



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

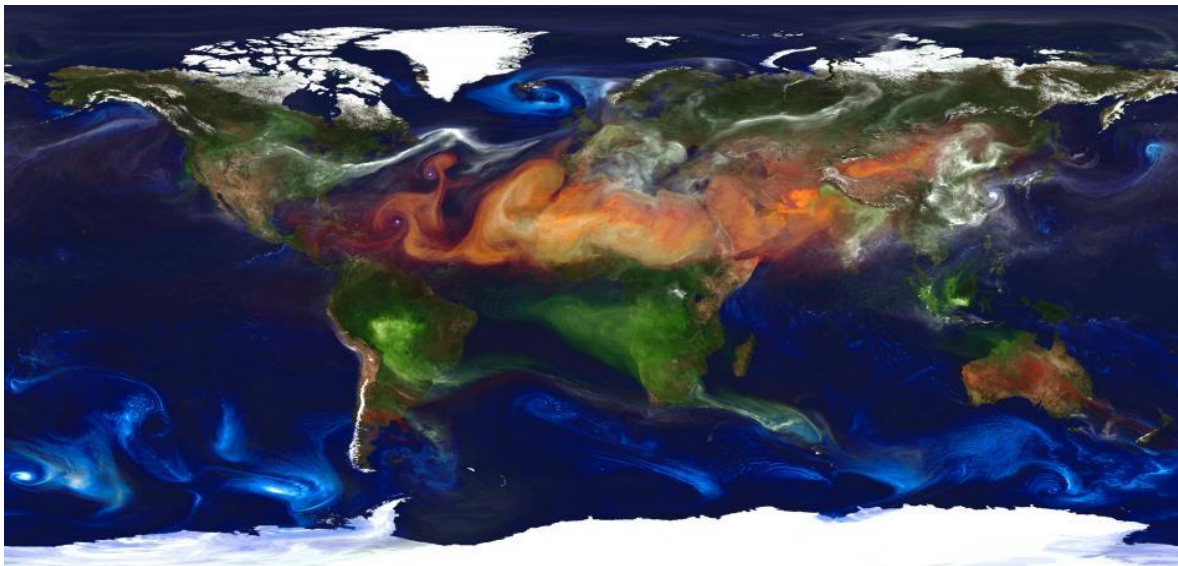
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

*Μελέτη της κατανομής του μεγέθους/συγκέντρωσης των
αιωρούμενων επίγειων αερολυμάτων στο Λεκανοπέδιο*

Αθηνών για το έτος 2013

Διπλωματική Εργασία

Ουρανία Ι. Σουπιωνά



Επιβλέπων: Αλέξανδρος Παπαγιάννης, Καθηγητής ΕΜΠ

Οκτώβριος, 2014

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

**Μελέτη της κατανομής του μεγέθους/συγκέντρωσης των
αιωρούμενων επίγειων αερολυμάτων στο Λεκανοπέδιο
Αθηνών για το έτος 2013**

Διπλωματική Εργασία

Ουρανία Ι. Σουπιωνά

Επιβλέπων: Αλέξανδρος Παπαγιάννης
Καθηγητής ΕΜΠ

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Αμοιρίδης Β.
Ερευνητής Β΄
Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών

Ζιώμας Ι.
Καθηγητής ΕΜΠ

Παπαγιάννης Α.
Καθηγητής ΕΜΠ

Οκτώβριος 2014

Στον αγαπημένο μου παππού,

Σπύρο Π. Λάσκαρη

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του ΕΜΠ κ. Αλέξανδρο Παπαγιάννη, επιβλέποντα αυτής της Διπλωματικής Εργασίας, ο οποίος ήταν πάντα παρών και διαθέσιμος, πρόθυμος να βοηθήσει και να μεταδώσει την αγάπη του για τον κλάδο της Φυσικής του Περιβάλλοντος. Αισθάνομαι τυχερή που μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με το τόσο ενδιαφέρον αυτό θέμα της παρούσας εργασίας και μου ρίξωσε βαθιά τη σκέψη να συνεχίσω τα βήματά μου στον τομέα αυτό.

Επιπρόσθετα, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον Δρ. Παναγιώτη Κόκκαλη, που συνέβαλε πολύ σημαντικά ώστε η παρούσα εργασία να ολοκληρωθεί και ήταν πάντα πρόθυμος να βοηθήσει και να μεταδώσει τις γνώσεις του. Ευχαριστώ επιπλέον και την υποψήφια διδάκτορα Αθηνά Αργυρούλη, που και αυτή με τον τρόπο της συνέβαλε, συμβουλευοντάς με σε αυτή μου την προσπάθεια.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου, το σύντροφο μου και τους φίλους που μου στάθηκαν και που με την αγάπη, τη στήριξη, την κατανόηση και τις συμβουλές τους κατάφερα να ανταπεξέλθω σε όσες δυσκολίες προέκυψαν.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η κατανομή του μεγέθους και οι οπτικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων, στην περιοχή του Λεκανοπεδίου Αττικής, με τη χρήση των επίγειων οργάνων μέτρησης των εταιρειών GRIMM GmbH (Model 365) και TSI Inc. (Model DustTrak 8520) και η σύγκριση των δεδομένων με αυτά του ηλιακού φωτόμετρου CIMEL από το δίκτυο AERONET της National Aeronautics and Space Administration (NASA).

Στο πρώτο Κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή για την γήινη ατμόσφαιρα και τη σύστασή της, τις στρωματώσεις που παρατηρούνται και καταδεικνύεται ο ρόλος των αιωρούμενων σωματιδίων στο φαινόμενο της Παγκόσμιας Κλιματικής Αλλαγής (ΠΚΑ).

Το δεύτερο Κεφάλαιο έχει ως στόχο τη γνωριμία και εξοικείωση με τον όρο αιωρούμενα σωματίδια και το ρόλο τους στην ατμόσφαιρα. Συγκεκριμένα, εξετάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων, οι κατηγορίες στις οποίες κατατάσσονται, οι πηγές προέλευσής τους, οι μηχανισμοί απομάκρυνσης από την ατμόσφαιρα, καθώς και οι επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό, στο περιβάλλον και στο κλίμα.

Στο τρίτο Κεφάλαιο, δίνεται ο ορισμός της ΠΚΑ και παρουσιάζονται οι τρόποι επίδρασης των σωματιδίων αυτών στην διάδοση της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα, καθώς και οι οπτικές τους ιδιότητες.

Στο τέταρτο Κεφάλαιο παρουσιάζουμε μια εκτενή περιγραφή των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν και από τα οποία αντλήθηκαν δεδομένα και περιγράφεται συνοπτικά η γεωγραφική θέση της υπό μελέτης περιοχής, η οποία την καθιστά περιοχή με μεγάλο ατμοσφαιρικό ενδιαφέρον.

Ακολούθως, στο πέμπτο Κεφάλαιο παρουσιάζουμε τα πειραματικά αποτελέσματα που ελήφθησαν για επιλεγμένες ημερομηνίες λόγω της παρουσίας αιωρούμενων σωματιδίων. Συγκεκριμένα, πρώτα παρουσιάζεται μια περίπτωση που χαρακτηρίζεται με απουσία στρωμάτωσης σωματιδίων υπεράνω του Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος (ΑΟΣ) και εν συνεχεία, παρουσιάζουμε την περίπτωση επεισοδίου μεταφοράς σκόνης από την έρημο Σαχάρα και τέλος, γίνεται σύγκριση κατανομής μεγέθους των σωματιδίων όπως μετρήθηκαν από το όργανο GRIMM και το ηλιακό φωτόμετρο του δικτύου AERONET. Παράλληλα παρουσιάζουμε τη μεταβολή του οπτικού πάχους των σωματιδίων και του συντελεστή Ångström, σε συνδυασμό με μετεωρολογικά δεδομένα και παράλληλη ανάλυση οπισθοτροχιών αερίων μαζών για τις ημερομηνίες 11/01/2013 και 20-21/05/2013. Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού παρουσιάζεται η μηνιαία και εποχιακή κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων, έτσι όπως καταγράφηκαν από το GRIMM για ολόκληρο το έτος καθώς και η μηνιαία

και εποχιακή κατανομή της συγκέντρωσης των σωματιδίων PM_{10} , σύμφωνα με τα δεδομένα του TSI, για το έτος 2013.

Η εργασία αυτή ολοκληρώνεται στο έκτο Κεφάλαιο, που περιλαμβάνει τα συμπεράσματα και τις μελλοντικές προοπτικές.

ABSTRACT

The aim of this study is to examine the size distribution and optical properties of aerosols in the region of Attica, using two in situ instruments: one from GRIMM GmbH (Model 365) and one from TSI (Model DustTrak 8520) and comparing the data acquired with those from a sun photometer CIMEL member of the AERONET network of NASA.

Chapter 1 is an introduction to the earth's atmosphere and its composition; the layers of atmosphere observed and a description of the role of aerosols in Global Climate Change.

Chapter 2 deals with the role the airborne particles in the atmosphere. It presents the main characteristics of the aerosols; the categories that they are grouped into; their sources, the removal of particulate matter and the effects on the human health; the environment and the earth's climate.

In Chapter 3, a definition of Global Climate Change is provided, as well as the way that these particles influence propagation of the radiation in the atmosphere. The aerosol optical properties are also described.

In Chapter 4, there is an extensive description of the instruments used from which data were drawn and the geographic location of the study area of atmospheric interest.

In Chapter 5, the experimental results are analyzed for selected dates of interest in terms of the presence of aerosols. This first case analyzed is characterized as a "clear case" due to the absence of particles over the top of the PBL, while the second case is characterized as a "special case" due to the dust transport from the Saharan region where we compared the particle size distribution derived from the GRIMM and CIMEL (AERONET) measurements. Additionally, we present the temporal variation of the aerosol optical thickness and the Ångström exponent, using meteorological data and air mass back trajectories for these selected dates. At the end of this chapter the monthly and seasonal distributions of particle size, as recorded by the GRIMM for the entire year, are presented, along with the monthly and seasonal distributions of the concentration of particles PM_{10} , acquired by the TSI instrument, for the same year.

This thesis is completed in the sixth Chapter, presenting our conclusions and the corresponding future perspectives.

Πίνακας Περιεχομένων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ.....	1
2. ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ-ΚΑΤΑΤΑΞΗ-ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ- ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ	4
2.1. Τα αιωρούμενα σωματίδια.....	4
2.2. Μηχανισμοί απομάκρυνσης από την ατμόσφαιρα	5
2.3. Κατηγορίες κατάταξης σωματιδίων.....	7
2.3.1. Με βάση την προέλευση:.....	7
2.3.2. Με βάση το μηχανισμό σχηματισμού τους :	10
2.3.3. Με βάση τη χημική τους σύσταση :	13
2.3.4. Κατηγοριοποίηση με βάση τον τρόπο που μελετώνται από τους επιστήμονες και καταγράφονται οι μετρήσεις : 13	
2.3.5. Ανάλογα με τις επιπτώσεις τους στην υγεία :	14
2.4. Επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων σε διάφορους τομείς	17
2.4.1. Επιπτώσεις στον άνθρωπο	17
2.4.2. Επιπτώσεις στο περιβάλλον.....	18
2.4.3. Επίδραση των αερολυμάτων στο κλίμα.....	18
2.4.4. Επίδραση στην ορατότητα.....	19
3. ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ	22
3.1. Εισαγωγή.....	22
3.2. Άμεση και έμμεση επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων στην ακτινοβολία	23
3.2.1. Οπτικές ιδιότητες των αερολυμάτων.....	25
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	30
4.1. Περιγραφή του οργάνου GRIMM-Ambient Dust Monitor #365	30
4.2. Περιγραφή του DUST TRAKTM TSI 8520 - Aerosol Monitor	32
4.3. Δίκτυο AERONET-Φωτόμετρο CIMEL	35
4.4. Σύστημα εκπομπής LIDAR EOLE EMΠ	37
4.5. Το Ατμοσφαιρικό μοντέλο HYSPLIT	40
4.6. Η υπό μελέτη περιοχή.....	40
5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	42
5.1. Κατανομή μεγέθους αιωρούμενων σωματιδίων για Clear Case.....	43
5.2. Κατανομή μεγέθους αιωρούμενων σωματιδίων για Special Case	56
5.3. Μηνιαία και εποχιακή κατανομή μεγέθους σωματιδίων	71
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	75
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	78

Εικόνες

Εικόνα 2.1: Θαλάσσια έκταση από όπου μεταφέρονται σταγονίδια νερού με παρουσία διαφόρων αλάτων, υπό την επίδραση του ανέμου (http://earthobservatory.nasa.gov/ , Provided by: Daniel Haier, UCSB).	7
Εικόνα 2.2: Έντονη μεταφορά σκόνης από την Αφρικανική ήπειρο στο μεσογειακό και ελλαδικό χώρο στις 22 Φεβρουαρίου 2013. (NASA image courtesy Jeff Schmaltz, LANCE MODIS Rapid Response. Caption by Michon Scott.)(http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id= 80534).....	8
Εικόνα 2.3: Καπνός από την έκρηξη του ηφαιστείου Σεβελούτς στην Καμτσάτκα της Σιβηρίας κατευθύνεται προς τη Βερίγγειο Θάλασσα, όπως καταγράφηκε από το δορυφόρο Terra της NASA,στις 6 Οκτωβρίου 2012 (http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=79353).....	8
Εικόνα 2.4: Δορυφορική εικόνα από το δορυφόρο Aqua της NASA, στις 25 Αυγούστου 2007. Φαίνεται τεράστια διασπορά καπνού και σωματιδίων από τις πυρκαγιές σε Εύβοια, Αλιβέρι, Λακωνία Μεσσηνία και Ηλεία. (πηγή: NASA).	9
Εικόνα 2.5: Ερημική σκόνη, πτητικές οργανικές ενώσεις από τη βλάστηση, καπνός από τις δασικές πυρκαγιές, και ηφαιστειακή τέφρα είναι φυσικές πηγές των αιωρούμενων σωματιδίων (http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Aerosols/).	9
Εικόνα 2.6: Εκπομπές ρύπων από μεγάλες βιομηχανίες (http://www.econews.gr/wp-content/uploads/2010/10/news-ekropmes-rupwn.jpg).	10
Εικόνα 2.7: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας συσσωμάτωσης (Kathmann, 2008).	11
Εικόνα 2.8: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας πυρηνοποίησης και ανάπτυξης των αερολυμάτων (Kathmann, 2008)	12
Εικόνα 2.9: Οι τέσσερις μεγάλες κατηγορίες των σωματιδίων της ατμόσφαιρας, και κάποιες βασικές χημικές διεργασίες στις οποίες λαμβάνουν μέρος (Finlayson-Pitts and Pitts, 2005).....	14
Εικόνα 2.10: Πιθανότητα εναπόθεσης των εισπνεόμενων σωματιδίων στην αναπνευστική οδό, σύμφωνα με το μέγεθος των σωματιδίων (http://www.keepthecityout.co.uk/2012/01/did-you-know-dust-particles-can-damage-your-health/). ..	15
Εικόνα 2.11: Εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου (διαφορετικής κλίμακας) δείχνουν την ευρεία ποικιλία των σχημάτων των αερολυμάτων. Από αριστερά προς τα δεξιά: ηφαιστειακή τέφρα, γύρη, αλάτι της θάλασσας, και αιθάλη. (http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Aerosol).	16
Εικόνα 2.12: Ανατομία αναπνευστικού συστήματος του ανθρώπινου οργανισμού σε συνάρτηση με τη διάμετρο των εισπνεόμενων σωματιδίων. (http://www.itgsecchi.it/archivio%20progetti%5CAS%2005-06%5CComenius/airspm.html).	16
Εικόνα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση της ισορροπίας της ενέργειας της Γης όπου απαιτείται η ισερχόμενη ροή ενέργειας από τον Ήλιο να εξισορροπείται από την απερχόμενη ροή ενέργειας. Καταδεικνύεται και ο ρόλος των μοριακών αλληλεπιδράσεων των αερολυμάτων (Trenberth, K. E., J. T. Fasullo, J. Kiehl (2009): Earth's Global Energy Budget. Bull. Amer. Meteor. Soc., 90, 311–323. doi: http://dx.doi.org/10.1175/2008BAMS2634.1).....	23
Εικόνα 3.2: Ατμοσφαιρικά δεδομένα οπτικού βάθους αερολυμάτων πέντε ετών είναι διαθέσιμα ως παγκόσμιοι χάρτες αερολυμάτων από το MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer) του δορυφόρου Terra της NASA (http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=5280).....	29
Εικόνα 4.1: Το όργανο μέτρησης GRIMM-Ambient Dust Monitor #365, που βρίσκεται τοποθετημένο στο κτήριο Φυσικής του ΕΜΠ.....	30
Εικόνα 4.2: Αρχή λειτουργίας του συστήματος GRIMM-Ambient Dust Monitor #365.....	31
Εικόνα 4.3: Η φορητή συσκευή DUST TRAK™ TSI 8520 - Aerosol Monitor.....	33
Εικόνα 4.4: Αρχή λειτουργίας του συστήματος DUST TRAK™ TSI 8520 - Aerosol Monitor.	34
Εικόνα 4.5: Αριστερά: οι σταθμοί του παγκόσμιου δικτύου AERONET. Δεξιά: Το ηλιακό φωτόμετρο CIMEL εγκατεστημένο στον ακτινομετρικό σταθμό της Ακαδημίας Αθηνών στο Ίδρυμα Ιατροβιολογικών Ερευνών.	37
Εικόνα 4.6: Η διάταξη του συστήματος lidar, που βρίσκεται στο κτήριο Φυσικής του ΕΜΠ. Στην εικόνα φαίνονται η πηγή Nd:YAG laser, ο διαστολέας δέσμης, το τηλεσκόπιο λήψης, το σύστημα λήψης και καταγραφής των ηλεκτρονικών σημάτων.	39
Εικόνα 4.7: Τριδιάστατη αναπαράσταση της αστικής ρύπανσης στο Λεκανοπέδιο Αττικής. Η χρωματική διακύμανση αντιπροσωπεύει τις τιμές του οπτικού πάχους σωματιδίων από δορυφορικές μετρήσεις (http://www.onassis.gr/enim_deltio/46_09/lecture_1.php).	41

Εικόνα 5.1: Χωρο-Χρονική εξέλιξη της κατακόρυφης κατανομής του διορθωμένου ως προς την απόσταση σήματος lidar (RCS) στα 1064 nm όπως καταγράφηκε από το LIDAR του ΕΜΠ στις 11 Ιανουαρίου 2013.	43
Εικόνα 5.2: Χρονική διακύμανση οπτικού πάχους σε διάφορα μήκη κύματος όπως καταγράφηκε από το φωτόμετρο CIMEL στις 11 Ιανουαρίου 2013, στην Αθήνα.	44
Εικόνα 5.3: Χρονική διακύμανση του οπτικού πάχους αερολυμάτων σε fine mode, coarse mode και total mode, στα 500 nm, όπως καταγράφηκε από το φωτόμετρο CIMEL στις 11 Ιανουαρίου 2013 στην Αθήνα.	45
Εικόνα 5.4: Χρονική διακύμανση του συντελεστή Ångström στα 440-870 nm, όπως καταγράφηκε από το φωτόμετρο CIMEL στις 11 Ιανουαρίου 2013 στην Αθήνα.	46
Εικόνα 5.5: Ημερήσια ωριαία διακύμανση συγκέντρωσης σωματιδίων PM ₁₀ σε µg/m ³ , όπως καταγράφηκε από το DustTrak, στις 11 Ιανουαρίου 2013 στην Αθήνα.	46
Εικόνα 5.6: Αριστερά (σελ. 47): Η χωρο-χρονική εξέλιξη της μεταφοράς σωματιδιακής σκόνης σε g/m ² πάνω από την Ευρώπη, Δεξιά (σελ. 47): Η χωρο-χρονική εξέλιξη της ολικής νεφοκάλυψης πάνω από την Ευρώπη, όπως προβλέφθηκαν από το μοντέλο BSC/DREAM8b για την ημέρα της 11ης Ιανουαρίου 2013. Επίσης παρουσιάζονται τα μετεωρολογικά δεδομένα της ημέρας αυτής (σελ.48) όπως καταγράφηκαν από τον μετεωρολογικό σταθμό DAVIS PRO.	48
Εικόνα 5.7: Ενεργός ακτίνα (effective radius) σε µm, ως προς την τοπική ώρα για τις 11 Ιανουαρίου 2013. Η χρωματική κλίμακα δείχνει τον αριθμό των σωματιδίων.	49
Εικόνα 5.8: Κατανομή μεγέθους σωματιδίων (particle size distribution) dV/dlnR σε µm ³ /µm ² , συναρτήσει της ακτίνας (radius) σε µm, σε ημιλογαριθμική κλίμακα από μετρήσεις των οργάνων GRIMM και AERONET.	51
Εικόνα 5.9: Gaussian fitted κατανομή μεγέθους σωματιδίων (particle size distribution) dV/dlnR σε µm ³ /µm ² , συναρτήσει της ακτίνας (radius) σε µm, σε ημιλογαριθμική κλίμακα.	52
Εικόνα 5.10: Κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 355, 532, 1064 nm (αριστερά) και του συντελεστή Ångström λόγω οπισθοσκέδασης στο ζεύγος 532nm/1064 nm (AE b532nm/1064 nm), (δεξιά) όπως ανακτήθηκαν από τις μετρήσεις Raman lidar (EOLE), πάνω από την Αθήνα στις 11 Ιανουαρίου 2013, μεταξύ 01:30-03:00 UTC.	53
Εικόνα 5.11: Η ανάλυση οπισθοτροχιών 7-ημερών, από το μοντέλο Hysplit, για την προέλευση των σωματιδίων που ανιχνεύονται πάνω από την Αθήνα στις 11 Ιανουαρίου 2013, στις 14:00 UTC σε διάφορα επίπεδα ύψων μεταξύ 1350 m και 2350 m.	54
Εικόνα 5.12: Ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis) για τα δεδομένα της 11ης Ιανουαρίου 2013, στις 13:34 UTC, με ύψος αναφοράς τα 1500 m.	55
Εικόνα 5.13: Υπολογισμός του ύψους του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, μέσω της πρώτης παραγώγου, ως προς την απόσταση, του διορθωμένου σήματος lidar, στα 532 nm, για τις 11 Ιανουαρίου 2013, πάνω από την Αθήνα.	55
Εικόνα 5.14: Χωρο-Χρονική εξέλιξη της κατακόρυφης κατανομής του διορθωμένου ως προς την απόσταση σήματος lidar (RCS) στα 1064 nm όπως καταγράφηκε από το lidar του ΕΜΠ στις 20 και 21 Μαΐου 2013.	56
Εικόνα 5.15: Χρονική διακύμανση οπτικού πάχους σε διάφορα μήκη κύματος όπως καταγράφηκε από το φωτόμετρο CIMEL στις 20 Μαΐου 2013.	57
Εικόνα 5.16: Χρονική διακύμανση οπτικού πάχους σε διάφορα μήκη κύματος όπως καταγράφηκε από το φωτόμετρο CIMEL στις 21 Μαΐου 2013.	58
Εικόνα 5.17: Χρονική διακύμανση του οπτικού πάχους αερολυμάτων σε fine, coarse και total mode, στα 500 nm, όπως καταγράφηκε από το φωτόμετρο CIMEL στις 20 Μαΐου 2013.	59
Εικόνα 5.18: Χρονική διακύμανση του οπτικού πάχους αερολυμάτων σε fine, coarse και total mode, στα 500 nm, όπως καταγράφηκε από το φωτόμετρο CIMEL στις 20 Μαΐου 2013.	59
Εικόνα 5.19: Χρονική διακύμανση του συντελεστή Ångström στα 440-870 nm, όπως καταγράφηκε από το φωτόμετρο CIMEL στις 20 Μαΐου 2013.	60
Εικόνα 5.20: Χρονική διακύμανση του συντελεστή Ångström στα 440-870 nm, όπως καταγράφηκε από το φωτόμετρο CIMEL στις 21 Μαΐου 2013.	60
Εικόνα 5.21: Ημερήσια ωριαία διακύμανση συγκέντρωσης σωματιδίων PM ₁₀ (µg/m ³), όπως καταγράφηκε από το DustTrak, στις 20 Μαΐου 2013.	61
Εικόνα 5.22: Ημερήσια ωριαία διακύμανση συγκέντρωσης σωματιδίων PM ₁₀ (µg/m ³), όπως καταγράφηκε από το DustTrak, στις 21 Μαΐου 2013.	61
Εικόνα 5.23: Αριστερά: Η χωρο-χρονική εξέλιξη της μεταφοράς σωματιδιακής σκόνης σε g/m ² πάνω από την Ευρώπη, Δεξιά: Η χωρο-χρονική εξέλιξη της ολικής νεφοκάλυψης πάνω από την Ευρώπη, όπως προβλέφθηκαν από το μοντέλο BSC/DREAM8b για την 11η Ιανουαρίου 2013.	63

Εικόνα 5.24: Μετεωρολογικά δεδομένα όπως καταγράφηκαν από τον μετεωρολογικό σταθμό DAVIS PRO του Τομέα Φυσικής στις 21 Μαΐου 2013: α) Ωριαία μεταβολή της ατμοσφαιρικής πίεσης, β) Ωριαία μεταβολή της σχετικής υγρασίας, γ) Μέση τιμή της κατεύθυνσης του ανέμου, δ) Ωριαία μεταβολή της ταχύτητας ανέμου, ε) Ωριαία μεταβολή της θερμοκρασίας.	64
Εικόνα 5.25: Μετεωρολογικά δεδομένα όπως καταγράφηκαν από τον μετεωρολογικό σταθμό DAVIS PRO του Τομέα Φυσικής στις 21 Μαΐου 2013: α) Ωριαία μεταβολή της ατμοσφαιρικής πίεσης, β) Ωριαία μεταβολή της σχετικής υγρασίας, γ) Μέση τιμή της κατεύθυνσης του ανέμου, δ) Ωριαία μεταβολή της ταχύτητας ανέμου, ε) Ωριαία μεταβολή της θερμοκρασίας.	65
Εικόνα 5.26: Ενεργός ακτίνα (effective radius) σε μm , ως προς την τοπική ώρα για τις 20-21 Μαΐου 2013. Η χρωματική κλίμακα δείχνει τον αριθμό των σωματιδίων.	66
Εικόνα 5.27: Κατανομή μεγέθους σωματιδίων (particle size distribution) $dV/d\ln R$ σε $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$, συναρτήσει της ακτίνας (Radius) σε μm , σε ημιλογαριθμική κλίμακα, στις 20 Μαΐου 2013, 16:10 UTC στην Αθήνα.	67
Εικόνα 5.28: Κατανομή μεγέθους σωματιδίων (particle size distribution) $dV/d\ln R$ σε $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$, συναρτήσει της ακτίνας (Radius) σε μm , σε ημιλογαριθμική κλίμακα, στις 21 Μαΐου 2013, 06:26 UTC στην Αθήνα.	67
Εικόνα 5.29: Κατακόρυφες κατανομές του συντελεστή οπισθοσκέδασης (355, 532, 1064 nm) (αριστερά) και του συντελεστή Ångström λόγω οπισθοσκέδασης στο ζεύγος 532nm/1064 nm (AEb532nm/1064 nm), (δεξιά) όπως ανακτήθηκαν από τις μετρήσεις Raman lidar (EOLE), πάνω από την Αθήνα στις 20 Μαΐου 2013.	68
Εικόνα 5.30: Η ανάλυση οπισθοτροχιών 4-ημερών, από το μοντέλο Hysplit, για την προέλευση των σωματιδίων που ανιχνεύονται πάνω από την Αθήνα στις 20 Μαΐου 2013, στις 17:00 UTC σε διάφορα επίπεδα ύψους μεταξύ 1273 m και 2272 m.	69
Εικόνα 5.31: Η ανάλυση οπισθοτροχιών 5-ημερών, από το μοντέλο Hysplit, για την προέλευση των σωματιδίων που ανιχνεύονται πάνω από την Αθήνα στις 21 Μαΐου 2013, στις 7:00 UTC σε διάφορα επίπεδα ύψους μεταξύ 2274 m και 1275 m.	70
Εικόνα 5.32: Υπολογισμός του ύψους του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, μέσω της πρώτης παραγώγου, ως προς την απόσταση, του διορθωμένου σήματος LIDAR, στα 532 nm, στις 20 Μαΐου 2013, πάνω από την Αθήνα.	70
Εικόνα 5.33: Μηνιαία κατανομή μεγέθους σωματιδίων (particle size distribution) $dV/d\ln R$ σε $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$, συναρτήσει της ακτίνας (Radius) σε μm , σε ημιλογαριθμική κλίμακα, για το έτος 2013, όπως καταγράφηκε από το όργανο GRIMM, στην Αθήνα.	72
Εικόνα 5.34: Εποχιακή κατανομή μεγέθους σωματιδίων (particle size distribution) $dV/d\ln R$ σε $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$, συναρτήσει της ακτίνας (Radius) σε μm , σε ημιλογαριθμική κλίμακα, για το έτος 2013, όπως καταγράφηκε από το όργανο GRIMM, στην Αθήνα.	72
Εικόνα 5.35: Μηνιαίες τιμές συγκέντρωσης σωματιδίων PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) στην ατμόσφαιρα της Αθήνας, για το έτος 2013, όπως καταγράφηκαν από το όργανο DUST TRACK.	73
Εικόνα 5.36: Εποχιακές τιμές συγκέντρωσης σωματιδίων PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) στην ατμόσφαιρα της Αθήνας, για το έτος 2013, όπως καταγράφηκαν από το όργανο DUST TRACK.	73
Εικόνα 5.37: Ανάλυση κατά συστάδες για την περιοχή της Αθήνας για το έτος 2013, βορειοδυτικά, νοτιοδυτικά, δυτικά, βορειοανατολικά και τοπική κυκλοφορία, στα 2500 m.	74

Πίνακες

Πίνακας 2.1: Πίνακας (σε μετάφραση) σύγκρισης λεπτόκοκκων (fine) και χονδρόκοκκων (coarse) σωματιδίων της ατμόσφαιρας (Seinfeld και Pandis, 2006)	21
Πίνακας 4.1: Κατώτατα όρια διαφορετικών καναλιών αναφορικά με τη διάμετρο των σωματιδίων σε μm.	31
Πίνακας 5.1: Οι τιμές του οπτικού πάχους αερολυμάτων σε fine mode, coarse mode και total mode, στα 500 nm, όπως καταγράφηκαν από το φωτόμετρο CIMEL στις 11 Ιανουαρίου 2013 καθώς και η μέση τιμή και το επί τοις εκατό ποσοστό των δύο κατηγοριών σωματιδίων επί του συνόλου.	45
Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικές τιμές των fine mode και coarse mode περιοχών, όπως προέκυψαν από το fitting σε Γκαουσιανή κατανομή 2ου βαθμού.	52

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Η Γη περιβάλλεται από μια εκτεταμένη ζώνη αερίων, απαραίτητη για την ανάπτυξη της ζωής, η οποία ονομάζεται ατμόσφαιρα. Πρόκειται δηλαδή για ένα αεριώδες περίβλημα, το οποίο αποτελεί ένα σώμα με τη Γη και μετέχει σε όλες τις κινήσεις της.

Η σημασία της ατμόσφαιρας της Γης έγκειται στο γεγονός ότι στην παρουσία της οφείλεται η ύπαρξη ζωής, καθώς εξαιτίας της πραγματοποιείται η απορρόφηση μεγάλου τμήματος της υπεριώδους ακτινοβολίας, μέσω του στρώματος του όζοντος (O_3) και η μείωση της διαφοράς των ακραίων θερμοκρασιών, που θα υπήρχαν μεταξύ ημέρας και νύχτας χωρίς αυτήν, καθιστώντας έτσι τον πλανήτη βιώσιμο. Επίσης, η διαστρωμάτωση που εμφανίζει και η χημική σύστασή της είναι βασικοί παράγοντες οι οποίοι συμβάλουν στη διατήρηση της ζωής πάνω στη Γη, καθώς περιλαμβάνει και το πολύτιμο για την αναπνοή μας οξυγόνο.

Η Γη περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της με σταθερή γωνιακή ταχύτητα. Η ατμόσφαιρά της αποτελείται από ένα μίγμα αερίων, γνωστό και ως ατμοσφαιρικός αέρας, τα οποία συγκρατείται κοντά στην επιφάνεια της Γης λόγω της δύναμης της βαρύτητας (Λαζαρίδης, 2010). Η ατμόσφαιρα είναι αόρατη, άοσμη και παρουσιάζει ένα πλήθος ιδιοτήτων που αποτελούν τις συνθήκες του άμεσου περιβάλλοντος επιβίωσης των ζωικών και φυτικών οργανισμών του πλανήτη μας. Σε κάθε περίπτωση επηρεάζει την οπτική και ακουστική επαφή και είναι καθοριστική για τη ζωή. Απουσία αυτής, οι νύχτες θα ήταν υπερβολικά ψυχρές ενώ κατά τη διάρκεια της μέρας η θερμοκρασία θα ήταν πολύ υψηλότερη από ό,τι είναι τώρα.

Μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα κέντρο πολύπλοκων θερμοδυναμικών και μηχανικών διεργασιών που είναι υπεύθυνες για τη δημιουργία διαφόρων φαινομένων. Παρατηρούνται μετατροπές τόσο της ηλιακής όσο και της γήινης ακτινοβολίας σε άλλες μορφές ενέργειας (π.χ. θερμότητα, κινητική ενέργεια κ.α.). Τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα και γίνονται αντιληπτά από τον άνθρωπο, με άμεσο ή έμμεσο τρόπο, ονομάζονται μετεωρολογικά φαινόμενα.

Το ύψος μέχρι το οποίο φτάνει η ατμόσφαιρα δεν είναι γνωστό, αλλά ούτε και εύκολο να υπολογισθεί. Αυτό συμβαίνει καθώς η πυκνότητά της μειώνεται καθώς αυξάνεται το ύψος, ενώ στα ανώτερα στρώματά της είναι τόσο αραιή, καθιστώντας δύσκολο να καθοριστούν τα ακριβή όρια ανάμεσα σε αυτήν και το ενδοαστρικό διάστημα. Ωστόσο είναι γεγονός πως προστατεύει τη ζωή από μέρος της επικίνδυνης ηλιακής ακτινοβολίας, όπως αναφέρθηκε, αλλά επίσης και από συγκρούσεις με ύλη του διαστήματος (μετεωρίτες, αστεροειδείς κ.λπ.).

Η αρχική ατμόσφαιρα της Γης που δημιουργήθηκε πριν από περίπου 4.6 δισεκατομμύρια χρόνια είχε τελείως διαφορετική σύσταση από τη σημερινή. Περιείχε σε μεγάλες ποσότητες υδρογόνο (H_2) και ευγενή αέρια, διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), άζωτο (N_2) και υδρατμούς (H_2O). Ύστερα από μακροχρόνιες διεργασίες μεταξύ της ξηράς, των ωκεανών και των αερίων, η σύσταση της γήινης ατμόσφαιρας σταθεροποιήθηκε περίπου πριν από 400 εκατομμύρια χρόνια. Πλέον η ατμόσφαιρα της Γης στα κατώτερα κυρίως στρώματά της, αποτελείται από μείγμα αερίων που αποτελούν τον ξηρό αέρα (N_2 78.9%, O_2 20.95%, Ar 0.93% και CO_2 0.03%, τα τέσσερα πρώτα αέρια), από νερό και στις τρεις του φάσεις (στερεή, υγρή και αέρια) και από στερεά ή υγρά σωματίδια, τα οποία αποκαλούμε και ως «αερολύματα» ή «ατμοσφαιρικά αιωρήματα». Η φωτοσύνθεση δημιουργεί το οξυγόνο, οι αζωτούχες ενώσεις δημιουργούν το άζωτο της ατμόσφαιρας ως αποτέλεσμα του μεταβολισμού, ενώ οι αστραπές μετατρέπουν το άζωτο σε μόρια χρήσιμα για τη ζωή.

Έχοντας ως κριτήριο τη μεταβολή της θερμοκρασίας με το ύψος η ατμόσφαιρα αποτελείται από τα εξής στρώματα :

- Τροπόσφαιρα
- Στρατόσφαιρα
- Μεσόσφαιρα
- Θερμόσφαιρα
- Εξώσφαιρα

Η *τροπόσφαιρα* εκτείνεται από την επιφάνεια του εδάφους έως την τροπόπαυση, σε ύψος 10-18 km, ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και την εποχή του χρόνου (6-8 km ύψος στους πόλους, 12 km στα μέσα πλάτη και ~18 km στον ισημερινό). Χαρακτηρίζεται από μείωση της θερμοκρασίας με το ύψος, έντονη κατακόρυφη ανάμειξη αερίων μαζών και συνεπώς δυναμική αστάθεια. Η *στρατόσφαιρα* ξεκινά με το τέλος της τροπόπαυσης και λήγει στη στρατόπαυση, σε περίπου 45-50 km ύψος. Τα χαρακτηριστικά της είναι η αύξηση της θερμοκρασίας με το ύψος, η τέλεια απουσία υδρατμών και η ελάχιστη κατακόρυφη ανάμειξη των αερίων μαζών της. Ακολουθεί η *μεσόσφαιρα* που παύει σε ύψος περίπου 80-90 km και έχει χαρακτηριστικά όμοια με αυτά που αναφέρονται για την τροπόσφαιρα και τέλος, η *θερμόσφαιρα* που εκτείνεται έως τα 110 km. Μεταξύ μεσόσφαιρας-θερμόσφαιρας ευρίσκεται η ιονόσφαιρα, στην οποία, όπως φανερώνει και η ονομασία της, παρατηρείται μερικός ιονισμός των συστατικών της ατμόσφαιρας από την ηλιακή ή σωματιδιακή ακτινοβολία.

Η τροπόσφαιρα χωρίζεται στο Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα (ΑΟΣ) και την ελεύθερη τροπόσφαιρα με κριτήριο την κατακόρυφη μεταβολή της θερμοκρασίας ανάλογα με τη περίοδο της ημέρας και το ύψος. Το πάχος του ΑΟΣ στις ηπειρωτικές περιοχές επηρεάζεται από την

κατακόρυφη κίνηση των αερίων μαζών, στην οποία συμβάλλουν η θέρμανση της γήινης επιφάνειας από την ηλιακή ακτινοβολία, η μορφολογία του εδάφους και οι τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες. Στην τροπόσφαιρα περιέχεται περίπου το 85% της μάζας της ατμόσφαιρας και το σύνολο σχεδόν των υδρατμών και των αιωρούμενων σωματιδίων, ενώ σε αυτό το στρώμα της ατμόσφαιρας γίνεται απορρόφηση της υπέρυθρης (IR) γήινης ακτινοβολίας από τους υδρατμούς (H_2O), το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το μεθάνιο (CH_4) και το όζον (O_3). Εδώ εκπέμπεται το σύνολο των αερίων ρύπων που προέρχονται είτε από φυσικές, είτε από ανθρωπογενείς πηγές. Ο λόγος αυτός καθιστά την τροπόσφαιρα το κύριο μέρος της ατμόσφαιρας μέσα στο οποίο εντείνεται το ενδιαφέρον για τη μελέτη της συμπεριφοράς της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Πλέον, το ενδιαφέρον για τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας είναι μεγάλο εξαιτίας των επιπτώσεων τους στην ανθρώπινη υγεία και του ρόλου τους στην κλιματική αλλαγή.

2. ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ-ΚΑΤΑΤΑΞΗ- ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ- ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

2.1. Τα αιωρούμενα σωματίδια

Με τον όρο αιωρούμενα σωματίδια αναφερόμαστε σε κάθε σώμα, στερεό ή υγρό, εκτός του ύδατος, που βρίσκεται σε διασπορά και έχει διάμετρο μεγαλύτερη από $0.002 \mu m$ και μικρότερη από $100 \mu m$ περίπου. Σωματίδια με διάμετρο έως και $0.1 \mu m$ χαρακτηρίζονται ως πυρήνες συμπίκνωσης (πυρήνες Aitken), για $0.1 \mu m < d \leq 2 \mu m$ αποκαλούνται συσσωματώματα, ενώ για $d > 2 \mu m$ μιλάμε για χονδρά σωματίδια (coarse). Γενικότερα τα σωματίδια που η διάμετρός τους είναι μικρότερη των $10 \mu m$ ($d < 10 \mu m$) σχηματίζουν τα λεγόμενα αερολύματα (aerosols), τα οποία συμπεριφέρονται σαν να ήταν διαλυμένα στον αέρα.

Αξίζει να αναφερθεί πως όσο μεγαλώνει το μέγεθος και συνεπώς η διάμετρος των αιωρούμενων αυτών σωματιδίων, τόσο αυξάνει και η πιθανότητα να κατακρημνισθούν στην επιφάνεια της γης με τη μορφή υετού. Στην πλειοψηφία τους, τα σωματίδια της ατμόσφαιρας δεν έχουν σφαιρικό σχήμα, ωστόσο γίνεται αυτή η παραδοχή προς διευκόλυνση της μελέτης τους και συνεπώς μιλάμε για φαινομενική διάμετρο όταν αναφερόμαστε στο μέγεθος.

Η σκόνη, ο καπνός, η ιπτάμενη τέφρα αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα αιωρούμενων σωματιδίων. Κάποια σωματίδια είναι αρκετά μεγάλα ή σκουρόχρωμα, ώστε καθίστανται ορατά σαν καπνός, ενώ άλλα είναι τόσο μικρά που δύναται να ανιχνευθούν μόνο με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων σε καθαρή ατμόσφαιρα είναι της τάξεως των $10 \mu g/m^3$. Οι τυπικές συγκεντρώσεις των σωματιδίων σε μια απομακρυσμένη (αγροτική ή θαλάσσια) περιοχή είναι της τάξης των 100-200 σωματιδίων/ cm^3 , ενώ σε αστικές περιοχές υπερβαίνουν σε πολλές περιπτώσεις τα 6000 σωματίδια/ cm^3 , όπου φυσικά κάνουμε λόγο για ρυπασμένες περιοχές.

Στην ατμόσφαιρα υπάρχει μια τεράστια ποικιλία σωματιδίων, τόσο από άποψη προέλευσης όσο και από άποψη φυσικοχημικών χαρακτηριστικών, με κυριότερους εκπροσώπους τη σύσταση και το μέγεθος. Η φύση τους και η χημική σύστασή τους ποικίλλει, ενώ εξαρτάται από την τοποθεσία, την εποχή του χρόνου και τις καιρικές συνθήκες. Ο χρόνος ζωής τους μπορεί να κυμαίνεται από λίγα δευτερόλεπτα έως και μερικούς μήνες. Η μεγαλύτερη χρονική διάρκεια ζωής παρατηρείται στην

στρατόσφαιρα, όπου επικρατούν συνθήκες ευστάθειας, σε αντίθεση με την τροπόσφαιρα, όπου οι παρατηρούμενοι χρόνοι ζωής τους είναι μικρότεροι. Αιωρούμενα σωματίδια απαντώνται δηλαδή τόσο στην τροπόσφαιρα, όσο και στην στρατόσφαιρα, με μεγαλύτερη διακύμανση αναφορικά με τη χωρική και την χρονική τους κατανομή στην πρώτη, αλλά και όσον αφορά τη χημική τους σύσταση. Αυτή η διακύμανση οφείλεται κυρίως στην αλληλεπίδραση των σωματιδίων με τον κύκλο του νερού. Αντίθετα, οι πηγές των σωματιδίων στην στρατόσφαιρα είναι λιγότερες από αυτές της τροπόσφαιρας.

2.2.Μηχανισμοί απομάκρυνσης από την ατμόσφαιρα

Τα σωματίδια σταδιακά απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα με δύο κύριους μηχανισμούς:

- i) με ξηρή εναπόθεση στην επιφάνεια της γης και
- ii) με υγρή εναπόθεση, καθώς ενσωματώνονται σε σταγονίδια των νεφών κατά το σχηματισμό ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων.

Τα σωματίδια συμμετέχουν σε φωτοχημικές διεργασίες στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα τη τροποποίηση της χημικής σύστασης και του μεγέθους τους. Οι κυριότερες διεργασίες στις οποίες συμμετέχουν, περιλαμβάνουν χημικές αντιδράσεις με αέρια, συμπύκνωση ατμών και υδρατμών στην επιφάνεια τους, συσσωμάτωση μικρότερων σε μεγαλύτερα, ενσωμάτωση σε σταγονίδια νερού και τελικά κατακρήμνιση μέσω βαρύτητας ή μετά από ενσωμάτωση στις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις (βροχές, χιόνια). Οι διεργασίες αυτές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Φυσικές διεργασίες σχηματισμού ατμοσφαιρικών σωματιδίων, που έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγάλου μεγέθους ($d > 1 \mu m$) «χονδρών» σωματιδίων.
- Χημικές διεργασίες σχηματισμού ατμοσφαιρικών σωματιδίων, που έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μικρού μεγέθους ($d < 1 \mu m$) «λεπτών» σωματιδίων.

i) Ξηρή εναπόθεση :

Ξηρή εναπόθεση είναι η μεταφορά αέριων και σωματιδιακών στοιχείων από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια του εδάφους χωρίς να υπάρχει κατακρήμνιση. Η ξηρή αυτή εναπόθεση των σωματιδίων περιέχει θειικά, νιτρικά αμμωνιακά και άλλα συστατικά που συνεισφέρουν στον ευτροφισμό και στην όξυνση των οικοσυστημάτων, ραδιενεργά στοιχεία, κατιόντα όπως Na^+ , K^+ , Ca^{2+} και Mg^{2+} και τοξικά βαρέα μέταλλα όπως Pb, Cd και Zn (Petroff et al., 2008). Αυτό το είδος της εναπόθεσης εξαρτάται από την τύρβη της ατμόσφαιρας, τις χημικές ιδιότητες των εναποτιθέμενων σωματιδίων και από την φύση της επιφάνειας εναπόθεσης (Seinfeld and Pandis, 2006). Η ατμοσφαιρική σταθερότητα ασκεί μεγάλο έλεγχο στην εναπόθεση των σωματιδίων μέσω της αύξησης της τυρβώδους ανάμιξης. Η ένταση της τυρβώδους ροής στην ατμόσφαιρα, ειδικά κοντά στο έδαφος, είναι αυτή που καθορίζει το ρυθμό με τον οποίο τα σωματίδια αποτίθενται στην

επιφάνεια του εδάφους (Seinfeld and Pandis, 2006). Όταν ένα σωματίδιο μεταφέρεται λόγω της ροής πάνω σε ένα εμπόδιο και λόγω της αδράνειάς του δε μπορεί να ακολουθήσει την ροή στην κοντινή περιοχή του εμποδίου, συγκρούεται και παραμένει στην επιφάνεια αυτού αν αγνοήσουμε την αναπήδηση.

Η αναπήδηση φαίνεται να επηρεάζει την εναπόθεση των χονδρόκοκκων σωματιδίων, με μέγεθος συνήθως πάνω από 5 μm . Από μηχανική σκοπιά, η αναπήδηση αυτή σχετίζεται με την κινητική ενέργεια του σωματιδίου, συνεπώς την ταχύτητά του κατά τη στιγμή της σύγκρουσης και από τη φύση της σύγκρουσης στην επιφάνεια που τελικά εναποτίθεται. (Petroff et al., 2008). Επίσης το μέγεθος, η πυκνότητα και το σχήμα των σωματιδίων καθώς και η επιφάνεια καθεαυτή είναι σημαντικά για το αν θα συγκρατηθούν τα σωματίδια από το έδαφος. Φυσικές επιφάνειες, όπως επιφάνειες με βλάστηση συνήθως ευνοούν την ξηρή εναπόθεση (Seinfeld and Pandis, 2006). Άλλου είδους επιφάνειες, όπως για παράδειγμα επιφάνειες κτίριων σε αστικές περιοχές, λειτουργούν ως εμπόδια.

Η γνώση της ροής της ξηρής εναπόθεσης των σωματιδίων σε επιφάνειες σαν κι αυτές σε μια πόλη είναι σημαντική για τον υπολογισμό της έκθεσης των ανθρώπων στα αερολύματα. Στις αστικές και βιομηχανικές περιοχές για παράδειγμα, το στίγμα της ξηρής αυτής εναπόθεσης είναι εμφανές, καθώς εύκολα ένας παρατηρητής μπορεί να αντιληφθεί τις επικαθήσεις. Κτίρια καλυμμένα από αιθάλη, λερωμένα παράθυρα κτιρίων και αυτοκινήτων, διαβρωμένες επιφάνειες από το συνδυασμό της δράσης των ρυπαντών και των καιρικών συνθηκών (π.χ. χημική διάβρωση μέσω γαλβανικής δράσης των σωματιδίων και ταυτόχρονη παρουσία υγρασίας) είναι μερικά παραδείγματα καθημερινής εικόνας.

ii) Υγρή εναπόθεση:

Πρόκειται για μια φυσική διαδικασία κατά την οποία ύλη μεταφέρεται από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια του εδάφους μέσω υετού (βροχή, χιόνι, χαλάζι κ.ά.). Οι 4 πιθανές διαδικασίες παρουσιάζονται στη συνέχεια:

1. Καθίζηση καθαρισμού, η απομάκρυνση σωματιδίων από ένα σύννεφο που φέρνει βροχή,
2. Παρακράτηση νεφών, η πρόσκρουση των σταγόνων των νεφών στο έδαφος, συνήθως στις ψηλές κορυφές βουνών
3. Εναπόθεση από ομίχλη, η απομάκρυνση ύλης με καθίζηση σταγονιδίων ομίχλης
4. Εναπόθεση χιονιού, η αφαίρεση του ύλης κατά τη διάρκεια μιας χιονοθύελλας.

Και στις τέσσερις προαναφερθείσες διαδικασίες, τρία στάδια είναι απαραίτητα ώστε να έχουμε τελικά υγρή εναπόθεση ύλης. Αρχικά, τα σωματίδια πρέπει να βρεθούν σε κατάσταση τέτοια ώστε να υπάρχει συμπυκνωμένο νερό, στην συνέχεια πρέπει να απομακρυνθούν με τον υετό και τέλος πρέπει να μεταφερθούν στην επιφάνεια της γης. Τα σωματίδια μπορεί να υποστούν χημικές

μετατροπές σε κάθε ένα από αυτά τα στάδια. Ωστόσο, σχεδόν όλες οι παραπάνω διαδικασίες είναι αναστρέψιμες. Για παράδειγμα, με τη βροχή απομακρύνονται σωματίδια από τα νέφη αλλά οι σταγόνες της βροχής μέσω της εξάτμισης δημιουργούν με τη σειρά τους και αυτές νέα αερολύματα (Seinfeld and Pandis, 2006).

Μέσω των διεργασιών αυτών επηρεάζεται το μέγεθος και η σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων. Επειδή ξηρή και υγρή εναπόθεση οδηγούν σε μικρούς χρόνους παραμονής στην τροπόσφαιρα και επιπλέον, λόγω της ποικίλης γεωγραφικής κατανομής των σωματιδίων, τα τροποσφαιρικά αερολύματα διαφέρουν, όσον αφορά τη συγκέντρωση και τη σύνθεσή τους, στα διάφορα μήκη και πλάτη του πλανήτη μας.

2.3.Κατηγορίες κατάταξης σωματιδίων

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν 5 μεγάλες κατηγορίες κατάταξης αιωρούμενων σωματιδίων οι οποίες αφορούν την προέλευση, τον τρόπο σχηματισμού, τη χημική σύσταση, τον επιστημονικό τρόπο μελέτης και καταγραφής και τις επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.

2.3.1. Με βάση την προέλευση:

Όσον αφορά την προέλευση των αιωρούμενων σωματιδίων της τροπόσφαιρας, μπορούμε να διακρίνουμε δυο βασικές κατηγορίες : Α. Φυσικές πηγές, Β. Ανθρωπογενείς πηγές προέλευσης.

A. Φυσικές πηγές :

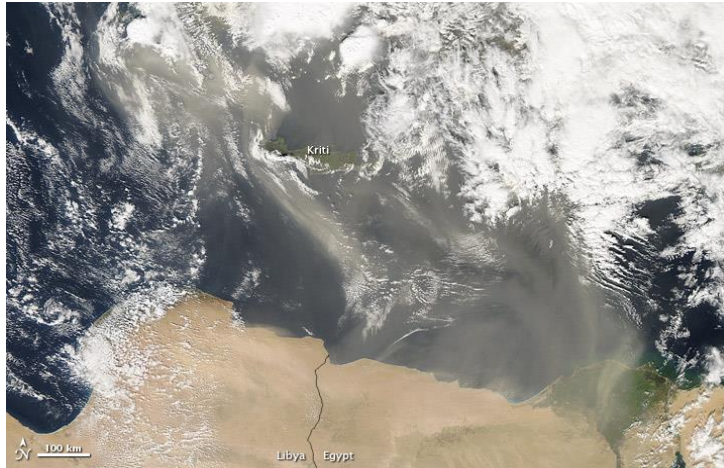
Στην κατηγορία αυτή αξιοσημείωτες πηγές είναι οι ακόλουθες :

- Θαλάσσιες εκτάσεις και ωκεανοί (marine) από όπου μεταφέρονται σταγονίδια νερού με παρουσία διαφόρων αλάτων, υπό την επίδραση του ανέμου. Τα αιωρούμενα σωματίδια του θαλασσινού άλατος έχουν ένα πολύ σημαντικό ρόλο στην ατμοσφαιρική χημεία και επηρεάζουν τη συγκέντρωση αερίων ενώσεων όπως του υδροχλωρίου (HCl), του θειικού οξέως (H₂SO₄), της αμμωνίας (NH₄) κ.λπ. Αποτελούν επίσης «καταβόθρα» του αερίου θειικού οξέος (H₂SO₄) μειώνοντας την απόδοση σχηματισμού του H₂SO₄ στο οριακό στρώμα της θάλασσας (Λαζαρίδης, 2010).



Εικόνα 2.1: Θαλάσσια έκταση από όπου μεταφέρονται σταγονίδια νερού με παρουσία διαφόρων αλάτων, υπό την επίδραση του ανέμου (<http://earthobservatory.nasa.gov/>, Provided by: Daniel Haier, UCSB).

- Ηπειρωτικές εκτάσεις (continental) από τις οποίες έχουμε μεταφορά σκόνης (π.χ. έρημοι) υπό την επίδραση του ανέμου, με ικανότητα να ταξιδεύουν σε μεγάλες αποστάσεις. Μπορούν να επηρεάσουν κατά πολύ την ποιότητα του αέρα μιας περιοχής, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τα οξείδια του αζώτου (NO_x).



Εικόνα 2.2: Έντονη μεταφορά σκόνης από την Αφρικανική ήπειρο στο μεσογειακό και ελλαδικό χώρο στις 22 Φεβρουαρίου 2013. (NASA image courtesy Jeff Schmaltz, LANCE MODIS Rapid Response. Caption by Michon Scott.)(<http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=80534>).

- Ηφαίστεια όπου μέσω των εκρήξεων τους εκλύονται σωματίδια που μπορούν να δημιουργήσουν διαταραχή στο περιβάλλον σε μεγάλη απόσταση από την ηφαιστειακή πηγή. Νέφη ηφαιστειακής σωματιδιακής ύλης μεταφέρονται μέσω του αέρα για πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα (Papayannis et al., 2012).



Εικόνα 2.3: Καπνός από την έκρηξη του ηφαιστείου Σεβελούτς στην Καμτσάτκα της Σιβηρίας κατευθύνεται προς τη Βερίγγειο Θάλασσα, όπως καταγράφηκε από το δορυφόρο Terra της NASA, στις 6 Οκτωβρίου 2012 (<http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=79353>).

- Καύση βιομάζας και δασικές πυρκαγιές κατατάσσονται στις φυσικές πηγές προέλευσης, αν και μπορεί να πυροδοτήθηκαν αρχικά από ανθρώπινη παρέμβαση, αμέλεια και ασυνειδησία.

Μέσω αυτών εκλύονται μεγάλες ποσότητες ρύπων με μορφή καπνού και ιπτάμενης τέφρας (Lazaridis et al., 2008). Σε μεγαλύτερες ποσότητες εκπέμπονται το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και οι υδρατμοί, καθώς και μεγάλος αριθμός αιωρούμενων σωματιδίων και ενώσεων αέριας φάσης, που περιλαμβάνουν μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και μη-μεθανικούς υδρογονάνθρακες (NMHCs). Επίσης κατά τη διάρκεια μιας μεγάλης δασικής πυρκαγιάς έχουμε έκλυση μεγάλου ποσού θερμότητας και πιθανώς, άλλων χημικών ενώσεων από το έδαφος, επηρεάζοντας τη θερμοδυναμική συμπεριφορά του Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος (θερμοκρασία, πίεση, υγρασία).



Εικόνα 2.4: Δορυφορική εικόνα από το δορυφόρο Aqua της NASA, στις 25 Αυγούστου 2007. Φαίνεται τεράστια διασπορά καπνού και σωματιδίων από τις πυρκαγιές σε Εύβοια, Αλιβέρι, Λακωνία Μεσσηνία και Ηλεία. (πηγή: NASA).

- Η χλωρίδα με την εκπομπή οργανικών πτητικών ενώσεων (VOC) και το έδαφος λόγω επαναιώρησης σκόνης μέσω μηχανικών καταπονήσεων και μέσω διάβρωσης της επιφάνειάς του από τον άνεμο αποτελούν με τη σειρά τους, πηγές σωματιδιακών ρύπων. Μπορούν με τον τρόπο αυτό να επηρεάσουν σημαντικά την ποιότητα του αέρα μιας περιοχής. Η φωτοσυνθετική δραστηριότητα και η διαπνοή των φυτών συνδέεται άμεσα με την παραγωγή ισοπρενίου και άλλων πτητικών οργανικών ενώσεων (OVOCs) που με τη φωτοχημική οξείδωσή τους παράγουν οργανικά αερολύματα, τα σωματίδια σκόνης αλλά και μεγάλες ποσότητες επικίνδυνων ρυπαντών από έδαφος ρυπασμένο σε μεγάλο βαθμό, αξίζει να αναφερθούν.



Εικόνα 2.5: Ερημική σκόνη, πτητικές οργανικές ενώσεις από τη βλάστηση, καπνός από τις δασικές πυρκαγιές, και ηφαιστειακή τέφρα είναι φυσικές πηγές των αιωρούμενων σωματιδίων (<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Aerosols/>).

B) Ανθρωπογενείς πηγές :

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν :

- Οι εκπομπές βιομηχανικών ρύπων στις οποίες κατατάσσονται κυρίως σωματίδια με σχετικά μεγάλη διάμετρο μεγαλύτερη από 2.5 μm, προερχόμενα από την ατελή καύση ορυκτών καυσίμων. Επιπλέον, οι εκπομπές αυτές προέρχονται και από άλλες διεργασίες όπως για παράδειγμα η καύση λιγνιτών για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η παρασκευή τσιμέντου, η μεταλλουργία και η καύση στερεών αποβλήτων.



Εικόνα 2.6: Εκπομπές ρύπων από μεγάλες βιομηχανίες (<http://www.econews.gr/wp-content/uploads/2010/10/news-ekpompes-rupwn.jpg>).

- Οι βιομηχανικές πηγές αυτές είναι στατικές, ενώ κάθε μια από αυτές εκλύει σχετικά σταθερή ποσότητα και ποιότητα (με την έννοια της γνωστής σύστασης) ρύπων (Γεντεκάκης, 2003).
- Οι εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων, προϊόντα από τις καύσεις των αυτοκινήτων και άλλων μέσων μεταφοράς. Πρόκειται για κινητές πηγές μόλυνσης που χρησιμοποιούν μηχανές διαφορετικών κύκλων, διαφορετικά καύσιμα και εκπέμπουν ποικίλους σε ποιότητα και ποσότητα, απλούς και σύνθετους ρύπους.

2.3.2. Με βάση το μηχανισμό σχηματισμού τους :

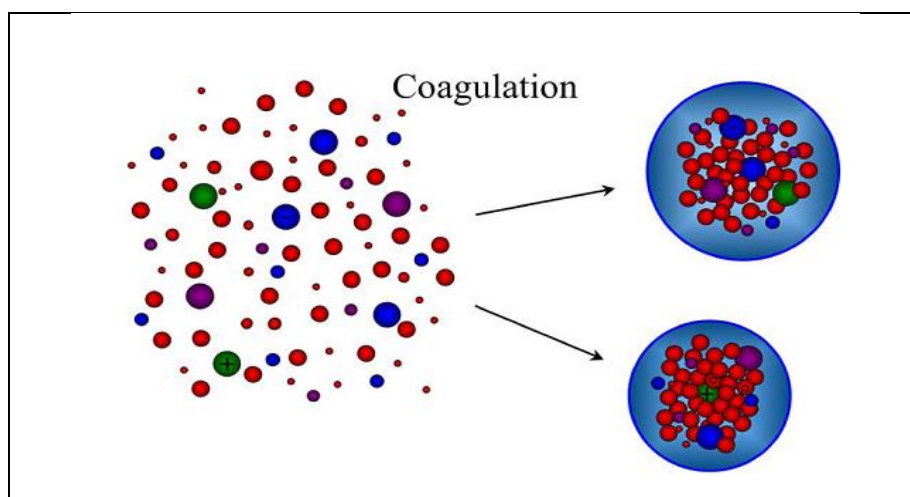
Με βάση το κριτήριο αυτό τα αιωρούμενα σωματίδια κατατάσσονται σε :

- Πρωτογενή, τα οποία εκλύονται απευθείας στην ατμόσφαιρα, είτε από φυσικές διεργασίες είτε από ανθρώπινη δραστηριότητα.
- Δευτερογενή, τα οποία δημιουργούνται από φυσικές ή χημικές διεργασίες (π.χ. παρουσία υδρατμών και ηλιακής ακτινοβολίας), δηλαδή με έμμεσο τρόπο, στην ατμόσφαιρα. Συγκεκριμένα δημιουργούνται μέσω χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα. Στις χημικές αυτές αντιδράσεις παίρνουν μέρος αέρια (π.χ. ατμοσφαιρικό

οξυγόνο, υδρατμοί), αντιδρώντα μόρια (π.χ. O_3 , ελεύθερες ρίζες) και ρύποι (π.χ. SO_2 , NO_2 , VOCs).

Στους μηχανισμούς σχηματισμού των αιωρούμενων σωματιδίων περιλαμβάνεται μια σειρά από διεργασίες. Η *συσσωμάτωση (coagulation)* είναι η διαδικασία κατά την οποία ατμοσφαιρικά αιωρήματα συγκρούονται μεταξύ τους λόγω της σχετικής κίνησης που έχουν το ένα ως προς το άλλο και σχηματίζουν μεγαλύτερα σωματίδια (Λαζαρίδης, 2010). Με τον τρόπο αυτό έχουμε μείωση του αριθμού των σωματιδίων με ταυτόχρονη αύξηση της διαμέτρου τους. Οι λόγοι που οδηγούν στο φαινόμενο της συσσωμάτωσης είναι πολλοί και διάφοροι.

Όταν η σχετική κίνηση μεταξύ των σωματιδίων προέρχεται από την κίνηση Brown, δηλαδή την ακανόνιστη κίνηση ενός μικρού σωματιδίου μέσα σε ένα υγρό ή αέριο το οποίο «βομβαρδίζεται» από τα μόρια του υγρού ή αερίου αυτού αντίστοιχα και γι' αυτό κινείται ακανόνιστα με «τυχαίο» τρόπο στο χώρο, τότε η διεργασία ονομάζεται θερμική συσσωμάτωση (thermal coagulation). Όταν η σχετική αυτή κίνηση προέρχεται από άλλες εξωτερικές δυνάμεις όπως βαρύτητα, ηλεκτρικές δυνάμεις, αεροδυναμικά φαινόμενα κ.α., τότε μιλάμε για κινηματική συσσωμάτωση.



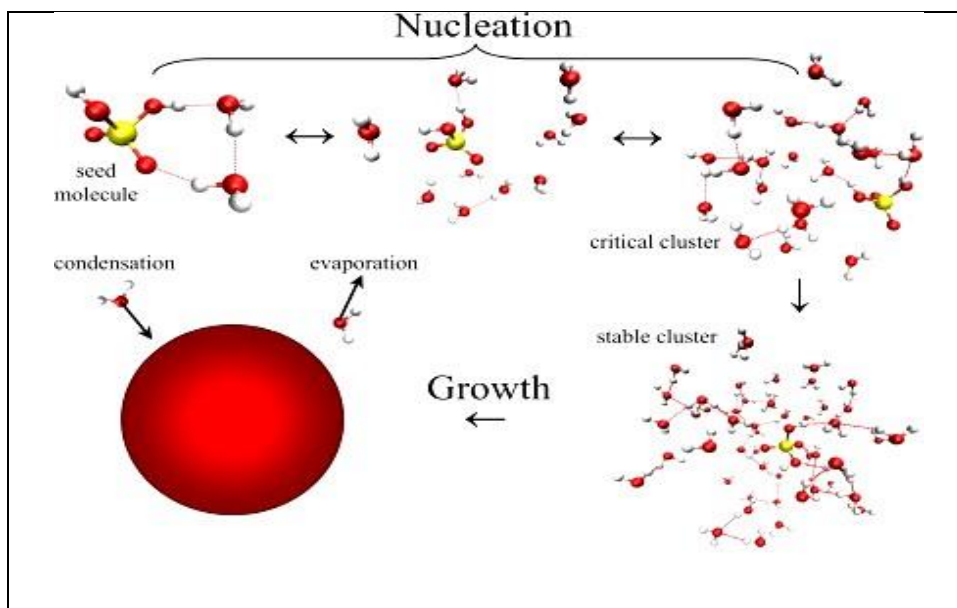
Εικόνα 2.7: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας συσσωμάτωσης (Kathmann, 2008).

Μιλάμε για διεργασίες *συμπύκνωσης (condensation)* όταν τα σταγονίδια που έχουν δημιουργηθεί στην ατμόσφαιρα, συνεχίσουν να αυξάνονται σε μέγεθος με συμπύκνωση υδρατμών. Ο ρυθμός αύξησης του μεγέθους των σταγονιδίων εξαρτάται από τη σχετική υγρασία, το μέγεθος του σωματιδίου και το σχετικό μέγεθος των σωματιδίων ως προς το μέσο ελεύθερο μήκος (ως μέσο ελεύθερο μήκος λ του αερίου, ορίζεται η μέση απόσταση που μετακινείται ένα μόριο μεταξύ δύο διαδοχικών συγκρούσεων), (Λαζαρίδης, 2010). Όταν ακόμη η διάμετρος τους είναι μικρότερη από το ελεύθερο μήκος, οι τυχαίες μοριακές συγκρούσεις μεταξύ σωματιδίων και μορίων των υδρατμών

καθορίζουν το ρυθμό αύξησης. Στην περίπτωση που τα σωματίδια ξεπεράσουν σε μέγεθος το ελεύθερο μήκος, ισχύουν οι θεωρίες συσσωμάτωσης και διάχυσης των μορίων στην επιφάνεια της σταγόνας.

Μια εξίσου σημαντική διεργασία που συμβαίνει στην ατμόσφαιρα και παίζει πρωταρχικό ρόλο σε φαινόμενα όπως η συμπύκνωση, η δημιουργία νέων σωματιδίων και νεφών στην ατμόσφαιρα, η κρυστάλλωση και ο βρασμός, είναι η *πυρηνοποίηση* (*nucleation*). Πρόκειται για μεταβολή φάσης από μια φάση σε άλλη. Παράδειγμα, η μεταβολή από υγρή σε αέρια φάση, η οποία δε γίνεται με άμεσο τρόπο, αλλά μέσω της δημιουργίας μικρών συσσωματώσεων μορίων σε μορφή πυρήνων (*clusters*).

Το γεγονός ότι προϋπάρχουν συγκεντρώσεις σωματιδίων στην ατμόσφαιρα είναι αυτό που καθιστά την άμεση μετατροπή φάσης δύσκολα πραγματοποιήσιμη, καθώς έχουμε πυρηνοποίηση πάνω στην επιφάνεια αυτών των προϋπαρχόντων σωματιδίων. Η πυρηνοποίηση που πραγματοποιείται χωρίς την ύπαρξη σωματιδίων αναφέρεται ως ομογενής πυρηνοποίηση (*homogeneous nucleation*), ενώ παρουσία σωματιδίων ονομάζεται ετερογενής πυρηνοποίηση (*heterogeneous nucleation*). Για διαδικασίες πυρηνοποίησης όπου λαμβάνει μέρος μια μόνο χημική ένωση, έχουμε την ομομοριακή (*homomolecular*) περίπτωση, ενώ όταν συμμετέχουν περισσότερες της μιας χημικές ενώσεις αναφερόμαστε σε ετερομοριακή (*heteromolecular*) πυρηνοποίηση. Η θεωρία της πυρηνοποίησης βασίζεται σε εξισώσεις ροής που περιγράφουν τη μεταβολή της συγκέντρωσης των συσσωματωμάτων με την προσθήκη ή αφαίρεση μορίων (Λαζαρίδης, 2010).



Εικόνα 2.8: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας πυρηνοποίησης και ανάπτυξης των αερολυμάτων (Kathmann, 2008)

Τα σωματίδια των αερολυμάτων επιπλέον συμμετέχουν σε χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα. Στα σωματίδια αυτά ο λόγος επιφάνεια προς μάζα είναι υψηλός και συνεπώς το μέγεθος αυτό της επιφάνειας τους επιτρέπει να συμμετέχουν με ενεργό δράση σε αρκετές αντιδράσεις με τα μόρια υγρών αερίων ή και στερεών σωματιδίων της ατμόσφαιρας. Πιο συγκεκριμένα, οι αντιδράσεις αυτές μπορούν να διακριθούν σε τρία είδη: αντιδράσεις μεταξύ στοιχείων μέσα στο σωματίδιο, αντιδράσεις μεταξύ σωματιδίων διαφορετικής χημικής σύστασης και αντιδράσεις μεταξύ σωματιδίων και ενός ή περισσοτέρων χημικών ενώσεων της περιβάλλουσας αέριας φάσης.

2.3.3. Με βάση τη χημική τους σύσταση :

Ανάλογα με τα συστατικά τους, τα αιωρούμενα σωματίδια παίζουν βασικό ρόλο στην Παγκόσμια Κλιματική Αλλαγή και μπορούμε να διαχωρίσουμε τα σωματίδια σε δυο μεγάλες κατηγορίες :

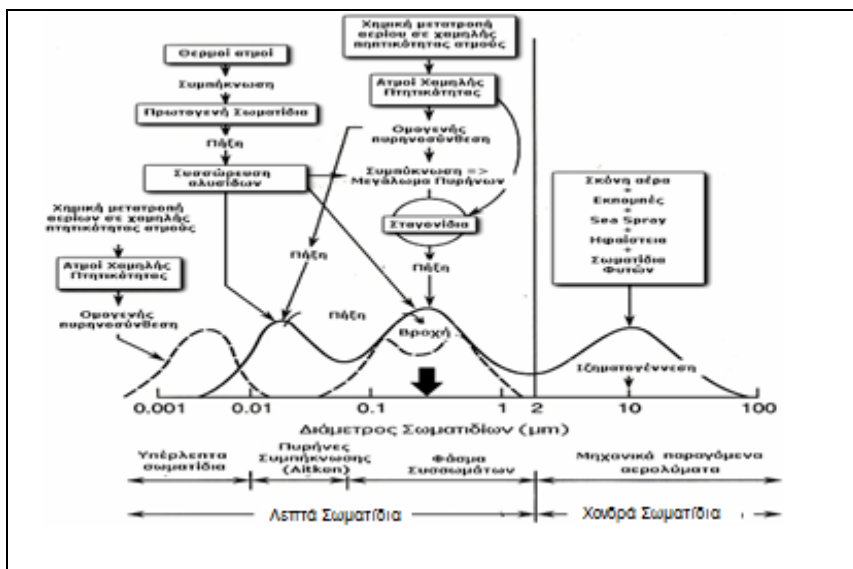
- Τα ανόργανα, είτε πρωτογενή, είτε δευτερογενή, στα οποία τα βασικά συστατικά είναι ανόργανα, όπως προδίδει και η ονομασία της κατηγορίας. Στα ανόργανα αυτά σωματίδια περιλαμβάνονται λεπτά σωματίδια, που συνιστώνται κυρίως από ιόντα (SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ , H^+), υδρατμούς, μέταλλα (Pb, Cd, V, Ni, Cu, Zn, Mn, Fe), ενώ τα ανόργανα στοιχεία των αδρών σωματιδίων είναι οξειδία στοιχείων εδαφικής προέλευσης (Al, Fe, Si), καθώς και άλατα όπως NaCl και CaCO_3 . Εδώ κατατάσσονται και οι ιπτάμενες τέφρες που προέρχονται από τη καύση ορυκτών καυσίμων και τα κυριότερα συστατικά της είναι ο στοιχειακός άνθρακας και τα οξειδία αργιλίου, ασβεστίου, σιδήρου, πυριτίου.
- Τα οργανικά, περιλαμβάνουν και πρωτογενή και δευτερογενή σωματίδια με στοιχειακό άνθρακα (black carbon). Τα οργανικά αυτά σωματίδια αποτελούνται από ένα πολύπλοκο μίγμα οργανικών ενώσεων περιλαμβάνοντας πολλές ομάδες όπως τα n-αλκάνια, n-αλκανικό οξύ, οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs), οι αλκοόλες, τα σάκχαρα, αρωματικές ενώσεις και οξέα. Τα πρωτογενή είναι γνωστά με το γενικό όρο αιθάλη (soot carbon) και τα δευτερογενή σωματίδια προκύπτουν μέσω διεργασιών μετατροπής αερίου σε σωματίδιο από πρόδρομες ενώσεις στην αέρια φάση, όπως για παράδειγμα η φωτοχημική οξείδωση πτητικών υδρογονανθράκων (VOC) με εξαιρετικά πολύπλοκους μηχανισμούς.

2.3.4. Κατηγοριοποίηση με βάση τον τρόπο που μελετώνται από τους επιστήμονες και καταγράφονται οι μετρήσεις :

Οι κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται, σε αυτή την περίπτωση είναι οι ακόλουθες:

- Κατηγορία PM_{10} σωματίδια, που αφορά στα αιωρούμενα εκείνα σωματίδια με διάμετρο μέχρι 10 μm και συνεπώς ανήκουν στα χονδρόκοκκα σωματίδια (coarse),

- Κατηγορία $PM_{2.5}$, που αφορά στα σωματίδια με διάμετρο έως $2.5 \mu m$ και ανήκουν στα λεπτόκοκκα σωματίδια (fine) και
- Κατηγορία PM_1 που αφορά στα σωματίδια με διάμετρο έως $1 \mu m$ και ανήκουν, επίσης, στα λεπτόκοκκα σωματίδια (fine).



Εικόνα 2.9: Οι τέσσερις μεγάλες κατηγορίες των σωματιδίων της ατμόσφαιρας, και κάποιες βασικές χημικές διεργασίες στις οποίες λαμβάνουν μέρος (Finlayson-Pitts and Pitts, 2005).

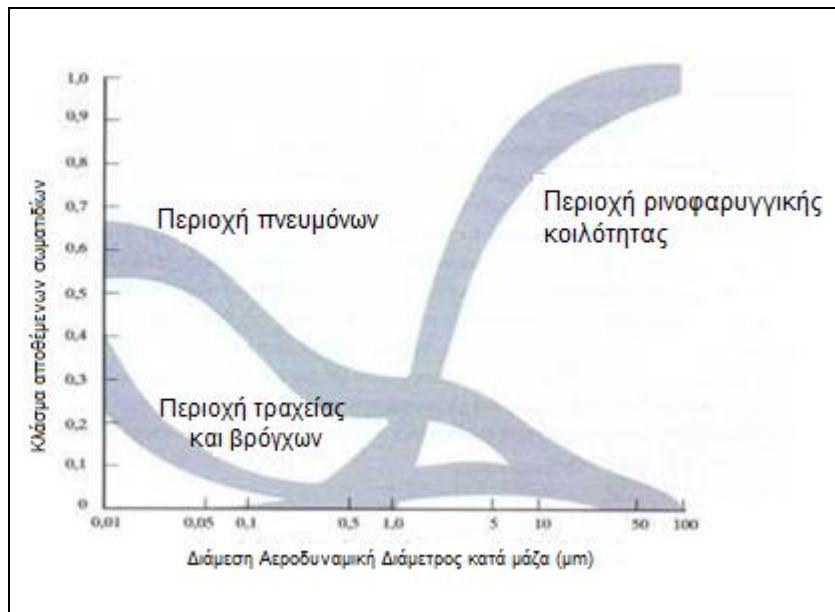
Στην Εικόνα 2.9 συνοψίζονται συναρτήσει του μεγέθους των αερολυμάτων, οι τρόποι δημιουργίας, η προέλευση, οι τρόποι απομάκρυνσης και εναπόθεσης αυτών και γενικά διεργασίες αεροδυναμικής, θερμοδυναμικής και ηλεκτροστατικής συμπεριφοράς τους. Η απομάκρυνση των σωματιδίων εξαρτάται από τις ατμοσφαιρικές διεργασίες, τη μάζας τους και τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες.

2.3.5. Ανάλογα με τις επιπτώσεις τους στην υγεία :

Ένας μέσος ενήλικας αναπνέει περίπου 10.000 λίτρα αέρα κάθε μέρα. Άρα, η ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα που αναπνέουμε διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην υγεία και στη ποιότητα της ζωής. Παγκοσμίως, η ατμοσφαιρική ρύπανση θεωρείται υπεύθυνη για μεγάλο αριθμό θανάτων, αλλά και ασθενειών του αναπνευστικού/καρδιαγγειακού συστήματος. Σήμερα, η ατμοσφαιρική ρύπανση στις πόλεις μας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην υγεία και την ποιότητα ζωής των ανθρώπων, ειδικά για αυτούς που ζουν στα αστικά κέντρα.

Η ικανότητα του αναπνευστικού συστήματος να προστατεύεται από τη σωματιδιακή ύλη καθορίζεται κυρίως από το μέγεθος των σωματιδίων. Όσον πιο μικρά είναι τα σωματίδια, τόσο πιο πολύ αυξάνει η πιθανότητα εισχώρησής τους στην αναπνευστική περιοχή των πνευμόνων, όπου

εναποτίθενται κυρίως στις κυψελίδες των πνευμόνων και με την πάροδο του χρόνου επιφέρουν σοβαρές βλάβες στην υγεία των ανθρώπων.



Εικόνα 2.10: Πιθανότητα εναπόθεσης των εισπνεόμενων σωματιδίων στην αναπνευστική οδό, σύμφωνα με το μέγεθος των σωματιδίων (<http://www.keepthecityout.co.uk/2012/01/did-you-know-dust-particles-can-damage-your-health/>).

Παρατηρούμε στο παραπάνω σχήμα ότι στη ρινοφαρυγγική κοιλότητα αντιστοιχούν σωματίδια μεγάλης διαμέτρου. Αντίθετα, το μέγιστο της απόθεσης στους πνεύμονες αντιστοιχεί στις μικρές διαμέτρους. Τέλος, η καμπύλη που αντιστοιχεί στην τραχεία και στους βρόγχους καλύπτει ευρύ φάσμα διαμέτρων με σχετικά χαμηλά ποσοστά απόθεσης. Το μέγεθος των σωματιδίων είναι σημαντικό, καθώς αυτό είναι που καθορίζει το σημείο της αναπνευστικής οδού όπου θα εναποτεθεί το σωματίδιο, καθώς και το πόσο γρήγορα και με ποιο τρόπο θα απομακρυνθεί. Ωστόσο, δεν είναι μονάχα το πλήθος των σωματιδίων σε ένα συγκεκριμένο εύρος διαμέτρου που είναι σημαντικό, αλλά και η χημική σύσταση του αερολύματος. Η χημική τους σύσταση είναι εκείνη που καθορίζει κατά κύριο λόγο το πως θα αντιδράσει ένα ανθρώπινο όργανο ή σημείο όταν έρθει σε επαφή με τα σωματίδια.

Σύμφωνα λοιπόν με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω μπορούμε να αναφέρουμε τις ακόλουθες κατηγορίες :

- Εισπνεύσιμα σωματίδια (inhalable particles):

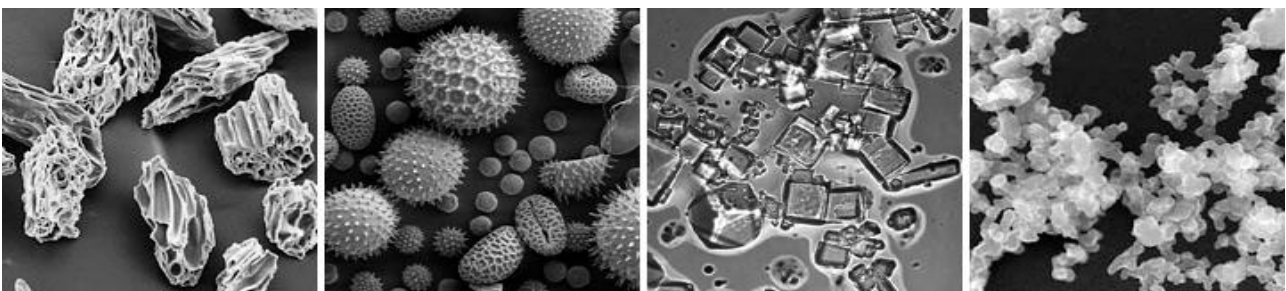
Τα αιωρούμενα σωματίδια που εισέρχονται στο ανώτερο σύστημα της αναπνευστικής οδού (ρινοφάρυγγας). Περιλαμβάνουν σωματίδια με διάμετρο έως 10 μm, καθώς η πλειοψηφία των σωματιδίων με διαμέτρους μεγαλύτερες από 10 μm κατακρατούνται στη στοματική ρινική κοιλότητα.

- Θωρακικά σωματίδια (thoracic particles):

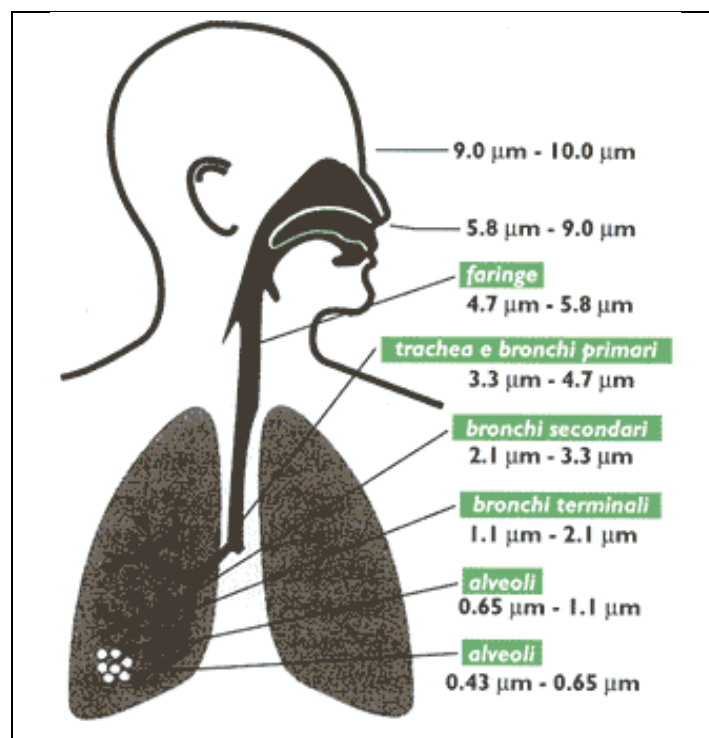
Αποτελούν το κλάσμα των εισπνεύσιμων σωματιδίων που καταφέρνουν να διαπερνούν το ανώτερο τμήμα της αναπνευστικής οδού (ρινοφάρυγγας). Θεωρείται ότι έχουν μέγεθος μικρότερο των 7 μm .

- Αναπνεύσιμα σωματίδια (respirable particles):

Το σωματιδιακό κλάσμα με μέγεθος αεροδυναμικής διαμέτρου μικρότερο από 2.5 μm είναι το πιο σημαντικό από άποψη επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία. Τα σωματίδια αυτά καταφέρνουν να διεισδύσουν έως τα βάθη των πνευμόνων και γι' αυτό καλούνται αναπνεύσιμα.



Εικόνα 2.11: Εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου (διαφορετικής κλίμακας) δείχνουν την ευρεία ποικιλία των σχημάτων των αερολυμάτων. Από αριστερά προς τα δεξιά: ηφαιστειακή τέφρα, γύρη, αλάτι της θάλασσας, και αιθάλη. (<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Aerosol>).



Εικόνα 2.12: Ανατομία αναπνευστικού συστήματος του ανθρώπινου οργανισμού σε συνάρτηση με τη διάμετρο των εισπνεόμενων σωματιδίων. (<http://www.itgsecchi.it/archivio%20progetti%5CAS%2005-06%5CCComenius/airspm.html>).

2.4. Επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων σε διάφορους τομείς

2.4.1. Επιπτώσεις στον άνθρωπο

Τα τελευταία χρόνια σε πολλές χώρες έχει εκδηλωθεί ενδιαφέρον για το πώς επηρεάζεται η ανθρώπινη υγεία από την ατμοσφαιρική ρύπανση. Σε πολλές αστικές περιοχές τα αερολύματα θεωρούνται ο πιο σημαντικός ρύπος προκαλώντας στον ανθρώπινο οργανισμό εξασθένηση της πνευμονικής λειτουργίας, αυξημένα αναπνευστικά προβλήματα, επιβάρυνση χρόνιων πνευμονικών παθήσεων, πνευμονικές καρκινογενέσεις, με αύξηση του αριθμού εισαγωγών σε νοσοκομεία και ειδικότερα στα επείγοντα περιστατικά. Αυξημένοι ρυθμοί εμφάνισης καρδιαγγειακών και αναπνευστικών νόσων και θανάτων ενήλικων ατόμων φαίνεται να συνδέονται με παρατεταμένη έκθεση σε σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις αερολυμάτων.

Ως έκθεση (exposure) ορίζουμε τη συγκέντρωση του ρύπου που έρχεται σε επαφή με τον άνθρωπο, σε ορισμένη χρονική περίοδο (Λαζαρίδης, 2010). Τα αιωρούμενα σωματίδια εναποτίθενται κυρίως στις κυψελίδες των πνευμόνων και με την πάροδο του χρόνου επιφέρουν σοβαρές βλάβες στην ανθρώπινη υγεία. Η υπερβολική έκθεση στα αιωρούμενα σωματίδια συμβάλλει στη δημιουργία χρόνιων αναπνευστικών προβλημάτων και μπορεί να αυξήσει τον κίνδυνο της καρδιακής ανακοπής και του πρόωγου θανάτου. Άτομα νεαρής ηλικίας, άτομα που πάσχουν από άσθμα, καρδιολογικά και άλλα προβλήματα καθώς και οι ηλικιωμένοι είναι ομάδες ιδιαίτερα ευαίσθητες στην έκθεση σε ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Όσο πιο μικρά είναι τα σωματίδια τόσο πιο επικίνδυνα είναι. Η επικινδυνότητα τους εξαρτάται επίσης από τη χημική τους σύσταση. Μελέτες γίνονται και για την τοξικότητα των αερολυμάτων και υπάρχουν ενδείξεις πως η τοξικότητα σχετίζεται με την περιεκτικότητα των σωματιδίων αυτών σε διαλυτά συστατικά, ραδιενεργές ουσίες και μέταλλα και πιθανόν σε οργανικές ενώσεις.

Βραχυπρόθεσμες εκθέσεις μπορεί να προκαλέσουν αυξανόμενη ευαισθησία στα αερομεταφερόμενα αλλεργιογόνα και άλλα ερεθιστικά, και μπορεί να εξασθενίσουν το ανοσοποιητικό σύστημα του σώματος. Η μακροπρόθεσμη έκθεση συμβάλλει εξίσου στις επιπτώσεις, καθώς 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 της χρόνιας βρογχίτιδας και ακόμη και πρόωρο θάνατο.

Ως δόση ορίζουμε την ποσότητα εκείνη του ρύπου η οποία εναποτίθεται στα διάφορα μέρη του αναπνευστικού συστήματος και όχι μόνον, σε ορισμένη χρονική περίοδο. Η δόση αυτή που εναποτίθεται και παραμένει στην αναπνευστική οδό εξαρτάται από τη συγκέντρωση και το χρόνο

έκθεσης, την ανατομία της αναπνευστικής οδού , τις παραμέτρους αναπνοής καθώς και από τις φυσικοχημικές ιδιότητες των σωματιδίων (Λαζαρίδης, 2010).

Στους κύριους μηχανισμούς εναπόθεσης των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου ανήκουν η πρόσκρουση, η καθίζηση, η διάχυση, η ενσφήνωση και η ηλεκτροστατική εναπόθεση. Τέλος να αναφέρουμε ότι το ποσοστό των αιωρούμενων σωματιδίων που θα εισέλθουν τελικά στο αναπνευστικό σύστημα, εξαρτάται, εκτός από την ποσότητά και τη μάζα τους, και από τη συχνότητα και τον τρόπο αναπνοής. Το τι είδους σωματίδια θα εναποτεθούν τελικά, σε τι ποσοστό και σε ποιο σημείο του αναπνευστικού συστήματος, είναι συνάρτηση πολλών και διαφορετικών παραγόντων.

2.4.2. Επιπτώσεις στο περιβάλλον

Με το πέρασμα των χρόνων έχει παρατηρηθεί πως η παρουσία των αιωρούμενων σωματιδίων επιδρά στο περιβάλλον γύρω μας, είτε φυσικό (υδρολογικός κύκλος, βλάστηση, οικοσύστημα) είτε τεχνητό (κτίρια, μνημεία κ.α.) και το επηρεάζει. Επιρροή έχουμε μέσω της εναπόθεσης στα φύλλα και σε άλλα μέρη των φυτών, στις επιφάνειες των κτιρίων κ.α., με σημαντικότερη κυρίως την όξινη εναπόθεση, δηλαδή εναπόθεση σωματιδίων στα οποία περιλαμβάνονται θειικά και νιτρικά. Τα σωματίδια αυτά μπορούν να παραμείνουν για αρκετό χρονικό διάστημα στις επιφάνειες που έχουν αποτεθεί και να βρεθούν και πάλι να αιωρούνται στην ατμόσφαιρα μέσω της επαναιώρησης, όπως έχει αναφερθεί. Άμεσος τρόπος επιρροής, όσον αφορά τη βλάστηση, θεωρείται η εναπόθεση κατευθείαν στα φύλλα και τμήματα των φυτών, ενώ έμμεσος τρόπος, η εναπόθεση στο έδαφος και το νερό απ' όπου ακολούθως επηρεάζεται το οικοσύστημα στο σύνολό του.

Στις φυσικές επιπτώσεις που έχουν σημειωθεί, αξίζει να αναφέρουμε τη μείωση της φωτοσύνθεσης, την πτώση των φύλλων, τη μειωμένη ανάπτυξη των φυτών και την αλλαγή στον κύκλο των θρεπτικών συστατικών των οικοσυστημάτων. Επίσης παρατηρείται αλλαγή στη χημική σύσταση του εδάφους και στον πληθυσμό των βακτηρίων του εδάφους.

Αντίστοιχα, στις τεχνητές επιπτώσεις περιλαμβάνονται η διάβρωση, η αλλαγή και υποβάθμιση στο χρώμα και οι λερωμένες επιφάνειες καλυμμένες με ένα είδος σκόνης μειώνοντας την αισθητική, και όχι μόνον, αξία κτιρίων και σημαντικών πολιτιστικών μνημείων.

2.4.3. Επίδραση των αερολυμάτων στο κλίμα

Τα αιωρούμενα σωματίδια, ως ένα από τα πιο μεταβλητά στοιχεία της ατμόσφαιρας της Γης, είναι γνωστό ότι επηρεάζουν το ενεργειακό ισοζύγιο και το κλίμα της Γης. Τα σωματίδια αερολυμάτων επηρεάζουν το ισοζύγιο ακτινοβολίας και το κλίμα της Γης άμεσα με την απορρόφηση και σκέδαση

της ηλιακής ακτινοβολίας (Forster et al., 2007), όσο και έμμεσα δρώντας ως πυρήνες συμπύκνωσης νεφών, αλλάζοντας έτσι τις μικροσκοπικές ιδιότητες των νεφών (Forster et al., 2007). Επίσης, τα σωματίδια αυτά διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην ατμοσφαιρική χημεία και έτσι επηρεάζουν τις πυκνότητες των άλλων ήσσονος σημασίας συστατικών της ατμόσφαιρας, όπως το όζον (Schwartz et al., 1995). Σε αντίθεση με τα αέρια του θερμοκηπίου που προκαλούν μόνο αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη, τα αιωρούμενα σωματίδια, ανάλογα με τη σύνθεσή τους, μπορεί να προκαλέσουν είτε ψύξη είτε θέρμανση της ατμόσφαιρας.

Η κατανόηση της επίδρασης των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων στο κλίμα και τη φωτοχημεία της ατμόσφαιρας απαιτεί γνώση των οπτικών και φυσικών ιδιοτήτων τους, όπως το συντελεστή απόσβεσης του φωτός, την ανακλαστικότητα, το ποσοστό διασποράς και την κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων. Ωστόσο, παρά τη σημαντική πρόοδο στην κατανόηση των αποτελεσμάτων των αερολυμάτων στο κλίμα, εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικές αβεβαιότητες λόγω της έλλειψης επαρκών πληροφοριών σχετικά με τη χρονική και χωρική μεταβλητότητα των σωματιδίων και των συναφών ιδιοτήτων τους σε όλο τον κόσμο (Forster et al., 2007).

Τα αιωρούμενα σωματίδια επιδρούν άμεσα στην ακτινοβολία με την σκέδαση και απορρόφηση της ηλιακής και θερμικής ακτινοβολίας (Lyamani et al., 2008), αλλά και έμμεσα στο ισοζύγιο ακτινοβολίας, αλλάζοντας τις ιδιότητες των νεφών και τον χρόνο ζωής αυτών στην ατμόσφαιρα και συνεπώς και τις κατακρημνίσεις, όπως θα αναλυθούν στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

2.4.4. Επίδραση στην ορατότητα

Τα σωματίδια ελαττώνουν την ορατότητα καθώς και την ηλιακή ακτινοβολία μέχρις ότου αυτή φτάσει στην επιφάνεια της Γης. Προκαλείται θολότητα της ατμόσφαιρας όταν η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων είναι αυξημένη. Η θολερότητα της ατμόσφαιρας εξαρτάται από την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων καθ' ύψος, τη χημική σύστασή τους και τη σχετική υγρασία. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται εντονότερα σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές, γνωστό και ως ατμοσφαιρική θολερότητα. Έχει αντίστροφα αποτελέσματα από το φαινόμενο του θερμοκηπίου, όπου λόγω της απορρόφησης υπέρυθρης ακτινοβολίας από συγκεκριμένα αέρια, έχουμε θέρμανση των κατώτερων στρωμάτων της ατμόσφαιρας. Έτσι, μια μόνιμη θολότητα της ατμόσφαιρας λόγω αυξημένης συγκέντρωσης, είναι ικανή να προκαλέσει πτώση της θερμοκρασίας της Γης σε χρόνο μερικών ετών. Ωστόσο, το τι θα επικρατήσει τελικά, εξαρτάται από τις τοπικές συνθήκες τις περιοχής που μελετάται κάθε φορά.

Κλείνοντας το Κεφάλαιο 2, παρατίθεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας των αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας, ανάλογα με τον τρόπο δημιουργίας τους, τη σύνθεσή τους, τις πηγές από τις οποίες προέρχονται κ.α.

	Λεπτόκοκκα Σωματίδια	Χονδρόκοκκα Σωματίδια
Τρόποι δημιουργίας	Χημικές αντιδράσεις Πυρηνοποίηση Συμπύκνωση Συσσωμάτωση Διαδικασίες νεφών/ ομίχλης	Μηχανική διατάραξη Αιώρηση σκόνης
Σύνθεση	Θειικά άλατα Νιτρικά άλατα Αμμωνιακά Ιόντα υδρογόνου Στοιχειακός άνθρακας Οργανικά στοιχεία Νερό Μέταλλα	Σκόνη επαναιώρησης Ιπτάμενη τέφρα από γαιάνθρακες και πετρέλαιο Οξειδία από κρυσταλλικά στοιχεία CaCO ₃ , NaCl Γύρη, σπόροι Θραύσματα ελαστικών
Διαλυτότητα	Μεγάλη διαλυτότητα και υγροσκοπικά	Μεγάλη αδιαλυτότητα και μη υγροσκοπικά
Πηγές	Καύση ορυκτών καυσίμων/βιομάζας (γαιάνθρακας, πετρέλαιο, βενζίνης, diesel, ξύλο) Μετατροπή από αέρια σε σωματιδιακή φάση των οξειδίων του αζώτου, του τριοξειδίου του θείου και των οργανικών πτητικών ενώσεων Καμίνια, Βιομηχανικές εγκαταστάσεις	Επαναιώρηση βιομηχανικής σκόνης και εδάφους Αιώρηση εδάφους(καλλιέργεια, εξόρυξη, δρόμοι χωρίς επίστρωση) Βιολογικές πηγές Κατασκευές/ Κατεδαφίσεις Θάλασσα
Χρόνος ζωής	Ημέρες έως εβδομάδες	Λεπτά της ώρας έως ημέρες
Απόσταση μετακίνησης	Εκατοντάδες έως χιλιάδες χιλιόμετρα	< δεκάδες χιλιόμετρα

Πίνακας 2.1: Πίνακας (σε μετάφραση) σύγκρισης λεπτόκοκκων (fine) και χονδρόκοκκων (coarse) σωματιδίων της ατμόσφαιρας (Seinfeld και Pandis, 2006)

3. ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ

3.1. Εισαγωγή

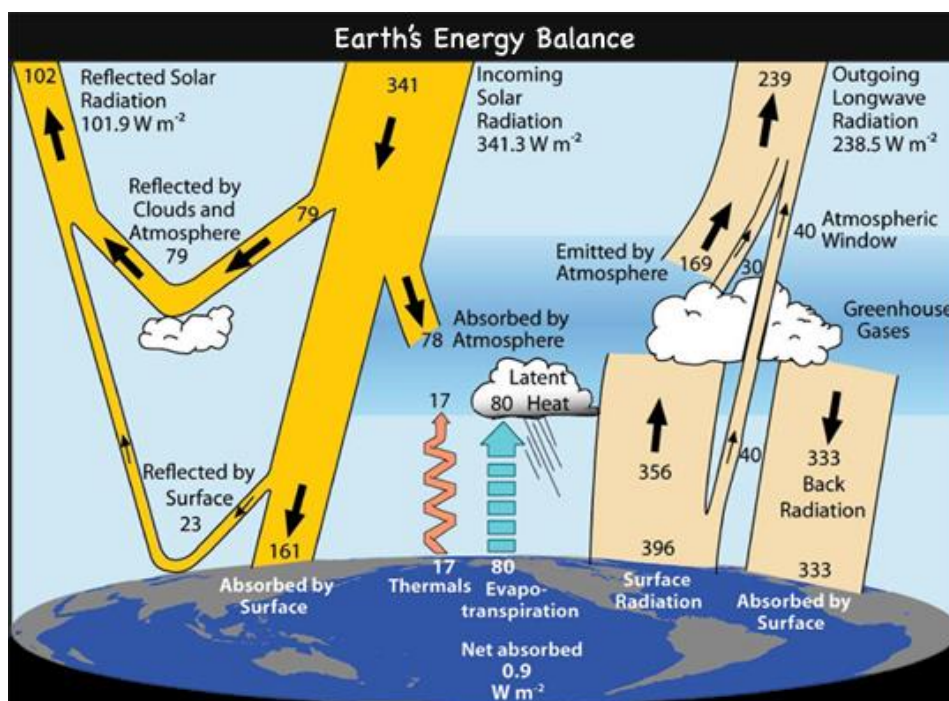
Με τον όρο *Παγκόσμια Κλιματική Αλλαγή* (ΠΚΑ) αναφερόμαστε στην αργή και σταθερή μεταβολή του γήινου κλίματος τόσο μέσω φυσικών, όσο και μέσω ανθρωπογενών επιδράσεων. Το παγκόσμιο κλίμα είναι αποτέλεσμα της πολύπλοκης αλληλεπίδρασης εκατοντάδων μεταβλητών που χαρακτηρίζουν από τη μια την κύρια πηγή ενέργειας (την ηλιακή ακτινοβολία) και από την άλλη ένα μεγάλο αριθμό γήινων χαρακτηριστικών και φαινομένων που το διαμορφώνουν (σύσταση της ατμόσφαιρας, άνεμοι και θαλάσσια ρεύματα, τοπογραφία, νέφη και υετός, ηφαιστειακές εκρήξεις, κ.λ.π.) (Foster et al., 2007, Μελάς κ.α., 2000). Το κλίμα κατά κύριο λόγο είναι αποτέλεσμα της απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας και της αναδιανομή αυτής στο σύστημα ατμόσφαιρας-Γης.

Το ταξίδι της ακτινοβολίας από την αφετηρία (Ήλιος) μέχρι τον τελικό προορισμό (Γη) επηρεάζεται από αστρονομικούς, γεωγραφικούς και γεωμετρικούς παράγοντες. Στους αστρονομικούς περιλαμβάνονται η απόσταση Γης-Ήλιου και το ύψος του ήλιου πάνω από τον ορίζοντα, ενώ στους γεωγραφικούς μπορούμε χαρακτηριστικά να αναφέρουμε το γεωγραφικό πλάτος, το ύψος του σημείου παρατήρησης από τη μέση στάθμη της θάλασσας, την τοπογραφία του ορίζοντα παρατήρησης και την ανακλαστικότητα-λευκότητα της ακτινοβοληθείσας επιφάνειας. Τέλος, στους γεωμετρικούς παράγοντες περιλαμβάνονται ο προσανατολισμός και η κλίση της επιφάνειας που ακτινοβολείται, σε σχέση με την κατεύθυνση των ακτίνων του ήλιου, παράγοντες που σχετίζονται με τις εποχές του έτους.

Ο πλανήτης μας βρίσκεται κατά μέσο όρο σε σταθερή κατάσταση θερμοκρασίας, επομένως χάνει τόση ενέργεια όση λαμβάνει από τον ήλιο με μορφή ακτινοβολίας, σε μεγαλύτερα μήκη κύματος από αυτά της προσπίπτουσας. Στοιχειωδώς, μιλάμε για μια ροή ενέργειας που προσπίπτει ανά μονάδα χρόνου σε μια μοναδιαία επιφάνεια κάθετη στις ακτίνες πρόσπτωσης, που βρίσκεται στα όρια της ατμόσφαιρας. Ακολούθως παρατίθεται ένα χαρακτηριστικό αριθμητικό παράδειγμα για την κατανόηση του ισοζυγίου της ακτινοβολίας από τον Ήλιο και του θερμικού ισοζυγίου της Γης.

Έστω λοιπόν ότι 100 μονάδες ηλιακής ακτινοβολίας προσπίπτουν στην επιφάνεια της γης. Τα σύννεφα και τα αιωρούμενα σωματίδια παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην επανασκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας στο διάστημα (περίπου 20 και 6% αντίστοιχα). Ένα ποσοστό γύρω στο 20% της προσπίπτουσας αυτής ακτινοβολίας απορροφάται από τα σύννεφα και την ατμόσφαιρα (όζον,

υδρατμοί) και συνεπώς ένα ποσοστό της τάξεως του 50% της ακτινοβολίας, φτάνει τελικά στην επιφάνεια της γης, είτε κατευθείαν είτε μέσω σκέδασης, και απορροφάται από αυτήν. Από αυτές τις 50 αυτές μονάδες ενέργειας, ένα πολύ σημαντικό ποσοστό (20 μονάδες ενέργειας) εκπέμπεται σαν υπέρυθρη ακτινοβολία προς το διάστημα (16 απορροφούνται από την ατμόσφαιρα-από το H₂O και CO₂ και 6 περνούν ανεπηρέαστες έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα. Το υπόλοιπο μέρος (30 μονάδες ενέργειας) μεταφέρεται προς την ατμόσφαιρα δια αγωγής (6 μονάδες ενέργειας με τη μορφή αισθητής θερμότητας) και το υπόλοιπο με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας, μέσω της εξάτμισης του νερού (Παπαγιάννης, 2014). Συμπεραίνουμε συνεπώς πως η γη επανεκπέμπει στο διάστημα περίπου το 30% της συνολικής ενέργειας που δέχεται από τον ήλιο.



Εικόνα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση της ισορροπίας της ενέργειας της Γης όπου απαιτείται η ισερχόμενη ροή ενέργειας από τον Ήλιο να εξισορροπείται από την απερχόμενη ροή ενέργειας. Καταδεικνύεται και ο ρόλος των μοριακών αλληλεπιδράσεων των αερολυμάτων (Trenberth, K. E., J. T. Fasullo, J. Kiehl (2009): Earth's Global Energy Budget. Bull. Amer. Meteor. Soc., 90, 311–323. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2008BAMS2634.1>).

3.2. Άμεση και έμμεση επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων στην ακτινοβολία

Κατά τη διαδρομή της μέσα από την ατμόσφαιρα, η ηλιακή ακτινοβολία, όπως αναφέρθηκε προηγούμενα, υφίσταται πολλαπλές επιδράσεις. Ανάλογα με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, τη φυσική και τη χημική κατάσταση (στερεή, υγρή, αέρια) της ύλης που αυτή συναντά, υφίσταται σκέδαση (scattering), απορρόφηση (absorption), φαινόμενα φθορισμού ή ανάκλαση (reflection). Όσον αφορά τα αιωρούμενα σωματίδια και την επίδρασή τους με την ακτινοβολία, μπορούμε να αναφέρουμε ότι έχουμε άμεση και έμμεση επίδραση, η οποία συνεπώς συμβάλλει και

στην ΠΚΑ. Τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας, αλληλεπιδρούν όχι μόνο με τη εξερχόμενη ακτινοβολία (όπως τα αέρια που συμβάλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου), αλλά και με την εισερχόμενη ακτινοβολία. Η μαθηματική περιγραφή της αλληλεπίδρασης γίνεται μέσω πολλών παραγόντων μερικοί από τους οποίους είναι ο συντελεστής σκέδασης, ο συντελεστής απορρόφησης, η λευκότητα μεμονωμένης σκέδασης (Single Scattering Albedo-SSA) και ο συντελεστής Ångström.

Η άμεση επίδραση των αερολυμάτων στην ακτινοβολία γίνεται μέσω της σκέδασης και απορρόφησης της ηλιακής και γήινης ακτινοβολίας από τα σωματίδια αυτά.

Σκέδαση είναι το φαινόμενο κατά το οποίο φωτόνια αλληλεπιδρούν με τα μόρια του αέρα και τα αιωρούμενα σωματίδια στην ατμόσφαιρα, απομακρύνοντας ένα μέρος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη πολύ καλής συσχέτισης ανάμεσα στη μάζα των λεπτών σωματιδίων και του συντελεστή σκέδασης. Κατά την διεργασία αυτή, οποιοδήποτε σωματίδιο παρεμβληθεί στην πορεία ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος, αφαιρεί ενέργεια από αυτό, την οποία επανεκπέμπει σε στερεά γωνία 4π με κέντρο το σωματίδιο. Η δευτερογενής εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας λόγω σκέδασης προέρχεται από τα ηλεκτρόνια των σωματιδίων, τα οποία με την επίδραση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας εκτελούν εξαναγκασμένες ταλαντώσεις, με αποτέλεσμα τα σωματίδια να γίνονται πηγές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (Λαζαρίδης, 2010). Δύο ειδών σκεδάσεις διακρίνονται: η *σκέδαση Rayleigh*, που πραγματοποιείται όταν τα σωματίδια που προκαλούν την σκέδαση έχουν διαστάσεις πολύ μικρότερες του προσπίπτοντος μήκους κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας και η *σκέδαση Mie* όπου η διάμετρος των σωματιδίων είναι συγκρίσιμη με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που επανεκπέμπεται παραμένει σταθερό, μιλάμε δηλαδή για ελαστική σκέδαση. Τέλος, υπάρχει και η μη-ελαστική σκέδαση Raman από τα μόρια της ατμόσφαιρας, όπου το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που επανεκπέμπεται είναι διαφορετικό από το αρχικό. Σκέδαση Raman για παράδειγμα υφίσταται το μόριο του νερού (H_2O).

Στην περίπτωση των αερολυμάτων που μελετάμε, μας ενδιαφέρει η σκέδαση Mie, όπου τα σωματίδια έχουν διάμετρο από 10^{-2} έως 10^2 φορές το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Σε αυτή την κατηγορία σκέδασης, εκτός από το μέγεθος του σωματιδίου, σημαντικό ρόλο παίζουν και οι οπτικές ιδιότητες των σωματιδίων που σχετίζονται με το δείκτη διάθλασής τους, που θα αναλυθεί λίγο αργότερα. Η σκέδαση αυτή γίνεται κυρίως κατά την κατεύθυνση της ακτινοβολίας και δεν είναι πολωμένη. Το θεωρητικό μοντέλο της είναι μια σφαίρα με διαφορετικό συντελεστή διάθλασης από το εξωτερικό περιβάλλον στο οποίο ισχύουν η κυματική και οι εξισώσεις Maxwell Με συνοριακές συνθήκες που δίνονται από την εφαρμογή ακτινοβολίας συγκεκριμένου μήκους

κύματος στην επιφάνεια ενός σφαιρικού σωματιδίου με συγκεκριμένο δείκτη διάθλασης του μέσου, μέσα στο οποίο βρίσκεται το αερόλυμα (Καλυβίτης, 2008).

Απορρόφηση είναι η διαδικασία κατά την οποία έχουμε μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμότητα από τα αιωρούμενα σωματίδια. Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας βρίσκεται μεταξύ 0.1 και 20 μm και καλύπτει της περιοχές της υπεριώδους, της ορατής και της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Γενικά, η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από τον αέρα στην ατμόσφαιρα αποτελεί την βασική διεργασία που καθορίζει το κλίμα στη Γη (Λαζαρίδης, 2010).

Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργούν αυτοί οι δύο μηχανισμοί και το πώς επιδρούν στο ισοζύγιο της ακτινοβολίας είναι ιδιαίτερα πολύπλοκος, λόγω της χωρικής και χρονικής μεταβλητότητας που παρουσιάζουν τόσο οι συγκεντρώσεις όσο και οι φυσικές οπτικές και χημικές ιδιότητες των αερολυμάτων (Lyamani et al., 2008).

Η *έμμεση επίδραση* των αιωρούμενων σωματιδίων στην αλλαγή του κλίματος της γης γίνεται με αρκετά πολύπλοκο τρόπο και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως είναι η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων και των υδρατμών στην ατμόσφαιρα, καθώς και η ανακλαστική ικανότητα των νεφών. Τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν την ιδιότητα να λειτουργούν ως πυρήνες συμπύκνωσης των υδρατμών (cloud condensation nuclei- CCN). Η αύξηση της συγκέντρωσης των πυρήνων συμπύκνωσης σε συνδυασμό με την ύπαρξη υγρασίας οδηγεί σε νέφη με μεγαλύτερη συγκέντρωση υδροσταγονιδίων που έχουν όμως μικρότερη ακτίνα. Λόγω της μικρής ακτίνας των υδροσταγονιδίων, τα νέφη έχουν μεγαλύτερη λευκαύγεια (albedo), λόγω της οποίας, η ηλιακή και η γήινη ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω σε αυτά, σκεδάζεται πολλαπλά, επηρεάζοντας συνεπώς το ενεργειακό ισοζύγιο της γης. Η αύξηση αυτή της συγκέντρωσής των υδροσταγονιδίων επηρεάζει τις βροχοπτώσεις και ο χρόνος παραμονής των θερμών νεφών στην τροπόσφαιρα παρατείνεται.

3.2.1. Οπτικές ιδιότητες των αερολυμάτων

Έχει γίνει κατανοητό μέχρι στιγμής πως η ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάδοσή της στην ατμόσφαιρα αλληλεπιδρά με τα συστατικά αυτής μέσω οπτικών, φυσικών και χημικών φαινομένων, για να φτάσει τελικά εξασθενημένη στην επιφάνεια της γης.

Έστω ότι μια μονοχρωματική ακτίνα φωτός μήκους κύματος λ προσπίπτει και διαδίδεται κάθετα σε μια ομοιογενή ατμόσφαιρα, έχει ένταση $I(0, \lambda)$. Τότε η ένταση της ακτινοβολίας στο επίπεδο του εδάφους θα δίνεται από τη σχέση των Beer-Lambert :

$$I(z, \lambda) = I(0, \lambda) \exp\left(-\int_0^z \alpha(z', \lambda) dz'\right) \quad (3.1)$$

όπου, $\alpha(z', \lambda)$ ο συντελεστής εξασθένησης της ατμόσφαιρας (cm^{-1}) για μήκος κύματος λ , στη θέση z' . Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από φαινόμενα σκέδασης και απορρόφησης που οφείλονται στα

μόρια και στα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας καθώς επίσης από το μήκος κύματος της μονοχρωματικής ακτινοβολίας, τη θερμοκρασία, την πίεση και την κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης των σκεδαζόντων ή απορροφούντων συστατικών της ατμόσφαιρας.

Θεωρώντας την ατμόσφαιρα ομογενή με πάχος dz και για μία ακτινοβολία έντασης έστω I_0 η οποία διέρχεται μέσω της ατμόσφαιρας αυτής και εξασθενεί, ορίζουμε ως *οπτικό πάχος (optical depth)* της ατμόσφαιρας για ένα πάχος z , την ποσότητα:

$$\tau(0, z) = \int_0^z \alpha(\lambda, z') dz' \quad (3.2)$$

όπου εκφράζει την ελάττωση της ακτινοβολίας στο μήκος κύματος λ που οφείλεται στην παρουσία των ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων. Με άλλα λόγια, το οπτικό πάχος που αποδίδεται μόνο στα σωματίδια ονομάζεται σωματιδιακό οπτικό πάχος (Aerosol Optical Thickness-AOT) και υποδηλώνει την εξασθένηση της έντασης μιας δέσμης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας καθώς διέρχεται διαμέσου ενός στρώματος πάχους z στην ατμόσφαιρα, λόγω της αλληλεπίδρασής της με τα σωματίδια που περιέχονται εντός του στρώματος αυτού.

Οι τιμές του οπτικού αυτού πάχους τ κυμαίνονται συνήθως από 0.1 έως 0.5. Σε εξαιρετικές περιπτώσεις η τιμή του ξεπερνά τη μονάδα. Γενικά παρατηρούμε πως το οπτικό βάθος μειώνεται με την αύξηση του μήκους κύματος κάτι που έρχεται σε συμφωνία με το γεγονός ότι η σκέδαση είναι μεγαλύτερη για τα μικρότερα μήκη κύματος. Το οπτικό βάθος λοιπόν είναι μια φθίνουσα συνάρτηση του μήκους κύματος.

Σε μελέτες σχετικές με τις οπτικές ιδιότητες των αεροζόλ και την επίδραση αυτών στο ισοζύγιο της ακτινοβολίας, μια σημαντική παράμετρος είναι και ο συντελεστής Ångström που συμβολίζεται ως A_E . Ο προσδιορισμός αυτής της παραμέτρου γίνεται όταν αναζητείται η εξάρτηση της σκέδασης από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας (Bryant et al., 2006). Ο δείκτης Ångström εξαρτάται από την κατανομή του μεγέθους των αερολυμάτων και από τον δείκτη διάθλασης, αλλά είναι ανεξάρτητος από την συγκέντρωση του αερολύματος. Γενικά, ισχύει ότι η τιμή του δείκτη αυξάνει με τη μείωση του μεγέθους του αερολύματος (Seinfeld and Pandis, 2006).

Οι πληροφορίες που παρέχει ο συντελεστής αυτός είναι σχετικές με το μέγεθος των σωματιδίων που επικρατούν στη μάζα της ατμόσφαιρας. Για καταστάσεις όπου η σκέδαση προέρχεται από σωματίδια διαμέτρου μικρότερης από $1\mu\text{m}$ (fine) π.χ. νιτρικά, θειικά και καύση βιομάζας, ο δείκτης Ångström παίρνει τιμές κοντά στο 2, ενώ για μεγαλύτερα σωματίδια διαμέτρου λίγων μm (coarse) π.χ. σκόνη και θαλάσσιο άλας, παίρνει τιμές κοντά στο μηδέν (Seinfeld and Pandis, 2006). Για την εδαφική σκόνη έχει βρεθεί ότι η τιμή του δείκτη κυμαίνεται μεταξύ 0.1-0.6 (Formenti et al., 2001).

Ορίζουμε ως παράμετρο μεγέθους α (size parameter), το μέγεθος του σωματιδίου εκφρασμένο αδιάστατα, η οποία ορίζεται ως ο λόγος της περιμέτρου του σφαιρικού σωματιδίου (όπου D_p η διάμετρος) προς το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\alpha = \frac{\pi D_p}{\lambda} \quad (3.3)$$

Με βάση τις τιμές του παράγοντα μεγέθους α γίνεται η διάκριση της σκέδασης σε Rayleigh και Mie ($\alpha \ll 1$ σκέδαση Rayleigh, $\alpha \approx 1$ σκέδαση Mie), που αναφέρθηκαν προηγούμενα.

Ο δείκτης διάθλασης είναι ένας μιγαδικός αριθμός που εξαρτάται από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και είναι αδιάστατο μέγεθος. Δίνεται από τη σχέση:

$$m(\lambda) = n(\lambda) + ik(\lambda) \quad (3.4)$$

όπου, ο δείκτης n στο πραγματικό μέρος καταδεικνύει την ταχύτητα του φωτός στο υλικό μέσο, ενώ ο δείκτης k στο φανταστικό μέρος αντιπροσωπεύει την απορροφητικότητα του υλικού του σωματιδίου αυτού. Το φανταστικό και το πραγματικό μέρος είναι επιμέρους συναρτήσεις του μήκους κύματος. Όσο μεγαλύτερη η τιμή του k , τόσο ισχυρότερη είναι και η απορρόφηση από τα αιωρούμενα σωματίδια και συνεπώς για μηδενικό φανταστικό δείκτη, δεν υφίσταται απορρόφηση.

Η απορρόφηση της ακτινοβολίας λοιπόν προκαλείται μόνο από εκείνα τα αερολύματα που έχουν μη μηδενικό συντελεστή διάθλασης k στο φανταστικό μέρος του δείκτη αυτού.

Εάν F_0 (Wm^{-2}) είναι η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στα αερολύματα, τότε η απορροφούμενη ενέργεια F_{abs} (σε W) είναι:

$$F_{abs} = C_{abs}F_0 \quad (3.5)$$

όπου, C_{abs} (m^{-2}) η ενεργός διατομή απορρόφησης (single particle absorption cross section).

Τα αντίστοιχα ισχύουν και για το φαινόμενο της σκέδασης, αν αντικαταστήσουμε το δείκτη «abs» με «scat» και ορίσουμε την ενεργό διατομή απλής σκέδασης από τα αερολύματα, C_{scat} (single particle scattering cross section).

Ορίζουμε ως λευκότητα μεμονωμένης σκέδασης ω (single scattering albedo) το λόγο:

$$\omega = C_{scat}/C_{ext} \quad (3.6)$$

όπου, $C_{ext} = C_{scat} + C_{abs}$ είναι η ενεργός διατομή εξασθένησης από τα αερολύματα (λόγω σκέδασης και απορρόφησης).

Εξάγοντας τη σχέση:

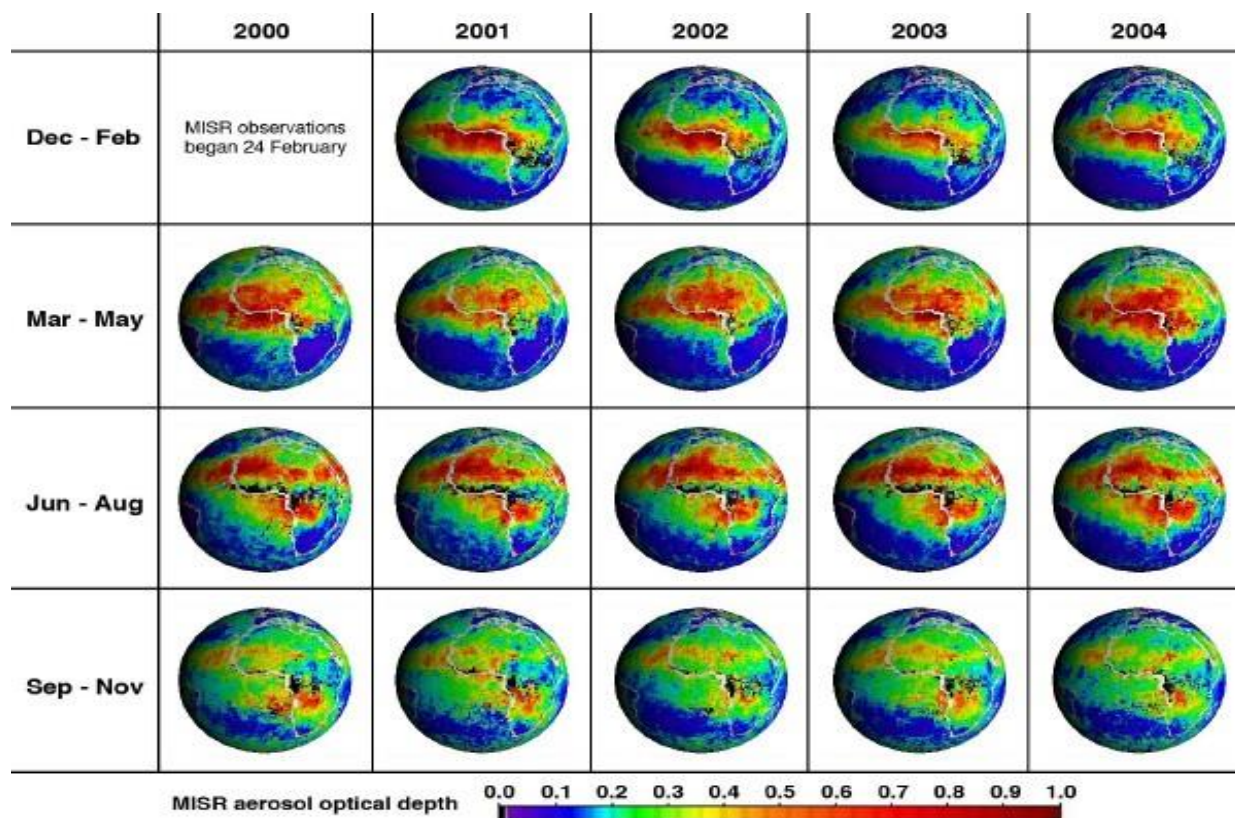
$$1 - \omega = C_{abs}/C_{ext}, \quad (3.7)$$

παρατηρούμε ότι όσο μεγαλώνει το ω τόσο αυξάνει η σκέδαση από τα αερολύματα της ηλιακής ακτινοβολίας ενώ αντίθετα, όσο πιο μεγάλο είναι το $1-\omega$, τόσο αυξάνει και η απορρόφηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας από τα αερολύματα. Μεγάλες τιμές του ω συνεπώς καταδεικνύουν αερολύματα με έντονη σκέδαση και μεγάλες τιμές του $1-\omega$, αερολύματα με έντονη απορρόφηση.

Η Εικόνα 3.2 προέρχεται από τα ατμοσφαιρικά δεδομένα της NASA, όπου με αναπαράσταση σε παγκόσμιους χάρτες χρωματικής κλίμακας, δείχνει την εξέλιξη του οπτικού βάθους των αερολυμάτων, όπως καταγράφηκαν επί μια σειρά 5 ετών, από το 2000 έως το 2004, σε κατηγοριοποίηση ανά εποχή (τρίμηνη περίοδος). Στην Εικόνα αυτή φαίνεται πώς η τοποθεσία και η ποσότητα των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων σε όλη την Αφρική (λευκό περίγραμμα) και τον Ατλαντικό Ωκεανό αλλάζει από εποχή σε εποχή μεταξύ του Μαρτίου του 2000 και Νοεμβρίου του 2004. Το Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR) του δορυφόρου Terra, μετρά το συνολικό ποσό των αερολυμάτων σε μια στήλη της ατμόσφαιρας μεταξύ του αισθητήρα και του εδάφους. Οι μετρήσεις αυτές, δηλαδή το οπτικό βάθος, βασίζονται στο πόσο καλά το φως μπορεί να περνά διαμέσου της στήλης με τελικό προορισμό την επιφάνεια του εδάφους. Η χρωματική κλίμακα υποδεικνύει το εύρος των τιμών του οπτικού βάθους, όπου σχετικά καθαρός ουρανός αναπαρίσταται με μπλε και μωβ απόχρωση, ενώ μια πολύ θολή από σωματίδια ατμόσφαιρα, με πορτοκαλί και κόκκινο. Τιμή οπτικού βάθους 1.0 σημαίνει ότι περίπου 37% του φωτός από την κορυφή της ατμόσφαιρας καταφέρνει να φτάσει τελικά στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ για τιμή 0.7 περίπου το 50% του φωτός περνά και φτάνει στο έδαφος. Το υπόλοιπο ποσοστό απορροφάται, ανακλάται ή σκεδάζεται από τα αερολύματα. Κάποια σημεία με μαύρη απόχρωση φανερώνουν απουσία μετρήσεων καθώς η μόνιμη νεφοκάλυψη στάθηκε εμπόδιο στη λήψη μετρήσεων.

Εντυπωσιακό είναι το γεγονός ότι εποχιακά, παρουσιάζονται ομοιότητες στην εξέλιξη των τιμών του οπτικού πάχους. Μεταξύ Δεκεμβρίου και Φεβρουαρίου, η ατμόσφαιρα πάνω από τη Βόρεια Αφρική είναι σχετικά καθαρή, απαλλαγμένη από σωματίδια, ενώ υψηλά επίπεδα αερολυμάτων παρατηρούνται σε όλη την τροπική περιοχή της Δυτικής Αφρικής και τον Κόλπο της Γουινέας. Από το Μάρτιο μέχρι το Μάιο, παρατηρούνται μεγάλες τιμές οπτικού πάχους και εκτείνονται προς το βορρά, ενώ στη Νότια Αφρική, παρατηρείται το ελάχιστο της τιμής του οπτικού πάχους για ολόκληρο το έτος. Κατά την καλοκαιρινή περίοδο, τους μήνες Ιούνιο έως και Αύγουστο, υπάρχει επίμονη νεφοκάλυψη κατά μήκος της Δυτικής Αφρικής (μαύρα εικονοστοιχεία στους χάρτες) και οι πολύ μεγάλες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων επεκτείνονται βόρειο-βορειοδυτικά πάνω από τη Μαυριτανία, τη Δυτική Σαχάρα και την Αλγερία, αλλά και νότια, προς το Κονγκό. Μεταξύ Σεπτεμβρίου και Νοεμβρίου οι υψηλότερες συγκεντρώσεις περιορίζονται σε τμήματα της νότιας

Αφρικής και του Κονγκό, που ως επί το πλείστον σχετίζονται με την εποχική καύση γεωργικών υπολειμμάτων. Επίσης, μετρίως υψηλή συγκέντρωση οπτικού πάχους (πράσινο και κίτρινο χρώμα) εκτείνεται και λίγο πιο δυτικά, πάνω από τον Ατλαντικό.



Εικόνα 3.2: Ατμοσφαιρικά δεδομένα οπτικού βάθους αερολυμάτων πέντε ετών είναι διαθέσιμα ως παγκόσμιοι χάρτες αερολυμάτων από το MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer) του δορυφόρου Terra της NASA (<http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=5280>).

Για να εκτιμηθεί η επίδραση της χρόνιας έκθεσης των αερολυμάτων στην υγεία του ανθρώπου, απαιτείται ακριβής καταγραφή των ιδιοτήτων των αερολυμάτων για δέκα και περισσότερα χρόνια. Επίγεια δίκτυα καταγραφής που μετρούν με ακρίβεια το ποσό της στήλης αερολυμάτων και τις ιδιότητές τους είναι λίγα και ελλιπή. Πλέον, δορυφορικά όργανα μπορούν να συμπληρώσουν αυτά τα δεδομένα, παρέχοντας μετρήσεις οπτικού βάθους αερολυμάτων για μεγάλες χρονικές περιόδους και μεγάλες περιοχές.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

4.1. Περιγραφή του οργάνου GRIMM-Ambient Dust Monitor #365

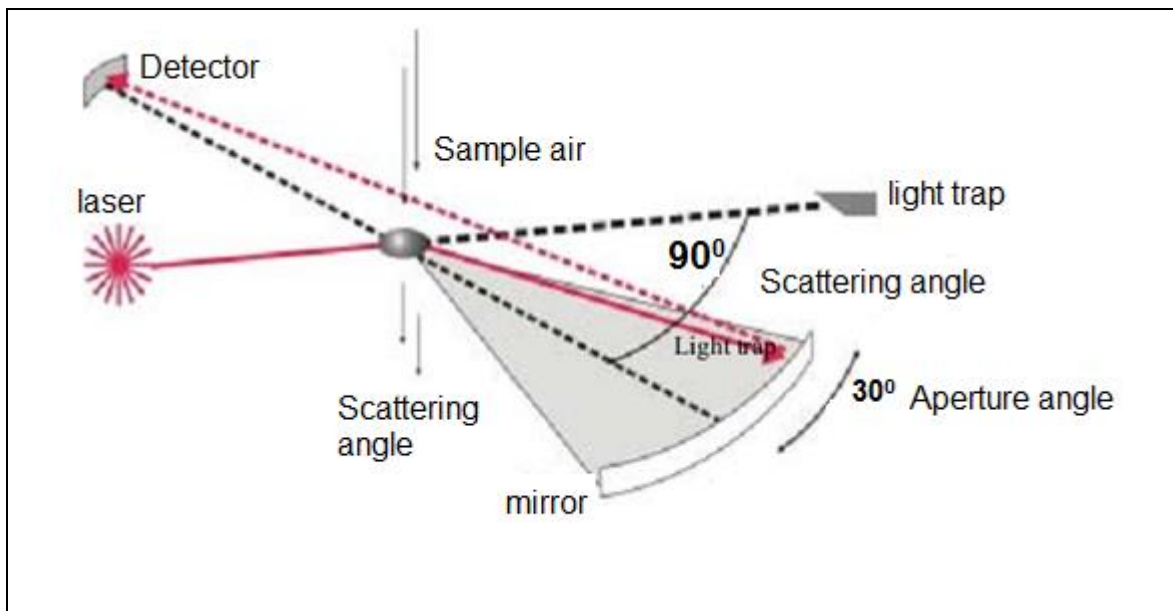
Το όργανο GRIMM-Ambient Dust Monitor #365 αποτελεί μια κινητή μονάδα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.1, με περίβλημα από ανοξείδωτο χάλυβα, με ενσωματωμένη οπτική μονάδα, ικανή να μετρήσει, ταυτόχρονα, τα σωματίδια PM_{10} , $PM_{2.5}$ και PM_1 . Έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιεί μετρήσεις για σωματίδια με εύρος μεγέθους από 0.25 μm έως 32 μm (προαιρετικά) και μάζα σωματιδίων από 1 έως 1500 $\mu g/m^3$, με παράλληλο αισθητήρα μέτρησης της θερμοκρασίας και της υγρασίας. Η συσκευή αυτή αποθηκεύει δεδομένα μετρήσεων για περιόδους ημερών, εβδομάδων ή μηνών των αποτελεσμάτων των μετρήσεων. Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στη σκέδαση του φωτός δέσμης laser (laser ημιαγωγού) από τα αιωρούμενα σωματίδια, κατά την οποία γίνεται καταμέτρηση των παραγόμενων μεμονωμένων φωτονίων σκέδασης. Η πηγή laser λειτουργεί στα 685 nm και έχει ισχύ 60 mW. Η σκεδαζόμενη ακτινοβολία laser συλλέγεται σε γωνία περίπου 90° μέσω ενός κάτοπτρου και οδηγείται σε μια φωτοδίοδο όπου και ανιχνεύεται. Το παραγόμενο ηλεκτρικό σήμα από την φωτοδίοδο περνά, μετά από μια αντίστοιχη ενίσχυση, σε έναν πολυκαλικό ταξινομητή μεγέθους. Ένας αναλυτής καταγραφής του ύψους του κάθε παραγόμενου παλμού ταξινομεί τότε το σήμα που καταγράφεται σε κάθε κανάλι (size bin) ανάλογα με το μέγεθος του σκεδάζοντος σωματιδίου.



Εικόνα 4.1: Το όργανο μέτρησης GRIMM-Ambient Dust Monitor #365, που βρίσκεται τοποθετημένο στο κτήριο Φυσικής του ΕΜΠ.

Οι καταγραφόμενες μετρήσεις μπορούν να εμφανίζονται και να αποθηκεύονται επίσης στην κάρτα αποθήκευσης δεδομένων και να μεταφέρονται μέσω μιας θύρας για περαιτέρω ανάλυση. Εάν δεν υπάρχει κάρτα αποθήκευσης δεδομένων η συσκευή διαθέτει εσωτερική μνήμη μεγέθους 80 Kb.

Ο ατμοσφαιρικός αέρας, που πρόκειται να αναλυθεί, «αντλείται» από το όργανο μέσω μιας αντλίας ελεγχόμενου εσωτερικού όγκου, με ρυθμό 1.2 λίτρα/λεπτό. Το αέριο δείγμα διέρχεται μέσω του καναλιού μέτρησης, εμπρός από τον ανιχνευτή διόδου λέιζερ και συλλέγεται σε ένα φίλτρο. Η αντλία πραγματοποιεί επίσης τον απαραίτητο καθαρισμό του παρεχόμενου αέρα, το οποίο φιλτράρεται και περνά διαμέσου ενός ρυθμιστή (regulator) πίσω στον οπτικό θάλαμο ώστε να διασφαλιστεί ότι δεν θα υπάρξει επικάθιση σκόνης στην οπτική διάταξη λέιζερ.



Εικόνα 4.2: Αρχή λειτουργίας του συστήματος GRIMM-Ambient Dust Monitor #365.

Κατά τη διαδικασία της μέτρησης, όλα τα σωματίδια κατηγοριοποιούνται στο αντίστοιχο μέγεθος, όπου τα κατώτατα όρια των διαφορετικών καναλιών μεγέθους (σε μm) φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

0,25	0,28	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,58	0,65	0,70	0,80	1,0	1,3	1,6	2,0	2,5
3,0	3,5	4,0	5,0	6,5	7,5	8,0	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0	25,0	30,0	32,0	

Πίνακας 4.1: Κατώτατα όρια διαφορετικών καναλιών αναφορικά με τη διάμετρο των σωματιδίων σε μm .

Όταν το μέγεθος τους γίνει μεγαλύτερο από το μεγαλύτερο κανάλι μεγέθους, δεν μπορούν παρά να κατηγοριοποιηθούν ως σωματίδια με διάμετρο $> 32 \mu\text{m}$ και ως τέτοια θα αναφέρονται, ανεξάρτητα από το πόσο μεγαλύτερα είναι στην πραγματικότητα. Το συγκεκριμένο σύστημα χρησιμοποιεί 31 κανάλια. Η πρακτική εμπειρία στο Λεκανοπέδιο Αθηνών έχει δείξει ότι πολύ λίγα σωματίδια άνω των $10 \mu\text{m}$ υπάρχουν στον περιβάλλοντα αέρα και σχεδόν κανένα πάνω από τα $30 \mu\text{m}$ σε μια 24ωρη μέτρηση.

Το δείγμα αέρα ρέει διαμέσου της εισόδου δείγματος στο θάλαμο μέτρησης. Τα σταγονίδια νερού και χονδρά σωματίδια απομακρύνονται στη γυάλινη φιάλη που υπάρχει ακολούθως και χρησιμεύει ως παγίδα νερού. Στη συνέχεια, ένα λεπτό φίλτρο απομακρύνει όλα τα σωματίδια από το δείγμα αέρα. Μία αντλία μεμβράνης αναρροφά τον καθαρό αέρα μέσω μιας βαλβίδας, ενός φίλτρου προστασίας, ενός στομίου και μιας βαλβίδας τριών οδών. Η ροή του δείγματος ελέγχεται από έναν ελεγκτή ροής, ο οποίος παρακολουθεί την πτώση της πίεσης στομίου. Ένα μέρος του αέρα αυτού που έχει φιλτραριστεί, χρησιμοποιείται για να εφοδιάζει το δοσομετρικό θάλαμο με αέρα, ώστε ο οπτικός θάλαμος και ο θάλαμος μέτρησης να διατηρούνται καθαροί. Ο φιλτραρισμένος αυτός αέρας επίσης θα χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της λειτουργίας αυτοελέγχου, στη βαθμονόμηση του συστήματος μέτρησης των σωματιδίων (εύρεση του μηδενός).

Κάτω από το σημείο συμπύκνωσης της υγρασίας, οι ανιχνευτές παρέχουν κανονική ένδειξη, ωστόσο, όταν η σχετική υγρασία υπερβαίνει το 70%, αρχίζει να λειτουργεί το σύστημα αφύγρανσης, το οποίο αφαιρεί την υγρασία, καθώς ένας επιπλέον αισθητήρας υγρασίας και θερμοκρασίας ελέγχει ανά πάσα στιγμή αυτές τις παραμέτρους.

Στην αρχή της κάθε μέτρησης, το όργανο αρχίζει έναν αυτοέλεγχο, που διαρκεί περίπου 30 δευτερόλεπτα, ενώ η πραγματική μέτρηση ξεκινά όταν στην οθόνη LCD εμφανιστεί το πρώτο αποτέλεσμα. Στο σημείο αυτό οι μετρήσεις αποθηκεύονται και φορτώνονται κάθε 6 δευτερόλεπτα στο μικροεπεξεργαστή της οθόνης. Οι μετρήσεις αυτές, για κάθε κανάλι, μετατρέπονται σε όγκο και πολλαπλασιάζονται με την τιμή συγκεκριμένης πυκνότητας σωματιδίων μέσης σύστασης που προκύπτει μέσω βαθμονόμησης. Αυτές οι μετρήσεις πραγματικού χρόνου μεταφέρονται κάθε ένα λεπτό στην κάρτα μνήμης, αν χρησιμοποιείται. Τα δεδομένα μπορούν επίσης να είναι διαθέσιμα μέσω μιας ενσωματωμένης σειριακής θύρας (RS-232). Επίσης, μπορούν να μεταφέρονται σε εξωτερικό υπολογιστή ανά 6 δευτερόλεπτα (fast mode) ή 60 δευτερόλεπτα (normal mode).

4.2. Περιγραφή του DUST TRAKTM TSI 8520 - Aerosol Monitor

Το DUST TRAKTM TSI 8520 – Aerosol Monitor αποτελεί ένα όργανο μέτρησης της συγκέντρωσης των αερολυμάτων, κατάλληλο για χρήση σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους.

Πρόκειται για μια φορητή συσκευή κατάλληλα βαθμονομημένη, που διαθέτει σύστημα σκέδασης ακτίνας laser, που εκπέμπεται στα 780 nm και προσδιορίζει τη συγκέντρωση των PM_{10} , των $PM_{2.5}$ και των PM_1 σωματιδίων, σε πραγματικό χρόνο.



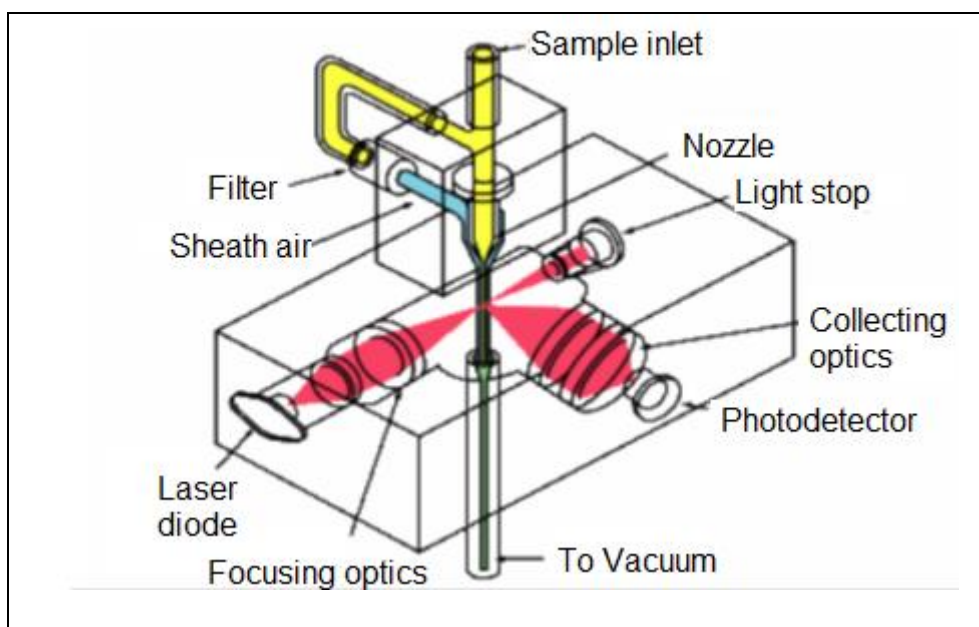
Εικόνα 4.3: Η φορητή συσκευή DUST TRAK™ TSI 8520 - Aerosol Monitor.

Ο κύριος μηχανισμός του οργάνου βρίσκεται τοποθετημένος μέσα σε αδιάβροχο πλαστικό περίβλημα (Εικόνα 4.3) εφοδιασμένο με σύστημα παγίδευσης της ατμοσφαιρικής υγρασίας, ώστε να δίνεται η δυνατότητα μέτρησης των αερολυμάτων με διάφορες καιρικές συνθήκες, με συγκεκριμένη ακρίβεια. Εξωτερικά του περιβλήματος προστασίας υπάρχει ένας μεταλλικός σωλήνας από τον οποίο, μέσω αντλίας, συλλέγονται τα αιωρούμενα σωματίδια και ακολούθως αυτά περνούν από μια κεφαλή η οποία επιτρέπει τη διέλευση μόνο σωματιδίων συγκεκριμένου διαμέτρου (π.χ. PM_{10} , $PM_{2.5}$ ή PM_1). Επιπλέον, στο εσωτερικό υπάρχει ένας θάλαμος όπου συλλέγεται το δείγμα αέρα το οποίο ακτινοβολείται από πηγή διοδικού laser (εκπομπή στα 780 nm) καθώς και ένα σύνολο από φακούς και φίλτρα και ένας φωτοανιχνευτής. Το σύστημα DustTrak διαθέτει μνήμη τέτοια ώστε να καταγράφονται και να παραμένουν αποθηκευμένα δεδομένα αρκετών εβδομάδων.

Η αρχή λειτουργίας του οργάνου αυτού βασίζεται στη σκέδαση μιας εστιασμένης δέσμης laser από τα αερολύματα. Ο σωλήνας με τη βοήθεια αντλίας συλλέγει το δείγμα αέρα το οποίο οδηγείται σε θάλαμο όπου και γίνεται η ακτινοβολήση του δείγματος από τη δέσμη laser. Ειδικότερα, ένα μέρος του 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 φιλτράρεται καθώς διέρχεται από ένα φίλτρο αερολυμάτων. Ο απαλλαγμένος αέρας από σωματίδια οδηγείται και αυτός στο θάλαμο μέτρησης, προκειμένου να περιβάλλει το αφιλτράριστο ρεύμα αέρα, ώστε να περιοριστούν οι ανταλλαγές μορίων με το περιβάλλον. Επιπλέον, προστατεύονται τα οπτικά μέρη του οργάνου από την επικάλυψη σωματιδίων, ενώ παράλληλα βελτιώνεται και ο χρόνος απόκρισης του οργάνου, όταν υπάρχουν μεγάλες αλλαγές της

συγκέντρωσης των σωματιδίων. Κατά τη διάρκεια της ακτινοβολίας laser, φαινόμενα σκέδασης Mie λαμβάνουν χώρα από τα αιωρούμενα σωματίδια, προς όλες τις κατευθύνσεις. Ένα σύστημα φακών συλλέγει την κάθετα σκεδαζόμενη ακτινοβολία και την εστιάζει σε έναν φωτοανιχνευτή ο οποίος μετατρέπει το ανιχνευόμενο οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό. Ακολούθως, το ηλεκτρικό αυτό σήμα εξόδου ενισχύεται και καταγράφεται σαν μια ηλεκτρική τάση η οποία είναι ανάλογη της συγκέντρωσης της μάζας των σκεδαζόντων αερολυμάτων, με τη χρήση μίας σταθεράς βαθμονόμησης. Η σταθερά βαθμονόμησης αυτή καθορίζεται εργαστηριακά με την χρήση γνωστής συγκέντρωσης σωματιδίων, για μια τυπική χημική σύσταση αερολυμάτων. Η εμπρόσθια σκεδαζόμενη ακτινοβολία συλλέγεται από μια παγίδα ακτινοβολίας.

Ο μελετούμενος όγκος αέρα του DustTrak είναι σταθερός και καθορίζεται από τη διατομή του ρεύματος αέρα και την ακτίνα laser. Η υπολογιζόμενη 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 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).



Εικόνα 4.4: Αρχή λειτουργίας του συστήματος DUST TRAK™ TSI 8520 - Aerosol Monitor.

Να αναφερθεί επίσης ότι τα όργανα καταγραφής της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας ανταποκρίνονται γραμμικά με τη συγκέντρωση μάζας των αερολυμάτων. Αν για παράδειγμα ένα σωματίδιο σκεδάξει μια συγκεκριμένη ποσότητα ακτινοβολίας, τότε n σωματίδια σκεδάζουν ακτινοβολία n φορές ισχυρότερα αυτήν την ποσότητα.

Το όργανο ελέγχου DustTrak έχει εργαστηριακά βαθμονομηθεί με χρήση πρότυπων 33 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 τη διαδικασία βαθμονόμησης είναι ιδανικό για τον υπολογισμό του μέσου όρου της εξάρτησης της συγκέντρωσης των αερολυμάτων από το λαμβανόμενο ηλεκτρικό σήμα από τον φωτοανιχνευτή.

4.3. Δίκτυο AERONET-Φωτόμετρο CIMEL

Το πρόγραμμα AERONET (AErosol RObotic NETwork) είναι ένα δίκτυο επίγειων μετρήσεων παθητικής τηλεπισκόπησης αερολυμάτων (Εικόνα 4.5 αριστερά) που ιδρύθηκε από τις NASA και LOA-PHOTONS (CNRS, Γαλλία). Σκοπός του δικτύου αυτού είναι ο υπολογισμός και η ανάκτηση οπτικών ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων στην συνολική ατμοσφαιρική στήλη, όπως προκύπτουν από τις μετρήσεις της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας από τα φωτόμετρα CIMEL. Συγκεκριμένα, παρέχει τα οπτικά πάχη σε όλα τα διαθέσιμα μήκη κύματος, τον συντελεστή Ångström, τη συγκέντρωση της συνολικής στήλης των υδρατμών, καθώς και τη σχετική συνεισφορά των λεπτών σωματιδίων στη συνολική στήλη των αερολυμάτων, έναντι των χονδρόκοκκων αερολυμάτων. Όσον αφορά τα προϊόντα που προέρχονται από την αντιστροφή των σημάτων του CIMEL (ανάμεσά τους αναφέρονται και οι μικροφυσικές ιδιότητες των αερολυμάτων), αυτά υπολογίζονται από την επίλυση πολύπλοκων μαθηματικών εξισώσεων, με προϋπόθεση ότι ισχύουν ορισμένες παραδοχές (Dubovik et al., 2006).

Χρησιμοποιείται λογισμικό που αντιστρέφει την ακτινοβολία του ουρανού για όλες τις almucantar μετρήσεις και μετρήσεις στο κύριο επίπεδο, μαζί με τα ήδη υπολογισμένα οπτικά πάχη στα ίδια μήκη κύματος. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται στα κανάλια 340, 380, 440, 500, 675, 870, 1020 και 1640 nm. Οι παραδοχές που ορίζονται για τον υπολογισμό των αντίστροφων προϊόντων είναι οι εξής:

- Τα αιωρούμενα σωματίδια χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: σφαιρικά και μη σφαιρικά
- Η ατμόσφαιρα θεωρείται επίπεδη και παράλληλη (plane-parallel)
- Η κατακόρυφη κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων θεωρείται ομογενής κατά τις μετρήσεις με almucantar και στο κύριο επίπεδο (principal plane).

Η χωρική κατανομή των σωματιδίων $dV(r)/dlnr$ ($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$) υπολογίζεται σε 22 κατανομές μεγέθους των αερολυμάτων με ακτίνα r , έτσι ώστε $0.05 \mu\text{m} \leq r \leq 15 \mu\text{m}$. Το πραγματικό μέρος $n(\lambda)$ του δείκτη διάθλασης ($1.33 \leq n(\lambda) \leq 1.6$) και το φανταστικό μέρος $k(\lambda)$ του δείκτη διάθλασης ($0.0005 \leq k(\lambda) \leq 0.5$) των αερολυμάτων υπολογίζονται από τα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της ακτινοβολίας υποβάθρου του ουρανού. Επιπλέον, εκτός της χωρικής κατανομής των αερολυμάτων υπολογίζονται και ορισμένες παράμετροι που

αφορούν, το σύνολο των αιωρούμενων σωματιδίων, αλλά και τα λεπτά και τα χονδρά σωματίδια. Οι παράμετροι αυτές παρουσιάζονται ακολούθως:

C_v ($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$) η συγκέντρωση όγκου αερολύματος	$C_v = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{dV(r)}{d\ln(r)} d\ln(r)$ (4.1)
---	--

r_v ($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$) η μέση ακτίνα όγκου αερολύματος	$\ln r_v = \frac{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \ln r \frac{dV(r)}{d\ln(r)} d\ln(r)}{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{dV(r)}{d\ln(r)} d\ln(r)}$ (4.2)
---	---

σ_v η τυπική απόκλιση	$\sigma_v = \sqrt{\frac{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} (\ln r - \ln r_v)^2 \frac{dV(r)}{d\ln(r)} d\ln(r)}{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{dV(r)}{d\ln(r)} d\ln(r)}}$ (4.3)
------------------------------	---

r_{eff} η ενεργός ακτίνα σωματιδίων	$r_{\text{eff}} = \frac{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} r^3 \frac{dn(r)}{d\ln(r)} d\ln(r)}{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} r^2 \frac{dn(r)}{d\ln(r)} d\ln(r)}$ (4.4)
--	--

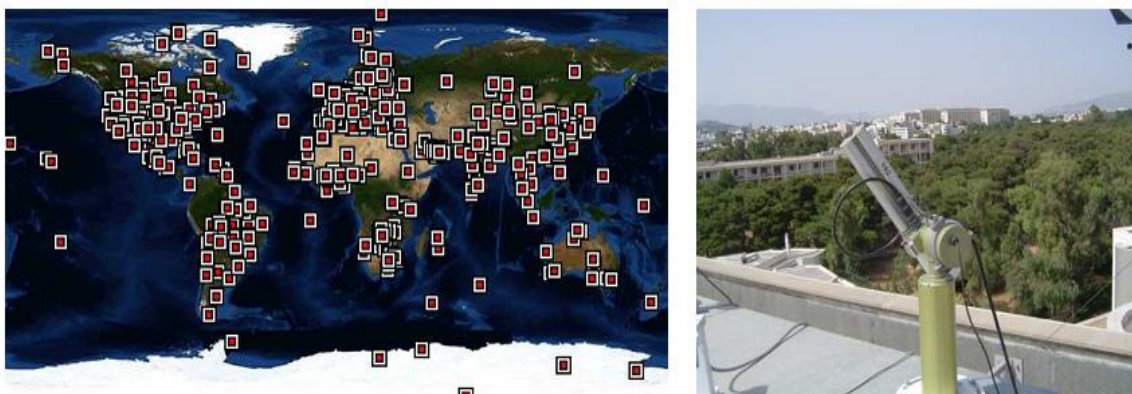
Η μαθηματική σχέση που δίνει τη χωρική κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων είναι η εξής:

$\frac{dV(r)}{d\ln(r)} = V(r) \frac{dN(r)}{d\ln(r)} = \frac{4}{3} \pi r^3 \frac{dN(r)}{d\ln(r)}$ (4.5)
--

Αναφορικά με τη διάκριση των σωματιδίων σε λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα, το χρησιμοποιούμενο λογισμικό υπολογίζει την ελάχιστη τιμή μεγέθους στο διάστημα από 0.194 μm έως 0.576 μm και συνεπώς η τιμή αυτή χρησιμοποιείται ως το σημείο-ακτίνα διαχωρισμού των λεπτόκοκκων από τα χονδρόκοκκα σωματίδια. Με τη χρήση του διαχωρισμού αυτού το λογισμικό υπολογίζει το οπτικό πάχος, τη συνάρτηση φάσης και την ανακλαστικότητα μεμονωμένης σκέδασης $\omega_0(\lambda)$ (σε 83 διαφορετικές γωνίες σκέδασης της ηλιακής ακτινοβολίας για όλα τα μετρούμενα μήκη κύματος ακτινοβολίας του ατμοσφαιρικού υποβάθρου) των μικρών και των μεγάλων αερολυμάτων χωριστά.

Τα δεδομένα οπτικού πάχους είναι διαθέσιμα σε 3 επίπεδα επεξεργασίας: Επίπεδο 1.0 (χωρίς επεξεργασία, unscreened), Επίπεδο 1.5 (αποκλεισμός νεφών, cloud screened), Επίπεδο 2.0

(αποκλεισμός νεφών και εξασφάλιση ποιότητας, quality assured). Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα επιπέδου 1.5, από το σταθμό ATHENS-NOA (37N,23E) για τον οποίο υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα της χρονικής περιόδου του 2013 που μελετάμε.



Εικόνα 4.5: Αριστερά: οι σταθμοί του παγκόσμιου δικτύου AERONET. Δεξιά: Το ηλιακό φωτόμετρο CIMEL εγκατεστημένο στον ακτινομετρικό σταθμό της Ακαδημίας Αθηνών στο Ίδρυμα Ιατροβιολογικών Ερευνών.

4.4. Σύστημα εκπομπής lidar EOLE EMPI

Η διάταξη lidar EOLE του Εργαστηρίου Laser και Εφαρμογών, του Τομέα Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών (ΣΕΜΦΕ) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ) αποτελείται από τα ακόλουθα βασικά μέρη (Εικόνα 4.6):

- Πηγή παλμικής ακτινοβολίας Nd:YAG laser,
- Οπτική διάταξη εκπομπής της ακτινοβολίας laser,
- Διάταξη ανίχνευσης της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας laser,
- Σύστημα ανίχνευσης, καταγραφής, ψηφιοποίησης και αποθήκευσης των σημάτων lidar.

Ως πηγή laser χρησιμοποιείται ένα παλμικό laser στερεάς κατάστασης Nd:YAG (Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet) της Spectra-Physics (Lab-170-10), το οποίο αρχικά εκπέμπει ακτινοβολία στα 1064 nm με ενέργεια 850 mJ/παλμό, με συχνότητα 10 Hz. Με την παρεμβολή δύο μη γραμμικών κρυστάλλων KD*P (Potassium Dideuterium Phosphate) που ελέγχονται θερμικά ώστε να παραμένουν σε σταθερή θερμοκρασία λειτουργίας, έχουμε την παραγωγή της δεύτερης (SHG) στα 532 nm και τρίτης (THG) αρμονικής συχνότητας στα 355 nm, αντίστοιχα (Siegman, 1986). Έτσι, οι ταυτόχρονα εκπεμπόμενες δέσμες laser στα 1064 nm, 532 nm και 355 nm, έχουν ενέργεια ανά παλμό 260 mJ, 300 mJ και 240 mJ, αντίστοιχα.

Η παραγόμενη δέσμη laser στα 355 nm κατά τη διαδικασία “θέρμανσης” της διάταξης αυτής, οδηγείται αρχικά, μέσω ενός εκτροπέα και ενός κατόπτρου ανακλαστικότητας 100% στα 355 nm, σε ένα σύστημα καταγραφής της ενέργειας ανά παλμό, ενώ οι υπόλοιπες δύο δέσμες στα 532 και 1064 nm οδηγούνται σε ένα beam dump. Μόλις η διαδικασία θέρμανσης της διάταξης ολοκληρωθεί, αφαιρείται το ανακλαστικό κάτοπτρο και η δέσμη με τα τρία μήκη κύματος διέρχεται πλέον από έναν διαστολέα δέσμης (beam expander) και οδηγείται, μέσω ενός κατόπτρου 100%, προς την ατμόσφαιρα. Ο διαστολέας αυτός αυξάνει την διάμετρο της δέσμης κατά έναν παράγοντα 3.

Από τη στιγμή που το σύστημα laser τίθεται σε λειτουργία Q-Switch, απαιτείται ένα χρονικό διάστημα ~15-20 min, έως ότου η δέσμη laser αποκτήσει μέγιστη και σταθερή ενέργεια σε όλο το χωρικό προφίλ της. Είναι γνωστό ότι μια ενεργειακά ασταθής και χωρικά ασύμμετρη δέσμη laser μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις (καταστροφή των ειδικών επιστρώσεων των οπτικών στοιχείων) όταν προσπέσει π.χ. σ’έναν διαστολέα δέσμης. Για το λόγο αυτό, η διάδοση μέσω του διαστολέα δέσμης και η εκπομπή προς την ατμόσφαιρα της δέσμης laser, γίνεται μόνον αφού σταθεροποιηθεί ενεργειακά και ομογενοποιηθεί χωρικά η παραγόμενη ακτινοβολία laser.

Ως διαστολέας δέσμης χρησιμοποιείται ένα σύστημα φακών, το οποίο επιτρέπει την αύξηση της διαμέτρου της δέσμης laser με σκοπό την μείωση της γωνιακής της απόκλισης (τύπου Galilean). Μέσω του διαστολέα αυτού, η εξερχόμενη δέσμη laser προς την ατμόσφαιρα έχει διάμετρο 30 mm και γωνιακή απόκλιση 0.17 mrad. Ο διαστολέας που χρησιμοποιείται είναι αχρωματικός, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ομοιόμορφη διαστολή της δέσμης και στα τρία μήκη κύματος εκπομπής και αποτελείται από 4 φακούς με ειδικές αντανακλαστικές επιστρώσεις σε όλες τις επιφάνειες των επιμέρους οπτικών για τα μήκη κύματος 355, 532 και 1064 nm.

Το σύστημα λήψης αποτελείται από ένα τηλεσκόπιο τύπου Cassegrain διαμέτρου 300 mm και εστιακής απόστασης 600 mm, το οποίο χρησιμοποιείται για τη συλλογή της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας στα μήκη κύματος που εκπέμπει η πηγή laser, με τελικές τιμές ανακλαστικότητας 98.3% στα 355 nm, 96.2% στα 387 nm, 90.5%, στα 532 nm και 85% στα 1064 nm.

Η συλλεγόμενη ακτινοβολία laser εισέρχεται στο σύστημα οπτικής ανίχνευσης (φασματοφωτόμετρο), όπου και διαχωρίζεται αρχικά σε δύο φασματικές περιοχές: στην υπεριώδη περιοχή του φάσματος (355, 387 και 407 nm), και στην ορατή-κοντινή υπέρυθρη περιοχή (532, 607 και 1064 nm), μέσω ενός διχρωϊκού κατόπτρου, ενώ ακολούθως, μέσω ενός συστήματος διχρωϊκών κατόπτρων διαχωρίζεται στα επί μέρους έξι μήκη κύματος που αναφέρθηκαν. Η φασματικά διαχωρισμένη πλέον ακτινοβολία, πριν προσπέσει στον αντίστοιχο φωτοανιχνευτή,

διέρχεται από μια συστοιχία οπτικών φίλτρων, που έχουν σαν στόχο τη μείωση του αντίστοιχου ατμοσφαιρικού υποβάθρου, αλλά και τη μείωση της έντασης της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας laser.

Για την ανίχνευση των σημάτων lidar στα 355, 387, 532, 407 και 607 nm χρησιμοποιούνται πέντε φωτοπολλαπλασιαστές, ενώ για την ανίχνευση του σήματος στα 1064 nm χρησιμοποιείται μία φωτοδίοδος χιονοστιβάδας πυριτίου (Si-APD) διαμέτρου 1.5 mm.

Η καταγραφή των σημάτων lidar στο σύστημα του ΕΜΠ πραγματοποιείται με δύο μεθόδους: την αναλογική μέθοδο (analog detection mode) και την τεχνική της καταμέτρησης φωτονίων (photon counting detection mode). Στην αναλογική μέθοδο καταγραφής ο παλμός εξόδου του φωτοπολλαπλασιαστή καταγράφεται σαν ρεύμα εξόδου, ενώ στην τεχνική της καταμέτρησης φωτονίων καταμετρώνται τα παραγόμενα φωτοηλεκτρόνια από τον φωτοπολλαπλασιαστή. Η τεχνική καταμέτρησης φωτονίων είναι πιο αξιόπιστη από την αναλογική μέθοδο, αναφορικά με τον λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) και την σταθερότητα του παραγόμενου σήματος lidar. Παρόλα αυτά είναι εφικτή η εφαρμογή της μόνο στην περίπτωση που τα προσπίπτοντα φωτόνια στην φωτοκάθοδο του φωτοπολλαπλασιαστή καταφθάνουν με χαμηλούς σχετικά ρυθμούς, ώστε τα παραγόμενα φωτοηλεκτρόνια να είναι χρονικά διακριτά και ανιχνεύσιμα ένα προς ένα (Newsom et al., 2009).



Εικόνα 4.6: Η διάταξη του συστήματος lidar, που βρίσκεται στο κτήριο Φυσικής του ΕΜΠ. Στην εικόνα φαίνονται η πηγή Nd:YAG laser, ο διαστολέας δέσμης, το τηλεσκόπιο λήψης, το σύστημα λήψης και καταγραφής των ηλεκτρονικών σημάτων.

4.5. Το Ατμοσφαιρικό μοντέλο HYSPLIT

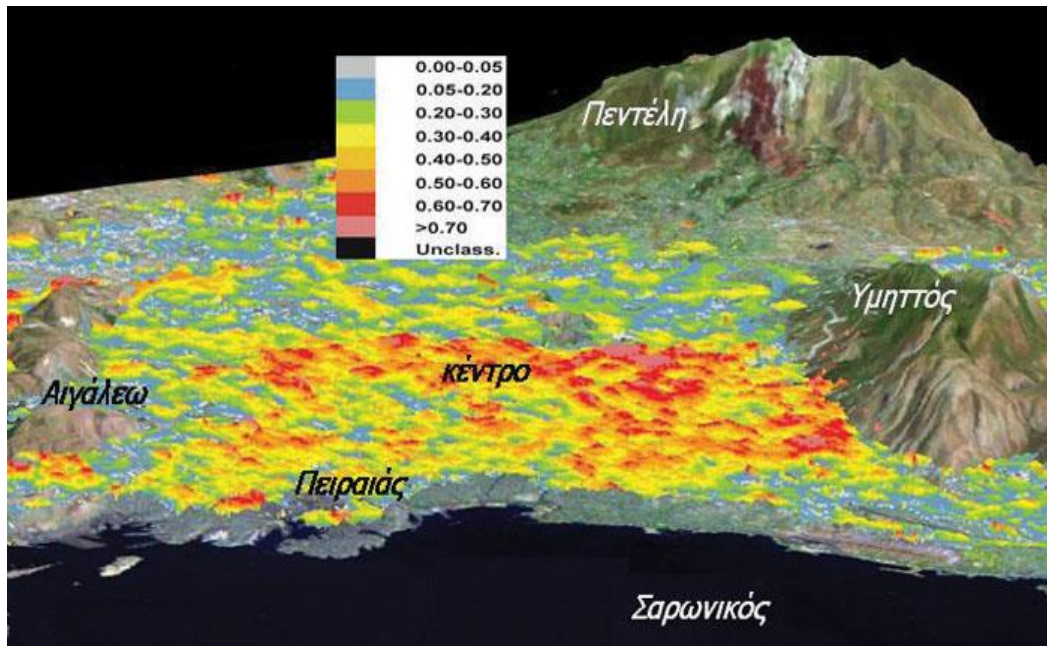
Το HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα το οποίο υπολογίζει από τροχιές απλών πακέτων αέρα έως και πολύπλοκες προσομοιώσεις διασποράς και εναπόθεσης ρύπων. Αρχικά αναπτύχθηκε από τις κοινές προσπάθειες του εθνικού οργανισμού NOAA (National Oceanic and Atmosphere Administration) των ΗΠΑ και του Αυστραλιανού Γραφείου Μετεωρολογίας. Πρόσφατες αναβαθμίσεις του από διάφορους φορείς, περιλαμβάνουν βελτιώσεις στους αλγορίθμους που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς καθώς επίσης και στα γραφικά συστήματα που χρησιμοποιούνται για την οπτικοποίηση των μετρήσεων και αποτελεσμάτων. Η διασπορά κάποιου ρύπου υπολογίζεται υποθέτοντας τον ως «φούσκα» (πακέτο αέριου ρύπου) ή ως σωματίδια. Στην πρώτη περίπτωση οι φούσκες διαρκούν ως έχουν, μέχρι το μέγεθός τους να υπερβεί (είτε οριζοντίως είτε καθέτως) το μέγεθος της κυψελίδας του χρησιμοποιούμενου από τα μετεωρολογικά δεδομένα πλέγματος. Στη συνέχεια χωρίζεται σε επί μέρους φούσκες εκ των οποίων κάθε μια περιλαμβάνει μέρος της μάζας του ρύπου. Στη δεύτερη περίπτωση ένας καθορισμένος αριθμός σωματιδίων μεταφέρεται εντός του χωρικού εύρους που καθορίζει το μοντέλο, κυρίως από ανέμους, και αυτά διασπείρονται εξαιτίας τυρβωδών ατμοσφαιρικών κινήσεων. Η αρχική διαμόρφωση του μοντέλου προϋποθέτει μια τριών διαστάσεων κατανομή των σωματιδίων.

Στην εργασία έγινε χρήση του μοντέλου για τον υπολογισμό των οπισθοτροχιών (backtrajectory) του ανέμου, δηλαδή της πορείας της οποίας ακολούθησε το ρεύμα για να φτάσει σε κάποια τοποθεσία, στην περίπτωσή μας, πάνω από την Αττική.

4.6. Η υπό μελέτη περιοχή

Το Λεκανοπέδιο Αττικής, έχει έκταση περίπου 427 km² και καλύπτει το 11.2% της Αττικής. Περιβάλλεται ημικυκλικά από τα όρη Αιγάλεω (Δυτικά), Ποικίλο (Δυτικά ΒορειοΔυτικά), Πάρνηθα (Βόρεια), Πεντέλη (Βορειο-Ανατολικά) και Υμηττό (Ανατολικά), ενώ στα νότια βρέχεται από το Σαρωνικό κόλπο (Εικόνα 4.7). Πρόκειται για την πιο πυκνοκατοικημένη περιοχή της Ελλάδας, με μεγάλο αριθμό αυτοκινήτων και άλλων πετρελαιοκίνητων οχημάτων, καθώς και μεγάλο αριθμό βιομηχανιών και βιοτεχνιών (περίπου 40% της ελληνικής βιομηχανικής δραστηριότητας). Στα νοτιοδυτικά βρίσκεται και το εμπορικό λιμάνι του Πειραιά, το μεγαλύτερο της χώρας και ένα από τα σημαντικότερα της Μεσογείου. Συνεπώς, το Λεκανοπέδιο Αθηνών, ευνοεί πρώτον τη δημιουργία και δεύτερον, την παραμονή της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε αυτό. Πρόκειται επίσης για μια περιοχή με μεγάλη ηλιοφάνεια καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, στην οποία παρατηρούνται συχνά θερμοκρασιακές αναστροφές, οι οποίες διαμορφώνουν σταθερές

ατμοσφαιρικές συνθήκες και περιορίζουν την κυκλοφορία των αέριων μαζών και τη διασπορά των ρύπων στην ατμόσφαιρα.



Εικόνα 4.7: Τρισδιάστατη αναπαράσταση της αστικής ρύπανσης στο Λεκανοπέδιο Αττικής. Η χρωματική διακύμανση αντιπροσωπεύει τις τιμές του οπτικού πάχους σωματιδίων από δορυφορικές μετρήσεις (http://www.onassis.gr/enim_deltio/46_09/lecture_1.php).

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

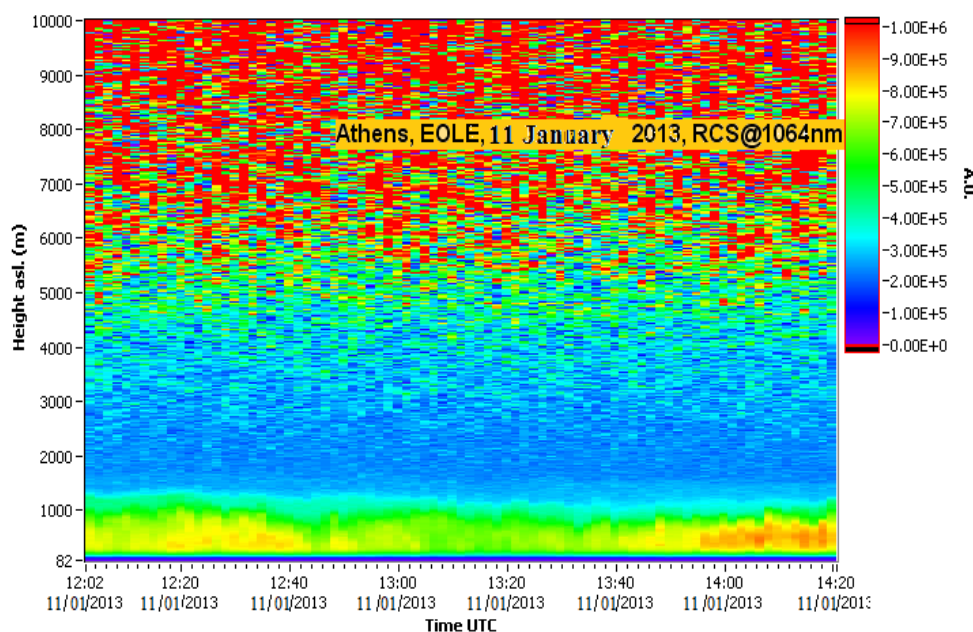
Το όργανο GRIMM εγκαταστημένο στο κτίριο φυσικής του ΕΜΠ, χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή των αερολυμάτων κατά την περίοδο Δεκέμβριο 2012 έως Δεκέμβριο 2013. Για την ίδια χρονική περίοδο αναλύσαμε τις μετρήσεις του CIMEL αναφορικά με την κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων. Στην ίδια χρονική περίοδο αναλύσαμε και τα διαθέσιμα δεδομένα αναφορικά με τη χωροχρονική εξέλιξη του ύψους του Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος. Ακολούθως, χαρακτηρίσαμε τις αντίστοιχες ημέρες των μετρήσεων αυτές ως «clear» και «no clear» με βάση το γεγονός αν η ελεύθερη τροπόσφαιρα μετά το πέρας του ΑΟΣ ήταν καθαρή ή επιβαρημένη με σωματίδια που προέρχονται από απομακρυσμένες πηγές (π.χ. μεταφορά σκόνης, καύση βιομάζας κλπ.) ελέγχοντας παράλληλα το οπτικό πάχος (AOT) και το συντελεστή Ångström (AE) του CIMEL και τις αντίστοιχες μετεωρολογικές συνθήκες από τα μοντέλα BSC-DREAM8b (μοντέλο προσομοίωσης και πρόβλεψης του ατμοσφαιρικού κύκλου των αερολυμάτων σκόνης) και HYSPLIT. Να τονίσουμε εδώ, πως οι δύο αυτές παράμετροι (AOT και AE) αποτελούν τις βασικές ιδιότητες χαρακτηρισμού των αερολυμάτων. Τα αιωρούμενα σωματίδια με τοπική προέλευση (βιομηχανία, κυκλοφορία κ.α.), βρίσκονται, γενικώς, εντός του οριακού στρώματος, το ύψος του οποίου εξαρτάται από την κατακόρυφη κίνηση των αερίων μαζών, μέσα σε αυτό καθώς διάφοροι παράγοντες όπως η θέρμανση της γήινης επιφάνειας σε άμεση σχέση με την ηλιοφάνεια, η μορφολογία του εδάφους και μετεωρολογικές συνθήκες επηρεάζουν άμεσα την ικανότητα κατακόρυφης κίνησης των αερίων μαζών εντός του ΑΟΣ (Παπαγιάννης 2014).

Καθώς το όργανο GRIMM μας παρέχει το λόγο $dN/dlnr$, (όπου N ο αριθμός σωματιδίων και σύμφωνα με τη σχέση 4.5, με βασική υπόθεση ότι τα σωματίδια είναι σφαιρικά) είναι δυνατόν να ανακτήσουμε την ολική χωρική κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων $dV/dlnr$ ($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$) η οποία και εκφράζεται πλέον στην περιοχή εντός του ΑΟΣ. Οι μετρήσεις του GRIMM πραγματοποιούνται στην επιφάνεια του εδάφους και με βασική προϋπόθεση ότι υπάρχει ομογενής ατμόσφαιρα εντός του ΑΟΣ, (με βάση τα διαγράμματα των σημάτων lidar των διορθωμένων από την απόσταση και το ατμοσφαιρικό υπόβαθρο: RCS) και ελέγχοντας τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν, πολλαπλασιάσαμε τα ήδη επεξεργασμένα δεδομένα GRIMM με το αντίστοιχο ύψος του ΑΟΣ (εκφρασμένο σε μέτρα), για επιλεγμένες ημέρες και χρονικές στιγμές. Αντίστοιχα, από το CIMEL χρησιμοποιήσαμε τα δεδομένα χωρικής κατανομής, $dV/dlnr$ και τα συγκρίναμε με τα αντίστοιχα που ανακτήσαμε από τα δεδομένα του GRIMM. Ακολούθως θα ασχοληθούμε με την ανάλυση επιλεγμένων επεισοδίων “clear” και “no clear” κατά τη μελετηθείσα χρονική περίοδο.

5.1. Κατανομή μεγέθους αιωρούμενων σωματιδίων για Clear Case

Υστερα από ενδελεχή έλεγχο όλων των προαναφερθέντων παραμέτρων για διάφορες ημερομηνίες της περιόδου Δεκεμβρίου 2012 έως Δεκεμβρίου 2013 επιλέξαμε το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα μιας “clear case” είναι αυτό της 11^{ης} Ιανουαρίου 2013. Ακολούθως παρατίθενται οι λόγοι που μας οδήγησαν σε αυτή την επιλογή.

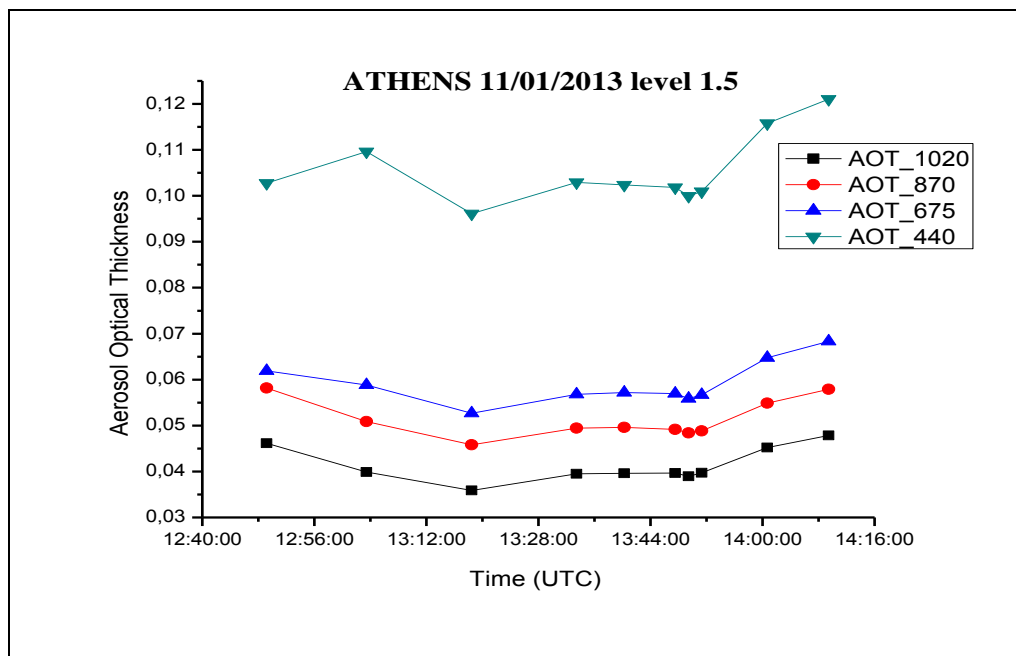
Αρχικά, παρατηρώντας τη χρονική εξέλιξη της κατακόρυφης κατανομής του διορθωμένου ως προς την απόσταση σήματος lidar στα 1064 nm (RCS), της αντίστοιχης ημέρας, όπως καταγράφηκε από το lidar του ΕΜΠ, παρατηρούμε ότι το ύψος του ΑΟΣ είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο, κυμαίνεται από 1100 έως 1300 m, ανάλογα με την ώρα της ημέρας και τα αερολύματα εντός αυτού οφείλονται στις ανθρώπινες δραστηριότητες (π.χ. βιομηχανία, κυκλοφορία αυτοκινήτων). Το τμήμα από 1300 έως περίπου 5000 m, φαίνεται να είναι σχεδόν απαλλαγμένο από αιωρούμενα σωματίδια, όπως φανερώνει η χρωματική κλίμακα, γεγονός που επιβεβαιώνει πως δεν υπάρχει μεταφορά σωματιδίων από απομακρυσμένη περιοχή, δηλαδή δεν υπάρχει δηλαδή παρεμβολή σωματιδιακών στρωματώσεων στην ελεύθερη τροπόσφαιρα. Ωστόσο, να αναφέρουμε πως το σήμα της δέσμης lidar ήταν σχετικά ασθενές οπότε και δεν έχουμε καθαρή εικόνα σε μεγάλο ύψος, στην περιοχή των 5500-10000 m.



Εικόνα 5.1: Χωρο-Χρονική εξέλιξη της κατακόρυφης κατανομής του διορθωμένου ως προς την απόσταση σήματος lidar (RCS) στα 1064 nm όπως καταγράφηκε από το LIDAR του ΕΜΠ στις 11 Ιανουαρίου 2013.

Ακολούθως, παρουσιάζουμε τη χρονική διακύμανση στις τιμές του οπτικού πάχους (AOT), της συγκεκριμένης ημερομηνίας όπως καταγράφηκαν από το ηλιακό φωτόμετρο CIMEL (Εικόνα 5.2).

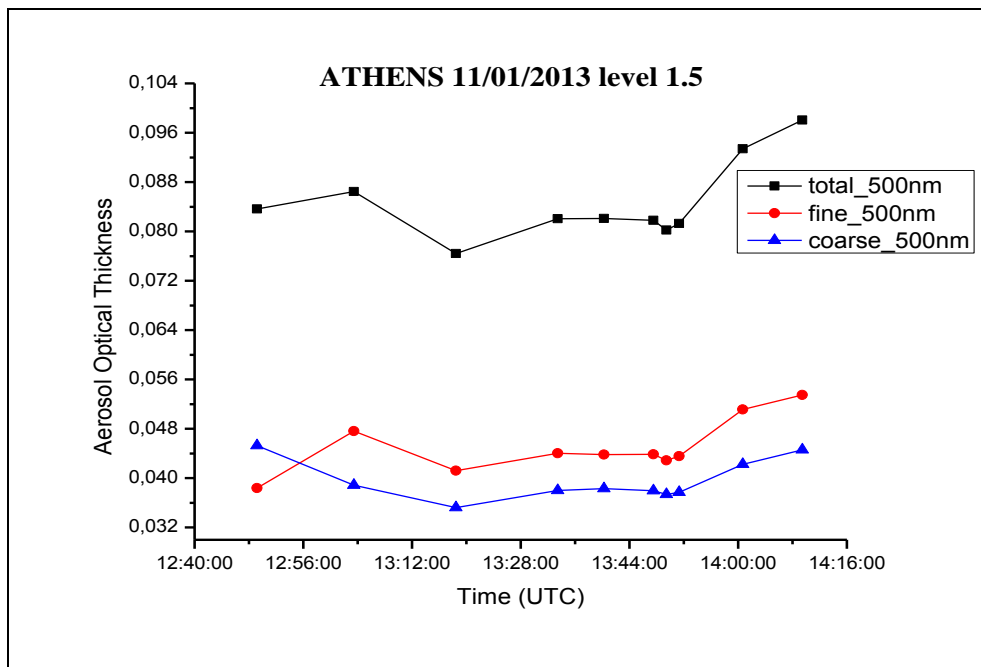
Οι τιμές του AOT στις 11 Ιανουαρίου 2013 χαρακτηρίζονται ως σχετικά χαμηλές, σε φυσιολογικά επίπεδα, και συγκεκριμένα γύρω στις 13:18 UTC παίρνουν την ελάχιστη τιμή τους. Η μέση τιμή του AOT στα 440 nm (AOT_440) είναι 0.105, στα 675 nm είναι 0.059 (AOT_675), στα 870 nm 0.051 (AOT_870) και τέλος, στα 1020 nm η μέση τιμή του AOT κυμαίνεται στα 0.041 (AOT_1020). Στις 13:03 UTC η τιμή του AOT στα 440 nm είναι περίπου 0.11, ενώ στα υπόλοιπα μήκη κύματος, σχεδόν υποδιπλάσια της τιμής αυτής ή και μικρότερη. Καταδεικνύεται έτσι και η εξάρτηση του AOT από το μήκος κύματος, καθώς είναι γνωστό πως παίρνει μεγαλύτερες τιμές σε μικρότερα μήκη κύματος.



Εικόνα 5.2: Χρονική διακύμανση οπτικού πάχους σε διάφορα μήκη κύματος όπως καταγράφηκε από το φωτόμετρο CIMEL στις 11 Ιανουαρίου 2013, στην Αθήνα.

Ακολουθώς, παρουσιάζουμε τη χρονική διακύμανση του οπτικού πάχους των αερολυμάτων στα λεπτά (fine), χονδρά (coarse) και ολικά (total) σωματίδια στα 500 nm όπως όπως καταγράφηκαν από το ηλιακό φωτόμετρο CIMEL στις 11 Ιανουαρίου 2013, στην Αθήνα.

Από το γράφημα αυτό είναι φανερό ότι τα λεπτά σωματίδια υπερτερούν των χονδρών σε ποσοστό 53,8% έναντι 46.2% όπως υπολογίσαμε σύμφωνα με τα δεδομένα που φαίνονται στον Πίνακα 5.1. Η μέση τιμή του οπτικού πάχους για τα λεπτά σωματίδια υπολογίζεται στα 0.044, στα χονδρά παίρνει την τιμή 0.038 ενώ η μέση τιμή του αθροίσματος των δύο κατηγοριών αερολυμάτων κυμαίνεται στα 0.081 (Πίνακας 5.1).

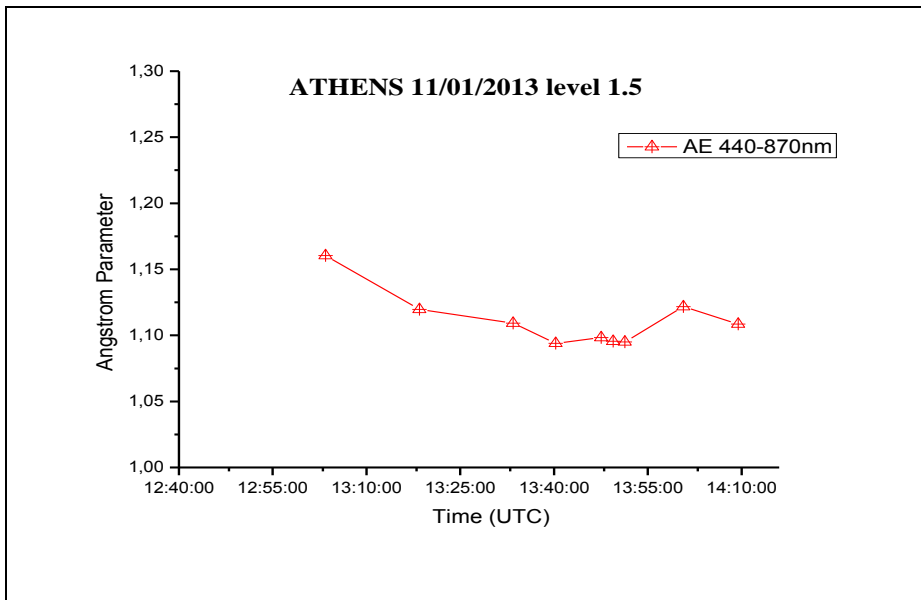


Εικόνα 5.3: Χρονική διακύμανση του οπτικού πάχους αερολυμάτων σε fine mode, coarse mode και total mode, στα 500 nm, όπως καταγράφηκε από το φωτόμετρο CIMEL στις 11 Ιανουαρίου 2013 στην Αθήνα.

Time UTC	Total_AOT_500nm	Coarse_Mode_AOT_500nm	Fine_Mode_AOT_500nm
13:03:27	0.0864	0.0388	0.0476
13:18:27	0.0764	0.0352	0.0412
13:33:26	0.0820	0.0380	0.0440
13:40:15	0.0821	0.0382	0.0438
13:47:33	0.0818	0.0379	0.0439
13:49:26	0.0802	0.0373	0.0429
13:51:18	0.0812	0.0377	0.0436
Average	0.0814	0.0376	0.0439
Per cent (%)	100	46.1754	53.8246

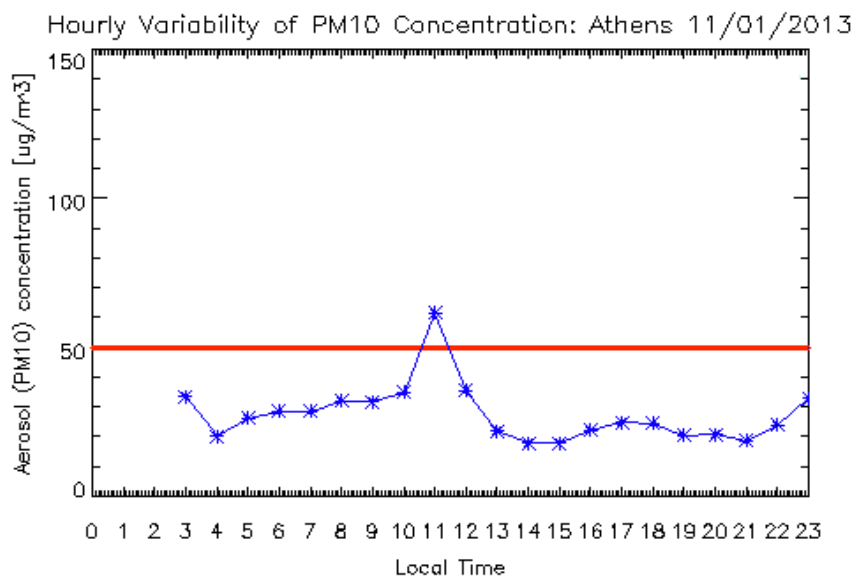
Πίνακας 5.1: Οι τιμές του οπτικού πάχους αερολυμάτων σε fine mode, coarse mode και total mode, στα 500 nm, όπως καταγράφηκαν από το φωτόμετρο CIMEL στις 11 Ιανουαρίου 2013 καθώς και η μέση τιμή και το επί τοις εκατό ποσοστό των δύο κατηγοριών σωματιδίων επί του συνόλου.

Παρατηρώντας τη χρονική διακύμανση του συντελεστή Ångström (440-870 nm), όπως επίσης καταγράφηκε από το ηλιακό φωτόμετρο CIMEL (Εικόνα 5.4), οι τιμές που καταγράφονται στη χρονική διάρκεια μιας ώρας είναι της τάξεως του 1.11. Υψηλές σχετικά τιμές του συντελεστή Ångström δείχνουν την ύπαρξη μικρού μεγέθους σωματιδίων. Γίνεται σαφές λοιπόν, πως μικρές τιμές AOT αντιστοιχούν σε μεγάλες σχετικά τιμές συντελεστή Ångström (βλ. Εικόνες 5.3 και 5.4) και φανερώνουν λεπτά κυρίως σωματίδια τοπικής προέλευσης, όπως επιβεβαιώνεται και από τις οπισθοτροχιές αερίων μαζών που καταλήγουν στην Αθήνα, όπως θα παρουσιάσουμε ακολούθως.



Εικόνα 5.4: Χρονική διακύμανση του συντελεστή Ångström στα 440-870 nm, όπως καταγράφηκε από το φωτόμετρο CIMEL στις 11 Ιανουαρίου 2013 στην Αθήνα.

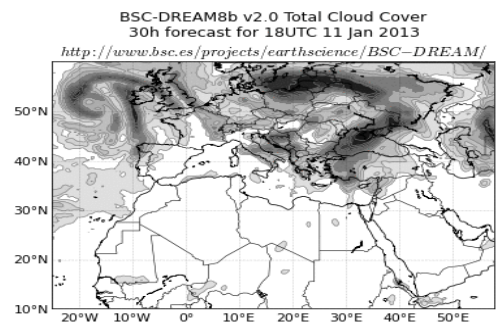
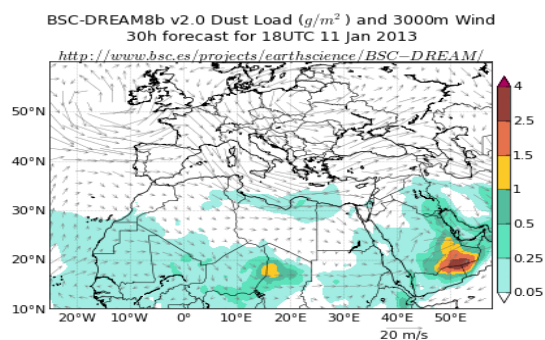
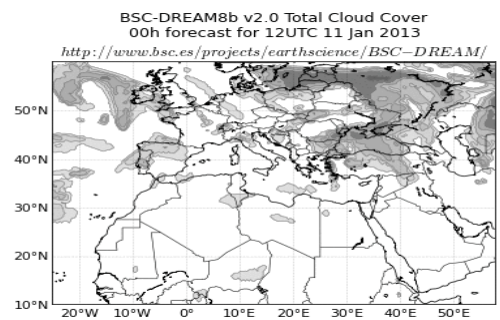
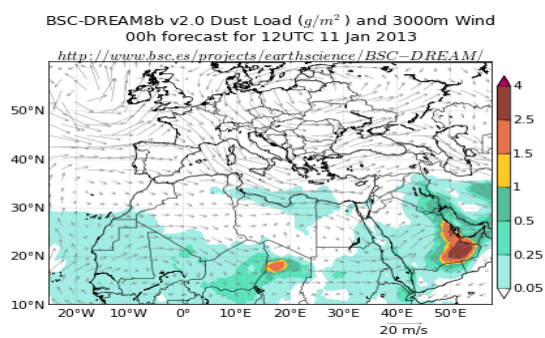
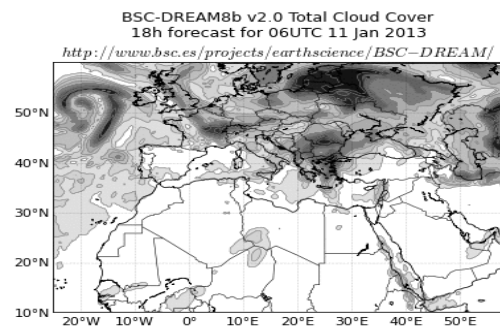
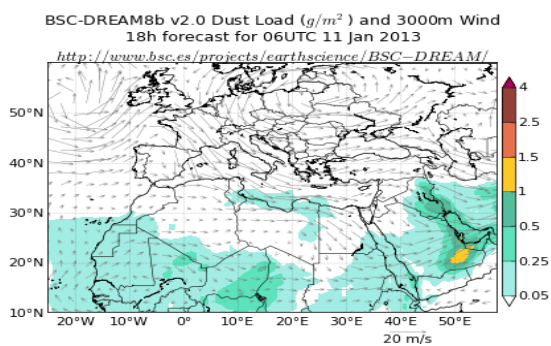
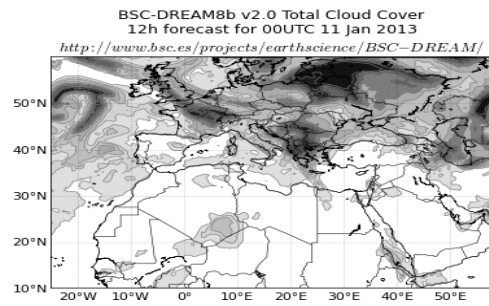
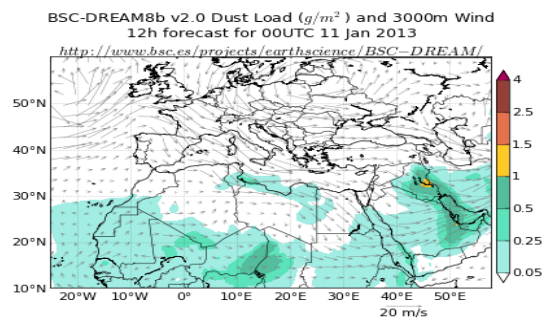
Ακολουθώς, στην Εικόνα 5.5 παρουσιάζεται το γράφημα της ημερήσιας ωριαίας διακύμανσης της συγκέντρωσης σωματιδίων PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), όπως καταγράφηκε από το DustTrak, στις 11 Ιανουαρίου 2013. Η οριζόντια γραμμή παριστά το όριο ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) της συγκέντρωσης της κατηγορίας αυτής σωματιδίων, σύμφωνα με την ΕΕ. Παρατηρούμε λοιπόν πως για τοπική ώρα 3:00 και για όλη σχεδόν τη διάρκεια της ημέρας, η συγκέντρωση των PM_{10} είναι ικανοποιητικά κάτω του ορίου, με τις τιμές να κυμαίνονται κυρίως από $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ έως και $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ με ελάχιστη τιμή τις $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ωστόσο, για τοπική ώρα 11:00 εμφανίζεται ένα μέγιστο με τιμή $61.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

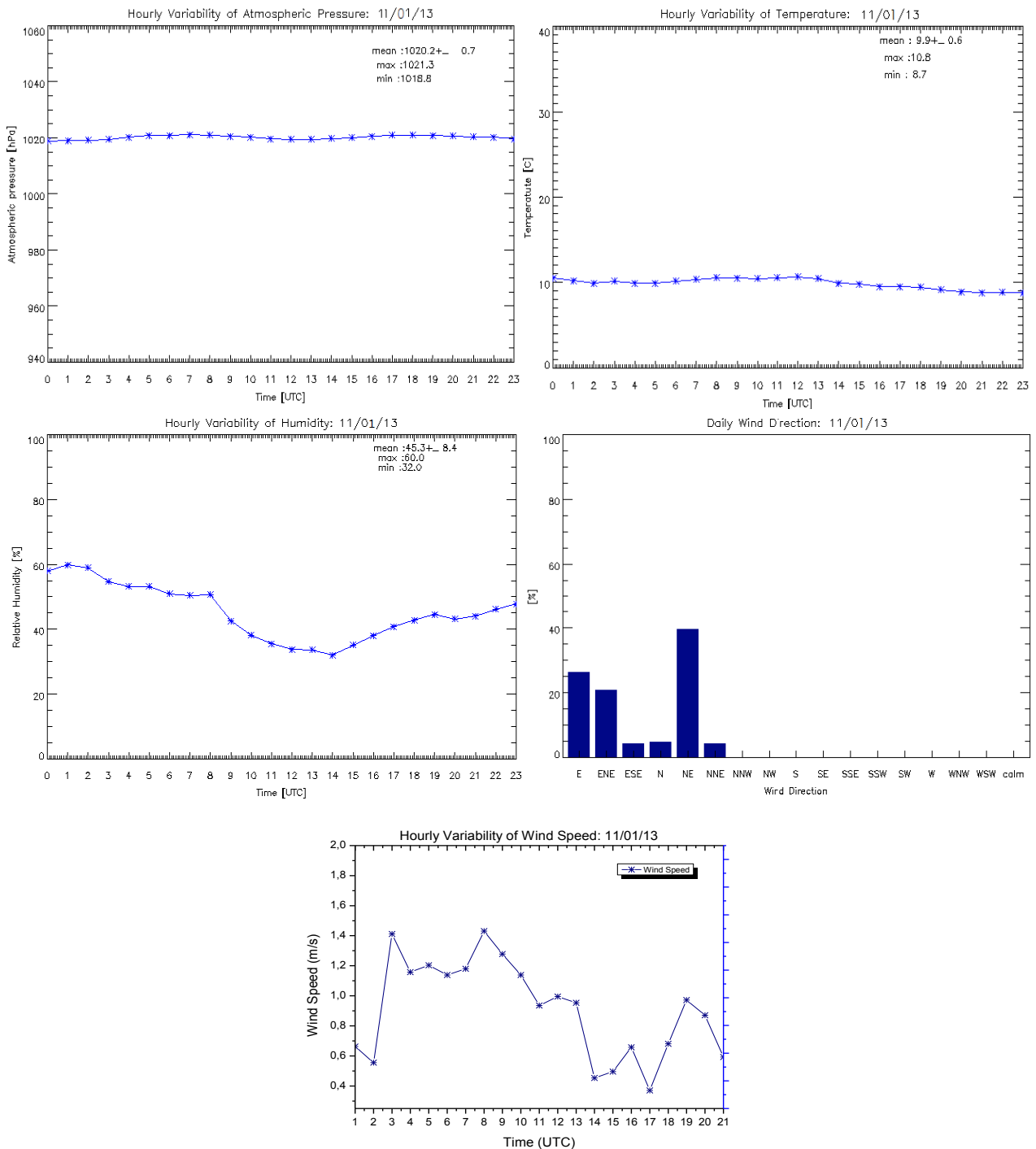


Εικόνα 5.5: Ημερήσια ωριαία διακύμανση συγκέντρωσης σωματιδίων PM_{10} σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$, όπως καταγράφηκε από το DustTrak, στις 11 Ιανουαρίου 2013 στην Αθήνα.

Το προγνωστικό μοντέλο BSC-DREAM8b επιβεβαιώνει πως την ημέρα εκείνη (από 00:00 έως 18:00 UTC) δεν υπήρξε επεισόδιο μεταφοράς σκόνης πάνω από τον Ελλαδικό χώρο, ενώ υπήρχαν και αρκετά διαστήματα νεφοκάλυψης.

Το ποσοστό της υγρασίας μεταξύ 11:00- 15:00 UTC παίρνει τιμές μικρότερες του 40%, η ατμοσφαιρική πίεση σταθερή στα 1021 hPa, η μέση τιμή της θερμοκρασίας στους 8.7° C, ενώ η επικρατέστερη διεύθυνση ανέμου ήταν η Βορειο-Ανατολική.

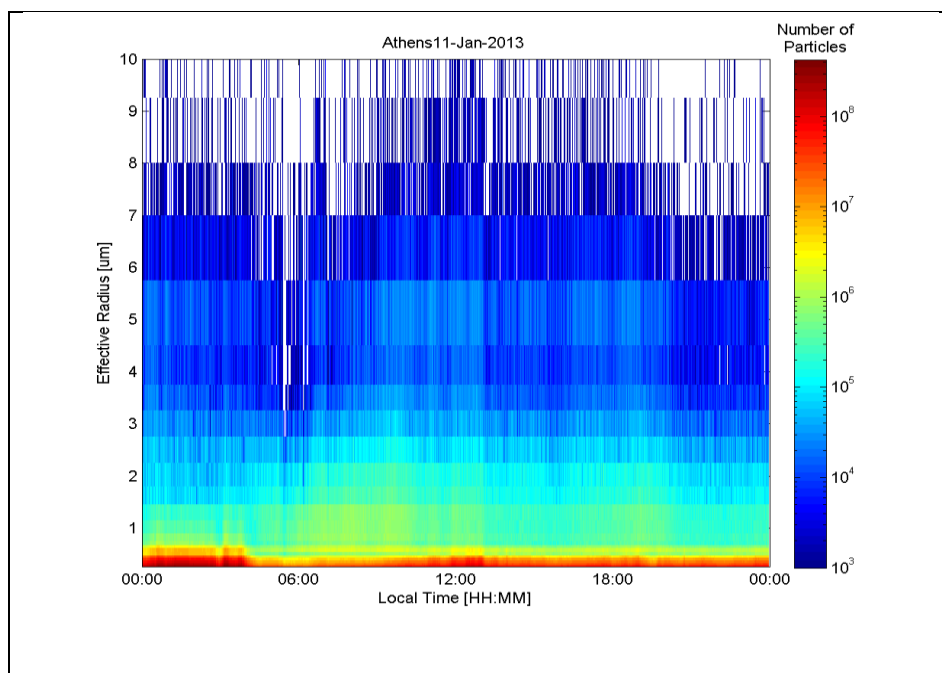




Εικόνα 5.6: Αριστερά (σελ. 47): Η χωρο-χρονική εξέλιξη της μεταφοράς σωματιδιακής σκόνης σε g/m² πάνω από την Ευρώπη, Δεξιά (σελ. 47): Η χωρο-χρονική εξέλιξη της ολικής νεφοκάλυψης πάνω από την Ευρώπη, όπως προβλέφθηκαν από το μοντέλο BSC/DREAM8b για την ημέρα της 11ης Ιανουαρίου 2013. Επίσης παρουσιάζονται τα μετεωρολογικά δεδομένα της ημέρας αυτής (σελ.48) όπως καταγράφηκαν από τον μετεωρολογικό σταθμό DAVIS PRO.

Στην Εικόνα 5.7 παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή της ενεργού ακτίνας (effective radius) των αερολυμάτων σε μm, στις 11 Ιανουαρίου 2013, όπως προέκυψε ύστερα από επεξεργασία των δεδομένων που κατέγραψε το GRIMM, ενώ η χρωματική κλίμακα αντιπροσωπεύει τον αριθμό των σωματιδίων ανά m³. Παρατηρούνται αυξημένες συγκεντρώσεις καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας

για τιμές ενεργού ακτίνας έως και 0.5 μm , εντονότερες τις 4 πρώτες πρωινές ώρες, αλλά και γύρω στις 12:00, τοπική ώρα, καθώς και για τιμές ενεργού ακτίνας από 0.5 μm έως 2 μm , αλλά με μικρότερη συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων, της τάξεως του $10^5/\text{m}^3$. Για μεγαλύτερες τιμές ενεργού ακτίνας (π.χ. 4-6 μm) ο αριθμός αιωρούμενων σωματιδίων μειώνεται σημαντικά, κάτω των $10^4/\text{m}^3$.



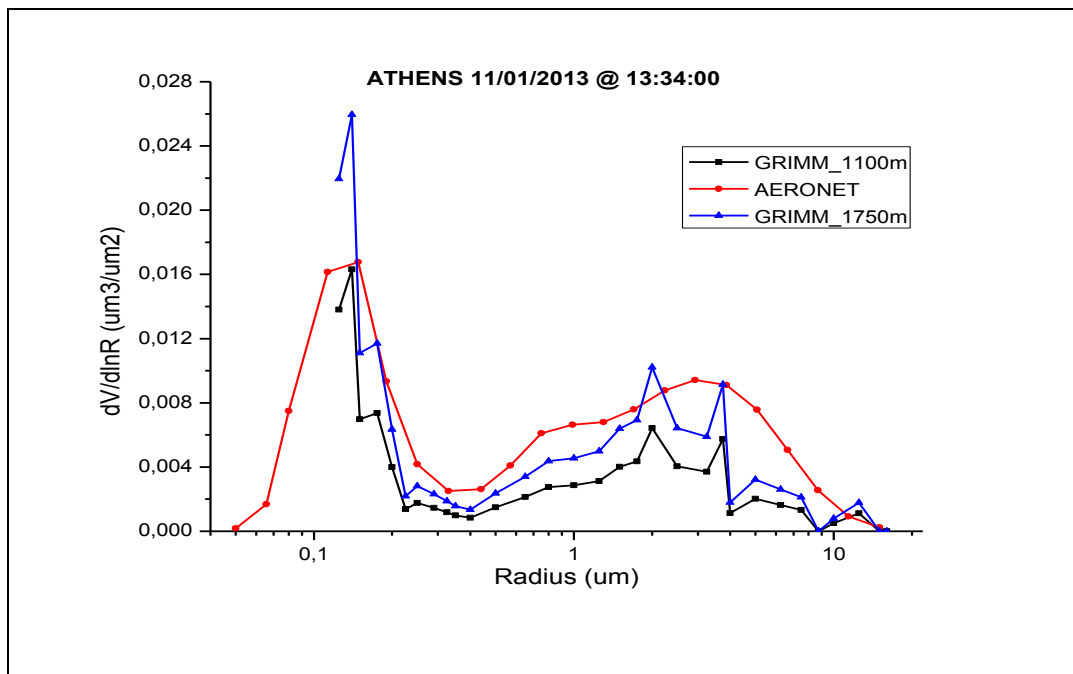
Εικόνα 5.7: Ενεργός ακτίνα (effective radius) σε μm , ως προς την τοπική ώρα για τις 11 Ιανουαρίου 2013. Η χρωματική κλίμακα δείχνει τον αριθμό των σωματιδίων.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω και ύστερα από επεξεργασία των δεδομένων του GRIMM (αριθμός σωματιδίων ανά m^3), όπως περιγράφηκε προηγούμενα, αναπαραστήσαμε γραφικά την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων σε κοινό γράφημα μαζί με τα δεδομένα που ήταν διαθέσιμα από το δίκτυο του AERONET για την υπό μελέτη ημερομηνία και για κοινή ώρα 13:34 UTC. Η τιμή του ύψους του ΑΟΣ τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, με την οποία πολλαπλασιάσαμε, σε πρώτη φάση, τα δεδομένα του GRIMM ήταν 1100 m (Εικόνα 5.8, μαύρη γραμμή). Σε δεύτερη ανάλυση πολλαπλασιάσαμε τα δεδομένα του GRIMM με τιμή ύψους 1750 m (βλ. Εικόνα 5.13), όπου για ύψη μεγαλύτερα της τιμής αυτής, η τιμή της πρώτης παραγώγου του διορθωμένου ως προς την απόσταση σήματος lidar στα 532 nm παραμένει σταθερή, ενώ φαίνεται στο ύψος αυτό να παύει η ύπαρξη σωματιδίων και εκτός του ΑΟΣ. Το γράφημα της Εικόνας 5.8 παρουσιάζει την κατανομή μεγέθους σωματιδίων (particle size distribution) $dV/d\ln R$ σε $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$, σε συνάρτηση με την ακτίνα (Radius) σε μm , σε ημιλογαριθμική κλίμακα. Η ημιλογαριθμική κλίμακα, όπως έχει αποδειχτεί από προηγούμενες μελέτες, είναι πολύ περισσότερο χρήσιμη και θεωρείται καταλληλότερη, εμπειρικά, για τέτοιου είδους κατανομές. Όταν η περιοχή δεδομένων είναι στενή,

η λογαριθμική κατανομή προσεγγίζει μια κανονική κατανομή. Όπως και στη δική μας περίπτωση, η ημιλογαριθμική κατανομή θεωρείται καταλληλότερη, όταν η περιοχή δεδομένων του x-άξονα είναι μεγαλύτερη από περίπου 10 (διαφορά μεταξύ της υψηλότερης και της χαμηλότερης τιμής του οριζόντιου άξονα).

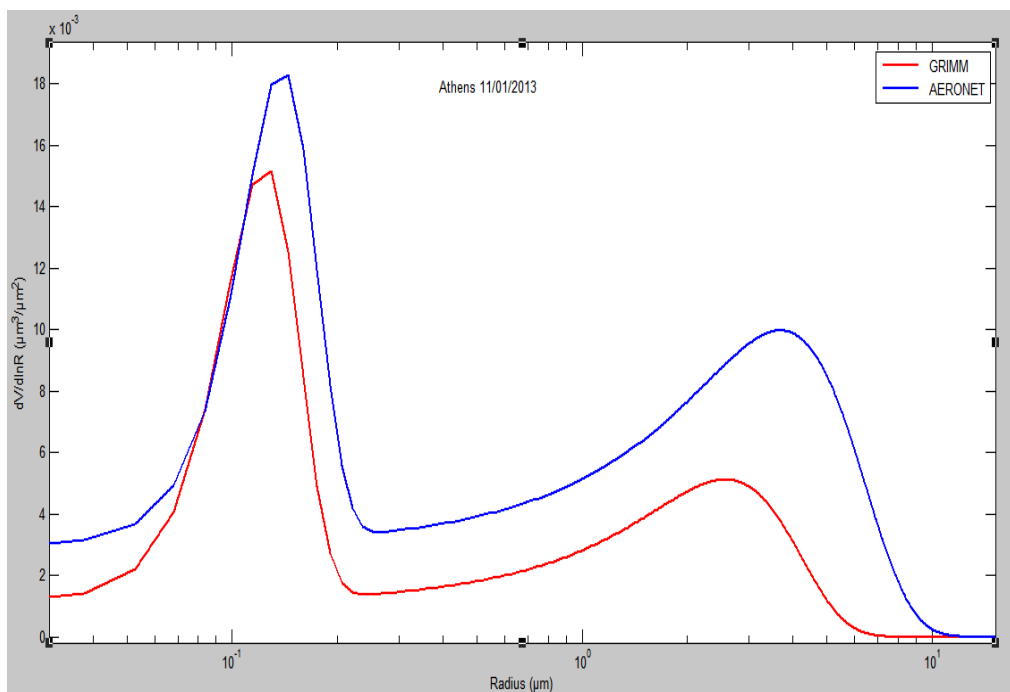
Στο γράφημα αυτό λοιπόν, παρατηρώντας αρχικά τις δύο κατανομές, AERONET και GRIMM στα 1100 m, που φαίνονται με κόκκινη και μαύρη γραμμή αντίστοιχα, υπάρχει μια αρκετά καλή ταύτιση, με παρόμοιες τιμές μετρήσεων στις περιοχές όπου υπάρχουν σωματίδια, λεπτά στην πρώτη κορυφή του διαγράμματος και χονδρά στη δεύτερη κορυφή, αντίστοιχα. Επαληθεύεται επομένως το γεγονός πως η συγκέντρωση των λεπτών σωματιδίων είναι μεγαλύτερη από αυτή των χονδρών με αντιπροσωπευτικές τιμές τα $0.017 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$, έναντι τις μέσης τιμής των $0.007 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$, όπως φαίνεται στο διάγραμμα. Η κατανομή μεγέθους σωματιδίων κυριαρχείται από αερολύματα γύρω στα $0.1 \mu\text{m}$ και λιγότερο από αερολύματα μεταξύ $1-10 \mu\text{m}$ και παρουσιάζει 2 κορυφές, μία για διαμέτρους από 2 έως $3 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$, fine) και μια μικρότερη γύρω στα $10 \mu\text{m}$ (PM_{10} , coarse). Το ελάχιστο που παρατηρείται μεταξύ των δύο κορυφών και στις δύο περιπτώσεις μετρήσεων των GRIMM και CIMEL δηλώνει απουσία αιωρούμενων σωματιδίων σε μια στενή περιοχή με τιμές μεγαλύτερες των $0.1 \mu\text{m}$ και μικρότερες των $1 \mu\text{m}$ καθώς επίσης απουσία σωματιδίων έχουμε και για τιμές μικρότερες των $0.1 \mu\text{m}$ και μεγαλύτερες των $10 \mu\text{m}$. Ωστόσο δεν υπάρχει πλήρης ταύτιση τιμών, αλλά το CIMEL δίνει μεγαλύτερες τιμές καθώς μετρά σε ολόκληρη την ατμοσφαιρική στήλη, ενώ το GRIMM έχει σημείο αναφοράς το έδαφος. Στις τιμές του GRIMM περιλαμβάνεται και ο παράγοντας της υγρασίας, που επηρεάζει άμεσα το μέγεθος των σωματιδίων και συνεπώς προκαλεί αύξηση στις αριθμητικές τιμές. Ο παράγοντας αυτός απουσιάζει από τις μετρήσεις του οργάνου GRIMM.

Συγκρίνοντας τώρα την κατανομή από το AERONET και το GRIMM στα 1750 m , Βλέπουμε πως η κορυφή για τα σωματίδια με διαμέτρους από $2.5 \mu\text{m}$ έως και 10 περίπου μm , των δύο περιπτώσεων, έχει ταυτιστεί καλύτερα, με τα σημεία να έχουν πλησιάσει περισσότερο. Ωστόσο φαίνεται ότι το όργανο GRIMM έχει μετρήσει μεγαλύτερη τιμή συγκέντρωσης λεπτών σωματιδίων, με μέγιστη τιμή κατανομής μεγέθους τα $0.026 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ για τιμή ακτίνας $0.14 \mu\text{m}$, ύστερα από τη μετατροπή των δεδομένων. Οι δύο κατανομές του GRIMM στα 1100 m και GRIMM στα 1750 m , είναι μετετοπισμένες μεταξύ τους, κατά έναν παράγοντα 1.6.



Εικόνα 5.8: Κατανομή μεγέθους σωματιδίων (particle size distribution) $dV/d\ln R$ σε $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$, συναρτήσει της ακτίνας (radius) σε μm , σε ημιλογαριθμική κλίμακα από μετρήσεις των οργάνων GRIMM και AERONET.

Στη συνέχεια, θέλοντας να απαλλαγούμε από το θόρυβο που παρεμβάλλεται στις πειραματικές μετρήσεις κάναμε fit τις δύο κατανομές σε Γκαουσιανή κατανομή 2^{ου} βαθμού (bimodal) απ' όπου προέκυψε το γράφημα της εικόνας 5.9, καθώς και ο Πίνακας 5.1.2, που περιλαμβάνει το ύψος των fine και coarse mode περιοχών, το εύρος και το εμβαδόν τους, καθώς και τις συντεταγμένες του cut off point, δηλαδή του σημείου όπου διαχωρίζονται οι δύο κορυφές και έχουμε απουσία σωματιδίων για συγκεκριμένες τιμές ακτίνας.

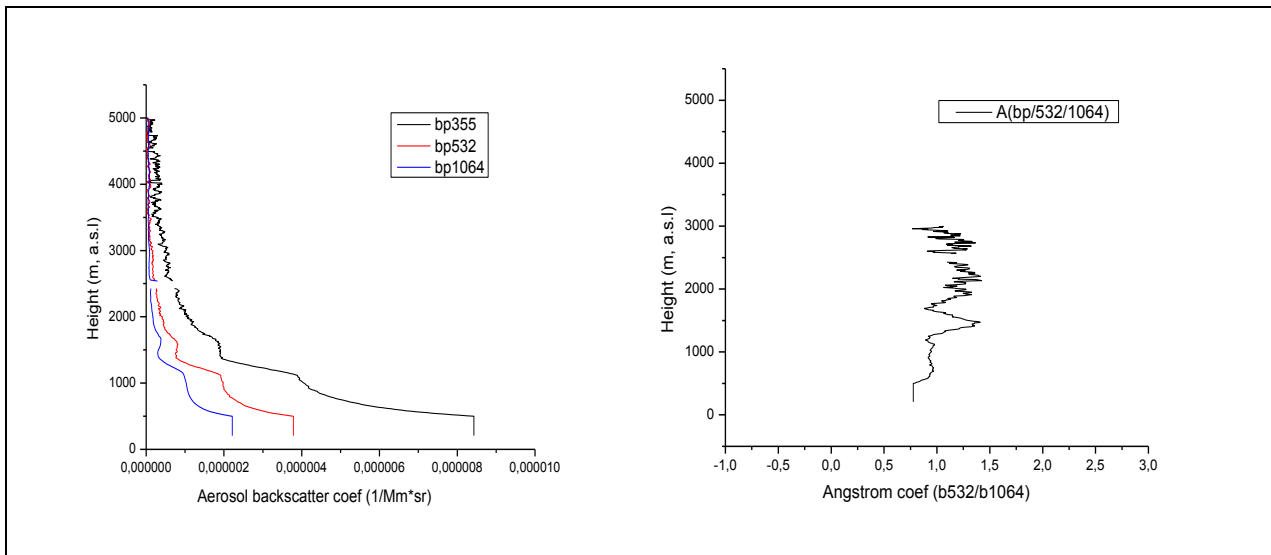


Εικόνα 5.9: Gaussian fitted κατανομή μεγέθους σωματιδίων (particle size distribution) $dV/d\ln R$ σε $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$, συναρτήσει της ακτίνας (radius) σε μm , σε ημιλογαριθμική κλίμακα.

	AERONET		GRIMM	
	Fine mode	Coarse mode	Fine mode	Coarse mode
Height	0.01553	0.00994	0.01415	0.00514
Width	0.06734	4.42008	0.06129	2.48352
Area	0.00130	0.05259	0.00109	0.01452
Cut-off point	x-coord : 0.225	y-coord: 0.00137	x-coord: 0.231	y-coord: 0.0014

Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικές τιμές των fine mode και coarse mode περιοχών, όπως προέκυψαν από το fitting σε Γκαουσιανή κατανομή 2ου βαθμού.

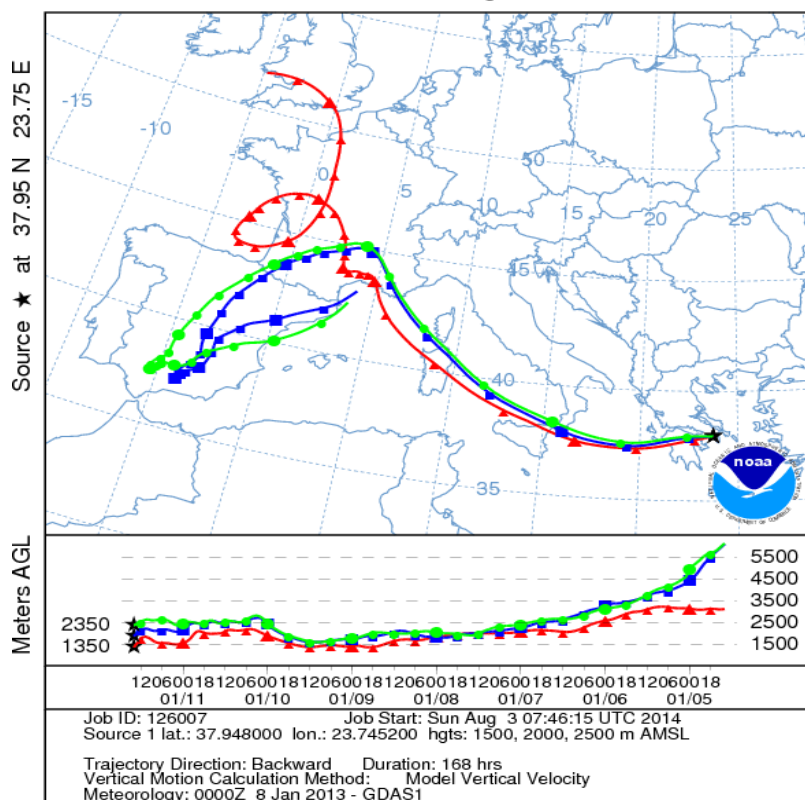
Η κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης των αερολυμάτων στα 355, 532 και 1064 nm από τις μετρήσεις του lidar, επιβεβαιώνει πως υπάρχει απουσία σωματιδίων στα ύψη από 5000 έως και 1500 m, ενώ χαμηλότερα ξεκινά αυξημένη ύπαρξη σωματιδίων και αυξάνεται καθώς πλησιάζουμε το έδαφος. Οι τιμές του συντελεστή Ångström λόγω οπισθοσκέδασης στο ζεύγος 532nm /1064 nm (AE b532nm/1064 nm) παραμένουν σχεδόν σταθερές, με τιμές γύρω από τη μονάδα, με ένα εύρος τιμών από 0.80 έως 1.33.



Εικόνα 5.10: Κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 355, 532, 1064 nm (αριστερά) και του συντελεστή Ångström λόγω οπισθοσκέδασης στο ζεύγος 532nm/1064 nm (ΑΕ b532nm/1064 nm), (δεξιά) όπως ανακτήθηκαν από τις μετρήσεις Raman lidar (EOLE), πάνω από την Αθήνα στις 11 Ιανουαρίου 2013, μεταξύ 01:30-03:00 UTC.

Με τη βοήθεια του μοντέλου Hysplit, πραγματοποιήσαμε ανάλυση των οπισθοτροχιών των αερίων μαζών για να εντοπίσουμε την προέλευση αυτών που φθάνουν στην Αθήνα (ύστερα από πορεία 7 ημερών) στις 11 Ιανουαρίου (14:00 UTC) σε διάφορα ύψη μεταξύ 1350 m και 2350 m πάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας. Όπως είναι φανερό από την Εικόνα 5.11, οι μάζες αυτές έχουν κυρίως προέλευση την Νοτιο-Δυτική και Δυτική Ευρώπη, περνώντας πάνω από τη Μεσόγειο. Πρόκειται δηλαδή για αέριες μάζες εμπλουτισμένες με σωματίδια κυρίως ανθρωπογενούς προέλευσης, από τις βιομηχανίες της Νοτιο-Δυτικής, Δυτικής Ευρώπης.

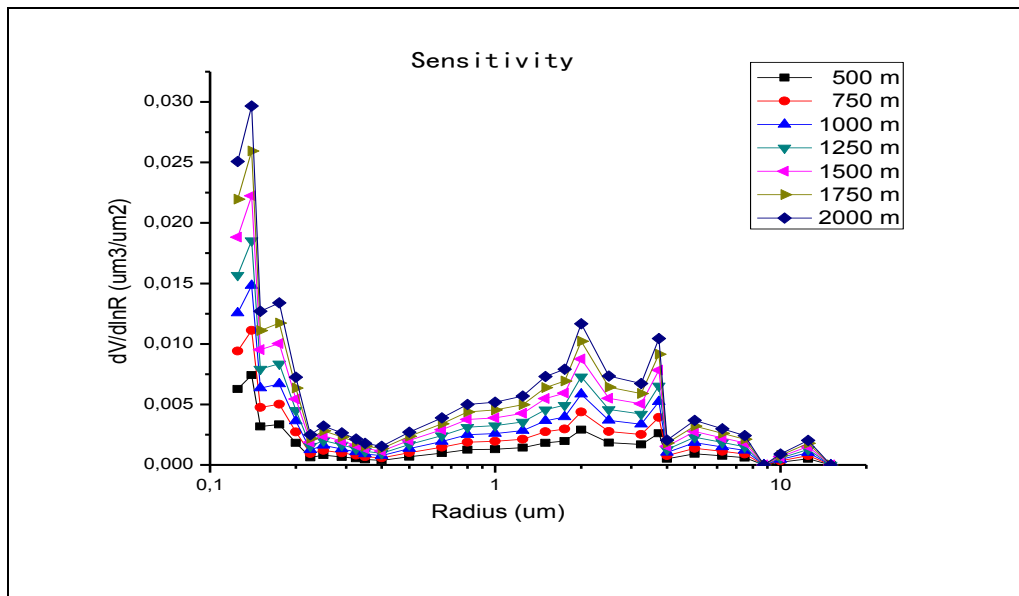
NOAA HYSPLIT MODEL
 Backward trajectories ending at 1400 UTC 11 Jan 13
 GDAS Meteorological Data



Εικόνα 5.11: Η ανάλυση οπισθοτροχιών 7-ημερών, από το μοντέλο Hysplit, για την προέλευση των σωματιδίων που ανιχνεύονται πάνω από την Αθήνα στις 11 Ιανουαρίου 2013, στις 14:00 UTC σε διάφορα επίπεδα ύψων μεταξύ 1350 m και 2350 m.

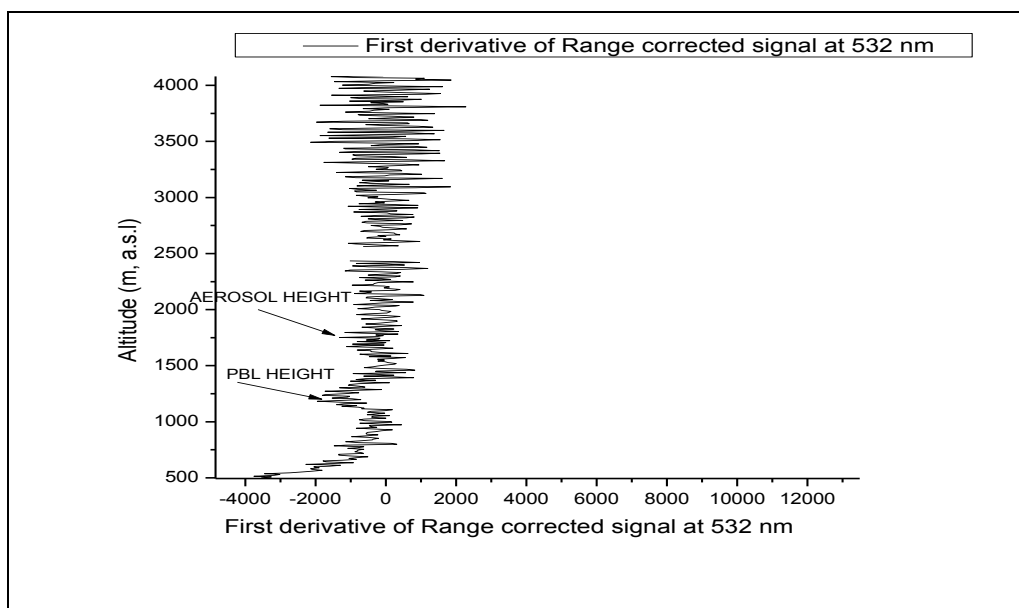
Θέλοντας να μελετήσουμε πόσο επηρεάζονται οι μετρήσεις μας από τον παράγοντα «ύψος» του ΑΟΣ, πραγματοποιήσαμε για τα δεδομένα της 11^{ης} Ιανουαρίου 2013, στις 13:34 UTC ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis). Με ύψος αναφοράς τα 1500 m και με δεδομένο ότι το ύψος του ΑΟΣ είναι δυνατόν να κυμαίνεται από 500 m έως και 2000 m, ανάλογα με την εποχή και την ώρα της ημέρας, υπολογίσαμε ουσιαστικά το σφάλμα για τις τιμές 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750 και 2000 m, όπως φαίνεται και στο ένθετο του γραφήματος (Εικόνα 5.12). Στο κοινό αυτό γράφημα λοιπόν, παρατηρούμε ότι στις περιοχές των κορυφών, όπου υπάρχουν λεπτά (fine mode) και χονδρά (coarse mode) σωματίδια, ο παράγοντας «ύψος» επηρεάζει αισθητά τις μετρήσεις, σε σχέση με τις περιοχές τιμών ακτίνας όπου έχουμε απουσία σωματιδίων. Όσο απομακρυνόμαστε από την τιμή αναφοράς τόσο αυξάνει η τιμή του σφάλματος και τόσο αποκλίνουν οι κατανομές μεταξύ τους. Για παράδειγμα, για την ίδια τιμή δεδομένων, στα 1250 m (απόκλιση 250 m), παρατηρείται σφάλμα της τάξεως του 16.7 % ενώ στα 500 m (απόκλιση 1000 m), το σφάλμα φτάνει την τιμή 66.7 %. Ειδικότερα, όσο πιο έντονη είναι η κορυφή, τόσο μεγαλύτερη είναι και η μετατόπιση των τιμών, προς τα πάνω, κοιτάζοντας με φορά από τη μικρότερη στη μεγαλύτερη. Εδώ συγκεκριμένα, οι τιμές στο fine mode μετατοπίζονται με βήμα 0.0037 για κάθε αύξηση του ύψους ανά 250 m, στο εύρος 500-2000 m, ενώ στο coarse mode το αντίστοιχο βήμα είναι 0.0014. Συνεπώς, ο παράγοντας

«ύψος» είναι σημαντικός και κρίνεται απαραίτητο να υπολογίζουμε με αρκετά καλή ακρίβεια (± 50 m) το ύψος του ΑΟΣ έτσι ώστε να υπεισέρχεται στις μετρήσεις μας το μικρότερο δυνατό σφάλμα.



Εικόνα 5.12: Ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis) για τα δεδομένα της 11ης Ιανουαρίου 2013, στις 13:34 UTC, με ύψος αναφοράς τα 1500 m.

Στην περίπτωση μας, ο τρόπος με τον οποίο υπολογίσαμε την ακριβή τιμή του ΑΟΣ, έγινε με τον υπολογισμό της πρώτης παραγώγου, ως προς την απόσταση, του διορθωμένου σήματος lidar, στα 532 nm, όπως φαίνεται στο γράφημα της Εικόνας 5.13 που ακολουθεί.

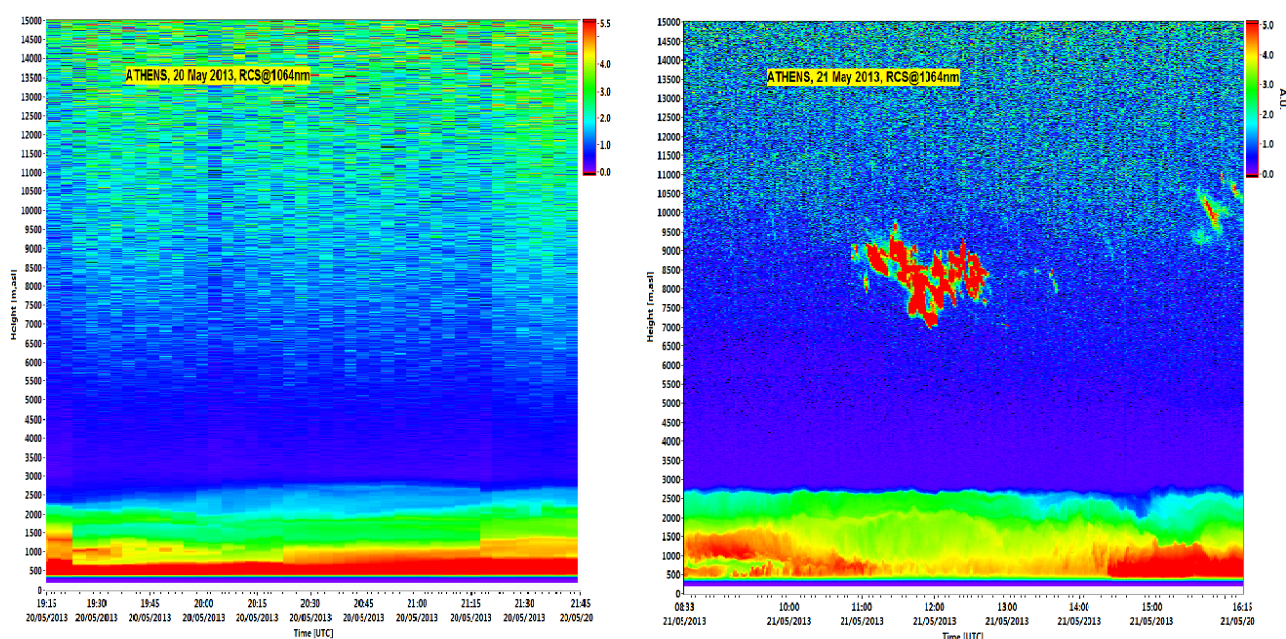


Εικόνα 5.13: Υπολογισμός του ύψους του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, μέσω της πρώτης παραγώγου, ως προς την απόσταση, του διορθωμένου σήματος lidar, στα 532 nm, για τις 11 Ιανουαρίου 2013, πάνω από την Αθήνα.

5.2. Κατανομή μεγέθους αιωρούμενων σωματιδίων για Special Case

Κατά την περίοδο του Μαΐου 2013 προέκυψαν ημέρες με ιδιαίτερο ενδιαφέρον σχετικά με την χωρο-χρονική μεταβολή των αιωρούμενων σωματιδίων στο Λεκανοπέδιο Αθηνών. Ως ειδική περίπτωση επιλέξαμε την περίοδο 20-21 Μαΐου 2013, όπου είχαμε επεισόδιο μεταφοράς σκόνης όπως θα παρουσιαστεί στη συνέχεια.

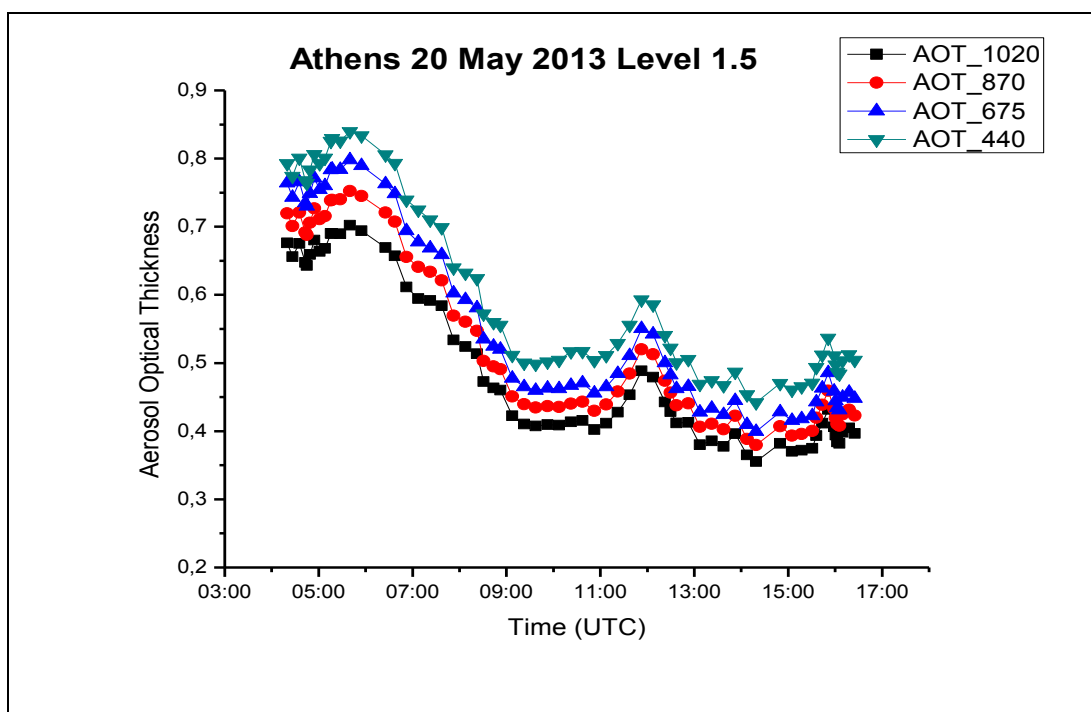
Ξεκινώντας και πάλι από τη χωρο-χρονική εξέλιξη της κατακόρυφης κατανομής του διορθωμένου ως προς την απόσταση σήματος lidar στα 1064 nm (RCS), των αντίστοιχων ημερών (Εικόνα 5.14), όπως καταγράφηκε από το σύστημα lidar του ΕΜΠ, παρατηρούμε τα εξής: στις 20 Μαΐου με ώρα έναρξης τις 19:15 UTC, εμφανίζεται μια επιπλέον στρωμάτωση μετά το πέρας του ΑΟΣ, του οποίου το ύψος φτάνει στα 1400 m περίπου και εντός του οποίου παρουσιάζονται μεγάλες τιμές του συντελεστή οπισθοσκέδασης, όπως υποδηλώνει και η αντίστοιχη χρωματική κλίμακα. Στο τμήμα από 1400 m έως περίπου 2500 m, είναι εμφανής μια επιπλέον στρωμάτωση, υπάρχει δηλαδή μια διακριτή ύπαρξη σωματιδιακών στρωματώσεων στην ελεύθερη τροπόσφαιρα. Από 2500 έως και 6500 m η τροπόσφαιρα είναι φανερά απαλλαγμένη από σωματίδια, ενώ για μεγαλύτερα ύψη η δέσμη laser εξασθενεί. Η επιπρόσθετη αυτή στρωμάτωση συνεχίζει να υπάρχει και την επόμενη ημέρα, στις 21 Μαΐου, με ύψος που φθάνει έως και τα 2700 m, με την πρωινή μέτρηση RCS_1064 nm να ξεκινά στις 08:33 UTC και με αυξημένες τιμές του σήματος οπισθοσκέδασης. Και πάλι η περιοχή αμέσως μετά τα 2700 m έως και τα 7000 m χαρακτηρίζεται από απουσία αερολυμάτων, ενώ έχει καταγραφεί και ύπαρξη νεφώσεων στην περιοχή μεταξύ 7000 έως 12500 m.



Εικόνα 5.14: Χωρο-Χρονική εξέλιξη της κατακόρυφης κατανομής του διορθωμένου ως προς την απόσταση σήματος lidar (RCS) στα 1064 nm όπως καταγράφηκε από το lidar του ΕΜΠ στις 20 και 21 Μαΐου 2013.

Υστερα από την άφιξη των σωματιδίων σκόνης πάνω από την περιοχή της Αθήνας στην ελεύθερη τροπόσφαιρα, με ενδεχόμενη προέλευση από την έρημο Σαχάρα, λαμβάνει χώρα μια σαφής ανάμειξη των σωματιδίων αυτών με τα σωματίδια ανθρωπογενούς προέλευσης εντός του ΑΟΣ, όπως καθίσταται φανερό από το καταγραφές οπισθοσκεδαζόμενο σήμα lidar των δύο αυτών ημερών, κυρίως μάλιστα κατά τη διάρκεια της δεύτερης ημέρας, στις 21 Μαΐου.

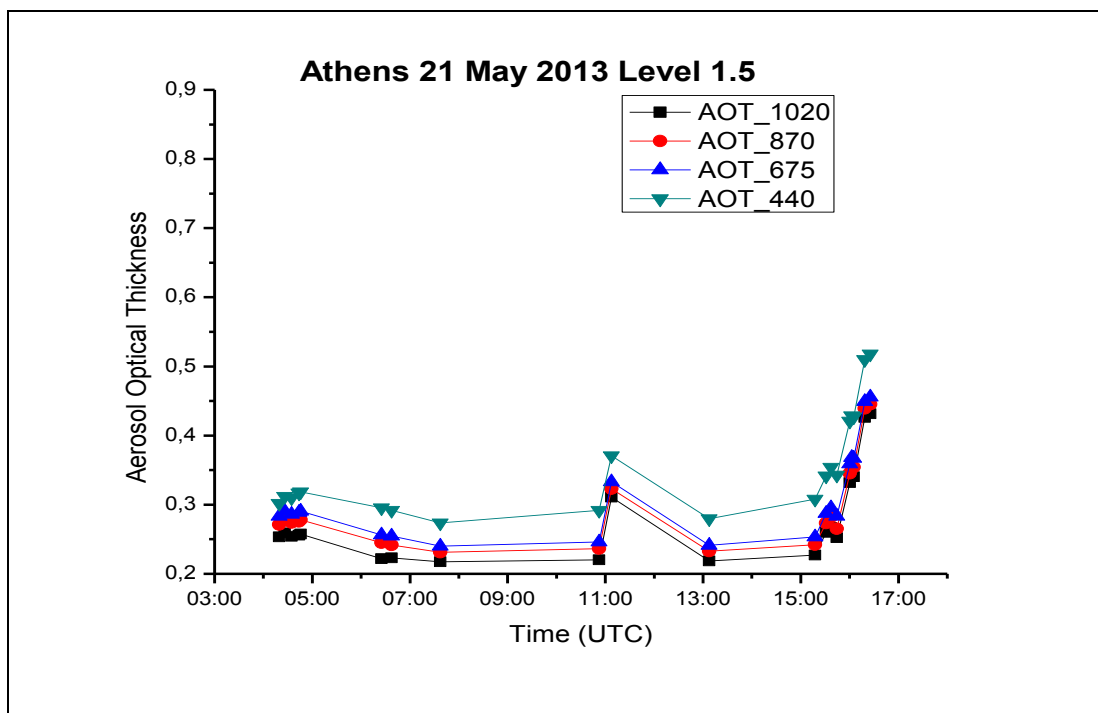
Οι τιμές του AOT στις 20 και 21 Μαΐου 2013 όπως καταγράφηκαν από το ηλιακό φωτόμετρο CIMEL στην περιοχή της Αθήνας εμφανίζονται αυξημένες και μάλιστα με σχετικά μεγάλες διακυμάνσεις. Ειδικότερα, η μέση τιμή του AOT στα 440 nm (AOT_440) για τις 20 και 21 Μαΐου είναι 0.1602 και 0.351 αντίστοιχα. Για τις ίδιες ημέρες στα 675 nm είναι 0.559 και 0.307 (AOT_675), στα 870 nm 0.528 και 0.307 (AOT_870) και τέλος στα 1020 nm η μέση τιμή του AOT κυμαίνεται στα 0.494 και 0.278 αντίστοιχα (AOT_1020). Τις πρώτες πρωινές ώρες της 20^{ης} Μαΐου οι τιμές του AOT είναι ιδιαίτερα αυξημένες, όπως έχουν καταγραφεί και στα 4 διαφορετικά μήκη κύματος, ωστόσο φθίνουν αισθητά στο χρονικό διάστημα 7:00-9:00 UTC ενώ για ώρα 12:00 UTC, έχουμε και πάλι μια αύξηση τιμών η οποία μειώνεται ξανά τις ώρες που ακολουθούν.



Εικόνα 5.15: Χρονική διακύμανση οπτικού πάχους σε διάφορα μήκη κύματος όπως καταγράφηκε από το φωτόμετρο CIMEL στις 20 Μαΐου 2013.

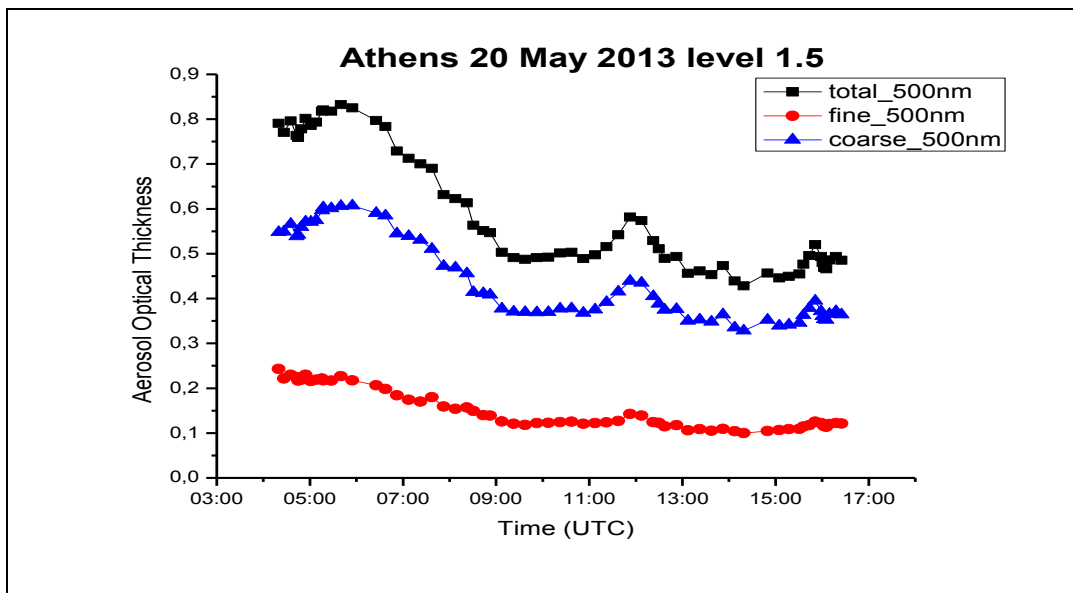
Στις 21 Μαΐου, οι μετρήσεις ξεκινούν τις πρώτες πρωινές ώρες, σε αυξημένα σχετικά επίπεδα, με τις τιμές να παραμένουν σχετικά σταθερές από τις 04:00 UTC έως και λίγο πριν τις 11:00 UTC, όπου και πάλι στο χρονικό διάστημα 11:00-12:00 UTC παρουσιάζεται αύξηση, όπως καταγράφηκε σε όλα τα μήκη κύματος, με τα μικρότερα μήκη κύματος να δίνουν μεγαλύτερες τιμές σε όλα τα

γραφήματα, όπως αναμέναμε. Η μέγιστη τιμή καθ' όλη τη διάρκεια του διημέρου καταγράφεται στις 05:39 UTC της 20^{ης} Μαΐου στα 0.840 στα 440 nm και 0.702 στα 1020 nm, η ελάχιστη στις 7:37 UTC της 21^{ης} Μαΐου στα 0.274 στα 440 nm και 0.217 στα 1020 nm.

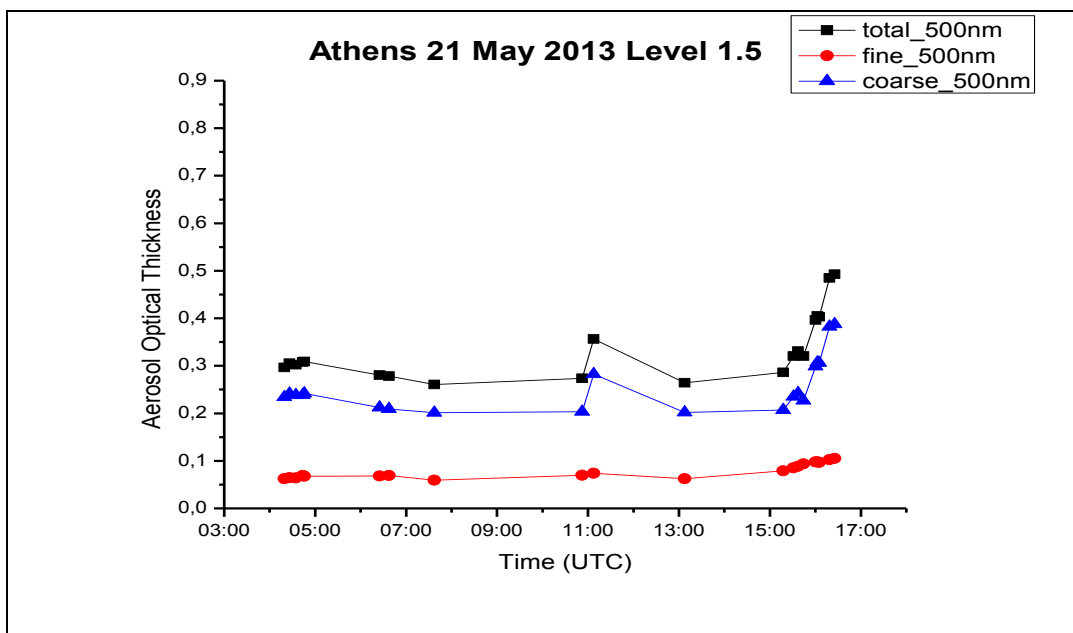


Εικόνα 5.16: Χρονική διακύμανση οπτικού πάχους σε διάφορα μήκη κύματος όπως καταγράφηκε από το φωτόμετρο CIMEL στις 21 Μαΐου 2013.

Στα ακόλουθα γραφήματα (Εικόνες 5.17 και 5.18) παρατηρούμε τη συνεισφορά των λεπτών και χονδρών σωματιδίων στο σύνολο του οπτικού πάχους, όπως καταγράφηκε από το CIMEL στα 500 nm (level 1.5). Είναι σαφές πως η πλειοψηφία των σωματιδίων ανήκει στην κατηγορία των χονδρών σωματιδίων, όπως υποδηλώνει η μπλε γραμμή και στα δυο διαγράμματα. Συγκεκριμένα τα χονδρά σωματίδια υπερτερούν των λεπτών σε ποσοστό 74.4% επί του συνόλου, έναντι 25.6% που αντιστοιχεί στα λεπτά σωματίδια στις 20 Μαΐου. Τα ποσοστά αυτά διατηρούνται περίπου στα ίδια επίπεδα, με μια μικρή αύξηση της τάξεως του 2% υπέρ των χονδρών σωματιδίων, με τα ποσοστά δηλαδή να διαμορφώνονται στα 76.4 % και 23.6% αντίστοιχα, την επόμενη ημέρα.



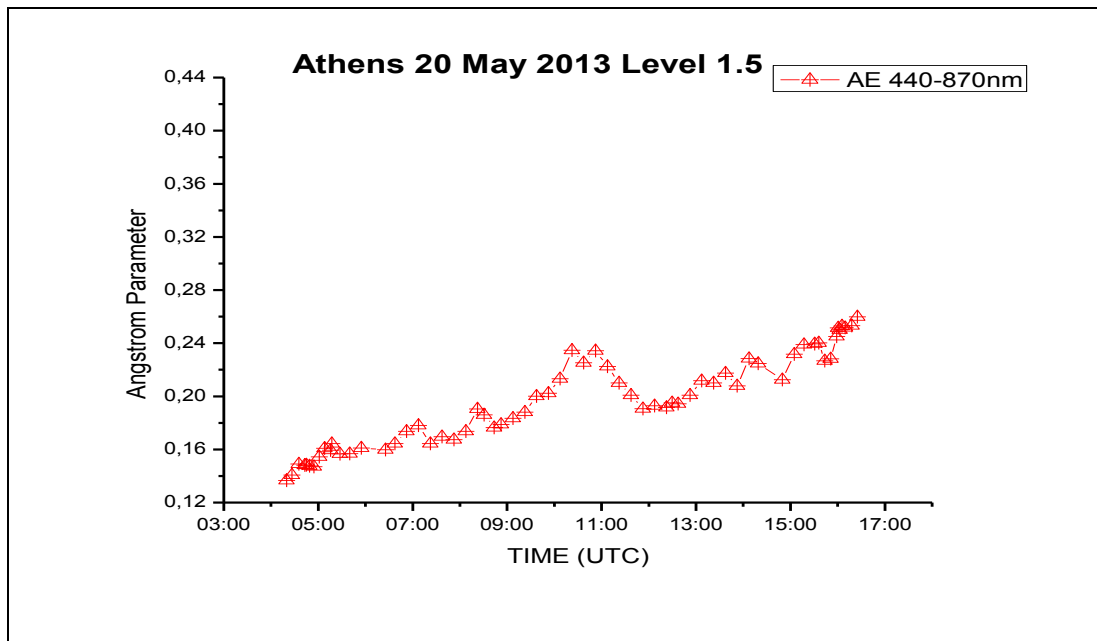
Εικόνα 5.17: Χρονική διακύμανση του οπτικού πάχους αερολυμάτων σε fine, coarse και total mode, στα 500 nm, όπως καταγράφηκε από το φωτόμετρο CIMEL στις 20 Μαΐου 2013.



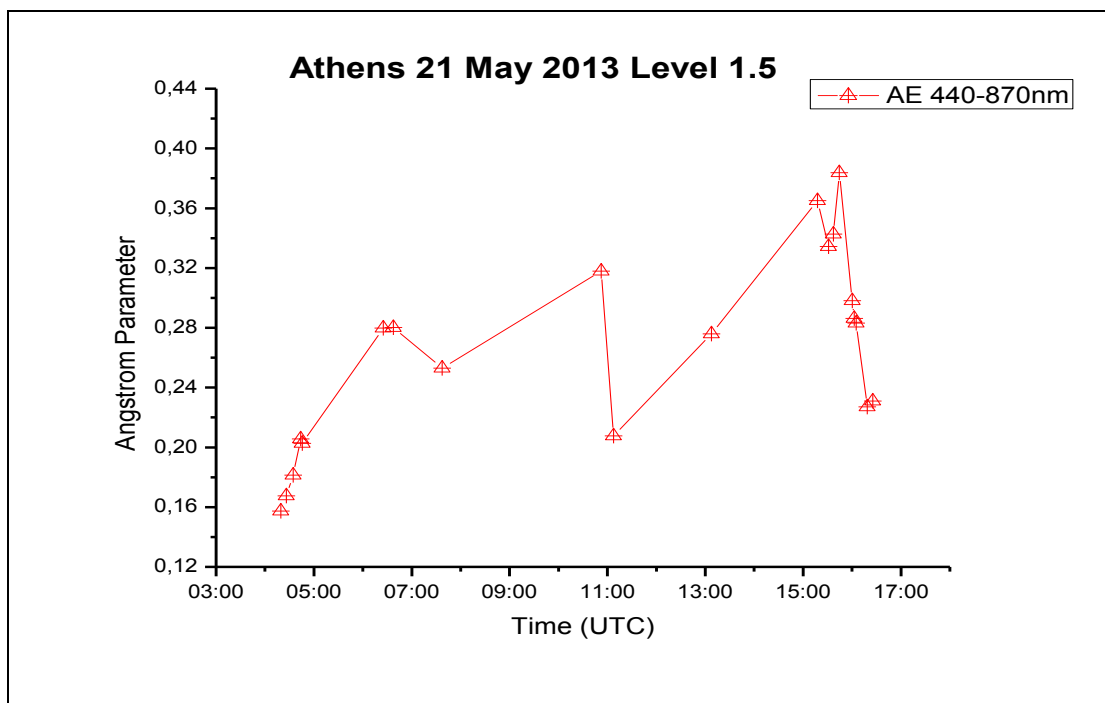
Εικόνα 5.18: Χρονική διακύμανση του οπτικού πάχους αερολυμάτων σε fine, coarse και total mode, στα 500 nm, όπως καταγράφηκε από το φωτόμετρο CIMEL στις 20 Μαΐου 2013.

Παρατηρώντας τη χρονική διακύμανση του συντελεστή Ångström όπως επίσης καταγράφηκε από το ηλιακό φωτόμετρο CIMEL, βλέπουμε να καταγράφονται χαμηλές τιμές όπως είναι αναμενόμενο, λόγω της αυξημένης συγκέντρωσης των χονδρών σωματιδίων που φανερώνουν μεταφορά σκόνης από απομακρυσμένη περιοχή. Τις πρώτες πρωινές ώρες της 20^{ης} Μαΐου οι τιμές κυμαίνονται στα 0.13-0.18, αυξάνονται σταδιακά με το πέρασμα της ώρας και εμφανίζουν μέγιστο γύρω στις 11:00 UTC, αλλά και τις απογευματινές ώρες, με την ελάχιστη τιμή της ημέρας, αλλά και συνολικά στη διάρκεια του διημέρου, να είναι στα 0.14, αρκετά χαμηλή, να σημειώνεται στις

4:19:42, όπως καταγράφηκε από την πρώτη μέτρηση. Η μέση τιμή κυμαίνεται στα 0.20 για την πρώτη μέρα, ενώ για τη δεύτερη στα 0.26, παραμένοντας δηλαδή στα ίδια χαμηλά επίπεδα.



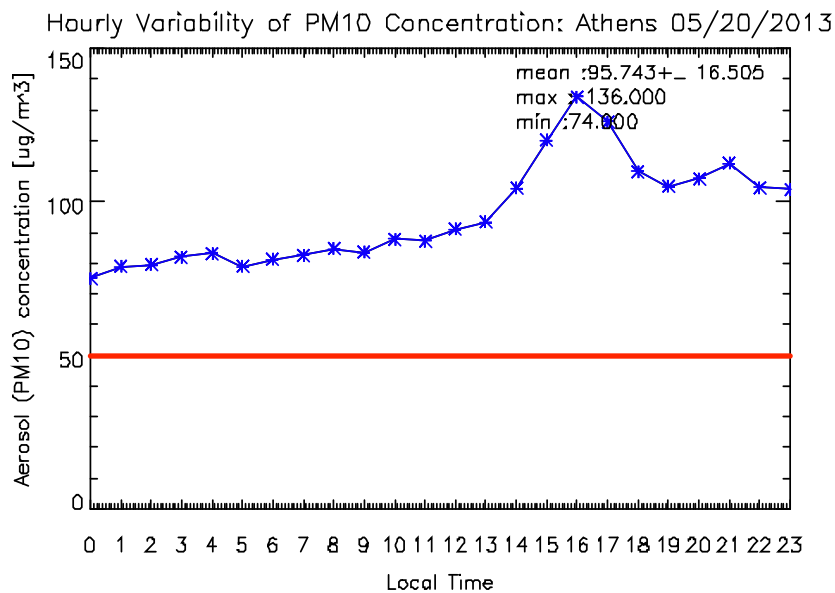
Εικόνα 5.19: Χρονική διακύμανση του συντελεστή Ångström στα 440-870 nm, όπως καταγράφηκε από το φωτόμετρο CIMEL στις 20 Μαΐου 2013.



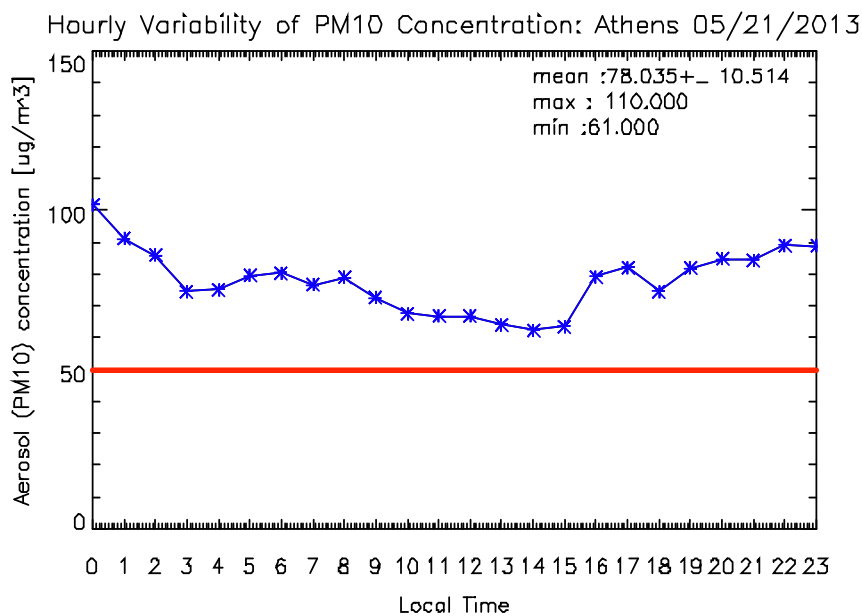
Εικόνα 5.20: Χρονική διακύμανση του συντελεστή Ångström στα 440-870 nm, όπως καταγράφηκε από το φωτόμετρο CIMEL στις 21 Μαΐου 2013.

Στα γραφήματα των Εικόνα 5.21 και 5.22 παρουσιάζουμε την ημερήσια ωριαία διακύμανση της συγκέντρωσης σωματιδίων PM₁₀ (μg/m³), όπως καταγράφηκε από το όργανο DustTrak, στις 20 και

21 Μαΐου 2013. Όπως προαναφέραμε, η κόκκινη γραμμή παριστά το όριο της συγκέντρωσης της κατηγορίας αυτής σωματιδίων, όπως έχει καθιερωθεί από την ΕΕ. Καθ' όλη τη διάρκεια του 48ώρου, η συγκέντρωση των σωματιδίων PM₁₀ βρίσκεται πάνω από το όριο των 50 μg/m³ με τη μέγιστη τιμή να φτάνει τα 136 μg/m³, στις 20 Μαΐου για τοπική ώρα 16:00, που είναι και η μέγιστη που σημειώθηκε καθ' όλη τη διάρκεια του διημέρου και την ελάχιστη στα 61 μg/m³, να σημειώνεται γύρω στις 14:00, τοπική ώρα, της επόμενης ημέρας.

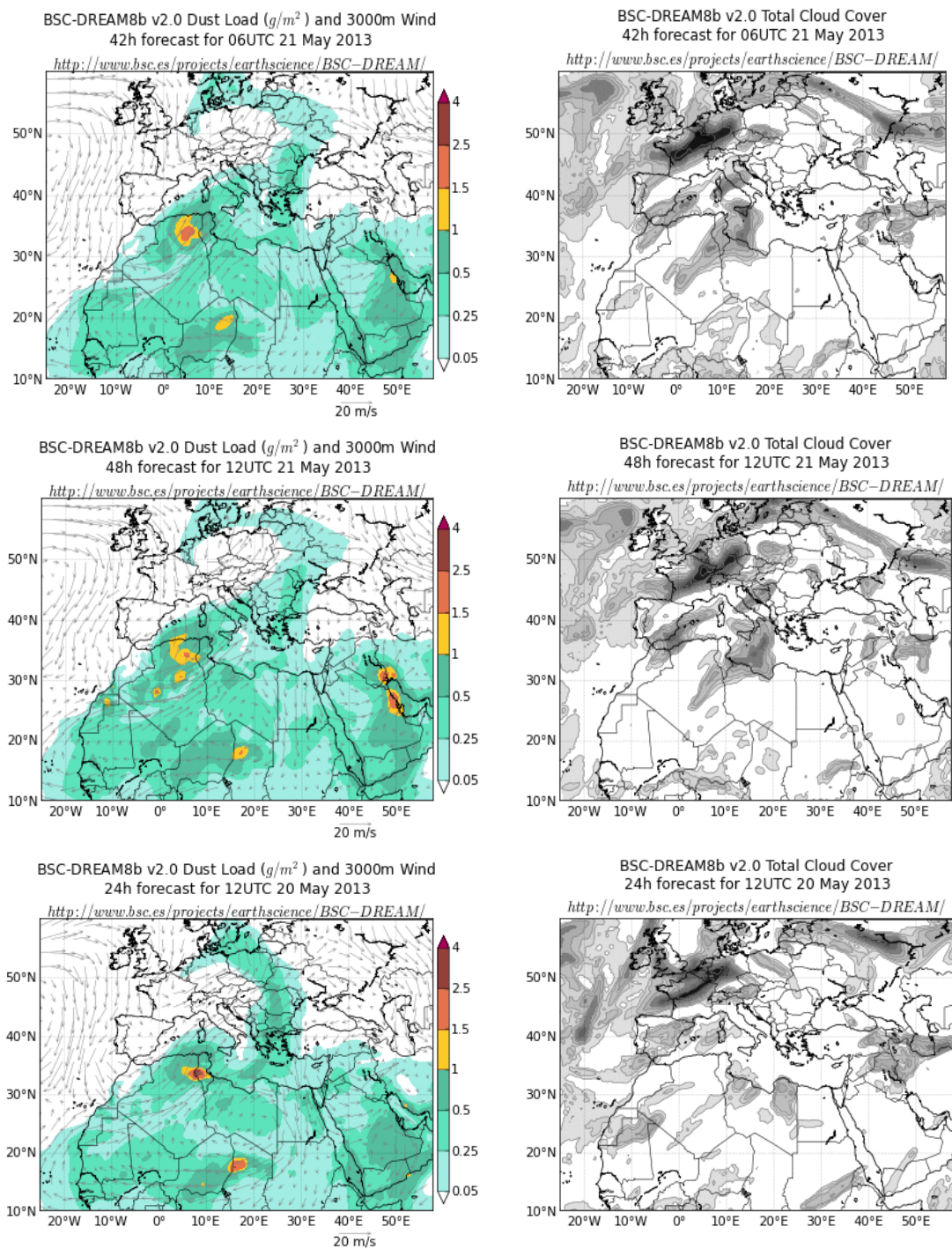


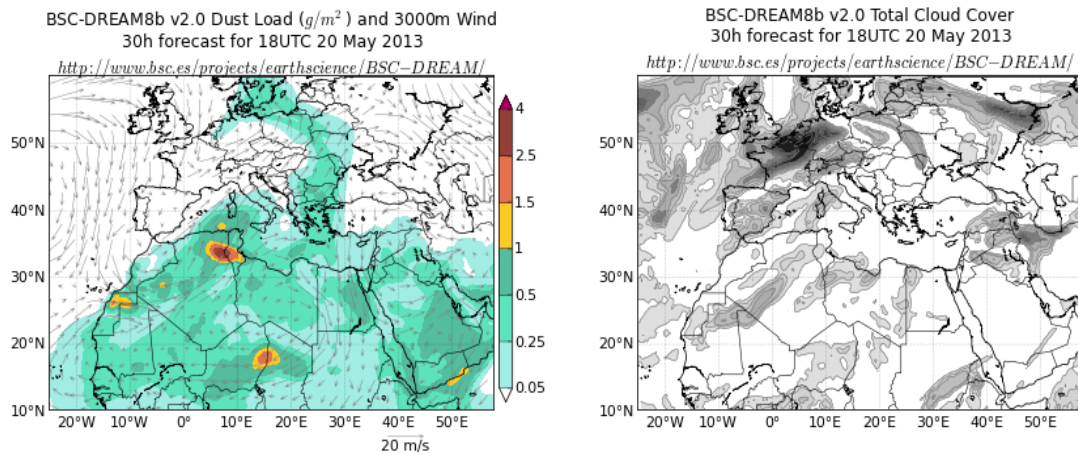
Εικόνα 5.21: Ημερήσια ωριαία διακύμανση συγκέντρωσης σωματιδίων PM₁₀ (μg/m³), όπως καταγράφηκε από το DustTrak, στις 20 Μαΐου 2013.



Εικόνα 5.22: Ημερήσια ωριαία διακύμανση συγκέντρωσης σωματιδίων PM₁₀ (μg/m³), όπως καταγράφηκε από το DustTrak, στις 21 Μαΐου 2013.

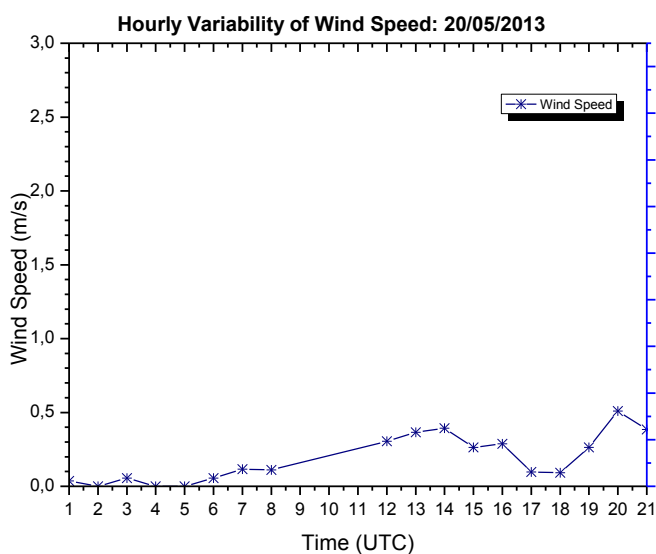
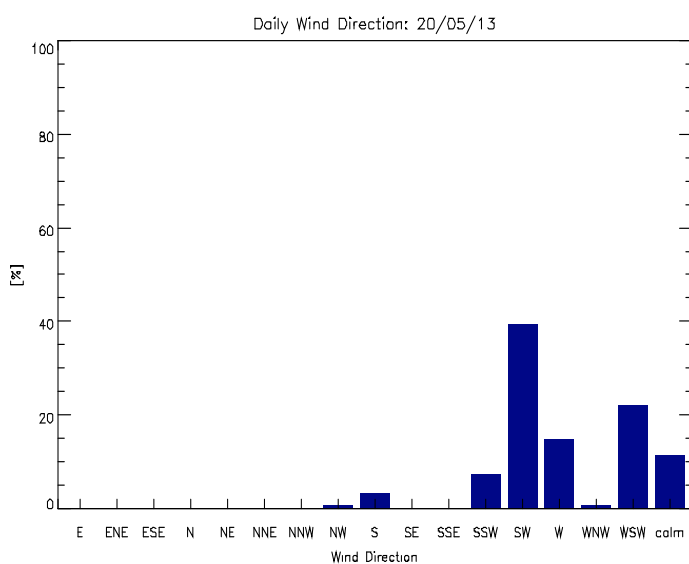
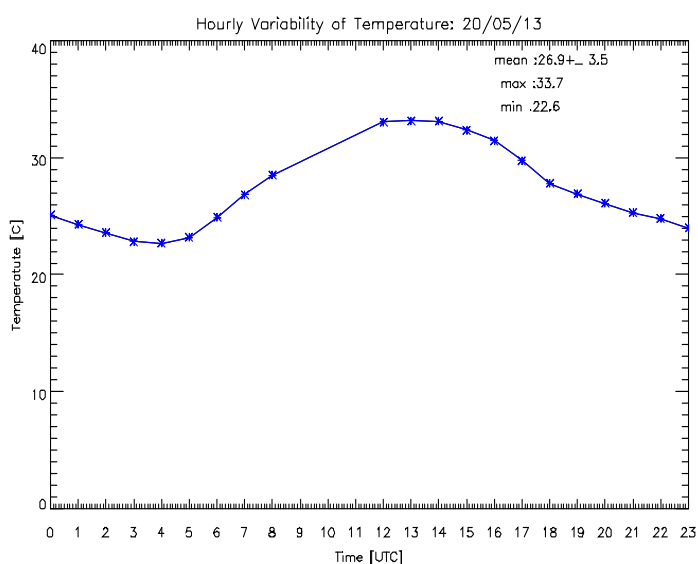
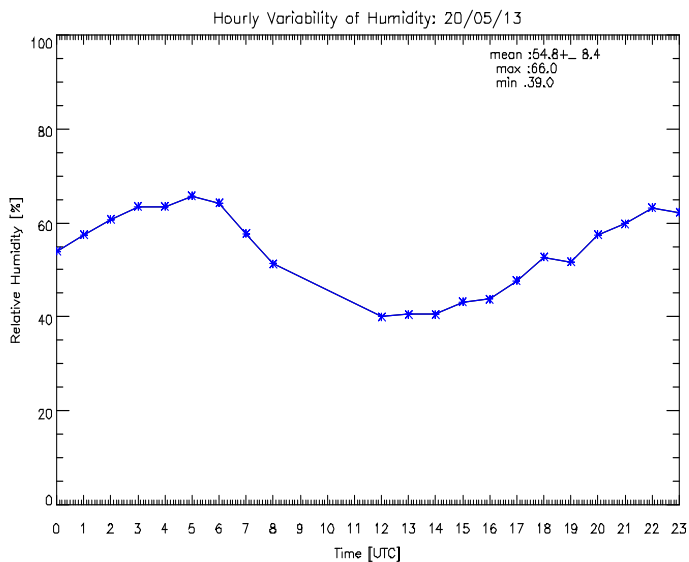
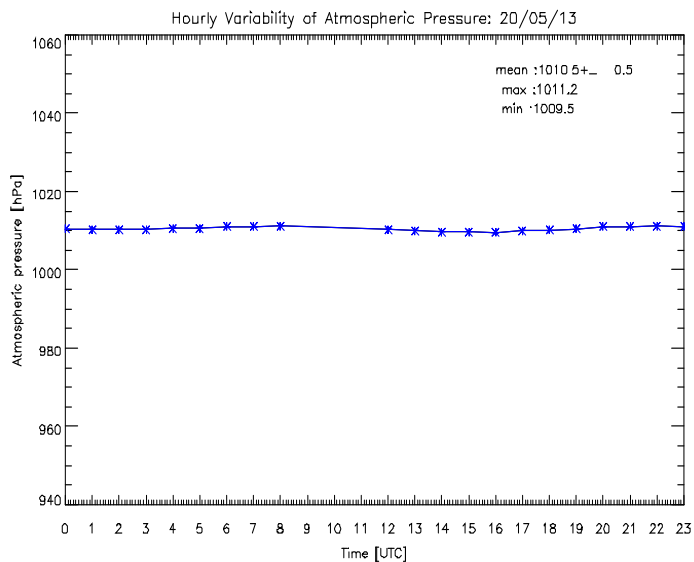
Το μοντέλο BSC-DREAM8b έρχεται να επιβεβαιώσει τις υποθέσεις μας για μεταφορά σκόνης όπως φαίνεται ακολούθως. Πάνω από ολόκληρο το χώρο της Ανατολικής Μεσογείου, της Ελλάδας και των Βαλκανίων παρατηρούμε μεταφορά σκόνης από την Αφρικανική ήπειρο, και ακριβέστερα, πάνω από το Λεκανοπέδιο Αττικής έχουμε μεταφορές σωματιδιακής σκόνης με φόρτο της τάξης των 0.5-1 g/m^2 στις 20 Μαΐου, που με το πέρασμα της ώρας εξασθενεί λίγο, ενώ οι τιμές της επόμενης ημέρα μειώνονται στα 0.25-0.5 g/m^2 . Το ίδιο χρονικό διάστημα, η ατμόσφαιρα του Ελλαδικού χώρου φαίνεται απαλλαγμένη από νέφη, σύμφωνα πάντα με τις προγνώσεις του μοντέλου.



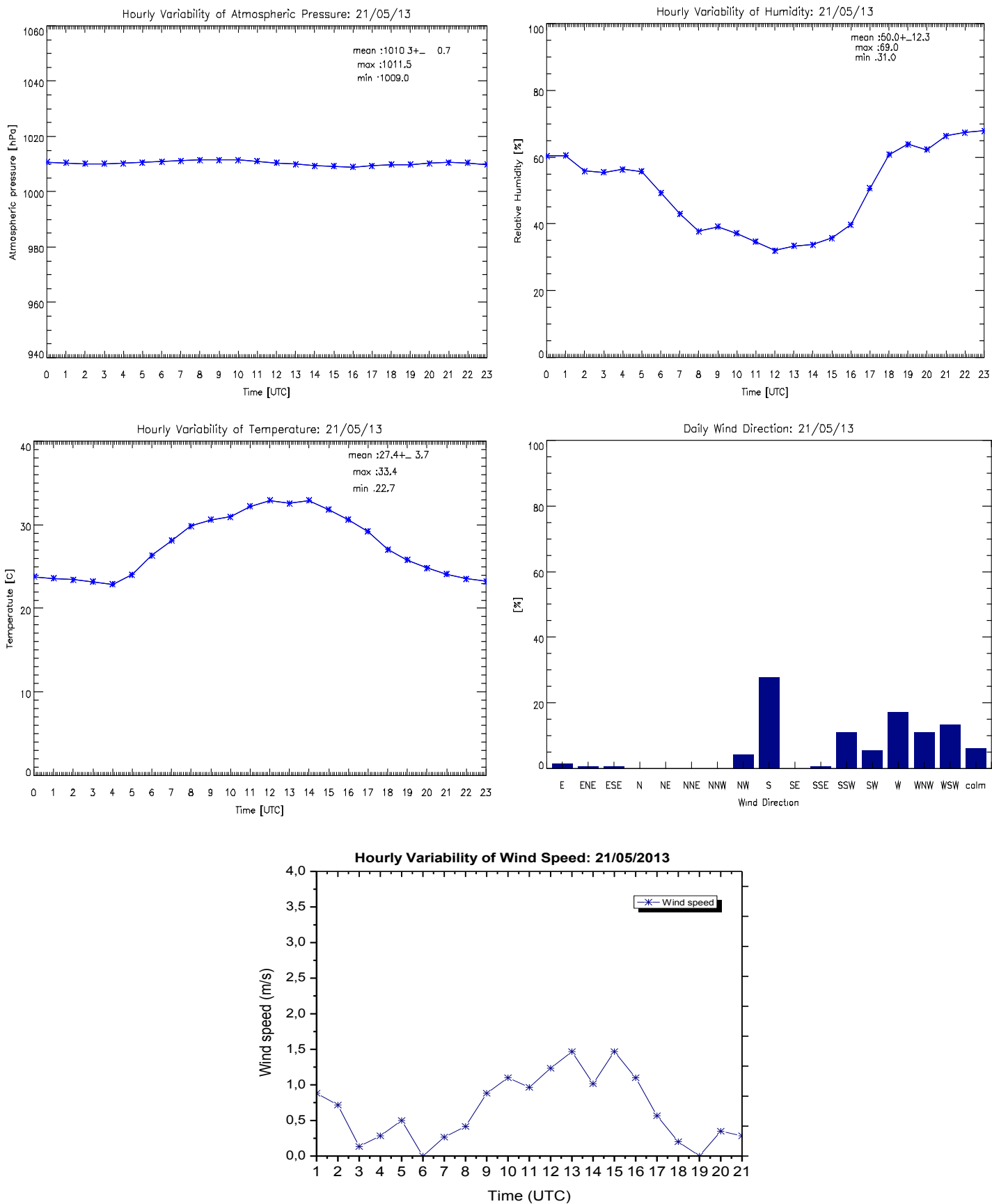


Εικόνα 5.23: Αριστερά: Η χωρο-χρονική εξέλιξη της μεταφοράς σωματιδιακής σκόνης σε g/m^2 πάνω από την Ευρώπη, Δεξιά: Η χωρο-χρονική εξέλιξη της ολικής νεφοκάλυψης πάνω από την Ευρώπη, όπως προβλέφθηκαν από το μοντέλο BSC/DREAM8b για την 11η Ιανουαρίου 2013.

Όσον αφορά τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούσαν πάνω από την Αθήνα το διήμερο αυτό του Μαΐου, αρκετά όμοιες και για τις δύο ημέρες, να αναφέρουμε ότι στις 20 Μαΐου η ατμοσφαιρική πίεση ήταν σταθερή στα 1010.5 ± 0.5 hPa και ο μέσος όρος της σχετικής υγρασίας κυμάνθηκε στα 54.8 ± 8.4 % με την ελάχιστη τιμή στο 39% να σημειώνεται στις 12:00 UTC, ενώ στο χρονικό διάστημα 10:00-14:00 UTC η σχετική υγρασία έλαβε τιμές γύρω στο 40%. Η επικρατέστερη διεύθυνση ανέμου είναι νοτιοδυτική με μέση τιμή ταχύτητας ανέμου 0.2 m/s και η θερμοκρασία κυμαίνεται σε ένα εύρος 23-33 °C. Στις 21 Μαΐου οι τιμές της σχετικής υγρασίας έχουν μια μικρή πτώση με τη μέση τιμή να βρίσκεται στο 50.0 ± 12.3 % ενώ στο χρονικό διάστημα 06:00-16:00 UTC οι τιμές είναι χαμηλότερες του 40%. Η επικρατέστερη τιμή ανέμου έχει αλλάξει κυρίως σε νότια, μέση τιμή της ταχύτητας του είναι 0.6 m/s, ενώ η ατμοσφαιρική πίεση, η θερμοκρασία διατηρούνται σε ίδια επίπεδα με την προηγούμενη ημέρα.

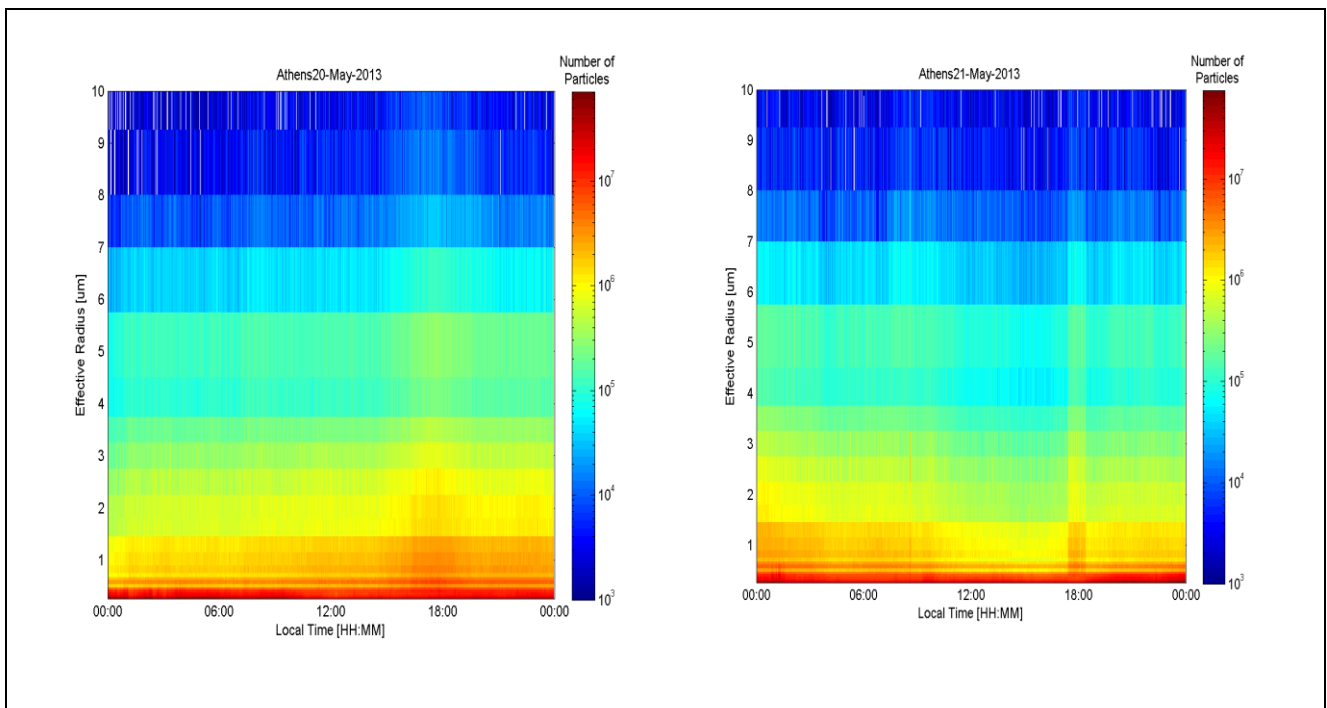


Εικόνα 5.24: Μετεωρολογικά δεδομένα όπως καταγράφηκαν από τον μετεωρολογικό σταθμό DAVIS PRO του Τομέα Φυσικής στις 21 Μαΐου 2013: α) Ωριαία μεταβολή της ατμοσφαιρικής πίεσης, β) Ωριαία μεταβολή της σχετικής υγρασίας, γ) Μέση τιμή της κατεύθυνσης του ανέμου, δ) Ωριαία μεταβολή της ταχύτητας ανέμου, ε) Ωριαία μεταβολή της θερμοκρασίας.



Εικόνα 5.25: Μετεωρολογικά δεδομένα όπως καταγράφηκαν από τον μετεωρολογικό σταθμό DAVIS PRO του Τομέα Φυσικής στις 21 Μαΐου 2013: α) Ωριαία μεταβολή της ατμοσφαιρικής πίεσης, β) Ωριαία μεταβολή της σχετικής υγρασίας, γ) Μέση τιμή της κατεύθυνσης του ανέμου, δ) Ωριαία μεταβολή της ταχύτητας ανέμου, ε) Ωριαία μεταβολή της θερμοκρασίας.

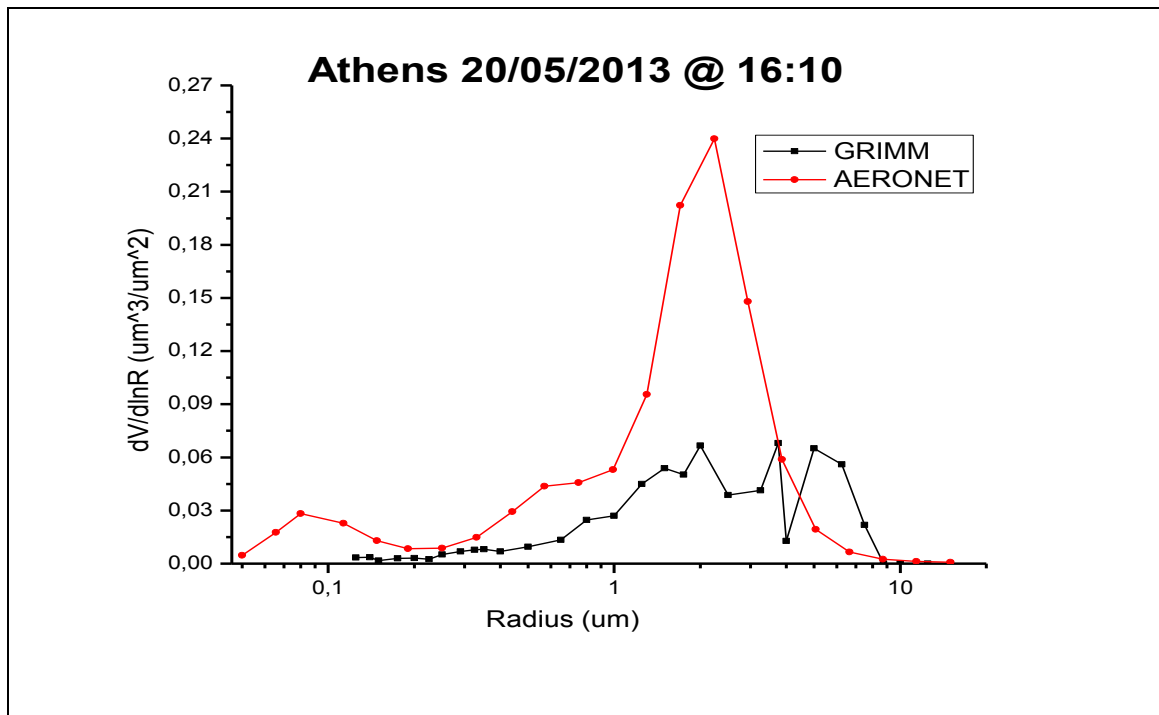
Ακολουθώς παρουσιάζουμε τις μετρήσεις της ενεργού ακτίνας των σωματιδίων (effective radius) σε μm , για τις 20 και 21 Μαΐου 2013 όπως προέκυψε ύστερα από επεξεργασία των δεδομένων που κατέγραψε το GRIMM (Εικόνα 5.26). Παρατηρούνται αυξημένες συγκεντρώσεις σωματιδίων καθ' όλη τη διάρκεια του διημέρου για τιμές ενεργού ακτίνας έως $1 \mu\text{m}$, της τάξεως του $10^7/\text{m}^3$, καθώς και για τιμές ενεργού ακτίνας από $1 \mu\text{m}$ έως $3,5 \mu\text{m}$, με συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων, της τάξεως του 10^6 m^{-3} . Για μεγαλύτερες τιμές ενεργού ακτίνας, σε ένα εύρος $3.5\text{-}6 \mu\text{m}$, ο αριθμός αιωρούμενων σωματιδίων μειώνεται, ενώ παρατηρείται μια αύξηση για τοπική ώρα 18:00 της πρώτης ημέρας, στο εύρος αυτό. Για μεγαλύτερες τιμές ενεργού ακτίνας υπάρχει περαιτέρω μείωση του αριθμού, όπως φανερώνει η αντίστοιχη χρωματική κλίμακα της Εικόνας 5.26 (αριστερά).



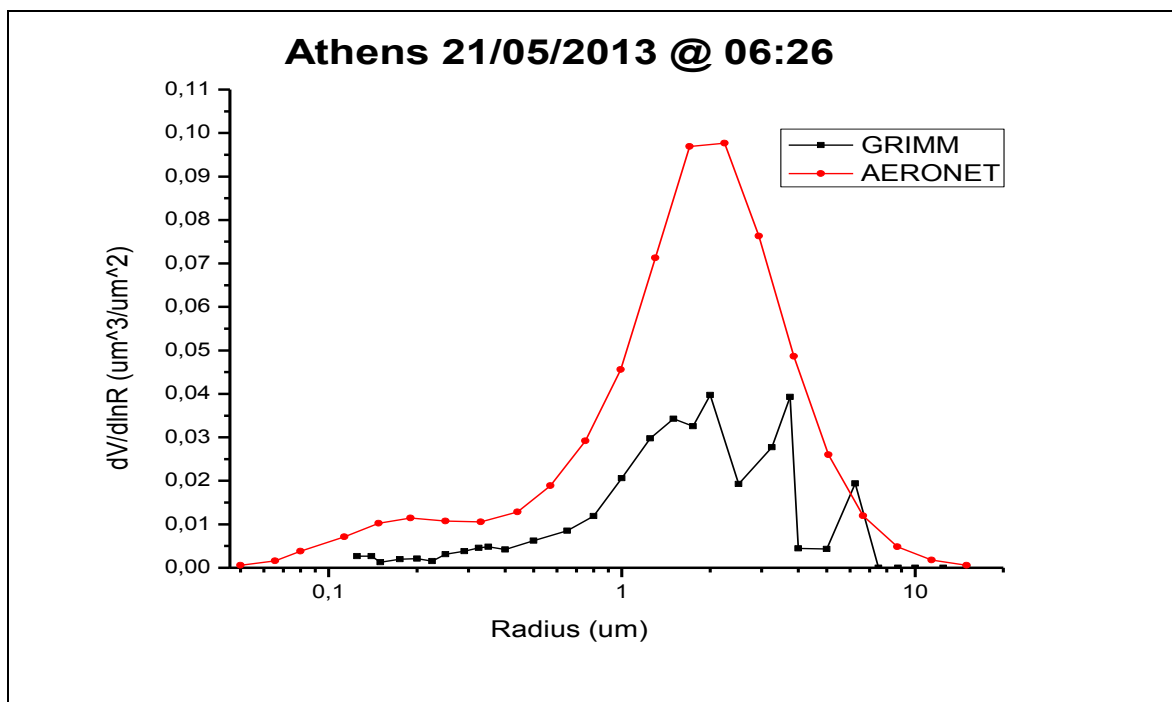
Εικόνα 5.26: Ενεργός ακτίνα (effective radius) σε μm , ως προς την τοπική ώρα για τις 20-21 Μαΐου 2013. Η χρωματική κλίμακα δείχνει τον αριθμό των σωματιδίων.

Συνοψίζοντας τις πληροφορίες των παραπάνω γραφημάτων (Εικόνες 5.15 έως 5.20), συμπεραίνουμε πως η χρονική εξέλιξη των τιμών του AOT των σωματιδίων σε όλη την ατμοσφαιρική στήλη, σε επιλεγμένα φασματικά κανάλια όπως και του εκθέτη Ångström ($440\text{-}870 \text{ nm}$), από τις μετρήσεις του ηλιακού φωτομέτρου CIMEL στην περιοχή της Αθήνας στις υπό μελέτη ημερομηνίες, καταδεικνύει άφιξη ερημικής σκόνης πάνω από το σταθμό AERONET στην Αθήνα, με τα χονδρά σωματίδια να επικρατούν έναντι των λεπτών. Οι τιμές των AOT και AE παρουσιάζουν σχετικά μεγάλες διακυμάνσεις, με αυξημένες τιμές AOT και χαμηλές τιμές AE, καθόλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Το επεισόδιο μεταφοράς σκόνης από την Αφρικανική ήπειρο επιβεβαιώθηκε και από τις πληροφορίες που μας δίνει το μοντέλο BSC DREAM, από τις μετρήσεις lidar και φυσικά από τις τιμές συγκέντρωσης PM_{10} που κατέγραψε το TSI στο έδαφος.

Συγκρίνοντας τώρα σε κοινό γράφημα τα δεδομένα όπως καταγράφηκαν από το GRIMM και το CIMEL, σύμφωνα με την προαναφερθείσα μέθοδο επεξεργασίας, προκύπτουν τα ακόλουθα γραφήματα της κατανομής μεγέθους σωματιδίων (Εικόνες 5.27 και 5.28):



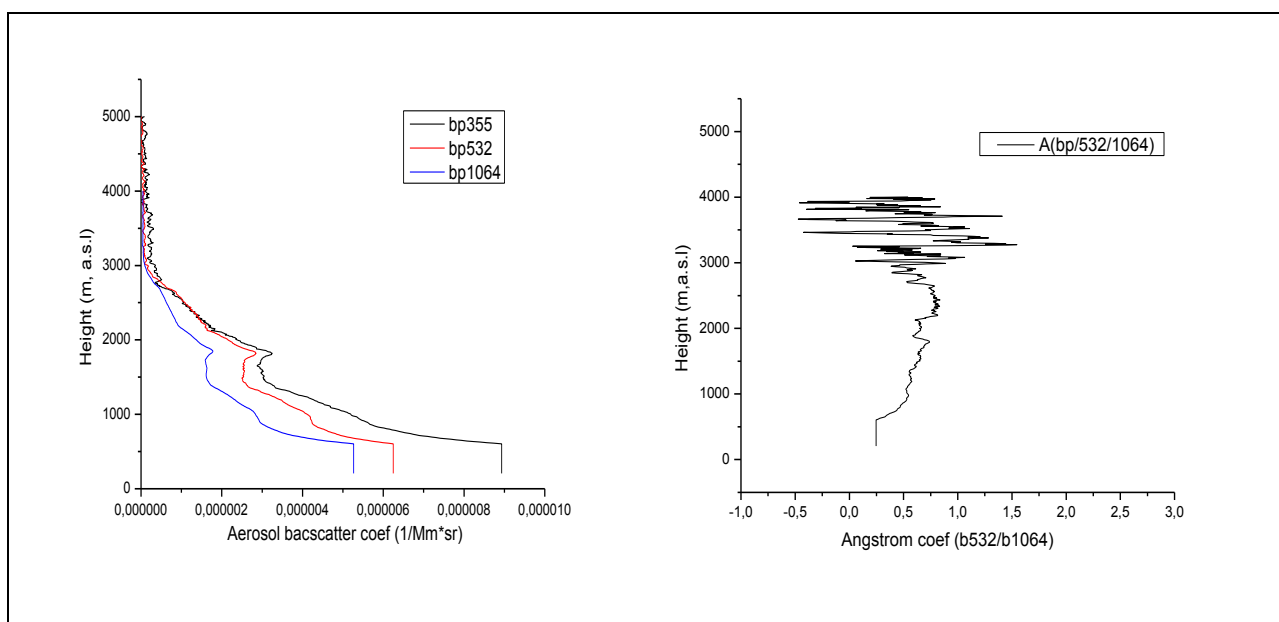
Εικόνα 5.27: Κατανομή μεγέθους σωματιδίων (particle size distribution) $dV/d\ln R$ σε $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$, συναρτήσει της ακτίνας (Radius) σε μm , σε ημιλογαριθμική κλίμακα, στις 20 Μαΐου 2013, 16:10 UTC στην Αθήνα.



Εικόνα 5.28: Κατανομή μεγέθους σωματιδίων (particle size distribution) $dV/d\ln R$ σε $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$, συναρτήσει της ακτίνας (Radius) σε μm , σε ημιλογαριθμική κλίμακα, στις 21 Μαΐου 2013, 06:26 UTC στην Αθήνα.

Από τις Εικόνες 5.27 και 5.28, είναι εμφανές πως τα χονδρά σωματίδια υπερτερούν των λεπτών στις 20 και 21 Μαΐου. Ωστόσο, όπως προαναφέραμε το GRIMM καταγράφει μόνο τα σωματίδια που εντοπίστηκαν στην επιφάνεια του εδάφους και ύστερα από την κατάλληλη επεξεργασία αναφερόμαστε στην περιοχή μέχρι και ο πέρασ του ΑΟΣ, (η τιμή του οποίου υπολογίστηκε στα 1100 m, στις 20 Μαΐου και 1300 m στις 21 Μαΐου). Αντίθετα, στις μετρήσεις του AERONET συμπεριλαμβάνονται και τα σωματίδια της ελεύθερης τροπόσφαιρας, στην οποία, όπως προαναφέραμε, είναι εμφανής μια επιπλέον στρωμάτωση, λόγω μεταφοράς σκόνης από την έρημο Σαχάρα, μετά το πέρασ του ΑΟΣ σε ύψος που φτάνει ακόμη και τα 2700 m, την 21η Μαΐου. Η μέγιστη τιμή συγκέντρωσης σωματιδίων είναι τα $0.240 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ την πρώτη και $0.097 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$, τη δεύτερη ημέρα για σωματίδια με διάμετρο 4.48 μm , ενώ η πλειοψηφία των σωματιδίων εντοπίζεται στις τιμές μεταξύ 1-10 μm , με το εύρος του coarse mode να συμφωνεί και στα δυο μοντέλα και στις δυο εξεταζόμενες περιπτώσεις.

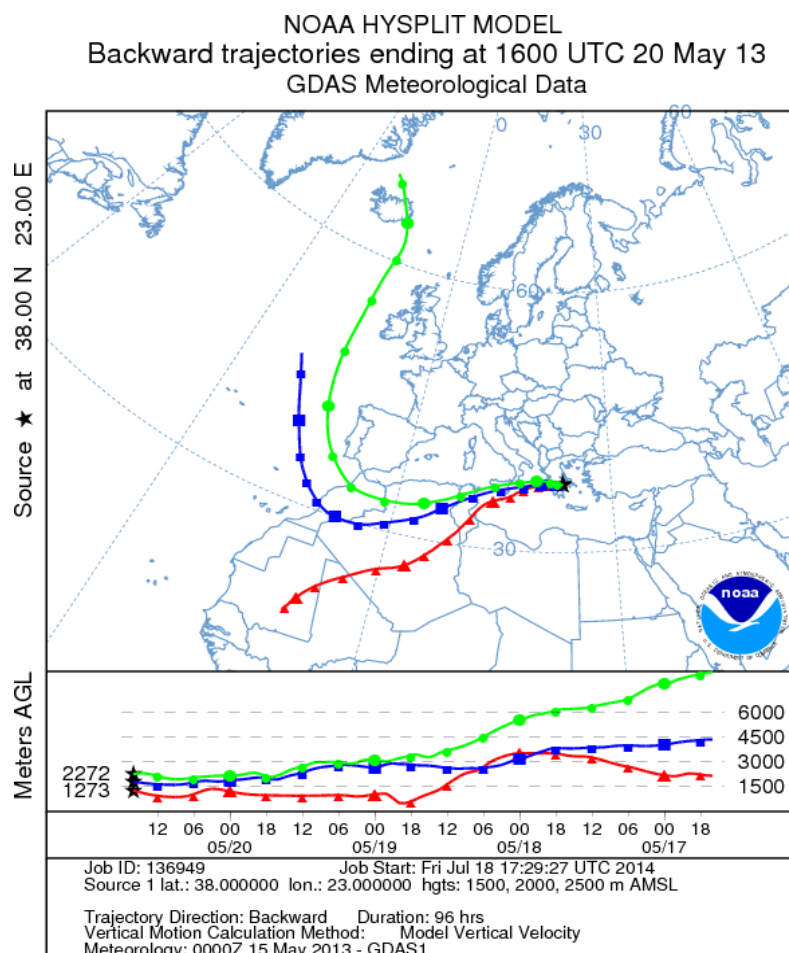
Ακολουθως, στην Εικόνα 5.29, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα (στα 355 nm, 532 nm και 1064 nm) αναφορικά με τον συντελεστή οπισθοσκέδασης αερολυμάτων από το σύστημα lidar και οι αντίστοιχες τιμές του συντελεστή Ångström λόγω οπισθοσκέδασης στο ζεύγος 532 nm/1064 nm (A_{Eb532nm/1064nm}). Στην εικόνα αυτή, όντως παρατηρούμε την ύπαρξη μιας έντονης στρωμάτωσης στα 1700-1800 m, με τιμές A_{Eb532 nm/1064 nm} της τάξης του 0.5, τυπικές των ερημικών σωματιδίων.



Εικόνα 5.29: Κατακόρυφες κατανομές του συντελεστή οπισθοσκέδασης (355, 532, 1064 nm) (αριστερά) και του συντελεστή Ångström λόγω οπισθοσκέδασης στο ζεύγος 532nm/1064 nm (A_{Eb532nm/1064 nm}), (δεξιά) όπως ανακτήθηκαν από τις μετρήσεις Raman lidar (EOLE), πάνω από την Αθήνα στις 20 Μαΐου 2013.

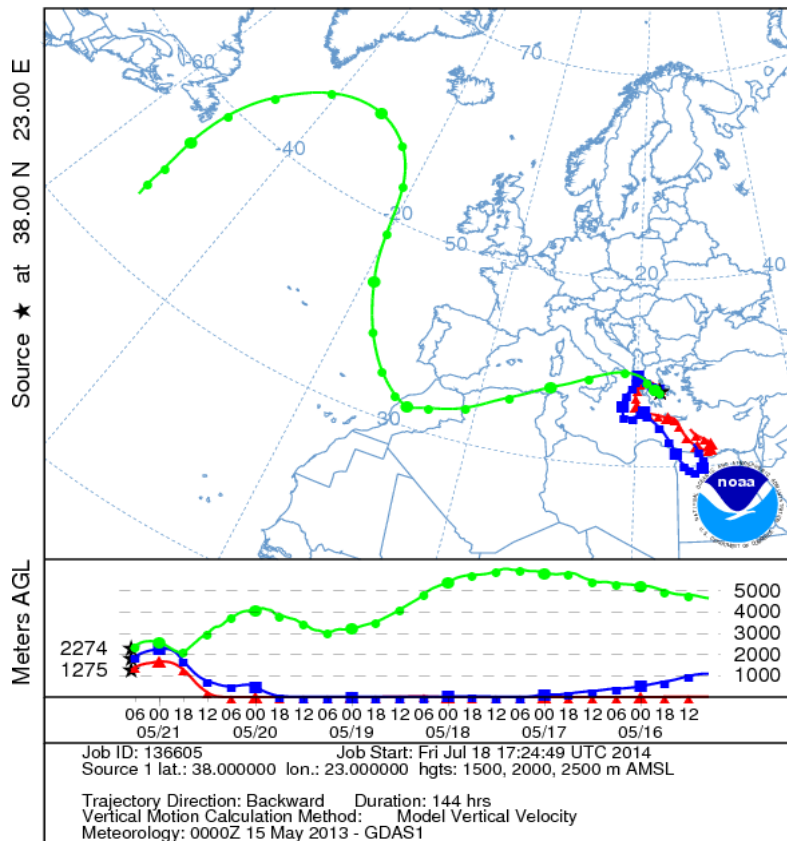
Η ανάλυση οπισθοτροχιών 4-ημερών των αερίων μαζών που κατέληξαν στην Αθήνα στις 20 Μαΐου (16:00 UTC), με χρήση του μοντέλου Hysplit, (Εικόνα 5.30) έδειξε ότι η κύρια προέλευση των σωματιδίων που ανιχνεύονται είναι η Δυτική-Βόρειο Δυτική περιοχή της ερήμου Σαχάρας της Αφρικής, που καθιστά εμφανή τη μεταφορά σκόνης σε διάφορα επίπεδα ύψους από 1273 έως 2272 m. Ομοίως, στην Εικόνα 5.31 φαίνεται ότι οι αέριες μάζες που κατέληξαν πάνω από την ατμόσφαιρα της Αθήνας την επόμενη ημέρα (21 Μαΐου 2013 στις 7:00 UTC), είχαν προέλευση από την Βορειο-Δυτική έκταση της ερήμου Σαχάρας, σε ύψος 2274 m, αλλά και ανατολικότερα, από την περιοχή της Αιγύπτου, σε ύψος 1275 m, με το επεισόδιο μεταφοράς σκόνης στον Ελλαδικό χώρο να συνεχίζεται.

Το συγκεκριμένο επεισόδιο μεταφοράς σκόνης, χαρακτηρίστηκε ως το μεγαλύτερο σε διάρκεια για το έτος 2013, διάρκειας 5-ημερών (19-23 Μαΐου) όπου οι καταγραφείσες μέσες ημερήσιες τιμές συγκέντρωσης των PM₁₀ κυμάνθηκαν από 50 έως 80 μg/m³, τιμές πάνω από επιτρεπτό όριο των 50 μg/m³, σύμφωνα μάλιστα και με το αντίστοιχο δελτίο της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (EMY) (http://www.hnms.gr/hnms/greek/significantDUST_2013_gr.pdf).



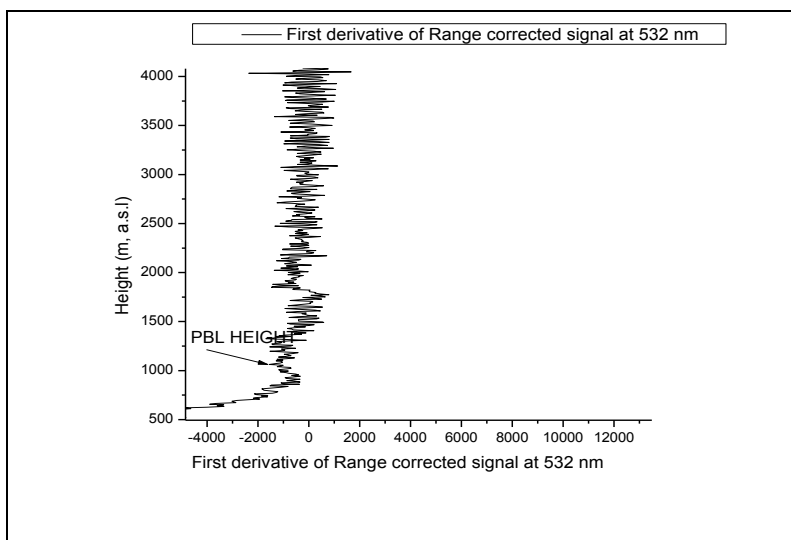
Εικόνα 5.30: Η ανάλυση οπισθοτροχιών 4-ημερών, από το μοντέλο Hysplit, για την προέλευση των σωματιδίων που ανιχνεύονται πάνω από την Αθήνα στις 20 Μαΐου 2013, στις 17:00 UTC σε διάφορα επίπεδα ύψους μεταξύ 1273 m και 2272 m.

NOAA HYSPLIT MODEL
 Backward trajectories ending at 0700 UTC 21 May 13
 GDAS Meteorological Data



Εικόνα 5.31: Η ανάλυση οπισθοτροχιών 5-ημερών, από το μοντέλο Hysplit, για την προέλευση των σωματιδίων που ανιχνεύονται πάνω από την Αθήνα στις 21 Μαΐου 2013, στις 7:00 UTC σε διάφορα επίπεδα ύψους μεταξύ 2274 m και 1275 m.

Ενδεικτικά στην Εικόνα 5.32 παραθέτουμε το γράφημα της πρώτης παραγώγου του σήματος lidar RCS στα 532 nm για τον υπολογισμό του ύψους του ΑΟΣ στις 20 Μαΐου 2013.



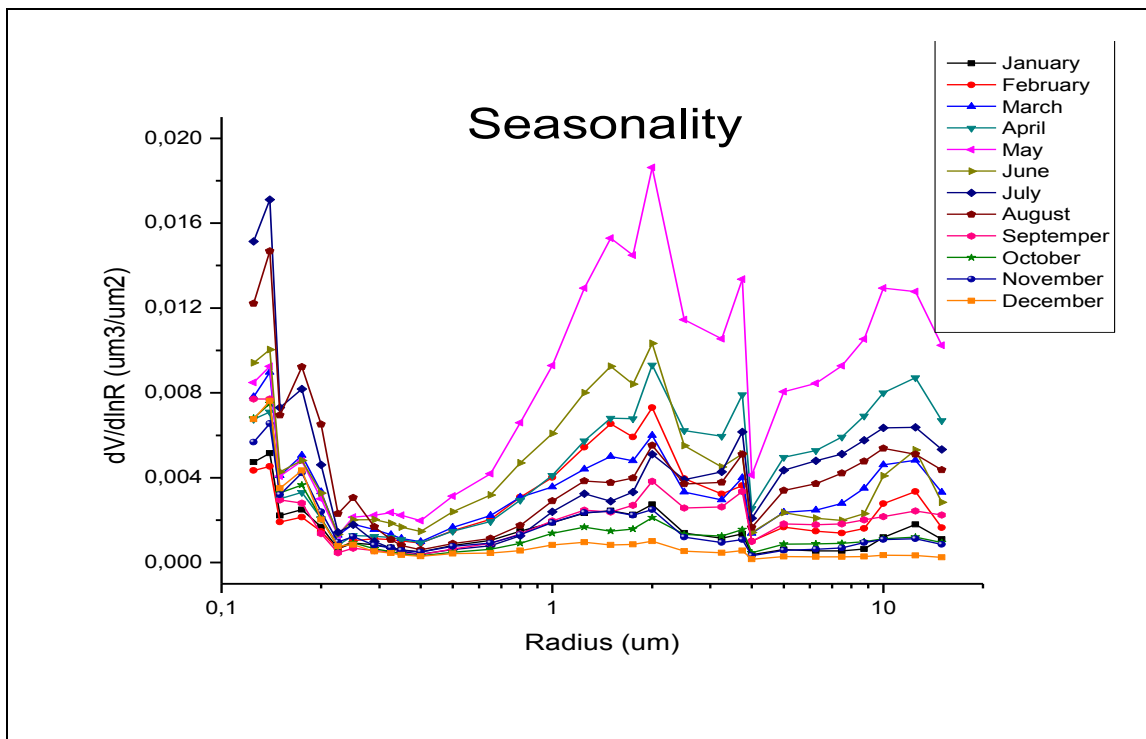
Εικόνα 5.32: Υπολογισμός του ύψους του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, μέσω της πρώτης παραγώγου, ως προς την απόσταση, του διορθωμένου σήματος LIDAR, στα 532 nm, στις 20 Μαΐου 2013, πάνω από την Αθήνα.

5.3. Μηνιαία και εποχιακή κατανομή μεγέθους σωματιδίων

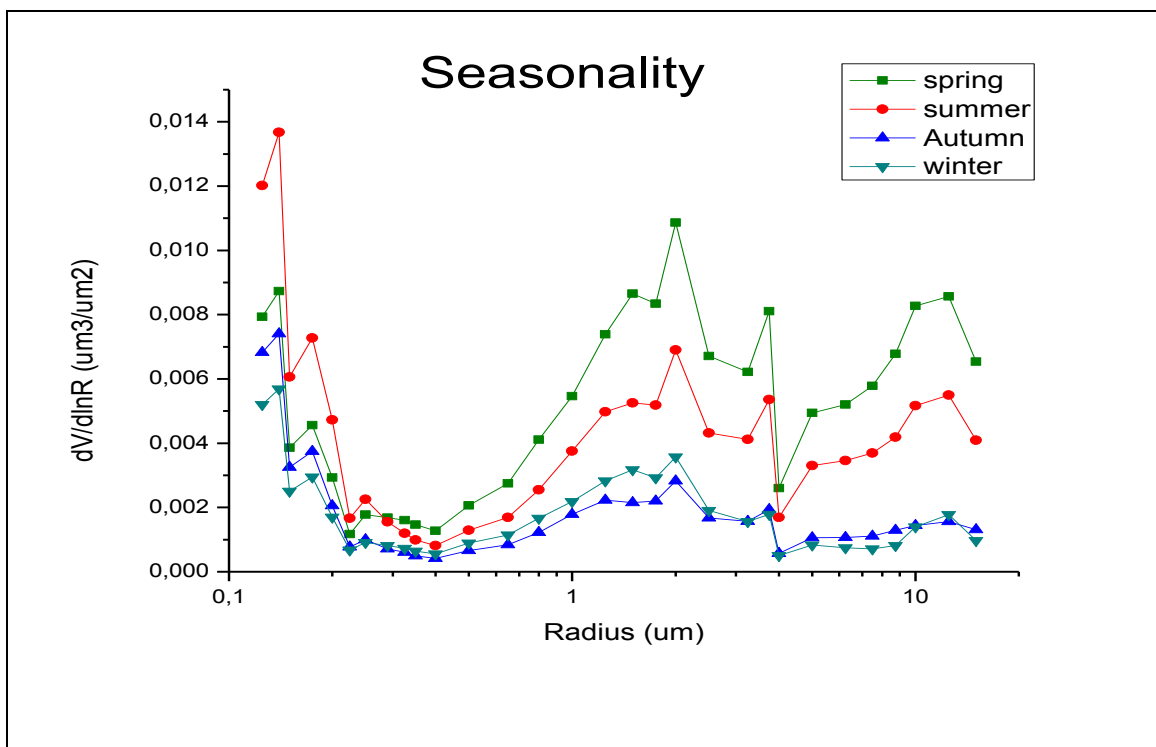
Η Ελλάδα ενσωμάτωσε την Ευρωπαϊκή Οδηγία για τα όρια της συγκέντρωσης των αερολυμάτων, μεταξύ άλλων ρύπων, και των αιωρούμενων σωματιδίων το 2002. Τα προβλεπόμενα όρια που θέτει η οδηγία είναι ο ημερήσιος μέσος όρος της συγκέντρωσης των αερολυμάτων να είναι μικρότερος ή ίσος με τα $50 \mu\text{g m}^{-3}$ και η τιμή αυτή να μην υπερβαίνεται περισσότερο από 35 ημέρες το χρόνο, ενώ ο ετήσιος μέσος όρος θα πρέπει να είναι μικρότερος ή ίσος με $20 - 28 \mu\text{g m}^{-3}$. Η Οδηγία τέθηκε σε ισχύ από την 01.01.2005. Σύμφωνα με τα δεδομένα του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Κλιματικής Αλλαγής (ΥΠΕΚΑ), από το 2005 ως το 2011 καταγράφεται συστηματική υπέρβαση και των δύο οριακών τιμών σε πλήθος σταθμών μέτρησης ρύπων του, στο Λεκανοπέδιο Αθηνών.

Θα ασχοληθούμε με τη μελέτη της μηνιαίας και εποχιακής κατανομής του μεγέθους των σωματιδίων όπως καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια του έτους 2013, από το GRIMM και το DUST TRACK. Τα δεδομένα αυτά τα κατηγοριοποιήσαμε ανά μήνα (Εικόνες 5.33 και 5.35) και στη συνέχεια και ανά εποχή (Εικόνες 5.34 και 5.36), ώστε να έχουμε μια συνολική εικόνα της διακύμανσης των αιωρούμενων σωματιδίων κατά τη διάρκεια του συγκεκριμένου έτους.

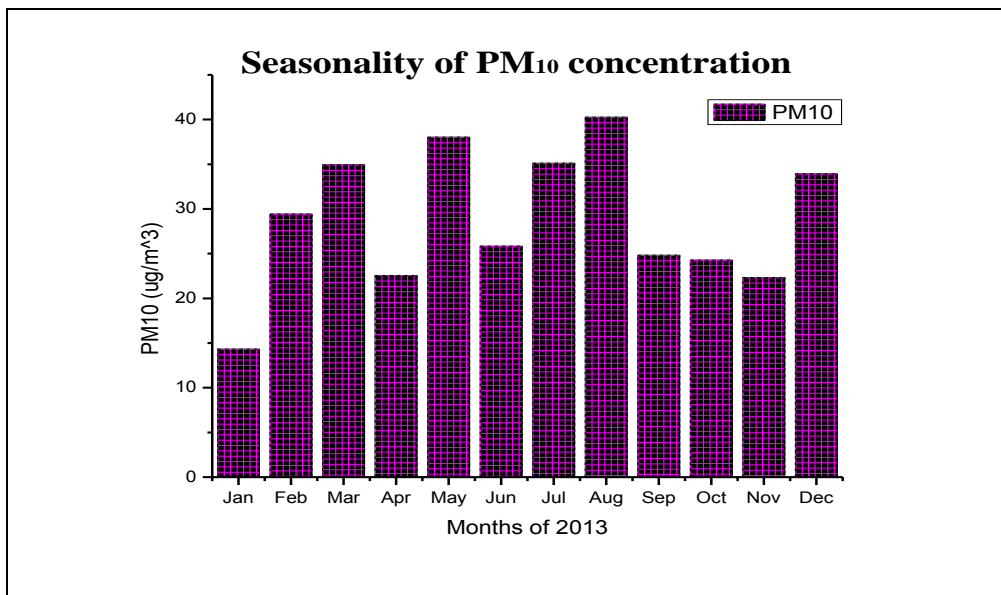
Παρατηρούμε στις εικόνες 5.33 έως και 5.36 πως την άνοιξη και το καλοκαίρι, προκύπτουν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων, κυρίως σε σωματίδια μεγαλύτερης διαμέτρου, γεγονός που δικαιολογείται κυρίως λόγω των επεισοδίων μεταφοράς σκόνης από την Αφρικανική ήπειρο, αλλά και λόγω μεταφοράς καπνού από πυρκαγιές που λαμβάνουν χώρα στον Ελλαδικό χώρο, αλλά και στην ευρύτερη περιοχή των Βαλκανίων, κυρίως κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Τους χειμερινούς και φθινοπωρινούς μήνες τα λεπτά σωματίδια υπερτερούν των χονδρών. Για το έτος 2013 ο Μάιος ήταν ο μήνας για τον οποίο η κατανομή μεγέθους σωματιδίων ήταν μεγαλύτερη, με τα χονδρά σωματίδια να κάνουν έντονα αισθητή την εμφάνισή τους. Οι φθινοπωρινοί μήνες καθώς και οι μήνες του χειμώνα, εμφανίζουν χαμηλότερες συγκεντρώσεις σωματιδίων. Ωστόσο όσον αφορά τις συγκεντρώσεις των PM_{10} , κυρίως για το μήνα Δεκέμβριο, χαρακτηρίζονται αυξημένες, λόγω του φαινομένου της καύσης βιομάζας στην Αθήνα που απελευθερώνει στην ατμόσφαιρα μεγάλες συγκεντρώσεις αυτής της κατηγορίας σωματιδίων.



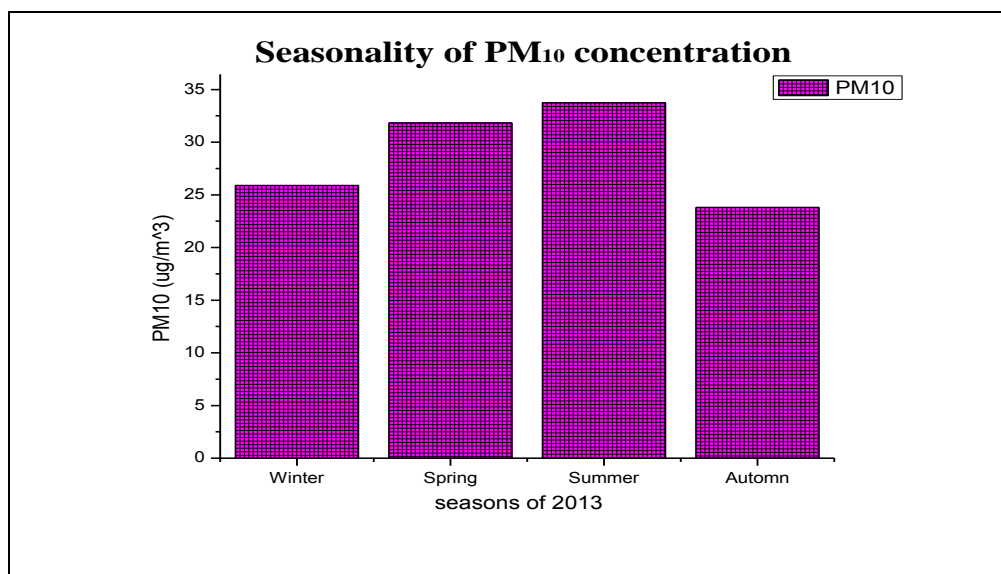
Εικόνα 5.33: Μηνιαία κατανομή μεγέθους σωματιδίων (particle size distribution) $dV/d\ln R$ σε $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$, συναρτήσει της ακτίνας (Radius) σε μm , σε ημιλογαριθμική κλίμακα, για το έτος 2013, όπως καταγράφηκε από το όργανο GRIMM, στην Αθήνα.



Εικόνα 5.34: Εποχιακή κατανομή μεγέθους σωματιδίων (particle size distribution) $dV/d\ln R$ σε $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$, συναρτήσει της ακτίνας (Radius) σε μm , σε ημιλογαριθμική κλίμακα, για το έτος 2013, όπως καταγράφηκε από το όργανο GRIMM, στην Αθήνα.



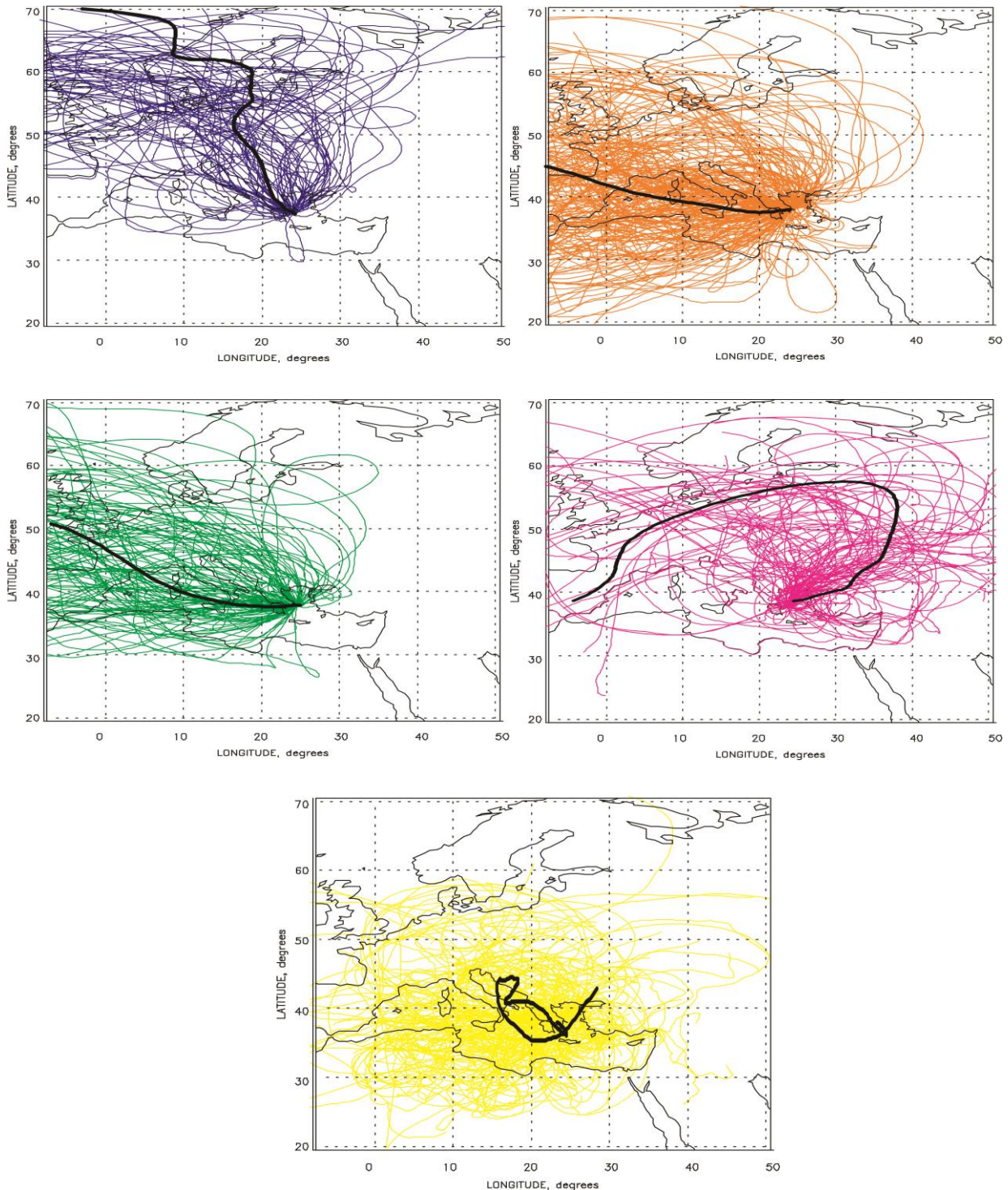
Εικόνα 5.35: Μηνιαίες τιμές συγκέντρωσης σωματιδίων PM10 (µg/m³) στην ατμόσφαιρα της Αθήνας, για το έτος 2013, όπως καταγράφηκαν από το όργανο DUST TRACK.



Εικόνα 5.36: Εποχιακές τιμές συγκέντρωσης σωματιδίων PM10 (µg/m³) στην ατμόσφαιρα της Αθήνας, για το έτος 2013, όπως καταγράφηκαν από το όργανο DUST TRACK.

Για τον προσδιορισμό της προέλευσης των αιωρούμενων σωματιδίων που καταφθάνουν πάνω από την περιοχή της Αθήνας, πραγματοποιήσαμε ανάλυση οπισθοτροχιών κατά συστάδες (cluster analysis) (Rozwadowska et al., 2010) από το Δεκέμβριο 2012 έως και το Δεκέμβριο 2013. Επιλέχθηκαν να παρουσιαστούν οι υπολογισμοί για το ύψος των 2500 m, μιας και το ύψος αυτό αντιπροσωπεύει καλύτερα τον διαχωρισμό μεταξύ ΑΟΣ και ελεύθερης τροπόσφαιρας. Έτσι, στην Εικόνα 5.37 παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση κατά συστάδες των οπισθοτροχιών 4-ημερών για τον προσδιορισμό των πιθανότερων πηγών ρύπανσης για την περιοχή της Αττικής κατά τη διάρκεια του έτους που μελετήσαμε (έτος 2013). Βορειοδυτικά, η

πιθανή πηγή προέλευσης είναι η Κεντρική Ευρώπη, με το ποσοστό των αερίων μαζών να είναι 13%, Νοτιοδυτικά η έρημος Σαχάρα και η δυτική Ευρώπη, με το ποσοστό συμμετοχής των αερίων μαζών στη διεύθυνση αυτή να είναι 11%. Επίσης, από τα δυτικά φτάνουν στην Αθήνα καθαρές θαλάσσιες μάζες σε ένα ποσοστό 32%, η βορειοανατολική προέλευση των αερίων μαζών είναι κυρίως από τις βαλκανικές χώρες, της τάξεως του 18% και τέλος, σε τοπικό επίπεδο, έχουμε τοπική και διασυνοριακή ρύπανση με το αντίστοιχο ποσοστό να φτάνει το 26%.



Εικόνα 5.37: Ανάλυση κατά συστάδες για την περιοχή της Αθήνας για το έτος 2013, βορειοδυτικά, νοτιοδυτικά, δυτικά, βορειοανατολικά και τοπική κυκλοφορία, στα 2500 m.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Η αναγκαιότητα συστηματικής παρακολούθησης, τόσο των επιπέδων, όσο και της σύστασης των αιωρούμενων σωματιδίων επισημαίνεται διεθνώς σε πολλές μελέτες και σχετικές δημοσιευμένες εργασίες τόσο για την αποσαφήνιση των ρόλων τους στην ποιότητα του αέρα και στις επιπτώσεις στην υγεία όσο και για την αποσαφήνιση του ρόλου που παίζουν στην Παγκόσμια Κλιματική Αλλαγή. Τα τελευταία χρόνια και στην Ελλάδα υπάρχει συντονισμένη δραστηριότητα στον τομέα αυτό, ενώ το ενδιαφέρον για τα αιωρούμενα σωματίδια είναι έντονο και με μεγάλο περιθώριο για περαιτέρω μελέτη και έρευνα τα επόμενα χρόνια.

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη της κατανομής μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων και η σύγκριση των αποτελεσμάτων μέσω των δεδομένων αφενός από το επίγειο όργανο μέτρησης, GRIMM, που ήταν τοποθετημένο στο κτίριο Φυσικής του ΕΜΠ και αφετέρου από το ηλιακό φωτόμετρο CIMEL του δικτύου AERONET. Τα δεδομένα του CIMEL ανακτήθηκαν από την ιστοσελίδα <http://aeronet.gsfc.nasa.gov> μέσω της οποίας το δίκτυο AERONET διαχέει τα αποτελέσματα στο διαδίκτυο. Επίσης, ανακτήθηκαν και παρουσιάστηκαν οι τιμές για το οπτικό πάχος και το συντελεστή Ångström, στα διάφορα μήκη κύματος καταγραφής του CIMEL, βοηθώντας έτσι την εξαγωγή συμπερασμάτων για το είδος και την προέλευση των αερολυμάτων. Επιπρόσθετα, το όργανο TSI DUST TRACK πραγματοποιούσε μετρήσεις από την ταράτσα του κτιρίου φυσικής και με τη βοήθεια του οποίου είχαμε τη δυνατότητα να παρακολουθούμε την εξέλιξη της συγκέντρωσης των σωματιδίων PM₁₀, στην περιοχή του Ζωγράφου.

Για να γίνει σαφές το νόημα και η αποτελεσματικότητα της σύγκρισης των κατανομών μέσω των δυο οργάνων, επιλέξαμε να παρουσιάσουμε δυο διαφορετικές περιπτώσεις: Η πρώτη περίπτωση αφορούσε καθαρή τοπική ρύπανση, με σωματίδια να υπάρχουν μόνον εντός του ΑΟΣ, ενώ η ελεύθερη τροπόσφαιρα ήταν απαλλαγμένη από σωματίδια και η δεύτερη περίπτωση περιλάμβανε μεταφορά σκόνης από απομακρυσμένη περιοχή (έρημος Σαχάρα).

Τα συμπεράσματα μας από τη μελέτη της πρώτης περίπτωσης, στις 11 Ιανουαρίου 2013, είναι πως το GRIMM και CIMEL συμφωνούν σε ικανοποιητικό βαθμό, όσον αφορά την κατανομή μεγέθους σωματιδίων. Τα λεπτά σωματίδια και στα δύο όργανα καταγραφής υπερτερούν έναντι των χονδρών, με τα αντίστοιχα μέγιστα να διαγράφονται ξεκάθαρα καθώς η απουσία αιωρούμενων σωματιδίων σε μια στενή περιοχή με τιμές μεγαλύτερες των 0.1 μm και μικρότερες των 1 μm συνθέτει αυτή τη bimodal κατανομή. Οι τιμές του AOT, του συντελεστή Ångström και της ενεργού ακτίνας σωματιδίων συμφωνούν επίσης στο γεγονός ότι τα λεπτά σωματίδια κυριαρχούν την ημέρα

εκείνη, ενώ το μοντέλο BSC DREAM δεν έχει καταγράψει κανένα επεισόδιο μεταφοράς σκόνης πάνω από τον Ελλαδικό χώρο. Τέλος και με τη βοήθεια του οργάνου DUST TRACK βλέπουμε πως η συγκέντρωση των σωματιδίων PM_{10} δε λαμβάνει μεγάλες τιμές και κυμαίνεται σχεδόν σε όλη τη διάρκεια του 24ώρου αρκετά χαμηλότερα του ορίου της συγκέντρωσης της κατηγορίας αυτής σωματιδίων, όπως έχει δοθεί από την ΕΕ για το έτος 2013.

Ωστόσο, άξιο αναφοράς είναι πως ο παράγοντας υγρασία, για τον οποίο δεν είχαμε ακριβή τιμή μέτρησης για την ημερομηνία εκείνη, δεν λαμβάνεται υπ' όψιν στις μετρήσεις που καταγράφονται από το GRIMM. Αυτό, καθώς και το γεγονός ότι οι μετρήσεις του GRIMM πραγματοποιούνται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, τις οποίες ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία τις «μεταφέρουμε» σε όλο το ύψος της ατμοσφαιρικής στήλης μέχρι το πέρας του ΑΟΣ, σε αντίθεση με το CIMEL που μετρά σε ολόκληρη την ατμοσφαιρική στήλη, είναι οι δυο βασικότεροι λόγοι για τις τυχόν παρατηρούμενες μικρές αποκλίσεις. Ύστερα από ανάλυση οπισθοτροχιών που καταφθάνουν στην Αθήνα, με τη βοήθεια του μοντέλου Hysplit έγινε φανερό πως οι μάζες αυτές έχουν κυρίως προέλευση την νοτιο-δυτική και δυτική Ευρώπη, με αφετηρία τον Ατλαντικό Ωκεανό.

Όσον αφορά τη δεύτερη περίπτωση, στις 20-21 Μαΐου 2013, παρατηρούμε αρχικά αυξημένη τιμή των χονδρών σωματιδίων, όπως είναι φανερό από τις τιμές του οπτικού πάχους, όπως καταγράφηκαν από το δίκτυο του AERONET και τις μικρές τιμές του συντελεστή Ångström, λόγω της αυξημένης συγκέντρωσης των χονδρών σωματιδίων που φανερώνουν μεταφορά σκόνης από απομακρυσμένη περιοχή. Παρατηρούνται αυξημένες συγκεντρώσεις σωματιδίων καθ' όλη τη διάρκεια του διημέρου, ενώ όσον αφορά τη χρονική εξέλιξη της κατακόρυφης κατανομής του διορθωμένου ως προς την απόσταση σήματος lidar στα 1064 nm (RCS), είναι αδιαμφισβήτητο το γεγονός της ύπαρξης μια επιπλέον στρωμάτωσης σωματιδίων, μετά το πέρας του ΑΟΣ, με μη τοπική πηγή προέλευσης. Σύμφωνα με την πρόγνωση που μας δίνει το BSC DREAM πρόκειται για σωματίδια σκόνης που μεταφέρθηκαν με τη βοήθεια των μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούσαν τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο, από τη έρημο Σαχάρα της Αφρικανικής ηπείρου.

Συγκρίνοντας, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, τις δύο κατανομές μεγέθους σωματιδίων βλέπουμε μια ταύτιση των κατανομών ως προς το εύρος των κορυφών, ωστόσο υπάρχει διαφοροποίηση στις τιμές, όπως είναι αναμενόμενο, με το AERONET να δίνει υψηλότερες τιμές καθώς μετρώντας σε ολόκληρη την ατμοσφαιρική στήλη, έχει συμπεριλάβει στην καταγραφή και τα σωματίδια που προέρχονται από το επεισόδιο μεταφοράς σκόνης, πάνω από το ΑΟΣ, ενώ στην κατανομή του GRIMM, περιλαμβάνονται μόνο τα σωματίδια στην επιφάνεια του εδάφους, που ύστερα από δική μας επεξεργασία, αφορούν τα σωματίδια που βρίσκονται μόνο εντός του ΑΟΣ.

Όσον αφορά τη συνολική εικόνα της ύπαρξης σωματιδίων σε χρονικό διάστημα ενός έτους, την άνοιξη και το καλοκαίρι, προκύπτουν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων, κυρίως σε σωματίδια μεγαλύτερης διαμέτρου, γεγονός που δικαιολογείται κυρίως λόγω των επεισοδίων μεταφοράς σκόνης από την Αφρικανική ήπειρο, αλλά και λόγω μεταφοράς καπνού από καύση βιομάζας που λαμβάνουν χώρα στον Ελλαδικό χώρο αλλά και στα Βαλκάνια, τους καλοκαιρινούς κυρίως μήνες, με τις υψηλότερες τιμές να καταγράφονται το Μάιο και τις χαμηλότερες τον Ιανουάριο. Ωστόσο λόγω του φαινομένου της καύσης βιομάζας κατά το χειμώνα στην Αθήνα, ο μήνας Δεκέμβριος φαίνεται να έχει αυξημένες συγκεντρώσεις σωματιδίων PM_{10} , σε σχέση με τους υπόλοιπους μήνες, στο χρονικό διάστημα από τις αρχές του φθινοπώρου έως το τέλος του χειμώνα.

Τέλος, αναλύοντας τις πηγές προέλευσης των αιωρούμενων σωματιδίων στην ελεύθερη τροπόσφαιρα (~2500 m) είδαμε ότι αυτές ποικίλουν ανάλογα με τη διεύθυνση προέλευσης των αερίων μαζών, σύμφωνα με την ανάλυση κατά συστάδες των αερίων μαζών, με κύριες πηγές προέλευσης την κεντρική και δυτική Ευρώπη, τα Βαλκάνια τη Μεσόγειο και την έρημο Σαχάρα κατά τη διάρκεια του έτους 2013.

Λόγω των υψηλών συγκεντρώσεων σωματιδίων που καταγράφονται κατά το έτος 2013, κρίνουμε απαραίτητο να συνεχισθεί η λήψη και ανάλυση παρόμοιων μετρήσεων κατά τα επόμενα έτη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Dubovik O. and M. King, A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements, *Journal of Geophysical Research*, **105**, D16, 20673-20696, 2000.

Dubovik, O., A. Sinyuk, T. Lapyonok, B. Holben, M. Mishchenko, P. Yang, T. F. Eck, H. Volten, O. Muñoz, B. Veihelmann, W. J. van der Zande, J.-F. Leon, M. Sorokin, I. Slutsker, Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust, *Journal of Geophysical Research*, **111**, D11208, doi:10.1029/2005JD006619, 2006.

Dubovik, O., B. N. Holben, T. Lapyonok, A. Sinyuk, M. I. Mishchenko, P. Yang, and I. Slutsker, Non-spherical aerosol retrieval method employing light scattering by spheroids, *Geophysical Research Letters*, **29**, 10.1029/2001/GL014506, 2002.

Finlayson-Pitts, B. J., and J. N. Jr., Pitts, *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere*, Academic Press, 2000.

Formenti, P., Andreae, M.O., Andreae, T.W., Ichoku, C., Schebeske, G., Kettle, J., Maenhaut, W., Cafmeyer, J., Ptasinsky, J., Karnieli, A. and Lelieveld, J. (2001). Physical and chemical characteristics of aerosols over the Negev Desert (Israel) during summer 1996. *Journal of Geophysical Research* 106. doi: 10.1029/2000JD900556. issn: 0148-0227.

Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Berntsen T., Betts R., Fahey D.W., Haywood J., Lean J., Lowe D.C., Myhre G., Nganga J., Prinn R., Raga G., Schulz M., Van Dorland R., *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2007

Kathmann, S. M., The impact of Molecular interactions on Atmospheric Aerosol Radiative Forcing. *Advances in Quantum Chemistry*, Schenter G.K., 2008, ISSN 0065-3276.

Kokhanovsky, A., *Aerosol Optics: Light Absorption and Scattering by Particles in the Atmosphere*, Springer, New York, 2007.

Lazaridis, M., M. Latos, V. Aleksandropoulou, H. Hov, A. Papayannis, and K. Torseth, Contribution of forest fire emissions to atmospheric pollution in Greece, *Air Quality, Atmosphere and Health*, **1**, 143–158, 2008.

Lyamani, H. F., J. Olmo, and L. Alados-Arboledas Light scattering and absorption properties of aerosol particles in the urban environment of Granada, Spain, *Atmospheric Environment*, **42**, 2630–2642, 2008.

Lyamani H. F., J. Olmo, and L. Alados-Arboledas, Physical and optical properties of aerosols over urban variability, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 239–254, Granada, Spain, 2010.

Newsom, R. K., Turner D. D., Mielke B., Clayton M., Ferrare R. and Sivaraman Chitra, Simultaneous analog and photon counting detection for Raman lidar, *Appl. Opt.*, 48, 20, 3903-3914, 2009.

Papayannis, A., R. E. Mamouri, P. Kokkalis, V. Amiridis, N. I. Kristiansen, A. Stohl, D. Balis, E. Giannakaki, D. Nicolae, G. Tsaknakis, L. Belegante, A. Nemuc, I. Veselovskii, M. Korenskiy, K. Allakhverdiev, M. F. Huseyinoglu and T. Baykara, Optical properties and vertical extension of ash layers over the Eastern Mediterranean as observed by Raman lidars during the Eyjafjallajökull eruption (May 2010), *Atmospheric Environment (Special Issue)*, **48**, 56-65, 2012.

Paterson K. “CE532 Air Particulate Laboratory: Analysis of second hand smoke, Types of air particulate, Representativy sizes of Air Particulate” www.bic.ac.civil.mtu.edu/public_html/classes/cd352/labs/particulates.html Firt prototype internet laboratory of the MTU Enviroment Course Ware Series, 1995.

Petroff A., A. Mailliat, M. Amielh, F. Anselmet, Aerosol dry deposition on vegetative canopies. Part II: A new modelling approach and applications, *Atmospheric Environment*, 42 (2008) 3654–3683.

Prats, N., Cachorro V.E., A. Berjon, C. Toledano, and A. M. De Frutos, Column-integrated aerosol microphysical properties from AERONET Sun photometer over Southwestern Spain, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **11**, 12535–12547, 2011.

Rozwadowska A., Zielinski T., Petelski T., and Sobolewski P., Cluster analysis of the impact of air back-trajectories on aerosoloptical properties at Hornsund, Spitsbergen, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 877–893, 2010

Siegman Anthony E. “LASERS”, University Sience Books, 1986, ISBN 0-935702-11-3

Seinfeld J.H., and S. Pandis S. «Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change», 2nd Edition John Wiley, New York, 2006.

TSI Inc., “Aerosol Statistics Lognormal Distributions and dN/dlogDp”, Application Note PR-001, Copyright © 2010 by TSI Incorporated, 2010.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Γεντεκάκης Ι., «ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ: Επιπτώσεις, Έλεγχος & Εναλλακτικές Τεχνολογίες», 2η Βελτιωμένη Έκδοση. Ι. Γεντεκάκης, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα, 2010.

Καλυβίτης Ν., «Φυσικές ιδιότητες αιωρούμενων σωματιδίων με κλιματικό ενδιαφέρον στην ατμόσφαιρα της Ανατολικής Μεσογείου», Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Κρήτης, 2008.

Λαζαρίδης Μ., «Ατμοσφαιρική ρύπανση με στοιχεία μετεωρολογίας», εκδόσεις Τζιόλα, 2010, ISBN 960-8050-01-4.

Μακροπούλου Μ. και Α. Παπαγιάννης, «Εφαρμογές των Lasers στη Βιοιατρική και το Περιβάλλον», Εκδόσεις ΕΜΠ, 2014.

Μελάς, Δ., Ασωνίτης, Γ. και Αμοιρίδης, Β., «Κλιματική Αλλαγή (Οδηγός Εκπαιδευτικών)». Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων, Διεύθυνση Σπουδών Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης. Ανάπτυξη Εκπαιδευτικού Υλικού για την Περιβαλλοντική Εκπαίδευση, 2000.

Παπαγιάννης Α., “Φυσική Περιβάλλοντος”, Εκδόσεις ΕΜΠ, 2014.

Διαδικτυακές Αναφορές :

- 1) <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>
- 2) www.bsc.esearth-sciences/mineral-dust-forecast-system/bsc-dream8b-forecast
- 3) <http://www.econews.gr/>
- 4) <http://www.keepthecityout.co.uk/>
- 5) <http://www.nasa.gov/>
- 6) <http://www.physics.ntua.gr/~papayannis/>
- 7) <http://ready.arl.noaa.gov/hypub-bin/trajasrc.pl>
- 8) (http://www.tsi.com/uploadedFiles/Site_Root/Products/Literature/Application_Notes/PR-001-RevA_Aerosol-Statistics-AppNote.pdf)

Φωτογραφία εξωφύλλου :

“Portrait of Global Aerosols”:

http://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_2393.html