο τρόπο να υπολογίζουμε τις άγνωστες σταθερές. Αυτή η μέθοδος ονομάζεται 'βαθμονόμηση στις  $\pm 45^\circ$ ', και με αυτόν τον τρόπο βαθμονομήσαμε και το σύστημα lidar-αποπόλωσης του ΕΜΠ. Σε αυτήν την περίπτωση εκμεταλλευόμαστε το γεγονός πως  $\tan^2(\pm 45^\circ)=1$  οπότε από τις 4.1 και 4.2

παίρνουμε πως  $P_s(+45^\circ)=P_s(-45^\circ)$  και  $P_T(+45^\circ)=P_T(-45^\circ)$  και από την 4.8 παίρνουμε (Freudenthaler .et. al., 2009):

$$V^* = \frac{(T_p + T_s)}{(R_p + R_s)} \delta^*(\pm 45^\circ) \quad (4.10)$$

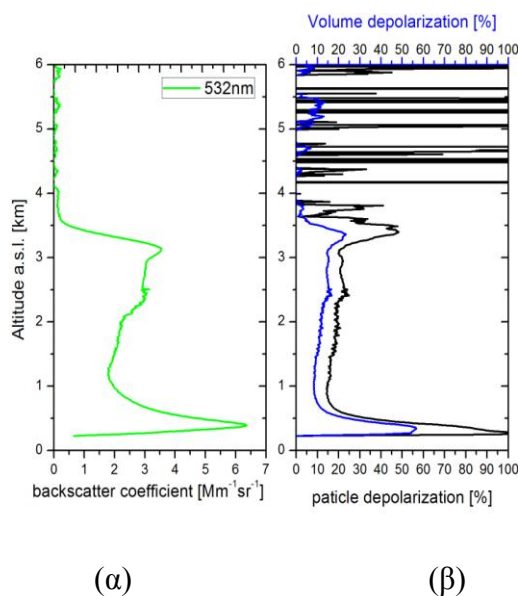
Στην Εικόνα 4.5 παρατηρούμε το σήμα lidar για το κάθετα πολωμένο λαμβανόμενο σήμα διορθωμένο με την απόσταση (επάνω) για τις  $\pm 45^\circ$  και το αντίστοιχο σήμα (κάτω) για το παράλληλα πολωμένο λαμβανόμενο σήμα. Στο ύψος των 2 km παρατηρούμε μια μικρή στρωμάτωση αιωρούμενων σωματιδίων. Επίσης, παρατηρούμε πως το σήμα όταν ο PBC έχει περιστραφεί κατά  $+ 45^\circ$  είναι ίδιο με το σήμα που λαμβάνουμε όταν ο PBC έχει περιστραφεί κατά  $-45^\circ$ , όπως προκύπτει και από τις εξισώσεις 4.1 και 4.2.

Έτσι, εφαρμόζοντας την τεχνική της βαθμονόμησης των  $\pm 45^\circ$ , και έχοντας βαθμονομήσει σωστά το lidar αποπόλωσης του ΕΜΠ θα παρουσιάσουμε συνοπτικά ορισμένα παραδείγματα εφαρμογής της μεθόδου lidar αποπόλωσης.

### 4.3 Εφαρμογή στη μελέτη του φαινομένου μεταφοράς ερημικής σκόνης από την έρημο Σαχάρα πάνω από το Λεκανοπέδιο της Αττικής.

Όπως ήδη έχει αναφερθεί το lidar αποπόλωσης έχει την δυνατότητα να εντοπίσει την ύπαρξη στρωματώσεων σκόνης στην ατμόσφαιρα και στη συγκεκριμένη υποενότητα θα μελετήσουμε το φαινόμενο μεταφοράς ερημικής σκόνης από την έρημο Σαχάρα στην περιοχή της Αττικής.

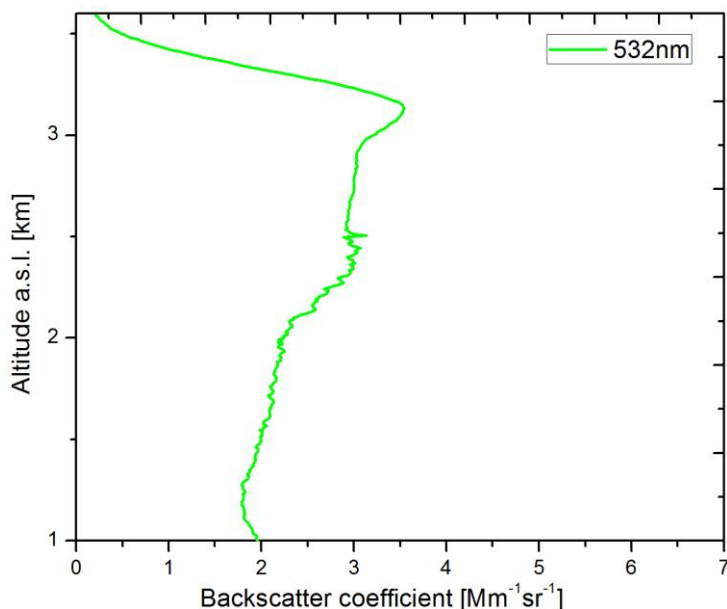
Στην Εικόνα 4.6 παρουσιάζουμε τον συντελεστή οπισθοσκέδασης, τον σωματιδιακό λόγο αποπόλωσης και τον λόγο αποπόλωσης όγκου από μετρήσεις που έγιναν 3 Μαΐου του 2011. Φαίνεται η ύπαρξη ερημικής σκόνης σε ύψος από 1100 m έως 3500 m.



**Εικόνα 4.6** (α) ο συντελεστής οπισθοσκέδασης (β) ο λόγος αποπόλωσης για τα σωματίδια(μαύρο) και ο συνολικός λόγος αποπόλωσης(μπλε)(03/05/2011).



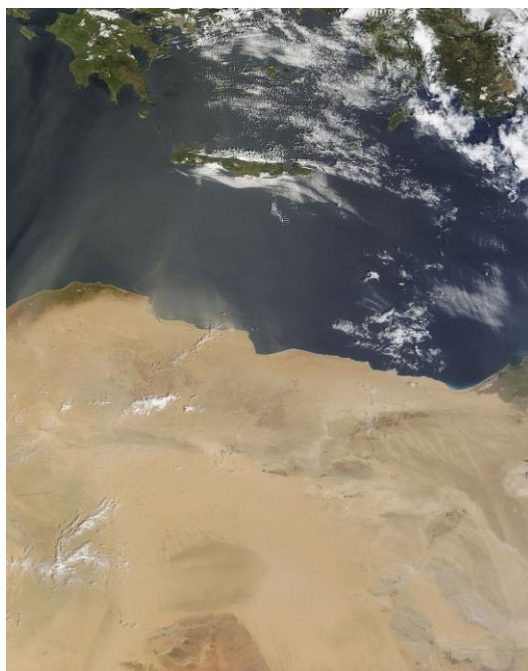
Στην Εικόνα 4.7 παρουσιάζουμε τον συντελεστή οπισθοσκέδασης αερολυμάτων σε σχέση με το ύψος, από 1000 m έως 3600 m. Παρατηρούμε πως η στρωμάτωση σκόνης από τα 1100 m έως και 2000 m περίπου παραμένει στα ίδια επίπεδα, ενώ η ύπαρξη σκόνης στην ατμόσφαιρα από τα 2000 m έως και τα 2500 m γίνεται πιο έντονη. Από τα 2500 m έως και τα 2900 m διατηρεί την ίδια συγκέντρωση και στην συνέχεια ακολουθεί ένα μέγιστο της συγκεντρώσεως σκόνης στο ύψος των 3100 m.



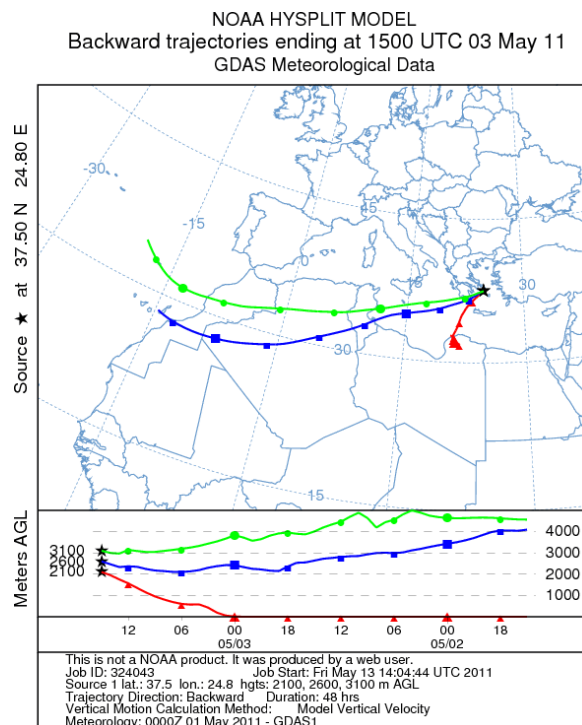
**Εικόνα 4.7** Ο συντελεστής οπισθοσκέδασης αερολυμάτων σε σχέση με το ύψος(03/05/2011).

Εδώ αξίζει να αναφερθούμε στο λόγο που επιλέγουμε να μετρήσουμε το λόγο οπισθοσκέδασης στο μήκος κύματος των 532nm και όχι στο μήκος κύματος των 1064nm που εκπέμπει και ένα Nd:YAG laser. Θα προτιμούσαμε να επιλέξουμε το μήκος κύματος  $\lambda=1064\text{nm}$  έναντι του  $\lambda=532\text{nm}$  λόγω της εντονότερης σκέδασης των σωματιδίων έναντι των μορίων. Επειδή όμως το μήκος κύματος  $\lambda=1064\text{nm}$  δεν διαθέτει κανάλι ανίχνευσης στην καταμέτρηση φωτονίων δεν μπορούμε να λάβουμε επαρκές σήμα σε ύψη μεγαλύτερα από 5-6km. Επομένως, προτιμάμε το  $\lambda=532\text{nm}$  το οποίο διαθέτει ένα τέτοιο κανάλι, συνεπώς, μπορούμε να λάβουμε σήματα από ακόμα μεγαλύτερα υψόμετρα.

Στην Εικόνα 4.8 μπορούμε να δούμε πως οι αέριες μάζες παρασύρουν σκόνη από την Σαχάρα και την κατευθύνουν πάνω από το Νότιο Αιγαίο, την Κρήτη, την Πελοπόννησο έως και την Αττική.



**Εικόνα 4.8** Δορυφορική εικόνα για την περιοχή της βορείου Αφρικής στο γεωγραφικό μήκος του ελλαδικού χώρου και της νότιας Ελλάδας(03/05/2011).(δορυφόρος MODIS) (<http://earthobservatory.nasa.gov>)



**Εικόνα 4.9** Οπισθοτροχιές των αέριων μαζών που καταλήγουν στο Λεκανοπέδιο της Αττικής στις 3 Μαΐου 2011 στις 15:00 UTC\*.

Στην Εικόνα 4.9 επίσης καταγράφουμε τις οπισθοτροχιές που έχουν ακολουθήσει οι αέριες μάζες για διάρκεια 48 ωρών οι οποίες έχουν καταλήξει στην περιοχή πάνω από το Λεκανοπέδιο την Αττικής στις 14:04 UTC στο ύψος των 3100m 2600m και 2100m με πράσινο μπλε και κόκκινο χρώμα αντίστοιχα στις 03/05/2011. Οι τροχιές που έχουν ακολουθήσει οι αέριες μάζες που κατέληξαν στην Αθήνα στο ύψος των 3100m και 2.600m είχαν ως αφετηρία την ευρύτερη περιοχή πάνω από τους κανάριους νήσους βορειοδυτικά της Αφρικής. Αυτές οι αέριες μάζες πέρασαν πάνω από την βορειοδυτική Σαχάρα σε σχετικά χαμηλά ύψη και είναι ικανές να παρασύρουν σκόνη. Η κόκκινη γραμμή ξεκινά από πολύ χαμηλό υψόμετρο νότια της Κρήτης και στην συνέχεια ανεβαίνει στο ύψος των 2100m πάνω από την αττική. (<http://ready.arl.noaa.gov>)

\*Για να μετατρέψουμε την ώρα UTC σε τοπική ώρα Ελλάδος προσθέτουμε 3 ώρες τους καλοκαιρινούς μήνες(θερινή ώρα) και 2 ώρες κατά την διάρκεια του χειμώνα (χειμερινή ώρα).



## Κεφάλαιο 5

### ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΟΡΓΑΝΟΥ DustTrak ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΤΩΝ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΩΝ





## 5.1 Εισαγωγή

Για την καταγραφή της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων και των ιδιοτήτων τους υπάρχουν πολλές επίγειες τεχνικές. Οι επίγειες τεχνικές διακρίνονται στις παθητικές, στις ενεργητικές και τις επιτόπιες (in situ). Στις παθητικές τεχνικές ανιχνεύεται η ακτινοβολία (ηλιακή ή γήινη) από ένα δέκτη, ενώ στις ενεργητικές τεχνικές εκπέμπεται μια δέσμη φωτός και ανιχνεύεται, ακολούθως, η οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία από ένα δέκτη. Στο παρακάτω κεφάλαιο θα επεξεργαστούμε μετρήσεις που έχουν ληφθεί με τη χρήση του οργάνου DustTrak. Στις επόμενες δύο παραγράφους θα αναφερθούμε πιο διεξοδικά στο όργανο αυτό.

## 5.2 Περιγραφή του οργάνου DustTrak

Το όργανο μέτρησης της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων DustTrak είναι μία φορητή συσκευή εξοπλισμένη με σύστημα σκέδασης ακτίνας Laser με την οποία μπορούμε να προσδιορίσουμε την συγκέντρωση των  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  και των  $PM_1$  σε πραγματικό χρόνο, σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους. (Εικόνα 5.1)

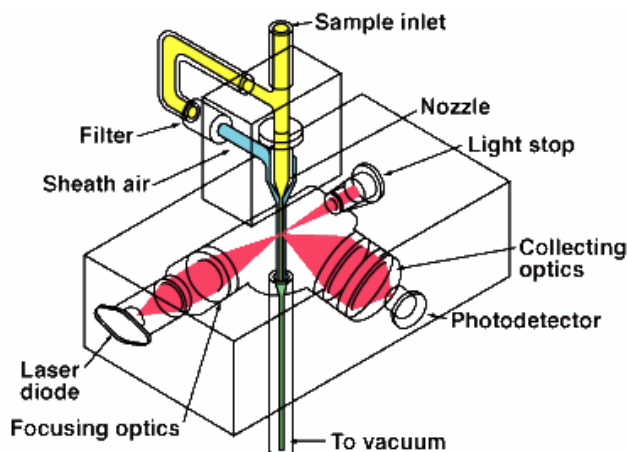
Ο κύριος μηχανισμός του οργάνου προστατεύεται από ένα αδιάβροχο κουτί που είναι εφοδιασμένο με ένα σύστημα παγίδευσης της ατμοσφαιρικής υγρασίας, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα να εκτίθεται σε ποικίλες καιρικές συνθήκες και να εκτελεί μετρήσεις αερολυμάτων με συγκεκριμένη ακρίβεια. Από ένα μεταλλικό σωλήνα ο οποίος είναι προσαρμοσμένος εξωτερικά στο κουτί προστασίας συλλέγονται μέσω μίας αντλίας τα αιωρούμενα σωματίδια τα οποία κατόπιν περνούν από μία κεφαλή που επιτρέπει τη διέλευση σωματιδίων συγκεκριμένης διαμέτρου. Η μνήμη του οργάνου είναι αρκετή ώστε να καταγράφει και να αποθηκεύει μετρήσεις αρκετών εβδομάδων ακόμα και αν οι μετρήσεις είναι συχνές.



**Εικόνα 5.1** Αριστερά, το DustTrak για εξωτερικούς χώρους (εσωτερική άποψη) και δεξιά, για εσωτερικούς χώρους.

### 5.3 Αρχή λειτουργίας DustTrak

Η αρχή λειτουργίας του DustTrak βασίζεται στην σκέδαση ακτινοβολίας ενός διοδικού laser από τα μετρούμενα αερολύματα. Έτσι, το DustTrak αποτελείται από: ένα σωλήνα που συλλέγει το δείγμα του μελετώμενου αέρα, μέσω μίας αντλίας, ένα θάλαμο όπου το δείγμα αέρα ακτινοβολείται και μια πηγή διοδικού laser που χρησιμοποιείται για την ακτινοβολία του δείγματος με μήκος κύματος ακτινοβολίας laser στα 780 nm. Επίσης, χρησιμοποιείται ένα σύστημα από φακούς και φίλτρα, και ένας φωτοανιχνευτής που μετατρέπει το ανιχνευόμενο οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό. Στην Εικόνα 6.2 παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας του οργάνου.



**Εικόνα 5.2:** Απεικόνιση των διάφορων τμημάτων του οργάνου DustTrak

Ο κάθετος στύλος του DustTrak χρησιμεύει στην δειγματοληψία του μελετούμενου αέρα. Έτσι, ένα μέρος από το συλλεγόμενο δείγμα αέρα οδηγείται απευθείας στο θάλαμο μέτρησης του οργάνου, με συνεχή ροή αέρα με τη βοήθεια μιας μηχανικής αντλίας διαφράγματος. Το υπόλοιπο μέρος του δείγματος αέρα διέρχεται από ένα φίλτρο αερολυμάτων (Εικόνα 5.2) Επιπλέον, προστατεύονται τα οπτικά μέρη του οργάνου από την επικάλυψη σωματιδίων, ενώ παράλληλα βελτιώνεται και ο χρόνος απόκρισης του οργάνου σε ξαφνικές αλλαγές της συγκέντρωσης των σωματιδίων. Ο φιλτραρισμένος αέρας από σωματίδια, τελικά, οδηγείται και αυτός στο θάλαμο μέτρησης προκειμένου να περιβάλλει το αφιλτράριστο ρεύμα αέρα και, έτσι, να περιορίσει την ανταλλαγή μορίων με το περιβάλλον. Τελικά ο αντλούμενος αέρας ακτινοβολείται από την δέσμη laser. Τα αιωρούμενα σωματίδια του αέριου δείγματος σκεδάζουν την ακτινοβολία προς όλες τις κατευθύνσεις (σκέδαση Mie). Ένα σύστημα φακών συλλέγει την κάθετα σκεδαζόμενη ακτινοβολία laser και την εστιάζει σε έναν φωτοανιχνευτή. Ακολούθως το ηλεκτρικό σήμα εξόδου του φωτοανιχνευτή ενισχύεται και καταγράφεται σαν μια ηλεκτρική τάση η οποία είναι ανάλογη της συγκέντρωσης της μάζας των σκεδαζόντων αερολυμάτων, με τη χρήση μίας εσωτερικής σταθεράς βαθμονόμησης. Η εμπρόσθια σκεδαζόμενη ακτινοβολία συλλέγεται από μια παγίδα ακτινοβολίας. Η εσωτερική σταθερά βαθμονόμησης καθορίζεται εργαστηριακά με την χρήση μιας γνωστής συγκέντρωσης σωματιδίων.



Τα όργανα καταγραφής της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας Laser ανταποκρίνονται γραμμικά με την συγκέντρωση μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων. Αυτό σημαίνει πως εάν ένα σωματίδιο σκεδάξει μία ποσότητα ακτινοβολίας, δέκα αιωρούμενα σωματίδια θα σκεδάσουν δέκα φορές ισχυρότερα αυτήν την ποσότητα αερολυμάτων. Η ένταση του προσπίπτοντος φωτός στον ανιχνευτή εξαρτάται επιπλέον, και από το μέγεθος του σκεδαζόντος σωματιδίου. Αυτή η εξάρτηση είναι μεγαλύτερη για σωματίδια με διάμετρο ( $d$ ) μικρότερη από το ένα τρίτο του μήκους κύματος του Laser ( $\sim 0.25\mu\text{m}$ ). Για τα μικρά σωματίδια η ένταση του σκεδαζόμενου φωτός μειώνεται σαν κλάσμα της έκτης δύναμης της διαμέτρου του ( $d^6$ ). Έτσι, το μικρότερο σωματίδιο που μπορεί να ανιχνευτεί με το Laser του DustTrak ( $\lambda = 780\text{ nm}$ ) είναι περίπου  $0.1\mu\text{m}$ . Η ένταση του σκεδαζόμενου φωτός επίσης εξαρτάται από το δείκτη διάθλασης και την απορροφητικότητα των σωματιδίων. Η ελαφριά διασπορά από τα μόρια μπορεί να μοντελοποιηθεί από μαθηματική άποψη χρησιμοποιώντας ένα σύνθετο σύνολο εξισώσεων βασισμένων στη θεωρία διασποράς Mie για μικρά σωματίδια.

Σύμφωνα με την θεωρία της σκέδασης Mie σημαντικό ρόλο παίζει το μέγεθος του σωματιδίου που σκεδάζει την ακτινοβολία σε σχέση με το μήκος κύματος  $\lambda$  της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Επίσης σημαντικό ρόλο παίζουν οι οπτικές ιδιότητες των σωματιδίων που σχετίζονται με τον δείκτη διάθλασής τους  $N$ , ο οποίος είναι συνάρτηση του μήκους κύματος:  $N = n + ik$  (εδώ, ο δείκτης  $n$  είναι το πραγματικό μέρος του δείκτη διάθλασης και συνδέεται με την ταχύτητα του φωτός στο υλικό μέσο, ενώ ο δείκτης  $k$  είναι ένδειξη της απορροφητικότητας του υλικού του σωματιδίου αυτού). Όπως προαναφέρθηκε, η ένταση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας δίνεται από τη σχέση:  $F_{\text{scat}} = C_{\text{scat}} * F_0$ , όπου  $F_0$  είναι η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η ένταση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας από τα σωματίδια αυτά κατανέμεται στον χώρο ανάλογα με τις διαστάσεις και το σχήμα των σκεδαζόντων αιωρούμενων σωματιδίων.

Το όργανο ελέγχου DustTrak έχει εργαστηριακά βαθμονομηθεί με χρήση πρότυπων αιωρούμενων σωματιδίων (τυπικά της περιοχής της Αριζόνα) που αποτελούνται από σωματίδια διαφόρων μεγεθών αντιπροσωπευτικών μιας ερημικής περιοχής. Το ευρύ φάσμα των μεγεθών αερολυμάτων που χρησιμοποιούνται κατά την διαδικασία βαθμονόμησης είναι ιδανικό για τον υπολογισμό του μέσου όρου της εξάρτησης της συγκέντρωσης των αερολυμάτων από το λαμβανόμενο ηλεκτρικό σήμα από τον φωτοανιχνευτή.

Ο μελετούμενος όγκος αέρα του DustTrak είναι σταθερός και καθορίζεται από τη διατομή του ρεύματος αέρα και την ακτίνα Laser. Η μάζα των σωματιδίων καθορίζεται από την ένταση του σκεδαζόμενου φωτός μέσα στο σταθερό μελετούμενο όγκο. Δεδομένου ότι ο όγκος αυτός είναι γνωστός, οι πληροφορίες μπορούν να μετατραπούν εύκολα από το μικροεπεξεργαστή του οργάνου σε συγκέντρωση αερολύματος ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

## **5.4 Μετρήσεις και επεξεργασία ατμοσφαιρικών παραμέτρων και αιωρούμενων σωματιδίων**

Οι μετρήσεις των βασικών ατμοσφαιρικών παραμέτρων και των αιωρούμενων σωματιδίων στην περιοχή των εγκαταστάσεων του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου στην περιοχή Ζωγράφου (κτίριο Φυσικής) πραγματοποιήθηκαν κατά την χρονική περίοδο: 01-09-2010 έως 04-11-2010. Ειδικότερα, οι μετρήσεις αυτές περιέλαβαν:

- την καταγραφή της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων  $PM_{10}$
- την καταγραφή των βασικών μετεωρολογικών παραμέτρων (θερμοκρασία, πίεση, ταχύτητα, διεύθυνση ανέμου και σχετική υγρασία).

Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν τα αποτελέσματα της συγκέντρωσης των  $PM_{10}$  και θα εξεταστεί η εξάρτησή τους από τις μετεωρολογικές παρατηρήσεις.

### **5.4.1 Συγκέντρωση των $PM_{10}$ στην ευρύτερη περιοχή του Ζωγράφου**

Η διακύμανση των τιμών της συγκέντρωσης των  $PM_{10}$  εξαρτάται από τις μετεωρολογικές συνθήκες, την προέλευση των αντίστοιχων εκπομπών όπως και τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Οι διάφοροι πιθανοί συνδυασμοί των προαναφερθέντων τριών παραγόντων σε κάθε περιοχή, μπορούν είτε να ευνοούν τη συσσώρευση ρύπων, είτε να προκαλούν τον φυσικοχημικό μετασχηματισμό των ρύπων στην ατμόσφαιρα δημιουργώντας νέους ρύπους, είτε να συμβάλλουν στην απομάκρυνση τους.

Επιπλέον οι μετεωρολογικοί παράμετροι που παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση των επιπέδων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι:

- η διεύθυνση του ανέμου,
- η ευστάθεια της ατμόσφαιρας που συνδέεται με την θερμοκρασία,
- η ηλιοφάνεια (κυρίως για τους φωτοχημικούς ρύπους)
- η βροχόπτωση,
- η σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας
- και έμμεσα η θερμοκρασία.

Οι κύριες πηγές των αερίων ρύπων στην ευρύτερη περιοχή του Ζωγράφου αναφορικά με τα αιωρούμενα σωματίδια  $PM_{10}$  περιλαμβάνουν τέσσερις διαφορετικές συνιστώσες που ανήκουν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τις τοπικές πηγές και τις υπέρ-τοπικές πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Να σημειωθεί εδώ πως όλη η επεξεργασία των μετρήσεων έγινε σε ώρες UTC εκτός σε ορισμένες περιπτώσεις στις οποίες και το αναφέρουμε.

#### **Τοπικές πηγές σωματιδιακής αέριας ρύπανσης**

Οι τοπικές πηγές σωματιδιακής αέριας ρύπανσης περιλαμβάνουν κυρίως τη βιομηχανική δραστηριότητα, τις ενδεχόμενες δασικές πυρκαγιές και τις μεταφορές.

### Αστική περιοχή

Οι εγκαταστάσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου βρίσκονται στη περιοχή του Ζωγράφου η οποία τοποθετείται ανατολικά του κέντρου της Αθήνας. Η Αθήνα είναι μια μεγαλούπολη η οποία σύμφωνα με την απογραφή του 2001 κατοικείται από 3.2 εκατομμύρια κατοίκους. Συνεπώς η ανθρώπινη δραστηριότητα είναι σημαντικά έντονη και ικανή να επηρεάσει την συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων στην ευρύτερη περιοχή των Αθηνών. Περιβάλλεται από πολλές βιομηχανικές περιοχές οι οποίες συνεισφέρουν και αυτές με την σειρά τους στην επιβάρυνση της ατμόσφαιρας. Για παράδειγμα στην Εικόνα 5.3 βλέπουμε πως κάτω από συγκεκριμένες μετεωρολογικές συνθήκες μπορεί ο σωματιδιακός φόρτος πάνω από την βιομηχανική περιοχή της Ελευσίνας να μεταφερθεί στο κέντρο των Αθηνών και να επηρεάσει σημαντικά τα επίπεδα συγκέντρωσης ατμοσφαιρικών ρύπων.



**Εικόνα 5.3** Χάρτης προσομοίωσης της μεταφοράς ρύπων από την περιοχή της Ελευσίνας προς την Αθήνα. Ο πράσινος χρωματισμός αντιστοιχεί στο νέφος των ρύπων που μεταφέρεται από τους ανέμους προς τις διάφορες περιοχές του λεκανοπεδίου. Φαίνεται πως η μεταφορά αυτή μπορεί να επηρεάσει κάτω από κατάλληλες συνθήκες ακόμα και το κέντρο των Αθηνών. (<http://www.meteo.noa.gr/>)

### Καύση βιομάζας

Η καύση βιομάζας συμβαίνει, κυρίως, κατά τη διάρκεια μιας δασικής πυρκαγιάς, οπότε και έχουμε την έκλυση στην ατμόσφαιρα μεγάλων ποσοτήτων από αιωρούμενα σωματίδια που αποτελούνται κυρίως από οργανικό άνθρακα (OC: organic carbon) και αιθάλη (BC: black carbon).

### Μετακινήσεις

Η περιοχή όπου τοποθετήθηκαν τα όργανα βρίσκεται στο ανατολικό τμήμα της πόλης της Αθήνας, μέσα στον αστικό ιστό και πλαισιώνονται από ένα δίκτυο αυτοκινητόδρομων συχνής κυκλοφορίας. Οι κυριότεροι αυτών είναι η περιφερειακή Υμηττού και η λεωφόρος Κατεχάκη. Η εκπομπή καυσαερίων από τις εξατμίσεις των αυτοκινήτων και μοτοσυκλετών, συμβάλλουν, τοπικά, στην αύξηση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων. Επίσης, οι εγκαταστάσεις του Εθνικού

Μετσόβιου Πολυτεχνείου στεγάζουν καθημερινά πλήθος εργαζομένων και φοιτητών οι οποίοι με την σειρά τους συνεισφέρουν στην αύξηση των σωματιδιακών ρύπων τοπικά χρησιμοποιώντας τα μέσα μεταφοράς τους. Ο κυκλοφοριακός φόρτος, όπως θα γίνει φανερό, είναι η κύρια πηγή αιωρούμενων σωματιδίων.

#### Υπερ-τοπικές πηγές σωματιδιακής αέριας ρύπανσης

Στις υπερ-τοπικές πηγές σωματιδιακής αέριας ρύπανσης περιλαμβάνονται οι ερημικές περιοχές (π.χ. έρημος Σαχάρα), η πιθανή καύση βιομάζας (π.χ. δασικές πυρκαγιές), οι έντονες βιομηχανικές δραστηριότητες, οι ηφαιστειακές εκρήξεις, κ.τ.λ. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι υπερ-τοπικές πηγές ρύπανσης, όπως είναι η έρημος Σαχάρα, αποτελούν πολύ σημαντική πηγή αερολυμάτων (*Parayannis et al.*, 2005), κυρίως μεγάλης διαμέτρου ( $PM_{10}$ ), τα οποία μπορούν να ανιχνευθούν σε πολύ μεγάλες αποστάσεις από το σημείο έκλυσης (*Parayannis et al.*, 2008).

Ειδικά για το Λεκανοπέδιο της Αθήνας ισχύουν τα παρακάτω (Εκθεση Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., 2005). Η τοπογραφία του λεκανοπεδίου της Αθήνας είναι κλειστή, δυσχεραίνοντας έτσι την ατμοσφαιρική κυκλοφορία και τον αερισμό, συνεπώς και την διάχυση των ρύπων λόγω της ύπαρξης ορεινών όγκων. Οι κλιματολογικοί παράγοντες όπως η μεγάλη συχνότητα θερμοκρασιακών αναστροφών, η μεγάλη διάρκεια ηλιοφάνειας, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και οι υψηλές θερμοκρασίες ευνοούν τη συσσώρευση ρύπων και την δημιουργία δευτερογενών ρύπων.

#### **5.4.2 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων μέτρησης της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων $PM_{10}$ στην περιοχή του Ζωγράφου**

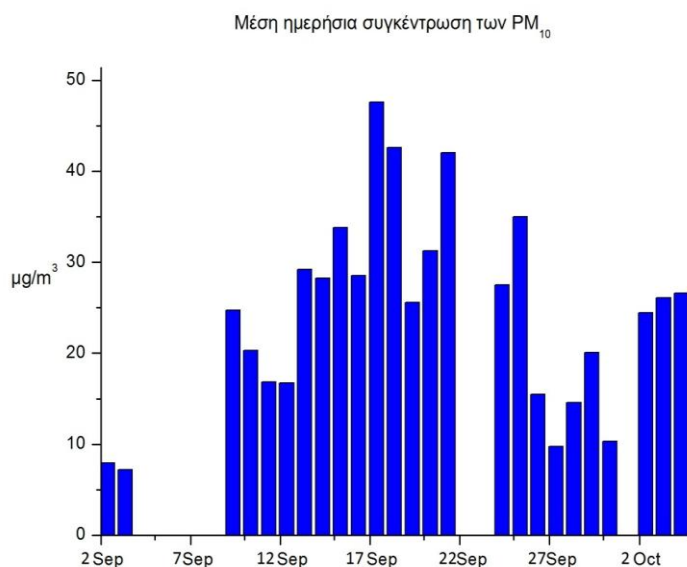
Τα κύρια στατιστικά αποτελέσματα (ελάχιστη, μέγιστη και μέση τιμή της συγκέντρωσης καθώς και η τυπική απόκλιση της, σε  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) που προέκυψαν από τις μετρήσεις των σωματιδίων  $PM_{10}$  παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1 που ακολουθεί. Αναφέρονται, ξεχωριστά, τα στοιχεία που προέκυψαν για τρεις περιπτώσεις: για όλες τις ημέρες των μετρήσεων, για τις ημέρες των μετρήσεων όπου δεν παρατηρήθηκε μεταφορά σκόνης από την έρημο Σαχάρα προς την ευρύτερη περιοχή της Αττικής και μόνο για τις ημέρες που παρατηρήθηκε το συγκεκριμένο φαινόμενο. Για κάθε περίπτωση υπολογίζουμε τα στατιστικά στοιχεία για το σύνολο των μετρήσεων και παράγουμε επίσης τα ίδια δεδομένα για τη μέση ωριαία συγκέντρωση των  $PM_{10}$  για όλη την περίοδο των μετρήσεων.

Στον Πίνακα 5.1 παρατηρούμε ότι αναφορικά με τα  $PM_{10}$  για όλες τις ημέρες των μετρήσεων (02/9/2010 έως 4/10/2010) η μέση συγκέντρωση των αερολυμάτων ήταν  $25.19 \pm 13.23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ενώ το εύρος των τιμών της συγκέντρωσης κυμάνθηκε από 0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  έως 83  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Εάν εξαιρεθούν οι ημέρες κατά τις οποίες έχουμε μεταφορά σκόνης από την έρημο Σαχάρα, για την ίδια χρονική περίοδο, η μέση τιμή συγκέντρωσης των  $PM_{10}$  που καταγράφηκε ήταν  $23.83 \pm 13.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ενώ το εύρος των τιμών της συγκέντρωσης και στην περίπτωση αυτή, κυμάνθηκε από 0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  έως 83  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η μέση τιμή συγκέντρωσης για τις ημέρες που είχαμε μεταφορά σκόνης από την έρημο Σαχάρα ήταν  $29.49 \pm 12.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ενώ το εύρος των τιμών της συγκέντρωσης στην περίπτωση αυτή, κυμάνθηκε από 0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  έως 69  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

**Πίνακας 5.1:** Στατιστικά στοιχεία (ελάχιστη, μέγιστη, μέση τιμή και τυπική απόκλιση) για τις συγκεντρώσεις των αερολυμάτων PM<sub>10</sub> που μετρήθηκαν στην ευρύτερη περιοχή του Ζωγράφου(02/9/2010 έως 04/10/2010).

Συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων	Ελάχιστη τιμή συγκέντρωσης (μg/m <sup>3</sup> )	Μέγιστη τιμή συγκέντρωσης (μg/m <sup>3</sup> )	Μέση τιμή συγκέντρωσης (μg/m <sup>3</sup> )	Τυπική απόκλιση συγκέντρωσης (μg/m <sup>3</sup> )
PM <sub>10</sub> (όλες τις ημέρες)	0	83	25.19	13.23
Ομοίως για την μέση ωριαία συγκέντρωση	1.95	60.78	25.05	12.85
PM <sub>10</sub> (ημέρες χωρίς Σαχάρα)	0	83	23.83	13.28
Ομοίως για την μέση ωριαία συγκέντρωση	1.95	60.78	23.61	12.96
PM <sub>10</sub> (ημέρες με Σαχάρα)	5	69	29.49	12.12
Ομοίως για την μέση ωριαία συγκέντρωση	7.85	57.38	29.51	11.40

Παρατηρούμε ότι ο μέσος όρος συγκέντρωσης των σωματιδίων διαφέρει για τις ημέρες που έχουμε μεταφορά σκόνης από την Σαχάρα με τις ημέρες που δεν παρατηρείτε το συγκεκριμένο φαινόμενο όπως διαφέρει και για το σύνολο των ημερών. Πιο συγκεκριμένα για τις ημέρες χωρίς μεταφορά σκόνης η μέση τιμή συγκέντρωσης των αερολυμάτων είναι 23.83±13.28 μg/m<sup>3</sup> ενώ για τις ημέρες που παρατηρήθηκε το φαινόμενο είναι σημαντικά μεγαλύτερη στην τιμή 29.49±12.12 μg/m<sup>3</sup>. Η αύξηση αυτή είναι της τάξεως του 23.8%. Συμπεραίνουμε πως το φαινόμενο αυτό είναι αρκετό ώστε να επηρεάσει σημαντικά την συγκέντρωση των PM<sub>10</sub>. Θα αναφερθούμε περαιτέρω σε συγκεκριμένες ημέρες της περιόδου των μετρήσεων όσον αφορά στο φαινόμενο αυτό σε άλλη υποενότητα.



**Εικόνα 5.4** Μέση ημερήσια συγκέντρωση των PM<sub>10</sub>

Στην Εικόνα 5.3 παρατηρούμε στο ραβδόγραμμα την μέση ημερήσια τιμή για όλες τις ημέρες σε όλη την περίοδο των μετρήσεων. Σύμφωνα με την ευρωπαϊκή ένωση το ημερήσιο όριο της συγκέντρωσης των PM<sub>10</sub> είναι 50µg/m<sup>3</sup> με ανώτερο όριο υπερβάσεων τις 35 ημέρες το χρόνο και το ετήσιο όριο είναι 40µg/m<sup>3</sup>. Καθ όλη την διάρκεια των μετρήσεων δεν παρατηρήθηκε καμία υπέρβαση των ορίων που θεσπίζει η Ευρωπαϊκή Ένωση. Οι ημέρες που παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη συγκέντρωση των PM<sub>10</sub> είναι οι 17/09, 18/09, 21/09 και 25/09 με συγκεντρώσεις πάνω από 35µg/m<sup>3</sup>. Ενώ τις ημέρες 2/09, 3/09, 27/09 και 30/09 οι συγκεντρώσεις των PM<sub>10</sub> δεν ξεπέρασαν τα 10µg/m<sup>3</sup>.

#### 5.4.2.1 Συσχέτιση της συγκέντρωσης των PM<sub>10</sub> και της σχετικής υγρασίας

Για να μελετήσουμε στην πράξη την συσχέτιση υγρασίας και συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων υπολογίσαμε τον μέσο ωριαίο όρο της συγκέντρωσης των PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>) και της σχετικής υγρασίας (%) ανά ώρα για όλες τις ημέρες της περιόδου των μετρήσεων όπως και για όλη την περίοδο των μετρήσεων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα (Εικόνα 5.5α, 5.5β, 5.5γ, 5.5δ, 5.5ε)

Οι κατακόρυφες κινήσεις του αέρα επηρεάζουν την ανάμειξη των ρύπων. Ιδιαίτερα οι ακανόνιστες ανοδικές/καθοδικές κινήσεις που επικρατούν στο στρώμα ανάμειξης μπορούν να μεταφέρουν και να αναμείξουν τους ρύπους γρήγορα και αποτελεσματικά. Η κατακόρυφη ανάμειξη των ρύπων έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της μέσης συγκέντρωσής τους.

Κατακόρυφες κινήσεις στην ατμόσφαιρα μπορεί να προκληθούν από πολλές αιτίες. Για παράδειγμα μπορούμε να αναφέρουμε τον αέρα που αναγκάζεται να ανέλθει όταν συναντά κάποιο τοπογραφικό εμπόδιο καθώς και τις ανοδικές/καθοδικές κινήσεις οι οποίες αναπτύσσονται σε συνδυασμό με βαρομετρικά χαμηλά/υψηλά. Όταν η ατμόσφαιρα τείνει να καταστείλει αυτές τις κινήσεις λέμε ότι επικρατεί ευστάθεια

ενώ όταν αυτές οι κινήσεις ενισχύονται λέμε ότι η ατμόσφαιρα βρίσκεται σε κατάσταση αστάθειας.

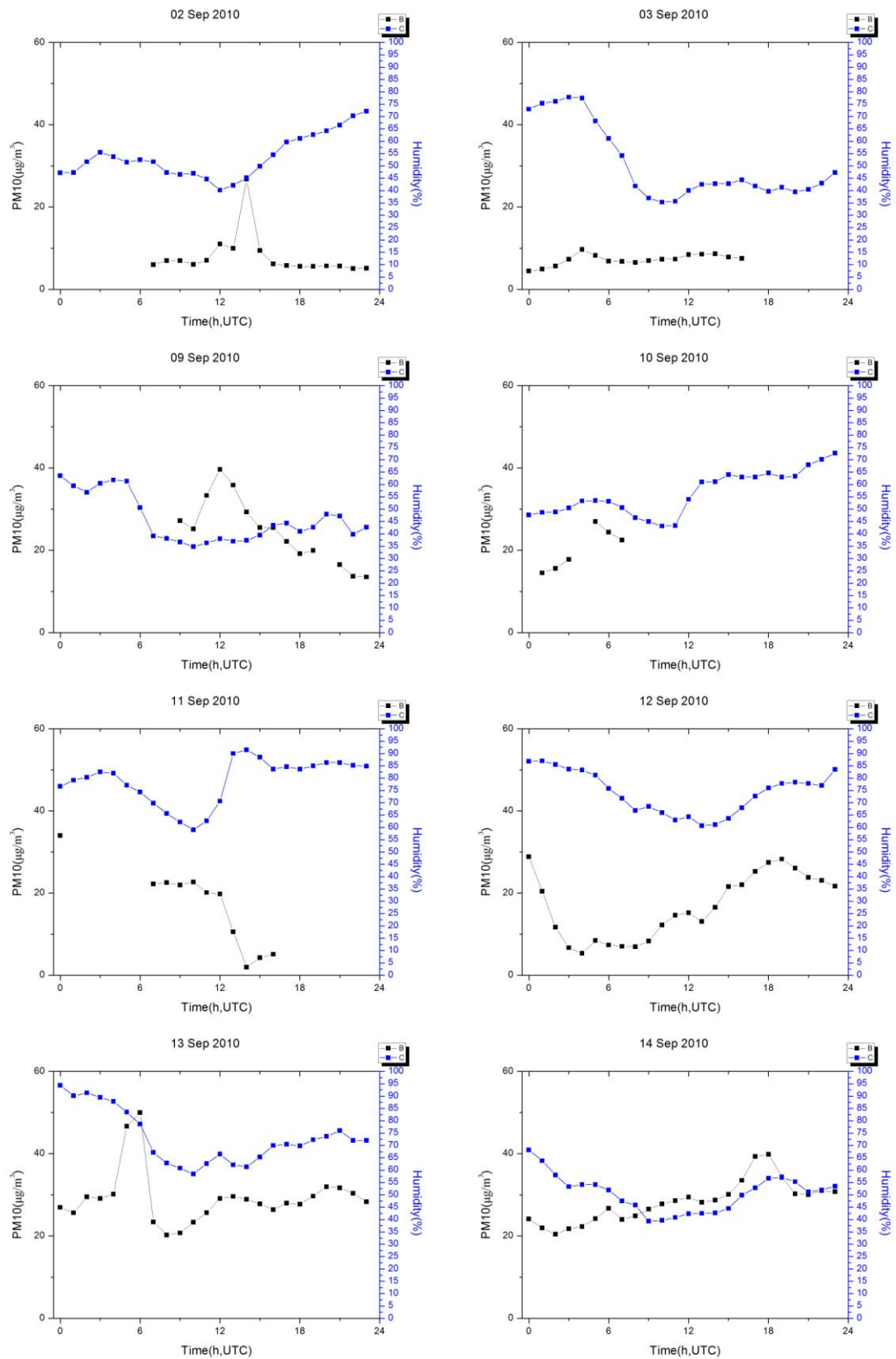
Την νύχτα αναπτύσσεται συνήθως μια αναστροφή η οποία διαρκεί μέχρι τις πρωινές ώρες. Η αναστροφή εμποδίζει την κατακόρυφη μεταφορά ρύπων οι οποίοι εξαπλώνονται κατά κύριο λόγο στο οριζόντιο. Συνεπώς σε αστικές περιοχές όπως το Λεκανοπέδιο της Αθήνας μια θερμοκρασιακή αναστροφή σε χαμηλό υψόμετρο θα οδηγούσε σε υψηλές συγκεντρώσεις των αέριων ρύπων.

Σε γενικές γραμμές όσον αφορά την μέση ωριαία συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων παρουσιάζονται δύο μέγιστα, ένα κατά τις πρωινές ώρες και ένα κατά τις απογευματινές ώρες, τα οποία αντιστοιχούν στις αιχμές του κυκλοφοριακού φορτίου. (η ώρα στα διαγράμματα είναι σε UTC) Το φαινόμενο είναι ακόμα πιο έντονο όταν συνδυάζεται με ανατολικές διευθύνσεις του ανέμου οι οποίες παρασύρουν αιωρούμενα σωματίδια από την περιφερειακή Υμηττού και από την Λεωφόρο Κατεχάκη προς τις εγκαταστάσεις του Ε.Μ.Π. όπου και έλαβαν χώρα οι μετρήσεις.

Στις Εικόνες 5.5 παρατηρούμε συχνά πως η συγκέντρωση των  $PM_{10}$  αυξομειώνεται ακολουθώντας την αυξομείωση της σχετικής υγρασίας της ατμόσφαιρας. Το φαινόμενο παρατηρείται κυρίως μέχρι και την ανατολή του ηλίου και γίνεται πιο έντονο τις απογευματινές ώρες έως και τα μεσάνυχτα. Γενικά μπορούμε να πούμε πως κατά την διάρκεια της νύχτας λαμβάνει χώρα το φαινόμενο αυτό. Το γεγονός αυτό φαίνεται να εξηγείται από την ύπαρξη μιας θερμοκρασιακής αναστροφής, από τις απογευματινές ώρες έως τις πρώτες πρωινές ώρες σε σχετικά μικρό ύψος στο Λεκανοπέδιο της Αθήνας.

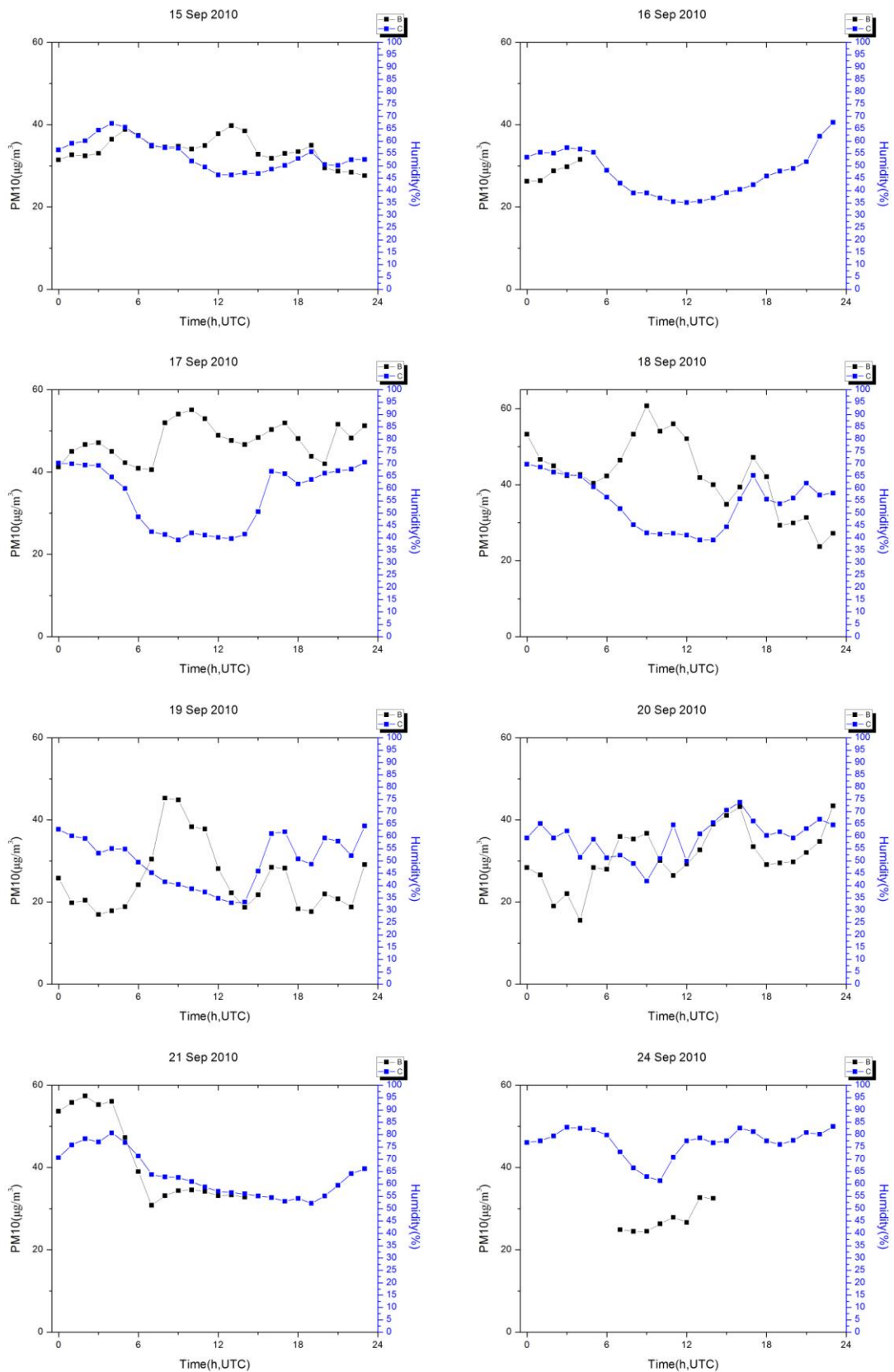
Υπενθυμίζουμε ότι θερμοκρασιακή αναστροφή είναι το φαινόμενο κατά το οποίο σε ένα ορισμένο ύψος της κατώτερης ατμόσφαιρας η θερμοκρασία του αέρα αυξάνεται τοπικά με το ύψος, αντί να μειώνεται όπως κανονικά συμβαίνει στην τροπόσφαιρα και αυτό παίζει σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια της ατμόσφαιρας καθώς και στη μεταφορά και διασπορά των αέριων ρύπων μέσα σε αυτήν (Εικόνα 5.6). Θερμοκρασιακή αναστροφή έχουμε όταν δημιουργείται το Σταθερό Οριακό Στρώμα κατά τη διάρκεια της νύχτας, όταν παύει δηλαδή η θέρμανση του εδάφους και το έδαφος είναι ψυχρότερο από τον αέρα που το περιβάλλει.

Παρατηρούμε για τις ημέρες 17/09, 18/09, 19/09 πως η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων είναι σημαντική αυξημένη και συγκεκριμένα παρατηρούμε μια σχετική αναστροφή των καμπύλων συγκέντρωσης των  $PM_{10}$  και των καμπύλων σχετικής υγρασίας για τις συγκεκριμένες ημέρες σε σχέση με την υπόλοιπη περίοδο των μετρήσεων. Παραπέμποντας στις Εικόνες 5.9γ και 5.9δ όπου μπορούμε να παρατηρήσουμε τα ανεμολογικά δεδομένα των ημερών αυτών διακρίνουμε πως αυτές τις ημέρες υπερισχύουν νοτιοδυτικοί άνεμοι όπου και τοποθετείται το κέντρο της Αθήνας σε σχέση με την περιοχή των μετρήσεων (Ζωγράφου). Συμπεραίνουμε λοιπόν, πως αυτό θα πρέπει να οφείλεται κυρίως στην μεταφορά ξηρών αέριων μαζών από το κέντρο της Αθήνας φτωχές σε υγρασία και πλούσιες σε αιωρούμενα σωματίδια.

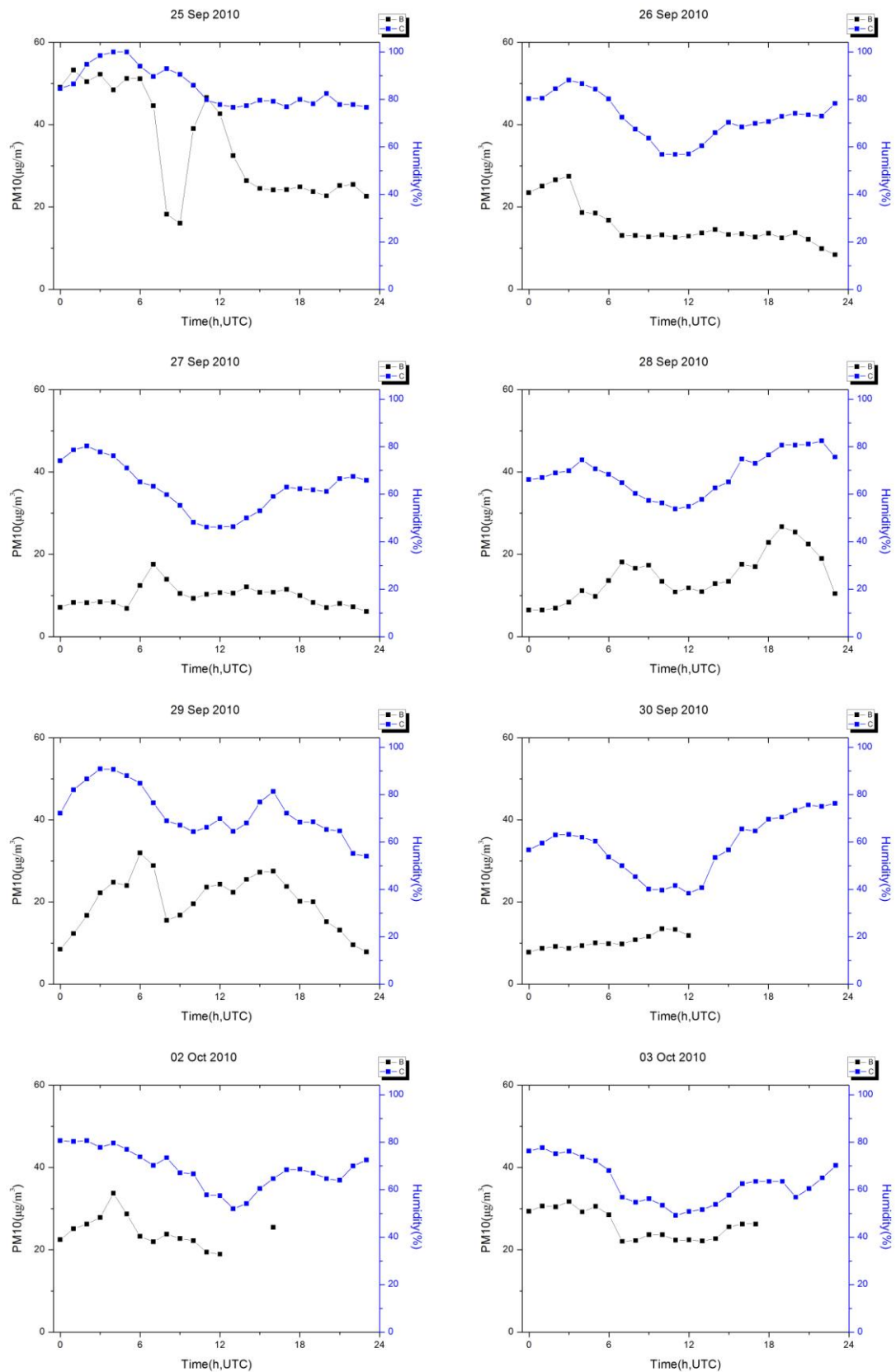


**Εικόνα 5.5α** Παρουσίαση της μέσης ωριαίας συγκέντρωσης των  $\text{PM}_{10}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) μαύρη καμπύλη και της σχετικής υγρασίας (μπλε καμπύλη) [02, 03, 09-14/09/2010).

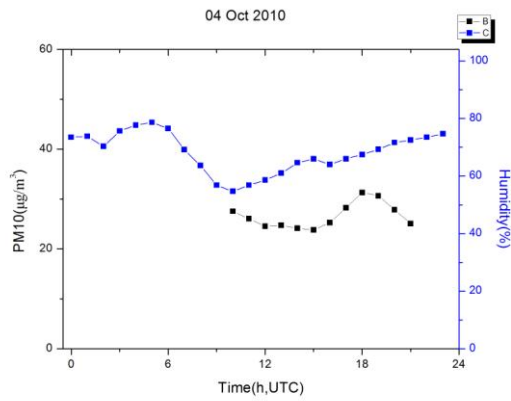




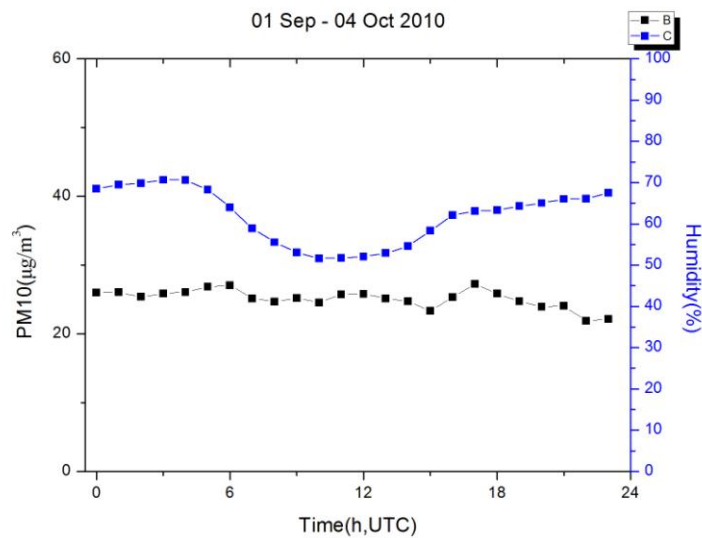
**Εικόνα 5.5β** Παρουσίαση της μέσης ωριαίας συγκέντρωσης των  $PM_{10}$  ( $\mu g/m^3$ ) μαύρη καμπύλη και της σχετικής υγρασίας (μπλε καμπύλη) [15-21/09/2010 & 24/09/2010).



**Εικόνα 5.5γ** Παρουσίαση της μέσης ωριαίας συγκέντρωσης των  $\text{PM}_{10}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) μαύρη καμπύλη και της σχετικής υγρασίας (μπλε καμπύλη) [25/09-30/09/2010 & 02, 03/10/2010].

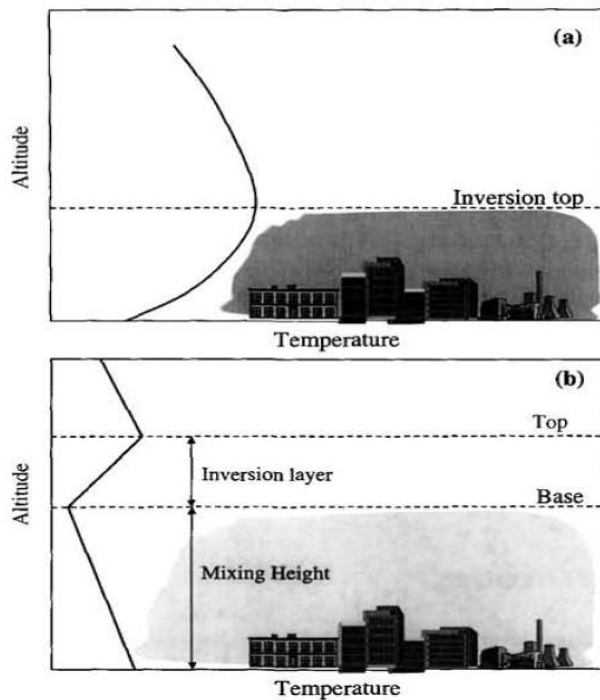


**Εικόνα 5.5δ** Παρουσίαση της μέσης ωριαίας συγκέντρωσης των  $PM_{10}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (μαύρη καμπύλη) και της σχετικής υγρασίας (μπλε καμπύλη) (04/10/2010).



**Εικόνα 5.5ε** Παρουσίαση της μέσης ωριαίας συγκέντρωσης των  $PM_{10}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) μαύρη καμπύλη και της σχετικής υγρασίας (μπλε καμπύλη) για όλη την περίοδο των μετρήσεων (1/09/2010-4/10/2010)

Στην θερμοκρασιακή αναστροφή δεν έχουμε αναταρακτικές κινήσεις στην ατμόσφαιρα, άρα οι αέριοι ρύποι εγκλωβίζονται σε ένα ρηχό ΑΟΣ, επομένως η διάχυσή τους γίνεται ελάχιστη. Κατά τη διάρκεια της ημέρας η θερμοκρασιακή αναστροφή καταστρέφεται λόγω συνταρακτικών κινήσεων του ΑΟΣ, επομένως αυξάνονται και οι δυνατότητες διάχυσης των αερίων ρύπων, όπως άλλωστε είναι εμφανές από τις μετρήσεις που αφορούν τα αιωρούμενα σωματίδια.



**Εικόνα 5.6** Απεικόνιση της θερμοβαθμίδας στην κατώτερη ατμόσφαιρα: a) κατά τη διάρκεια της νύχτας, b) κατά τη διάρκεια της ημέρας ( Seinfeld and Pandis 1998).

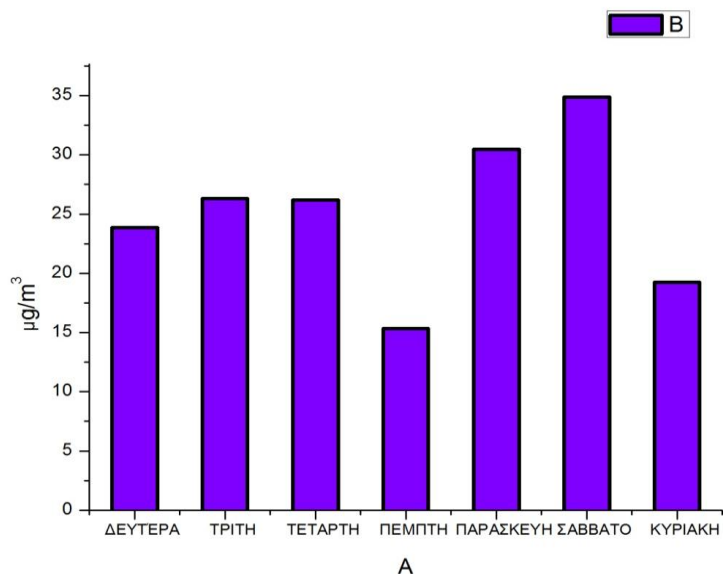
Ο συνδυασμός της υψηλής σχετικής υγρασίας και της θερμοκρασιακής αναστροφής στο ΑΟΣ φαίνεται να δημιουργεί τις κατάλληλες συνθήκες για την αύξηση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων PM<sub>10</sub> στο Λεκανοπέδιο της Αθήνας λόγω εγκλωβισμού τους στο σταθερό ΑΟΣ.

#### 5.4.2.2 Στατιστική ανάλυση ανά ημέρα εβδομάδας.

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε τη μέση συγκέντρωση σωματιδίων ανά ημέρα εβδομάδας για την περίοδο 01/09-04/10/2010.

Από την Εικόνα 5.7 παρατηρούμε πως η ημέρα εβδομάδας με την μικρότερη συγκέντρωση σωματιδίων είναι η Πέμπτη με μέση τιμή συγκέντρωσης 15.32  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ακολουθεί η Κυριακή με μέση ημερήσια τιμή 19.23  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Τα χαμηλά επίπεδα της συγκέντρωσης των PM<sub>10</sub> την Κυριακή είναι αναμενόμενα, γεγονός που οφείλεται αφ' ενός στη μειωμένη λειτουργία των περισσότερων βιομηχανικών μονάδων της ευρύτερης περιοχής της Αττικής και αφετέρου στην ελάττωση του κυκλοφοριακού φόρτου.

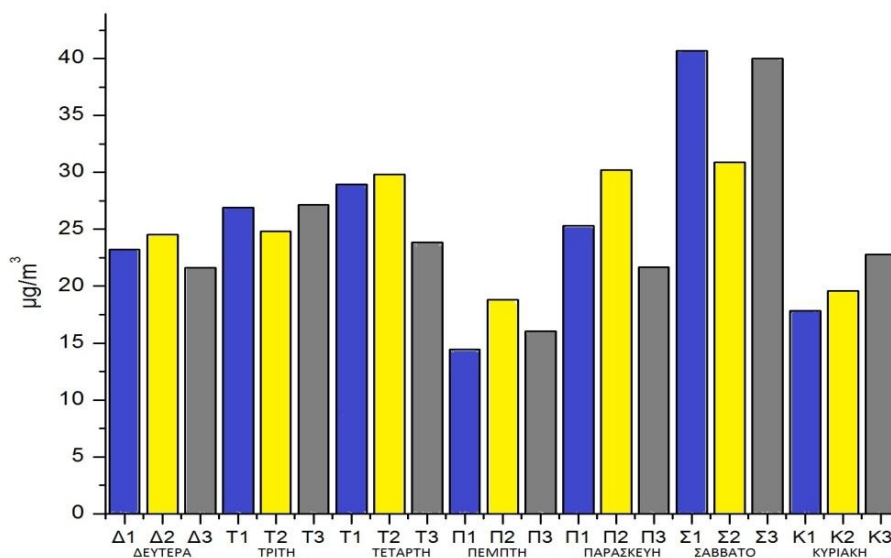
Αντίθετα τις εργάσιμες μέρες – όπως αναμένεται- αφού τα εργοστάσια λειτουργούν και το κυκλοφοριακό είναι αυξημένο σημειώνονται τα μεγαλύτερα επίπεδα συγκέντρωσης των PM<sub>10</sub>. Την Δευτέρα, την Τρίτη και την Τετάρτη τα επίπεδα συγκέντρωσης κυμαίνονται γύρω στα 23  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  με 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  και την Παρασκευή η μέση τιμή συγκέντρωσης είναι γύρω στα 30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .



**Εικόνα 5.7** Μέση τιμή συγκέντρωσης σωματιδίων ανά ημέρα εβδομάδας (01/09-04/10/2010).

Παρ όλα αυτά η μεγαλύτερη μέση ημερήσια τιμή συγκέντρωσης  $PM_{10}$  παρατηρείται το Σάββατο με τιμή σχεδόν  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Πλησίον του Ε.Μ.Π όπως έχει ήδη αναφερθεί τοποθετείται ένας από τα σημαντικότερα αστικά δίκτυα της Αττικής. Η περιφερειακή Υμηττού και η λεωφόρος Κατεχάκη τις ημέρες του Σαββάτου εξυπηρετούν πλήθος αυτοκινήτων τα οποία έχουν κατεύθυνση από και προς τα νότια προάστια της Αθήνας προς την υπόλοιπη κεντρική και βόρεια Αθήνα. Ο αυξημένος κυκλοφοριακός φόρτος είναι ικανός να προκαλέσει την αύξηση των επιπέδων συγκέντρωσης των  $PM_{10}$  σε τέτοιο βαθμό ώστε η μέγιστη τιμή ανά ημέρα εβδομάδας να σημειώνεται το Σάββατο.

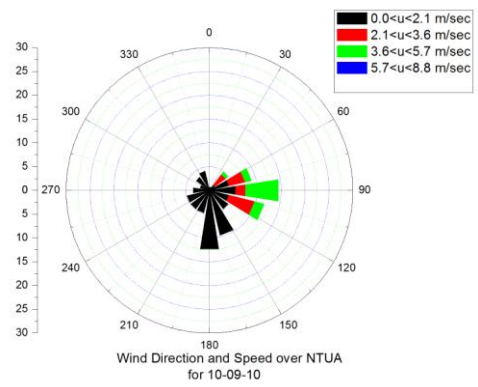
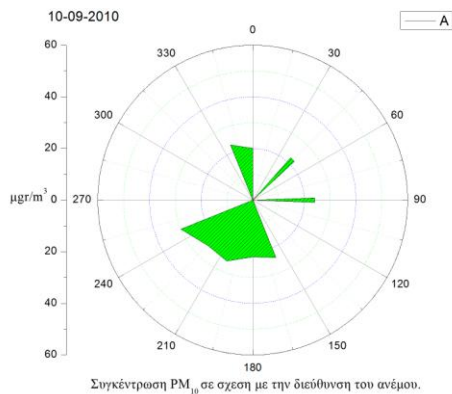
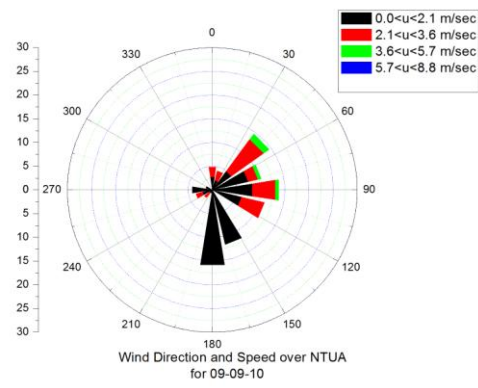
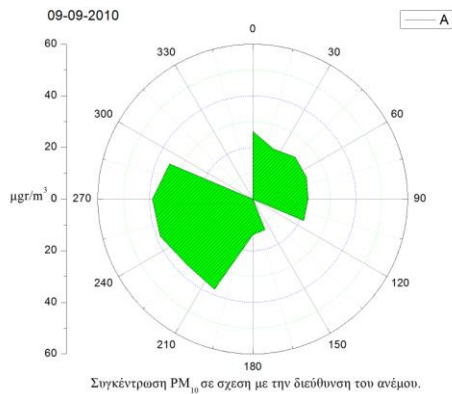
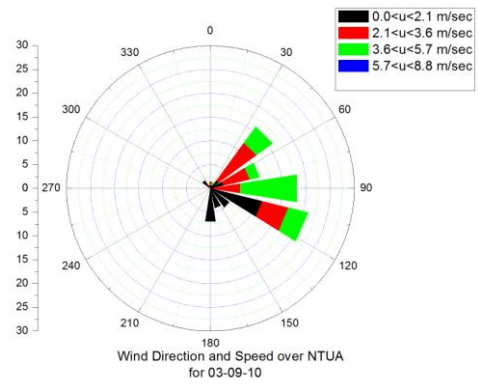
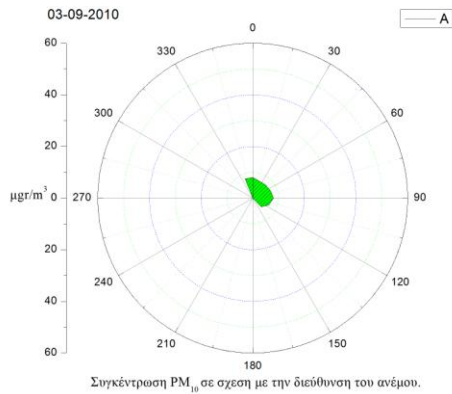
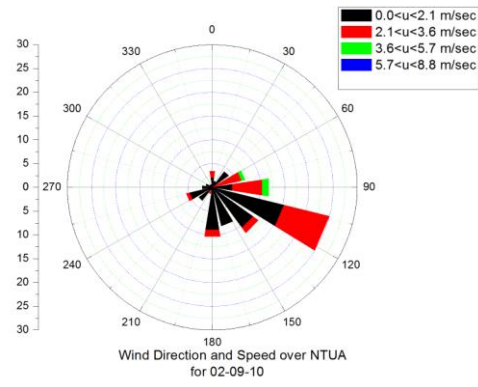
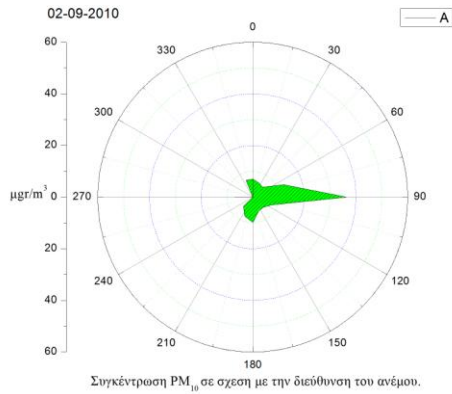
Για την καλύτερη κατανόηση των παραπάνω αρκεί να παρατηρήσουμε το ραβδόγραμμα στην Εικόνα 5.8. Για την παραγωγή του συγκεκριμένου ραβδογράμματος χωρίσαμε τις ημέρες σε τρία οκτάωρα. Το πρώτο οκτάωρο σε κάθε μέρα διαρκεί από τις 5π.μ. έως και τη 1μ.μ., το δεύτερο από τη 1μ.μ. έως και τις 9μ.μ και το τελευταίο οκτάωρο από τις 9μ.μ. έως και τις 5π.μ. σε τοπική ώρα. Παρατηρούμε πως σχεδόν σε όλες τις ημέρες της εβδομάδας τις βραδινές ώρες η συγκέντρωση των  $PM_{10}$  είναι αισθητά μικρότερη με εξαίρεση το Σάββατο και την Κυριακή. Για όλες τις καθημερινές ισχύει το εξής μοτίβο: τις πρωινές και τις απογευματινές ώρες οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων είναι μεγαλύτερες από τις συγκεντρώσεις τις βραδινές ώρες. Η εξήγηση του γεγονότος αυτού έχει ξανά δοθεί και είναι η αυξημένη αστική κυκλοφορία τις συγκεκριμένες περιόδους της ημέρας. Το Σάββατο συμβαίνει το εξής: Οι συγκεντρώσεις που σημειώνονται τις απογευματινές ώρες είναι σημαντικά μικρότερες από την υπόλοιπη περίοδο της ημέρας. Αυτό οφείλεται αφ' ενός στην εγγύτητα του αστικού δικτύου στη περιοχή των μετρήσεων και αφετέρου στο γεγονός της έντονης νυχτερινής ζωής στην περιοχή της Αθήνας και την αύξηση της ανθρώπινης δραστηριότητας τις συγκεκριμένες ώρες.



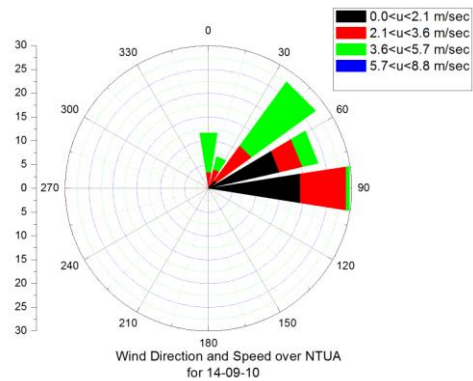
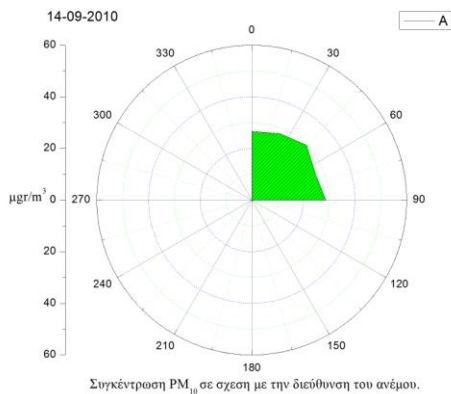
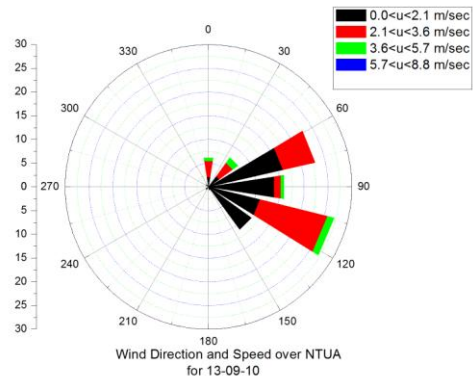
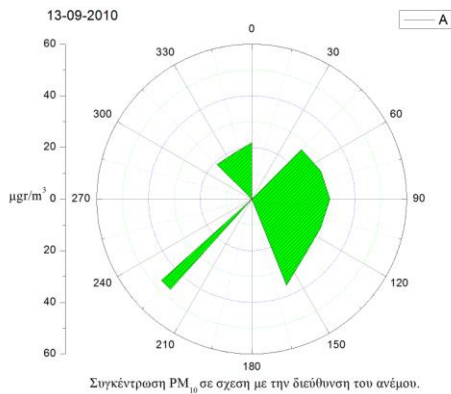
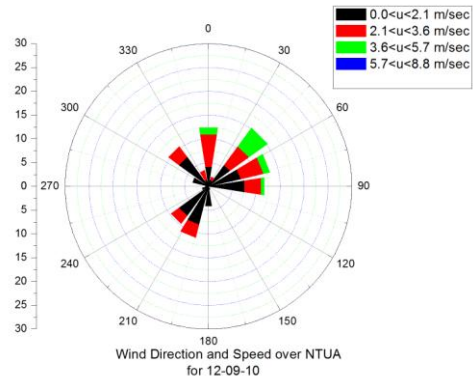
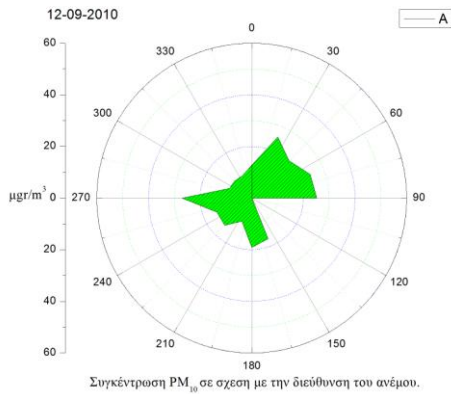
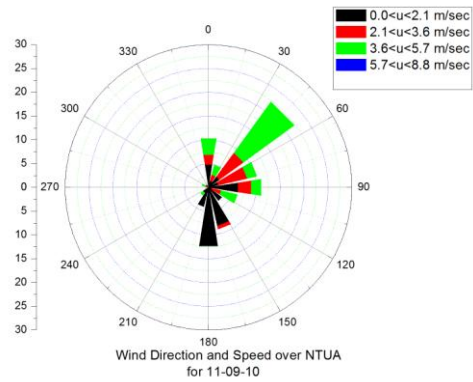
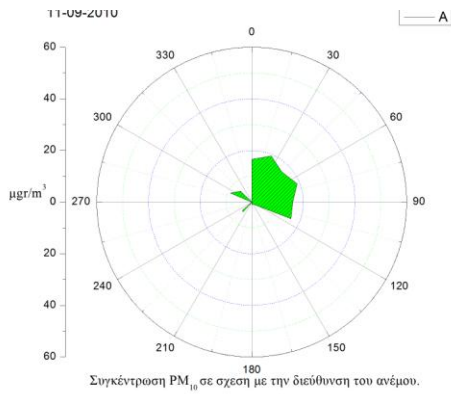
**Εικόνα 5.8** Μέση τιμή συγκέντρωσης σωματιδίων ανά ημέρα εβδομάδας και ανά οκτώωρο (01/09-04/10/2010).

#### 5.4.2.3 Συσχέτιση συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων PM<sub>10</sub> και κατεύθυνσης ανέμου

Γενικά τα επίπεδα συγκέντρωσης των PM<sub>10</sub> σε τοπικό επίπεδο επηρεάζονται σημαντικά από την διεύθυνση και την ταχύτητα του 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 και η πολύωρη άπνοια οδηγούν στην αύξηση των τιμών συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων. Ταχύτητες μεγαλύτερες των 2m/s βοηθούν στην αποσυμφόρηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Chaloulakou A. et. al., 2003).

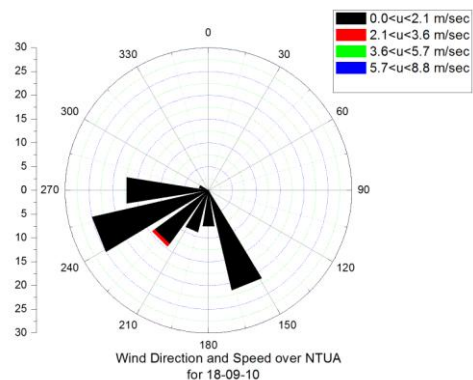
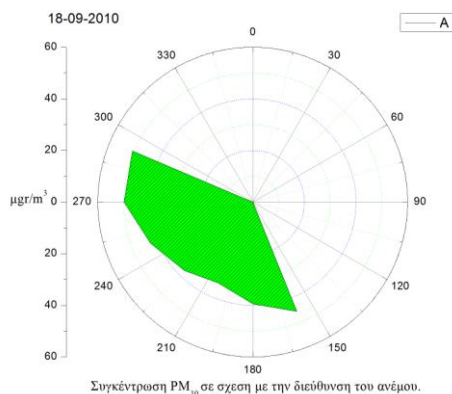
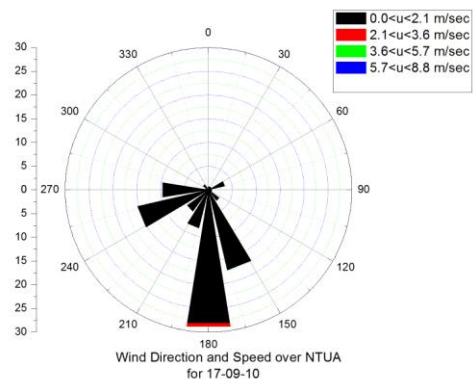
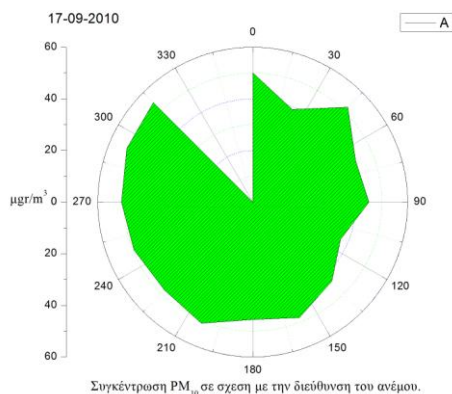
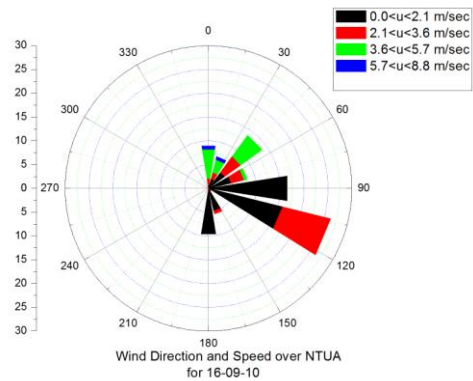
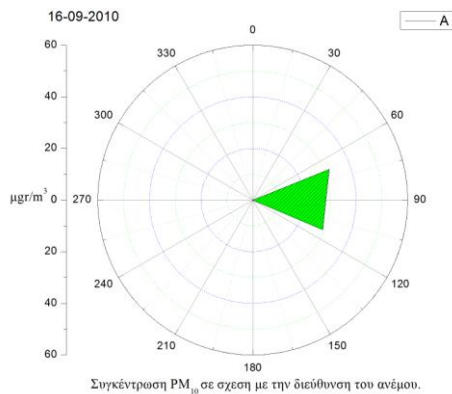
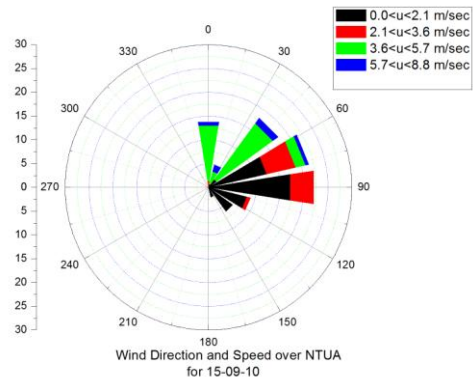
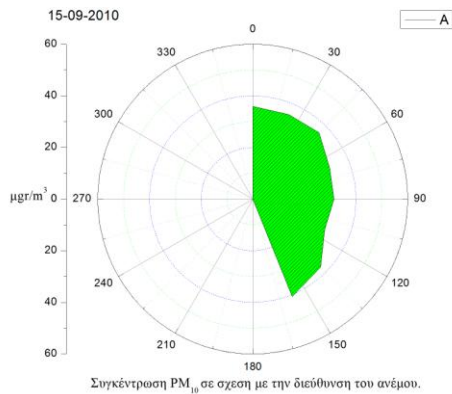


**Εικόνα 5.9α** Ροδογράμματα της συγκέντρωσης των PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>) σε σχέση με την κατεύθυνση του ανέμου (αριστερά) και ροδογράμματα της κατεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου (δεξιά) [02, 03, 09, 10/09/2010].

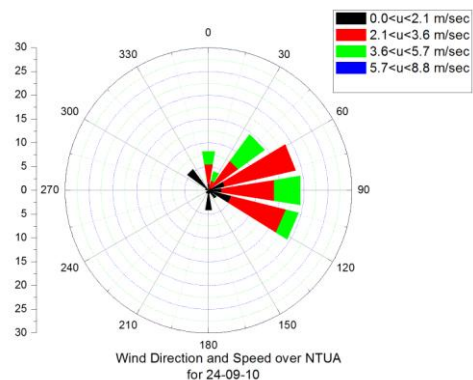
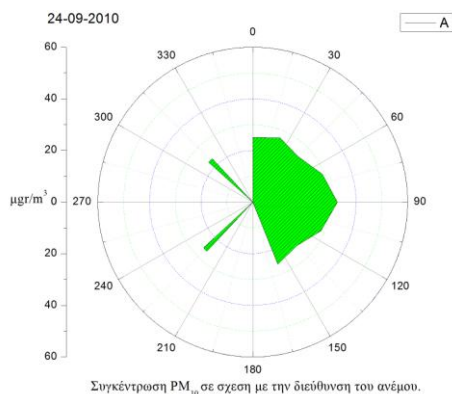
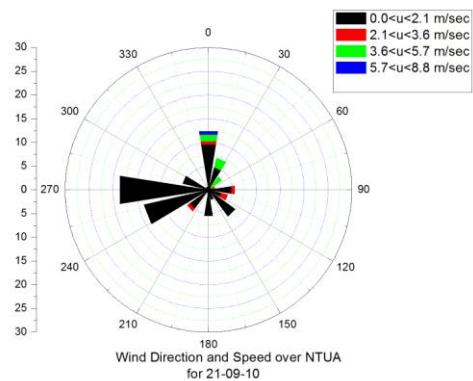
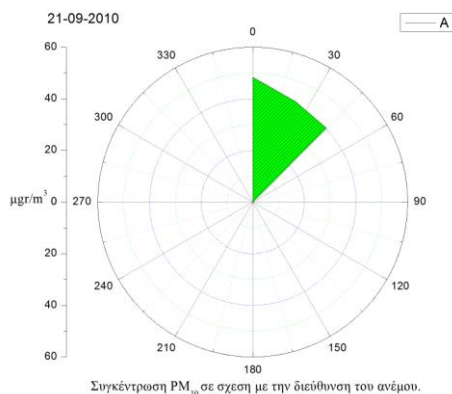
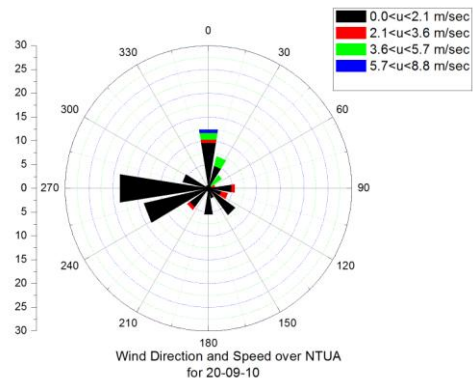
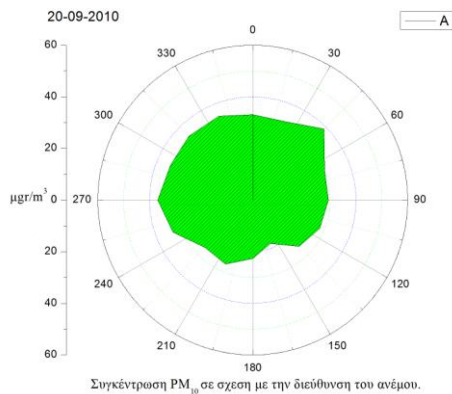
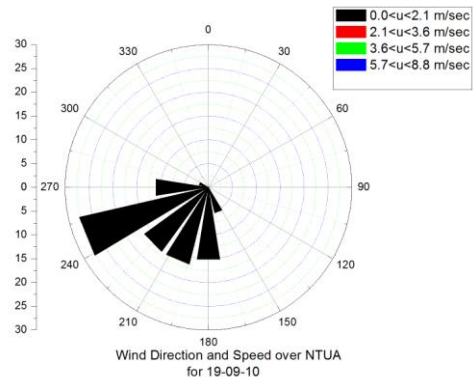
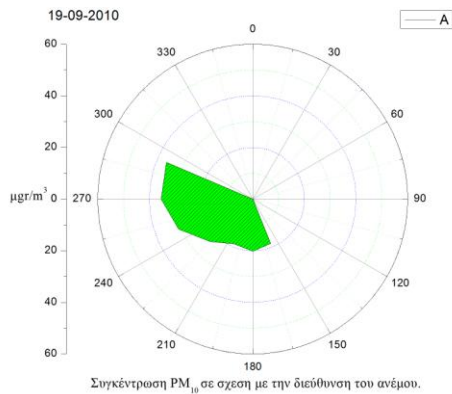


**Εικόνα 5.9β** Ροδογράμματα της συγκέντρωσης των PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>) σε σχέση με την κατεύθυνση του ανέμου (αριστερά) και ροδογράμματα της κατεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου (δεξιά) [11-14/09/2010].

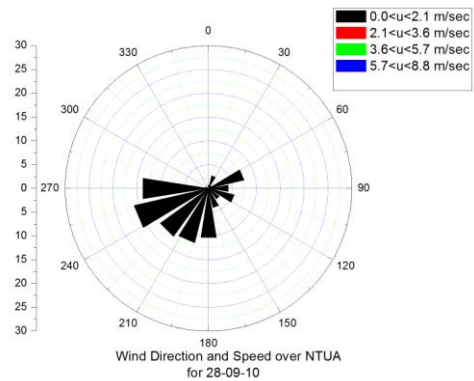
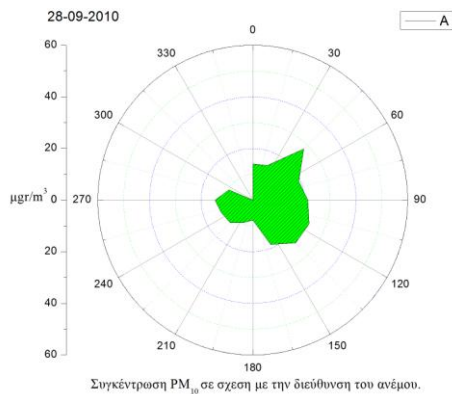
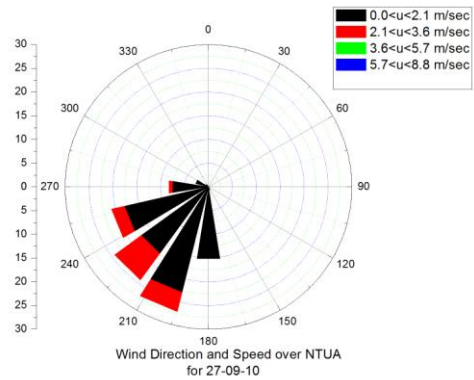
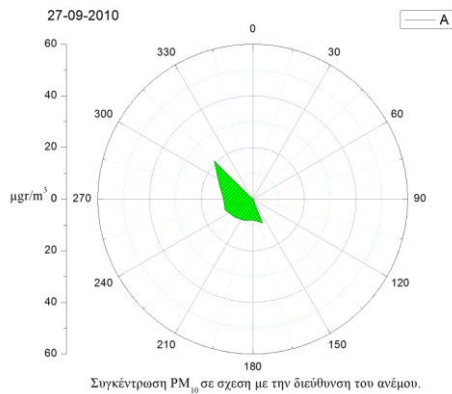
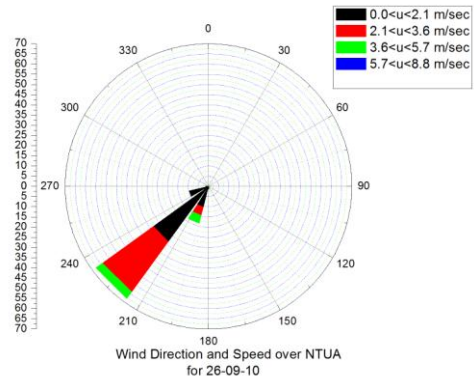
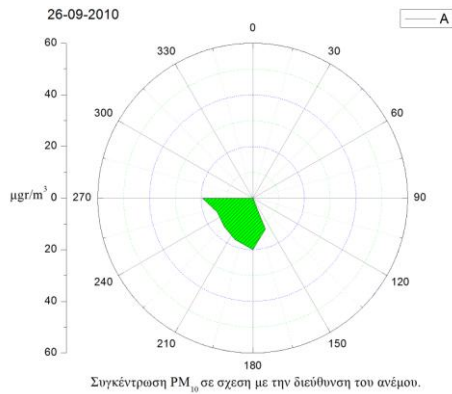
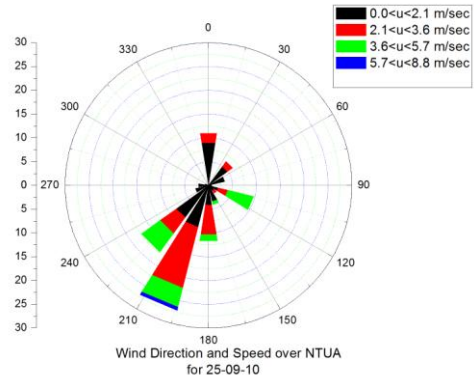
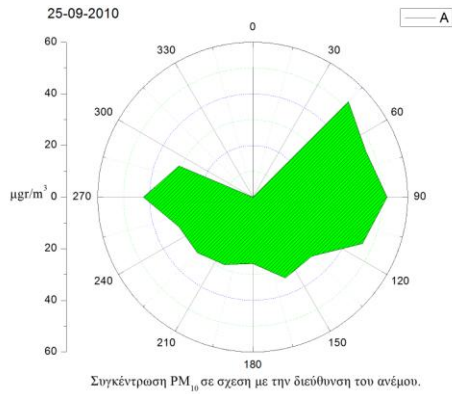




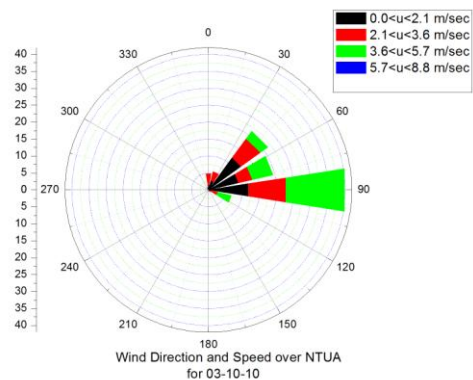
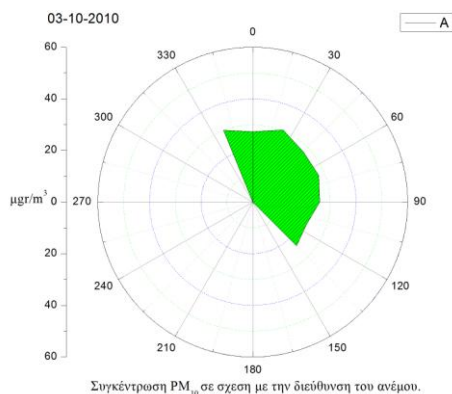
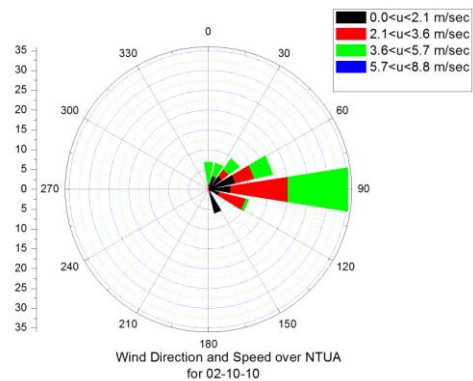
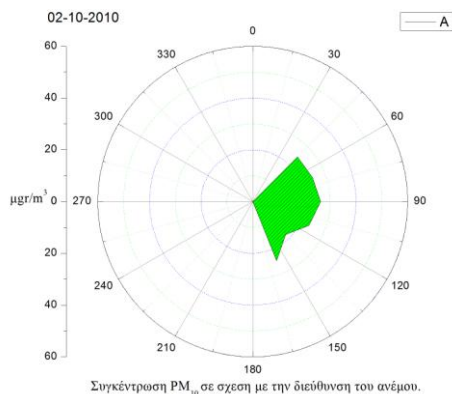
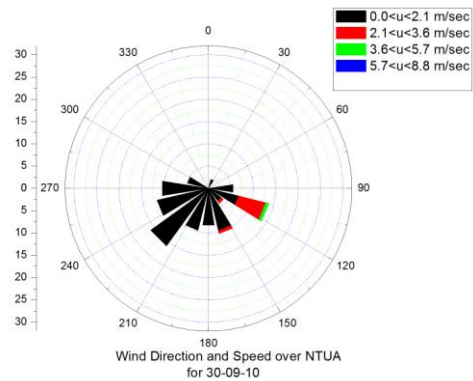
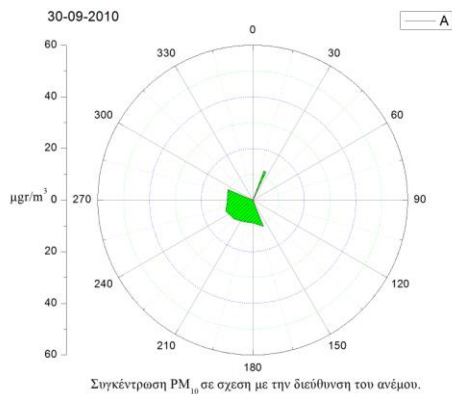
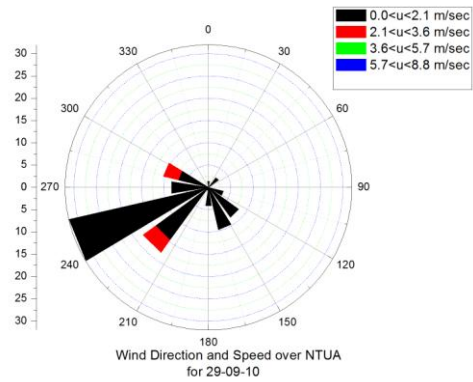
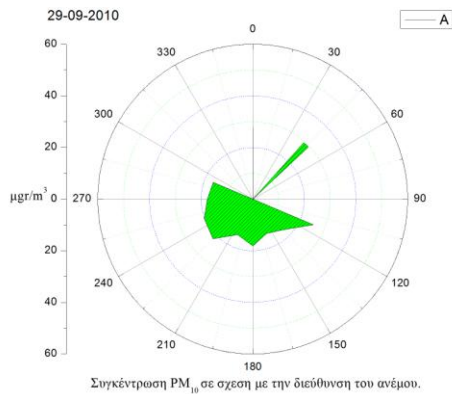
**Εικόνα 5.9γ** Ροδογράμματα της συγκέντρωσης των PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>) σε σχέση με την κατεύθυνση του ανέμου (αριστερά) και ροδογράμματα της κατεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου (δεξιά) [15-18/09/2010].



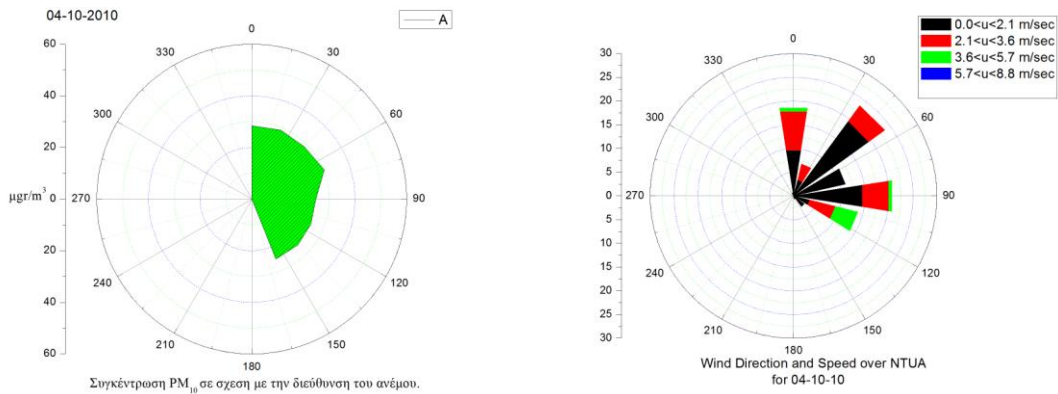
**Εικόνα 5.9δ** Ροδογράμματα της συγκέντρωσης των PM<sub>10</sub> (μg/m<sup>3</sup>) σε σχέση με την κατεύθυνση του ανέμου (αριστερά) και ροδογράμματα της κατεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου (δεξιά) [19-21 & 24/09/2010).



**Εικόνα 5.9ε** Ροδογράμματα της συγκέντρωσης των PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>) σε σχέση με την κατεύθυνση του ανέμου (αριστερά) και ροδογράμματα της κατεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου (δεξιά) [25-28/09/2010].



**Εικόνα 5.9ξ** Ροδογράμματα της συγκέντρωσης των PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>) σε σχέση με την κατεύθυνση του ανέμου (αριστερά) και ροδογράμματα της κατεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου (δεξιά)(29, 30/09 & 02, 03/10/2010).

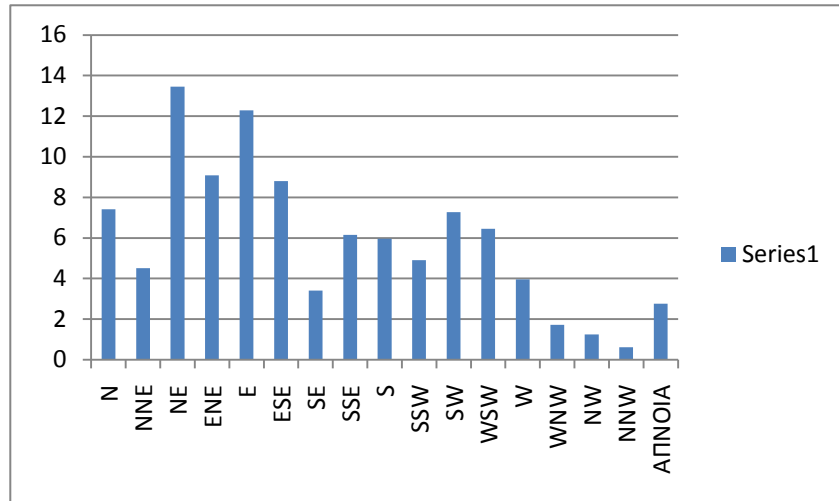


**Εικόνα 5.9η** Ροδογράμματα της συγκέντρωσης των PM<sub>10</sub> (μg/m<sup>3</sup>) σε σχέση με την κατεύθυνση του ανέμου (αριστερά) και ροδογράμματα της κατεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου (δεξιά) (04/10/2010).

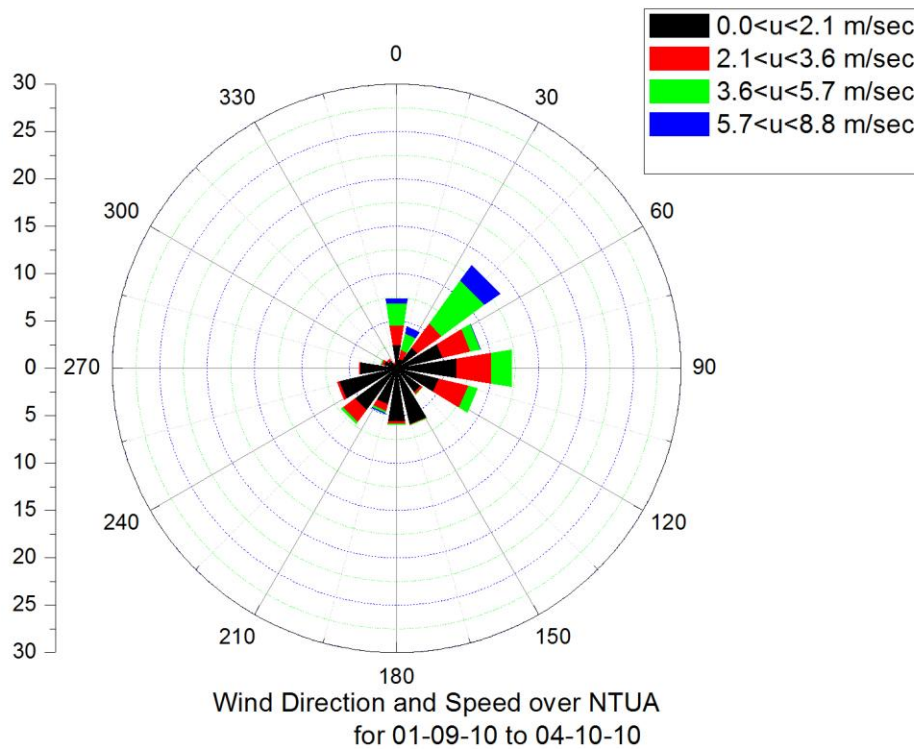
Για να μελετήσουμε στην πράξη την σχέση της κατεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου με την συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων PM<sub>10</sub> παράγαμε τα ροδογράμματα που παρουσιάζονται στις Εικόνες 5.9α, 5.9β, 5.9γ, 5.9δ, 5.9ε, 5.9ζ και 5.9η. Γενικά παρατηρούμε πως όταν οι άνεμοι έχουν ανατολική και νοτιοδυτική προέλευση σημειώνονται υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης των PM<sub>10</sub>. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η 02-09-2010 όπου οι ανατολικοί άνεμοι προκαλούν έντονη αύξηση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων σε σχέση με τις υπόλοιπες κατευθύνσεις του ανέμου για την ίδια μέρα. Μπορούμε εύκολα να αντιληφθούμε από αυτά τα ροδογράμματα πόσο σημαντικό ρόλο μπορεί να παίξει η ταχύτητα του ανέμου στη διάχυση και γενικά στη μεταφορά των αέριων ρύπων. Τις ημέρες που οι άνεμοι πνέουν σε χαμηλές ταχύτητες (<2m/s) η συγκέντρωση των PM<sub>10</sub> διατηρείται σε σταθερά επίπεδα.(π.χ. 17-20/09/2010)

#### 5.4.2.4 Ανάλυση μετεωρολογικών ανεμολογικών δεδομένων

Στο επόμενο ραβδόγραμμα (Εικόνα 5.10 ) παρουσιάζεται η επί τοις % συχνότητα των κατευθύνσεων του ανέμου ή της άπνοιας για όλο το χρονικό διάστημα μετρήσεων που πραγματοποιήσαμε. Παρατηρούμε ότι σε ποσοστό περίπου 3% είχαμε άπνοια, ενώ η επικρατέστερη κατεύθυνση του ανέμου την περίοδο των μετρήσεων είναι η βορειοανατολική (NE), σε ποσοστό 13%, ενώ η λιγότερη συχνή κατεύθυνση είναι η βόρειο-βορειοδυτική (NNW) με ποσοστό <1%. Γενικά οι κατευθύνσεις του ανέμου που επικρατούν τείνουν να είναι ανατολικοί σε μεγαλύτερο ποσοστό και νοτιοδυτικοί σε μικρότερο. Το ποσοστό άπνοιας είναι αρκετά μικρό της τάξεως του 3%.



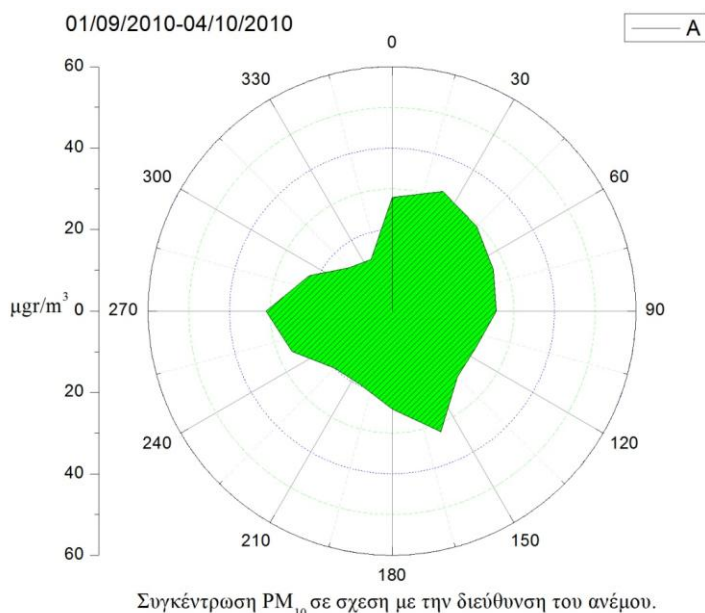
**Εικόνα 5.10** Η συχνότητα (επί τοις %) εμφάνισης της κατεύθυνσης του ανέμου ή της άπνοιας από 01/9/2010 έως 04/10/2010 στην περιοχή του Ζωγράφου.



**Εικόνα 5.11** Ροδόγραμμα κατεύθυνσης και ταχύτητας ανέμου για όλη την περίοδο των μετρήσεων(1/09-4/10/2010)

Στην Εικόνα 5.11 παρουσιάζουμε το ροδόγραμμα της κατεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου στην ευρύτερη περιοχή του Ζωγράφου για τις ημέρες της περιόδου από 1/09/10 έως 4/10/10. Οι μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου σημειώνονται κυρίως από την βορειοανατολική κατεύθυνση του ανέμου όπου συναντώνται ταχύτητες μεγαλύτερες των 5.7m/s σε ποσοστό 15% και ακολουθεί η βόρεια και

βόρειο-βορειοανατολική κατεύθυνση με ποσοστά στην ίδια ταχύτητα 6% και 16% αντίστοιχα. Ταχύτητες αρκετά μεγάλες (>2.71m/s) ώστε να είναι ικανές να προκαλέσουν διάχυση των ρύπων έρχονται κυρίως από την βόρεια κατεύθυνση έως την ανατολικό-νοτιοανατολική κατεύθυνση. Παρ' όλο το μικρό ποσοστό άπνοιας ωστόσο, οι ταχύτητες του ανέμου είναι σχετικά μικρές συντελώντας στη συσσώρευση των αέριων ρύπων.



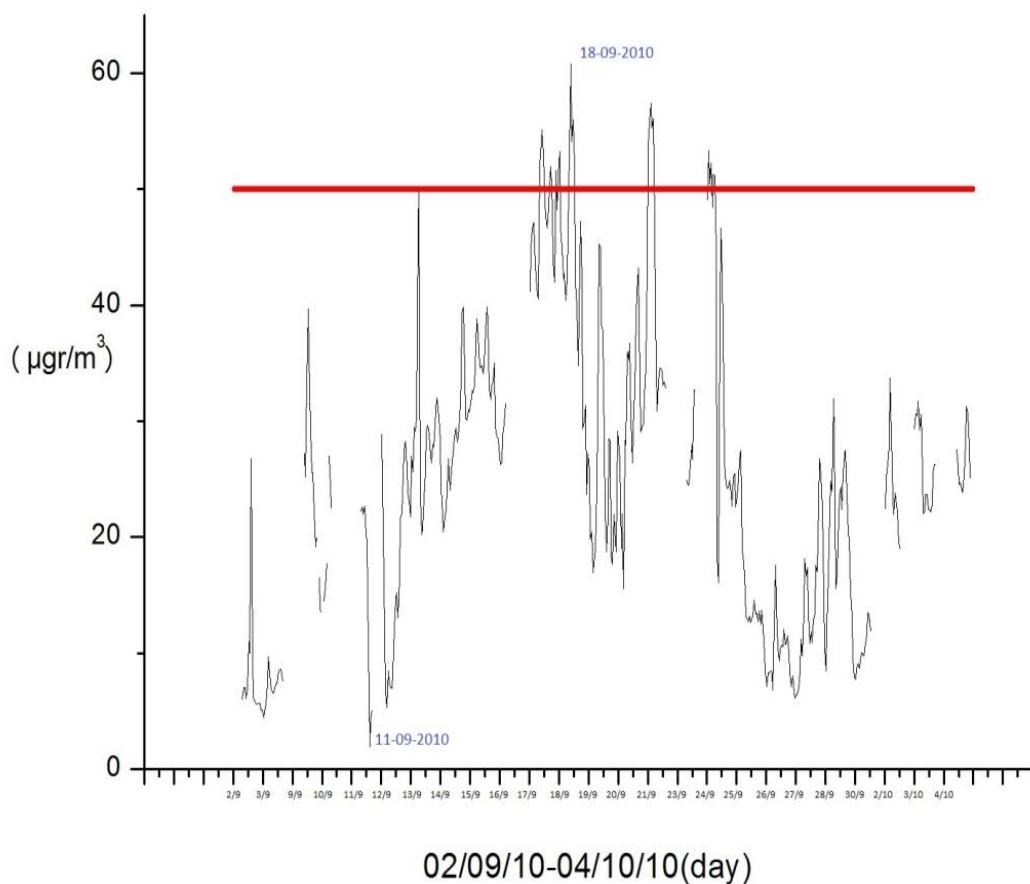
**Εικόνα 5.12** Ροδόγραμμα της συγκέντρωσης των PM<sub>10</sub> (μg/m<sup>3</sup>) σε σχέση με την κατεύθυνση του ανέμου για όλη την περίοδο των μετρήσεων (1/09-4/10/2010)

Από το παραπάνω ροδόγραμμα (Εικόνα 5.12) μπορούμε να συμπεράνουμε πως οι κατευθύνσεις ανέμου οι οποίες μεταφέρουν PM<sub>10</sub> στη περιοχή του Ζωγράφου είναι κυρίως βορειοανατολικές νότιο-νότιοανατολικές και δυτικές. Ωστόσο η διαφορά στο σωματιδιακό φόρτο των ανέμων δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη, με μία εξαίρεση για τους βόρειο-βόρειοδυτικούς ανέμους οι οποίοι είναι και οι πιο «καθαροί». Οι συγκεκριμένοι άνεμοι όμως όπως φαίνεται και από την Εικόνα 5.11 είναι και οι πιο σπάνιοι με ποσοστό μικρότερο του 3%.

## 5.5 Περιγραφή επιλεγμένων περιόδων ή ημερών.

Στην Εικόνα 5.13 παρουσιάζουμε την στιγμιαία συγκέντρωση των PM<sub>10</sub> για το χρονικό διάστημα 02/09-04/10/2010. Στην αρχή της περιόδου των μετρήσεων η μέση τιμή συγκέντρωσης των PM<sub>10</sub> είναι σε σχετικά μικρά επίπεδα. Στη συνέχεια σημειώνεται η ελάχιστη τιμή συγκέντρωσης το μεσημέρι τις 11<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου και ακολούθως ένα μέγιστο στις 18 Σεπτεμβρίου. Γενικά από τις 15 έως και τις 24 Σεπτεμβρίου οι τα επίπεδα συγκέντρωσης των PM<sub>10</sub> είναι μεγαλύτερα από ό,τι τις άλλες ημέρες της περιόδου των μετρήσεων αφού τις τελευταίες ημέρες παρουσιάζεται μια γενική πτώση των συγκεντρώσεων. ( Η κόκκινη γραμμή στην εικόνα 5.13

παρουσιάζει το όριο των 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  που δεν πρέπει να ξεπεραστεί περισσότερο από 35 ημέρες το χρόνο)

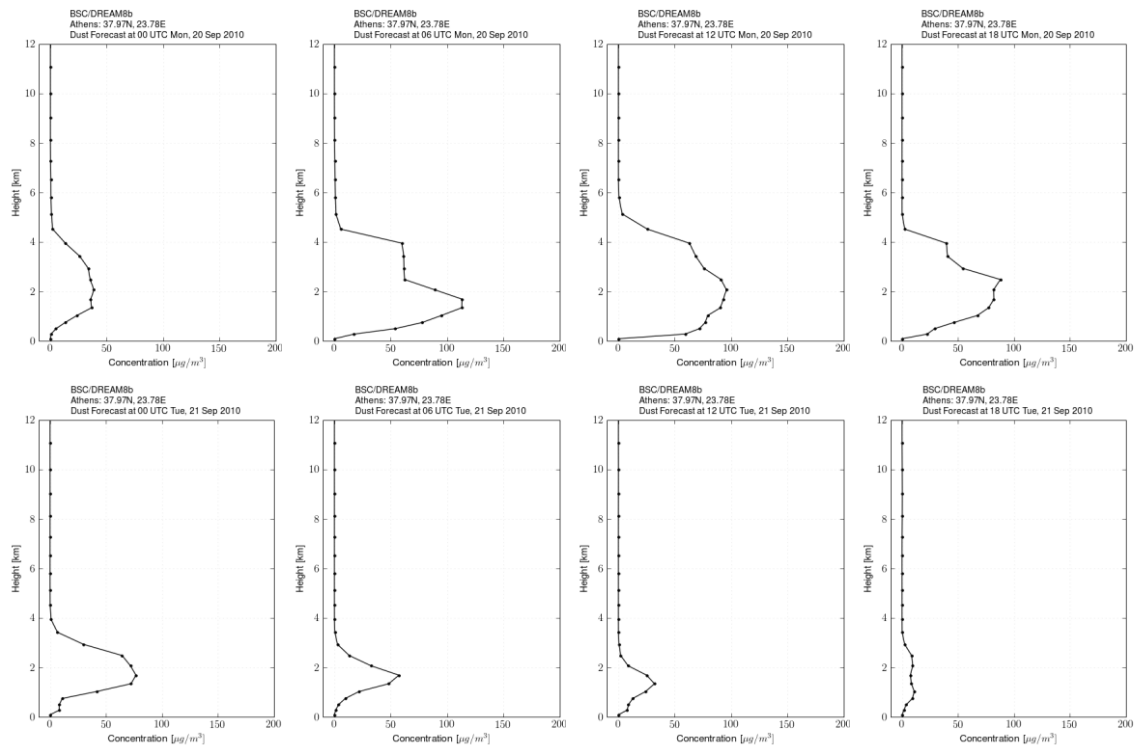


**Εικόνα 5.13** Η στιγμιαία συγκέντρωση των  $\text{PM}_{10}$  καθ' όλη την διάρκεια των μετρήσεων.

### 5.5.1 Μεταφορά σκόνης από την έρημο Σαχάρα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία για την εκτίμηση μεταφοράς σκόνης από την έρημο Σαχάρα πάνω από την ευρύτερη περιοχή των Αθηνών χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα του μοντέλου DREAM(Dust **RE**gional Atmospheric Model). Δημιουργήθηκε από τους Nickovic και Dobricic (1996). Τα δεδομένα είναι διαθέσιμα μέσω του διαδικτύου στην ηλεκτρονική διεύθυνση <http://www.bsc.es/projects/earthscience/DREAM/>.



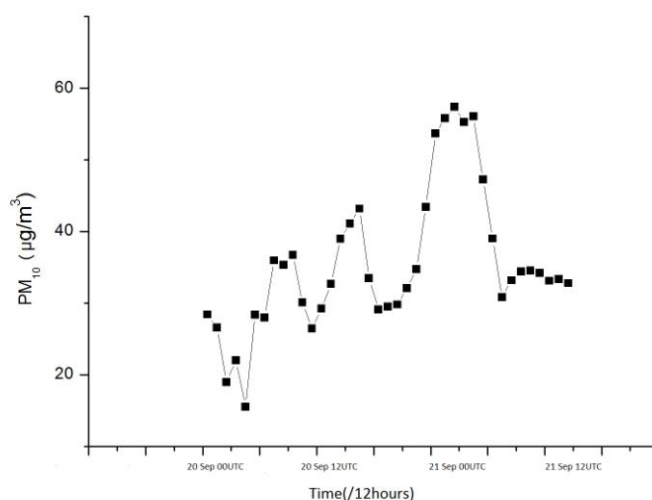


**Εικόνα 5.14** Η κατακόρυφη κατανομή συγκέντρωσης σκόνης Σαχάρα πάνω από την Αθήνα για τις ημέρες 20-21 Σεπτεμβρίου σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου Dream.

Στην παραπάνω εικόνα (Εικόνα 5.14) παρουσιάζουμε την συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων που προέρχονται από την έρημο Σαχάρα για την ημέρες 20 και 21 Σεπτεμβρίου σύμφωνα με το μοντέλο Dream. Το φαινόμενο αρχίζει με μικρή ένταση από τις πρώτες πρωινές ώρες της 20<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου. Αιωρούμενα σωματίδια από την έρημο Σαχάρα εντοπίζονται από το ύψος των 500m έως και τα 4 km με μεγαλύτερη συγκέντρωση αυτών στα 2 περίπου χιλιόμετρα στις τιμές περίπου των 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Μετά από έξι ώρες η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων σημειώνει μια έντονη αύξηση στη τιμή των 120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  σε υψόμετρο κάτω από 2 km. Το επόμενο 12ωρο το φαινόμενο συνεχίζει να έχει μεγάλη ένταση και οι στρωματώσεις σκόνης πλησιάζουν όλο και περισσότερο το έδαφος συνεχίζοντας οι τιμές των συγκεντρώσεων να είναι αρκετά μεγάλες ώστε να επηρεάσουν σημαντικά τις μετρήσεις εδάφους με το DustTrak. Την επόμενη ημέρα το φαινόμενο συνεχίζει να υπάρχει με τις συγκεντρώσεις να μειώνονται προοδευτικά έως οι τιμές τους γίνονται μικρότερες από 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Η αύξηση της συγκέντρωσης των  $\text{PM}_{10}$  γίνεται αντιληπτή και από το έδαφος με μία μικρή χρονική καθυστέρηση. Τα αιωρούμενα σωματίδια χρειάζονται κάποιο χρόνο να εναποτεθούν στο έδαφος από τέτοια υψόμετρα, λόγω βαρύτητας. Έτσι στην Εικόνα 5.15 μπορούμε να δούμε την προοδευτική αύξηση της συγκέντρωσης των  $\text{PM}_{10}$  που μετράμε με το DustTrak. Παρατηρούμε ότι το μοντέλο Dream παρουσιάζει το φαινόμενο να είναι πιο έντονο την 20<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου, ενώ από τις μετρήσεις εδάφους

η συγκέντρωση των  $PM_{10}$  είναι μεγαλύτερη κατά τις πρώτες πρωινές ώρες της 21<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου.



**Εικόνα 5.15** Συγκέντρωση των  $PM_{10}$  στο έδαφος για την 20<sup>η</sup> και 21<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου του 2010.

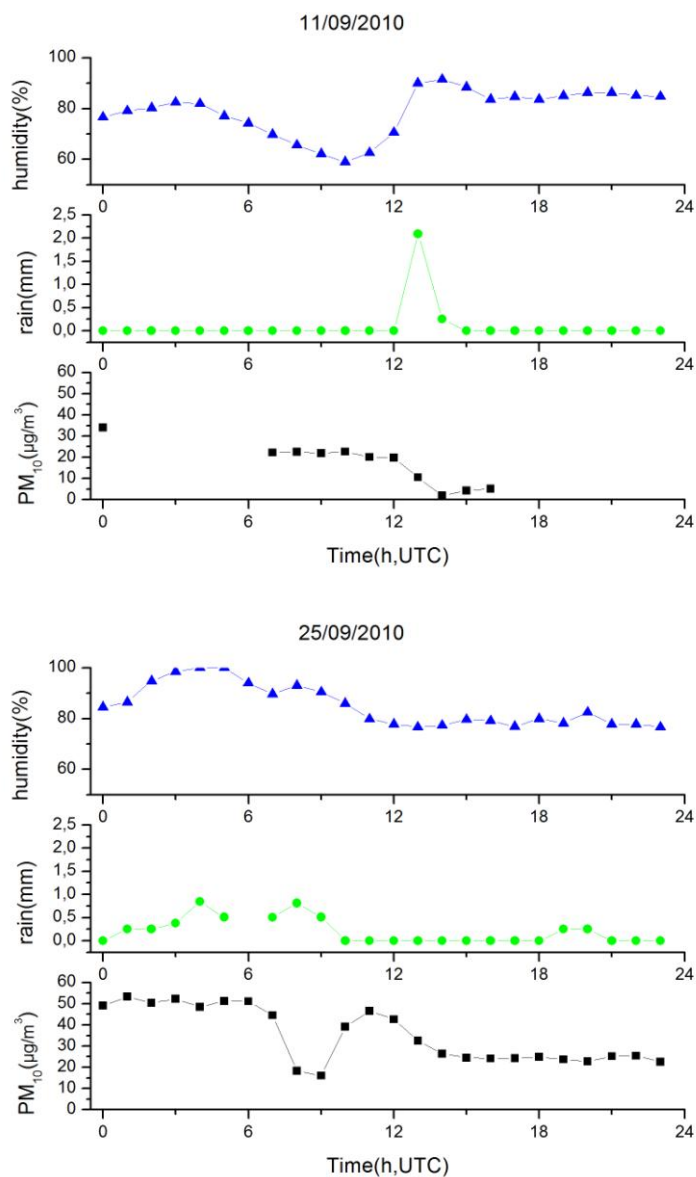
Αναφορικά με τα  $PM_{10}$  για τις δύο αυτές ημέρες των μετρήσεων (20/9/2010 και 21/09/2010) η μέση συγκέντρωση των αερολυμάτων ήταν  $35.40 \pm 9.84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ενώ το εύρος των τιμών της συγκέντρωσης κυμάνθηκε από  $15.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$  έως  $57.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Παρατηρούμε πως η μέση τιμή της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων είναι πολύ μεγαλύτερη από την μέση τιμή της συγκέντρωσης των  $PM_{10}$  για όλη την περίοδο των μετρήσεων. Συνεπώς παρατηρούμε πως κατά το φαινόμενο μεταφοράς ερημικής σκόνης από την έρημο Σαχάρα η συγκέντρωση των  $PM_{10}$  σημειώνει μια σημαντική αύξηση.

### 5.5.2 Μείωση συγκέντρωσης των $PM_{10}$ λόγω βροχόπτωσης.

Στην Εικόνα 5.16 παρουσιάζεται η σχετική υγρασία, τα επίπεδα βροχόπτωσης και η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων για την 11<sup>η</sup> και 25<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου του 2010. Στις 11 Σεπτεμβρίου τις μεσημεριανές ώρες σημειώνεται ένα έντονο φαινόμενο βροχόπτωσης (2mm) το οποίο προκαλεί σημαντική μείωση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων από τα  $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$  περίπου στα  $1.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ομοίως στις 25 Σεπτεμβρίου τις πρωινές ώρες ένα επεισόδιο βροχής προκαλεί μείωση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων από τα  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  περίπου στα  $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Η έκπλυση λοιπόν, είναι μια διαδικασία κατά την οποία τα σωματίδια συσσωματώνονται με σταγονίδια νερού ή παγοκρυστάλλων και παρασύρονται μαζί τους στο έδαφος. Η έκπλυση είναι ένας άμεσος μηχανισμός απομάκρυνσης των

αιωρούμενων σωματιδίων με εμφανή αποτελέσματα στην τροπόσφαιρα το οποίο γίνεται φανερό στα παρακάτω διαγράμματα.



**Εικόνα 5.16** Η σχετική υγρασία (%), τα επίπεδα βροχόπτωσης και η συγκέντρωση των PM<sub>10</sub> για την 11<sup>η</sup> και 25<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου του 2010.

## 5.6 Σύνοψη και συμπεράσματα

Στην περιοχή του Ζωγράφου για την περίοδο που μελετήσαμε καταγράφηκαν τιμές των συγκεντρώσεων των PM<sub>10</sub> που η μέση ημερήσια τιμή τους γενικά, δεν ξεπερνά το όριο των 50μg/m<sup>3</sup> παρά μόνο τοπικά μέγιστα που ξεπερνούν το όριο αυτό. Συνοψίζοντας από τα παραπάνω, όπως φάνηκε και από την ανάλυση και επεξεργασία

των δεδομένων μας οι αυξομειώσεις της συγκέντρωσης των  $PM_{10}$  είναι αποτέλεσμα κυρίως των εξής παραγόντων:

#### Γεωμορφία του εδάφους

Η κλειστή τοπογραφία του Λεκανοπεδίου της Αθήνας, δυσχεραίνει την κυκλοφορία και τον αερισμό, συνεπώς και τη διάχυση των ρύπων λόγω της ύπαρξης ορεινών όγκων που περικλείουν την περιοχή της πρωτεύουσας. Επιπλέον, η γεωμορφία αυτή ευνοεί συγκεκριμένες συνθήκες κατεύθυνσης ανέμου επιτρέποντας την συσσώρευση των ρύπων σε συγκεκριμένες περιοχές.

#### Κατεύθυνση του ανέμου

Οι επικρατούσες διευθύνσεις του ανέμου είναι βορειανατολικών ή νοτιοδυτικών διευθύνσεων με αποτέλεσμα τη μεταφορά και διασπορά των ρύπων ως επί το πλείστον σε συγκεκριμένες περιοχές.

#### Ταχύτητα του ανέμου

Η ταχύτητα του ανέμου βοηθά σημαντικά στη διάχυση των αέριων ρύπων και τις ημέρες που επικρατεί σχετική άπνοια δεν παρατηρούνται σημαντικές αυξομειώσεις στις συγκεντρώσεις των  $PM_{10}$ .

#### Ωρα της ημέρας

Κατά την διάρκεια της ημέρας σημειώνονται τοπικά μέγιστα στη συγκέντρωση των  $PM_{10}$  λόγω της έντονης ανθρώπινης δραστηριότητας η λόγω ύπαρξης τυχόν θερμοκρασιακών αναστροφών οι οποίες δεν επιτρέπουν την κατακόρυφη κίνηση των αέριων μαζών.

#### Μεταφορά σκόνης από την έρημο Σαχάρα

Η μεταφορά αιωρούμενων σωματιδίων από την έρημο Σαχάρα στην ευρύτερη περιοχή των Αθηνών είναι ένα φαινόμενο που μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την συγκέντρωση των  $PM_{10}$  επιβαρύνοντας την ατμόσφαιρα με αιωρούμενα σωματίδια.

#### Βροχόπτωση

Τα επεισόδια βροχής είναι ένας άμεσος τρόπος απομάκρυνσης των αιωρούμενων σωματιδίων από την ατμόσφαιρα συντελώντας στον καθαρισμό της από τα  $PM_{10}$ .

## **Κεφάλαιο 6**

### **ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ**



## 6.1 Σύνοψη

Αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάλυση της τεχνικής lidar αποπόλωσης και η εφαρμογή της στην μελέτη του φαινομένου μεταφοράς ερημικής σκόνης από την έρημο Σαχάρα στον Ελλαδικό χώρο και κυρίως στο Λεκανοπέδιο της Αττικής. Επιπλέον, η χρήση του οργάνου DustTrak για την καταγραφή της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων και η καταγραφή και η μελέτη των διαδικασιών που επηρεάζουν την συγκέντρωσή τους στο Λεκανοπέδιο της Αττικής.

Αρχικά στο πρώτο κεφάλαιο αναφερθήκαμε στα αιωρούμενα σωματίδια. Παρουσιάστηκαν συνοπτικά οι φυσικές και οι ανθρωπογενείς πηγές των αερολυμάτων, εξετάζεται η χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων και οι φυσικές τους ιδιότητες όπως είναι το μέγεθος και η μορφή τους. Επιπλέον παρουσιάστηκε η δυναμική κίνηση των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα και οι μηχανισμοί απομάκρυνσής τους από αυτήν. Στη συνέχεια αναφερθήκαμε στις οπτικές ιδιότητες των σωματιδίων και στην 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 και οι επιπτώσεις που έχουν στην ανθρώπινη υγεία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάστηκε μία εισαγωγή στις αρχές λειτουργίας και στη διάταξη ενός τυπικού συστήματος lidar και επίσης αναφέρθηκαν οι διάφορες τεχνικές χρήσης ενός τέτοιου συστήματος. Περιγράφηκαν οι βασικές φυσικές αρχές που διέπουν την διάδοση μονοχρωματικής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα όπου στη συνέχεια, πώς βάσει αυτών παράγουμε την βασική εξίσωση lidar. Ακολούθως επιλύουμε την εξίσωση αυτή για την περίπτωση των αιωρούμενων σωματιδίων σύμφωνα με την αντιστροφή σήματος lidar.

Στη συνέχεια στο τρίτο κεφάλαιο αναφερθήκαμε πιο διεξοδικά στην τεχνική lidar αποπόλωσης, περιγράφοντας την μορφή που παίρνει η εξίσωση lidar στην περίπτωση αυτή και ορίζουμε τον λόγο αποπόλωσης. Αναφερθήκαμε συνοπτικά στις αιτίες που προκαλείται αποπόλωση στην διερχόμενη από την ατμόσφαιρα μονοχρωματική ακτινοβολία και περιγράφουμε κάποιες εφαρμογές της τεχνικής αυτής που δεν αποτελούν προϊόν προσωπικής εργασίας, αλλά βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση της όπως και δηλώνουν της δυνατότητες χρήσης της. Οι εφαρμογές που περιγράφηκαν πραγματεύονται των διαχωρισμό σκόνης από τον καπνό, την μελέτη των πολικών στρατοσφαιρικών σύννεφων των οποίων η μελέτη είναι αναγκαία για την καλύτερη κατανόηση των διαδικασιών που εμπλέκονται στη δημιουργία της τρύπας του όζοντος. Επιπλέον η μελέτη των θυσάνων και των προσδιορισμό της θερμοδυναμικής κατάστασης των σύννεφων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο έγινε μία συνοπτική τεχνική περιγραφή του συστήματος lidar αποπόλωσης του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και επίσης περιγράφηκε η διαδικασία βαθμονόμησης που ακολουθείται γενικά για ένα τέτοιο σύστημα αλλά και

πιο ειδικά για το συγκεκριμένο σύστημα στο οποίο έγιναν και οι μετρήσεις. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μία εφαρμογή της τεχνικής στη μελέτη του φαινομένου μεταφοράς ερημικής σκόνης από την έρημο Σαχάρα πάνω από το Λεκανοπέδιο της Αττικής. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με μία δορυφορική εικόνα από τον δορυφόρο MODIS και με τη μεταφορά των αέριων μαζών διηπειρωτικά μέσω του κώδικα HYSPLIT.

Το πέμπτο κεφάλαιο αναφέρεται στο όργανο DustTrak και στην αρχή λειτουργίας του όπως και στη χρήση του για την καταγραφή των αιωρούμενων σωματιδίων με επιτόπιες μετρήσεις στη περιοχή Ζωγράφου την περίοδο του μήνα Σεπτεμβρίου του έτους 2010 και τις τέσσερις πρώτες μέρες του μήνα Οκτωβρίου του ίδιου έτους. Ακολούθως, παρουσιάστηκε μία στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων για όλη την περίοδο των μετρήσεων και για ξεχωριστά για τις ημέρες που σύμφωνα με το μοντέλο DREAM είχαμε επεισόδιο μεταφοράς ερημικής σκόνης από την έρημο Σαχάρα στο Λεκανοπέδιο Αττικής. Έγινε επίσης και μία καταγραφή των πιθανών πηγών αιωρούμενων σωματιδίων στην περιοχή και στη συνέχεια παράγουμε συστηματικά για κάθε ημέρα τα διαγράμματα συγκέντρωσης των  $PM_{10}$  και της σχετικής υγρασίας, όπως και των ανεμολογικών δεδομένων της περιοχής για όλη την περίοδο των μετρήσεων σύμφωνα με τον μετεωρολογικό σταθμό του ΕΜΠ. Ακολούθως, με την επεξεργασία των παραπάνω δεδομένων εξηγούμε τις διαδικασίες και τα μετεωρολογικά φαινόμενα που επηρεάζουν την συγκέντρωση των αερολυμάτων. Επιπλέον, έγινε μία αναφορά σε επιλεγμένες ημέρες και περιόδους που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον όπως ημέρες που σημειώθηκαν επεισόδια βροχής ή ημέρες που σημειώθηκαν επεισόδια μεταφοράς ερημικής σκόνης από την έρημο Σαχάρα.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάστηκε μία σύνοψη όλων των παραπάνω και καταγράφονται τα συνολικά αποτελέσματα και συμπεράσματα της έρευνας, με παράλληλη παρουσίαση των μελλοντικών προοπτικών.

## **6.2 Συμπεράσματα**

Από την επεξεργασία των μετρήσεων που ελήφθησαν με το σύστημα lidar αποπόλωσης στις 3 Μαΐου του 2011 εντοπίστηκαν στρωματώσεις ερημικής σκόνης στο ύψος των 1000m έως το ύψος των 3600m. Συμπεραίνουμε λοιπόν, πως η τεχνική αυτή προσφέρεται για τον εντοπισμό τέτοιων στρωματώσεων αφού η σκόνη οπισθοσκεδάζει σημαντικό ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Συγκρίνοντας τα δεδομένα αυτά με δορυφορικές εικόνες από τον δορυφόρο MODIS και τις οπισθοτροχιές των αέριων μαζών (κώδικας HYSPLIT) που καταλήγουν στο γεωγραφικό μήκος και πλάτος της Αθήνας επιβεβαιώθηκε η προέλευση των στρωματώσεων αυτών σε αυτά τα ύψη από την έρημο Σαχάρα. Συνεπώς, το Λεκανοπέδιο της Αττικής κάτω από συγκεκριμένες και ευνοϊκές συνθήκες δέχεται σημαντικές ποσότητες αιωρούμενων σωματιδίων ερημικής προελεύσεως ικανές να επηρεάσουν σημαντικά τις τιμές συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων  $PM_{10}$ .



Στη συνέχεια από την επεξεργασία των επιτόπιων μετρήσεων που λήφθηκαν με το όργανο DustTrak είδαμε πως οι τιμές των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων στο Λεκανοπέδιο της Αττικής είναι ένας συνδυασμός πολλών παραγόντων, όπως είναι οι μετεωρολογικές και ανεμολογικές συνθήκες που επικρατούν, η ανθρώπινη δραστηριότητα, η γεωμορφία του εδάφους και διηπειρωτικά επεισόδια μεταφοράς σκόνης.

Γενικά, η κλειστή τοπογραφία του Λεκανοπεδίου της Αθήνας, δυσχεραίνει την κυκλοφορία και τον αερισμό, συνεπώς και την διάχυση των ρύπων. Επιπλέον η γεωμορφία αυτή ευνοεί συγκεκριμένες συνθήκες κατεύθυνσης ανέμου επιτρέποντας την συσσώρευση των ρύπων σε συγκεκριμένες περιοχές. Οι επικρατούσες διευθύνσεις του ανέμου είναι κυρίως βορειανατολικές ή νοτιοδυτικές.

Σε ημερήσια βάση παρατηρούμαι σημαντικές αυξομειώσεις στις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων και σημειώνονται τοπικά μέγιστα κυρίως τις ώρες αιχμής του κυκλοφοριακού φόρτου λόγω της εγγύτητας στο σημείο των μετρήσεων της Λεωφόρου Κατεχάκη. Τα μέγιστα αυτά των συγκεντρώσεων σημειώνονται τις πρώτες πρωινές και τις πρώτες απογευματινές ώρες. Η ίδια αιτία φαίνεται να εξηγεί και το γεγονός που το Σάββατο είναι η μέρα με τη μεγαλύτερη μέση ημερήσια τιμή συγκέντρωσης των  $PM_{10}$  λόγω του έντονου κυκλοφοριακού φόρτου στη λεωφόρο Κατεχάκη αφού είναι ένας από τους βασικούς οδικούς συνδέσμους της βόρειας και κεντρικής Αθήνας με τα νότια, παραλιακά προάστια. Νοτιοανατολικοί άνεμοι μεταφέρουν κυρίως ξηρές αέριες μάζες πλούσιες σε αιωρούμενα σωματίδια στην περιοχή του Ζωγράφου ενώ οι πιο «καθαροί» άνεμοι είναι κυρίως οι βόρειοι. Τις ημέρες που επικρατεί άπνοια δεν παρατηρούνται σημαντικές αυξομειώσεις στις τιμές των συγκεντρώσεων των  $PM_{10}$ . Επιπλέον, κατά την διάρκεια της ημέρας κυρίως της πρώτες πρωινές και τις πρώτες βραδινές ώρες παρατηρείται η ύπαρξη μίας θερμοκρασιακής αναστροφής σε σχετικά χαμηλό ύψος στην περιοχή, που εμποδίζει την διάχυση των ρύπων σε άλλες περιοχές. Επεισόδια βροχόπτωσης είναι ικανά να μειώσουν σημαντικά τα επίπεδα συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων με την διαδικασία της έκπλυσης που σταγονίδια νερού συμπαρασύρουν σημαντικές ποσότητες σωματιδίων στο έδαφος.

Τέλος, στην περιοχή διοχετεύονται σημαντικές ποσότητες αιωρούμενων σωματιδίων από την έρημο Σαχάρα. Από την στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων συμπεραίνουμε πως τα επεισόδια αυτά είναι ικανά να επηρεάζουν σημαντικά αυτές τις τιμές ακόμα και σε χαμηλά ύψη όπως έδειξαν και οι μετρήσεις από το όργανο DustTrak. Επίσης παρατηρείται μία καθυστέρηση της παρατήρησης του φαινομένου από το έδαφος που δηλώνει το χρόνο που χρειάζονται αυτά τα σωματίδια να φτάσουν το έδαφος και αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως το φαινόμενο της εναπόθεσης.

### 6.3 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 και της έρευνας έχουν στραφεί στην μελέτη της για την 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 την έγκαιρη αντιμετώπιση για την κατάσβεση τους.

Το σύστημα lidar αποπόλωσης του ΕΜΠ είναι φορητό και μας δίνεται η 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 την δυνατότητα να συλλέξουν μετεωρολογικά και ανεμολογικά δεδομένα μπορούν να εγκατασταθούν σε καίρια σημεία στο Λεκανοπέδιο της Αττικής οι οποίοι θα είναι εξοπλισμένοι με όργανα DustTrak για την καταγραφή των αιωρούμενων σωματιδίων. Μία συστηματική και ενδεδειγμένη καταγραφή τέτοιων δεδομένων θα οδηγούσε σε μία ολοκληρωμένη και πλήρους 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.

## *Βιβλιογραφία*

### *Ξένη βιβλιογραφία*

- Blum U., Fricke K. H., “The Bonn University lidar at the Estrange: technical description and capabilities for the atmospheric research” European Geosciences Union, **23**, 2005
- Boudel W. R., *Fundamentals of Air Pollution*, Academic Press, San Diego, 1994
- Burden F., McKelvie I., Forstner U., Guenther A., *Environmental Monitoring Handbook*, McGraw-Hill Company, N. York, USA, 2002
- Cairo F., Guido D. D., Adriani A., Pulvirenti L., Fierli F., “Comparison of various linear depolarization parameters measured by lidar”, APPLIED OPTICS, Vol. **38**, No.21, 1999
- Chaloulakou A., Kassomenos P., Spyrellis N., Demokritou P., Koutrakis P., “Measurements of PM10 and PM2.5 particle concentrations in Athens, Greece”, Atmospheric Environment, **37**, 649-660, 2003
- Chen W., Chiang C., Nee J., “Lidar ratio and depolarization ratio for cirrus clouds”, Applied Optics, Vol. **41**, No.30, 2002
- Esselborn M., Wirth M., Fix A., Weinzierl B., Rasp K., Tesche M., Petzold A., “Spatial distribution and optical properties of Saharan dust observed by airborne high spectral resolution lidar during SAMUM 2006”, International Meteorological Institute in Stockholm, Tellus **61B**, 131-143, 2009
- Fiocco G. and Smullin L. D., “Detection of scattering layers in the upper atmosphere (60-140 km) by optical radar”, Nature, **199**, 1275-1276, 1963
- Freudenthaler V., Esselborn M., Wiengner M., Heese B., Tesche M., Ansmann A., Müller D., Althausen D., Wirth M., Fix A., Ehret G., Knippertz P., Toledano C., Gasteiger J., Garhammer M., Ard Seefeldner M., “Depolarization ratio profiling at several wavelengths in pure Saharan dust during SAMUM 2006”, Tellus **61B**, 165-179, 2009
- Gobbi G. P., “Polarization lidar returns from aerosols and thin clouds: a framework for the analysis”, Applied Optics, Vol. **37**, No.24, 1998
- Hu Y., Vaughan M., McClain C., Behrenfeld M., Maring H., Anderson D., Sun-Mack S., Flittner D., Huang J., Wielicki B., Minnis P., Weimer C., Trepte C., Kuehn R., “Global statistics of liquid water content and effective number

- concentration of water clouds over ocean derived from compined CALIPSO and MODIS measurements”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **7**, 3353-3359,2007
- Hu Y., “Depolarization ratio-effective lidar ratio relation: Theoretical basis for space lidar cloud phase discrimination”, *Geophysical Research Letters*, Vol. **34**, L11812, doi:10.1029/2007GL029584, 2007
  - Hu Y., Vaughan M., Liu Z., Lin B., Yang P., Flittner D., Hunt B., Kuehn R., Huang J., Wu D., Rodier S., Powell K., Trepte C., Winker D., “The depolarization-attenuated backscatter relation: CALIPSO lidar measurements vs. theory”, *OPTICS EXPRESS*, Vol. **15**, No. 9, 2007
  - Jacobson Z., *Atmospheric pollution*, Cambridge University Press, 2002
  - Kardas A., Markowicz K., Stelmaszczyk K., Karasinski G., Malinowski S., Stacewicz T., Woeste L., Hochhertz C., “Saharah aerosol sensed over Warsaw by backscatter depolarization lidar”, *Optica Applicata*, Vol. **XL**, No. **1**, 2010
  - Young J., Platt U., *Advanced Environmental Monitoring*, Springer, 2007
  - Klett J., “Stable analytical inversion solution for processing lidar returns” *Applied Optics*, Vol. **20**, No.2, 1981
  - Klett, J., “Lidar inversion with Variable Backscatter/Extinction ratios” *Applied Optics*, Vol **24**, 1985
  - Kokhanovsky A., *Aerosol Optics: Light absorption and scattering by particles in the atmosphere*, Springer, 2008
  - Mark L., *Cavity ring-down spectroscopy and the retrieval of aerosol optical properties from biomass burning during flame*, For the degree of Master of Science, Colorado State University, 2008
  - Measures, R. A., *Laser remote sensing, Fundamentals and Applications*, Krieger Publishing Company, N. York, 1992
  - Otto S., Bierwirth E., Weinzierl B., Kandler K., Esselborn M., Tesche M., Schladitz A., Wendisch M., Trautmann T., “Solar radiative effects of a Saharan dust plume observed during SAMUM assuming spheroidal model particles”, *International Meteorological Institute in Stockholm*, *Tellus* **61B**, 270-296, 2009
  - PICASSO-CENA Pathfinder instruments for cloud and aerosol spaceborne observations, Lidar ATBD White Papers.

- Remountaki E., Bourliva A., Mamouri R.E. Papayannis A., Samara C., Tsezos M., “PM10 concentration levels, composition and morphology and aerosol vertical profiles by multi-wavelength raman lidar during a Saharan dust transport event over Athens, Greece”, NTUA, 2009
- Rodriguez J. M., Atmospheric aerosol characterization using Lidar power profile and UPRM lidar development, for the degree of Master of Engineering, University of Puerto Rico, 2009
- Salby M. L., Fundamentals of Atmospheric Physics, Academic Press, San Diego, 1996
- Santacesaria V., MacKenzie A. R., Stefanutti L., “A climatological study of polar stratospheric clouds (1989-1997) from LIDAR measurements over Dumont d’Urville (Antarctica)”, *Tellus* **53B**, 306-321, 2001
- Sassen K., Griffin M. K., Dodd G. C., “Optical scattering and microphysical properties of subvisual cirrus clouds, and climate implications”, *American Meteorological Society*, **28**, 91-98, 1989
- Sassen K., Petrilla R. L., “Lidar depolarization from multiple scattering in marine clouds”, *Applied Optics*, Vol. **25**, No.9, 1986
- Seinfeld J., Pandis N. S., Atmospheric chemistry and physics, John Wiley & Sons, New York, 2006
- Tesche M., Ansmann A., Muller D., Althausen D., Engelmann R., Freudenthaler V., Grob S., “Vertically resolved separation of dust and smoke over Cape Verde using multiwavelength Raman and polarization lidars during Saharan Mineral Dust Experiment 2008”, *J. of Geophysical Research*, Vol. **114**, D13202, doi:10.1029/2009JD011862, 2009
- Weitkamp C., Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere, Springer, Singapore, 2005
- Xuan W., Xiaomeri L., Libera N., Yiming Z., “Lidar measurements of aerosol depolarization ratio”, Napoli University Press, 1998
- Young M., Optics and lasers, Springer, Berlin, 2000

## *Ελληνική βιβλιογραφία*

- Αμοιρίδης Π. Β., Μεταβολές αιωρούμενων σωματιδίων σε τοπική και παγκόσμια κλίμακα, Διδακτορική Διατριβή, Α.Π.Θ., 2005
- Ασσαέλ Μ., Μελάς Δ., Καρατζάς Κ., Αχίλλας Χ., Κακοσίμος Κ., “Ανάπτυξη δικτύου μετρητικών διατάξεων για τον προσδιορισμό της χωρικής κατανομής των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων στο πολεοδομικό συγκρότημα της Θεσσαλονίκης “ 2009
- Δασκάλου Β., Μελέτη των οπτικών ιδιοτήτων των αερολυμάτων που μετρήθηκαν στο σταθμό της Φινοκαλιάς Ηρακλείου Κρήτης, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, 2008
- Λαζαρίδης Μ., Ατμοσφαιρική Ρύπανση με στοιχεία μετεωρολογίας, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2005
- Μακροπούλου Μ., Παπαγιάννης Α., Εφαρμογές των lasers στη βιοιατρική και το Περιβάλλον (Σημειώσεις), Ε.Μ.Π., 2005
- Μαμούρη Ρ., Τηλεπισκόπηση της ατμοσφαιρας με τη χρήση πηγών Laser και δορυφορικών δεκτών, Διδακτορική Διατριβη, Ε.Μ.Π., 2009
- Μελάς Δ., Αλεξανδροπούλου Α., Αμοιρίδης Β., Κακαρίδου Μ., Σουλακέλλης Ν., Ατμοσφαιρική Ρύπανση, [Οδηγός εκπαιδευτικών], Αθήνα, 2000
- Παπαγιάννης Α., Φυσική Περιβάλλοντος, Ε.Μ.Π.-ΣΕΜΦΕ, 2006
- Σεραφετινιδης, Α.Α. Εισαγωγή στην οπτοηλεκτρονική, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1989

## *Αναφορές στο διαδίκτυο*

[www.eoearth.org](http://www.eoearth.org)

<http://lidar.tropos.de>

<http://search.nasa.gov>

[www.solarnavigator.net](http://www.solarnavigator.net)

<http://www.aer.com>

<http://www.environment.gov.au>

<http://www.minenv.gr>

<http://iate.europa.eu>

<http://ready.arl.noaa.gov>

<http://www.european-lung-foundation.org>