



Τομέας Φυσικής Περιβάλλοντος και Μετεωρολογίας

Τμήμα Φυσικής

Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ  
ΦΥΣΙΚΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ  
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Μελέτη της κατακόρυφης κατανομής των  
αιωρούμενων σωματιδίων στην περιοχή της  
Ινδίας με τη χρήση τηλεπισκόπησης Lidar**

Λάλος Κωνσταντίνος (ΑΜ: 201751)

*Τριμελής Επιτροπή:*

*Λεκτ. Γιαννακάκη Ελένη (επιβλέπουσα)*

*Καθ. Φλόκα Έλενα*

*Prof. Adj. Komppula Mika*

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2019

## Ευχαριστίες

Η πραγματοποίηση της διπλωματικής εργασίας είναι αποτέλεσμα εντατικής προσωπικής προσπάθειας αλλά εν μέρει στηρίχθηκα από πολλούς ανθρώπους τους οποίους επιθυμώ να ευχαριστήσω.

Καταρχάς, θέλω να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια μου κα. Ελίνα Γιαννακάκη η οποία με επιμονή και υπομονή με στήριξε με τις γνώσεις της και με τις εύστοχες παρατηρήσεις της σε όλη την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας, παρά τις δυσκολίες που αντιμετώπισα ήταν πάντοτε πρόθυμη να με βοηθήσει παρόλο το επιβαρυνμένο της πρόγραμμα.

Επιπρόσθετα θέλω να ευχαριστήσω την καθηγήτρια κ. Έλενα Φλόκα για την συμπαράστασή της.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τον Dr. Mika Komppula, ο οποίος μου παραχώρησε τα δεδομένα του lidar από την πειραματική εκστρατεία.

Στο σημείο αυτό θέλω να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του Μεταπτυχιακού προγράμματος που διεύρυναν τους γνωστικούς μου ορίζοντες. Επίσης οφείλω να αναγνωρίσω την προθυμία και την ευγένεια της κ. Ελευθερίας Μουτζίκη.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω και στους συμφοιτητές μου που συνεργαστήκαμε σε όλη την κοινή μας πορεία.

Τέλος θέλω να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου που μου προσφέρουν ανιδιοτελώς την συμπαράστασή τους, προκειμένου να πραγματοποιήσω τους στόχους μου.

## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η στατιστική ανάλυση των δεδομένων που προέκυψαν με την χρήση του πολυφασματικού (3+2) Raman Lidar στην περιοχή του Gual Pahari (28.43 deg N, 77.15 deg E), στην Ινδία την χρονική περίοδο από τον Μάρτιο 2008 μέχρι τον Μάρτιο 2009, για τα 767 στρώματα που εντοπίστηκαν στην ελεύθερη τροπόσφαιρα. Οι μετρήσεις χωρίστηκαν σε 4 εποχικές περιόδους, Προ-Μουσωνική (Μάρτιος-Μάιος), Μουσωνική (Ιούνιος-Σεπτέμβριος), Μετά-Μουσωνική (Οκτώβριος-Νοέμβρης) και Ξηρή Εποχή (Δεκέμβρης- Φλεβάρης). Οι μέσες τιμές καθώς και οι τυπικές αποκλίσεις του Lidar Ratio στα 355nm είναι  $49\pm 13$ ,  $57\pm 22$ ,  $37\pm 19$  και  $50\pm 20$  sr αντίστοιχα για τις προαναφερθείσες περιόδους. Οι μέσες τιμές καθώς και οι τυπικές αποκλίσεις του Angstrom Exponent ext 355 to ext 532nm είναι  $1.2\pm 0.5$ ,  $1.0\pm 0.6$  και  $1.6\pm 0.7$  για την Προ-Μουσωνική, Μουσωνική και Ξηρή Εποχή με εξαίρεση την Μετά-Μουσωνική περίοδο όπου δεν καταγράφηκαν μετρήσεις. Επιπρόσθετα οι μετρήσεις χωρίστηκαν οπτικά σε 6 τομείς προέλευσης των αερίων μαζών, με την βοήθεια του μετεωρολογικού μοντέλου HYSPLIT, Δυτικός τομέας κοντινής μεταφοράς, Δυτικός τομέας μακρινής μεταφοράς, Νοτιοδυτικός τομέας κοντινής μεταφοράς, Νοτιοδυτικός τομέας μακρινής μεταφοράς, Νότιος και Νοτιοανατολικός, Βόρειος και Βορειοανατολικός. Οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις του Lidar Ratio στα 355nm είναι  $44\pm 14$ ,  $45\pm 12$ ,  $50\pm 18$ ,  $47\pm 9$ ,  $63\pm 21$ ,  $49\pm 14$  sr καθώς και του Angstrom Exponent ext 355 to ext 532nm είναι  $1.5\pm 0.6$ ,  $1.5\pm 0.4$ ,  $1.2\pm 0.7$ ,  $1.4\pm 0.4$ ,  $1.2\pm 0.5$  και  $0.8\pm 0.6$  αντίστοιχα για τους προαναφερθέντες τομείς. Η αξιοποίηση του μετεωρολογικού μοντέλου HYSPLIT, σε συνδυασμό με τα δεδομένα από το όργανο MODIS, οδήγησε στον εντοπισμό 5 κύριων κατηγοριών σωματιδίων: σκόνη-καπνός, καπνός, αναμειγμένα σωματίδια, ηπειρωτικά ρυπασμένα και σωματίδια σκόνης με ποσοστά εμφάνισης 29%, 27%, 23%, 13% και 8%. Τα αιωρούμενα σωματίδια εξετάστηκαν τόσο ως προς τις γεωμετρικές όσο και τις οπτικές τους ιδιότητες.

Λέξεις Κλειδιά: Ινδία, Raman Lidar, Είδος σωματιδίων, Ανάλυση ανα τομείς

## Abstract

The purpose of this study is the statistical analysis of data derived from the use of multi-wavelength (3+2) Raman Lidar in the area of Gual Pahari (28.43 deg N, 77.15 deg E), in India during the period from March 2008 to March 2009, concerning the 767 layers that were observed in the free troposphere. The measurements were divided in four seasonal periods, Premonsoon (March-May), Monsoon (June-September), Postmonsoon (October-November) and Dry Season (December-February). The mean values and the standard deviations of Lidar Ratio in 355nm are  $49\pm 13$ ,  $57\pm 22$ ,  $37\pm 19$  και  $50\pm 20$  sr respectively for the above mentioned seasonal periods. The mean values and the standard deviations of Angstrom Exponent ext 355 to ext 532nm are  $1.2\pm 0.5$ ,  $1.0\pm 0.6$  και  $1.6\pm 0.7$  for the Premonsoon, Monsoon and Dry Season, with the exception of Postmonsoon where no measurements were recorded. In addition, the measurements were divided optically in 6 sections of origin of aerial masses with the use of meteorological model HYSPLIT, West Short Range Transport, West Long Range Transport, SouthSouthWest Short Range Transport, SouthSouthWest Long Range Transport, South & SouthEast, North & NorthEast. The mean values and the standard deviations of Lidar Ratio at 355nm are  $44\pm 14$ ,  $45\pm 12$ ,  $50\pm 18$ ,  $47\pm 9$ ,  $63\pm 21$ ,  $49\pm 14$  sr while those of Angstrom Exponent ext 355 to ext 532nm are  $1.5\pm 0.6$ ,  $1.5\pm 0.4$ ,  $1.2\pm 0.7$ ,  $1.4\pm 0.4$ ,  $1.2\pm 0.5$  και  $0.8\pm 0.6$  for the aforementioned sections. Lastly, the use of meteorological model HYSPLIT in combination with the data from the MODIS instrument, led to the detection of 5 primary particle types: Dustsmoke, Smoke, Mixture, Continental Polluted and Dust with occurrence percentages of 29%, 27%, 23%, 13% and 8% respectively. The geometrical and optical properties of these aerosol types are examined in this study.

Key words: India, Raman Lidar, Aerosol Type, Section analysis

# Περιεχόμενα

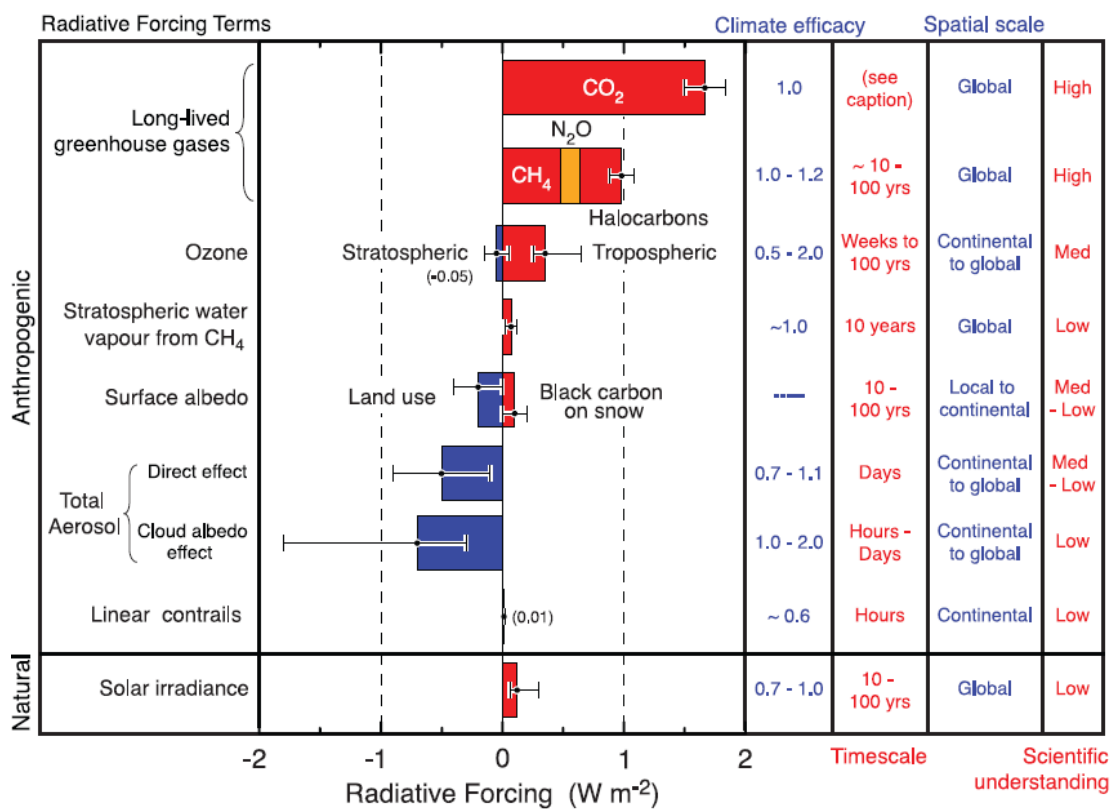
<b>1 Εισαγωγή.....</b>	<b>7</b>
<b>2 Μεθοδολογία.....</b>	<b>9</b>
2.1. Αρχή λειτουργίας της διάταξης Lidar.....	9
2.2. Συστήματα Lidar και τύποι συστημάτων Lidar.....	10
2.3 Lidar τύπου Polly XT.....	11
2.4 Εξισώσεις Lidar και οπτικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων.....	12
2.4.1. Εξισώσεις Lidar.....	13
2.4.2 Συντελεστής εξασθένισης.....	13
2.4.3. Συντελεστής οπισθοσκέδασης	
α. Μέθοδος Raman .....	14
β. Μέθοδος Klett.....	14
2.4.4. Λόγος Lidar.....	15
2.4.5. Εκθέτης Ångström.....	15
2.5. Συμπληρωματικές πηγές δεδομένων	
2.5.1.Το μετεωρολογικό μοντέλο HYSPLIT.....	16
2.5.2 Το όργανο MODIS.....	16
2.6. Σταθμός μετρήσεων Lidar.....	17
<b>3. Επεξεργασία και Στατιστική Ανάλυση των δεδομένων.....</b>	<b>19</b>
3.1. Εύρεση των γεωμετρικών και οπτικών ιδιοτήτων των στρωμάτων όλης της ατμοσφαιρικής στήλης μέσω του επιστρεφόμενου σήματος.....	19
3.2. Διαχωρισμός των στρωμάτων της ελεύθερης τροπόσφαιρας από τα στρώματα του οριακού στρώματος.....	21
3.3. Στατιστική Ανάλυση της ετήσιας διακύμανσης των γεωμετρικών και οπτικών ιδιοτήτων .....	26
3.4. Εποχική Ανάλυση των γεωμετρικών και οπτικών ιδιοτήτων .....	33
3.5 Στατιστική Ανάλυση των γεωμετρικών και οπτικών ιδιοτήτων με βάση την κατευθυντικότητα των οπισθοτροχιών.....	38
3.6. Ανάλυση των γεωμετρικών και οπτικών ιδιοτήτων για τα διαφορετικά είδη σωματιδίων που καταγράφονται στην περιοχή μελέτης.....	45
<b>4. Συμπεράσματα- Συζήτηση.....</b>	<b>58</b>

## **Παραρτήματα**

A. Κατάλογος σχημάτων .....	61
B. Κατάλογος πινάκων.....	64
Γ .Αγγλικοί όροι.....	65
Δ. Συντομογραφίες όρων.....	67
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>68</b>

# 1 Εισαγωγή

Η επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων στην παγκόσμια κλιματική διακύμανση είναι σημαντική είτε η προέλευση τους είναι φυσική είτε ανθρωπογενής [IPCC,2013]. Η ισορροπία του κλίματος επηρεάζεται και καθορίζεται από το ισοζύγιο της ηλιακής ενέργειας και από την εκπεμπόμενη και ανακλώμενη προς τα πίσω γήινη ακτινοβολία [Penner et al., 2001, Haywood and Boucher,2000]. Η αβεβαιότητα ως προς τις άμεσες και έμμεσες επιδράσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στο κλίμα, σε σχέση με την κλιματική επίδραση των θερμοκηπικών αερίων είναι ακόμη μεγάλη [IPCC, 2007]. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται το μέσο ισοζύγιο της ακτινοβολίας του κλιματικού συστήματος το 2005, σε σχέση με αυτό του 1750 ως αποτέλεσμα της συνεισφοράς διαφόρων συστατικών της ατμόσφαιρας. Το ενδιαφέρον εστιάζεται στο χαμηλό επίπεδο επιστημονικής κατανόησης που προκαλούν τα αιωρούμενα σωματίδια στο ενεργειακό ισοζύγιο και αποτυπώνεται στην τελευταία δεξιά στήλη του Σχήματος με τον χαρακτηρισμό χαμηλό (Low Scientific understanding). Τα αιωρούμενα σωματίδια μέσω της σκέδασης της ηλιακής ακτινοβολίας προς το διάστημα προκαλούν την ψύξη της ατμόσφαιρας, αντίθετα μέσω της απορρόφησης της ηλιακής ενέργειας προκαλούν την θέρμανση της ατμόσφαιρας.



**Σχήμα 1:** Μέση επίδραση στο ισοζύγιο ακτινοβολίας του κλιματικού συστήματος το 2005,συγκριτικά με αυτό του 1750 [IPCC,2007].

Η ακριβής κατανόηση της επίδρασης των αιωρούμενων σωματιδίων στο κλίμα προϋποθέτει την εύρεση της χωρικής και χρονικής τους κατανομής καθώς και τον προσδιορισμό των γεωμετρικών και οπτικών τους ιδιοτήτων [Hsu et al., 2000], ο παραπάνω στόχος καλύπτεται με τα όργανα lidar.

Τα επίγεια συστήματα lidar μπορούν να παρέχουν τα προφίλ της κατακόρυφης κατανομής των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Τα συστήματα ελαστικής οπισθοσκέδασης με την χρήση κρίσιμων υποθέσεων για συγκεκριμένες ατμοσφαιρικές παραμέτρους μπορούν να δώσουν ποσοτική πληροφορία για την ύπαρξη ατμοσφαιρικών στρωμάτων [Fernald 1984; Klett 1981]. Βελτιωμένα παρουσιάζονται τα συστήματα που βασίζονται στην ανελαστική σκέδαση από τα μόρια της ατμόσφαιρας, καθώς αποδεικνύονται χρήσιμα τόσο ως προς την ποιοτική όσο και ως προς την ποσοτική μελέτη της κατακόρυφης κατανομής των αιωρούμενων σωματιδίων. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα είναι ο ανεξάρτητος προσδιορισμός της κατακόρυφης κατανομής του συντελεστή εξασθένησης (extinction coefficient) και του συντελεστή οπισθοσκέδασης (backscatter coefficient). Ο λόγος του συντελεστή εξασθένησης προς τον συντελεστή οπισθοσκέδασης γνωστός και ο λόγος lidar (lidar ratio) αποτελεί μια σημαντική παράμετρο μιας και εξαρτάται από το μέγεθος, το σχήμα και την χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων [Ferrare et al., 2001, Franke et al., 2001, Müller et al, 2007]. Συνεπώς η παρουσία, η έκταση και η ανάπτυξη των κατακόρυφων δομών των στρωματώσεων παρέχεται χάρις τις μετρήσεις των οπτικών ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων με μεγάλη χωρική και χρονική ανάλυση.



## 2 Μεθοδολογία

Ο όρος lidar προέρχεται από την αγγλική ορολογία « light detection and ranging» και αναφέρεται σε ένα όργανο που μελετά το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με τα συστατικά της ατμόσφαιρας. Η τεχνική lidar στηρίζεται στην εκπομπή ενός παλμού μονοχρωματικής ακτινοβολίας laser, στην μέτρηση της επανασκεδαζόμενης ακτινοβολίας από τα μόρια και τα σωματίδια της ατμόσφαιρας και στην καταγραφή του χρόνου ανάμεσα στην εκπομπή και στην λήψη , η οποία αντιστοιχεί στην απόσταση των σκεδαστών από την πηγή laser.

### 2.1. Αρχή λειτουργίας της διάταξης Lidar

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το φορητό σύστημα Raman lidar POLLY<sup>XT</sup> (POrtable Lidar sYstem eXTended) το οποίο πραγματοποιεί αυτοματοποιημένες μετρήσεις. Οι φυσικές διεργασίες που αποτελούν την βάση για την ανάπτυξη του συστήματος lidar είναι η σκέδαση Rayleigh και η σκέδαση Mie και Raman.

Η σκέδαση Rayleigh αναφέρεται ως η ελαστική σκέδαση από σωματίδια που είναι σχετικά μικρά συγκρινόμενα με το μήκος κύματος της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας ως επακόλουθο αναφέρεται ως σκέδαση από τα μόρια της ατμόσφαιρας. Λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης των μορίων του αζώτου και του οξυγόνου στην ατμόσφαιρα, συγκεκριμένα σε ποσοστό 99%, μπορούμε να τα θεωρήσουμε ως τις κύριες πηγές σκέδασης Rayleigh. Σημαντικό είναι να τονισθεί το γεγονός ότι στην ελαστική σκέδαση Rayleigh η αλληλεπίδραση της μονοχρωματικής ακτινοβολίας με τα μόρια της ατμόσφαιρας δεν προκαλεί αλλαγή στην κβαντική τους κατάσταση , δηλαδή η ενέργεια της ταλάντωσης και η ενέργεια της δόνησης παραμένουν σταθερές, στοιχείο που διαφοροποιεί την ελαστική από την μη- ελαστική σκέδαση Raman που θα εξετασθεί μετέπειτα.

Η σκέδαση Mie μας δίνει την αναλυτική επίλυση της σκέδασης της ακτινοβολίας οποιουδήποτε μήκους κύματος από μια σφαίρα οποιασδήποτε ακτίνας και με οποιοδήποτε μιγαδικό δείκτη διάθλασης, συνεπώς η σκέδαση Mie δεν περιορίζεται σε ένα συγκεκριμένο μέγεθος σκεδαστών μιας και περιλαμβάνει και την σκέδαση Rayleigh. Εντούτοις ο όρος χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις που περιγράφεται η σκέδαση από σωματίδια με μέγεθος συγκρινόμενο με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας ή και μεγαλύτερα. Η φασματική εξάρτηση του σκεδαζόμενου φωτός εξαρτάται από την ακτίνα του σωματιδίου, το μήκος κύματος και τον μιγαδικό δείκτη διάθλασης και χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες που σχετίζονται με το μέγεθος του σωματιδίου. Στην περίπτωση των μικρών σωματιδίων (Rayleigh) η εξάρτηση είναι αντιστρόφως ανάλογη της τέταρτης δύναμης του μήκους κύματος, στην περίπτωση των πολύ μεγάλων σωματιδίων η σκέδαση δεν εξαρτάται από το μήκος κύματος της

ακτινοβολίας και τέλος στην περίπτωση που το μέγεθος των σωματιδίων και η τάξη μεγέθους της ακτινοβολίας είναι παρόμοιες, η φασματική εξάρτηση της έντασης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας ποικίλει. Η φασματική εξάρτηση της έντασης του σκεδαζόμενου φωτός βρίσκει χρήση στον καθορισμό του μεγέθους και άλλων παραμέτρων των ατμοσφαιρικών συστατικών για σωματίδια από 50nm μέχρι μερικά μm. Προκειμένου να επιτευχθεί ο προσδιορισμός των παραμέτρων είναι απαραίτητη η εκπομπή διαφόρων μηκών κύματος καθώς και ο ανεξάρτητος προσδιορισμός των συντελεστών οπισθοσκέδασης και εξασθένησης. Το πρόβλημα της θεωρίας Mie είναι πως περιγράφει την σκέδαση από σωματίδια που είναι σφαιρικά κάτι που αποτελεί μια εξιδανίκευση στην περίπτωση των σωματιδίων της ατμόσφαιρας, εξαίρεση αποτελούν τα σωματίδια που είναι μικρά συγκρινόμενα με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που αλληλεπιδρούν, όπου το σχήμα τους δεν επηρεάζει την σκεδαζόμενη δέσμη. Στις περιπτώσεις που τα σωματίδια είναι μεγάλα και μη σφαιρικά, όπως είναι οι παγοκρύσταλλοι, τα θαλάσσια σωματίδια, τα ηπειρωτικά και τα ερημικά σωματίδια δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την θεωρία του Mie. Τα συστήματα lidar που στηρίζονται στην θεωρία Rayleigh-Mie ονομάζονται lidar ελαστικής οπισθοσκέδασης και αποτελούν την συνηθέστερη μορφή lidar [Kovalev et al., 2004].

Η σκέδαση Raman αναφέρεται στην αλλαγή της ενέργειας ταλάντωσης-δόνησης του μορίου κατά την ανελαστική σκέδαση. Η αλλαγή στην συχνότητα της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας αντιστοιχεί στην ενεργειακή διαφορά μεταξύ της αρχικής και τελικής κατάστασης του μορίου και επομένως είναι συγκεκριμένη για κάθε μόριο. Χρησιμοποιώντας ως βάση την φασματική ανάλυση της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας ανιχνεύουμε ένα πλήθος ατμοσφαιρικών συστατικών.

## 2.2. Συστήματα Lidar και τύποι συστημάτων Lidar

Η βασική δομή ενός συστήματος lidar αποτελείται από έναν εκπομπό και έναν δέκτη. Μικρής διάρκειας παλμοί φωτός με μήκη από μερικά μέχρι αρκετές εκατοντάδες νανοδευτερόλεπτα και συγκεκριμένες φασματικές ιδιότητες παράγονται από το laser. Πολλά συστήματα εφαρμόζουν έναν διευρυντή δέσμης μέσα στον εκπομπό για να μειώσουν την απόκλιση της δέσμης του φωτός πριν αυτό διαφύγει στην ατμόσφαιρα. Στο άκρο του δέκτη, ένα τηλεσκόπιο συλλέγει τα φωτόνια που οπισθοσκεδάζονται από την ατμόσφαιρα. Συνήθως συνοδεύεται από ένα σύστημα οπτικής ανάλυσης, το οποίο ανάλογα με την διαδικασία, επιλέγει συγκεκριμένα μήκη κύματος ή καταστάσεις πόλωσης από το συλλεγόμενο φως. Η επιλεγμένη ακτινοβολία κατευθύνεται στο ανιχνευτή, όπου το λαμβανόμενο οπτικό σήμα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα. Η ένταση του σήματος σε σχέση με την εξάρτηση του από την στιγμή που εκπέμφθηκε ο παλμός καθορίζεται ηλεκτρονικά και αποθηκεύεται σε έναν υπολογιστή [Weitkamp, 2005].

Οι τρόποι κατηγοριοποίησης των συστημάτων lidar εξαρτάται από το φυσικό φαινόμενο που λαμβάνει χώρα, από τον σκοπό για τον οποίο κατασκευάστηκαν, από

το μήκος κύματος που χρησιμοποιούν [ Υπέρυθρο, Ορατό ή Υπεριώδες], από την τεχνολογία [συνεχές ή παλμικό laser, ομοαξονικό ή διαξονικό, αναλογικό ή καταμέτρησης φωτονίων]. Το εύρος των μετρήσεων είναι μεγάλο και μπορεί να αφορά μετρήσεις αιωρούμενων σωματιδίων και ατμοσφαιρικών ρύπων. Επιπρόσθετα είναι δυνατή η καταγραφή κατακόρυφων κατανομών διαφόρων ατμοσφαιρικών παραμέτρων όπως η συγκέντρωση υδρατμών, η σχετική υγρασία, η ατμοσφαιρική πυκνότητα, η θερμοκρασία και ο άνεμος [Γιαννακάκη,2009].

### 2.3. Lidar τύπου Polly XT

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με την χρήση ενός συστήματος έξι καναλιών Raman Lidar που καλείται Polly<sup>XT</sup> (POrtable Lidar sYstem eXTended”) [Althausen et al., 2009]. Οι μετρήσεις και η μεταφορά των δεδομένων πραγματοποιούνται αυτόματα, επιπρόσθετα το σύστημα είναι διαχειρίσιμο από απόσταση. Το όργανο διαθέτει επιπρόσθετα συστήματα που επιτρέπουν την ομαλή του λειτουργία, πιο συγκεκριμένα είναι εξοπλισμένο με ένα τροφοδοτικό αδιάλειπτης παροχής (uninterruptible power supply -UPS), ένα σύστημα κλιματισμού air conditioning (A/C), έναν αισθητήρα βροχής καθώς και με σύστημα απενεργοποίησης στην περίπτωση διέλευσης αεροπλάνου. Το ραντάρ είναι κατασκευασμένο σύμφωνα με τις οδηγίες που έχουν παρουσιασθεί από τους Duck et al. [2005]. Στο Σχήμα 2 αποτυπώνονται αναλυτικά τα διάφορα τμήματα του συστήματος Raman lidar Polly<sup>XT</sup> [Νακούδη, 2018].



**Σχήμα 2:** Η καμπίνα που περιέχει τα διάφορα τμήματα του Raman lidar συστήματος Polly<sup>XT</sup> (1)κεφαλή laser, (2) παροχή ρεύματος laser, (3) επιμηκυντής δέσμης, (4) τηλεσκόπιο, (5) δέκτης με επτά κανάλια, (6) παροχή ρεύματος για τη μονάδα ψύξης του φωτοπολλαπλασιαστή στα 1064 nm, (7) υπολογιστής με κάρτα επίκτησης δεδομένων και κάρτα διεπαφής, (8) UPS, (9) μονάδα κλιματισμού, (10) αισθητήρες εξωτερικής θερμοκρασίας και βροχόπτωσης, (11) κάλυμμα οροφής [Νακούδη, 2018].

Το είδος του laser που χρησιμοποιήθηκε είναι Inlite III από την εταιρεία Continuum. Εκπέμπει συνεχόμενη ενέργεια περίπου 180mJ, 110mJ, και 60mJ στα 1064nm, 532nm και 355nm αντίστοιχα. Η εκπεμπόμενη ενέργεια είναι γραμμικά πολωμένη στα 355nm. Ένας διευρυντής δέσμης χρησιμοποιείται για να μεγεθύνει την ακτίνα περίπου από τα 6mm στα 45mm πριν εισέλθει στην ατμόσφαιρα. Το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα συλλέγεται από ένα Νευτώνειο τηλεσκόπιο το οποίο έχει ένα κύριο καθρέπτη με διάμετρο 300mm και εστιακό μήκος 900mm. Το εύρος θέασης του δέκτη είναι 1mrad [Κομπρούλα, Μ., 2012].

## 2.4. Εξισώσεις Lidar και οπτικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων

Οι οπτικές παράμετροι των αιωρούμενων σωματιδίων που μπορεί να υπολογισθούν με ένα επίγειο σύστημα lidar συνοψίζονται στο Πίνακα 1.

**Πίνακας 1:** Οπτικές ιδιότητες αιωρούμενων σωματιδίων παραγόμενες με μετρήσεις lidar. Επίσης αναφέρονται τα σύμβολα και οι αντίστοιχες μονάδες

Οπτικές ιδιότητες	Σύμβολο	Μονάδες
Συντελεστής εξασθένησης σωματιδίων	$\alpha_{par}$	$Mm^{-1}$
Συντελεστής οπισθοσκέδασης σωματιδίων	$\beta_{par}$	$Mm^{-1}sr^{-1}$
Λόγος Lidar	$S_{par}$	sr
Συντελεστής αποπόλωσης	$\delta_{par}$	αδιάστατο
Εκθέτης Ångström, συντελεστές εξασθένησης	$\dot{A}_{\alpha,par}$	αδιάστατο
Εκθέτης Ångström, συντελεστές οπισθοσκέδασης	$\dot{A}_{\beta,par}$	αδιάστατο

Ο συντελεστής εξασθένησης ισούται με την πιθανότητα ανα μονάδα οπτικής διαδρομής, να αφαιρεθεί ένα φωτόνιο από την αρχική ακτινοβολία λόγω σκέδασης ή/ και απορρόφησης από το οπτικό μέσο. Ο συντελεστής οπισθοσκέδασης περιγράφει την σκέδαση της ακτινοβολίας σε  $180^{\circ}$  ως προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία [Γιαννακάκη, 2009]. Οι δύο προηγούμενες παράμετροι χαρακτηρίζονται ως εκτατικές μιας και εξαρτώνται από την συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων.

Ο λόγος lidar είναι ο λόγος του συντελεστή εξασθένησης προς τον συντελεστή οπισθοσκέδασης των αιωρούμενων σωματιδίων. Ο εκθέτης Ångström ο βασισμένος στους συντελεστές εξασθένησης ή οπισθοσκέδασης εκφράζει την φασματική κλίση των συντελεστών εξασθένησης ή οπισθοσκέδασης αντίστοιχα, που υπολογίζονται σε διαφορετικά μήκη κύματος [Γιαννακάκη, 2009]. Οι οπτικές παράμετροι της παραγράφου χαρακτηρίζονται ως εντατικές μιας και εξαρτώνται από το είδος, το μέγεθος και το σχήμα των σωματιδίων .

### 2.4.1 Εξισώσεις Lidar

Προκειμένου να προσδιορισθούν οι οπτικές ιδιότητες των αιωρούμενων απαιτείται η επίλυση των δύο εξισώσεων του lidar. Η πρώτη εξίσωση αναφέρεται στην ελαστική οπισθοσκέδαση που υφίσταται η δέσμη laser από τα μόρια και τα σωματίδια του αέρα [Fernald et al., 1972]

$$P(z, \lambda_0) = \frac{E_0 \eta_{\lambda_0}}{z^2} O(z, \lambda_0) \beta(z, \lambda_0) \exp[-2 \int_0^z a(\zeta, \lambda_0) d\zeta]$$

Ο όρος  $P(z, \lambda_0)$  αναφέρεται στο σήμα λόγω της σκέδασης Rayleigh και της σκέδασης από τα σωματίδια που προέρχεται από το ύψος  $z$  και στο μήκος κύματος  $\lambda_0$ . Ο όρος  $E_0$  αναφέρεται στην εκπεμπόμενη ισχύ της δέσμης laser. Ο όρος  $\eta_{\lambda_0}$  περιέχει παραμέτρους που εξαρτώνται από την διάταξη του lidar και αντιπροσωπεύουν την αποδοτικότητα των οπτικών και ανιχνευτικών διατάξεων στο μήκος κύματος  $\lambda_0$ . Ο όρος  $O(z, \lambda_0)$  καλείται συνάρτηση αλληλεπικάλυψης της εξερχόμενης δέσμης. Ο συντελεστής οπισθοσκέδασης  $\beta(z, \lambda_0) [= \beta_{\text{par}}(z, \lambda_0) + \beta_{\text{mol}}(z, \lambda_0)]$  εκφράζει την ελαστική οπισθοσκέδαση από τα μόρια και τα σωματίδια της ατμόσφαιρας στο μήκος κύματος  $\lambda_0$ . Ο όρος  $\alpha(z, \lambda_0) [= \alpha_{\text{par}}(z, \lambda_0) + \alpha_{\text{mol}}(z, \lambda_0)]$  είναι ο συντελεστής εξασθένησης στα μήκη κύματος  $\lambda_0$ . Ο όρος  $\alpha(z, \lambda_0)$  αντιπροσωπεύει την εξασθένηση της ακτινοβολίας κατά την πορεία της μέσα στην ατμόσφαιρα από κάτω προς τα επάνω για να λάβουμε υπόψιν μας και την διαδρομή της δέσμης από πάνω προς τα κάτω πολλαπλασιάσουμε τον συντελεστή εξασθένησης με το 2.

Η δεύτερη εξίσωση αναφέρεται στο επιστρεφόμενο σήμα λόγω της ανελαστικής σκέδασης Raman από τα μόρια [Ansmann et al., 1992]

$$P(z, \lambda_{Ra}) = \frac{E_0 \eta_{\lambda_{Ra}}}{z^2} O(z, \lambda_{Ra}) \beta_{Ra}(z, \lambda_{Ra}) \exp \left\{ - \int_0^z [a(\zeta, \lambda_0) + a(\zeta, \lambda_{Ra})] d\zeta \right\}$$

Οι μόνες διαφορές σε σχέση με την εξίσωση της ελαστικής οπισθοσκέδασης είναι το μήκος κύματος  $\lambda_{Ra}$ , το γεγονός ότι η σκέδαση πραγματοποιείται μόνο στα μόρια της ατμόσφαιρας στην περίπτωση του συντελεστή οπισθοσκέδασης  $\beta_{Ra}(z, \lambda_{Ra})$  και τέλος το συντελεστής εξασθένησης  $\alpha(z, \lambda_{Ra}) [= \alpha_{\text{par}}(z, \lambda_{Ra}) + \alpha_{\text{mol}}(z, \lambda_{Ra})]$  που περιγράφει μόνο την εξασθένηση που πραγματοποιείται κατά την επιστροφή του σήματος στο όργανο καταγραφής [Weitkamp, C. (Ed.), 2005 ; Γιαννακάκη, 2009].

### 2.4.2. Συντελεστής εξασθένησης

Ο υπολογισμός του συντελεστή εξασθένησης στηρίζεται στην εξίσωση του επιστρεφόμενου σήματος λόγω της ανελαστικής σκέδασης Raman. Λαμβάνοντας υπόψιν την αριθμητική πυκνότητα των μορίων (άζωτο ή οξυγόνο)  $[N_{Ra}]$ , την ενεργό διατομή κατά Raman σκέδαση στο μήκος κύματος  $\lambda_0$  και σε γωνία σκέδασης  $180^\circ [ \frac{d\sigma_{Ra}}{d\Omega} (180^\circ, \lambda_0) ]$ , υποθέτοντας πως η συνάρτηση αλληλεπικάλυψης είναι ίση

με την μονάδα [ $O(z, \lambda_{Ra})=1$ ] προκύπτει μετά από πράξεις η εξίσωση [Ansmann et al., 1990].

$$a_{par}(z, \lambda_0) = \frac{\frac{d}{dz} \ln \frac{N_{Ra}(z)}{z^2 P(z, \lambda_{Ra})} - a_{mol}(z, \lambda_0) - a_{mol}(z, \lambda_{Ra})}{1 + \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_{Ra}} \right)^{\overset{\circ}{A}_{\alpha, par}(z)}}$$

Υποθέτοντας τον εκθέτη Ångström  $A_{\alpha, par}$  να ισούται με την μονάδα. Το σφάλμα που εισάγεται από μια εσφαλμένη εκτίμηση του εκθέτη Ångström, μπορεί να οδηγήσει σε αβεβαιότητα στον υπολογισμό του συντελεστή εξασθένισης μικρότερη του 10% [Ferrare et al., 1998].

### 2.4.3. Συντελεστής οπισθοσκέδασης

#### A. Μέθοδος Raman

Ο συντελεστής οπισθοσκέδασης  $\beta_{par}(z, \lambda_0)$  υπολογίζεται με την συνδυασμένη χρήση του ολικού [μόρια και σωματίδια] και ανελαστικού [μόρια] οπισθοσκεδαζόμενου σήματος.

$$\beta_{par}(\lambda_0, z) = -\beta_{mol}(\lambda_0, z) + [\beta_{par}(\lambda_0, z_0) + \beta_{mol}(\lambda_0, z_0)] \frac{P(\lambda_{Ra}, z_0)P(\lambda_0, z)N_{Ra}(z) \exp\left\{-\int_{z_0}^z [a_{par}(\lambda_{Ra}, \zeta) + a_{mol}(\lambda_{Ra}, \zeta)]dz\right\}}{P(\lambda_0, z_0)P(\lambda_{Ra}, z)N_{Ra}(z_0) \exp\left\{-\int_{z_0}^z [a_{par}(\lambda_0, \zeta) + a_{mol}(\lambda_0, \zeta)]dz\right\}}$$

Με την χρήση της δοσμένης εξίσωσης και κάνοντας την υπόθεση πως τα δύο σήματα έχουν την ίδια συνάρτηση αλληλεπικάλυψης  $O(z, \lambda_0)=O(z, \lambda_{Ra})$  και θεωρώντας τον συντελεστή οπισθοσκέδασης για τα σωματίδια σε ένα ύψος αναφοράς  $z_0$  όπου τα μόρια συνεισφέρουν μόνο κατά 10% στην συνολική οπισθοσκέδαση υπολογίζεται ο συντελεστής οπισθοσκέδασης  $\beta_{par}(z, \lambda_0)$ .

#### B. Μέθοδος Klett

Όταν εξετάζουμε την ολικά οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία χωρίς να γίνεται διάκριση μεταξύ της συνεισφοράς των μορίων και των σωματιδίων εφαρμόζουμε την μέθοδο κατά Klett. [Klett, 1981; Sasano et al., 1985]. Μέσω των παραδοχών του σταθερού καθ' ύψος λόγου lidar για την περιοχή πλήρους επικάλυψης της δέσμης laser με το οπτικό πεδίο του τηλεσκοπίου καθώς και την θεώρηση της περιοχής βαθμονόμησης του συντελεστή οπισθοσκέδασης σε ένα ύψος αναφοράς προκύπτει η εξίσωση:

$$\beta_{par}(\lambda, z) = -\beta_{mol}(\lambda, z) + \frac{P(\lambda, z) z^2 \exp \left[ -2(S_{par} - S_{mol}) \int_{z_0}^z \beta_{mol}(\lambda, \zeta) d\zeta \right]}{\frac{P(\lambda, z_0) z_0^2}{\beta_{par}(z_0) + \beta_{mol}(z_0)} - 2S_{par} \int_{z_0}^z P(\lambda, \zeta) \zeta^2 \exp \left[ -2(S_{par} - S_{mol}) \int_{z_0}^{\zeta} \beta_{mol}(z') dz' \right] d\zeta}$$

#### 2.4.4. Λόγος Lidar

Ο λόγος lidar εκφράζεται από τον λόγο των κατακόρυφων κατανομών του συντελεστή εξασθένησης προς τον συντελεστή οπισθοσκέδασης των αιωρούμενων σωματιδίων. Η σχέση που προκύπτει σύμφωνα με τις μετρήσεις Raman είναι :

$$S_{par}(z, \lambda_0) = \frac{a_{par}(z, \lambda_0)}{\beta_{par}(z, \lambda_0)}$$

Ο λόγος lidar εξαρτάται από την κατανομή μεγεθών, το σχήμα, την χημική σύσταση των σωματιδίων, το ύψος και το μετρούμενο μήκος κύματος. Κατά συνέπεια διαφορετικά εύρη τιμών καθορίζουν και διαφορετικά είδη σωματιδίων.

#### 2.4.5. Εκθέτης Ångström

Ο εκθέτης Ångström [ Ångström, 1964 ] από τον συντελεστή εξασθένησης των σωματιδίων δίνεται από την σχέση:

$${}^0 A_{a,par} = - \frac{\ln \left[ \frac{a_{par}(z, \lambda_1)}{a_{par}(z, \lambda_2)} \right]}{\ln \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)}$$

και αποτελεί καλή ένδειξη του τύπου και του μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων.

Ο εκθέτης Ångström βασισμένος στους συντελεστές οπισθοσκέδασης δίνεται από την σχέση [Franke et al., 2003; Mattis et al., 2004]:

$${}^0 A_{\beta,par} = - \frac{\ln \left[ \frac{\beta_{par}(z, \lambda_1)}{\beta_{par}(z, \lambda_2)} \right]}{\ln \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)}$$

και είναι ενδεικτικός του μεγέθους των σωματιδίων.

## 2.5. Συμπληρωματικές πηγές δεδομένων

### 2.5.1 Το μετεωρολογικό μοντέλο HYSPLIT

Το μετεωρολογικό μοντέλο HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) [Draxler and Hess, 1997] χρησιμοποιεί μετεωρολογικά δεδομένα για να υπολογίσει την μεταγωγή και διασπορά των αέριων μαζών. Χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο (HYSPLIT) προκειμένου να παράγουμε 4 ημερών οπισθοτροχιές για κάθε στρώμα αιωρούμενων σωματιδίων που καταγράφεται στην περιοχή μας. Τεσσάρων ημερών οπισθοτροχιές δημιουργήθηκαν επειδή εκτείνονται πίσω αρκετά στον χρόνο και σε απόσταση για να καλύψουν τις κυριότερες πηγές που κατά πάσα πιθανότητα επηρεάζουν την περιοχή που μελετάμε. Οι αναλυτικές οπισθοτροχιές παρέχουν πληροφορίες τόσο όσον αφορά την προέλευση των παρατηρούμενων αέριων μαζών όσο και σχετικά με συνοπτικά μετεωρολογικά μοτίβα. Συστηματικές μελέτες αιωρούμενων σωματιδίων βασισμένες στον συνδυασμό οπισθοτροχιών και μεγάλης διάρκειας παρατηρήσεων μπορούν να εξηγήσουν μια πιθανή εξάρτηση των οπτικών ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων συναρτήσει της προέλευσης τους κάτι που έχει εφαρμοσθεί με επιτυχία για την κεντρική Ευρώπη [Mattis et al., 2000].

### 2.5.2 Το όργανο MODIS

Ο αριθμός των φωτιών δίνεται από το όργανο MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Ο αριθμός των εστίων της φωτιάς που καταγράφηκαν από το όργανο MODIS για τις τέσσερις ημέρες πριν από κάθε μέτρηση του οργάνου lidar, υπερθέτονται επάνω στον χάρτη όπου αποτυπώνονται παράλληλα οι οπισθοτροχιές τεσσάρων ημερών από την ημερομηνία και ώρα της κάθε καταγραφής του οργάνου lidar.

Οι εστίες της φωτιάς που αποτυπώνονται επάνω στους χάρτες παρουσιάζουν δείκτη εμπιστοσύνης μεγαλύτερο του 80%, ο δείκτης εμπιστοσύνης είναι ένα μέτρο που αντιπροσωπεύει κατά πόσο η εστία της φωτιάς που παρατηρήθηκε είναι πραγματική (με εύρος από 0-100%). Σύμφωνα με το εγχειρίδιο του οργάνου MODIS, ο χρήστης που επιθυμεί να είναι περισσότερο σίγουρος για το εάν οι εστίες της φωτιάς που παρατηρούνται είναι πραγματικές είναι επιθυμητό να επιλέξει επίπεδο εμπιστοσύνης μεγαλύτερο του 80% και τις εστίες φωτιάς με επίπεδο εμπιστοσύνης μικρότερο του 80% να τις θεωρήσει ως λανθασμένες [Amiridis et al., 2010]

Η παράλληλη αποτύπωση έχει ως στόχο να διαπιστώσουμε κατά πόσο οι αέριες μάζες που καταλήγουν στον τόπο μέτρησής μας, επηρεάστηκαν από τα σωματίδια καπνού κατά την διέλευση τους από τις εστίες φωτιάς. Τα κριτήρια επηρεασμού μιας αέριας μάζας από σωματίδια καπνού είναι το ύψος της την στιγμή της διέλευσης καθώς και ο ταχύτητας κίνησης της.

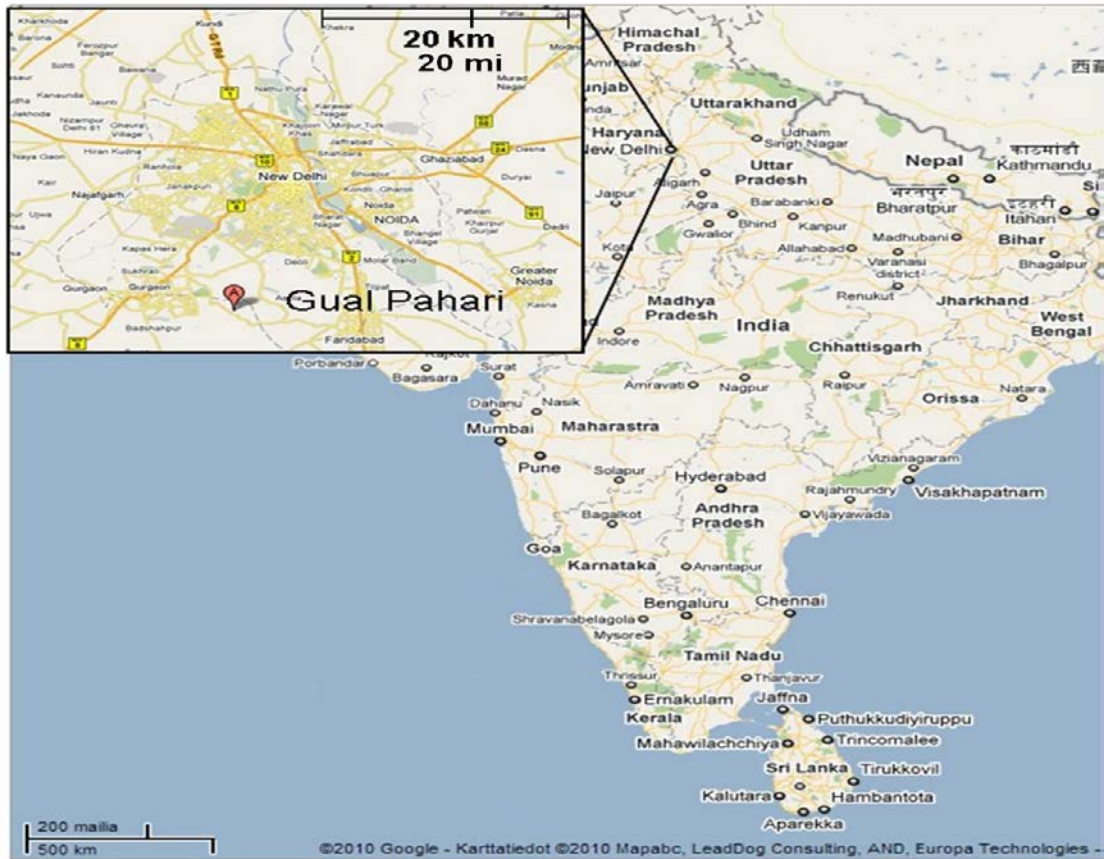


## 2.6. Σταθμός μετρήσεων Lidar

Οι χώρες της Νότιας Ασίας έχουν σημαντικό ρόλο στην μάχη ενάντια στην κλιματική αλλαγή, μιας και εκτίθενται σε μεγάλες ποσότητες σωματιδιακής ρύπανσης [Ramanathan et al., 2007a, Nakajima et al., 2007]. Το μεγαλύτερο πρόβλημα τόσο σε έκταση όσο και σε διάρκεια είναι το λεγόμενο Ασιατικό καφέ σύννεφο (brown cloud), οι πιθανές συνέπειες του νέφους στο τοπικό κλίμα και στην υγεία των ανθρώπων είναι ανησυχητικές (Ramanathan et al. 2007b).

Στην Ινδία και στην ευρύτερη περιοχή της Νότιας Ασίας, ο αριθμός των μετρήσεων του κατακόρυφου προφίλ των αιωρούμενων σωματιδίων είναι πολύ μικρός και προέρχεται από χρονικά περιορισμένες πειραματικές εκστρατείες [Komppula et al., 2012]. Ενδεικτικά αναφέρονται οι μετρήσεις κατακόρυφων προφίλ που πραγματοποιήθηκαν επάνω από περιοχές των παρακείμενων ωκεανών στην Ινδία, όπως είναι η Αραβική Θάλασσα, ο Ινδικός ωκεανός και ο κόλπος της Βενκάλης μέσω του προγράμματος INDOEX (INDian Ocean EXperiment) με την χρήση αεροσκάφους, πλοίων καθώς και επίγειων οργάνων [Muller et al., 2001; Welton et al., 2002; Pelon et al., 2002]. Μεγάλης διάρκειας μετρήσεις είναι ακόμη πιο σπάνιες για παράδειγμα οι Ganguly et al. (2006a) μελέτησαν τις φυσικές και οπτικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων επάνω από την περιοχή Ahmedabad για πολλά χρόνια, παρέχοντας δεδομένα για κάθε μια από τις εποχικές περιόδους. Για τις μετρήσεις των οπτικών ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων, χρησιμοποίησαν φωτόμετρο (sun photometer), αιθαλόμετρο (aethalometer), νεφελόμετρο (nephelometer) και σύστημα lidar.

Με αφορμή τις συνέπειες του καφέ σύννεφου στο τοπικό κλίμα και στην ανθρώπινη υγεία καθώς και λόγω του μικρού αριθμού μακροχρόνιων μετρήσεων, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ενός χρόνου Μάρτιος 2008 έως Μάρτιος 2009 στην περιοχή του Gual Pahari (28°26' Βόρεια, 77°09' Ανατολικά), το οποίο απέχει περίπου 20km από το Νέο Δελχί και βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή της Ινδίας (Σχήμα 3). Οι καταγραφές πραγματοποιήθηκαν με την χρήση του (3+2) Raman Lidar PollyXT FMI. Οι μετρήσεις έγιναν στα πλαίσια του προγράμματος EUCAARI (European Integrated Project on Aerosol Climate and Air Quality Interactions), παρέχοντας για πρώτη φορά μακροχρόνια δεδομένα του κατακόρυφου προφίλ των αιωρούμενων σωματιδίων κοντά στην περιοχή του Νέου Δελχί. Δεν υπάρχουν ισχυρές τοπικές πηγές ρύπανσης, εκτός από έναν δρόμο που βρίσκεται σε απόσταση περίπου 0.5 km νοτιοδυτικά του σταθμού. Οι ανθρωπογενείς πηγές στην περιοχή περιλαμβάνουν κίνηση αυτοκινήτων, εκπομπές πόλεων καθώς και χρήση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. (Reddy and Venkataraman, 2002a,b). Επιπλέον υπάρχουν εκπομπές ερημικής σκόνης, οι οποίες προέρχονται από τη γειτονική έρημο Thar, η οποία είναι η ένατη μεγαλύτερη υποτροπική έρημος.



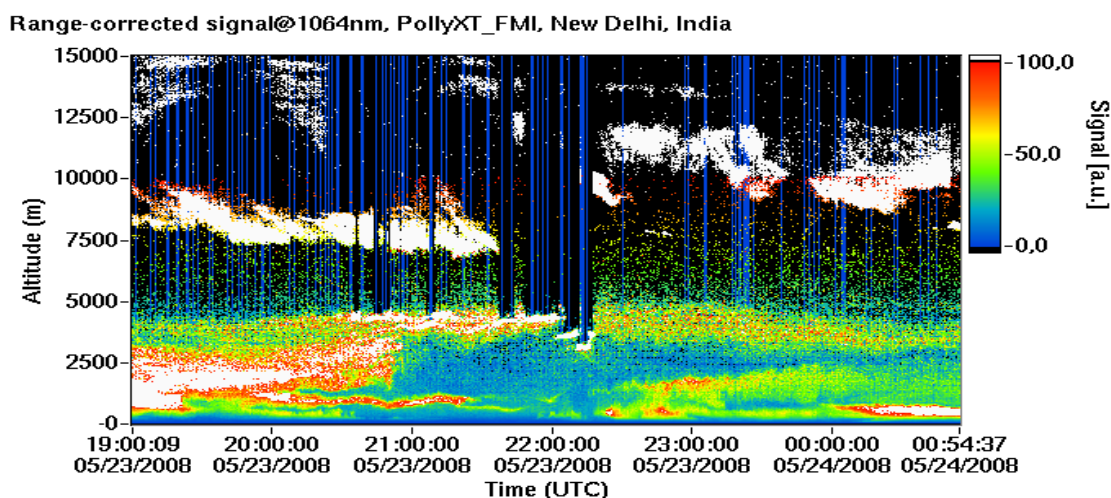
Σχήμα 3 : Τοποθεσία μέτρησης Gual Pahari [A.-P. Hyvarinen et al. 2010]

### 3. Επεξεργασία δεδομένων- Στατιστική Ανάλυση των αποτελεσμάτων

Αρχικά πραγματοποιήθηκε υπολογισμός των γεωμετρικών και οπτικών ιδιοτήτων όλων των στρωμάτων των αιωρούμενων σωματιδίων που παρατηρήθηκαν σε όλη την ατμοσφαιρική στήλη, στην περιοχή μελέτης μας, μέσω της επίλυσης των εξισώσεων Lidar και της χρήσης του επιστρεφόμενου σήματος. Εν συνεχεία πραγματοποιήθηκε διαχωρισμός των στρωμάτων των αιωρούμενων σωματιδίων που ανήκουν στην ελεύθερη τροπόσφαιρα από τα στρώματα που παρατηρούνται στο εσωτερικό του οριακού στρώματος. Τέλος οι μετρήσεις αναλύθηκαν ως προς την ετήσια και την εποχική διακύμανση τους και στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε προσπάθεια για την εύρεση του είδους των αιωρούμενων σωματιδίων καθώς και της προέλευσής τους με την χρήση του μετεωρολογικού μοντέλου HYSPLIT και των δεδομένων του οργάνου MODIS.

#### 3.1. Εύρεση των γεωμετρικών και οπτικών ιδιοτήτων των στρωμάτων όλης της ατμοσφαιρικής στήλης μέσω του επιστρεφόμενου σήματος

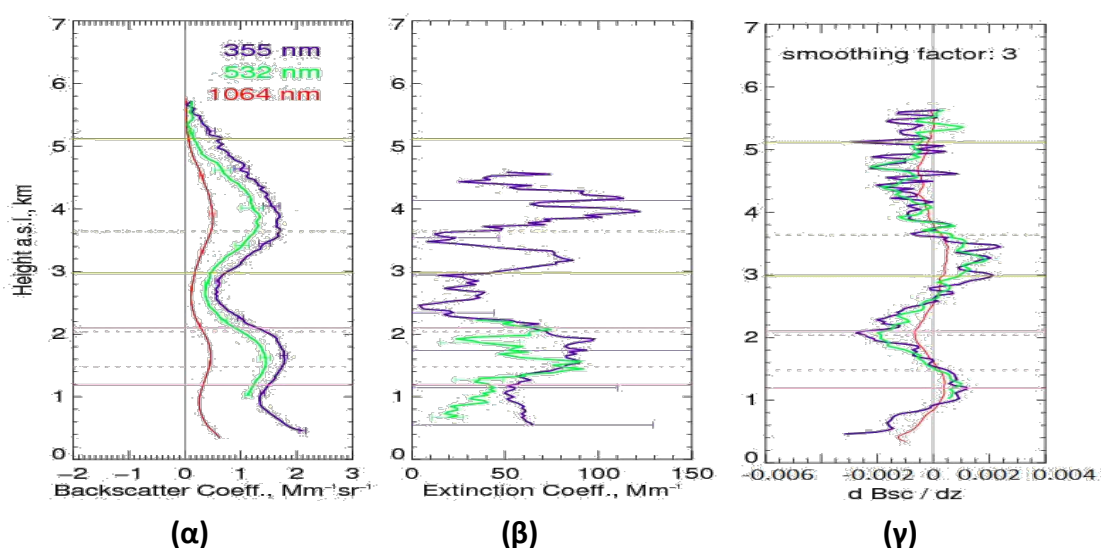
Το επιστρεφόμενο σήμα του lidar εμφανίζεται σε ένα διάγραμμα χωροχρονικής κατανομής του διορθωμένου σήματος (Quicklook) (Σχήμα 4) όπως παρατηρούμε εμφανίζεται ένα σύνολο διαφορετικών ειδών στρωματώσεων, χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το διάστημα 22:00 έως 01:00 όπου το πρώτο στρώμα κυμαίνεται από τα 1200 έως τα 2200m και το δεύτερο στρώμα από τα 3000 έως 5000m, οι γεωμετρικές διαστάσεις των στρωμάτων αποτυπώνονται με το κομμάτι της χρωματικής κλίμακας που κυμαίνεται από πράσινο έως κόκκινο και μεταξύ τους τα στρώματα ξεχωρίζουν με γαλάζιο χρώμα ένδειξη μικρής έντασης επιστρεφόμενου σήματος. Επιπρόσθετα με λευκές αποχρώσεις αποτυπώνονται τα σύννεφα, όπου παρατηρούμε τόσο χαμηλούς όσο και ψηλούς νεφικούς σχηματισμούς.



**Σχήμα 4** : Χωροχρονική απεικόνιση του σήματος (Quicklook) με το διορθωμένο σήμα να αποτυπώνεται στα 1064nm.

Το επιστρεφόμενο σήμα περιέχει πληροφορίες που είναι καθοριστικές για τον προσδιορισμό του ύψους των στρωμάτων των αιωρούμενων σωματιδίων. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο της κλίσης μπορούμε να προσδιορίσουμε την βάση καθώς και την κορυφή των στρωμάτων κατά την διάρκεια των μετρήσεων [Flamant et al., 1997; Bosenberg et al., 2003; Mattis et al., 2008]. Από το επιστρεφόμενο σήμα επιλέγουμε ένα διάστημα τριών ωρών, με απαραίτητη προϋπόθεση την ομοιομορφία της ατμόσφαιρας, με στόχο τον υπολογισμό του κατακόρυφου μέσου όρου του σήματος. Ο μέσος όρος ανα τρίωρο δεν ήταν πάντα εφαρμόσιμος λόγω βροχής, χαμηλών νεφών/ομίχλης καθώς και τεχνικών θεμάτων με το σύστημα lidar, στις συγκεκριμένες περιπτώσεις επιλέγεται ένα χρονικό διάστημα κοντά στο τρίωρο. Με την μέθοδο του Raman προσδιορίζουμε τις εκατοκτικές μεταβλητές και στην συνέχεια μέσω των σχέσεων του λόγου lidar καθώς και του εκθέτη Ångström υπολογίζουμε και τις εντατικές μεταβλητές όπως αναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο 2.4.

Στο Σχήμα 5α αποτυπώνονται οι συντελεστές οπισθοσκέδασης στα τρία μήκη κύματος 355, 532, 1064nm, στο Σχήμα 5β απεικονίζονται οι συντελεστές εξασθένισης στα δύο μήκη κύματος 355, 532nm και το Σχήμα 5γ εμφανίζεται η κλίση των συντελεστών οπισθοσκέδασης στα τρία μήκη κύματος. Τα κατακόρυφα προφίλ του Σχήματος 5 αντιστοιχούν στο χρονικό τρίωρο της χωροχρονικής κατανομής του διορθωμένου σήματος (Quicklook) στο διάστημα 22:00 έως 01:00 (UTC).



**Σχήμα 5:** Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ: α) του συντελεστή οπισθοσκέδασης σε τρία μήκη κύματος 355, 532, 1064nm β) του συντελεστή εξασθένισης σε δύο μήκη κύματος 355, 532nm γ) της κλίσης καθ' ύψος του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα τρία μήκη κύματος

Μέσω της πρώτης παράγωγου του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 1064nm είμαστε σε θέση να εξάγουμε τα όρια των ατμοσφαιρικών στρωμάτων. Η βάση του κάθε στρώματος εμφανίζεται ως τοπικό μέγιστο στην πρώτη παράγωγο του συντελεστή οπισθοσκέδασης ενώ η κορυφή εμφανίζεται ως τοπικό ελάχιστο. Προκειμένου να επιβεβαιώσουμε την μέθοδο της κλίσης, ελέγξαμε εάν τα όρια των στρωμάτων δηλαδή η κορυφή και η βάση που προκύπτουν από την μεθοδολογία συμπίπτουν με

τα όρια των στρωμάτων που μπορούν να εντοπισθούν οπτικά από τις εικόνες της χωροχρονικής κατανομής του διορθωμένου σήματος (Quicklook) (<http://polly.tropos.de>). Ως επαλήθευση της μεθόδου στο Σχήμα 5γ παρατηρούμε δύο στρώματα το πρώτο έχει όρια από 1200 έως τα 2200m και το δεύτερο στρώμα από τα 3000 έως 5000m, κάτι που επαληθεύεται και οπτικά μέσω του Σχήματος 4.

Με βάση τις εξισώσεις που εμφανίσθηκαν στο υποκεφάλαιο 2 υπολογίζονται οι εντατικές μεταβλητές με πεδία ορισμού για τον λόγο lidar [0 έως 120 sr] και για τον εκθέτη Ångström [-0.5 έως 4].

Εφαρμόζοντας την εύρεση των στρωμάτων για όλο το διάστημα των μετρήσεων (Μάρτιος 2008 έως Μάρτιος 2009), με την παραπάνω διαδικασία και λαμβάνοντας υπόψιν πως οι καταγραφές δεν είναι συνεχείς λόγω βροχής, χαμηλών νεφών/ομίχλης καθώς και τεχνικών θεμάτων με το σύστημα lidar, καταγράφηκαν σε διάστημα 119 ημερών 1277 στρώματα αιωρούμενων σωματιδίων σε όλο το ύψος της ατμοσφαιρικής στήλης.

Στην συνέχεια πραγματοποιείται διαχωρισμός των στρωμάτων σε δύο βασικές κατηγορίες, στα στρώματα που ανήκουν στο οριακό στρώμα (Planetary Boundary Layer/PBL) και στα στρώματα που ανήκουν στην ελεύθερη τροπόσφαιρα (Free Troposphere/FT) παρατηρείται και μια πρόσθετη κατηγορία που περιλαμβάνει ένα μικρό αριθμό στρωμάτων, τα οποία ανήκουν στο οριακό στρώμα και στην ελεύθερη τροπόσφαιρα ταυτόχρονα.

### 3.2. Διαχωρισμός των στρωμάτων της ελεύθερης τροπόσφαιρας από τα στρώματα του οριακού στρώματος

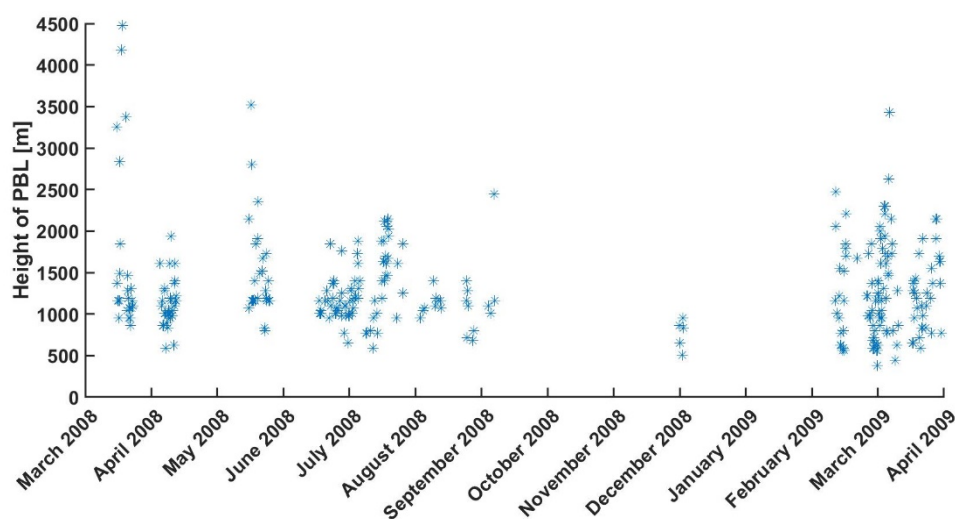
Οι μετρήσεις του συστήματος lidar παρέχουν την κατακόρυφη απεικόνιση των αιωρούμενων σωματιδίων με υψηλή ανάλυση επιτρέποντας τον καθαρό διαχωρισμό των οπτικών ιδιοτήτων μεταξύ των σωματιδίων του οριακού στρώματος (Planetary Boundary Layer/PBL) που συνήθως προέρχονται από τοπικές πηγές και της ελεύθερης τροπόσφαιρας (Free Troposphere/FT) τα οποία πηγάζουν από μεγάλες αποστάσεις ακόμη και από άλλες ηπείρους και συνήθως είναι διακριτά από τα σωματίδια του οριακού στρώματος όσον αφορά τις οπτικές αλλά και τις μικροφυσικές τους ιδιότητες [Wandinger et al., 2002; Mattis et al., 2004; Matthias et al., 2004; Muller et al., 2004]. Στην συγκεκριμένη μελέτη θα εξετασθούν τα στρώματα αιωρούμενων σωματιδίων της ελεύθερης τροπόσφαιρας, μιας και με την χρήση του μετεωρολογικού μοντέλου HYSPLIT, που θα αξιοποιηθεί μετέπειτα, υπάρχει η δυνατότητα της εύρεσης των διαπλανητικών πηγών ρύπανσης που επηρεάζουν τις καταγραφόμενες αέριες μάζες που καταλήγουν στην περιοχή εξέτασης μας.

Η κορυφή του οριακού στρώματος καθορίζεται σύμφωνα με τους Korhonen et al. [2014]. Η κορυφή του οριακού στρώματος προσδιορίζεται από το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα στα 1064nm χρησιμοποιώντας την μέθοδο WCT (Wavelet Covariance Transform) [Brooks, 2003]. Η ακρίβεια στον προσδιορισμό των

στρωμάτων που παρατηρούνται στην ελεύθερη τροπόσφαιρα εξαρτάται από τον σωστό καθορισμό της κορυφής του οριακού στρώματος. Οι Korhonen et al. [2014] έδειξαν πως η μέθοδος δουλεύει σωστά παρόλη την συχνή ύπαρξη αναμεμιγμένων στρωμάτων που προκαλούνται από την έντονη εκπομπή από μεγάλες σημειακές πηγές και την καύση βιομάζας.

Σκοπός είναι να επιτευχθεί ο διαχωρισμός των στρωμάτων που ανήκουν πλήρως στην ελεύθερη τροπόσφαιρα από το σύνολο των στρωμάτων που ανήκουν σε όλη την ατμοσφαιρική στήλη, έχοντας ως δεδομένα τα ακριβή γεωμετρικά χαρακτηριστικά (κορυφή και βάση) των στρωμάτων όπως προσδιορίστηκαν στο υποκεφάλαιο 3.1 καθώς και της κορυφής του οριακού στρώματος.

Δεδομένου πως η εύρεση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κάθε στρώματος προκύπτει από τον μέσο όρο του σήματος, σε χρονικό διάστημα τριών ωρών, στο ίδιο χρονικό διάστημα θα υπολογισθεί ο μέσος όρος της κορυφής του οριακού στρώματος, ως αποτέλεσμα σε κάθε στρώμα αντιστοιχεί και μια τιμή της κορυφής του οριακού στρώματος. Η χωροχρονική διακύμανση του ύψους της κορυφής του οριακού στρώματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 6. Η μέση τιμή βρέθηκε στα  $1420 \pm 690$  m. Η μέγιστη τιμή στα 4470 m και η χαμηλότερη τιμή είναι 380 m.

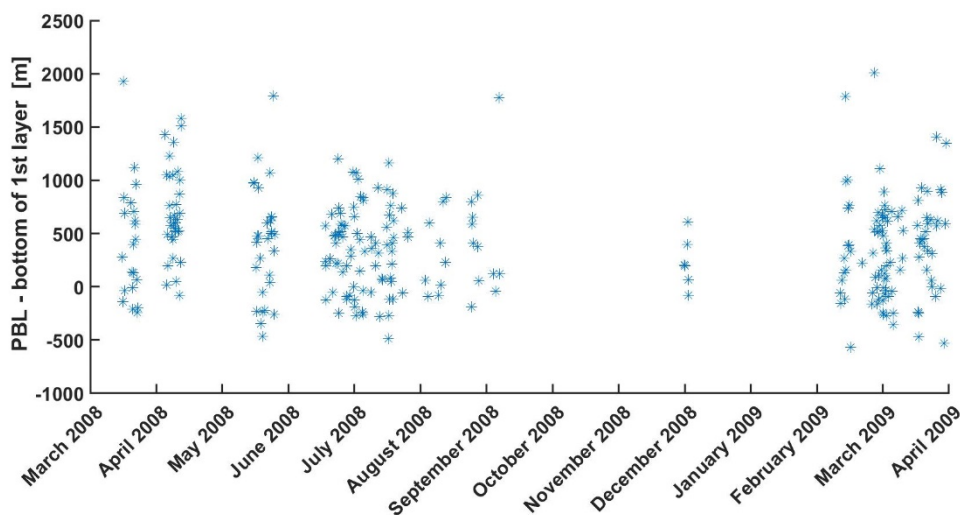


**Σχήμα 6:** Η χωροχρονική αποτύπωση του ύψους της κορυφής του οριακού στρώματος

Στην συνέχεια πραγματοποιείται σύγκριση της τιμής που καθορίζει την κορυφή του οριακού στρώματος με το αντίστοιχο κεντρικό ύψος του στρώματος των αιωρούμενων σωματιδίων, το κεντρικό ύψος δίνεται από την σχέση  $\text{κεντρικό ύψος} = \frac{\text{βάση} + \text{κορυφή}}{2}$  ( $\text{center height} = \frac{\text{base} + \text{top}}{2}$ ). Στην περίπτωση που η τιμή του κεντρικού ύψους του στρώματος ήταν χαμηλότερη από την τιμή της κορυφής του οριακού στρώματος τότε το στρώμα αιωρούμενων σωματιδίων κατατάσσεται στο οριακό στρώμα, στην περίπτωση που το κεντρικό ύψος του στρώματος ήταν μεγαλύτερο από το ύψος του οριακού στρώματος τότε το στρώμα

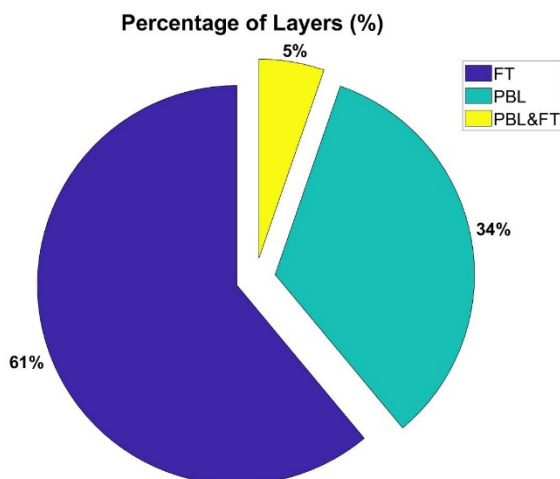
χαρακτηρίζεται ως στρώμα που ανήκει στην ελεύθερη τροπόσφαιρα. Η διαδικασία που αναλύθηκε εφαρμόστηκε και για τα 1277 στρώματα που ανήκουν σε όλη την ατμοσφαιρική στήλη και εντοπίστηκαν 833 στρώματα αιωρούμενων σωματιδίων.

Προκειμένου να απομονωθούν τα στρώματα που ανήκουν μόνο στην ελεύθερη τροπόσφαιρα πραγματοποιήθηκε για κάθε ένα από τα 833 στρώματα αιωρούμενων σωματιδίων η αφαίρεση της βάσης τους από το ύψος της κορυφής του οριακού στρώματος, που τους αντιστοιχεί και τα αποτελέσματα εμφανίζονται στο Σχήμα 7. Οι αρνητικές τιμές που εμφανίζονται στον γγ' άξονα αποδίδονται σε στρώματα που ανήκουν ταυτόχρονα στο οριακό στρώμα και στην ελεύθερη τροπόσφαιρα. Στην μελέτη θα εξετασθούν μόνο τα στρώματα που ανήκουν καθαρά στην ελεύθερη τροπόσφαιρα συνεπώς από τα 833 στρώματα καταλήγουμε στα 767 στρώματα αιωρούμενων σωματιδίων, δηλαδή εξετάζονται τα στρώματα που παρουσιάζουν θετικές τιμές στο Σχήμα 7.



**Σχήμα 7:** Διαφορά μεταξύ του ύψους του οριακού στρώματος(PBL) και της βάσης των στρωμάτων που ανήκουν στην ελεύθερη τροπόσφαιρα (FT).

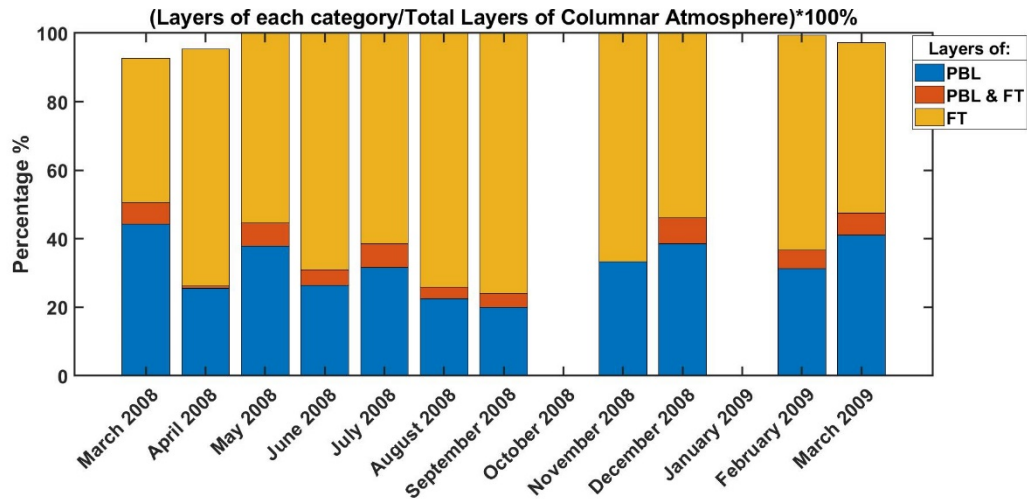
Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται το ποσοστό των στρωμάτων που καταλαμβάνουν τις τρεις κατηγορίες που παρατηρήθηκαν κατά των διαχωρισμό τους, στην συγκεκριμένη μελέτη θα εξετασθούν μόνο τα στρώματα των αιωρούμενων σωματιδίων που ανήκουν στην ελεύθερη τροπόσφαιρα.



**Σχήμα 8:** Το ποσοστό που καταλαμβάνουν τα στρώματα που ανήκουν σε κάθε κατηγορία της ατμόσφαιρας, οριακό στρώμα (PBL), οριακό στρώμα και ελεύθερη τροπόσφαιρα ταυτόχρονα(PBL&FT) και ελεύθερη τροπόσφαιρα (FT).

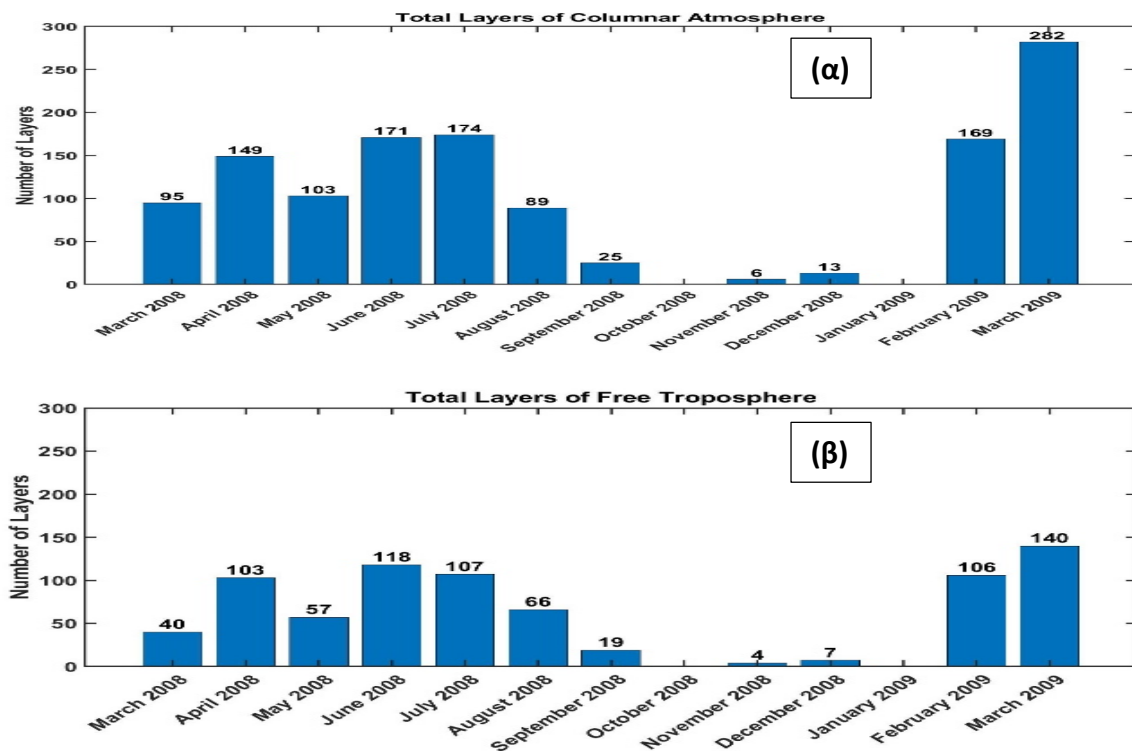
Στο Σχήμα 9 παρατηρείται μια πτωτική τάση στο ποσοστό των στρωμάτων που ανήκουν στο οριακό στρώμα από τον μήνα Μάρτιο 2008 έως τον μήνα Σεπτέμβριο 2008 συνεπώς όλο και λιγότερα στρώματα ανήκουν στην συγκεκριμένη κατηγορία επιπρόσθετα αποτελεί ένδειξη ότι το ύψος της κορυφής του οριακού στρώματος μειώνεται. Οι χαμηλότερες τιμές του οριακού στρώματος παρατηρούνται τους μήνες Ιούνιος-Σεπτέμβριος που αποτελούν την Μουσωνική περίοδο, μια περίοδο έντονων βροχοπτώσεων. Σύμφωνα με την Νακούδη [2018] η αύξηση της ποσότητας της βροχής αντιστοιχεί και σε μείωση του ύψους της κορυφής του οριακού στρώματος, κατά συνέπεια οι ρύποι που προέρχονται από τοπικές πηγές περιορίζονται και τα αιωρούμενα σωματίδια που ανήκουν στην ελεύθερη τροπόσφαιρα είναι αποτέλεσμα της διαπλανητικής ρύπανσης. Τους μήνες Νοέμβριος 2008 έως τον Μάρτη 2009 παρατηρείται η αντίθετη τάση στα ποσοστά των στρωμάτων που ανήκουν στο οριακό στρώμα. Τους μήνες Μάρτιο, Απρίλιο 2008 καθώς και τον Μάρτιο 2009 το ποσοστό δεν ανέρχεται στο 100% μιας και δεν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις της κορυφής του οριακού στρώματος, σε ένα μικρό σύνολο στρωμάτων, συνεπώς δεν ήταν εφικτή η διακριτοποίηση των στρωμάτων σε μια από τις τρεις παραπάνω κατηγορίες.





**Σχήμα 9:** Αποτύπωση του ποσοστού των στρωμάτων που ανήκουν στο οριακό στρώμα (PBL), στην ελεύθερη τροπόσφαιρα(FT) και στο οριακό στρώμα(PBL) ταυτόχρονα και τέλος στα στρώματα που ανήκουν στην ελεύθερη τροπόσφαιρα (FT).

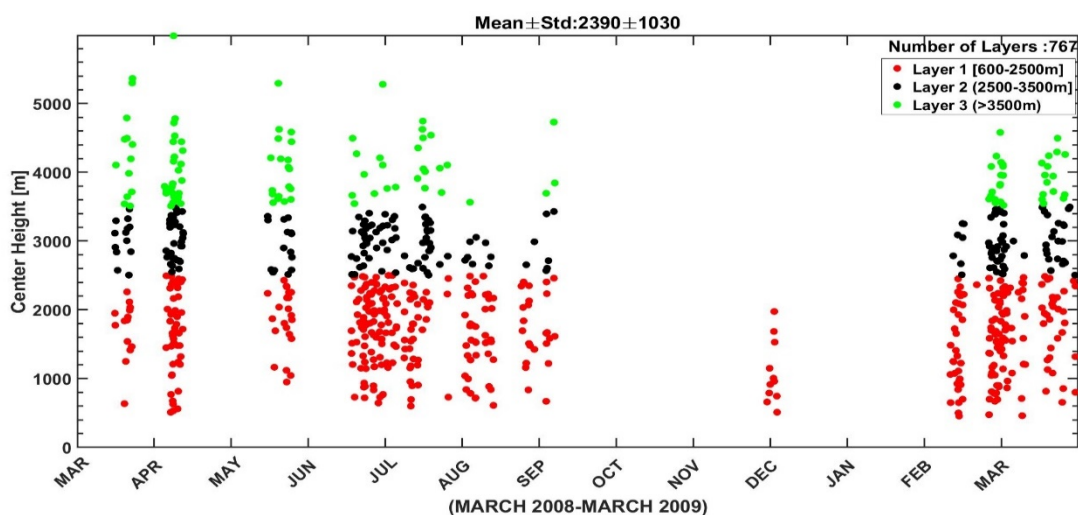
Στο Σχήμα 10 παρουσιάζεται το σύνολο των στρωμάτων που ανήκουν σε όλη την ατμοσφαιρική στήλη και το σύνολο των στρωμάτων που παρατηρούνται στην ελεύθερη τροπόσφαιρα. Στο Σχήμα 10α αυξητική παρατηρείται η τάση από τον Μάρτιο 2008 έως τον Ιούλιο 2008, με εξαίρεση τον μήνα Μάιο 2008 στην συνέχεια παρουσιάζει πτώση μέχρι και τον Δεκέμβρη 2008 τέλος παρατηρείται ανοδική τάση μέχρι τον μήνα Μάρτιο 2009 όπου παρατηρούνται και οι μέγιστες τιμές. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και στην περίπτωση της ελεύθερης τροπόσφαιρας Σχήμα 10β.



**Σχήμα 10:** Αριθμός των στρωμάτων που παρατηρούνται σε όλη την ατμοσφαιρική στήλη (α) και στην ελεύθερη τροπόσφαιρα (β).

### 3.3 Στατιστική Ανάλυση της ετήσιας διακύμανσης των γεωμετρικών και οπτικών ιδιοτήτων

Η ετήσια διακύμανση των γεωμετρικών και οπτικών ιδιοτήτων των στρωμάτων της ελεύθερης τροπόσφαιρας μελετάται στην συνέχεια. Στο Σχήμα 11 παρουσιάζεται το κεντρικό ύψος (center height) των στρωμάτων της ελεύθερης τροπόσφαιρας [κεντρικό ύψος =  $\frac{\text{βάση}+\text{κορυφή}}{2}$  ( $\text{center height} = \frac{\text{base}+\text{top}}{2}$ )]. Τα χρώματα αντιστοιχούν στα τρία εύρη υψών που εμφανίζονται στην ελεύθερη τροπόσφαιρα, στην πρώτη κατηγορία στρωμάτων ανήκουν αυτά που το κεντρικό τους ύψος κυμαίνεται από 600 έως 2500m, στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα στρώματα με κεντρικό ύψος από 2500 έως 3500m και στην τρίτη κατηγορία τα στρώματα με κεντρικό ύψος ανώτερο των 3500m. Τα κενά στις μετρήσεις τους μήνες Οκτώβρης 2008, Νοέμβρης 2008 και Ιανουάριος 2009 οφείλονται σύμφωνα με την Νακούδη [2008] σε τεχνικά προβλήματα του οργάνου Lidar και σε κακής ποιότητας δεδομένα, πρόσθετα προβλήματα που επηρέασαν τις μετρήσεις μέσα σε όλο το χρονικό διάστημα καταγραφής είναι η βροχή καθώς και τα χαμηλά σύννεφα. Καταγράφηκε η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του κεντρικού ύψους των στρωμάτων με τιμή  $2390\pm 1030\text{m}$  καθώς και ο αριθμός των στρωμάτων που παρατηρήθηκαν στην ελεύθερη τροπόσφαιρα, 767. Ένας αριθμός από έρευνες (e.g. Muller et al., 2001; Welton et al., 2002; Niranjana et al., 2007; Pelon et al., 2002) αναφέρουν πως τα στρώματα των αιωρούμενων σωματιδίων στην περιοχή της Ινδίας είναι σε θέση να ανέλθουν σε ύψη μέχρι και 3-5km. Μέσα στον χρόνο τα στρώματα των αιωρούμενων σωματιδίων μπορούν να ανέλθουν στα 5km ή ακόμη ψηλότερα, όπως μπορεί να φανεί και στο παρακάτω Σχήμα 11.

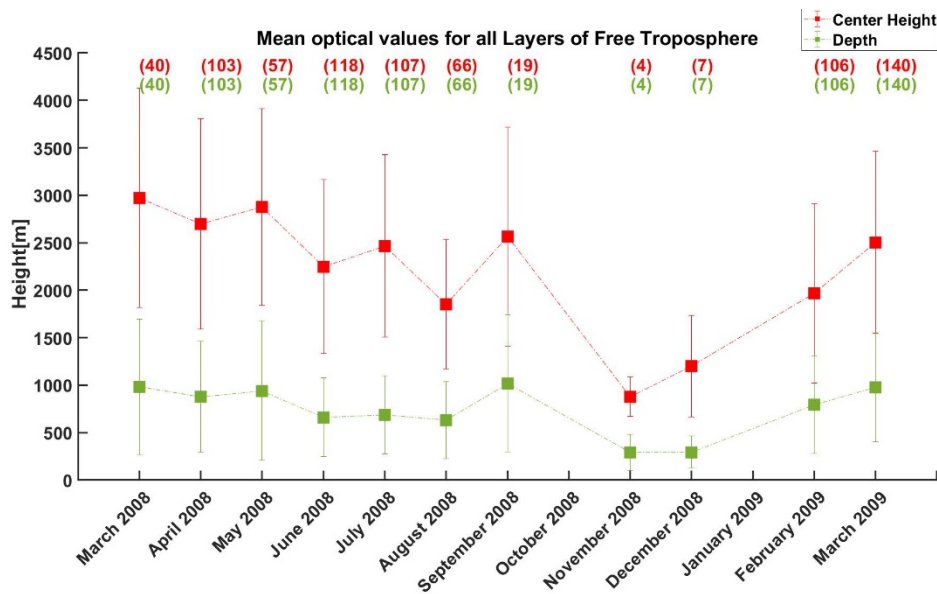


**Σχήμα 11:** Χρονοσειρά του κεντρικού ύψους των στρωμάτων της ελεύθερης τροπόσφαιρας.

Η μέση τιμή καθώς και η τυπική απόκλιση συναρτήσκει των ημερολογιακών μηνών τόσο για το κεντρικό ύψος όσο και για το πάχος των στρωμάτων αποτυπώνεται στο Σχήμα 12. Στην περίπτωση του κεντρικού ύψους (center height) των στρωμάτων, αποτυπώνεται με κόκκινο χρώμα, παρουσιάζεται μέγιστο μέσο ύψος τον μήνα Μάρτη 2008 με μέση τιμή και τυπική απόκλιση ( $3000\pm 1200\text{m}$ ) και ελάχιστο μέσο

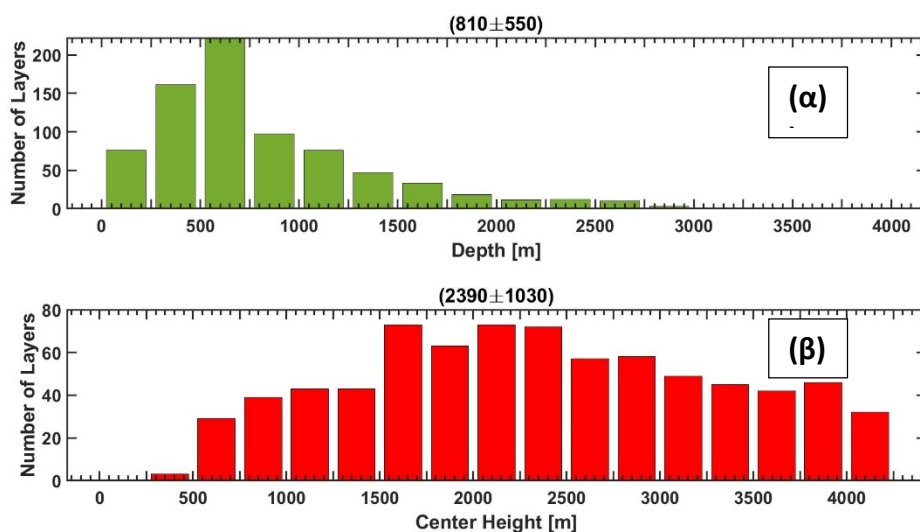
ύψος τον μήνα Νοέμβρη 2008 με τιμή ( $880 \pm 200$ m), ως γενικότερη εικόνα το κεντρικό ύψος των στρωμάτων παρουσιάζει πτωτική τάση από τον Μάρτη μέχρι τον Νοέμβρη του 2008 και μια ανοδική τάση από τον Δεκέμβρη του 2008 μέχρι τον Μάρτη 2009 από τον Σεπτέμβρη έως και τον Ιανουάριο 2009 έχουμε τις λιγότερες μετρήσεις. Το πάχος των στρωμάτων (Depth), που αποτυπώνεται με πράσινο χρώμα δεν παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις με εξαίρεση τους μήνες Νοέμβρη και Δεκέμβρη όπου παρουσιάζει μείωση.

Συμπερασματικά παρατηρείται μια σύνδεση του κεντρικού ύψους με το πάχος των στρωμάτων τους μήνες Νοέμβρη και Δεκέμβρη δηλαδή μειώνεται το κεντρικό ύψος και μειώνεται και το πάχος των στρωμάτων κάτι που υποδηλώνει πως τα στρώματα κατέρχονται προς το έδαφος και η ποσότητα των σωματιδίων που περιέχουν μειώνεται.



**Σχήμα 12:** Χρονική αποτύπωση της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης του κεντρικού ύψους (center height) καθώς και του πάχους (depth) των στρωμάτων των αιωρούμενων σωματιδίων.

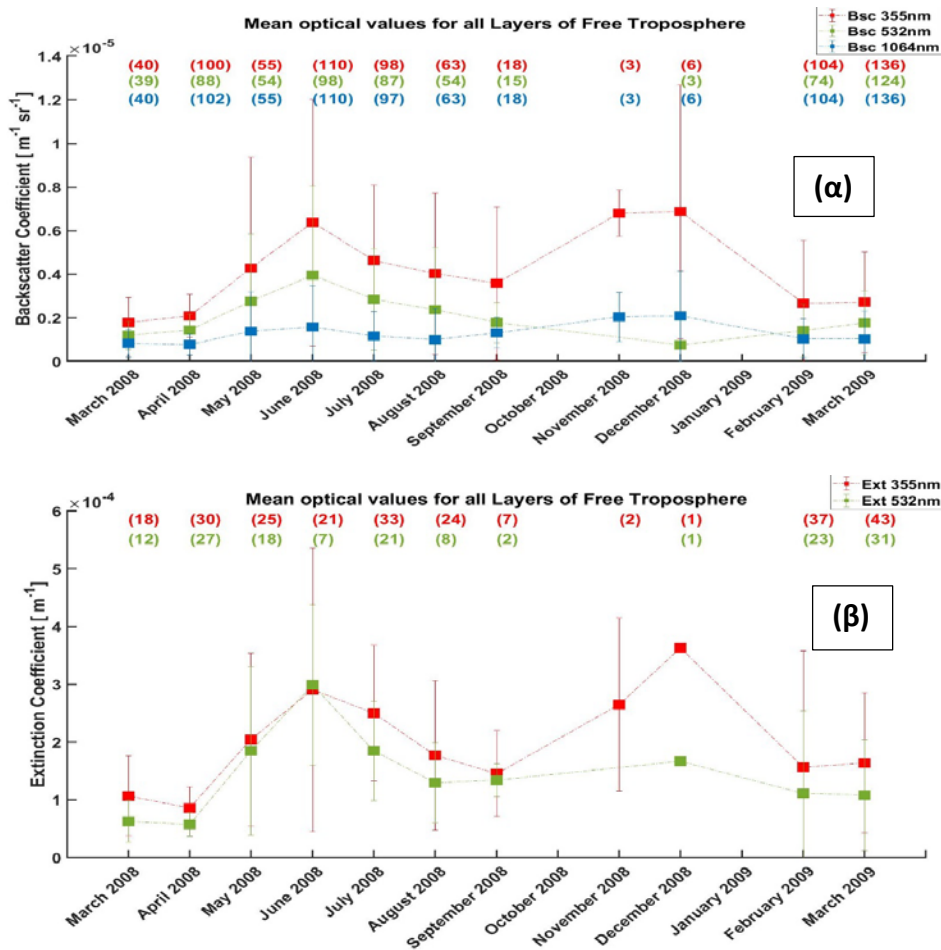
Το πάχος των στρωμάτων κυμαίνεται από τα 0 έως τα 3000m με μέση τιμή και τυπική απόκλιση  $810\pm 550$ m καθώς και το κεντρικό ύψος κυμαίνεται από τα  $2390\pm 1030$ m, κάτι που αποτυπώνεται στο Σχήμα 13(α),(β).



**Σχήμα 13:** Αποτύπωση του αριθμού των στρωμάτων συναρτήσει του πάχους των στρωμάτων (α) και του κεντρικού ύψους (β).

Οι εκτατικές μεταβλητές, συντελεστής οπισθοσκέδασης (backscatter coefficient/bsc) και συντελεστής εξασθένησης (extinction coefficient/ext) αποτελούν δείκτες της ποσότητας των αιωρούμενων σωματιδίων.

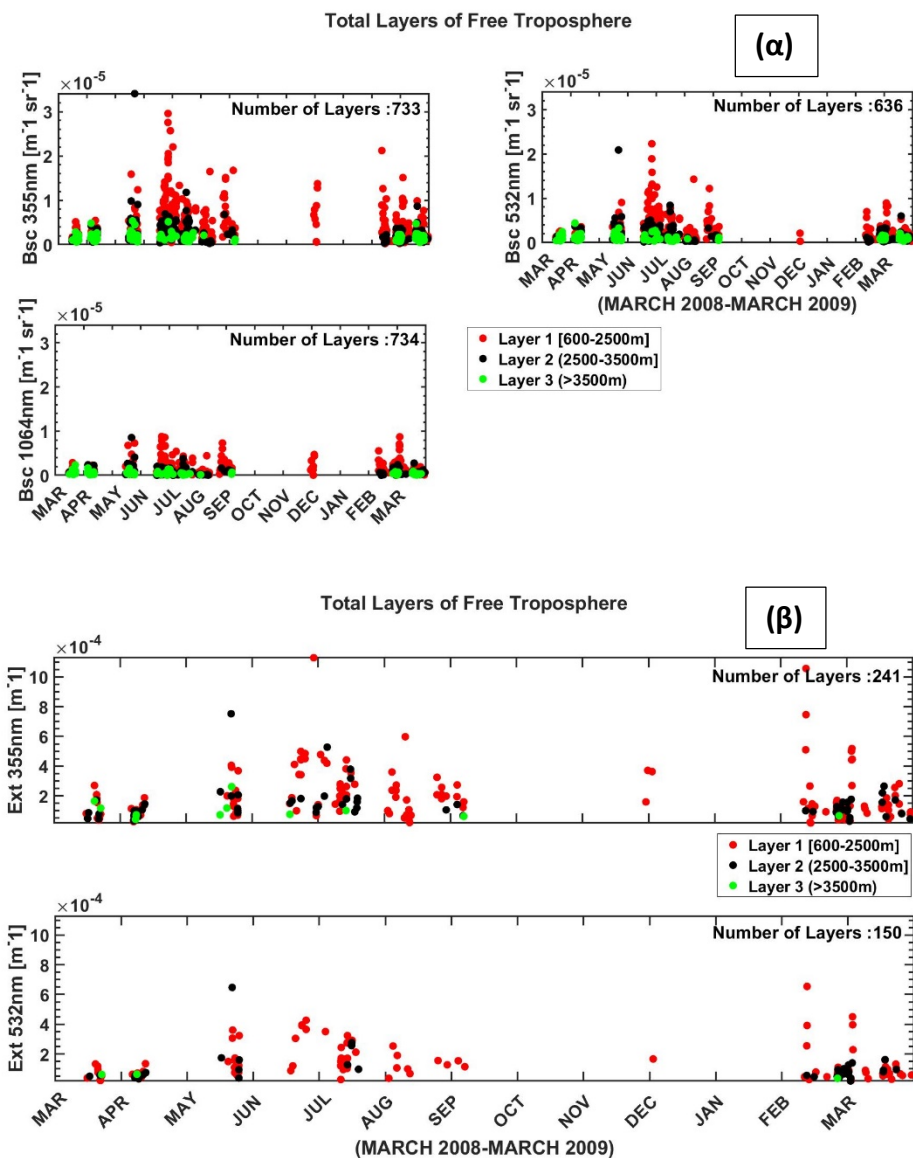
Στο Σχήμα 14(α),(β) τους μήνες Απρίλιος έως Ιούνιος 2008 καθώς και από τον Σεπτέμβρη έως τον Δεκέμβρη 2008 παρουσιάζεται μια αυξητική τάση στους συντελεστές οπισθοσκέδασης και εξασθένησης στο μήκος κύματος 355nm, ένδειξη πως στην περιοχή μελέτης παρουσιάζεται μεγαλύτερη συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων, στο τελευταίο διάστημα που προαναφέρθηκε η παρατήρηση δεν είναι αντιπροσωπευτική λόγω του μικρού αριθμού των μετρήσεων.



**Σχήμα 14:** Απεικόνιση των συντελεστών οπισθοσκέδασης (α) και συντελεστών εξασθένησης (β), με παράλληλη αποτύπωση των στρωμάτων που αντιστοιχούν σε κάθε μήνα στην κορυφή των διαγραμμάτων.

Οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις στους συντελεστές οπισθοσκέδασης και εξασθένησης στο μήκος κύματος 355nm είναι  $(3.7 \pm 3.8) \cdot 10^{-6} \text{ [m}^{-1} \text{ sr}^{-1}]$  και  $(1.8 \pm 1.5) \cdot 10^{-4} \text{ [m}^{-1}]$  αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 15 εμφανίζονται σε όλες τους μήνες, στρώματα αιωρούμενων σωματιδίων (Layers) με κεντρικά ύψη που αντιστοιχούν και στις τρεις κατηγορίες υψών με εξαίρεση τον μήνα Δεκέμβρη όπου παρατηρούνται στρώματα που ανήκουν μόνο στην κατηγορία με κεντρικά ύψη από 600-2500m. Τα στρώματα με τον μεγαλύτερο συντελεστή οπισθοσκέδασης και εξασθένησης, στα 355nm, αντιστοιχούν σε μεγαλύτερη συγκέντρωση σωματιδίων και σύμφωνα με την χρωματική κλίμακα εντάσσονται στην πρώτη κατηγορία υψών (600-2500m) δηλαδή βρίσκονται χαμηλότερα στο έδαφος σε σύγκριση με τα στρώματα με τον μικρότερο συντελεστή οπισθοσκέδασης και εξασθένησης, στα 355nm, που χαρακτηρίζονται από μικρότερη συγκέντρωση σωματιδίων και κατατάσσονται ψηλότερα στην ατμόσφαιρα (>3500m). Συμπερασματικά προκύπτει πως μεγαλύτερη ποσότητα αιωρούμενων σωματιδίων βρίσκεται χαμηλά στο έδαφος σε σύγκριση με τα ψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας.

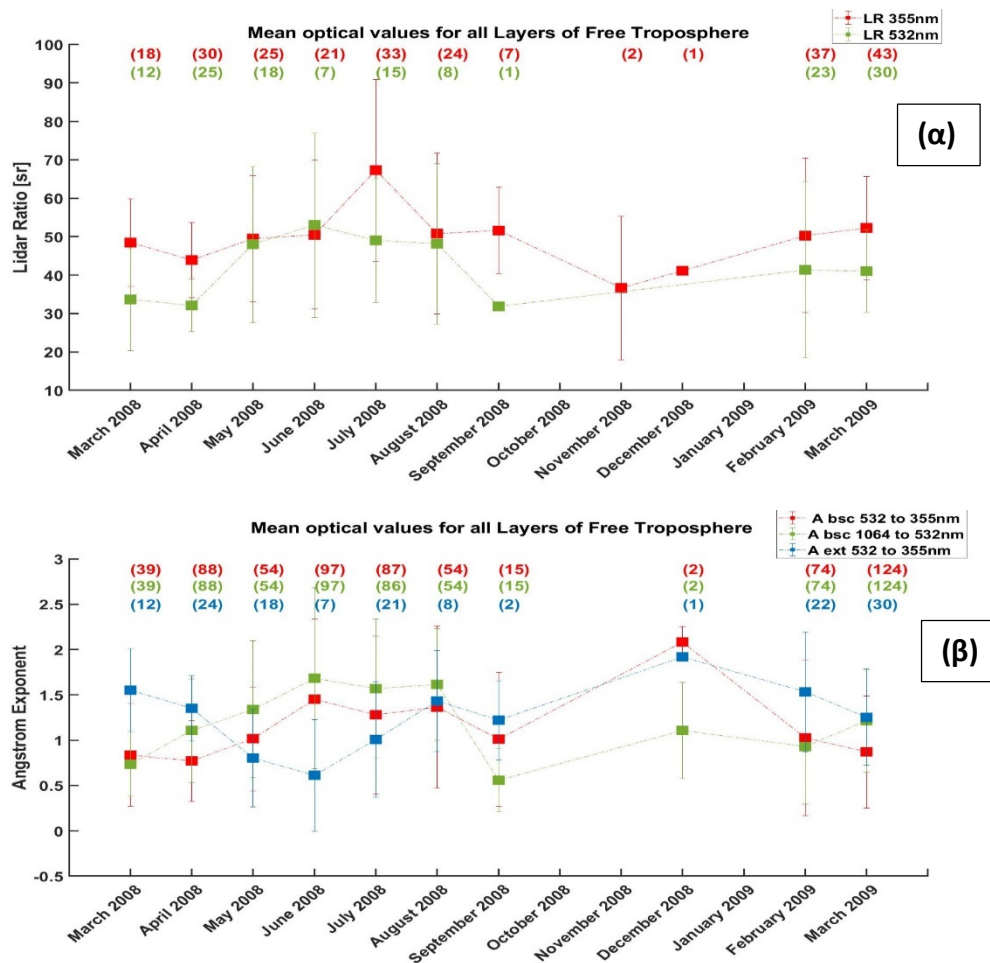


**Σχήμα 15:** Ο συντελεστής εξασθένισης (backscatter coefficient) (α) και συντελεστής οπισθοσκέδασης (β) για τα στρώματα της ελεύθερης τροπόσφαιρας συναρτήσει των μηνών με χρωματικό διαχωρισμό ως προς τις τρεις κατηγορίες εύρους κεντρικών υψών.

Οι εντατικές μεταβλητές, λόγος lidar (Lidar ratio) και ο εκθέτης Ångström (Ångström exponent) αποτελούν ένδειξη του τύπου και του μεγέθους των σωματιδίων.

Στο Σχήμα 16(α) παρατηρώντας τις τιμές του λόγου lidar στα 355 παρατηρούμε μια σχετική σταθερότητα των τιμών μέσα στον χρόνο με εξαίρεση τον μήνα Ιούλιο 2008 όπου παρουσιάζεται απότομη αύξηση, η οποία μπορεί να αποδίδεται στην έντονη παρουσία απορροφητικών σωματιδίων κατά πάσα πιθανότητα σωματιδίων καπνού. Από τον εκθέτη Ångström του συντελεστή εξασθένισης 532 και 355nm στο Σχήμα 16(β) παρατηρείται μια τάση μείωσης από τους μήνες Απρίλιος 2008 έως Ιούνιος 2008 κάτι που αποτελεί ένδειξη αύξησης του μεγέθους των σωματιδίων, η αντίθετη

συμπεριφορά παρατηρείται από τους μήνες Ιούνιος 2008 έως Αύγουστος 2008, δηλώνοντας την ύπαρξη μικρότερων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα.

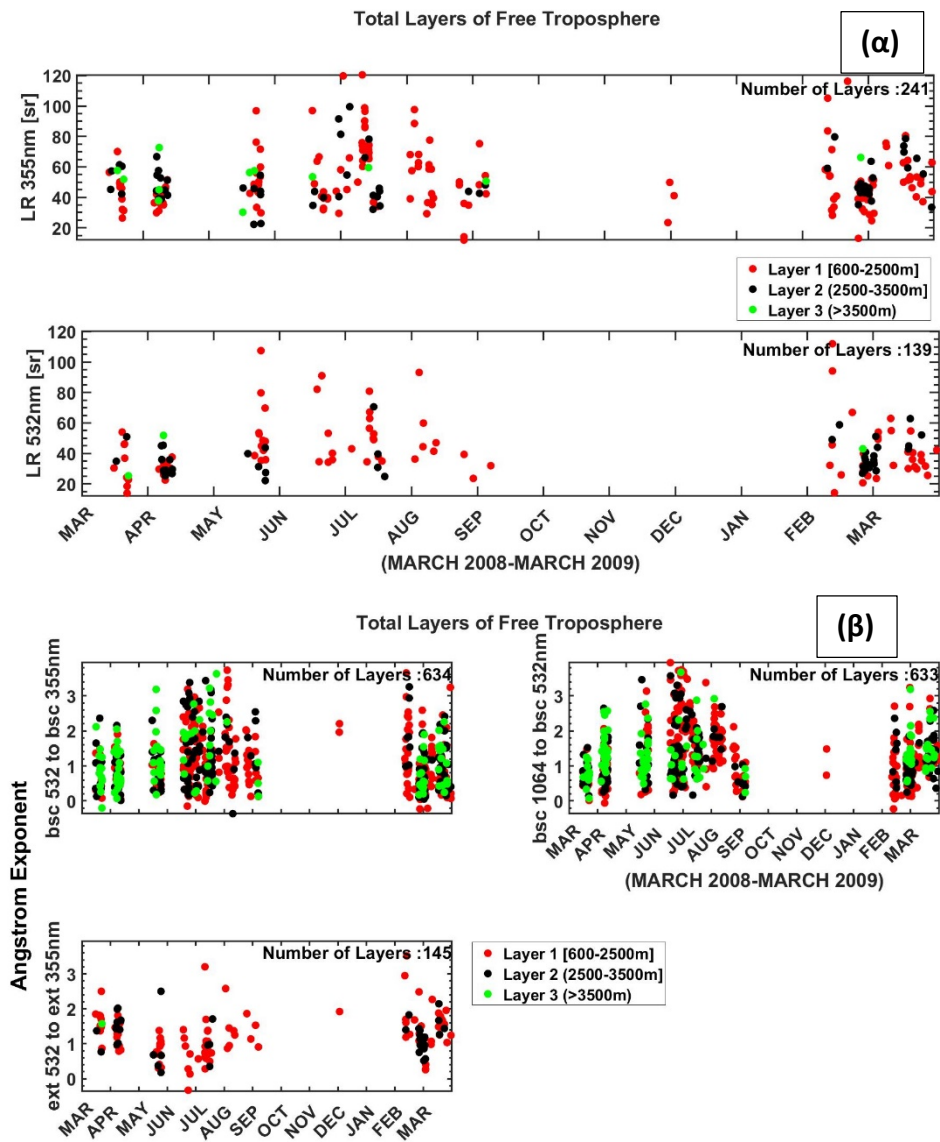


**Σχήμα 16:** Μέση τιμή και τυπική απόκλιση των εντατικών μεταβλητών συναρτήσεϊ των μηνών καταγραφής , λόγος lidar (lidar ratio)(α) και εκθέτης Ångström (Ångström exponent)(β) συναρτήσεϊ του συντελεστή εξασθένησεϊ και του συντελεστή οπισθοσκεδάσεϊ.

Η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση που παρατηρείται στις τιμές του λόγου lidar στα 355 και στα 532nm είναι  $52 \pm 18$  sr και  $42 \pm 17$  sr. Η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του εκθέτη Ångström από τους συντελεστές οπισθοσκεδάσεϊ 1064 και 532nm  $1.3 \pm 0.8$  αποτελεί ένδειξη ύπαρξεϊ ρυπασμένων σωματιδίων από τον περιοχή της Βορείας και Νότιας Ινδίας (Muller et al. 2007). Η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του εκθέτη Ångström από τους συντελεστές εξασθένησεϊ 532 και 355nm,  $(1.2 \pm 0.6)$ , υποδηλώνει πως τα σωματίδια έχουν προέλευση από την Βόρεια Ινδία (Muller et al. 2007).

Τέλος στο Σχήμα 17(α) παρατηρούμε πως στο λόγο lidar στα 355nm οι τιμές παρουσιάζουν μικρότερη διασπορά ως προς το εύρος τιμών τους μήνες Μάρτιο 2008, Απρίλιο 2008 καθώς και Μάρτη 2009 σε σύγκριση με τους άλλους μήνες. Στο Σχήμα 17(β) του εκθέτη Ångström του συντελεστή οπισθοσκεδάσεϊ 532 και 1064nm δεν παρατηρείται έντονος διαχωρισμός μεταξύ των στρωμάτων, δηλαδή το μέγεθος των

σωματιδίων φαίνεται σχετικά ανεξάρτητο από το ύψος, το ίδιο παρατηρείται και από τον εκθέτη Ångström του συντελεστή εξασθένησης 355 και 532nm.



**Σχήμα 17:** Παρουσιάζεται το σύνολο των τιμών των εντατικών μεταβλητών, λόγος lidar (lidar ratio) (α) και εκθέτης Ångström (Ångström exponent) (β) για τα στρώματα της ελεύθερης τροπόσφαιρας συναρτήσεως των μηνών με χρωματικό διαχωρισμό ως προς τις τρεις κατηγορίες εύρους κεντρικών υψών.



Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται συγκεντρωτικά ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση του κεντρικού ύψους και όλων των οπτικών ιδιοτήτων στην διάρκεια του ενός χρόνου.

**Πίνακας 2:** Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις του κεντρικού ύψους και των οπτικών ιδιοτήτων στην διάρκεια ενός χρόνου.

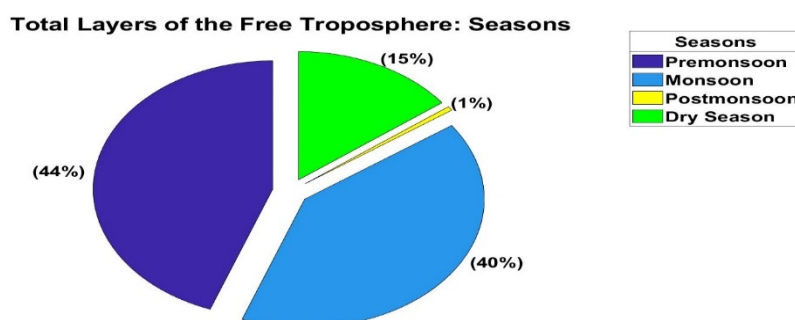
Center Height (m)	Bsc. coef. 355 nm ( $10^{-6}$ Mm $^{-1}$ sr $^{-1}$ )	Bsc. coef. 532 nm ( $10^{-6}$ Mm $^{-1}$ sr $^{-1}$ )	Bsc. coef. 1064 nm ( $10^{-6}$ Mm $^{-1}$ sr $^{-1}$ )	Ext. coef. 355 nm ( $10^{-4}$ Mm $^{-1}$ )	Ext. coef. 532 nm ( $10^{-4}$ Mm $^{-1}$ )
2390±1030	3.7±3.8	2.3±2.5	1.1±1.3	1.8±1.5	1.3±1.1

Lidar ratio 355 nm (sr)	Lidar ratio 532 nm (sr)	Ångström exp. b355 / b532	Ångström exp. b532 / b1064	Ångström exp. ext355 / ext532
52±18	42±17	1.1±0.8	1.3±0.8	1.2±0.6

### 3.4 Εποχική Ανάλυση των γεωμετρικών και οπτικών ιδιοτήτων

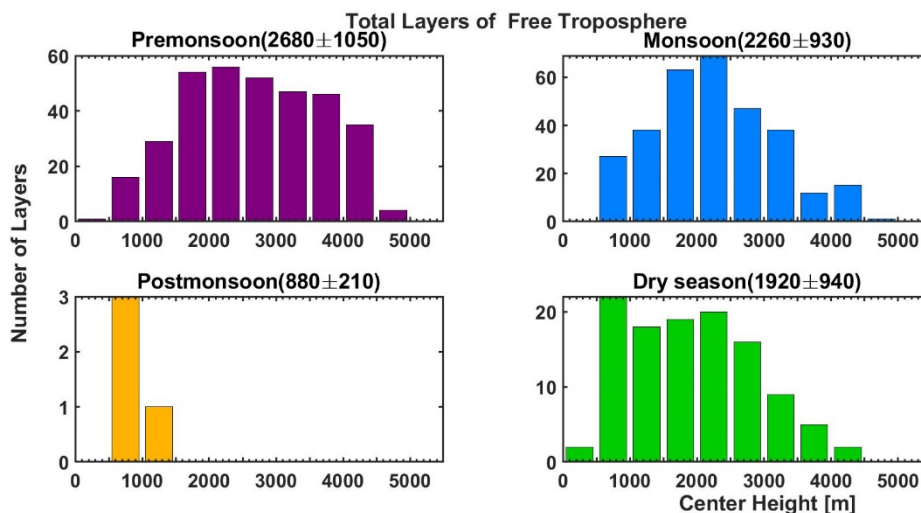
Οι γεωμετρικές και οπτικές παράμετροι των στρωμάτων της ελεύθερης τροπόσφαιρας χωρίσθηκαν περαιτέρω σε τέσσερις χρονικές περιόδους, Προμουσωνική (Premonsoon) (Μάρτης –Μάιος), Μουσωνική (Monsoon) (Ιούνιος-Σεπτέμβριος), Μεταμουσωνική (Postmonsoon) ( Οκτώβρης-Νοέμβρης) και Ξηρή περίοδος (Dry season) (Δεκέμβρης-Φλεβάρης).

Στο Σχήμα 18 παρουσιάζεται το ποσοστό των στρωμάτων της ελεύθερης τροπόσφαιρας που αντιστοιχεί σε κάθε μια από τις τέσσερις εποχικές περιόδους. Τα περισσότερα στρώματα ανήκουν στην Προμουσωνική Περίοδο (Μάρτιος 2008-Μάιος 2008) και τα λιγότερα στρώματα ανήκουν στην Μεταμουσωνική περίοδο (Οκτώβρης 2008 –Νοέμβρης 2008), λόγω του πολύ χαμηλού αριθμού μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν μέσω του οργάνου lidar.



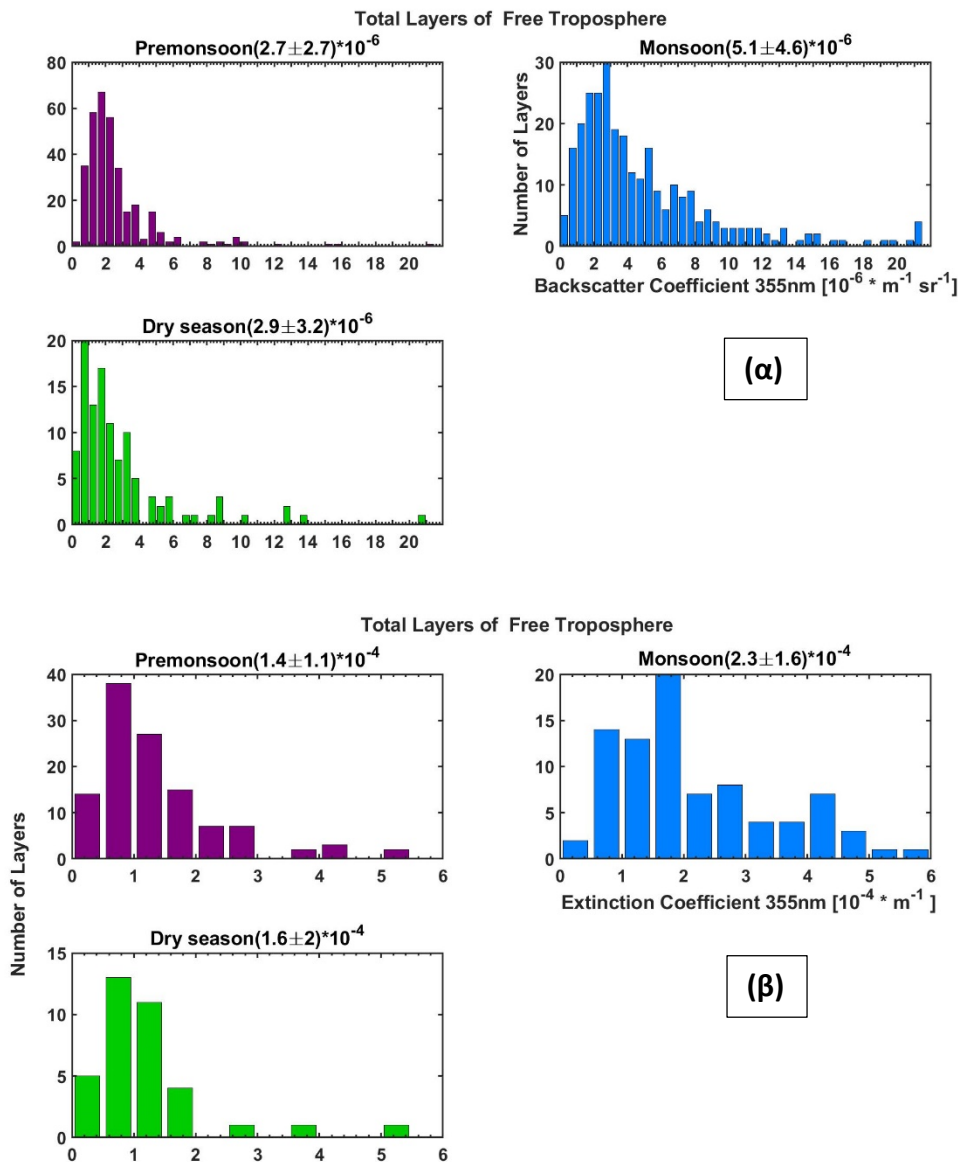
**Σχήμα 18:** Το ποσοστό των στρωμάτων της ελεύθερης τροπόσφαιρας που εμφανίσθηκαν σε κάθε μια από τις τέσσερις εποχικές περιόδους.

Το κεντρικό ύψος  $= \frac{\text{βάση} + \text{κορυφή}}{2}$  ( $\text{center height} = \frac{\text{base} + \text{top}}{2}$ ) παρουσιάζει μια καθαρά εποχική διακύμανση όπως φαίνεται στο Σχήμα 19. Το μεγαλύτερο μέσο ύψος εντοπίζεται την Μουσωνική περίοδο ( $2260 \pm 930\text{m}$ ) και το μικρότερο την Ξηρή περίοδο ( $1920 \pm 940\text{m}$ ) εξαιρείται η Μεταμουσωνική περίοδος από την μελέτη μας μιας και δεν υπάρχει επαρκής αριθμός μετρήσεων.



**Σχήμα 19:** Το κεντρικό ύψος των στρωμάτων χωρισμένο στις τέσσερις εποχικές περιόδους.

Οι συντελεστές οπισθοσκέδασης και εξασθένησης στα 355nm παρουσιάζονται στο Σχήμα 20. Την Μουσωνική περίοδο φαίνεται πως ο συντελεστής οπισθοσκέδασης έχει την μεγαλύτερη μέση τιμή ( $5.1 \pm 4.6$ )  $\cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$  και ακραίες τιμές να φθάνουν στα  $20 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ , η συγκέντρωση σωματιδίων είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με τις δύο άλλες υποεξέταση εποχές. Η μικρότερη μέση τιμή παρουσιάζεται την Προμουσωνική περίοδο ( $2.7 \pm 2.7$ )  $\cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ . Η εποχική διακύμανση της μέσης τιμής του συντελεστή εξασθένησης ακολουθεί την ίδια συμπεριφορά με τον συντελεστή οπισθοσκέδασης. Η Μουσωνική περίοδος έχει την μεγαλύτερη μέση τιμή ( $2.3 \pm 1.6$ )  $\cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$  και η Προμουσωνική την μικρότερη μέση τιμή ( $1.4 \pm 1.1$ )  $\cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ .

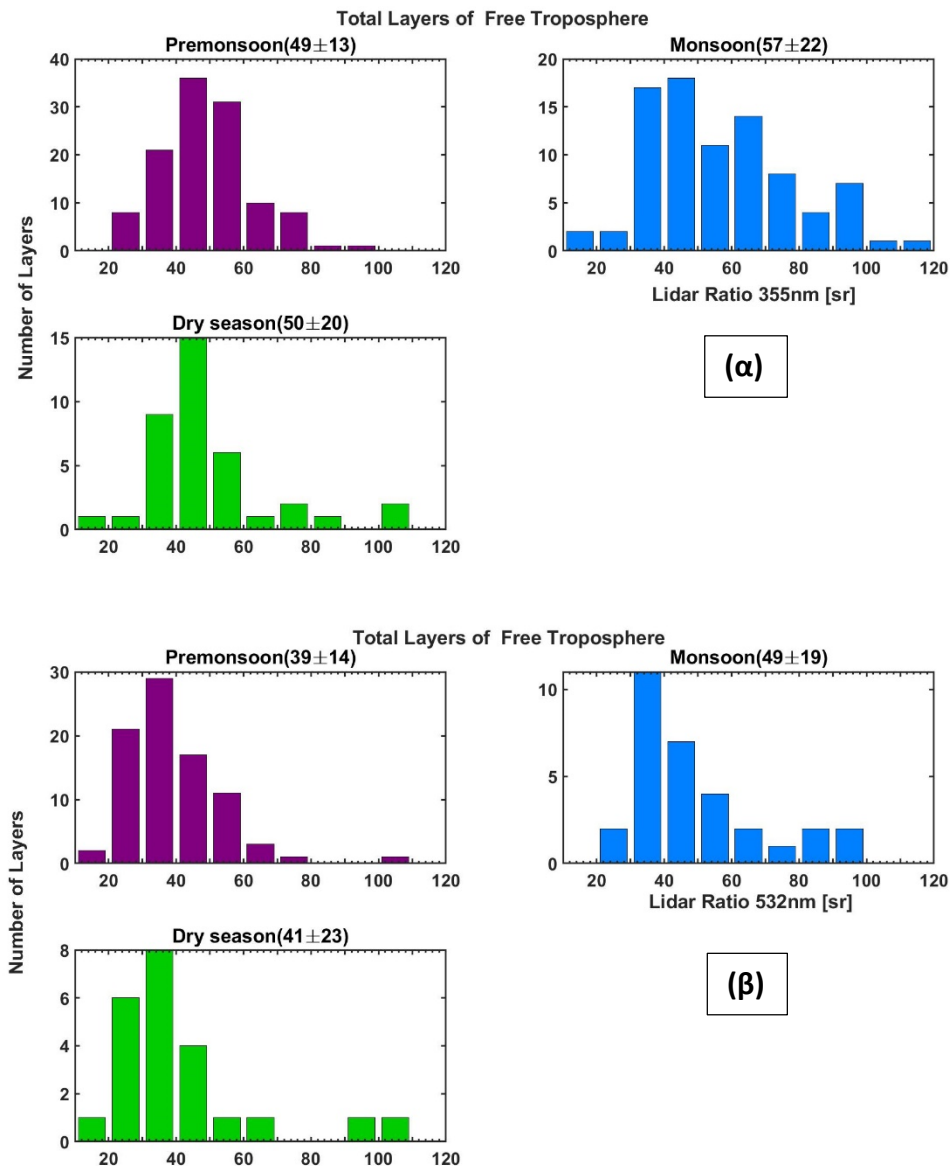


**Σχήμα 20:** Απεικόνιση του συντελεστή οπισθοσκέδασης (backscatter coefficient) (α) και του συντελεστή εξασθένησης (extinction coefficient) (β) για τα στρώματα της ελεύθερης τροπόσφαιρας συναρτήσει των εποχικών περιόδων.

Οι εντατικές μεταβλητές, λόγος lidar (Lidar ratio) και ο εκθέτης Ångström (Ångström exponent) αποτελούν ένδειξη του τύπου και του μεγέθους των σωματιδίων.

Σύμφωνα με το Σχήμα 21 οι εποχικοί μέσοι όροι του λόγου lidar στα 355nm ποικίλουν από  $49 \pm 13 \text{ sr}$  την Προμουςωνική περίοδο μέχρι  $57 \pm 22 \text{ sr}$  την Μουσιωνική περίοδο και η αντίστοιχη διακύμανση στα 532nm είναι  $39 \pm 14 \text{ sr}$  και  $49 \pm 19 \text{ sr}$ . Την Προμουςωνική περίοδο καθώς και την Ξηρή περίοδο ο λόγος lidar στα 532nm κυμαίνεται γύρω στα 40 sr κάτι που αναδεικνύει την ύπαρξη καθαρότερων αέριων μαζών με σχετικά πιο γηρασμένα σωματίδια, την Ξηρή περίοδο συγκεκριμένα τα στρώματα των αιωρούμενων σωματιδίων ήταν πιο κοντά στο έδαφος σε σύγκριση με τις άλλες περιόδους. Ο λόγος lidar στα 532nm την Μουσιωνική περίοδο κυμαίνεται στα 50 sr, καταδεικνύοντας την ύπαρξη σωματιδίων καπνού κάτι που υποστηρίζεται από την

τιμή του εκθέτη Ångström του συντελεστή εξασθένισης στα 355 και 532nm,  $1.0 \pm 0.6$  [Muller et al.,2007] στο Σχήμα 22.

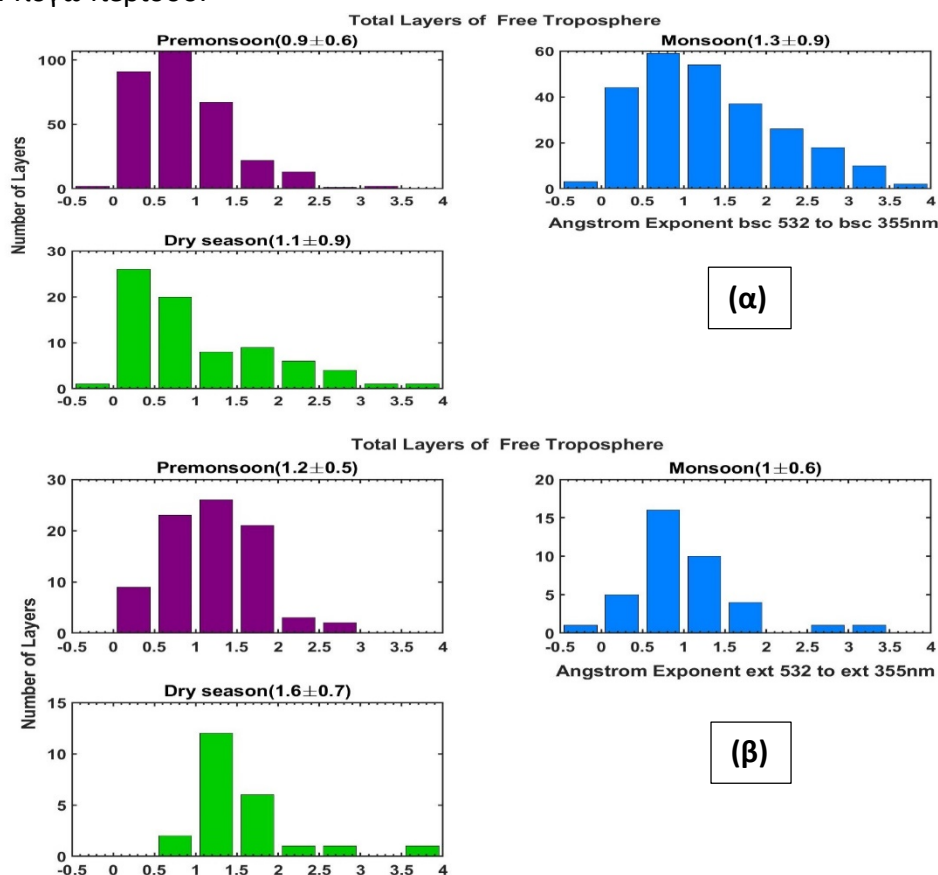


**Σχήμα 21:** Αποτύπωση των τιμών του λόγου lidar(lidar ratio) στα 355(α) και 532nm (β) συναρτήσει των εποχών.

Ο εκθέτης Ångström (AE) υπολογίζεται από τον συντελεστή οπισθοσκέδασης για δύο συνδυασμούς μηκών κύματος (355-532nm, 532-1064nm) καθώς και από ένα συνδυασμό μηκών κύματος στα 355-532nm στην περίπτωση του συντελεστή εξασθένισης. Ο εκθέτης Ångström συναρτήσε του συντελεστή εξασθένισης ( $AE_{ext}$ ) αναφέρεται στο μέγεθος των σωματιδίων, μεγαλύτερος ο εκθέτης, μικρότερα σωματίδια και αντίθετα. Ο εκθέτης Ångström συναρτήσε του συντελεστή οπισθοσκέδασης ( $AE_{bsc}$ ), εάν χρησιμοποιηθεί μαζί με τον μιγαδικό δείκτη διάθλασης, εξαρτάται επίσης από το μέγεθος των σωματιδίων. Συνολικά ο  $AE_{bsc}$  παρουσιάζει την

μεγαλύτερη μέση τιμή την Μουσωνική περίοδο ( $AE_{bsc\ 532-355}=1,3\pm 0,9$ ) και τη μικρότερη μέση τιμή την Προμουσωνική ( $AE_{bsc\ 532-355}=0,9\pm 0,6$ ), Σχήμα 22α.

Ο εκθέτης Ångström συναρτήσεως του συντελεστή εξασθένησης στον συνδυασμό μηκών κύματος 355-532nm ( $AE_{ext355-532}$ ), Σχήμα 22β βρέθηκε να έχει την υψηλότερη μέση τιμή την Ξηρή περίοδο ( $1,6\pm 0,7$ ) και την χαμηλότερη μέση τιμή την Μουσωνική περίοδο ( $1\pm 0,6$ ). Ως αποτέλεσμα οι τιμές μας δείχνουν πως την Μουσωνική περίοδο επικρατούν τα μεγαλύτερα σε μέγεθος σωματίδια και τα μικρότερα επικρατούν την Ξηρή περίοδο. Αυτό έχει νόημα, από την στιγμή που παρατηρείται περισσότερη καύση βιομάζας για την θέρμανση και το μαγείρεμα την Ξηρή περίοδο με αποτέλεσμα να παράγονται μικρότερα σωματίδια, το οποίο συμφωνεί με την έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους Ganguly et al. [2006a, b] οι οποίοι παρατήρησαν μεγαλύτερη συγκέντρωση μικρών σωματιδίων τους χειμερινούς μήνες, που στην περίπτωση μας συμπίπτουν με την Ξηρή περίοδο. Επιπρόσθετα η μεγάλη τιμή του ( $AE_{ext355-532}$ ) την Ξηρή περίοδο οφείλεται στα χαμηλότερα ποσοστά βροχόπτωσης, κατά συνέπεια μεγαλύτερα σωματίδια παραμένουν περισσότερο στην ατμόσφαιρα σε χαμηλότερα υψόμετρα, από την στιγμή που δεν καθιζάνουν. Οι Hyvarinen et al. [2010] ανέφεραν μια μείωση στο ποσοστό των μικρότερων σωματιδίων την Μουσωνική περίοδο κάτι που συμφωνεί με την μικρότερη μέση τιμή του ( $AE_{ext355-532}$ ) την εν λόγω περίοδο.



**Σχήμα 22:** Αποτύπωση των τιμών του εκθέτη Ångström του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 532 - 355nm (α) και του συντελεστή εξασθένησης στα 532 - 355nm (β) συναρτήσεως των εποχών.

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζεται συγκεντρωτικά ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση του κεντρικού ύψους και όλων των οπτικών ιδιοτήτων ανα εποχή.

**Πίνακας 3:** Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις του κεντρικού ύψους και των οπτικών ιδιοτήτων ανα εποχή.

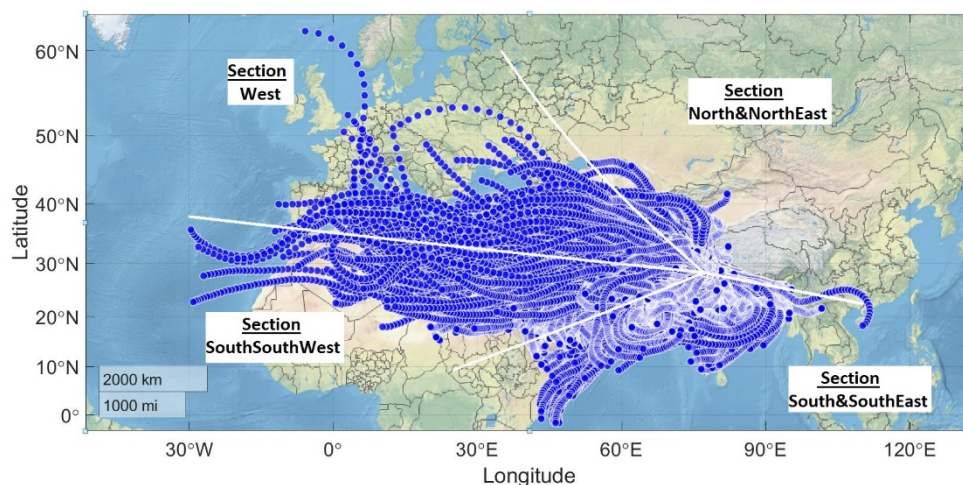
Seasons	Center Height (m)	Bsc. coef. 355 nm ( $10^{-6}$ Mm $^{-1}$ sr $^{-1}$ )	Bsc. coef. 532 nm ( $10^{-6}$ Mm $^{-1}$ sr $^{-1}$ )	Bsc. coef. 1064 nm ( $10^{-6}$ Mm $^{-1}$ sr $^{-1}$ )	Ext. coef. 355 nm ( $10^{-4}$ Mm $^{-1}$ )	Ext. coef. 532 nm ( $10^{-4}$ Mm $^{-1}$ )
Premonsoon	2680±1050	2.7±2.7	1.8±1.7	9.9±1.2	1.4±1.1	1.0±0.9
Monsoon	2260±930	5.1±4.6	3.1±3.2	1.3±1.5	2.3±1.6	2.0±1.0
Postmonsoon	880±209	6.8±1.1	--	2.0±1.1	2.7±1.5	--
Dry Season	1920±940	2.9±3.2	1.4±1.2	1.1±1.0	1.6±2.0	1.1±1.4

Seasons	Lidar ratio 355 nm (sr)	Lidar ratio 532 nm (sr)	Ångström exp. b355 / b532	Ångström exp. b532 / b1064	Ångström exp. ext355 / ext532
Premonsoon	49±13	39±14	0.9±0.6	1.1±0.6	1.2±0.5
Monsoon	57±22	49±19	1.3±0.9	1.6±0.9	1.0±0.6
Postmonsoon	37±19	--	--	--	--
Dry Season	50±20	41±23	1.1±0.9	0.9±0.6	1.6±0.7

### 3.5. Στατιστική ανάλυση των γεωμετρικών και οπτικών ιδιοτήτων με βάση την κατευθυντικότητα των οπισθοτροχιών

Περαιτέρω μελέτη πραγματοποιήθηκε με την χρήση του μετεωρολογικού μοντέλου Hysplit (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) που αναλύθηκε στην υποενότητα 2.5.1.. Χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο (HYSPLIT) προκειμένου να παράγουμε 4 ημερών οπισθοτροχιές για κάθε στρώμα αιωρούμενων σωματιδίων που καταγράφεται στην περιοχή μας και ανήκει στην ελεύθερη τροπόσφαιρα. Τεσσάρων ημερών οπισθοτροχιές δημιουργήθηκαν επειδή εκτείνονται πίσω αρκετά στον χρόνο και σε απόσταση για να καλύψουν τις κυριότερες πηγές που κατά πάσα πιθανότητα επηρεάζουν την περιοχή που μελετάμε. Για την δημιουργία της κάθε οπισθοτροχιάς δόθηκε στο μοντέλο το κεντρικό ύψος του αντίστοιχου στρώματος αιωρούμενων σωματιδίων που καταγράφεται στην περιοχή μελέτη μας καθώς και η ημερομηνία και ώρα της αντίστοιχης καταγραφής. Συνεπώς από τα 767 στρώματα της ελεύθερης τροπόσφαιρας δημιουργήθηκαν 767 οπισθοτροχιές οι οποίες αποτυπώνονται στο Σχήμα 23. Οι οπισθοτροχιές χωρίστηκαν οπτικά ως προς την κατευθυντικότητά τους σε 4 κύριους και 2 υποτομείς. Ο οπτικός διαχωρισμός ενέχει τον κίνδυνο οι οπισθοτροχιές να καταλαμβάνουν περισσότερους από έναν τομέα, κάτι που θα εξετασθεί μετέπειτα. Οι κύριοι τομείς είναι Βόρειος & Βορειοανατολικός τομέας (North&NorthEast section), Νότιος και Νοτιοανατολικός τομέας (South&SouthEast

section), Δυτικός τομέας (West section) και Νοτιονοτιοδυτικός τομέας (SouthSouthWest section).



**Σχήμα 23:** Αποτύπωση των οπισθοτροχιών και των τομέων με βάση την κατευθυντικότητα τους.

Οι δύο υποτομείς αναφέρονται στους δύο τελευταίους τομείς οι οποίοι χωρίστηκαν περαιτέρω σε μακρινής μεταφοράς (Long Range Transport) και κοντινής μεταφοράς (Short Range Transport). Πιο αναλυτικά ο δυτικός τομέας (Section West) χωρίζεται περαιτέρω σε τομέα μακρινής μεταφοράς (Long Range) και κοντινής μεταφοράς (Short Range). Ο Νοτιονοτιοδυτικός τομέας (Section SouthSouthWest) χωρίζεται σε τομέα μακρινής μεταφοράς (Long Range) και κοντινής μεταφοράς (Short Range).

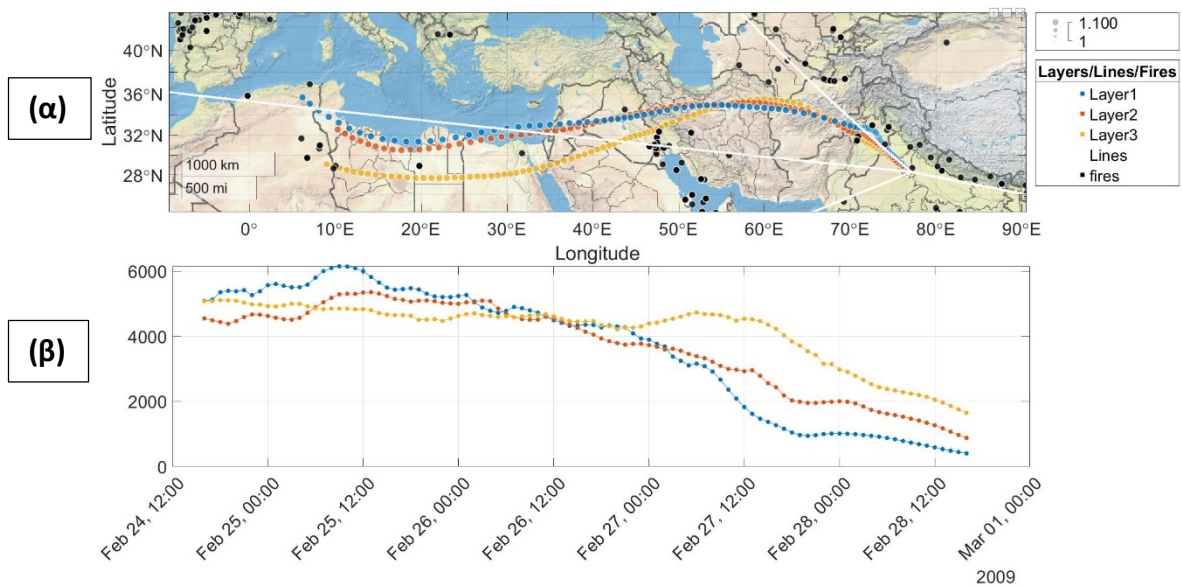
Ο περαιτέρω διαχωρισμός των παραπάνω τομέων σε μακρινής και κοντινής μεταφοράς πραγματοποιήθηκε μετατρέποντας τις καρτεσιανές συντεταγμένες, που χρησιμοποιήθηκαν για την αποτύπωση των οπισθοτροχιών στον χάρτη του Σχήματος 23 σε πολικές συντεταγμένες. Στην περίπτωση του κάθε τομέα το κριτήριο που κατατάσσει μια οπισθοτροχιά σε μακρινής ή κοντινής μεταφοράς είναι η μέση τιμή της ακτίνας, που προκύπτει λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις μέγιστες ακτίνες της κάθε οπισθοτροχιάς και στην συνέχεια βρίσκοντας την μέση τους τιμή, το κέντρο των οπισθοτροχιών μας είναι η Ινδία. Συνεπώς ο κάθε τομέας χαρακτηρίζεται από μια τιμή ακτίνας κάτι πολύ χρήσιμο για την συνέχεια. Στην περίπτωση που μια ακτίνα είναι μεγαλύτερη από την μέση τιμή της ακτίνας τότε η οπισθοτροχιά κατατάσσεται σε μακρινής μεταφοράς ενώ στην περίπτωση που η ακτίνα είναι μικρότερη κατατάσσεται σε κοντινής μεταφοράς.

Προκειμένου να προχωρήσουμε στην εύρεση μιας μέσης οπισθοτροχιάς για κάθε έναν από τους παραπάνω τομείς αλλά και για να υπολογισθεί η μέση ακτίνα των δύο δευτερευόντων τομέων ώστε να πραγματοποιηθεί ο διαχωρισμός σε τομέα μακρινής και κοντινής μεταφοράς είναι επιθυμητό να ενταχθεί κάθε οπισθοτροχιά σε έναν και μόνο τομέα στην περίπτωση που ανήκει σε δύο ή περισσότερους τομείς ταυτόχρονα. Στην περίπτωση που η οπισθοτροχιά ανήκει σε δύο ή περισσότερους τομείς εντάσσεται μετά από επιλογή σε έναν μόνο τομέα με βάση το τμήμα της που επηρεάζεται περισσότερο από τις πηγές ρύπανσης, οι οποίες εμφανίζονται στην

πορεία της μέχρι να καταλήξει στον τόπο μέτρησης μας. Τα κριτήρια που επιλέχθηκαν για να καθορισθεί εάν μια οπισθοτροχιά επηρεάζεται από πηγές ρύπανσης είναι το ύψος καθώς και η οριζόντια ταχύτητα διέλευσης της από τις πηγές ρύπανσης που παρουσιάζονται στην πορεία της. Πιο συγκεκριμένα τα σωματίδια καπνού(smoke) κυμαίνονται σε ύψη 1.6 έως 5.9km, με μέσο ύψος 3.8km [Amiridis et al., 2010]. Τα ερημικά σωματίδια (dust) κυμαίνονται από 1 έως 2km το φθινόπωρο, τον χειμώνα και την άνοιξη και από τα 2 έως τα 3km την καλοκαιρινή περίοδο, σε μικρότερο ποσοστό επηρεάζουν στρώματα σε ύψος από 3 έως 6km [Liu et al.,2008]. Τα θαλάσσια σωματίδια λόγω του μεγέθους τους φθάνουν μέχρι το 1km. Τα ηπειρωτικά σωματίδια κυμαίνονται μέχρι τα 2 km. Επιπρόσθετο κριτήριο είναι και η οριζόντια ταχύτητα κίνησης της κάθε οπισθοτροχιάς, το κομμάτι της οπισθοτροχιάς που διέρχεται από πηγή αιωρούμενων σωματιδίων με μεγαλύτερη ταχύτητα από την μέση ταχύτητα κίνησης της θα συλλέξει λιγότερα σωματίδια σε σύγκριση με το κομμάτι της οπισθοτροχιάς που θα διέλθει με μικρότερη ταχύτητα από την μέση ταχύτητα της. Η μέση ταχύτητα υπολογίζεται για την κάθε οπισθοτροχιά ξεχωριστά.

Στο Σχήμα 24 δίνεται ένα παράδειγμα κατάταξης των οπισθοτροχιών σε ένα και μόνο τομέα, οι τρεις οπισθοτροχιές καταλαμβάνουν τμήμα του Δυτικού τομέα καθώς και τμήμα του Νοτιονοτιοδυτικού τομέα, το κομμάτι της οπισθοτροχιάς που θα εξετασθεί ως προς το είδος των σωματιδίων που περιέχει καθώς και ως προς την κατευθυντικότητα του είναι το κομμάτι που καταλαμβάνει τον Δυτικό τομέα. Η αιτιολόγηση κατάταξης της οπισθοτροχιάς στον Δυτικό τομέα οφείλεται τόσο στα μεγάλα ύψη που παρατηρούνται στο κομμάτι της οπισθοτροχιάς που καταλαμβάνει τον Νοτιονοτιοδυτικό τομέα, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζεται από τις τέσσερις πηγές αιωρούμενων σωματιδίων που προαναφέρθηκαν (καπνός, σκόνη, θαλάσσια, ηπειρωτικά), καθώς και της ταχύτητας που παρουσιάζει η κάθε οπισθοτροχιά στον εν λόγω τομέα η οποία είναι μεγαλύτερη της μέσης ταχύτητας κίνησης.



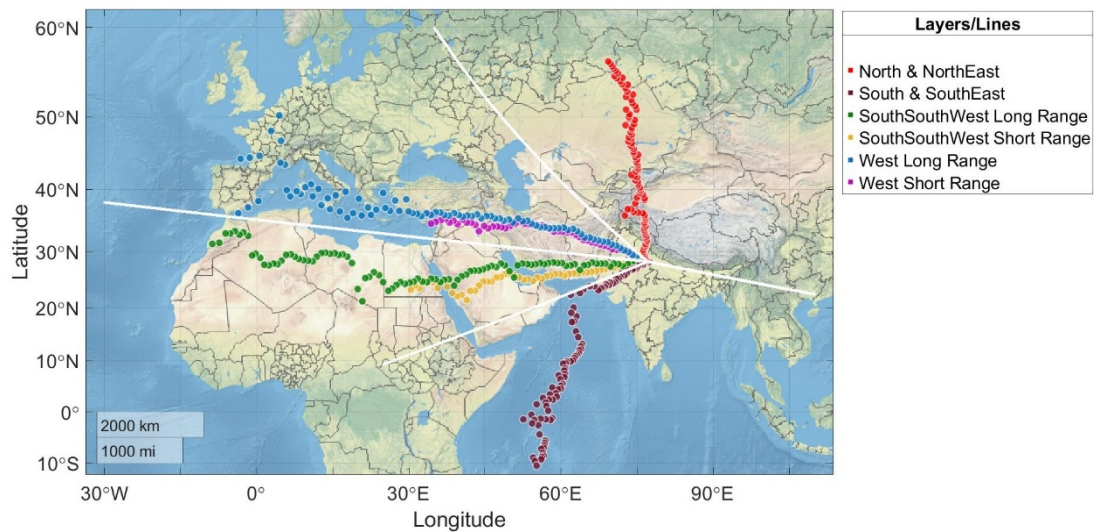


**Σχήμα 24:** Στο επάνω κομμάτι (α) αποτυπώνεται η πορεία των οπισθοτροχιών μια για κάθε στρώμα (Layer) που παρατηρήθηκε στον τόπο καταγραφής, την ημερομηνία και ώρα 28 Φλεβάρη 2009 17:00. Οι λευκές γραμμές συμβολίζουν τον διαχωρισμό σε τομείς, οι μαύρες τελείες αποτυπώνουν τις φωτιές που προέρχονται από τα δεδομένα του οργάνου MODIS με επίπεδο εμπιστοσύνης μεγαλύτερο του 80%. Στο κομμάτι (β) αποτυπώνεται το ύψος κίνησης της οπισθοτροχιάς, με την ημερομηνία στα δεξιά να αντιστοιχεί στην ημερομηνία της καταγραφής στον τόπο μέτρησης μας (28 Φλεβάρη 2009 17:00).

Δεδομένου πως το κομμάτι των οπισθοτροχιών που εξετάζεται είναι αυτό που ανήκει στον Δυτικό τομέα είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί η κατάταξη στον Δυτικό τομέα μακρινής μεταφοράς (West Long Range) ή στον Δυτικό τομέα κοντινής μεταφοράς (West Short Range). Ο τρόπος κατάταξης περιεγράφηκε πρωτύτερα μέσω της μετατροπής των καρτεσιανών σε πολικές συντεταγμένες και της σύγκρισης των ακτίνων κάθε οπισθοτροχιάς με την μέση ακτίνα του τομέα. Στην περίπτωση του Σχήματος 24 και οι τρεις οπισθοτροχιές ανήκουν στον Δυτικό τομέα κοντινής μεταφοράς (West Short Range) λόγω του ότι η ακτίνα της κάθε οπισθοτροχιάς είναι μικρότερη από την μέση ακτίνα του τομέα. Ακολουθώντας την ίδια λογική η κατάταξη πραγματοποιήθηκε και για τα 767 στρώματα της ελεύθερης τροπόσφαιρας.

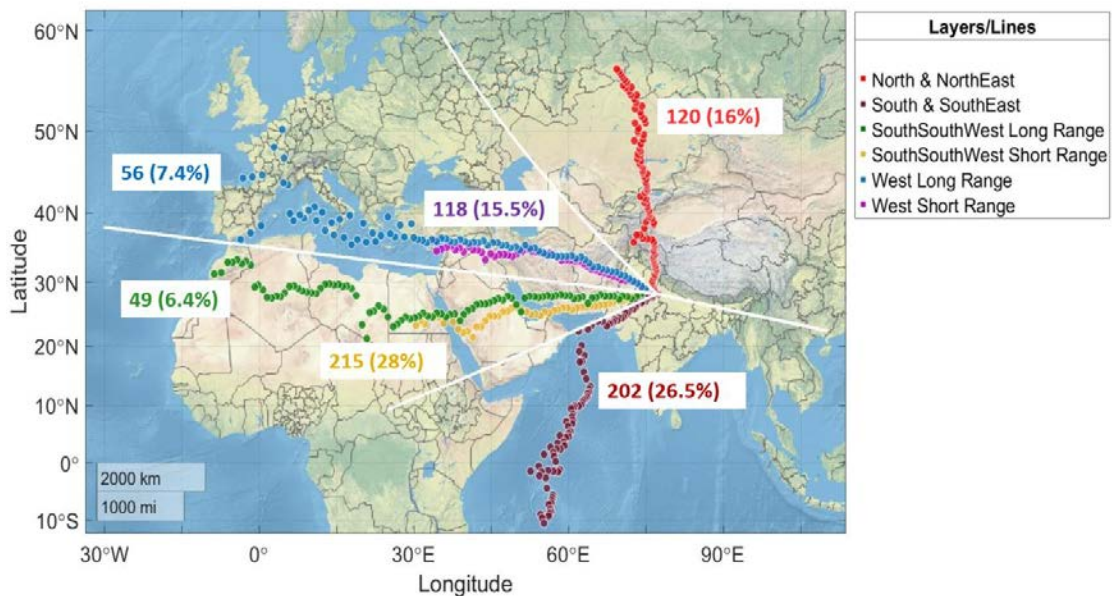
Έχοντας κατατάξει τις οπισθοτροχιές σε 6 τομείς ως τελικό στάδιο απαιτείται η εύρεση μέσω των τροχιών που αντιστοιχούν σε κάθε τομέα, αυτό γίνεται εφικτό μέσω της μετατροπής των καρτεσιανών συντεταγμένων της κάθε οπισθοτροχιάς σε πολικές συντεταγμένες. Στο εσωτερικό κάθε τομέα βρίσκεται η μέση τιμή της γωνίας που αντιστοιχεί σε πάχος  $\Delta r$ , για το σύνολο των οπισθοτροχιών του υποεξέταση τομέα. Πιο αναλυτικά έχοντας ως κέντρο την περιοχή μελέτης μας χωρίζουμε τον εκάστοτε τομέα σε δακτυλίους πάχους  $\Delta r$  και περιμέτρων που καθορίζονται από τα όρια των ευθειών που ορίζουν τον εκάστοτε τομέα, στην συνέχεια με αρχή την περιοχή μελέτης μας και βήμα  $\Delta r$  βρίσκουμε την μέση τιμή της γωνίας που αντιστοιχεί στον εκάστοτε δακτύλιο πάχους  $\Delta r$ . Η παράλληλη απεικόνιση όλων των μέσων γωνιών

παριστάνει την μέση οπισθοτροχιά του κάθε τομέα. Στην συνέχεια μετατρέποντας τις πολικές συντεταγμένες σε καρτεσιανές αποτυπώνονται οι μέσες οπισθοτροχιές των 6 τομέων επάνω στον χάρτη όπως φαίνεται στο Σχήμα 25.



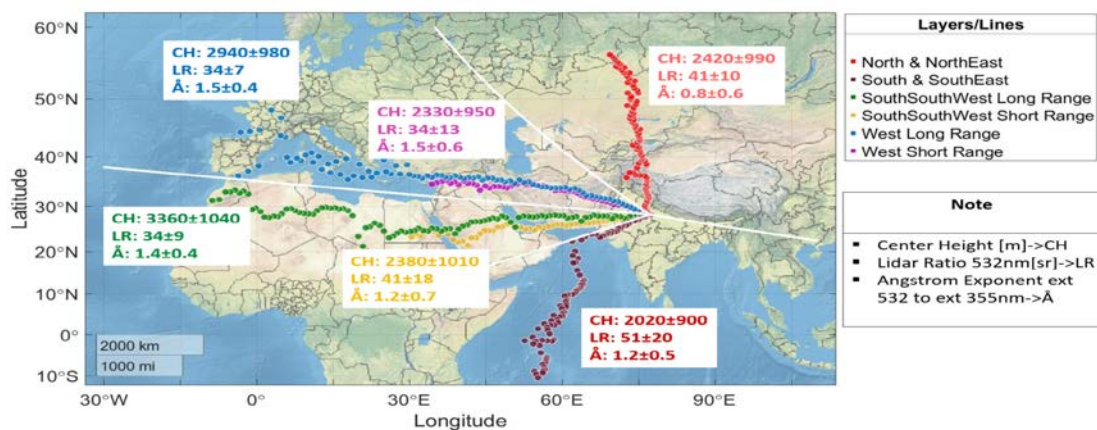
**Σχήμα 25:** Απεικόνιση των μέσων οπισθοτροχιών του κάθε τομέα

Στο Σχήμα 26 αποτυπώνεται ο αριθμός των οπισθοτροχιών καθώς και το ποσοστό αυτών, που έχουν χρησιμοποιηθεί για να δημιουργηθεί η μέση οπισθοτροχιά στον αντίστοιχο τομέα. Οι περισσότερες οπισθοτροχιές εμφανίζονται στον Νοτιονοτιοδυτικό κοντινής μεταφοράς τομέα (SouthSouthWest Short Range) και οι λιγότερες στον Νοτιονοτιοδυτικό μακρινής μεταφοράς (SouthSouthWest Long Range).



**Σχήμα 26:** Αποτύπωση του αριθμού των οπισθοτροχιών καθώς και του ποσοστού αυτών, που έχουν χρησιμοποιηθεί για να δημιουργηθεί η μέση οπισθοτροχιά στον αντίστοιχο τομέα.

Οι γεωμετρικές και επιλεγμένες εντατικές ιδιότητες αποτυπώνονται στο Σχήμα 27 και πιο συγκεκριμένα το κεντρικό ύψος των οπισθοτροχιών καθώς και ο λόγος lidar στα 532nm και ο εκθέτης Ångström του συντελεστή εξασθένισης στα 355 και 532nm. Η μεγαλύτερη μέση τιμή του κεντρικού ύψους εμφανίζεται στον Νοτιονοτιοδυτικό τομέα μακρινής μεταφοράς (SouthSouthWest Long Range) κάτι που δικαιολογείται από το γεγονός ότι η οπισθοτροχιά διέρχεται επάνω από την έρημο Σαχάρα και την Αραβική έρημο και σύμφωνα με τα κριτήρια ύψους που έχουμε από την βιβλιογραφία [Liu et al.,2008] τα ερημικά σωματίδια επηρεάζουν κυρίως τις αέριες μάζες μέχρι τα 3 km αλλά είναι σε θέση να ανέλθουν μέχρι και τα 6 km. Οι χαμηλότερες μέσες τιμές του κεντρικού ύψους εμφανίζονται στον Νότιο & Νοτιοανατολικό. Η μεγαλύτερη μέση τιμή του λόγου lidar 532nm παρατηρείται στον Νότιο & Νοτιοανατολικό ένδειξη απορροφητικών σωματιδίων κάτι που δεν φαίνεται σωστό μιας και η μέση οπισθοτροχιά εμφανίζεται να διέρχεται επάνω από θαλάσσια επιφάνεια συνεπώς ο λόγος lidar θα έπρεπε να κυμαίνεται ανάμεσα στα 20-30sr [Muller et al., 2007]. Η μεγάλη τιμή δικαιολογείται από το γεγονός ότι η οπισθοτροχιά κατά την πορεία της επάνω από την θαλάσσια επιφάνεια έχει ύψος μεγαλύτερο του 1km κατά μέσο όρο κατά συνέπεια δεν είναι σε θέση να επηρεασθεί από θαλάσσια σωματίδια αλλά επηρεάζεται κυρίως από σωματίδια που βρίσκονται επάνω από την στεριά όπως είναι σωματίδια σκόνης, ηπειρωτικά και καπνού. Η μεγάλη τιμή του λόγου lidar καταδεικνύει και την αδυναμία του υπολογισμού της μέσης οπισθοτροχιάς, με την χρήση της μεθόδου των πολικών συντεταγμένων, να αποτυπώσει το ποσοστό συνεισφοράς του κάθε τμήματος της μέσης οπισθοτροχιάς στο τελικό αποτέλεσμα των οπτικών και γεωμετρικών της ιδιοτήτων. Με άλλα λόγια όπως φαίνεται και στο Σχήμα 23, στην περίπτωση του Νότιου και Νοτιοανατολικού τομέα (South&SouthEast section), το μεγαλύτερο πλήθος οπισθοτροχιών βρίσκεται επάνω από χερσαία επιφάνεια και ένα μικρό πλήθος βρίσκεται επάνω από θαλάσσια έκταση κατά συνέπεια η μέση οπισθοτροχιά αποκτά τις χαρακτηριστικές οπτικές ιδιότητες των σωματιδίων καπνού, σκόνης και ηπειρωτικών παρά των θαλάσσιων σωματιδίων. Οι μεγαλύτερες μέσες τιμές του εκθέτη Ångström εντοπίζονται στον Δυτικό τομέα τόσο μακρινής όσο και κοντινής μεταφοράς ένδειξη μικρών σωματιδίων.



**Σχήμα 27:** Απεικόνιση του κεντρικού ύψους των οπισθοτροχιών καθώς και του λόγου lidar στα 532nm και του εκθέτη Ångström του συντελεστή εξασθένισης στα 355 και 532nm, των μέσων οπισθοτροχιών στους 6 τομείς

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζεται συγκεντρωτικά ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση του κεντρικού ύψους και όλων των οπτικών ιδιοτήτων στην διάρκεια του ενός χρόνου, με τα δεδομένα χωρισμένα ως προς τον τομέα των οπισθοτροχιών.

**Πίνακας 4:** Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις του κεντρικού ύψους και των οπτικών ιδιοτήτων ανα τομέα προέλευσης των οπισθοτροχιών.

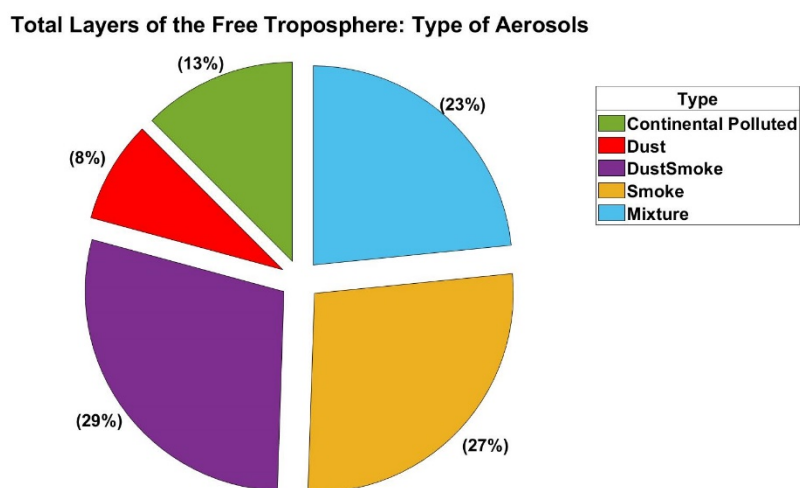
Sections	Center Height (m)	Bsc. coef. 355 nm ( $10^{-6}$ Mm <sup>-1</sup> sr <sup>-1</sup> )	Bsc. coef. 532 nm ( $10^{-6}$ Mm <sup>-1</sup> sr <sup>-1</sup> )	Bsc. coef. 1064 nm ( $10^{-6}$ Mm <sup>-1</sup> sr <sup>-1</sup> )	Ext. coef. 355 nm ( $10^{-4}$ Mm <sup>-1</sup> )	Ext. coef. 532 nm ( $10^{-4}$ Mm <sup>-1</sup> )
West Short Range	2330±950	3.2±3.2	2.0±2.0	1.1±1.0	1.1±1.0	0.6±0.3
West Long Range	2940±980	2.0±2.2	1.2±1.1	0.7±0.9	1.1±1.2	0.6±0.3
SouthSouthWest Short Range	2390±1010	3.4±3.0	2.1±2.0	1.2±1.3	1.9±1.7	1.4±1.4
SouthSouthWest Long Range	3362±1040	1.5±0.9	1.2±0.7	0.6±0.4	0.8±0.3	0.6±0.2
South & SouthEast	2010±900	4.3±4.0	2.7±2.8	1.2±1.4	2.0±1.0	1.4±0.7
North & NorthEast	2420±990	5.6±5.5	3.3±3.7	1.5±1.7	3.0±2.2	2.8±1.5

Sections	Lidar ratio 355 nm (sr)	Lidar ratio 532 nm (sr)	Ångström exp. b355 / b532	Ångström exp. b532 / b1064	Ångström exp. ext355 / ext532
West Short Range	44±14	34±13	1.1±0.8	1.2±0.6	1.5±0.6
West Long Range	45±12	35±7	1.1±0.8	1.2±0.7	1.5±0.4
SouthSouthWest Short Range	50±18	41±18	1.0±0.7	1.2±0.7	1.2±0.7
SouthSouthWest Long Range	47±9	34±9	0.7±0.6	1.1±0.5	1.4±0.4
South & SouthEast	63±21	51±20	1.2±0.8	1.4±0.8	1.2±0.5
North & NorthEast	49±14	41±10	1.3±0.8	1.5±0.9	0.8±0.6

### 3.6. Ανάλυση των γεωμετρικών και οπτικών ιδιοτήτων για τα διαφορετικά είδη σωματιδίων που καταγράφονται στην περιοχή μελέτης

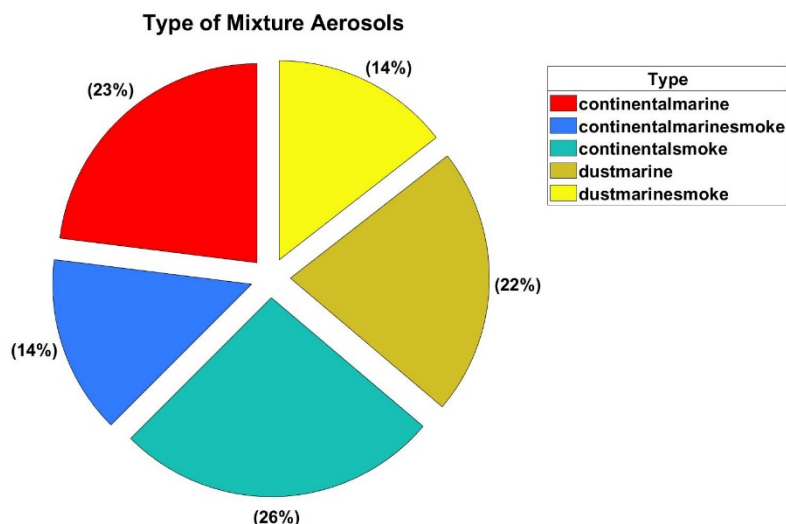
Τέλος με την χρήση του μετεωρολογικού μοντέλου HYSPLIT και των δεδομένων για τις εστίες φωτιάς του οργάνου MODIS πραγματοποιήθηκε ανίχνευση των σωματιδίων που επηρεάζουν τις 4 ημερών οπισθοτροχιές και κατ' επέκταση και τα στρώματα αιωρούμενων σωματιδίων που παρατηρούνται στην περιοχή μελέτη μας.

Τα σωματίδια που ανιχνεύθηκαν να καταλήγουν στην περιοχή του Gual Pahari παρουσιάζονται με σειρά ποσοστού εμφάνισης, σκόνη-καπνός (dustsmoke), καπνός (smoke), αναμειγμένα σωματίδια (mixture), ρυπασμένα ηπειρωτικά (continental polluted) και σκόνη (dust) όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 28.



**Σχήμα 28:** Αποτύπωση των ποσοστών εμφάνισης των διαφόρων ειδών σωματιδίων

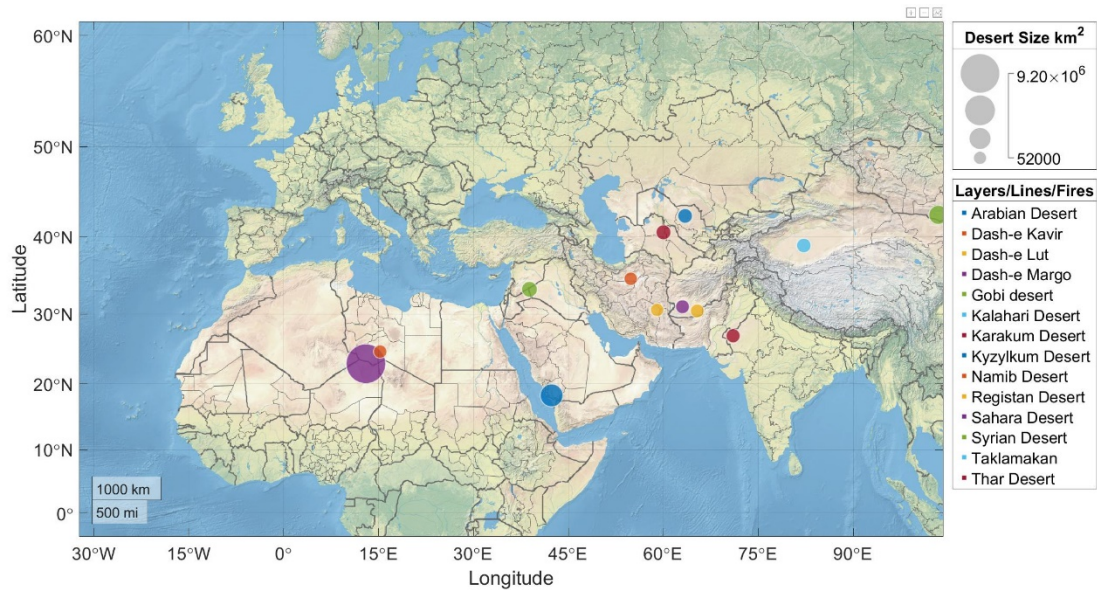
Τα αναμειγμένα σωματίδια με σειρά ποσοστού εμφάνισης είναι ηπειρωτικά-καπνός (continentalsmoke), ηπειρωτικά-θαλάσσια (continentalmarine), σκόνη-θαλάσσια (dustmarine), ηπειρωτικά-θαλάσσια-καπνός (continentalmarinesmoke), σκόνη-θαλάσσια-καπνός (dustmarinesmoke) όπως εμφανίζονται στο Σχήμα 29. Στην συνέχεια της μελέτης, τα αναμειγμένα σωματίδια θα εξετάζονται ως σύνολο χωρίς να γίνεται διακριτοποίηση μεταξύ τους.



**Σχήμα 29:** Αποτύπωση των ποσοστών εμφάνισης των διαφόρων ειδών σωματιδίων που ανήκουν στην κατηγορία των αναμεμιγμένων σωματιδίων

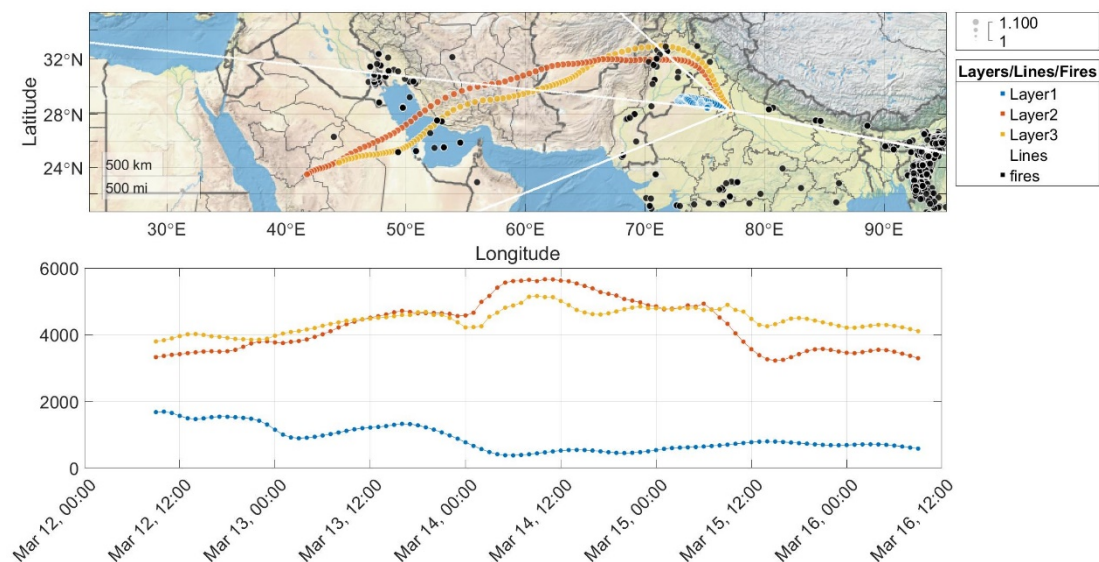
Δεν ανιχνεύθηκε καμία αέρια μάζα να περιλαμβάνει καθαρά θαλάσσια σωματίδια, λόγω του ότι το κριτήριο για να χαρακτηριστεί μια αέρια μάζα ως θαλάσσια είναι το κομμάτι της οπισθοτροχιάς που διέρχεται επάνω από θαλάσσια έκταση να βρίσκεται σε υψόμετρο χαμηλότερο του 1 km και ταυτόχρονα το υπόλοιπο κομμάτι που διέρχεται επάνω από χερσαία επιφάνεια να κυμαίνεται κατά μέσο όρο σε υψόμετρο μεγαλύτερο των 3.8 km, που αποτελεί την μεγαλύτερη μέση τιμή παρατήρησης των αιωρούμενων σωματιδίων που αναφέρθηκαν πρωτύτερα, φθάνοντας στον τόπο μέτρησης μας, κάτι που δεν παρατηρήθηκε σε καμία οπισθοτροχιά, συνεπώς θαλάσσια σωματίδια παρατηρούνται αναμεμιγμένα με ηπειρωτικά είτε με καπνό είτε με σκόνη.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται από ένα παράδειγμα σε κάθε κατηγορία σωματιδίων που ανιχνεύθηκαν στον τόπο μελέτης μας. Πιο συγκεκριμένα τα σωματίδια καπνού(smoke) κυμαίνονται σε ύψη 1.6 έως 5.9km, με μέσο ύψος 3.8km [Amiridis et al., 2010]. Τα ερημικά σωματίδια (dust) κυμαίνονται από 1 έως 2km το φθινόπωρο, τον χειμώνα και την άνοιξη και από τα 2 έως τα 3km την καλοκαιρινή περίοδο, σε μικρότερο ποσοστό επηρεάζουν στρώματα σε ύψος από 3 έως 6km [Liu et al.,2008]. Τα θαλάσσια σωματίδια λόγω του μεγέθους τους φθάνουν μέχρι το 1km.Τα ηπειρωτικά σωματίδια κυμαίνονται μέχρι τα 2 km.Στην μελέτη θα αξιοποιηθεί και ο χάρτης των κυριότερων ερήμων που επηρεάζουν την περιοχή μελέτης μας σύμφωνα με το Σχήμα 30 όπου με κύκλους παρουσιάζονται τα κέντρα των ερήμων όπως έχουν ορισθεί στην ιστοσελίδα ([https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_deserts\\_by\\_area](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_deserts_by_area)) καθώς και το μέγεθος των κύκλων σε συνδυασμό με το υπόμνημα στα δεξιά του σχήματος απεικονίζει και το μέγεθός τους.



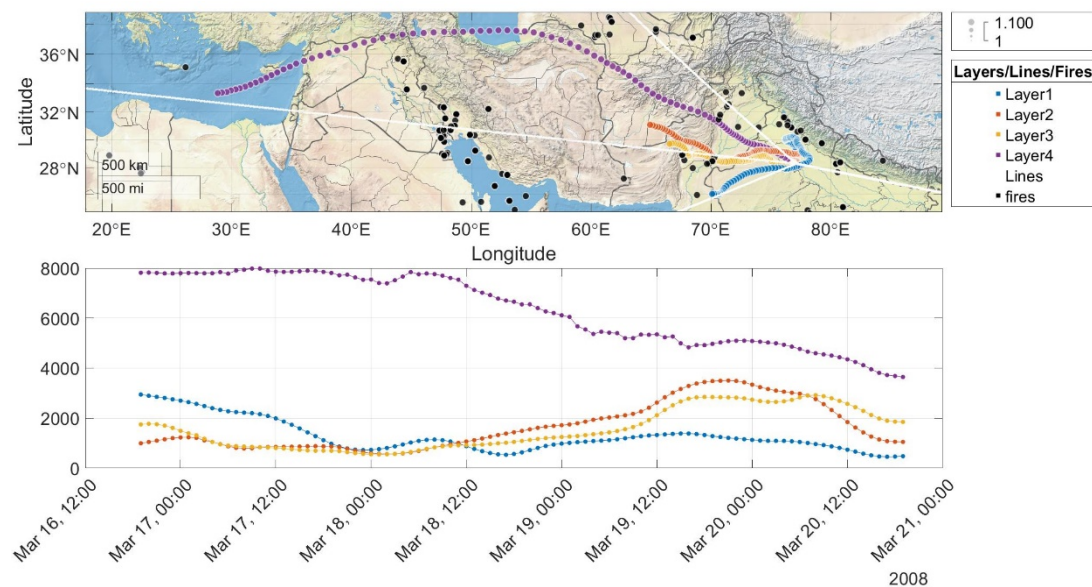
**Σχήμα 30:** Απεικόνιση των ερήμων που επηρεάζουν την περιοχή καταγραφής.

Στο Σχήμα 31 η οπισθοτροχιά που αντιστοιχεί στο στρώμα (Layer) 2 χαρακτηρίστηκε ως dustsmoke, δηλαδή περιέχει σωματίδια σκόνης και καπνού. Πιο συγκεκριμένα με βάση τα κριτήρια εμφάνισης των σωματιδίων στον τόπο καταγραφής η οπισθοτροχιά προσέλαβε ερημικά σωματίδια που εμφανίζονται σε ύψη από 3300m έως 4400m στην περιοχή που έχει γεωγραφικό μήκος από 42°E έως 49°E και γεωγραφικό πλάτος από 23°N έως 27°N, τα ερημικά σωματίδια προέρχονται από την Αραβική Έρημο. Σωματίδια καπνού προσλαμβάνει ανάμεσα σε γεωγραφικά μήκη 69.5° E και 71.5° E και γεωγραφικό πλάτος 31°N, σε ύψη από 3200 έως 4200m.



**Σχήμα 31:** Απεικόνιση των οπισθοτροχιών για την ημέρα και ώρα καταγραφής 16 Μαρτίου 2008 09:00 UTC εξέταση του στρώματος (Layer) 2 που προσλαμβάνει σωματίδια σκόνης-καπνού (dustsmoke).

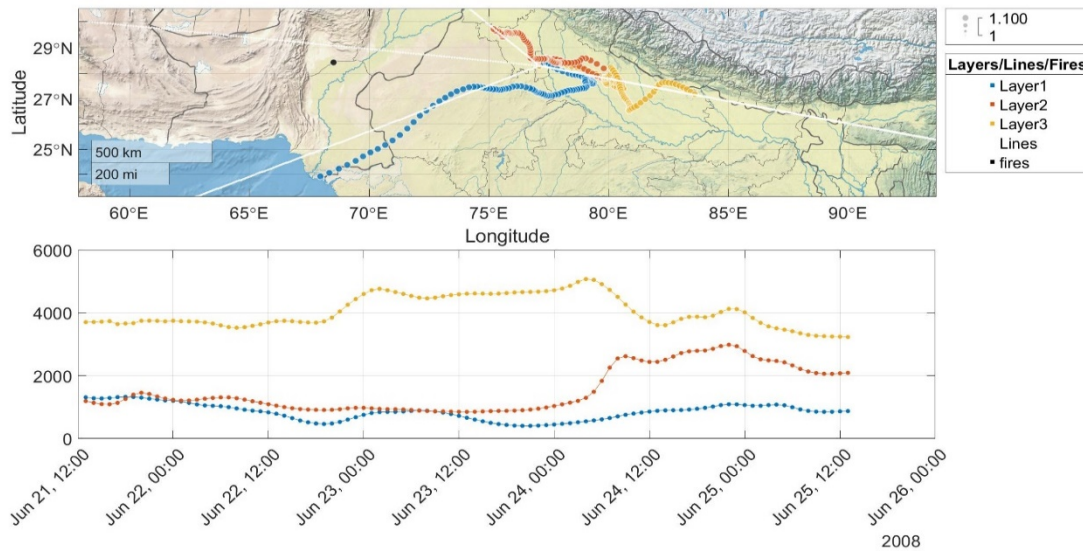
Στο Σχήμα 32 η οπισθοτροχιά που αντιστοιχεί στο στρώμα (Layer) 4 περιέχει μόνο σωματίδια καπνού (smoke). Η οπισθοτροχιά προσέλαβε σωματίδια καπνού στην περιοχή που ορίζεται από γεωγραφικό μήκος από 70°E έως 74°E και γεωγραφικό πλάτος από 31.6°N έως 29.5°N, σε ύψη που κυμαίνονται γύρω στα 5200m. Δεν προσέλαβε σωματίδια σκόνης λόγω του μεγάλου ύψους διέλευσης της οπισθοτροχιάς από τις ερήμους.



**Σχήμα 32:** Απεικόνιση των οπισθοτροχιών για την ημέρα και ώρα καταγραφής 21 Μαρτίου 2008 19:00 UTC, εξέταση του στρώματος (Layer) 4 που προσλαμβάνει σωματίδια καπνού (smoke).

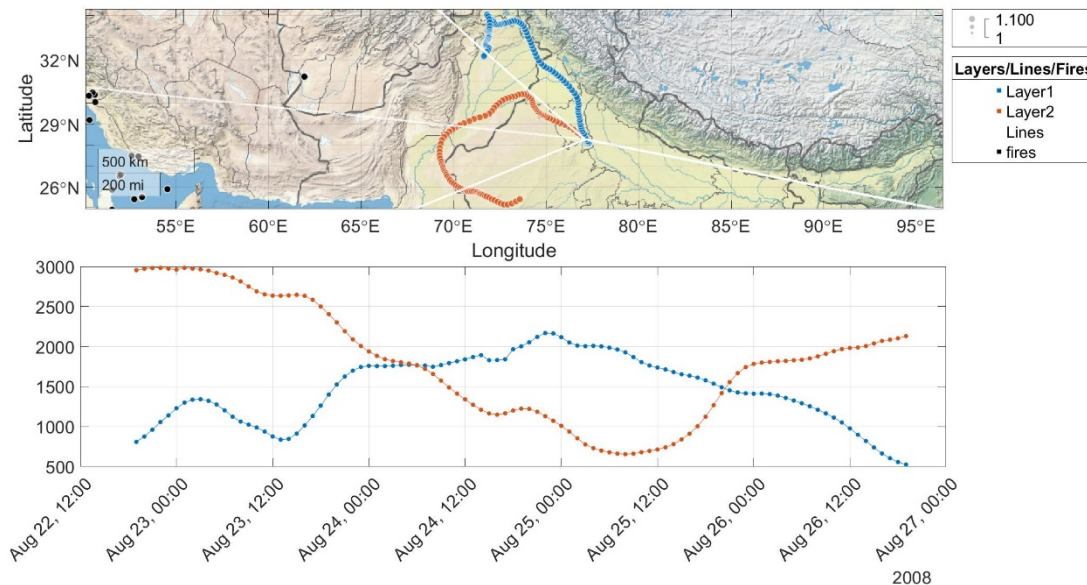
Το στρώμα (Layer) 2 προσλαμβάνει ηπειρωτικά σωματίδια (continental) στην περιοχή με γεωγραφικό μήκος 75°E έως 80°E και γεωγραφικό πλάτος 29.7°N έως 27.9°N σε ύψη από 1100 έως 1800m, δεν επηρεάζεται από την έρημο Thar μιας και περνά έξω από τα όρια της όπως φαίνεται στο Σχήμα 33 και επειδή η οπισθοτροχιά περνά κοντά από το Νέο Δελχί υπάρχει πιθανότητα τα σωματίδια να είναι ρυπασμένα ηπειρωτικά (continental polluted).





**Σχήμα 33:** Απεικόνιση των οπισθοτροχιών για την ημέρα και ώρα καταγραφής 25 Ιουνίου 2008 13:00 UTC, εξέταση του στρώματος (Layer) 2 που προσλαμβάνει σωματίδια ρυπασμένα ηπειρωτικά (continental polluted).

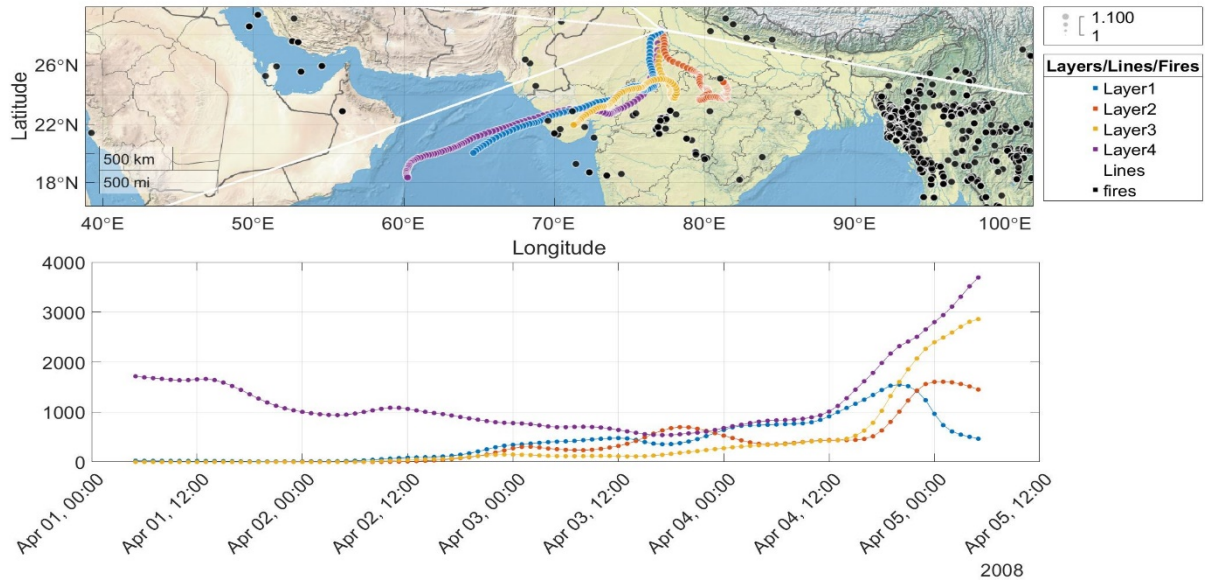
Το στρώμα (Layer) 2, Σχήμα 34, χαρακτηρίζεται από σωματίδια σκόνης (dust) μιας και διέρχεται επάνω από την έρημο Thar σε γεωγραφικό μήκος 69°E έως 75°E και σε γεωγραφικό πλάτος 25°N έως 30°N και σε ύψη από 650 έως 3000m.



**Σχήμα 34:** Απεικόνιση των οπισθοτροχιών για την ημέρα και ώρα καταγραφής 26 Αυγούστου 2008 19:00 UTC, εξέταση του στρώματος (Layer) 2 που προσλαμβάνει σωματίδια σκόνης (dust).

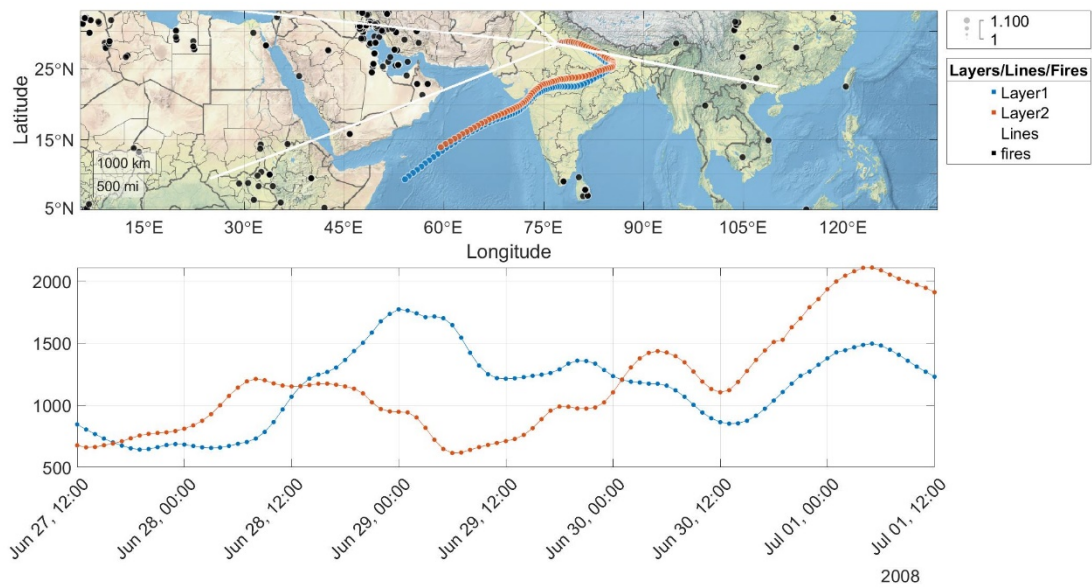
Στην συνέχεια δίνεται ένα παράδειγμα σε κάθε κατηγορία των σωματιδίων που χαρακτηρίζονται ως mixture. Στο Σχήμα 35 οι οπισθοτροχιές 2 και 3 και κατά συνέπεια τα στρώματα (Layers) 2 και 3 χαρακτηρίζονται ως σωματίδια ηπειρωτικά-καπνός (continentalsmoke), μιας και πληρούν και τα δύο κριτήρια επηρεασμού από ηπειρωτικά σωματίδια καθώς και από σωματίδια καπνού κατά την πορεία τους. Η οπισθοτροχιά 2 προσλαμβάνει σωματίδια καπνού μόνο στην αρχή της ενώ η

οπισθοτροχιά 3 στους συνδυασμούς γεωγραφικών μηκών και πλατών,  $71.5^{\circ}\text{E}-22.1^{\circ}\text{N}$  και  $77.9^{\circ}\text{E}-23.7^{\circ}\text{N}$ . Οι δύο οπισθοτροχιές προσλαμβάνουν ηπειρωτικά σωματίδια καθ' όλο το μήκος τους με εξαίρεση το τελευταίο κομμάτι της οπισθοτροχιάς 3 που ανέρχεται σε ύψη άνω των 2km.



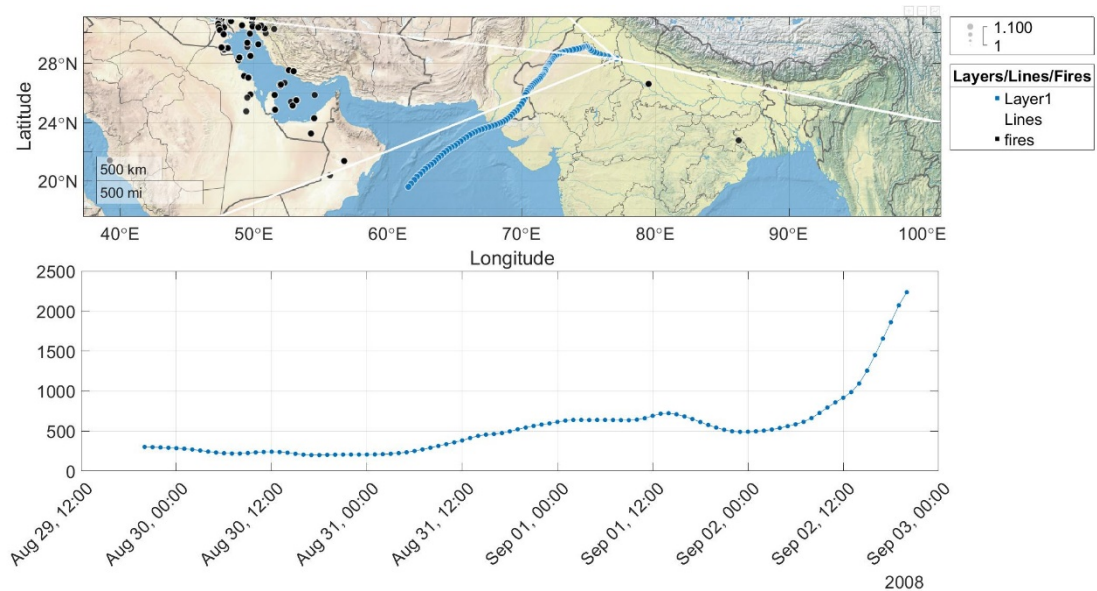
**Σχήμα 35:** Απεικόνιση των οπισθοτροχιών για την ημέρα και ώρα καταγραφής 05 Απριλίου 2008 05:00 UTC, εξέταση των στρωμάτων (Layer) 2,3 που προσλαμβάνουν σωματίδια ηπειρωτικά-καπνός (continentalsmoke).

Στο Σχήμα 36 οι οπισθοτροχιές 1 και 2 χαρακτηρίζονται ως ηπειρωτικά-θαλάσσια (continental-marine) και οι δύο οπισθοτροχιές προσλαμβάνουν θαλάσσια σωματίδια όσο διαρκεί η πορεία τους επάνω από θαλάσσια έκταση μιας και βρίσκονται συνεχώς κάτω του 1km στην συνέχεια ακολουθώντας πορεία επάνω από χερσαία επιφάνεια προσλαμβάνουν ηπειρωτικά σωματίδια σε όλο το μήκος τους μιας και βρίσκονται συνεχώς κάτω από τα 2km. Κατά την μετάβαση των οπισθοτροχιών από την θαλάσσια επιφάνεια στην χερσαία παρατηρείται ανύψωση στην περίπτωση της οπισθοτροχιάς/στρώματος 1 η αύξηση είναι έντονη από τα 1000m ανέρχεται στα 1800 ενώ μικρότερη άνοδος παρατηρείται στην περίπτωση της οπισθοτροχιάς 2 από τα 1050 ανέρχεται στα 1200, οι δύο οπισθοτροχιές στην συνέχεια ακολουθούν καθοδικές αλλά και ανοδικές πορείες μέχρι τον τόπο εξέτασης μας.



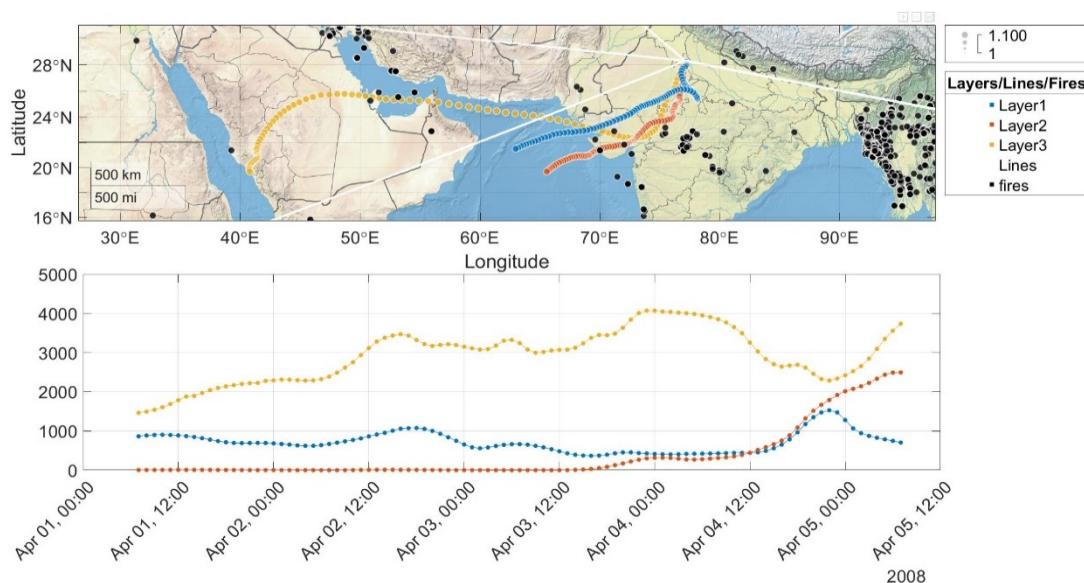
**Σχήμα 36:** Απεικόνιση των οπισθοτροχιών για την ημέρα και ώρα καταγραφής 01 Ιουλίου 2008 12:00 UTC, εξέταση των στρωμάτων (Layer) 1,2 που προσλαμβάνουν σωματίδια ηπειρωτικά-θαλάσσια (continental-marine).

Η οπισθοτροχιά του Σχήματος 37 περιλαμβάνει σωματίδια σκόνης-θαλάσσια (dustmarine) η πρόσληψη των θαλάσσιων σωματιδίων πραγματοποιείται από το γεωγραφικό πλάτος  $61^{\circ}\text{E}$  έως τις  $67^{\circ}\text{E}$  και γεωγραφικό μήκος  $19.7^{\circ}\text{N}$  και  $23.8^{\circ}\text{N}$  αντίστοιχα με τα ύψη να κυμαίνονται από 200 έως 300m. Στην συνέχεια κατά την πορεία της επάνω από χερσαία επιφάνεια προσλαμβάνει σωματίδια σκόνης από την έρημο Thar, με τα ύψη να κυμαίνονται από 200 έως 2200m.



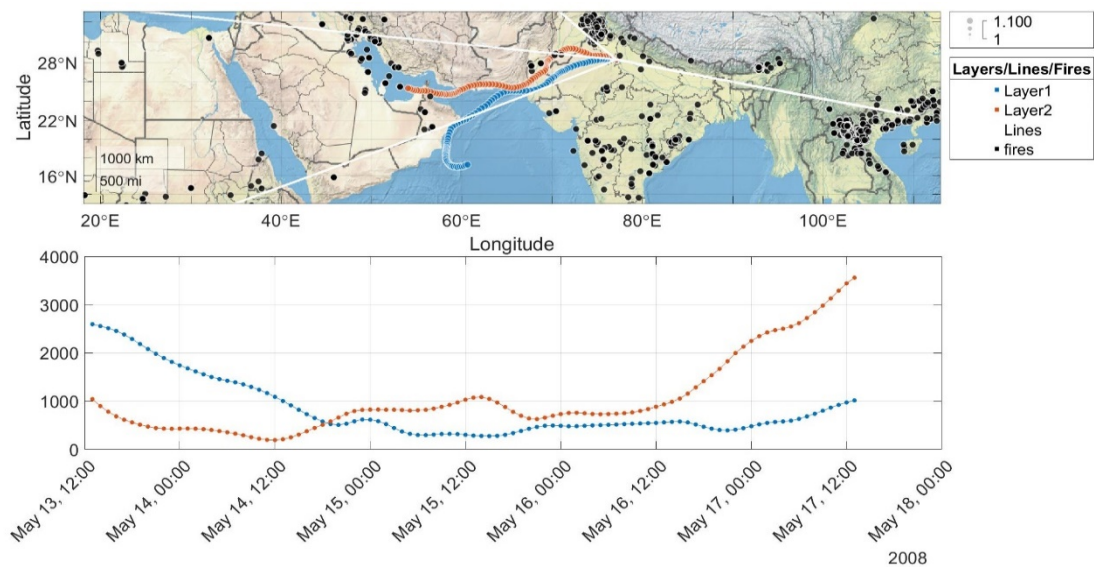
**Σχήμα 37:** Απεικόνιση των οπισθοτροχιών για την ημέρα και ώρα καταγραφής 02 Σεπτεμβρίου 2008 20:00 UTC, εξέταση του στρώματος (Layer) 1 που προσλαμβάνει σωματίδια σκόνης-θαλάσσια (dustmarine).

Η οπισθοτροχιά 2, Σχήμα 38 χαρακτηρίζεται από σωματίδια ηπειρωτικά-θαλάσσια-καπνού (continentalmarinesmoke). Κατά την πορεία της επάνω από θαλάσσια επιφάνεια προσλαμβάνει θαλάσσια σωματίδια, με την είσοδό της σε χερσαία επιφάνεια προσλαμβάνει σωματίδια καπνού μιας και διέρχεται επάνω από εστίες φωτιάς και τέλος αποκτά ηπειρωτικά σωματίδια μέχρι να φθάσει στον τόπο μελέτης μας και στις τρεις περιπτώσεις πληρούνται τα κριτήρια πρόσληψης των προαναφερθέντων σωματιδίων.



**Σχήμα 38:** Απεικόνιση των οπισθοτροχιών για την ημέρα και ώρα καταγραφής 05 Απριλίου 2008 07:00 UTC, εξέταση του στρώματος (Layer) 2 που προσλαμβάνει σωματίδια ηπειρωτικά-θαλάσσια-καπνού (continentalmarinesmoke).

Τέλος η οπισθοτροχιά 2 προσλαμβάνει σωματίδια σκόνης από την Αραβική έρημο (Arabian Desert), εν συνεχεία δέχεται θαλάσσια σωματίδια από την Αραβική θάλασσα και τέλος περνώντας από την εστίες φωτιάς προσλαμβάνει σωματίδια καπνού συνεπώς χαρακτηρίζεται ως οπισθοτροχιά με σωματίδια σκόνης-θαλάσσια-καπνού (dustmarinesmoke), Σχήμα 39.

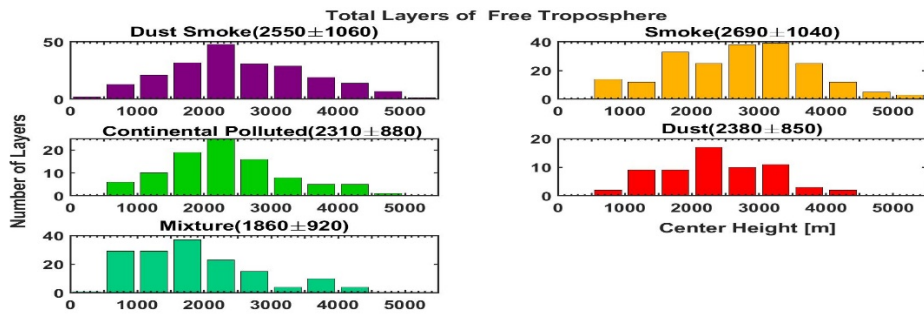


**Σχήμα 39:** Απεικόνιση των οπισθοτροχιών για την ημέρα και ώρα καταγραφής 17 Μαΐου 2008 13:00 UTC, εξέταση του στρώματος (Layer) 2 που προσλαμβάνει σωματίδια σκόνης-θαλάσσια-καπνού (dustmarinesmoke).

Οι οπισθοτροχιές που εξετάστηκαν και ανήκουν στην κατηγορία mixture θα εξετασθούν ως σύνολο και όχι ξεχωριστά όσον αφορά τις γεωμετρικές και οπτικές τους ιδιότητες.

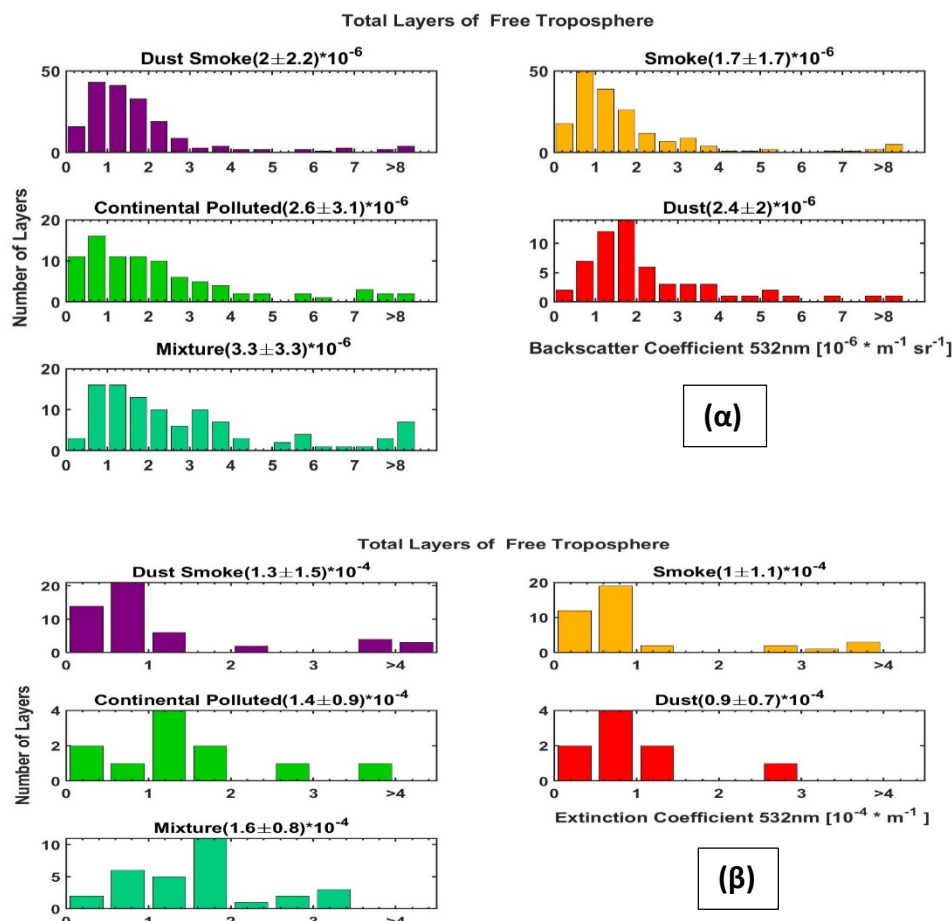
Έχοντας εντοπίσει τα σωματίδια που παρατηρούνται στην περιοχή εξέτασης μας είναι απαραίτητο να μελετήσουμε τις γεωμετρικές και οπτικές ιδιότητες των διαφορετικών σωματιδίων. Οι Muller et al., [2007] βασισμένοι σε 10 χρόνια μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε όλο τον πλανήτη παρουσιάζουν τις εντατικές οπτικές ιδιότητες των διαφορετικών τύπων αιωρούμενων σωματιδίων. Εντούτοις, μεγάλης διάρκειας μετρήσεις (Balis et al., 2004; Amiridis et al., 2009; Giannakaki et al., 2010) αποκαλύπτουν μεγάλη διακύμανση στις οπτικές ιδιότητες που μετρούνται λόγω της υψηλής χρονικής και χωρικής μεταβλητότητας που εμφανίζουν τα αιωρούμενα σωματίδια.

Ξεκινώντας από τις γεωμετρικές ιδιότητες, το κεντρικό ύψος των αέριων στρωμάτων (Layers) που παρατηρούνται στην περιοχή εξέτασης μας παρουσιάζεται στο Σχήμα 40. Το μεγαλύτερο κεντρικό ύψος εμφανίζεται στην περίπτωση των αέριων στρωμάτων που αποτελούνται από σωματίδια καπνού (smoke),  $2690 \pm 1040\text{m}$  και το μικρότερο κεντρικό ύψος εμφανίζεται στα αέρια στρώματα που αποτελούνται από αναμεμειγμένα σωματίδια (mixture),  $1860 \pm 920\text{m}$ .



**Σχήμα 40:** Απεικόνιση του κεντρικού ύψους των αέριων μαζών/στρωμάτων (Layers) που αποτελούνται από διαφορετικά είδη σωματιδίων.

Ο συντελεστής οπισθοσκέδασης (backscatter coefficient) και συντελεστής εξασθένισης (extinction coefficient) στα 532nm παρουσιάζονται στο Σχήμα 41. Οι μέγιστες τιμές του συντελεστή οπισθοσκέδασης και εξασθένισης παρουσιάζονται στην περίπτωση των αναμεμιγμένων σωματιδίων (mixture),  $(3.3 \pm 3.3) \cdot 10^{-6}$  και  $(1.6 \pm 0.8) \cdot 10^{-4}$  κάτι που αποτελεί ένδειξη μεγάλης συγκέντρωσης των εν λόγω σωματιδίων στο εσωτερικό των αέριων μαζών.



**Σχήμα 41:** Απεικόνιση των συντελεστών οπισθοσκέδασης (backscatter coefficient (α) και του συντελεστή εξασθένισης (extinction coefficient) (β) στα 532nm για τους διαφορετικούς τύπους σωματιδίων που καταγράφονται στο εσωτερικό των αέριων μαζών.

Οι εντατικές μεταβλητές, λόγος lidar (Lidar ratio) και ο εκθέτης Ångström (Ångström exponent) αποτελούν ένδειξη του τύπου και του μεγέθους των σωματιδίων. Στο Σχήμα 42 εμφανίζονται οι τιμές του λόγου lidar στα 355 και 532nm καθώς και οι τιμές του εκθέτη Ångström του συντελεστή εξασθένησης στα 532 και 355nm.

Τα ρυπασμένα ηπειρωτικά σωματίδια με τιμές  $55 \pm 20sr$  στα 532nm καθώς και  $1.4 \pm 0.8$  για τους αντίστοιχους συντελεστές βρίσκονται στα πλαίσια της βιβλιογραφίας σύμφωνα με τους Muller et al., [2007] για την περιοχή της Νοτιοανατολικής Ασίας (INDOEX) με τιμές  $51 \pm 20sr$  στα 532nm και  $1.5 \pm 0.3$  αντίστοιχα.

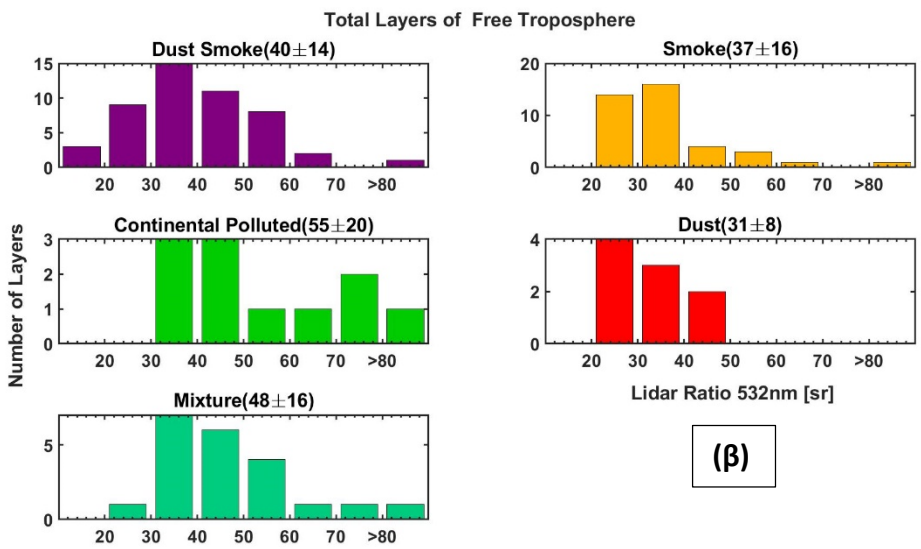
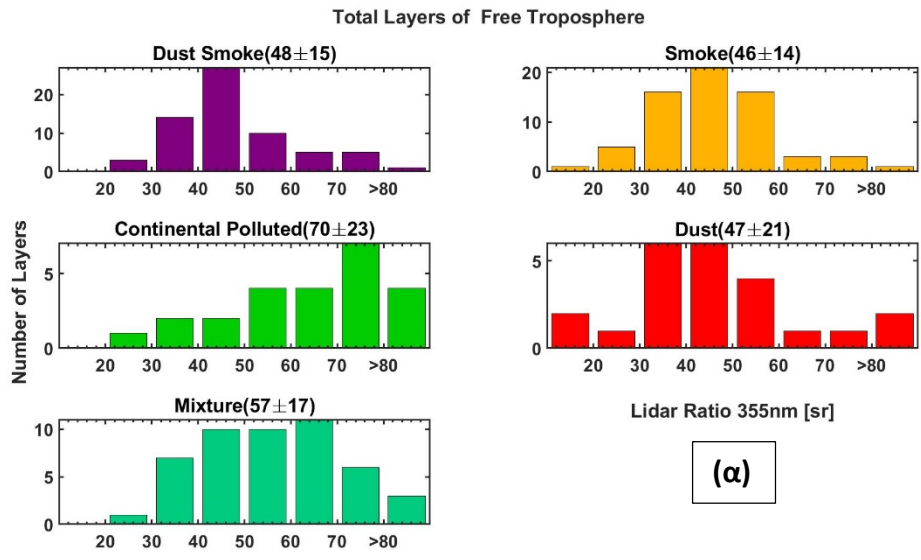
Στην περίπτωση των σωματιδίων σκόνης (dust) οι τιμές που παρουσιάζονται είναι  $31 \pm 8sr$  στα 532nm και  $1.6 \pm 0.7$ , οι συγκεκριμένες τιμές καταδεικνύουν σωματίδια που προέρχονται από τις ερήμους της Μέσης Ανατολής [Muller et al., 2007] όπως είναι η Αραβική (Saudi Arabian) έρημος με τιμή για τον λόγο lidar στα 532nm,  $38 \pm 5sr$ , η τιμή του εκθέτη Ångström του συντελεστή εξασθένησης στα 532 και 355nm είναι  $0.6 \pm 0.3$ , καταδεικνύοντας την ύπαρξη μεγαλύτερων σωματιδίων σε σύγκριση με τα σωματίδια που παρατηρούνται στον τόπο καταγραφής μας. Η διαφορά στην τιμή του εκθέτη Ångström ίσως οφείλεται στην έντονη τοπική ρύπανση της περιοχής όπου πραγματοποιείται η καταγραφή, με αποτέλεσμα να παρατηρείται αύξηση στην τιμή κατά συνέπεια μείωση στο μέγεθος των σωματιδίων. Οι Nisantzi et al., [2015] κατέγραψαν τιμές του λόγου lidar στα 532nm για την έρημο Σαχάρα  $44-65sr$  με μέση τιμή  $52.7sr$  και  $35-46sr$  με μέση τιμή  $41.1sr$  για τις ερήμους της Μέσης Ανατολής, όπως γίνεται φανερό η τιμή του λόγου lidar που έχει προκύψει στην περιοχή καταγραφή μας βρίσκεται πλησιέστερα στις τιμές που προκύπτουν από τις ερήμους της Μέσης Ανατολής.

Όσον αφορά τα σωματίδια καπνού (smoke) οι τιμές του λόγου lidar στα 355nm και του εκθέτη Ångström του συντελεστή εξασθένησης στα 532 και 355 είναι  $46 \pm 14sr$  και  $1.3 \pm 0.5$ . Σύμφωνα με τους Muller et al., [2007] οι τιμές ταιριάζουν με τις τιμές που καταγράφηκαν από φωτιές που παρατηρήθηκαν στην Σιβηρία και στον Καναδά  $46 \pm 13sr$  και  $1.0 \pm 0.5$  αντίστοιχα. Οι Amiridis et al., [2009] συσχέτισαν την ηλικία του μονοξειδίου του άνθρακα, από τις εκπομπές της φωτιάς με τον λόγο του lidar στα 355nm, με βάση τα αποτελέσματα η τιμή που εντοπίζεται στην περιοχή μελέτη μας ( $46 \pm 14sr$ ) αντιστοιχεί σε εστίες φωτιάς με σωματίδια που έχουν δημιουργηθεί 7-8 ημέρες πριν την αντίστοιχη καταγραφή.

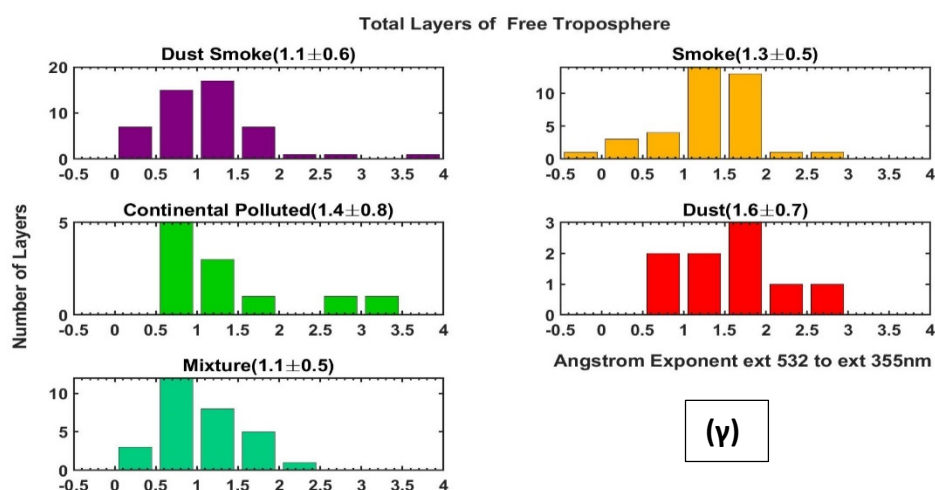
Οι τιμές του λόγου lidar στα 355 και 532nm καθώς και του εκθέτη Ångström του συντελεστή εξασθένησης στα 355 και 532nm για τις αέριες μάζες που αποτελούνται από σκόνη και καπνό (dustsmoke) είναι  $48 \pm 15sr$ ,  $40 \pm 14sr$  και  $1.1 \pm 0.6$ . Οι υπολογισμοί μέσο μοντέλων φανέρωσαν πως η απόκλιση από την σφαιρική μορφή μπορεί να αυξήσει τον συντελεστή οπισθοσκέδασης και συνεπώς να μειώσει τον λόγο του lidar [Mishchenko et al., 1997], το οποίο επαληθεύθηκε από τους Muller et al. [2003]. Συνεπώς κατά την ανάμειξη σωματιδίων καπνού με σωματίδια σκόνης, τα οποία αποκλίνουν από την σφαιρική μορφή θα έπρεπε να παρατηρηθούν μικρότερες τιμές

στους λόγους lidar των σωματιδίων καπνού-σκόνης (dustsmoke) σε σύγκριση με τα σωματίδια καθαρής σκόνης (dust) ή καθαρού καπνού (smoke) κάτι που δεν ισχύει στην περίπτωση των αποτελεσμάτων της μελέτης.

Στην περίπτωση των αναμεμιγμένων σωματιδίων (mixture) οι αντίστοιχες τιμές είναι  $57 \pm 17sr$ ,  $48 \pm 16sr$  και  $1.1 \pm 0.5$ .







**Σχήμα 42:** Απεικόνιση του λόγου lidar (lidar ratio) στα 355 (α) και 532nm (β) καθώς και του εκθέτη Ångström του συντελεστή εξασθένισης στα 532 και 355nm (Ångström Exponent ext 532nm to 355nm) (γ) για τα διαφορετικά είδη σωματιδίων.

Στον Πίνακα 5 παρουσιάζεται συγκεντρωτικά ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση του κεντρικού ύψους και όλων των οπτικών ιδιοτήτων στην διάρκεια του ενός χρόνου, με τον χωρισμό ως προς το είδος των σωματιδίων που παρατηρούνται στον τόπο καταγραφής μας.

**Πίνακας 5:** Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις του κεντρικού ύψους και των οπτικών ιδιοτήτων ανα είδος σωματιδίων στην περιοχή μελέτης.

Types of aerosol	Center Height (m)	Bsc. coef. 355 nm	Bsc. coef. 532 nm	Bsc. coef. 1064 nm	Ext. coef. 355 nm	Ext. coef. 532 nm
		( $10^{-6}$ Mm $^{-1}$ sr $^{-1}$ )	( $10^{-6}$ Mm $^{-1}$ sr $^{-1}$ )	( $10^{-6}$ Mm $^{-1}$ sr $^{-1}$ )	( $10^{-4}$ Mm $^{-1}$ )	( $10^{-4}$ Mm $^{-1}$ )
Dustsmoke	2550±1060	2.9±3.1	2.0±2.2	1.0±1.0	1.6±1.7	1.3±1.5
Smoke	2690±1040	2.8±2.9	1.7±1.7	1.0±1.3	1.5±1.4	1.0±1.1
Continental Polluted	2310±880	4.5±4.5	2.6±3.1	1.0±1.3	2.0±1.3	1.4±0.9
Dust	2380±850	4.0±3.3	2.4±2.0	1.2±1.2	1.8±1.3	0.9±0.7
Mixture	1860±920	5.3±4.8	3.3±3.3	1.5±1.5	2.2±1.7	1.6±0.8

Types of aerosol	Lidar ratio 355 nm (sr)	Lidar ratio 532 nm (sr)	Ångström exp. b355 / b532	Ångström exp. b532 / b1064	Ångström exp. ext355 / ext532
Dustsmoke	48±25	40±14	1.0±0.7	1.1±0.6	1.1±0.6
Smoke	46±14	37±16	0.9±0.7	1.2±0.7	1.3±0.5
Continental Polluted	70±23	55±20	1.5±0.9	1.7±0.8	1.4±0.8
Dust	47±21	31±8	1.2±0.8	1.2±0.7	1.6±0.7
Mixture	57±17	48±16	1.1±0.7	1.5±0.8	1.1±0.5

#### 4. Συμπεράσματα – Συζήτηση

Στόχος της διπλωματικής ήταν η μελέτη της κατακόρυφης κατανομής των αιωρούμενων σωματιδίων στην περιοχή της Ινδίας με την χρήση τηλεπισκόπησης Lidar. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή του Gual Pahari σε διάστημα ενός χρόνου από τον Μάρτιο 2008 έως τον Μάρτιο 2009.

Το επιστρεφόμενο σήμα χρησίμευσε στην επίλυση των εξισώσεων Lidar προκειμένου να προσδιορισθούν οι εκτατικές μεταβλητές, ο συντελεστής οπισθοσκέδασης σε μήκη κύματος 355, 532, 1064nm καθώς και ο συντελεστής εξασθένισης στα 355 και 532nm. Μέσω της πρώτης παραγώγου του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 1064 έγινε εφικτός ο γεωμετρικός προσδιορισμός των ορίων των στρωμάτων που παρατηρούνται σε όλη την ατμοσφαιρική στήλη. Επιπρόσθετα με την χρήση των εξισώσεων της θεωρίας υπολογίσθηκαν οι εντατικές μεταβλητές, ο λόγος lidar και ο εκθέτης Ångström. Συνεπώς μέχρι στιγμής γνωρίζουμε τις γεωμετρικές και οπτικές ιδιότητες όλων των στρωμάτων που παρατηρούνται σε όλη την ατμοσφαιρική στήλη.

Εν συνεχεία πραγματοποιήθηκε διαχωρισμός των στρωμάτων που ανήκουν στην ελεύθερη τροπόσφαιρα από τα στρώματα που ανήκουν στο εσωτερικό του οριακού στρώματος. Συνεπώς από τα 1277 στρώματα της ατμοσφαιρικής στήλης θα επεξεργαστούμε τα 767 στρώματα της ελεύθερης τροπόσφαιρας, ως προς τις γεωμετρικές και οπτικές τους ιδιότητες.

Αρχικά τις γεωμετρικές και οπτικές ιδιότητες τις μελετήσαμε ως προς την ετήσια διακύμανση τους, παρατηρώντας κενά τους μήνες Οκτώβρη 2008, Νοέμβρη 2008 και Ιανουάριο 2009 λόγω τεχνικών προβλημάτων, βροχόπτωσης και χαμηλών νεφών. Όσον αφορά το κεντρικό ύψος των στρωμάτων η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση είναι  $2390 \pm 1030\text{m}$  με τα μέγιστα ύψη να ανέρχονται μέχρι τα 3-5km κάτι που επιβεβαιώνεται από δημοσιεύσεις. Το πάχος των στρωμάτων με μέση τιμή και τυπική απόκλιση  $810 \pm 550\text{m}$  παρουσίασε μια σύνδεση με το κεντρικό ύψος, δηλαδή κατά την μείωση του κεντρικού ύψους μειώνεται και το πάχος των στρωμάτων κάτι που υποδηλώνει πως τα στρώματα που κατέρχονται προς το έδαφος παρουσιάζουν μείωση στην ποσότητα των σωματιδίων που περιέχουν. Οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις των συντελεστών οπισθοσκέδασης και εξασθένισης στο μήκος κύματος 355nm είναι  $(3.7 \pm 3.8) \cdot 10^{-6} [\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}]$  και  $(1.8 \pm 1.5) \cdot 10^{-4} [\text{m}^{-1}]$  αντίστοιχα. Επιπρόσθετα βρέθηκε πως τα στρώματα με τον μεγαλύτερο συντελεστή οπισθοσκέδασης και εξασθένισης, στα 355nm, που αντιστοιχούν σε μεγαλύτερη συγκέντρωση σωματιδίων βρίσκονται χαμηλότερα στο έδαφος σε σύγκριση με τα στρώματα με τον μικρότερο συντελεστή οπισθοσκέδασης και εξασθένισης, στα 355nm, που χαρακτηρίζονται από μικρότερη συγκέντρωση σωματιδίων και κατατάσσονται ψηλότερα στην ατμόσφαιρα. Συμπερασματικά προκύπτει πως μεγαλύτερη ποσότητα αιωρούμενων σωματιδίων βρίσκεται χαμηλά στο έδαφος σε σύγκριση με τα ψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση που παρατηρείται στις τιμές του λόγου lidar στα 355 και στα 532nm είναι  $52 \pm 18 \text{sr}$  και

42±17 sr. Η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του εκθέτη Ångström από τους συντελεστές οπισθοσκέδασης 1064 και 532nm  $1.3\pm 0.8$  αποτελεί ένδειξη ύπαρξης ρυπασμένων σωματιδίων από τον περιοχή της Βορείας και Νότιας Ινδίας. Η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του εκθέτη Ångström από τους συντελεστές εξασθένισης 532 και 355nm, ( $1.2\pm 0.6$ ), υποδηλώνει πως τα σωματίδια έχουν προέλευση από την Βόρεια Ινδία (Muller et al. 2007). Τέλος από την κατανομή των στρωμάτων συναρτήσει του εκθέτη Ångström του συντελεστή εξασθένισης 355 και 532nm παρατηρείται πως το μέγεθος των σωματιδίων είναι σχετικά ανεξάρτητο από το ύψος των στρωμάτων της ελεύθερης τροπόσφαιρας.

Εν συνεχεία τα στρώματα χωρίσθηκαν ως προς την εποχική περίοδο όπου παρατηρήθηκαν, Προμουσωνική (Premonsoon) (Μάρτης –Μάιος), Μουσωνική (Monsoon) (Ιούνιος-Σεπτέμβριος), Μεταμουσωνική (Postmonsoon) ( Οκτώβρης-Νοέμβρης) και Ξηρή περίοδος (Dry season) (Δεκέμβρης-Φλεβάρης). Τα περισσότερα στρώματα ανήκουν στην Προμουσωνική Περίοδο (Μάρτιος 2008-Μάιος 2008) και τα λιγότερα στρώματα ανήκουν στην Μεταμουσωνική περίοδο (Οκτώβρης 2008 – Νοέμβρης 2008), λόγω του πολύ χαμηλού αριθμού μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν μέσω του οργάνου lidar. Οι μεγαλύτερες μέσες τιμές των γεωμετρικών και οπτικών ιδιοτήτων με εξαίρεση τον εκθέτη Ångström ως προς τον συντελεστή εξασθένισης που παρουσιάζει την μικρότερη μέση τιμή, παρατηρήθηκαν την Μουσωνική περίοδο. Πιο συγκεκριμένα το μέσο κεντρικό ύψος ( $2260\pm 930\text{m}$ ), ο μέσος συντελεστής οπισθοσκέδασης ( $5.1\pm 4.6$ )\* $10^{-6} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ , ο μέσος συντελεστής εξασθένισης ( $2.3\pm 1.6$ )\* $10^{-4} \text{ m}^{-1}$ , ο μέσος λόγος lidar στα 355 και 532nm  $57\pm 22\text{sr}$  και  $49\pm 19\text{sr}$  αντίστοιχα και η χαμηλότερη μέση τιμή του εκθέτη Ångström συναρτήσει του συντελεστή εξασθένισης είναι  $1\pm 0,6$ . Οι παραπάνω τιμές αποτελούν ένδειξη υψηλότερης συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα λόγω των υψηλότερων τιμών των εκτατικών μεταβλητών την Μουσωνική περίοδο σε σύγκριση με τις άλλες περιόδους, ύπαρξη απορροφητικών σωματιδίων με μεγάλο μέγεθος το οποίο υποστηρίζεται από την τιμή του λόγου lidar στα 532nm και από την χαμηλή τιμή του εκθέτη Ångström συναρτήσει του συντελεστή εξασθένισης. Μικρότερες συγκεντρώσεις σωματιδίων παρατηρούνται την Προμουσωνική περίοδο λόγω των μικρότερων μέσων τιμών των εκτατικών μεταβλητών και ταυτόχρονα είναι λιγότερο απορροφητικά σε σύγκριση με την Μουσωνική περίοδο εξαιτίας της μικρότερης μέσης τιμής του λόγου lidar στα 532nm. Την Ξηρή περίοδο εμφανίζονται τα μικρότερα σε μέγεθος σωματίδια κάτι που δικαιολογείται από την μεγαλύτερη μέση τιμή του εκθέτη Ångström συναρτήσει του συντελεστή εξασθένισης σε σύγκριση με τις άλλες περιόδους, το γεγονός αυτό επαληθεύεται και από άλλες δημοσιεύσεις.

Η μελέτη των στρωμάτων συνεχίσθηκε χρησιμοποιώντας το μοντέλο (HYSPLIT) προκειμένου να παράγουμε 4 ημερών οπισθοτροχιές για κάθε στρώμα αιωρούμενων σωματιδίων που καταγράφεται στην περιοχή μας και ανήκει στην ελεύθερη τροπόσφαιρα και στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε οπτικός διαχωρισμός των στρωμάτων σε 6 τομείς κατευθυντικότητας. Οι τομείς είναι Βόρειος & Βορειοανατολικός τομέας (North&NorthEast section), Νότιος και Νοτιοανατολικός τομέας (South&SouthEast section), Δυτικός τομέας μακρινής μεταφοράς (West

section Long Range Transport), Δυτικός τομέας κοντινής μεταφοράς (West section Short Range Transport), Νοτιονοτιοδυτικός τομέας μακρινής μεταφοράς (SouthSouthWest section Long Range Transport) και Νοτιονοτιοδυτικός τομέας κοντινής μεταφοράς (SouthSouthWest section Short Range Transport). Τα συμπεράσματα είναι πως οι περισσότερες οπισθοτροχιές εντοπίζονται στον Νοτιονοτιοδυτικό κοντινής μεταφοράς τομέα (SouthSouthWest Short Range) και οι λιγότερες στον Νοτιονοτιοδυτικό μακρινής μεταφοράς (SouthSouthWest Long Range). Η μεγαλύτερη τιμή του κεντρικού ύψους εμφανίζεται στον Νοτιονοτιοδυτικό τομέα μακρινής μεταφοράς (SouthSouthWest Long Range) κάτι που δικαιολογείται από το γεγονός ότι η οπισθοτροχιά διέρχεται επάνω από την έρημο Σαχάρα και την Αραβική έρημο ενώ οι χαμηλότερες τιμές του κεντρικού ύψους εμφανίζονται στον Νότιο & Νοτιοανατολικό. Η μεγαλύτερη τιμή του λόγου lidar 532nm παρατηρείται στον Νότιο & Νοτιοανατολικό ένδειξη απορροφητικών σωματιδίων κάτι που δεν φαίνεται σωστό μιας και η μέση οπισθοτροχιά εμφανίζεται να διέρχεται επάνω από θαλάσσια επιφάνεια κάτι που καταδεικνύει την αδυναμία της μεθόδου εύρεσης μέσης οπισθοτροχιάς με την χρήση πολικών συντεταγμένων να αποτυπώσει το ποσοστό συνεισφοράς του κάθε τμήματος της μέσης οπισθοτροχιάς στο τελικό αποτέλεσμα των οπτικών και γεωμετρικών της ιδιοτήτων, όπως δικαιολογείται αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 3.5..Η μεγαλύτερη τιμή του εκθέτη Ångström εντοπίζονται στον Δυτικό τομέα τόσο μακρινής όσο και κοντινής μεταφοράς ένδειξη μικρών σωματιδίων.

Τέλος πραγματοποιήθηκε ανίχνευση των σωματιδίων που καταλήγουν στην περιοχή μελέτης μας με την συνδυαστική χρήση του μετεωρολογικού μοντέλου HYSPLIT, των δεδομένων του οργάνου MODIS καθώς και των κριτηρίων ύψους παρατήρησης των διαφορετικών τύπων σωματιδίων σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες. Οι κύριες κατηγορίες σωματιδίων που ανιχνεύθηκαν, με σειρά ποσοστού εμφάνισης, είναι σκόνη-καπνός (dustsmoke), καπνός (smoke), αναμειγμένα σωματίδια (mixture), ρυπασμένα ηπειρωτικά (continental polluted) και σκόνη (dust). Στην κατηγορία mixture ανήκουν, με σειρά ποσοστού εμφάνισης, τα ηπειρωτικά-καπνός (continentalsmoke), ηπειρωτικά-θαλάσσια (continentalmarine), σκόνη-θαλάσσια (dustmarine), ηπειρωτικά-θαλάσσια-καπνός (continentalmarinesmoke), σκόνη-θαλάσσια-καπνός (dustmarinesmoke), τα οποία εξετάζονται ως σύνολο στην κατηγορία αναμειγμένα σωματίδια (mixture). Το μεγαλύτερο κεντρικό ύψος εμφανίζεται στην περίπτωση των αέριων στρωμάτων που αποτελούνται από σωματίδια καπνού (smoke),  $2690 \pm 1040\text{m}$  και το μικρότερο κεντρικό ύψος εμφανίζεται στα αέρια στρώματα που αποτελούνται από αναμειγμένα σωματίδια (mixture),  $1860 \pm 920\text{m}$ . Οι μέγιστες τιμές του συντελεστή οπισθοσκέδασης και εξασθένισης παρουσιάζονται στην περίπτωση των αναμειγμένων σωματιδίων (mixture),  $(3.3 \pm 3.3) \cdot 10^{-6}$  και  $(1.6 \pm 0.8) \cdot 10^{-4}$  κάτι που αποτελεί ένδειξη μεγάλης συγκέντρωσης των εν λόγω σωματιδίων στο εσωτερικό των αέριων μαζών. Τα ρυπασμένα ηπειρωτικά σωματίδια με τιμές  $55 \pm 20\text{sr}$  στα 532nm καθώς και  $1.4 \pm 0.8$  για τους αντίστοιχους συντελεστές βρίσκονται στα πλαίσια της βιβλιογραφίας. Στην περίπτωση των σωματιδίων σκόνης (dust) η τιμή του λόγου lidar που έχει προκύψει

στην περιοχή καταγραφή μας βρίσκεται πλησιέστερα στις τιμές που προκύπτουν από τις ερήμους της Μέσης Ανατολής και όχι από την έρημο Σαχάρα. Όσον αφορά τα σωματίδια καπνού (smoke) οι τιμές του λόγου lidar στα 355nm και του εκθέτη Ångström του συντελεστή εξασθένισης στα 532 και 355 ταιριάζουν με τις τιμές που καταγράφηκαν από φωτιές που παρατηρήθηκαν στην Σιβηρία και στον Καναδά καθώς και οι εστίες φωτιάς αντιστοιχούν σε σωματίδια που έχουν δημιουργηθεί 7-8 ημέρες πριν την αντίστοιχη καταγραφή, σύμφωνα με τους Amiridis et al., [2009]. Οι τιμές των λόγων lidar στην περίπτωση των σωματιδίων σκόνη καπνού παρουσιάζουν την αντίθετη συμπεριφορά με βάση τις τιμές της βιβλιογραφίας [Mishchenko et al., 1997 ; Müller et al. ,2003].

Μελλοντικές έρευνες θα μπορούσαν να βελτιώσουν την ακρίβεια των οπτικών ιδιοτήτων που αντιστοιχούν στα διαφορετικά είδη σωματιδίων. Επιπρόσθετα σημαντικό είναι να πραγματοποιηθούν περισσότερες μελέτες προκειμένου να καθορισθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα κριτήρια ύψους εμφάνισης των διαφορετικών ειδών αιωρούμενων σωματιδίων, χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα θαλάσσια και τα ηπειρωτικά σωματίδια στα οποία δεν βρέθηκε βιβλιογραφία με τα ύψη παρατήρησης σε αντίθεση με τα σωματίδια σκόνης και καπνού. Τέλος χρήσιμο θα ήταν να αναπτυχθεί μέθοδος αυτόματου ανίχνευσης των αιωρούμενων σωματιδίων που αποτελούν τα στρώματα προκειμένου να μειωθεί ο χρόνος λήψης των τελικών αποτελεσμάτων και η μέθοδος ανίχνευσης να γίνει περισσότερο αντικειμενική.

## Παραρτήματα

### A. Κατάλογος Σχημάτων

1. Μέση επίδραση στο ισοζύγιο ακτινοβολίας του κλιματικού συστήματος το 2005,συγκριτικά με αυτό του 1750 [IPCC,2007].....	7
2. Η καμπίνα που περιέχει τα διάφορα τμήματα του Raman Lidar συστήματος PollyXT.....	11
3. Τοποθεσία μέτρησης Gual Pahari .....	18
4. Χωροχρονική απεικόνιση του σήματος (Quicklook) με το διορθωμένο σήμα να αποτυπώνεται στα 1064nm. ....	19
5. Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ: α) του συντελεστή οπισθοσκέδασης σε τρία μήκη κύματος 355, 532, 1064nm β) του συντελεστή εξασθένισης σε δύο μήκη κύματος 355, 532nm γ) της κλίσης καθ' ύψος του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα τρία μήκη κύματος.....	20
6. Η χωροχρονική αποτύπωση του ύψους της κορυφής του οριακού στρώματος.....	22

7. Διαφορά μεταξύ του ύψους του οριακού στρώματος(PBL) και της βάσης των στρωμάτων που ανήκουν στην ελεύθερη τροπόσφαιρα (FT).....	23
8. Το ποσοστό που καταλαμβάνουν τα στρώματα που ανήκουν σε κάθε κατηγορία της ατμόσφαιρας, οριακό στρώμα (PBL), οριακό στρώμα και ελεύθερη τροπόσφαιρα ταυτόχρονα(PBL&FT) και ελεύθερη τροπόσφαιρα (FT).....	24
9. Αποτύπωση του ποσοστού των στρωμάτων που ανήκουν στο οριακό στρώμα (PBL), στην ελεύθερη τροπόσφαιρα(FT) και στο οριακό στρώμα(PBL) ταυτόχρονα και τέλος στα στρώματα που ανήκουν στην ελεύθερη τροπόσφαιρα (FT).....	25
10. Αριθμός των στρωμάτων που παρατηρούνται σε όλη την ατμοσφαιρική στήλη (α) και στην ελεύθερη τροπόσφαιρα (β).....	25
11. Χρονοσειρά του κεντρικού ύψους των στρωμάτων της ελεύθερης τροπόσφαιρας.....	26
12. Χρονική αποτύπωση της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης του κεντρικού ύψους (center height) καθώς και του πάχους (depth) των στρωμάτων των αιωρούμενων σωματιδίων.....	27
13. Αποτύπωση του αριθμού των στρωμάτων συναρτήσει του πάχους των στρωμάτων (α) και του κεντρικού ύψους (β).....	28
14. Απεικόνιση των συντελεστών οπισθοσκέδασης (α) και συντελεστών εξασθένισης (β), με παράλληλη αποτύπωση των στρωμάτων που αντιστοιχούν σε κάθε μήνα στην κορυφή των διαγραμμάτων.....	29
15. Ο συντελεστής εξασθένισης (backscatter coefficient) (α) και συντελεστής οπισθοσκέδασης (β) για τα στρώματα της ελεύθερης τροπόσφαιρας συναρτήσει των μηνών με χρωματικό διαχωρισμό ως προς τις τρεις κατηγορίες εύρους κεντρικών υψών.....	30
16. Μέση τιμή και τυπική απόκλιση των εντατικών μεταβλητών συναρτήσει των μηνών καταγραφής, λόγος lidar (lidar ratio) (α) και εκθέτης Ångström (Ångström exponent) (β) συναρτήσει του συντελεστή εξασθένισης και του συντελεστή οπισθοσκέδασης.....	31
17. Παρουσιάζεται το σύνολο των τιμών των εντατικών μεταβλητών, λόγος lidar (lidar ratio) (α) και εκθέτης Ångström (Ångström exponent) (β) για τα στρώματα της ελεύθερης τροπόσφαιρας συναρτήσει των μηνών με χρωματικό διαχωρισμό ως προς τις τρεις κατηγορίες εύρους κεντρικών υψών.....	32
18. Το ποσοστό των στρωμάτων της ελεύθερης τροπόσφαιρας που εμφανίσθηκαν σε κάθε μια από τις τέσσερις εποχικές περιόδους.....	33
19. Το κεντρικό ύψος των στρωμάτων χωρισμένο στις τέσσερις εποχικές περιόδους.....	34

20. Απεικόνιση του συντελεστή οπισθοσκέδασης (backscatter coefficient) ( $\alpha$ ) και του συντελεστή εξασθένισης (extinction coefficient) ( $\beta$ ) για τα στρώματα της ελεύθερης τροπόσφαιρας συναρτήσει των εποχικών περιόδων.....	35
21. Αποτύπωση των τιμών του λόγου lidar(lidar ratio) στα 355( $\alpha$ ) και 532nm ( $\beta$ ) συναρτήσει των εποχών.....	36
22. Αποτύπωση των τιμών του εκθέτη Ångström του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 532 - 355nm ( $\alpha$ ) και του συντελεστή εξασθένισης στα 532 -355nm ( $\beta$ ) συναρτήσει των εποχών.....	37
23. Αποτύπωση των οπισθοτροχιών και των τομέων με βάση την κατευθυντικότητα τους.....	39
24. Αποτύπωση της πορείας των οπισθοτροχιών καθώς και το ύψος αυτών την ημερομηνία και ώρα 28 Φλεβάρη 2009 17:00.....	41
25. Απεικόνιση των μέσων οπισθοτροχιών του κάθε τομέα.....	42
26. Αποτύπωση του αριθμού των οπισθοτροχιών καθώς και του ποσοστού αυτών, που έχουν χρησιμοποιηθεί για να δημιουργηθεί η μέση οπισθοτροχιά στον αντίστοιχο τομέα.....	42
27. Απεικόνιση του κεντρικού ύψους των οπισθοτροχιών καθώς και του λόγου lidar στα 532nm και του εκθέτη Ångström του συντελεστή εξασθένισης στα 355 και 532nm, των μέσων οπισθοτροχιών στους 6 τομείς.....	43
28. Αποτύπωση των ποσοστών εμφάνισης των διαφόρων ειδών σωματιδίων.....	45
29. Αποτύπωση των ποσοστών εμφάνισης των διαφόρων ειδών σωματιδίων που ανήκουν στην κατηγορία των αναμειγμένων σωματιδίων.....	46
30. Απεικόνιση των ερήμων που επηρεάζουν την περιοχή καταγραφής.....	47
31. Απεικόνιση των οπισθοτροχιών για την ημέρα και ώρα καταγραφής 16 Μαρτίου 2008 09:00 UTC εξέταση του στρώματος (Layer) 2 που προσλαμβάνει σωματίδια σκόνης- καπνού (dustsmoke).....	47
32. Απεικόνιση των οπισθοτροχιών για την ημέρα και ώρα καταγραφής 21 Μαρτίου 2008 19:00 UTC, εξέταση του στρώματος (Layer) 4 που προσλαμβάνει σωματίδια καπνού (smoke).....	48
33. Απεικόνιση των οπισθοτροχιών για την ημέρα και ώρα καταγραφής 25 Ιουνίου 2008 13:00 UTC, εξέταση του στρώματος (Layer) 2 που προσλαμβάνει σωματίδια ρυπασμένα ηπειρωτικά (continental polluted).....	49
34. Απεικόνιση των οπισθοτροχιών για την ημέρα και ώρα καταγραφής 26 Αυγούστου 2008 19:00 UTC, εξέταση του στρώματος (Layer) 2 που προσλαμβάνει σωματίδια σκόνης (dust).....	49

35. Απεικόνιση των οπισθοτροχιών για την ημέρα και ώρα καταγραφής 05 Απριλίου 2008 05:00 UTC, εξέταση των στρωμάτων (Layer) 2,3 που προσλαμβάνουν σωματίδια ηπειρωτικά-καπνός (continentalsmoke).....	50
36. Απεικόνιση των οπισθοτροχιών για την ημέρα και ώρα καταγραφής 01 Ιουλίου 2008 12:00 UTC, εξέταση των στρωμάτων (Layer) 1,2 που προσλαμβάνουν σωματίδια ηπειρωτικά-θαλάσσια (continental-marine).....	51
37. Απεικόνιση των οπισθοτροχιών για την ημέρα και ώρα καταγραφής 02 Σεπτεμβρίου 2008 20:00 UTC, εξέταση του στρώματος (Layer) 1 που προσλαμβάνει σωματίδια σκόνης-θαλάσσια (dustmarine).....	51
38. Απεικόνιση των οπισθοτροχιών για την ημέρα και ώρα καταγραφής 05 Απριλίου 2008 07:00 UTC, εξέταση του στρώματος (Layer) 2 που προσλαμβάνει σωματίδια ηπειρωτικά-θαλάσσια-καπνού (continentalmarinesmoke).....	52
39. Απεικόνιση των οπισθοτροχιών για την ημέρα και ώρα καταγραφής 17 Μαΐου 2008 13:00 UTC, εξέταση του στρώματος (Layer) 2 που προσλαμβάνει σωματίδια σκόνης-θαλάσσια-καπνού ( dustmarinesmoke).....	53
40. Απεικόνιση του κεντρικού ύψους των αέριων μαζών/στρωμάτων (Layers) που αποτελούνται από διαφορετικά είδη σωματιδίων.....	54
41. Απεικόνιση των συντελεστών οπισθοσκέδασης (backscatter coefficient ( $\alpha$ ) και του συντελεστή εξασθένησης (extinction coefficient) ( $\beta$ ) στα 532nm για τους διαφορετικούς τύπους σωματιδίων που καταγράφονται στο εσωτερικό των αέριων μαζών.....	54
42. Απεικόνιση του λόγου lidar (lidar ratio) στα 355 ( $\alpha$ ) και 532nm ( $\beta$ ) καθώς και του εκθέτη Ångström του συντελεστή εξασθένησης στα 532 και 355nm (Ångström Exponent ext 532nm to 355nm) ( $\gamma$ ) για τα διαφορετικά είδη σωματιδίων.....	57

## B. Κατάλογος Πινάκων

1. Οπτικές ιδιότητες αιωρούμενων σωματιδίων παραγόμενες με μετρήσεις lidar. Επίσης αναφέρονται τα σύμβολα και οι αντίστοιχες μονάδες.....	12
2. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις του κεντρικού ύψους και των οπτικών ιδιοτήτων στην διάρκεια ενός χρόνου.....	33
3. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις του κεντρικού ύψους και των οπτικών ιδιοτήτων ανα εποχή.....	38
4. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις του κεντρικού ύψους και των οπτικών ιδιοτήτων ανα τομέα προέλευσης των οπισθοτροχιών.....	44
5. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις του κεντρικού ύψους και των οπτικών ιδιοτήτων ανα είδος σωματιδίων στην περιοχή μελέτης.....	57



## Γ. Αγγλικοί όροι

Aethalometer	Αιθαλόμετρο
Ångström Exponent backscatter related	Εκθέτης Ångström του συντελεστή οπισθοσκέδασης
Ångström Exponent extinction related	Εκθέτης Ångström του συντελεστή εξασθένισης
Backscatter Coefficient	Συντελεστής Οπισθοσκέδασης
Brown Cloud	Καφέ σύννεφο
Center Height	Κεντρικό ύψος
Continental Marine	Σωματίδια Ηπειρωτικά και Θαλάσσια
Continental Marine Smoke	Σωματίδια Ηπειρωτικά, Θαλάσσια και Καπνού
Continental Polluted	Ρυπασμένα ηπειρωτικά Σωματίδια
Continental Smoke	Σωματίδια Ηπειρωτικά και καπνού
Dry Season	Ξηρή περίοδος
Dust	Σωματίδια σκόνης
Dustmarine	Σωματίδια Σκόνης και Θαλάσσια
Dustmarinesmoke	Σωματίδια Σκόνης, Θαλάσσια και Καπνού
Dustsmoke	Σωματίδια σκόνης καπνού
Extinction Coefficient	Συντελεστής Εξασθένισης
Free Troposphere	Ελεύθερη τροπόσφαιρα
Layers	Στρώματα αιωρούμενων σωματιδίων

Lidar Ratio	Λόγος Lidar
Low Scientific understanding	Χαμηλό επίπεδο κατανόησης
Mixture	Αναμεμειγμένα σωματίδια
Monsoon	Μουσωνική περίοδος
North&NorthEast section	Βόρειος και Βορειοανατολικός τομέας
Nephelometer	Νεφελόμετρο
Planetary Boundary Layer	Οριακό στρώμα
Postmonsoon	Μεταμουσωνική περίοδος
Premonsoon	Προμουσωνική περίοδος
Quicklook	Διάγραμμα χωροχρονικής κατανομής του διορθωμένου σήματος
Smoke	Σωματίδια καπνού
South&SouthEast section	Νότιος και Νοτιοανατολικός Τομέας
SouthSouthWest Long Range	Νοτιονοτιοδυτικός μακρινής Μεταφοράς
SouthSouthWest Short Range	Νοτιονοτιοδυτικός κοντινής Μεταφοράς
Sun Photometer	Φωτόμετρο
West Long Range	Δυτικός μακρινής μεταφοράς
West Short Range	Δυτικός κοντινής μεταφοράς

## Δ. Συντομογραφίες όρων

Bsc	Backscatter Coefficient
EUCAARI	European Integrated Project on Aerosol Climate and Air Quality Interactions
Ext	Extinction Coefficient
FT	Free Troposphere
HYSPLIT	Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory
INDOEX	INDian Ocean EXperiment
Lidar	Light detection and ranging
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
PBL	Planetary Boundary Layer
PollyXT	POrtable Lidar sYstem eXTended
WCT	Wavelet Covariance Transform

## Βιβλιογραφία

- Althausen, D., Engelmann, R., Baars, H., Heese, B., Ansmann, A., Müller, D., and Komppula, M.: Portable Raman Lidar Polly(XT) for Automated Profiling of Aerosol Backscatter, Extinction, and Depolarization, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 26, 2366–2378, 2009.
- Amiridis, V., Balis, D. S., Giannakaki, E., Stohl, A., Kazadzis, S., Koukouli, M.E. and Zanis, P.: Optical characteristics of biomass burning aerosols over Southeastern Europe determined from UV-Raman lidar measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 2431–2440, 2009
- Amiridis, V., Giannakaki, E., Balis, D. S., Gerasopoulos, E., Pytharoulis, I., Zanis, P., Kazadzis, S., Melas, D. and Zerefos, C., "Smoke injection heights from agricultural burning in Eastern Europe as seen by CALIPSO", *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 11567–11576, 2010
- Ångström, A. 1964, "The parameters of atmospheric turbidity", *Tellus XIV* vol. 14, pp. 64–75
- Ansmann, A., Riebesell, M. & Weitkamp, C. 1990, "Measurement of atmospheric aerosol extinction profiles with a Raman lidar", *Optics Letters*, vol. 15, pp. 746-748.
- Ansmann, A., Wandinger, U., Riebesell, M., Weitkamp, C. & Michaelis, W., 1992: "Independent measurement of extinction and backscatter profiles in cirrus clouds by using a combined Raman elastic backscatter lidar", *Applied Optics*, 31, 7113-7131.
- Balis, D. S., Amiridis, V., Nickovic, S., Papayannis, A., and Zerefos, C.: Optical properties of Saharan dust layers as detected by a Raman lidar at Thessaloniki, Greece, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L13104, doi:10.1029/2004gl019881, 2004.
- Bösenberg, J., Matthias, V., Amodeo, A., et al.: EARLINET: A European Aerosol Research Lidar Network to establish an Aerosol Climatology, final report, MPI Rep. 348, Max-Planck-Inst. für Meteorol., Hamburg, Germany, 6–31, 2003.
- Brooks, I. M.: Finding boundary layer top: Application of a wavelet covariance transform to lidar backscatter profiles, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 20, 1092–1105, doi:10.1175/1520-0426(2003)020<1092:FBLTAO>2.0.CO;2, 2003.
- Draxler, R. R. and Hess, G. D.: Description of the HYSPLIT 4 modeling system, NOAA Tech Memo, ERL ARL-224, 24, NOAA, Silver Spring, Md., USA, 1997.

- Duck, T. J, Firanski, B., Lind, F. D., and Sipler, D.: Aircraft-protection radar for use with atmospheric lidars, *Appl. Opt.*, 44, 4937–4945, 2005
- Fernald, F.G., Herman, B.M. & Reagan, J.A. 1972, "Determination of aerosol height distributions by lidar", *Journal of Applied Meteorology*, vol. 11, pp. 482-489.
- Fernald, F.G. 1984, "Analysis of atmospheric lidar observations, some comments", *Applied Optics*, vol. 32, pp. 652-653
- Ferrare, R.A., Melfi, S.H., Whiteman, D.N., Evans, K.D. & Leifer, R. 1998, "Raman lidar measurements of aerosol extinction and backscattering: 1. Methods and comparisons", *Journal of Geophysical Research*, vol. 103, no. D16, pp. 19663-19672.
- Ferrare, R.A., Turner, D.D., Brasseur, L.H., Feltz, W.F., Dubovik, O. & Tooman, T.P. 2001, "Raman lidar measurements of the aerosol extinction-to-backscatter ratio over the Southern Great Plains", *Journal of Geophysical Research*, vol. 106, no. D17, pp. 20333-20347.
- Flamant, C., Pelon, J., Flamant, P. H., and Durand, P.: Lidar determination of the entrainment zone thickness at the top of the unstable marine atmospheric boundary layer, *Bound.-Lay. Meteorol.* , 83, 247–284, doi:10.1023/a:1000258318944, 1997.
- Franke, K., Ansmann, A., Müller, D., Althausen, D., Wagner, F. & Scheele, R. 2001, "One-year observations of particle lidar ratio over the tropical Indian Ocean with Raman lidar", *Geophysical Research Letters*, vol. 28, no. 24, pp. 4559-4562.
- Franke, K., Ansmann, A., Müller, D., Althausen, D., Venkataraman, C., Reddy, M.S., Wagner, F. & Scheele, R. 2003, "Optical properties of the Indo-Asian haze layer over the tropical Indian Ocean", *Journal of Geophysical Research*, vol. 108, no. 2.
- Ganguly, D., Jayaraman, A., and Gadhavi, H.: Physical and optical properties of aerosols over an urban location in western India: Seasonal variabilities, *J. Geophys. Res.*, 111, D24206, doi:10.1029/2006JD007392, 2006a.
- Ganguly, D., Jayaraman, A., Rajesh, T. A., and Gadhavi, H.: Wintertime aerosol properties during foggy and nonfoggy days over urban center Delhi and their implications for shortwave radiative forcing, *J. Geophys. Res.*, 111, D15217, doi:10.1029/2005JD007029, 2006b.
- Giannakaki, E., Balis, D. S., Amiridis, V., and Zerefos, C.: Optical properties of different aerosol types: seven years of combined Raman-elastic backscatter lidar measurements in Thessaloniki, Greece, *Atmos. Meas. Tech.*, 3, 569–578, doi:10.5194/amt-3- 569-2010, 2010.

- Giglio, L., Randerson, J. T., van der Werf, G. R., Kasibhatla, P. S., Collatz, G. J., Morton, D. C., and DeFries, R. S.: Assessing variability and long-term trends in burned area by merging multiple satellite fire products, *Biogeosciences*, 7, 1171–1186, doi:10.5194/bg-7-1171-2010, 2010.
- Haywood, J. & Boucher, O. 2000, "Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review", *Reviews of Geophysics*, vol. 38, no. 4, pp. 513-543.
- Hsu, N. C., Herman, J. R., and Weaver, C.: Determination of radiative forcing of Saharan dust using combined TOMS and ERBE data, *J. Geophys. Res.*, 105, 20649–20661, doi:10.1029/2000jd900150, 2000.
- Hyvarinen, A.-P., Lihavainen, H., Komppula, M., Panwar, T. S., Sharma, V. P., Hooda, R. K., and Viisanen, Y.: Aerosol measurements at the Gual Pahari EUCAARI station: preliminary results from in-situ measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 7241–7252, doi:10.5194/acp-10-7241-2010, 2010
- Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2007: "The physical science, Technical summary of the working group I report"*, Cambridge University Press, New York
- IPCC: *The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by: Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K, Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, P. M., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.
- Klett, J.D. 1981, "Stable analytical inversion solution for processing lidar returns", *Applied Optics*, vol. 20, no. 2, pp. 211-220.
- Kovalev, V.A. & Eichinger, W.E. 2004, "Elastic Lidar: Theory, Practice, and Analysis Methods", Willey & Sons
- Komppula, M., Mielonen, T., Arola, A., Korhonen, K., Lihavainen, H., Hyvärinen, A.-P., Baars, H., Engelmann, R., Althausen, D., Ansmann, A., Müller, D., Panwar, T.S., Hooda, R.K., Sharma, V.P., Kerminen, V.-M., Lehtinen, K.E.J., Viisanen, Y.: Technical Note: One year of Raman-lidar measurements in Gual Pahari EUCAARI site close to New Delhi in India – Seasonal characteristics of the aerosol vertical structure. *Atmospheric Chemistry and Physics* 12, 4513–4524. <https://doi.org/10.5194/acp-12-4513-2012>, 2012

- Korhonen, K., Giannakaki, E., Mielonen, T., Pfüller, A., Laakso, L., Vakkari, V., Baars, H., Engelmann, R., Beukes, J. P., Van Zyl, P. G., Ramandh, A., Ntsangwane, L., Josipovic, M., Tiitta, P., Fourie, G., Ngwana, I., Chiloane, K., and Komppula, M.: Atmospheric boundary layer top height in South Africa: measurements with lidar and radiosonde compared to three atmospheric model, *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 4263–4278, doi:10.5194/acp-14-4263-2014, 2014.
- Liu, D., Zhi, W., Liu, Z., Winker, D. & Trepte, C. (2008), A height resolved global view of dust aerosols from the first year CALIPSO lidar measurements, *J. Geophys. Res.*, **VOL. 113**, D16214, doi:10.1029/2007JD009776
- Matthias, V., et al. (2004), Vertical aerosol distribution over Europe: Statistical analysis of Raman lidar data from 10 EARLINET stations, *J. Geophys. Res.*, **109**, D18201, doi:10.1029/2004JD004638.
- Mattis, I., V. Jaenisch, D. Müller, K. Franke, and A. Ansmann (2000), Classification of particle extinction profiles derived within the framework of the German lidar network by the use of cluster analysis of backtrajectories, in *Lidar Remote Sensing of the Atmosphere*, edited by A. Dabas, C. Loth, and J. Pelon, pp. 211 – 214, Ed. Ecole Polytech., Palaiseau, France.
- Mattis, I., Ansmann, A., Müller, D., Wandinger, U. & Althausen, D. 2004, "Multiyear aerosol observations with dual-wavelength Raman lidar in the framework of EARLINET", *Journal of Geophysical Research*, , pp. 109.
- Mattis, I., Müller, D., Ansmann, A., Wandinger, U., Preissler, J., Seifert, P., and Tesche, M.: Ten years of multiwavelength Raman lidar observations of free-tropospheric aerosol layers over central Europe: Geometrical properties and annual cycle, *J. Geophys. Res.*, **113**, D20202, doi:10.1029/2007jd009636, 2008.
- Mishchenko, M., Travis, L. D., Kahn, R. A. and West, R. A.: Modeling phase functions for dustlike tropospheric aerosols using a shape mixture of randomly oriented polydisperse spheroids, *J. Geophys. Res.*, **102**, 16831–16847, 1997.
- Müller, D., Franke, K., Wagner, F., Althausen, D., Ansmann, A., and Heintzenberg, J: Vertical profiling of optical and physical particle properties over the tropical Indian Ocean with six- wavelength lidar 1. Seasonal cycle, *J. Geophys. Res.*, **106(D22)**, 28567–28575, 2001.

- Muller, D., Mattis, I., Wandinger, U., Ansmann, A., Althausen, D., Dubovik, O., Eckhardt, S., and Stohl, A.: Saharan dust over a central European EARLINET-AERONET site: combined observations with Raman lidar and Sun photometer, *J. Geophys. Res.*, 108, 4345, doi:10.1029/2002JD002918, 2003.
- Muller, D., I. Mattis, A. Ansmann, B. Wehner, D. Althausen, U. Wandinger, and O. Dubovik (2004), Closure study on optical and microphysical properties of a mixed urban and Arctic haze air mass observed with Raman lidar and Sun photometer, *J. Geophys. Res.*, 109, D13206, doi:10.1029/2003JD004200.
- Muller, D., Ansmann, A., Mattis, I., Tesche, M., Wandinger, U., Althausen, D. & Pisani, G. 2007, "Aerosol-type-dependent lidar ratios observed with Raman lidar", *Journal of Geophysical Research*, vol. 112, no. 16.
- Nakajima, T. Yoon, S.C., Ramanathan, V., Shi, G.Y., Takemura, T., Higurashi, A., Takamura, T., Aoki, K., Sohn, B. J., Kim, S. W., Tsuruta, H., Sugimoto, N., Shimizu, A., Tanimoto, H., Sawa, Y., Lin, N. H., Lee, C. T., Goto, D., and Schutgens, N.: Overview of the Atmospheric Brown Cloud East Asian Regional Experiment 2005 and a study of the aerosol direct radiative forcing in East Asia, *J. Geophys. Res.*, 112, D24S91, doi:10.1029/2007JD009009, 2007.
- Niranjan, K., Madhavan, B. L., and Sreekanth, V.: Micro pulse lidar observation of high altitude aerosol layers at Visakhapatnam located on the east coast of India, *Geophys. Res. Lett.*, 34(3), L03815, doi: 10.1029/2006GL028199, 2007
- Nisantzi, A., Mamouri, R.E., Ansmann, A., Schuster, G.L. and Hadjimitsis, D. G. : Middle East versus Saharan dust extinction-to-backscatter ratios, *Atmos.Chem.Phys.Discuss.*, 15, 5203-5240, doi:10.5194/acpd-15-5203-2015, 2015
- Pelon, J., Flamant, C., Chazette, P., et al., 2002: Characterization of aerosol spatial distribution and optical properties over the Indian Ocean from airborne LIDAR and radiometry during INDOEX'99, *J. Geophys. Res.*, 107(D19), 8029, doi:10.1029/2001JD000402.
- Penner, J.E., Andreae, M., Annegarn, H., Barrie, L., Feichter, J., Hegg, D., Jayaraman, A., Leaitch, R., Murphy, D., Nganga, J. & Pitari, G. 2001, "Aerosols, their direct and indirect effects", IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.



- Ramanathan, V., Li, F., Ramana, M. V., Praveen, P. S., Kim, D., Corrigan, C. E., Nguyen, H., Stone, E. A., Schauer, J. J., Carmichael, G. R., Adhikary, B., and Yoon, S. C.: Atmospheric brown clouds: Hemispherical and regional variations in long-range transport, absorption and radiative forcing, *J. Geophys. Res.*, 112, D22S21, doi:10.1029/2006JD008124, 2007a
- Ramanathan, V., Ramana, M. V., Roberts, G., Kim, D., Corrigan, C., Chung, C., and Winker, D.: Warming trends in Asia amplified by brown cloud solar absorption, *Nature*, 448, 575–579, 2007b.
- Reddy, M. S. and Venkataraman, C.: Inventory of aerosol and sulphur dioxide emissions from India: Part I – Fossil fuel combustion, *Atmos. Env.*, 36, 677–697, 2002a.
- Reddy, M. S. and Venkataraman, C.: Inventory of aerosol and sulphur dioxide emissions from India. Part II – biomass combustion, *Atmos. Env.*, 36, 699–712, 2002b.
- Sasano, Y., Browell, E.V. & Ismail, S. 1985, "Error caused by using a constant extinction/backscattering ratio in the lidar solution", *Applied Optics*, vol. 24, pp. 3929-3932.
- Wandinger, U., et al. (2002), Optical and microphysical characterization of biomass-burning and industrial-pollution aerosols from multiwavelength lidar and aircraft measurements, *J. Geophys. Res.*, 107(D21), 8125, doi:10.1029/2000JD000202.
- Weitkamp, C. (Ed.). 2005. "Lidar Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere." Springer, New York.
- Welton, E. J., Voss, K. J., Quinn, P. K., Flatau, P. J., Markowicz, K., Campbell, J. R., Spinhirne, J. D., Gordon, H. R., and Johnson, J. E.: Measurements of aerosol vertical profiles and optical properties during INDOEX 1999 using Micro-Pulse Lidars, *J. Geophys. Res.*, 107(D19), 8019, doi: 10.1029/2000JD000038, 2002.
- Γιαννακάκη, Ε., 2009, «Μελέτη των οπτικών και φυσικών ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων με μεθόδους τηλεπισκόπησης laser», Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
- Νακούδη,Κ.,2018, «Μελέτη του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος με μεθόδους τηλεπισκόπησης lidar στην Ινδία», Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών