



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ

---

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΓΥΡΗΣ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ  
ΕΝΕΡΓΗΣ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

*Μεταπτυχιακή Φοιτήτρια:*  
ΓΑΤΟΥ ΜΑΡΙΑ ΧΡΙΣΤΙΝΑ

*A.M.:*  
2019405

Αθήνα, 2021

Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών  
Τμήμα Φυσικής, Τομέας Φυσικής Περιβάλλοντος και  
Μετεωρολογίας

Μεταπτυχιακή Εργασία

“Μελέτη ατμοσφαιρικής γύρης με μεθόδους ενεργής  
Τηλεπισκόπησης”

Γάτου Μαρία Χριστίνα

Επιβλέπουσα: Γιαννακάκη Ελένη, Λέκτορας ΕΚΠΑ

Τριμελής Επιτροπή

Γιαννακάκη Ε.  
Λέκτορας ΕΚΠΑ

Αμοιρίδης Β.  
Ερευνητής Β'Εθνικό  
Αστεροσκοπείο Αθηνών

Mika Komppula  
Adj. Professor  
Μετεωρολογικό  
Ινστιτούτο  
Φινλανδίας

Αθήνα, 2021

## Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>10</b>
1.1	Τι είναι η γύρη . . . . .	10
1.2	Ατμοσφαιρική γύρη και υγεία . . . . .	10
1.3	Η γύρη και κλιματική αλλαγή . . . . .	12
1.3.1	Αύξηση CO <sub>2</sub> και γύρη . . . . .	15
1.4	Βιογενείς ρύποι και γύρη . . . . .	18
1.5	Lidar και κατακόρυφη κατανομή . . . . .	19
1.6	Σκοπός της εργασίας . . . . .	19
<b>2</b>	<b>Η τεχνική Lidar</b>	<b>20</b>
2.1	Αρχή Λειτουργίας . . . . .	20
2.2	Εξίσωση lidar . . . . .	20
2.3	Μέθοδος Klett . . . . .	21
2.4	Μέθοδος Raman . . . . .	22
2.5	Fluorecence lidar . . . . .	22
2.6	Οπτικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων . . . . .	24
2.6.1	Εκτατικές οπτικές Ιδιότητες . . . . .	24
2.6.2	Εντατικές οπτικές Ιδιότητες . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Μεθοδολογία</b>	<b>28</b>
3.1	Γυροπαγίδα Hirst . . . . .	28
3.2	Raman Polly <sup>XT</sup> Lidar . . . . .	28

3.3	Δεδομένα- Περιοχή μελέτης . . . . .	29
3.3.1	Περιοχή μελέτης . . . . .	29
3.3.2	Σταθμοί Δεδομένων . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Δίκτυο AERONET και Ηλιακό Φωτόμετρο</b>	<b>31</b>
4.1	Δίκτυο AERONET . . . . .	31
4.2	Ηλιακό φωτόμετρο Cimel . . . . .	32
4.3	Μεθοδολογία . . . . .	32
<b>5</b>	<b>Αποτελέσματα</b>	<b>33</b>
5.1	Συγκέντρωση και είδη ατμοσφαιρικής γύρης . . . . .	33
5.2	Προσδιορισμός των στρωμάτων και case studies . . . . .	36
5.2.1	Μεθοδολογία εύρεσης του πρώτου στρώματος της ατμόσφαιρα . . . . .	36
5.2.2	Μελέτη περιπτώσεων . . . . .	40
5.3	Γεωμετρικές και Οπτικές Ιδιότητες Lidar του στρώματος της ατμοσφαιρικής γύρης . . . . .	43
5.4	Οπτικές Ιδιότητες Φωτόμετρου Cimel . . . . .	53
5.5	Σύγκριση του λόγου Lidar 532nm όπως προκύπτει από μετρήσεις Lidar και φωτόμετρου Cimel μέσω γραμμικής παρεμβολής . . . . .	61
5.6	Φασματική εξάρτηση λόγου Lidar και συντελεστή αποπόλωσης . . . . .	62
5.7	Συσχέτιση του λόγου Lidar του συντελεστή αποπόλωσης και του εκθέτη Ångström από AERONET . . . . .	64
5.8	Συσχέτιση Κατανομής μεγεθών και συντελεστή μεμονωμένης σκέδασης . . . . .	66
<b>6</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	<b>67</b>

## Πίνακες

2.6.1 Οπτικές Ιδιότητες Αιωρούμενων Σωματιδίων . . . . .	24
5.1.1 Κυρίαρχα είδη γύρης . . . . .	33
5.1.2 Χρονικές περίοδοι μελέτης . . . . .	36
5.3.1 Μέσες τιμές οπτικών ιδιοτήτων του στρώματος για κάθε χρονική περίοδο . . . . .	44
5.3.2 Αριθμός δεδομένων για κάθε χρονική περίοδο . . . . .	44
5.4.1 (a) Μέσες τιμές οπτικών ιδιοτήτων των στρωμάτων για κάθε χρονική περίοδο από δεδομένα AERONET . . . . .	58
5.4.2 (b) Μέσες τιμές οπτικών και μικροφυσικών ιδιοτήτων των στρωμάτων για κάθε χρονική περίοδο από δεδομένα AERONET . . . . .	59
5.4.3 (c) Μέσες τιμές μικροφυσικών ιδιοτήτων των σωματιδίων των στρωμάτων για κάθε χρονική περίοδο από δεδομένα AERONET . . . . .	59
5.4.4 Αριθμός δεδομένων για κάθε χρονική περίοδο . . . . .	60
5.8.1 Ημέρες με αυξημένες τιμές κατανομής μεγεθών μεταξύ fine και coarse mode . . . . .	66

## Σχήματα

1.1.1 Απελευθέρωση κόκκων γύρης . . . . .	10
1.2.1 Annual count and highest daily mean for birch pollen in Basel, Switzerland, from 1960 to 2006 Birch pollen allergy in Europe, T. Biedermann, L. Winther, S. J. Till, P. Panzner, A. Knulst, E.Valovirta, <a href="https://doi.org/10.1111/all.13758">https://doi.org/10.1111/all.13758</a> . . . . .	11
1.3.1 Μέση επίδραση στο ισοζύγιο της ακτινοβολίας του κλιματικού συστήματος το 2011, σε σχέση με αυτό του 1750 [IPCC, 2013] . . . . .	13
1.3.2 Πρόβλεψη παραγωγής ανθρωπογενών αερολυμάτων ανάλογα το κάθε σενάριο . . . . .	14
1.3.3 Παραγωγή CO <sub>2</sub> (ppm) την τελευταία εικοσαετία . . . . .	17

4.1.1 Παγκόσμιοι Σταθμοί Δεδομένων AERONET . . . . .	31
5.1.1 Συγκέντρωση γύρης ανά είδος κατά την περίοδο 29/04/2016-29/08/2016 . . . . .	34
5.1.2 Συγκέντρωση γύρης κατά την περίοδο 29/04/2016-29/08/2016 . . . . .	34
5.1.3 Μικροφωτογραφίες ειδών γύρης που κυριάρχησαν . . . . .	35
5.2.1 Γραφική απεικόνιση εξίσωσης Haar . . . . .	38
5.2.2 Color Plot του διορθωμένου με την απόσταση σήμα για 08/05/2016 . . . . .	41
5.2.3 Κατακόρυφες κατανομές οπτικών ιδιοτήτων αιωρούμενων σωματιδίων 08/05/2020 . . . . .	42
5.2.4 Color Plot του διορθωμένου με την απόσταση σήμα για 24/05/2016 . . . . .	42
5.2.5 Κατακόρυφες κατανομές οπτικών ιδιοτήτων αιωρούμενων σωματιδίων 24/05/2016 . . . . .	43
5.3.1 Κορυφή και Βάση στρωμάτων. Με κάθετες γραμμές ορίζονται η αρχή και το τέλος κάθε περιόδου . . . . .	45
5.3.2 Μέσες τιμές λόγου Lidar 355nm και 532nm . . . . .	46
5.3.3 Μέσες τιμές Aext, A355/532 και A532/1064 . . . . .	47
5.3.4 Μέσες τιμές Volume και σωματιδιακού συντελεστή αποπόλωσης . . . . .	48
5.3.5 Συσχέτιση εκθέτη Ångström 355/532nm και σωματιδιακού συντελεστή αποπόλωσης 532nm	
50	
5.3.6 Συσχέτιση λόγου Lidar 532nm και σωματιδιακού συντελεστή αποπόλωσης 532nm . . . . .	50
5.3.7 Συσχέτιση σωματιδιακού συντελεστή αποπόλωσης 532nm και σχετικής υγρασίας [%] . . . . .	51
5.3.8 Συσχέτιση εκθέτη Ångström 355/532nm και σχετικής υγρασίας [%] . . . . .	52
5.4.1 Χρονοσειρά λόγου lidar και συντελεστή αποπόλωσης 675nm . . . . .	53
5.4.2 Χρονοσειρά εκθέτη Ångström 440/870nm και οπτικού βάθους λόγω εξασθένησης. (Με μαύρο απεικονίζονται τα δεδομένα Total, με γκρι σκούρο τα δεδομένα Fine και με γκρι ανοιχτό τα δεδομένα Coarse) . . . . .	54
5.4.3 Χρονοσειρά οπτικού βάθους λόγω εξασθένησης Total και Fine . . . . .	54

5.4.4 Χρονοσειρά οπτικού βάρους λόγω εξασθένησης Coarse . . . . .	55
5.4.5 Χρονοσειρά του φανταστικού και πραγματικού δείκτη διάθλασης (Με μαύρο απεικονίζεται το φανταστικό μέρος και με γκρι σκούρο το πραγματικό) . . . . .	55
5.4.6 Χρονοσειρά του συντελεστή μεμονωμένης σκέδασης 675nm . . . . .	56
5.4.7 Χρονοσειρά του οπτικού βάρους λόγω απορρόφησης και του εκθέτη Ångström 440/870nm λόγω απορρόφησης. . . . .	56
5.4.8 Χρονοσειρές Συγκέντρωσης όγκου και ενεργού ακτίνας (Με μαύρο απεικονίζονται τα δεδομένα Total, με γκρι σκούρο τα δεδομένα Fine και με γκρι ανοιχτό τα δεδομένα Coarse)	57
5.4.9 Χρονοσειρά τυπικής απόκλισης ακτίνας και Volume Median Radius (Με μαύρο απεικονίζονται τα δεδομένα Total, με γκρι σκούρο τα δεδομένα Fine και με γκρι ανοιχτό τα δεδομένα Coarse) . . . . .	58
5.5.1 Συσχέτιση του λόγου Lidar 532nm και λόγου Lidar από AERONET 532nm για κάθε στρώμα . . . . .	61
5.5.2 Συσχέτιση του λόγου Lidar 532nm και λόγου Lidar από AERONET 532nm για όλη την ατμοσφαιρική στήλη . . . . .	62
5.6.1 Φασματική εξάρτηση λόγου Lidar ανά περίοδο μελέτης. Με μαύρο, σκούρο γκρι και ανοιχτό γκρι έχουν επισημανθεί οι τιμές του λόγου lidar που προέκυψαν μέσω γραμμικής παρεμβολής από δεδομένα του AERONET. Τα δεδομένα στα 355 και 532nm προκύπτουν από το Lidar, ενώ τα υπόλοιπα από τα products του AERONET . . . . .	63
5.6.2 Φασματική εξάρτηση συντελεστή αποπόλωσης ανά περίοδο μελέτης . . . . .	63
5.7.1 Συσχέτιση του λόγου Lidar και του συντελεστή αποπόλωσης 675nm ανά περίοδο μελέτης. Το μέγεθος των κουκκίδων δηλώνει την συγκέντρωση σε αιωρούμενα σωματίδια . . . . .	65
5.7.2 Συσχέτιση του εκθέτη Ångström 440 – 870nm και του συντελεστή αποπόλωσης 675nm ανά περίοδο μελέτης. Το μέγεθος των κουκκίδων δηλώνει την συγκέντρωση σε αιωρούμενα σωματίδια . . . . .	65
5.8.1 Κατανομή μεγεθών και συντελεστής μεμονωμένης σκέδασης . . . . .	67

## Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία σημαίνει και την ολοκλήρωση των μεταπτυχιακών μου σπουδών στον Τομέα Φυσικής Περιβάλλοντος και Μετεωρολογίας. Καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου είχα την ανιδιοτελή στήριξη αρκετών ανθρώπων, τους οποίους και θα ήθελα να ευχαριστήσω. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Λέκτορα κ. Ελίνα Γιαννακάκη, η οποία ήταν η επιβλέπουσα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η καθοδήγηση της και το ενδιαφέρον που έδειξε κατά τη διάρκεια όλων αυτών των μηνών αποτέλεσε αρωγό στην εξαιρετικά γόνιμη, δημιουργική και αποτελεσματική συνεργασία μας μέσα σε ένα κλίμα εμπιστοσύνης και προσήλωσης στον στόχο της παρούσας εργασίας. Την ευχαριστώ θερμά τόσο για τις επιστημονικές γνώσεις που μου παρείχε όσο και για την στήριξη και την παρότρυνση να λάβω πρωτοβουλίες. Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς επιτροπής τον Δόκτωρα κ. Βασίλη Αμοιρίδη και Dr. Mika Komppula για την πολύτιμη βοήθειά τους στο αντικείμενο της μελέτης των ατμοσφαιρικών σωματιδίων.

Ευχαριστώ επίσης την Δόκτωρα κ. Κουρεμέτη Ναταλία για την πολύτιμη βοήθειά της στην ανάπτυξη όλων των προγραμμάτων matlab.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Δόκτωρα κ. Κωνσταντίνα Νακούδη για την βοήθεια της στην εύρεση των ατμοσφαιρικών στρωμάτων.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Dr. Stephanie Bahlman για την παραχώρηση των δεδομένων lidar.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που στάθηκε δίπλα μου με κατανόηση και υπομονή όλο αυτό το διάστημα. Η στήριξη και η ενθάρρυνσή τους να συνεχίσω να προσπαθώ ήταν καθοριστική για την σταδιοδρομία μου.

Γάτου Μαρία Χριστίνα

Αθήνα, Μάρτιος 2021



## Περίληψη

Αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι η μελέτη των οπτικών ιδιοτήτων της γύρης με μεθόδους τηλεπισκόπησης laser. Για να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από ένα σύστημα Lidar [= light detection and ranging], αλλά και από ένα φασματοφωτόμετρο Cimel του δικτύου AERONET. Η περιγραφή της γύρης από την σκοπιά της βιολογίας, η αλληλεπίδρασή της με το κλίμα και ο σκοπός της εργασίας αυτής αναλύονται στο πρώτο κεφάλαιο.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται το σύστημα Lidar, η αρχή λειτουργίας του, οι βασικοί ορισμοί των οπτικών ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων, οι μέθοδοι προσδιορισμού του συντελεστή οπισθοσκέδασης, αλλά και η αρχή λειτουργίας των fluorescence lidars, που αποτελούν όργανα χρήσιμα για τον προσδιορισμό των οπτικών ιδιοτήτων των βιογενών αιωρούμενων σωματιδίων.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική παρουσίαση όλων των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν συνεργατικά για την λήψη των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν, αλλά και της περιοχής μελέτης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται συνοπτικά η αρχή λειτουργίας των φασματοφωτόμετρων του δικτύου AERONET, από το οποίο λάβαμε δεδομένα για την ανάλυση τους.

Τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας των μετρήσεων των αιωρούμενων σωματιδίων που πραγματοποιήθηκαν από τον Απρίλιο του 2016 μέχρι και τον Αύγουστο του 2016, στην περιοχή της Φινλανδίας αποτελούν το αντικείμενο μελέτης του πέμπτου κεφαλαίου. Πιο συγκεκριμένα, από την κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης, εντοπίσαμε το πρώτο στρώμα της ατμόσφαιρας και θεωρώντας ότι σε αυτό βρίσκεται το μεγαλύτερο ποσοστό της γύρης, αναλύσαμε την μέση τιμή των οπτικών τους ιδιοτήτων. Στο πλαίσιο αυτού του κεφαλαίου εξετάζεται επίσης και η συσχέτιση του λόγου lidar με τον συντελεστή αποπόλωσης και τον εκθέτη Ångström. Επιπλέον, εξετάζεται και η επίδραση της σχετικής υγρασίας στις μετρήσεις του συντελεστή αποπόλωσης και του εκθέτη Ångström.

Χρησιμοποιώντας δεδομένα του δικτύου AERONET αξιολογούμε την συμφωνία τους με τα δεδομένα lidar, διαδικασία που φαίνεται να είναι επιτυχής. Η φασματική εξάρτηση του λόγου lidar και του συντελεστή αποπόλωσης είναι κάτι που μας απασχολεί στην συνέχεια του πέμπτου κεφαλαίου. Μέσω γραμμικής παρεμβολής επιχειρήσαμε έπειτα να συγκρίνουμε τον λόγο lidar από μετρήσεις lidar και όπως προκύπτει από το φασματοφωτόμετρο Cimel. Η διαφορά στην κλίση του γραφήματος που αναφέρεται μόνο στο πρώτο στρώμα της ατμόσφαιρας, αλλά και σε όλο το ύψος της ατμοσφαιρικής κολώνας είναι αυτή που μας δίνει πληροφορίες για τα αιωρούμενα σωματίδια υποβάθρου στην περιοχή ή την ταυτόχρονη ύπαρξη και άλλων στρωμάτων αιωρούμενων σωματιδίων. Πέραν αυτών, γίνεται μία προσπάθεια σύγκρισης και συσχέτισης της κατανομής μεγεθών των αιωρούμενων σωματιδίων και του συντελεστή μεμονωμένης σκέδασης στα 4 διαθέσιμα μήκη κύματος του AERONET. Στο τέλος, συνοψίζονται τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία όσον αφορά τις οπτικές ιδιότητες της γύρης, την συμφωνία των μετρήσεων από φασματοφωτόμετρα του δικτύου AERONET, την συσχέτιση των οπτικών ιδιοτήτων της γύρης με την υγρασία αλλά και μεταξύ τους, καθώς και την συσχέτιση της κατανομής μεγεθών των αιωρούμενων σωματιδίων με τον συντελεστή μεμονωμένης σκέδασης .

## Abstract

The main object of this Thesis is the study of the optical properties of aerosols with remote sensing methods. For this to be accomplished we analysed Lidar data and data retrieved from a Cimel phasmatophotometer of the AERONET network. The description of pollen in the scope of Biology is analysed in the first chapter.

In the second chapter, we represent the Lidar System, the principal of operation, the basic definitions of the optical properties of the lidar, the methods that are used for the retrieval of the backscatter coefficient and the principal of operation for the fluorescence lidar, which is very useful for the definition of the optical properties of biogenic aerosols.

In the third chapter a detailed description of experimental equipment that were used for the retrieval of the data, is being presented, and the region of the study as well.

In the fourth chapter a brief description of the principal of operation of the phasmatophotometers of the AERONET network is presented.

The subject of the fifth chapter is the determination of the optical properties of the first layer detected in the atmosphere as determined from the analysis of lidar and AERONET measurements performed during the period from April 2016 to August 2016. To detect the first layer of the atmosphere, as we know that the first layer is the one who has the biggest pollen concentrations, we used the backscatter signal. In the frame of this chapter we also present the correlation between the lidar ratio, the depolarization ration and the Ångström exponent, as well as the effect of relative humidity to the optical properties retrieved.

Subsequently we compare the optical properties for the first layers of aerosols, as retrieved by lidar and AERONET data. The spectral correlation of the lidar ratio has also been investigated. With linear interpolation we compared the lidar ratio from lidar and AERONET data, for the first layer and the entire atmospheric column for each day.

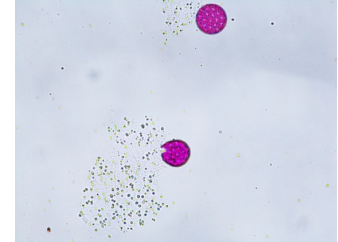
Apart from this, we tried to find a correlation between the size distribution of aerosols in the atmosphere and the single scattering albedo in the four wavelength that are provided by AERONET.

Finally, in the sixth chapter we present the basic conclusions which resulted from this thesis as far as the optical properties of the aerosols of the first layer in the atmosphere and their correlation between them a relative humidity is concerned.

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Τι είναι η γύρη

Οι κόκκοι της γύρης αποτελούν μικρά κίτρινα σωματίδια που εντοπίζονται στο εσωτερικό των ανθών. Το σχήμα τους μπορεί να ποικίλλει από εντελώς σφαιρικά έως καθόλου σφαιρικά, ενώ η ακτίνα τους κυμαίνεται από 25  $\mu\text{m}$  μέχρι και 200  $\mu\text{m}$ . Οι κόκκοι στους οποίους οφείλονται οι αλλεργίες στα έμβια όντα είναι συνήθως οι μικρότεροι, αφού μπορούν να διεισδύσουν ευκολότερα στον οργανισμό μέσω του αναπνευστικού συστήματος. Τα είδη της γύρης είναι πάρα πολλά ανάλογα το φυτό από το οποίο προέρχονται [1].



Σχήμα 1.1.1: Απελευθέρωση κόκκων γύρης

Για να γίνει η γονιμοποίηση στα φυτά, θα πρέπει να μεταφερθούν οι γυρεόκοκκοι από τους ανθήρες στο στίγμα του υπέρου. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται επικονίαση και επιτυγχάνεται κυρίως με τη βοήθεια των εντόμων και του ανέμου. Η αερομεταφερόμενη γύρη παράγεται σε τεράστιες ποσότητες την εποχή της άνθισης των φυτών, τόσο μεγάλες που μπορεί να είναι διακριτή ακόμα και με γυμνό μάτι σαν μία κίτρινη στρώση σκόνης. Το μικρό μέγεθος των κόκκων της επιτρέπει την οριζόντια και κατακόρυφη μεταφορά της σε μεγάλες αποστάσεις, με την βοήθεια του ανέμου. Όπως θα αναφερθεί και στη συνέχεια, έχει παρατηρηθεί ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της γύρης σκορπίζεται από τους γυρεόκοκκους τις πρώτες πρωινές ώρες. Επομένως σε περιόδους άνοιξης όπου ακόμα το έδαφος το πρωί είναι πιο ψυχρό από την ατμόσφαιρα, η θερμοκρασιακή αναστροφή που δημιουργείται εμποδίζει την ανάπτυξη κατακόρυφων διατμητικών ανέμων με αποτέλεσμα την αύξηση των συγκεντρώσεων γύρης τοπικά.

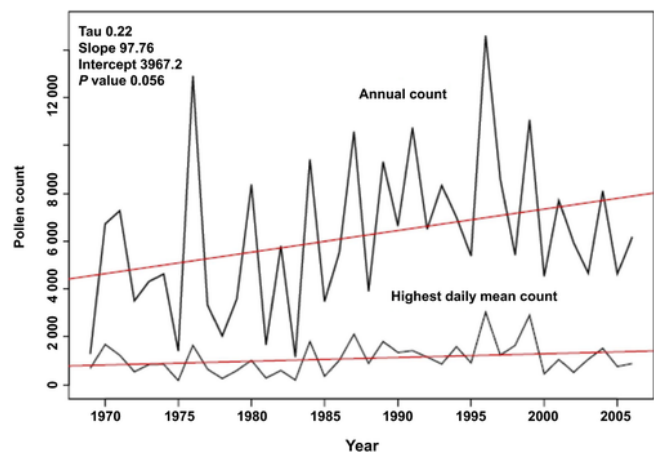
Παρόλα αυτά, σε ημέρες με σχετική υγρασία μεγαλύτερη από 80% το ποσοστό της γύρης που σκορπίζεται (Εικόνα 1.1.1) μειώνεται λόγω του οσμωτικού στρες που υφίστανται οι κόκκοι της γύρης. Επίσης με τη απόπλυση της ατμόσφαιρας οι κόκκοι της γύρης εναποτίθενται στο έδαφος και τα ποσοστά της γύρης μειώνονται [2].

## 1.2 Ατμοσφαιρική γύρη και υγεία

Η γύρη αποτελεί έναν παράγοντα που επηρεάζει άμεσα την υγεία των ανθρώπων με διάφορους τρόπους. Είναι γεγονός ότι ο αριθμός των ανθρώπων που εμφανίζουν συμπτώματα αλλεργιών στη γύρη αυξάνεται χρόνο με το χρόνο, έχοντας φτάσει σχεδόν ποσοστά 10-20% του πληθυσμού [5]. Για παράδειγμα, η γύρη του είδους *Betula* από τα δέντρα Σημύδας (*birch*) αποτελεί ένα από τα πιο χαρακτηριστικά είδη γύρης στην

Βόρεια Ευρώπη υπεύθυνο για αλλεργίες. Εκτός από τις αλλεργίες, αυξημένη εμφανίζεται και η συχνότητα καταγραφής περιστατικών με αλλεργική ρινίτιδα, άσθμα, ατοπικό έκζεμα, ασθένειες που μπορεί να είναι πολύ σοβαρές, ιδιαίτερα για ανθρώπους με χρόνια νοσήματα [7]. Εκτός από τις άμεσες συνέπειες της γύρης που προκαλεί αλλεργίες σε ένα μεγάλο μέρος του πληθυσμού, τεράστια προβλήματα δημιουργούνται και στην εύρυθμη λειτουργία του κράτους (επιβάρυνση εθνικού συστήματος υγείας, κοστοβόρες θεραπείες, συχνή απουσία των εργαζομένων από την δουλειά, επιβάρυνση βιωτικού επιπέδου). Η ανάγκη για την ανάπτυξη έρευνας για την γύρη επεκτείνεται και στην επιρροή της στο περιβάλλον. Είναι πλέον γνωστό ότι επηρεάζει, όπως και όλα τα αιωρούμενα σωματίδια, το ενεργειακό ισοζύγιο Γης – Ήλιου (IPCC, 2013), χωρίς βέβαια να είναι ακόμα πλήρως κατανοητό το πως αλληλεπιδρά με την ηλιακή ακτινοβολία αλλά και με τα υπόλοιπα αιωρούμενα σωματίδια. Επιπλέον, έπειτα από έρευνες, έχει επιβεβαιωθεί ότι τα μόρια γύρης μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο στην δημιουργία νεφών ως πυρήνες συμπύκνωσης των υδρατμών (CCN), αλλά και στον τρόπο δημιουργίας τους, ως πυρήνες παγοποίησης των υπέρψυχρων νεφών στα ανώτερα στρώματα της τροπόσφαιρας (IN) [8].

Για τους λόγους αυτούς αναγκαία έχει κριθεί η συνεχής παρακολούθηση της γύρης και της εποχιακής της διακύμανσης. Πλέον οι επίγειοι σταθμοί παρακολούθησης των συγκεντρώσεων της γύρης είναι αρκετοί προσφέροντας πληθώρα *in-situ* δεδομένων. Η πλειονότητα των παραδοσιακών γυροπαγίδων δεν είναι αυτοματοποιημένη, με αποτέλεσμα να απαιτούν τη συνεχή επίβλεψη από τον άνθρωπο, κάτι που τις καθιστά κοστοβόρες και χρονοβόρες. Όμως με την ανάπτυξη της τεχνολογίας, διάφορες τεχνικές έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατηγοριοποίηση της γύρης από *in-situ* δεδομένα, ώστε να δημιουργηθούν τα θεμέλια για την συστηματική παρακολούθηση της γύρης σε πραγματικό χρόνο από επίγειες μετρήσεις. Μερικές από αυτές τις τεχνικές χρησιμοποιούν την αναγνώριση εικόνων, την μοριακή ανάλυση των κόκκων της γύρης ή και την χημική τους ανάλυση. Το πρόβλημα όμως σε όλες αυτές τις τεχνικές έγκειται τόσο στον χρόνο που απαιτούν ώστε να δώσουν έγκυρα αποτελέσματα, όσο και στην ανάγκη να υπάρχει κάποια βάση δεδομένων προς σύγκριση για την κατηγοριοποίηση των κόκκων της γύρης [12]. Παρόλα αυτά, η κατηγοριοποίηση των διάφορων ειδών της γύρης ανάλογα με τα μορφολογικά της χαρακτηριστικά με τη βοήθεια μικροσκοπίων πολλές φορές αποτυγχάνει. Αυτό οφείλεται κυρίως στην ανάμειξη της γύρης με ανθρωπογενή αιωρούμενα σωματίδια που



Σχήμα 1.2.1: Annual count and highest daily mean for birch pollen in Basel, Switzerland, from 1960 to 2006 Birch pollen allergy in Europe, T. Biedermann, L. Winther, S. J. Till, P. Panzner, A. Knulst, E.Valovirta, <https://doi.org/10.1111/all.13758>

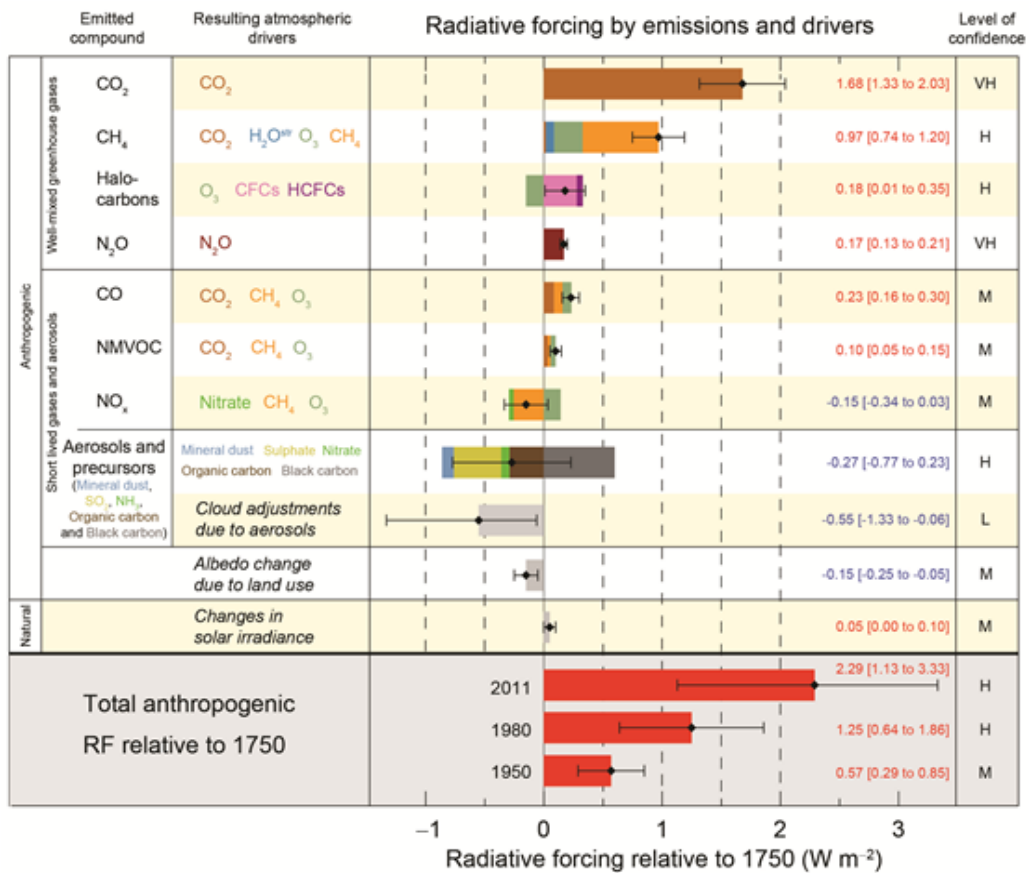
ρουπαίνουν την ατμόσφαιρα [9]. Επίσης ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα της γύρης είναι η αλλαγή στον όγκο των κόκκων της όταν αυτή βρεθεί σε περιβάλλον με διαφορετικές συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας. Πιο συγκεκριμένα, οι αφυδατωμένοι κόκκοι γύρης ενυδατώνονται ξανά όταν φτάσουν στο στίγμα του φυτού, προσλαμβάνοντας υγρασία από το περιβάλλον, με συνέπεια την αλλαγή του όγκου τους και πιθανότατα των μορφολογικών τους χαρακτηριστικών. Παρόμοια διαδικασία μπορεί να συμβεί και κατά τη διάρκεια της μελέτης τους στο μικροσκόπιο, προκαλώντας οσμωτικό στρες και δυσχεραίνοντας ακόμα περισσότερο την κατηγοριοποίηση της γύρης από παρατηρησιακά δεδομένα μικροσκοπίου [10]. Με την έννοια της όσμωσης εννοούμε την διαδικασία κατά την οποία ένα κύτταρο προσλαμβάνει υγρασία από το περιβάλλον του, μέχρι να φτάσει στα όρια η χωρητικότητά του και να «σπάσει».

Τα προβλήματα αυτά έχουν οδηγήσει στην ανάγκη εύρεσης διαφορετικών τρόπων για την αποτελεσματική κατηγοριοποίηση της γύρης. Έτσι το Lidar είναι ένα όργανο που αρχίζει να χρησιμοποιείται όλο και πιο συχνά για την κατηγοριοποίηση της γύρης, δεδομένου ότι βοηθά στη μέτρηση φυσικών ποσοτήτων (π.χ συντελεστής αποπόλωσης) που φαίνεται να αποτελεί μέγεθος που βοηθά στον χαρακτηρισμό της. Πιο συγκεκριμένα, πρόσφατες έρευνες έδειξαν ότι ο συντελεστής αποπόλωσης που προκύπτει από μετρήσεις Lidar, μπορεί να επιβεβαιώσει την ύπαρξη σφαιρικών και μη σφαιρικών κόκκων γύρης, υπό την απουσία άλλων τύπων αιωρούμενων σωματιδίων που εμφανίζουν μεγάλες τιμές αποπόλωσης όπως η σκόνη. Επίσης, σε μια πρώτη προσπάθεια υπολογισμού των οπτικών ιδιοτήτων της γύρης βρέθηκε ότι παρουσιάζει lidar ratio από 55-70sr, άρα μιλάμε για σωματίδια με μεσαία προς μεγάλη απορροφητικότητα για όλα τα είδη [29]. Παρόλα αυτά το μεγάλο εύρος των τιμών που λαμβάνει αποδεικνύει ότι ίσως η παράμετρος αυτή δεν είναι κατάλληλη για τον χαρακτηρισμό της γύρης [11]. Επιπλέον ο συντελεστής Ångström μπορεί να φανεί και αυτός χρήσιμος στην κατηγοριοποίηση της γύρης, με την προϋπόθεση να μην συνυπάρχουν ταυτόχρονα πολλά διαφορετικά είδη αιωρούμενων σωματιδίων.

### 1.3 Η γύρη και κλιματική αλλαγή

Τα σωματίδια παίζουν σημαντικό ρόλο στο περιβάλλον [IPCC, 2013]. Τα σωματίδια παίζουν σημαντικό ρόλο στο ισοζύγιο ακτινοβολίας της Γης λόγω της άμεσης επίδρασής τους (σκέδαση, απορρόφηση) στην ακτινοβολία του Ήλιου και της Γης. Για να αξιολογήσουμε την επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων στο ισοζύγιο ακτινοβολίας και κατ' επέκταση στην κλιματική αλλαγή, πρέπει να τα κατηγοριοποιήσουμε ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους. Η διαδικασία αυτή μπορεί να είναι αρκετά δύσκολη, ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονη κυκλοφορία αερίων μαζών, στις οποίες μπορεί να συνυπάρξουν ταυτόχρονα σωματίδια από ανθρωπογενή δραστηριότητα (κυρίως στις αστικές περιοχές), από καύση βιομάζας (π.χ. καλοκαιρινές φωτιές), ή θαλάσσια σωματίδια και σκόνη από την Αφρική. Στο Σχήμα 1.3.1 αποτυπώνεται το μέσο ισοζύγιο της ακτινοβολίας του κλιματικού συστήματος το 2013, ως συνάρτηση των επικρατέστερων

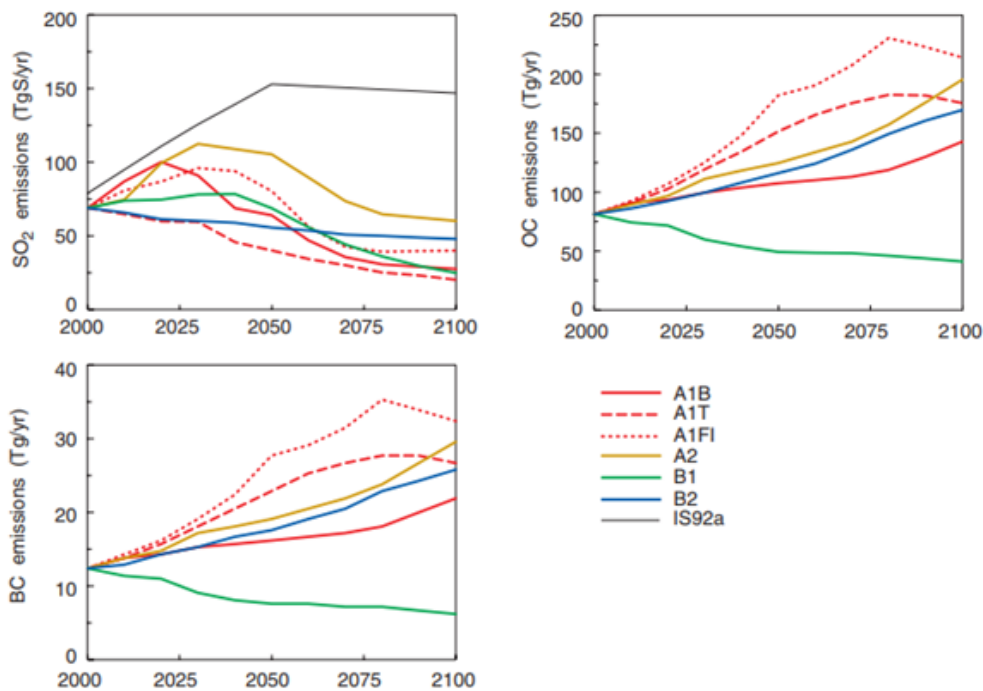
παραγόντων που το επηρεάζουν: τα θερμοκηπιακά αέρια [CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, halocarbons], το στρατοσφαιρικό και τροποσφαιρικό όζον, τα αιωρούμενα σωματίδια. Παρατηρείται λοιπόν, ότι με την αύξηση του πληθυσμού και κατ' επέκταση της ενεργειακής κατανάλωσης για την κάλυψη των αναγκών του, οι συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub> αναμένεται να αυξηθούν κατά πολύ περισσότερο συγκριτικά με τα χρόνια πριν την βιομηχανική επανάσταση. Επομένως, η μεγαλύτερη βαρύτητα στην τάση του κλίματος να γίνει θερμότερο έγκειται στον ανθρώπινο παράγοντα, που επηρεάζει την συγκέντρωση των ανθρωπογενών αερολυμάτων, τα αιωρούμενα σωματίδια, και το σχηματισμό νεφών. Η βεβαιότητα της κατανόησης του τρόπου με τον οποίο επιδρούν τα διάφορα συστατικά στο ενεργειακό ισοζύγιο παρουσιάζεται στα δεξιά του ίδιου Σχήματος 1.3.1 με κλίμακα από πολύ υψηλό [very high] μέχρι χαμηλό [low].



Σχήμα 1.3.1: Μέση επίδραση στο ισοζύγιο της ακτινοβολίας του κλιματικού συστήματος το 2011, σε σχέση με αυτό του 1750 [IPCC, 2013]

Στόχος της παγκόσμιας επιστημονικής κοινότητας είναι η βελτίωση των προβλέψεων σε ότι αφορά την κλιματική αλλαγή. Χαρακτηριστική είναι η αβεβαιότητα που εμφανίζεται για τα αιωρούμενα σωματίδια και τα νέφη καθώς και το χαμηλό επίπεδο κατανόησης αυτών. Προκειμένου να συμβεί αυτό, μεγάλη είναι η αναγκαιότητα λήψης μετρήσεων των αιωρούμενων σωματιδίων σε βάθος χρόνου σε δια ηπειρωτική κλίμακα. Οι μετρήσεις αυτές θα χρησιμοποιηθούν για την παραμετροποίησή τους, ώστε να μπορέσουν να εισαχθούν στα ήδη υπάρχοντα κλιματικά μοντέλα και έτσι να ληφθεί υπόψη η επίδραση τους στο κλίμα

για να επιτύχουμε μια ακριβέστερη και μακροσκελέστερη πρόγνωση του καιρού αλλά και του ισοζυγίου ακτινοβολίας, με σκοπό την έγκαιρη πρόβλεψη της έντασης της κλιματικής αλλαγής και της δημιουργίας σχεδίου ώστε να περιοριστεί μελλοντικά η περαιτέρω ρύπανση του πλανήτη και να έχουμε έγκαιρη ενημέρωση για επερχόμενα ακραία καιρικά φαινόμενα. Ωστόσο ένα τέτοιο σύστημα μετρήσεων δεν είναι διαθέσιμο, με αποτέλεσμα η αβεβαιότητα στην εκτίμηση της επίδρασης των αιωρούμενων σωματιδίων στο μελλοντικό κλίμα να είναι τόσο μεγάλη ώστε να είναι δύσκολη η ένταξή τους σε κλιματικές προσομοιώσεις και στις προβλέψεις των αλλαγών του κλίματος. Μια τέτοια προσπάθεια για την πρόβλεψη των μελλοντικών συγκεντρώσεων ανθρωπογενών αερολυμάτων έγινε με τη χρήση μοντέλων τα οποία μπόρεσαν να αναπαράγουν ικανοποιητικά συγκεντρώσεις παλαιότερων ετών. Εκτός από το θειϊκό άλας και τον μαύρο άνθρακα τα μοντέλα έδωσαν μια γραμμική αύξηση της συγκέντρωσης των ανθρωπογενών σωματιδίων. Για το SO<sub>2</sub> έχουμε μεγάλη αβεβαιότητα, με αποτέλεσμα κάποια μοντέλα να δίνουν αύξηση και κάποια μείωση των συγκεντρώσεων, όπως για παράδειγμα στο σενάριο A2, το οποίο προσπαθεί να προβλέψει τις συγκεντρώσεις το 2100, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.3.2. Παρόλα αυτά οι αβεβαιότητες είναι μεγάλες καθώς τα αποτελέσματα αλλάζουν ανάλογα με το αν τα μοντέλα λαμβάνουν υπόψη τους την κλιματική αλλαγή και την χημική σύσταση της ατμόσφαιρας (IPCC 2001,[14]). Επομένως καταλαβαίνουμε την αναγκαιότητα περαιτέρω έρευνας πάνω στην αλληλεπίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων με την ακτινοβολία.



Σχήμα 1.3.2: Πρόβλεψη παραγωγής ανθρωπογενών αερολυμάτων ανάλογα το κάθε σενάριο

Για την πρόβλεψη των μελλοντικών συγκεντρώσεων των ανθρωπογενών αερολυμάτων σύμφωνα με την IPCC, 2001 δημιουργήθηκαν κάποια σενάρια πρόβλεψης (Special Report on Emission Scenarios(SRES)), τα οποία ονομάστηκαν ως A1B, A1T, A1FI, A2, B1, B2. Τα σενάρια αυτά προβλέπουν τις αλλαγές στην παραγωγή των ανθρωπογενών ρύπων, από το 2000 μέχρι το 2100, χρησιμοποιώντας διαφορετικά δεδομένα σχετικά με την αύξηση πληθυσμού, την κατανάλωση ενέργειας και την ανάπτυξη "πράσινης" τεχνολογίας ανά τις δεκαετίες. Όπως βλέπουμε και στο Σχήμα 1.3.2 οι προβλεπόμενες συγκεντρώσεις ανθρωπογενών αερολυμάτων ποικίλλει αρκετά ανάλογα το σενάριο, με τα σενάρια A1B, A1T, και B1 να προβλέπουν τις μικρότερες μελλοντικές συγκεντρώσεις, σε αντίθεση με τα A1FI και A2 που προβλέπουν τις μεγαλύτερες. Όπως είναι όμως φυσικό σε ένα δυναμικό σύστημα όπως η ατμόσφαιρα, η κλιματική αλλαγή θα επηρεάσει και αυτή με τη σειρά της τον κύκλο ζωής και αναπαραγωγής των φυτών, με αποτέλεσμα άμεσες αλλαγές και στα ποσοστά της γύρης καθώς και στις περιόδους που εμφανίζει μέγιστα συγκεντρώσεων. Πιο συγκεκριμένα, η ανάπτυξη των φυτών αποτελεί μια πολυπαραγοντική διαδικασία που επηρεάζεται τόσο από βιολογικούς παράγοντες, όπως η ποιότητα του εδάφους μιας περιοχής, η ύπαρξη άφθονου νερού, αλλά και από παράγοντες που σχετίζονται με την τοπογραφία της περιοχής. Πιο συγκεκριμένα, κάθε περιοχή στη Γη μπορεί να περιγραφεί σε τρία διαφορετικά επίπεδα: το μακροκλίμα, το μεσοκλίμα και το μικροκλίμα. Το μακροκλίμα μιας περιοχής αναφέρεται στα γενικότερα κλιματικά χαρακτηριστικά που την διέπουν, όπως έχει παρατηρηθεί σε βάθος χρόνων, όπως είναι η θερμοκρασία, η ηλιακή ακτινοβολία, η ηλιοφάνεια, ο άνεμος, η υγρασία και οι βροχοπτώσεις. Το μεσοκλίμα μιας περιοχής είναι ο μετασχηματισμός του μακροκλίματος, λόγω τοπικών ιδιαιτεροτήτων, όπως είναι το ανάγλυφο του εδάφους, η ύπαρξη μεγάλων επιφανειών νερού και η βλάστηση. Το μικροκλίμα μιας περιοχής οφείλεται κυρίως σε ανθρώπινες παρεμβάσεις, όπως οι αλλαγές στην κάλυψη γης ή η κατασκευή ψηλών κτιρίων. Συνεπώς όλοι οι προαναφερθέντες παράγοντες είναι ικανοί να επέμβουν στον κύκλο ζωής ενός φυτού, με πιο σημαντικούς την θερμοκρασία που επικρατεί σε μια περιοχή και τη διαθεσιμότητα νερού σε αυτή. Όπως προαναφέρθηκε όμως (IPCC, 2013), η Ευρώπη τα τελευταία χρόνια βιώνει μια περίοδο αύξησης της μέσης θερμοκρασίας της, γεγονός που έχει άμεσο αντίκτυπο στις εκπομπές γύρης αλλά και στην περίοδο και την ένταση της περιόδου επικονίασης [13].

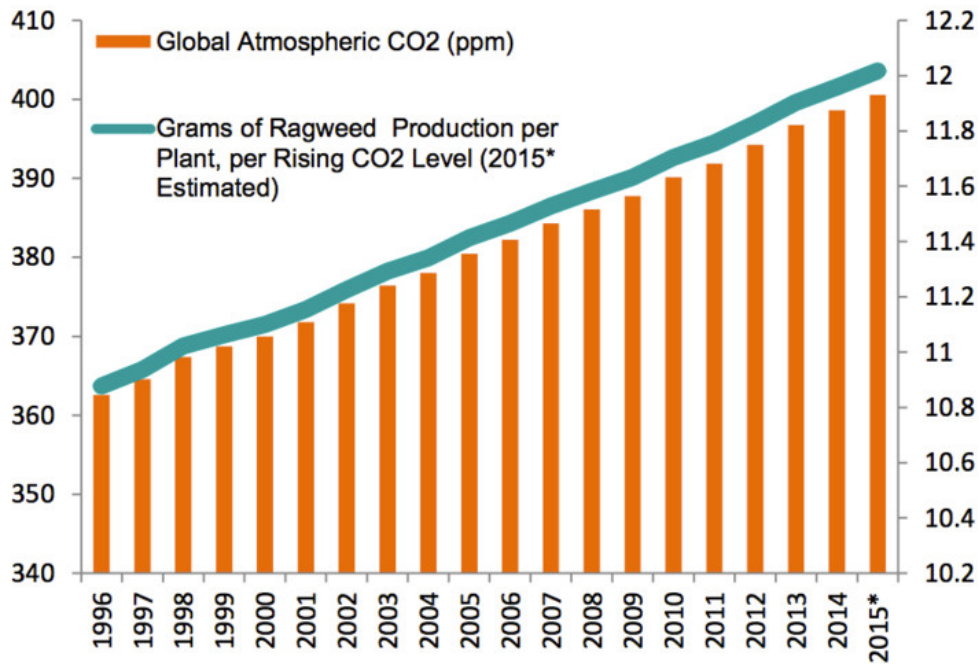
### 1.3.1 Αύξηση CO<sub>2</sub> και γύρη

Οι αυξημένες συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub> λόγω των ανθρωπογενών εκπομπών και της ταυτόχρονης μείωσης των πράσινων εκτάσεων είναι ικανές να επηρεάσουν την παραγωγή γύρης με δύο τρόπους. Η αυξημένη παραγωγή CO<sub>2</sub> οδηγεί στην αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας της Γης, αφού απορροφά στην περιοχή του υπέρυθρου στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Η θέρμανση αυτή με τη σειρά της οδηγεί στην αυξημένη εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων (π.χ. έντονες βροχοπτώσεις). Η αυξημένη συχνότητα εμφάνισης



τους, μπορεί να αλλάξει δραστικά την συγκεντρωση και την κατανομή της γύρης στη Γη, λόγω έντονων ανέμων, υγρασίας, αλλά και την δημιουργία μικρότερων σε μέγεθος κόκκων γύρης λόγω όσμωσης [16]. Όμως πρέπει να λάβουμε υπόψη μας και τις χωρικές και χρονικές μεταβλητότητες που εμφανίζει κάθε μέρος της Γης. Για παράδειγμα, όλες οι περιοχές της Γης δεν θερμαίνονται με τον ίδιο τρόπο. Οι περιοχές γύρω από τον ισημερινό θερμαίνονται γρηγορότερα, καθώς λόγω αυξημένης θερμοκρασίας έχουμε αυξημένη συγκέντρωση υδρατμών λόγω εξάτμισης, που αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά θερμοκηπικά αέρια. Επομένως η αύξηση του CO<sub>2</sub> δε θα επιφέρει τόσο μεγάλες θερμοκρασιακές αλλαγές όσο σε περιοχές όπως στους πόλους της Γης ή στις ερήμους, που η εξάτμιση είναι πολύ μικρή. Επίσης σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη, η διάρκεια και η ένταση των περιόδων χειμώνα είναι μεγαλύτερες, επομένως τα αποτελέσματα της θέρμανσης του πλανήτη θα γίνουν πιο εμφανή σε αυτά τα μέρη [16]. Επίσης, η αυξημένη παραγωγή CO<sub>2</sub> οδηγεί στην ενεργοποίηση της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης και κατ' επέκταση της ανάπτυξης των φυτών. Και οι δύο αυτές επιδράσεις δημιουργούν ευνοϊκές συνθήκες για την αυξημένη παραγωγή γύρης. Αδήριτη επομένως εμφανίζεται η ανάγκη έρευνας στην κατεύθυνση της γύρης για την μείωση της επερχόμενης επιβάρυνσης της δημόσιας υγείας από αλλεργίες, λόγω της αυξημένης παραγωγής γύρης [15].

Μέχρι και σήμερα, η σύνδεση των αυξημένων επιπέδων CO<sub>2</sub> με τα αυξημένα περιστατικά άσθματος, λόγω αλλεργιών στη γύρη, βρίσκεται υπό διερεύνηση. Παρόλα αυτά έχει επιβεβαιωθεί ότι η αύξηση των θερμών εποχών και κυρίως της άνοιξης, έχει προκαλέσει την πρόωρη ανθοφορία των δέντρων, όπως το είδος της σημύδας, αλλά και διάφορων αλλεργιογόνων ειδών χαμηλού πρασίνου. Αυτή η πρόωρη ανθοφορία επιβαρύνει για μεγαλύτερα διαστήματα την ποιότητα της ατμόσφαιρας των περιοχών [17]. Όμως αναλύοντας περισσότερο την φυσιολογία των δέντρων, όπως για παράδειγμα αυτή της σημύδας, καταλήγουμε στο γεγονός ότι η θέρμανση του πλανήτη μπορεί να έχει και αρνητικό αντίκτυπο στην παραγωγή γύρης. Για παράδειγμα, πρέπει να υπάρξει μια ελάχιστη θερμοκρασία τον χειμώνα προκειμένου να ξεκινήσει η ανθοφορία ενός δέντρου την άνοιξη που αρχίζει να αυξάνεται. Επομένως οι θερμότεροι χειμώνες μπορεί να μειώσουν την ανθοφορία και κατ' επέκταση την παραγωγή γύρης από δέντρα. Επίσης οι θερμότεροι χειμώνες αναγκάζουν τα ανθοφόρα δέντρα όπως η σημύδα να αυξήσουν την εμφάνισή τους σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη για να εξασφαλίσουν χαμηλότερες χειμερινές θερμοκρασίες, διαφοροποιώντας έτσι σιγά σιγά την κατανομή της πανίδας στην Γη. Αντίθετα, η χαμηλή βλάστηση και το γρασίδι φαίνεται να εμφανίζουν μεγαλύτερη προσαρμογή στην τάση του κλίματος για αλλαγή, παραμένοντας αμετάβλητες χωρικά και χρονικά. Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι δεν είναι ακόμα ξεκάθαρη η ανταπόκριση των δέντρων στην αύξηση του CO<sub>2</sub> και της θερμοκρασίας στον πλανήτη [18].



SOURCE: "Extreme Allergies and Global Warming," 2010, AAFA and NWF  
[www.aafa.org](http://www.aafa.org)

Σχήμα 1.3.3: Παραγωγή CO<sub>2</sub> (ppm) την τελευταία εικοσαετία

Την περίοδο του φθινοπώρου όμως τα φυτά όπως η αμβροσία αρτεμισίφυλλος, η οποία εμφανίζεται πλέον συχνά εκτός από την Αμερική και στην Ευρώπη, φαίνεται να προκαλούν τεράστια αύξηση περιστατικών αλλεργικής ρινίτιδας, τόσο μεγάλη που έχει τεθεί θέμα ακόμα και στο Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. (<https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/E-7-2011-008641EL.html:redirect>). Πρόσφατες μελέτες έδειξαν ότι πάνω από το 27% του πληθυσμού της Αμερικής εμφανίζει συμπτώματα αλλεργίας κατά την έκθεση του στη γύρη αυτού του είδους φυτού, με αποτέλεσμα να θεωρείται το πιο αλλεργιογόνο φυτό. Η τάση του πλανήτη να θερμανθεί και η μείωση των περιόδων παγοκάλυψης όμως ανάγκασε την αμβροσία αρτεμισίφυλλο να διευρύνει την περίοδο που παράγει γύρη 13-27 ημέρες στα μέσα γεωγραφικά πλάτη, συγκριτικά με το 1995, με περεταίρω επιβάρυνση της δημόσιας υγείας [19].

Τέλος, πρέπει να λάβουμε υπόψη μας ότι αλλεργιογόνοι μπορεί να είναι και κάποιοι παθογόνοι παράγοντες των φυτών (π.χ. *Alternaria alternate*), οι οποίοι και αυτοί με τη σειρά τους θα επηρεαστούν από την κλιματική αλλαγή, αφού ο ξενιστής τους (φυτό) θα έχει υποστεί και αυτός αλλαγές στην βιολογία του.

## 1.4 Βιογενείς ρύποι και γύρη

Η αύξηση των επιπέδων του όζοντος είναι λογικό να ενισχύσει την τάση της Γης να θερμανθεί, αφού αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά θερμοκηπικά αέρια. Η θέρμανση αυτή επιτρέπει την ενίσχυση του φωτοχημικού κύκλου και την γρηγορότερη παραγωγή δευτερογενών αερίων ρύπων, ιδιαίτερα τοξικών για τους ανθρώπους. Επιπλέον, οι συχνότερες φωτιές σε δασικές περιοχές επιβαρύνουν την ατμόσφαιρα με σωματίδια καπνού από κάυση βιομάζας.

Η συνολική αυτή επιβάρυνση της ατμόσφαιρας με διάφορα είδη αιωρούμενων σωματιδίων ανθρώπινης προέλευσης ενισχύουν την εμφάνιση αλλεργιών, ερεθίζοντας την αναπνευστική οδό και επιτρέποντας μέσω της αναπνοής να εισχωρήσουν τα αλλεργιογόνα σωματίδια στα κύτταρα του ανοσοποιητικού μας συστήματος. Σαφής είναι πλέον και η σύνδεση των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα με τα αναπνευστικά προβλήματα που μπορεί να προκαλέσουν. Στη συνέχεια, θα γίνει αναφορά στους σημαντικότερους ρυπαντές της ατμόσφαιρας που εμφανίζονται ιδιαίτερα αυξημένοι λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας, όπως έχει διασαφηνιστεί και από το IPCC. Τα τροποσφαιρικά αερολύματα που συνεισφέρουν στην φωτοχημεία της ατμόσφαιρας είναι κυρίως το μονοξειδίο του άνθρακα (CO), τα νιτρικά οξείδια (NO<sub>x</sub>) και οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC). Το CO που αποτελεί προϊόν ατελούς καύσης των μηχανών εσωτερικής καύσης δεν φαίνεται να συμβάλλει στα αναπνευστικά προβλήματα του πλυθισμού [30]. Αντίθετα, σε περιοχές με αυξημένες συγκεντρώσεις NO<sub>x</sub> και VOC εμφανίζονται περισσότερο περιστατικά αναπνευστικών προβλημάτων. Φυσικά τα νιτρικά οξείδια στην ατμόσφαιρα οξειδώνονται κάτω από μεγαλύτερες θερμοκρασίες επομένως η τάση του πλανήτη να γίνει θερμότερος παίζει και αυτή σημαντικό ρόλο στην ποιότητα της ατμόσφαιρας.

Το όζον, ως κύριος δευτερογενής ρύπος στα χαμηλά στρώματα της ατμόσφαιρας, με βασικό ρόλο στον φωτοχημικό κύκλο, που σημαίνει ότι οι συγκεντρώσεις του επηρεάζονται από τα ποσά της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνουν στην Γη, αποτελεί άλλον έναν ατμοσφαιρικό ρυπαντή στον οποίο μπορούν να αποδοθούν αναπνευστικά προβλήματα και αλλεργίες. Άλλοι αέριοι ρύποι που περιέχουν θείο (π.χ. SO<sub>2</sub>), οι πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAH's), το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), καθώς και διάφορα αιωρούμενα σωματίδια PM<sub>10</sub> και PM<sub>2.5</sub> μπορούν και αυτοί να επηρεάζουν αρνητικά την υγεία του αναπνευστικού των πολιτών. Επομένως πρέπει να λάβουμε υπόψη μας ότι η γύρη αποτελεί ένα είδος αιωρούμενων σωματιδίων που προκαλεί πολλά αναπνευστικά προβλήματα υγείας, αλλά όχι το μοναδικό και ίσως όχι το πιο επικίνδυνο [6].

## 1.5 Lidar και κατακόρυφη κατανομή

Έχει παρατηρηθεί ότι οι συγκεντρώσεις αλλά και η οριζόντια και κατακόρυφη διάχυση των κόκκων γύρης επηρεάζεται σημαντικά από τα μετεωρολογικά δεδομένα μίας περιοχής. Το μεγαλύτερο ποσοστό της γύρης που εκλύεται στην ατμόσφαιρα θα παραμείνει κοντά στην πηγή και θα εναποτεθεί στο έδαφος γύρω από αυτή. Ένα μικρό ποσοστό αυτής θα καταφέρει να μεταφερθεί σε μεγαλύτερα ύψη, με την ατμοσφαιρική τύρβη που αναπτύσσεται μέσα στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. Η τύρβη αυτή που οφείλεται κυρίως στην αστάθεια λόγω θέρμανσης του εδάφους και δευτερευόντως στο ανάγλυφο μιας περιοχής, παρατηρείται κυρίως πρωινές ώρες με την ανατολή του ηλίου. Επομένως μεγαλύτερες συγκεντρώσεις γύρης στην ατμόσφαιρα παρατηρούνται όταν η θερμοκρασία έχει φτάσει στο μέγιστο και το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα έχει αναπτυχθεί πλήρως δηλαδή λίγο μετά την μεσουράνηση του ηλίου [31]. Επομένως μπορούμε να αναφέρουμε ότι η συγκέντρωση γύρης ακολουθεί την πορεία ανάπτυξης του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος. Για παράδειγμα, έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί στην Γκουανγκγού στην Νότιο Κορέα, έχουν αποφανθεί ότι η αύξηση συγκέντρωσης της γύρης ξεκινά στις 09:00 LT και φθάνει να γίνει μέγιστη μεταξύ 12:00 LT and 14:00 LT. Επίσης μέγιστες συγκεντρώσεις βρέθηκαν κάτω από τα 500 m το πρωί, ενώ το μεσημέρι αυτές εντοπιζόνταν σε ύψη 1.5–2.0 km. Μετά τις 18:00 LT η συγκέντρωση γύρης μειώνεται και πάλι. Τέλος, μεγάλες συγκεντρώσεις γύρης παρατηρήθηκαν κυρίως μέσα στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, επομένως η γύρη δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να διασκορπιστεί σε ύψη μεγαλύτερα της τροπόσφαιρας [4].

## 1.6 Σκοπός της εργασίας

Παρά την εκτεταμένη έρευνα που γίνεται αναφορικά με τα φυτά, την παραγωγή και τον διασκορπισμό της γύρης, υπάρχει ακόμα μεγάλη έλλειψη γνώσης σε αυτούς τους τομείς αλλά και στην πιθανή αλληλεπίδραση της παραγωγής της γύρης με τις ανθρώπινες παρεμβάσεις στη χρήση της, την αύξηση των ανθρωπογενών ρύπων στην ατμόσφαιρα αλλά και των ακραίων καιρικών φαινομένων. Επομένως, είναι σημαντικό τόσο για την επιστημονική κοινότητα όσο και για την πολιτεία, η ανάπτυξη μεθόδων και η αξιοποίηση οργάνων που προβλέπουν τη γύρη σε ικανοποιητική χωροχρονική κλίμακα για τον μετριάσμό των αρνητικών επιπτώσεων αυτής στο κλίμα αλλά και την ανθρώπινη υγεία. Για όλους τους λόγους που έχουν προαναφερθεί είναι εμφανές ότι επιτακτική είναι η ανάγκη της μελέτης της γύρης καθώς αυτή επηρεάζει πολλές εκφάνσεις της καθημερινής ζωής. Σκοπός λοιπόν της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της κατακόρυφης κατανομής της ατμοσφαιρικής γύρης με την συνεργητική χρήση ενός συστήματος Raman Lidar και της γυροπαγίδας Hirst.

## 2 Η τεχνική Lidar

### 2.1 Αρχή Λειτουργίας

Ένα σύστημα Lidar αποτελεί μια διάταξη που περιλαμβάνει έναν πομπό, ένα οπτικό σύστημα υποδοχής, έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή και φωτοπολλαπλασιαστές (PMTs) ή φωτοδιόδους, προκειμένου να είναι εφικτός ο εντοπισμός του σήματος. Πιο αναλυτικά, ο πομπός είναι συνήθως ένα παλμικό laser, το οποίο εκπέμπει παλμικό φως διάρκειας της τάξης των δευτερολέπτων μέχρι αρκετές εκατοντάδες νανο-δευτερόλεπτα σε συγκεκριμένα μήκη κύματος. Το οπτικό σύστημα υποδοχής συλλέγει την οπισθοσκεδάζουσα ακτινοβολία σε κατάλληλα μήκη κύματος ανάλογα την εφαρμογή και ένα ηλεκτρικό σύστημα απεικονίζει και αποθηκεύει τις μετρήσεις, μετατρέποντας τις σε ηλεκτρικό σήμα. Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής χρησιμεύει στην καταγραφή και την αποθήκευση της διακύμανσης της έντασης του σήματος αναφορικά με το χρόνο.

### 2.2 Εξίσωση lidar

Προκειμένου να προσδιορίσουμε τις οπτικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων πρέπει να επιλύσουμε την εξίσωση lidar. Για να μπορέσουμε να την επιλύσουμε και επειδή δεν έχουμε μόνο έναν άγνωστο χρησιμοποιούμε και μία δεύτερη εξίσωση η οποία εκμεταλλεύεται την τεχνική Raman για να μειώσει τους αγνώστους. Ουσιαστικά τα αιωρούμενα σωματίδια οπισθοσκεδάζουν ελαστικά την εκπεμπόμενη δέσμη λέιζερ, ενώ τα μόρια εμφανίζουν ανελαστική οπισθοσκέδαση Raman. Στην γενική της μορφή η Εξίσωση 2.2.1 περιγράφει το λαμβανόμενο σήμα  $P$  από μία απόσταση  $z$ . Η τεχνική Raman lidar χρησιμοποιεί την ασθενή ανελαστική σκέδαση (Εξίσωση 2.2.2).

$$P(z, \lambda_0) = \frac{E_0 \eta \lambda_0}{z^2} O(z, \lambda_0) \beta(z, \lambda_0) \exp^{-2 \int_z^0 \alpha(\zeta, \lambda_0) d\zeta} \quad (2.2.1)$$

$$P(z, \lambda_{Ra}) = \frac{E_0 \eta \lambda_{Ra}}{z^2} O(z, \lambda_{Ra}) \beta(z, \lambda_{Ra}) \exp^{-\int_z^0 [\alpha(\zeta, \lambda_0) + \alpha(\zeta, \lambda_{Ra})] d\zeta} \quad (2.2.2)$$

Στην Εξίσωση 2.2.1 ο όρος  $P(z, \lambda_0)$  είναι το σήμα εξαιτίας της σκέδασης Rayleigh και της σκέδασης από τα αιωρούμενα σωματίδια που λαμβάνεται από το ύψος  $z$  και στο μήκος κύματος  $\lambda_0$ , ενώ στην Εξίσωση 2.2.2 ο όρος  $P(z, \lambda_{Ra})$  είναι το σήμα εξαιτίας της σκέδασης Raman των μορίων στο μήκος κύματος  $\lambda_{Ra}$ . Το μήκος κύματος  $\lambda_{Ra}$  περιγράφει την αλλαγή του μήκος κύματος που συμβαίνει εξαιτίας της ανελαστικής σκέδασης της ακτινοβολίας από τα διατομικά ή τριατομικά μόρια της ατμόσφαιρας. Με

τον όρο  $E_0$  αποτυπώνεται η εκπεμπόμενη ισχύς του παλμού του laser. Οι όροι  $n_{\lambda_0}$  και  $n_{\lambda_{Ra}}$  αφορούν παραμέτρους σχετικά με την αποδοτικότητα των οπτικών και ανιχνευτικών διατάξεων του Lidar στα μήκη κύματος  $\lambda_0$  και  $\lambda_{Ra}$ . Οι όροι  $O(z, \lambda_0)$  και  $O(z, \lambda_{Ra})$  περιγράφουν την συνάρτηση αλληλεπικάλυψης της εξερχόμενης δέσμης με το τηλεσκόπιο. Λαμβάνει τιμές απο 0 σε πολύ χαμηλά ύψη και γίνεται 1 κοντά στο 1 Km. Αυτό σημαίνει ότι τα συστήματα lidar είναι αδύνατο να πραγματοποιήσουν μετρήσεις σε χαμηλά ύψη. Η ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα αλληλεπιδρά είτε με τα μόρια (mol) είτε με τα αιωρούμενα σωματίδια (par). Ο συντελεστής οπισθοσκέδασης  $b(z, \lambda_0) = \beta_{par}(z, \lambda_0) + \beta_{mol}(z, \lambda_0)$  εκφράζει την ελαστική οπισθοσκέδαση από τα μόρια και τα σωματίδια της ατμόσφαιρας στο μήκος κύματος  $\lambda_0$ . Ο όρος  $\beta_{Ra}(z, \lambda_0)$  περιγράφει την ανελαστική σκέδαση από τα μόρια. Οι όροι  $\alpha(z, \lambda_0) = \alpha_{par}(z, \lambda_0) + \alpha_{mol}(z, \lambda_0)$  και  $\alpha(z, \lambda_{Ra}) = \alpha_{par}(z, \lambda_{Ra}) + \alpha_{mol}(z, \lambda_{Ra})$  είναι οι συντελεστές εξασθένησης στα μήκη κύματος  $\lambda_0$  και  $\lambda_{Ra}$  αντίστοιχα. Ο όρος  $a(z, \lambda_0)$  περιγράφει την εξασθένηση της ακτινοβολίας κατά την διαδρομή της μέσα στην ατμόσφαιρα από κάτω προς τα πάνω. Η ίδια εξασθένηση λαμβάνει χώρα και κατά την επιστροφή της ακτινοβολίας από πάνω προς τα κάτω γεγονός που εξηγεί την ύπαρξη του συντελεστή 2 στην εξίσωση 2.2.1. Στην περίπτωση της εξίσωσης 2.2.2, ο όρος  $\alpha(z, \lambda_{Ra})$  περιγράφει την εξασθένηση του φωτός κατά την επιστροφή στο σύστημα λήψης. Για τα μήκη κύματος που χρησιμοποιούμε, η απορρόφηση από τα μόρια της ατμόσφαιρας θεωρείται αμελητέα και η εξασθένηση της ακτινοβολίας οφείλεται μόνο σε φαινόμενα σκέδασης. Διαφορετικά θα έπρεπε να προστεθούν δύο ακόμα όροι που να εμπεριέχουν την εξασθένηση λόγω απορρόφησης.  $\alpha(z, \lambda_0) = \alpha_{par}(z, \lambda_0) + \alpha_{mol}(z, \lambda_0) + \alpha_{par,abs}(z, \lambda_0) + \alpha_{mol,abs}(z, \lambda_0)$

## 2.3 Μέθοδος Klett

Για τον υπολογισμό του συντελεστή οπισθοσκέδασης χρησιμοποιούνται 2 διαφορετικοί τρόποι τους οποίους και θα αναλύσουμε. Με την μέθοδο Klett χρειάζεται να γνωρίζουμε την ολική οπισθοσκεδάζουσα ακτινοβολία από τα μόρια και τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας. Για την επίλυση με τη μέθοδο αυτή πρέπει να γίνει σωστή επιλογή του λόγου lidar, δηλαδή του λόγου του συντελεστή εξασθένησης προς τον συντελεστή οπισθοσκέδασης, κάτι το οποίο είναι αρκετά περίπλοκο. Με την προϋπόθεση λοιπόν ότι ο λόγος lidar παραμένει αμετάβλητος με το ύψος, η συνάρτηση αλληλεπικάλυψης ισούται με 1 και έχουμε ένα συγκεκριμένο ύψος αναφοράς όπου η ατμόσφαιρα μπορεί να θεωρηθεί μοριακή, ο συντελεστής οπισθοσκέδασης υπολογίζεται ως εξής:

$$\beta_{par}(\lambda, z) = -\beta_{mol}(\lambda, z) + \frac{P(\lambda, z)z^2 \exp^{-2(S_{par}-S_{mol} \int_z^{z_0} \beta_{mol}(\lambda, \zeta)d\zeta)}}{\frac{P(\lambda, z_0)z_0^2}{\beta_{par}(z_0)+\beta_{mol}(z_0)} - 2S_{par} \int_{z_0}^z P(\lambda, \zeta)\zeta^2 \exp[-2(S_{par} - S_{mol}) \int_{z_0}^{\zeta} \beta_{mol}(z')dz']d\zeta} \quad (2.3.1)$$

## 2.4 Μέθοδος Raman

Με τη μέθοδο Raman ο συντελεστής οπισθοσκέδασης των αιωρούμενων σωματιδίων υπολογίζεται αξιοποιώντας και τον ολικό συντελεστή οπισθοσκέδασης και τον συντελεστή οπισθοσκέδασης από τα μόρια, υπολογίζοντας τον λόγο του ελαστικά οπισθοσχεδαζόμενου σήματος από τα σωματίδια της ατμόσφαιρας προς το οπισθοσχεδαζόμενο σήμα από το άζωτο ως εξής:

$$b_{par}(\lambda_0, z) = -b_{mol}(\lambda_0, z) + [b_{par}(\lambda_0, z_0) + b_{mol}(\lambda_0, z_0)]$$

$$\frac{P(\lambda_{Ra}, z_0)P(\lambda_0, z)N_{Ra}(z) \exp^{-\int_{z_0}^z [a_{par}(\lambda_{Ra}, \zeta) + a_{mol}(\lambda_{Ra}, \zeta)] d\zeta}}{P(\lambda_0, z_0)P(\lambda_{Ra}, z)N_{Ra}(z_0) \exp^{-\int_{z_0}^z [a_{par}(\lambda_0, \zeta) + a_{mol}(\lambda_0, \zeta)] d\zeta}} \quad (2.4.1)$$

Το πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου έγκειται στο γεγονός ότι ο συντελεστής οπισθοσκέδασης μπορεί να υπολογιστεί και σε χαμηλά ύψη, αφού η συνάρτηση αλληλεπικάλυψης των δύο διαφορετικών εξισώσεων lidar είναι ίσες, με την προϋπόθεση πάντα ότι το ύψος αναφοράς μας βρίσκεται εκεί που η ατμόσφαιρα είναι μοριακή.

## 2.5 Fluorescence lidar

Τα βιογενή αιωρούμενα σωματίδια (π.χ. σκόνη, σωματίδια από καύση βιαμάζας, γύρη) περιέχουν χημικές ουσίες, οι οποίες εμφανίζουν το χαρακτηριστικό του φθορισμού λόγω της διέγερσης με υπεριώδη ακτινοβολία. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί εξειδικευμένα lasers, τα λεγόμενα laser φθορισμού (laser induced fluorescence light detection and ranging (LIF LiDAR)), τα οποία αξιοποιούν την ιδιότητα των βιογενών αιωρούμενων σωματιδίων να εκπέμπουν στο υπεριώδες φάσμα όταν διεγείρονται. Στα συγκεκριμένα lidars το μήκος κύματος εκπομπής είναι μεγαλύτερο και η ενέργεια μικρότερη, επομένως πολλές φορές το σήμα είναι αρκετά ασθενές. Τέτοιου είδους lidars χρησιμοποιούν laser που εκπέμπει στα 266nm ή 532nm. Όμως στα 266nm έχουν εύρος ανίχνευσης μικρότερο από 1km, λόγω της έντονης απορρόφησης από το ατμοσφαιρικό όζον σε αυτό το μήκος κύματος [32]. Η γύρη που αποτελεί και αυτή ένα είδος βιογενών αιωρούμενων σωματιδίων εμφανίζει φθορισμό όταν διεγείρεται από την υπεριώδη ακτινοβολία. Κάθε είδος γύρης έχει και διαφορετικό φάσμα επομένως με αυτόν τον τρόπο εντοπίζεται ποιο είδος γύρης υπάρχει κάθε φορά. Επομένως η τεχνική αυτή δεν είναι χρήσιμη μόνο για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης της γύρης, αλλά και για τον προσδιορισμό των ειδών που εμφανίζονται. Ήδη έχουν γίνει κάποιες προσπάθειες να προσδιοριστούν τα φάσματα εκπομπής κάθε είδους γύρης (Yong-Le Pan et. al. 2010), παρόλα αυτά η διαδικασία βρίσκεται ακόμα σε αρχικό στάδιο. Με τον όρο φθορισμός

αναφερόμαστε στην εκπομπή ενός φωτονίου, έπειτα από την διέγερση ενός μορίου το οποίο απορρόφησε ενέργεια από τη συχνότητα της ακτινοβολίας που εκτέθηκε. Το κάθε μόριο έχει συγκεκριμένο φάσμα στο οποίο απορροφά και εκπέμπει. Πιο συγκεκριμένα για την γύρη και ειδικότερα για τα είδη που θα μας απασχολήσουν στην εργασία μας όταν διεγείρονται στα 370nm η γύρη από πεύκο φθορίζει με ένα μέγιστο στα 420nm, η γύρη από έλατο στα 465nm και η γύρη από σημύδα στα 470nm. Επομένως αφού το laser εκπέμπει στο υπεριώδες, αλληλεπιδρά με τα μόρια της γύρης, τα οποία με τη σειρά τους εμφανίζουν το φαινόμενο του φθορισμού. Η αλληλεπίδραση αυτή μας επιστρέφει ένα σήμα το οποίο περιέχει πληροφορίες για τις χημικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων. Με την προϋπόθεση ότι τα μόρια της γύρης είναι απολύτως σφαιρικά το σήμα φθορισμού  $N(\lambda_1, Z)$  που λαμβάνουμε από την αλληλεπίδραση της υπεριώδους ακτινοβολίας από τη γύρη μπορεί να δωθεί από την εξίσωση lidar με τον εξής τρόπο:

$$N(\lambda_1, Z) = n_0 \frac{E_0 \lambda_0}{hc} \xi(Z) \eta_0 \Delta Z N(Z) T_{\lambda_0} T_{\lambda_1} T(\lambda_0, Z) T(\lambda_1, Z) \int_{\lambda_1 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_1 + \Delta\lambda/2} \frac{d^2\sigma}{d\Omega d\lambda}(\lambda_1, \lambda) d\lambda \quad (2.5.1)$$

όπου  $E_0$  η ενέργεια του laser,  $n_0$  ο αριθμός των παλμών,  $\lambda_0$  το μήκος κύματος διέγερσης,  $h$  η σταθερά του Planck,  $c$  η ταχύτητα του φωτός,  $A_0$  το εμβαδό του τηλεσκοπίου,  $\xi(Z)$  ο παράγοντας overlap,  $\eta_0$  η αποδοτικότητα ανίχνευσης του οργάνου,  $\Delta Z$  το πάχος του στρώματος της γύρης,  $N(Z)$  η συγκέντρωση της γύρης,  $\lambda_1$  το μήκος κύματος φθορισμού της γύρης,  $T_{\lambda_0}$  η διαπερατότητα του μήκους κύματος διέγερσης,  $T_{\lambda_1}$  η διαπερατότητα του μήκους κύματος φθορισμού και  $T(\lambda_0, Z)$  η εξασθένιση του μήκους κύματος διέγερσης λόγω της ατμόσφαιρας,  $T(\lambda_1, Z)$  η εξασθένιση του μήκους κύματος φθορισμού λόγω της ατμόσφαιρας και  $\frac{d^2\sigma}{d\Omega d\lambda}$  η ενεργός διατομή κατά τη σκέδαση και σε γωνία σκέδασης  $180^\circ$ . Η ατμοσφαιρική εξασθένιση του μήκους κύματος εξασθένισης και φθορισμού ορίζεται ως:

$$T(\lambda_0, Z) = \exp^{-[a_m(\lambda, Z) + a_{ab}(\lambda, Z) + a_a(\lambda, Z)]Z} \quad (2.5.2)$$

$$T(\lambda_1, Z) = \exp^{-[a_m(\lambda, Z) + a_a(\lambda, Z)]Z} \quad (2.5.3)$$

όπου  $a_m(\lambda, Z)$  ο συντελεστής εξασθένισης των μορίων,  $a_{ab}(\lambda, Z)$  ο συντελεστής απορρόφησης του όζοντος και  $a_a(\lambda, Z)$  ο συντελεστής εξασθένισης των αιωρούμενων σωματιδίων [26].



## 2.6 Οπτικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων

Στον πίνακα 2.6.1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι οπτικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων τις οποίες και θα αναλύσουμε στη συνέχεια.

Πίνακας 2.6.1: Οπτικές Ιδιότητες Αιωρούμενων Σωματιδίων

Οπτικές Ιδιότητες Αιωρούμενων Σωματιδίων		
Χωρικός Συντελεστής εξασθένησης σωματιδίων	$\alpha_{\text{par}}$	$Mm^{-1}$
Χωρικός Συντελεστής οπισθοσκέδασης σωματιδίων	$\beta_{\text{par}}$	$Mm^{-1}sr^{-1}$
Λόγος Lidar	$S_{\text{par}}$	Sr
Συντελεστής Αποπόλωσης	$\delta_{\text{par}}$	αδιάστατο
Εκθέτης Ångström, συντελεστές εξασθένησης	$\dot{A}_{\alpha, \text{par}}$	αδιάστατο
Εκθέτης Ångström, συντελεστές οπισθοσκέδασης	$\dot{A}_{\beta, \text{par}}$	αδιάστατο

### 2.6.1 Εκτατικές οπτικές Ιδιότητες

Εξαρτώνται από την συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων στο σύστημα που μελετάμε κάθε φορά.

#### 2.6.1.1 Συντελεστής οπισθοσκέδασης των αιωρούμενων σωματιδίων

Ο χωρικός συντελεστής οπισθοσκέδασης περιγράφει την σκέδαση της ακτινοβολίας σε γωνία  $180^\circ$  ως προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο 2.3 και 2.4 για τον υπολογισμό του συντελεστή οπισθοσκέδασης των αιωρούμενων σωματιδίων υπάρχουν δύο διαφορετικοί τρόποι, η μέθοδος Klett και η μέθοδος Raman, με την πρώτη μέθοδο να θεωρεί μια σταθερή τιμή του λόγου lidar, αλλά και ένα ύψος αναφοράς στο οποίο η ατμόσφαιρα μπορεί να θεωρηθεί μοριακή, ενώ η δεύτερη να αξιοποιεί την ελαστική οπισθοσκέδαση από τα μόρια της ατμόσφαιρας και την ανελαστική οπισθοσκέδαση από το άζωτο.

#### 2.6.1.2 Συντελεστής εξασθένησης των αιωρούμενων σωματιδίων

Ο συντελεστής εξασθένησης των αιωρούμενων σωματιδίων υπολογίζεται από την εξίσωση 2.2.1 από το σήμα οπισθοσκέδασης που προκύπτει από τα μόρια της ατμόσφαιρας. Ο συντελεστής οπισθοσκέδασης

Raman  $\beta_{Ra}(z, \lambda_{Ra})$  στο μήκος κύματος εκπομπής δίνεται από τον τύπο:

$$\beta_{Ra}(z, \lambda_0) = N_{Ra}(z) \frac{d\sigma_{Ra}}{d\Omega}(180^\circ, \lambda_0) \quad (2.6.1)$$

όπου  $N_{Ra}(z) \frac{d\sigma_{Ra}}{d\Omega}(180^\circ, \lambda_0)$  η αριθμητική πυκνότητα των μορίων, δηλαδή το γινόμενο της μοριακής αριθμητικής πυκνότητας του αζώτου ή του οξυγόνου με την ενεργό διατομή κατά την Raman σκέδασης στο μήκος κύματος και σε γωνία σκέδασης  $180^\circ$ .

Επιπλέον θεωρούμε την συνάρτηση αλληλεπικάλυψης να είναι ίση με την μονάδα [ $O(z, \lambda_{Ra}) = 1$ ]. Για να προκύψει ο συντελεστής εξασθένησης των σωματιδίων εισάγουμε την εξίσωση 2.6.1 στην εξίσωση 2.2.2, αφού λογαριθμίσουμε τα δύο μέλη και πάρουμε την παράγωγο ως προς το ύψος, καταλήγωντας στην εξίσωση:

$$\alpha_{par}(z, \lambda_0) + \alpha_{par}(z, \lambda_{Ra}) = \frac{d}{dz} \ln\left(\frac{N_{Ra}(z)}{z^2 P(z, \lambda_{Ra})}\right) - a_{mol}(z, \lambda_0) - a_{mol}(z, \lambda_{Ra})$$

Για να υπολογίσουμε τον συντελεστή εξασθένησης των αιωρούμενων σωματιδίων στο εκπεμπόμενο μήκος κύματος θα πρέπει να εισάγουμε τον εκθέτη Ångström [ $\dot{A}_{a,par}$ ], μέσα από τον οποίο απεικονίζεται η φασματική εξάρτηση των συντελεστών εξασθένησης:

$$\frac{a_{par}(\lambda_0)}{a_{par}(\lambda_{Ra})} = \left(\frac{\lambda_{Ra}}{\lambda_0}\right)^{\dot{A}_{a,par}}$$

Τελικά, η εξίσωση που προκύπτει είναι η εξής:

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

Τέλος, για τον προσδιορισμό του συντελεστή εξασθένησης των σωματιδίων υποθέτουμε ότι ο εκθέτης Ångström,  $\dot{A}_{a,par}$ , για κοντινά κοντινά μήκη κύματος θεωρείται ίσος με την μονάδα.

### 2.6.2 Εντατικές οπτικές Ιδιότητες

Είναι οι ιδιότητες αυτές που προσδιορίζουν το σύστημα μελέτης και η τιμή τους είναι ανεξάρτητη του μεγέθους του συστήματος, αφού παραμένει σταθερή σε όλη την έκταση του.

### 2.6.2.1 Λόγος του συντελεστή εξασθένησης προς οπισθοσκέδαση αιωρούμενων σωματιδίων .

Μια σημαντική οπτική ιδιότητα των αιωρούμενων σωματιδίων αποτελεί ο λόγος lidar. Ο λόγος αυτός ισούται με τον συντελεστή εξασθένησης προς τον συντελεστή οπισθοσκέδασης και δίνεται από τη σχέση:

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

Ο λόγος lidar διαφοροποιείται καθ' ύψος, καθώς εμφανίζει ισχυρή εξάρτηση από το σχήμα, τη χημική σύνθεση και το μέγεθος των σωματιδίων. Επιπρόσθετα ο λόγος lidar ανάλογα το είδος των σωματιδίων που επικρατούν στην περιοχή μελέτης κάθε φορά, εμφανίζει φασματική εξάρτηση, άλλες φορές έντονη και άλλες φορές καθόλου, γεγονός που θα διερευνηθεί και στην παρούσα εργασία. Ο προσδιορισμός του λόγου lidar μπορεί να μας δώσει πληροφορίες για την προέλευση και τη σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων, συνδυάζοντας πληροφορίες σχετικά με την προέλευση των αιωρούμενων σωματιδίων (π.χ. ηπειρωτικά, θαλάσσια, καύση βιομάζας). Τυπικές τιμές που προτείνονται από τη βιβλιογραφία είναι για τα θαλάσσια σωματίδια 20 – 35 sr, για τα σωματίδια από ερήμους 50 – 80 sr, για τα αστικά 35 – 70 sr και για τα σωματίδια καπνού 70 – 100 sr [Ansmann et al., 2001].

**2.6.2.2 Συντελεστής Αποπόλωσης** Ο συντελεστής αποπόλωσης υπολογίζεται ως ο λόγος της κάθετης συνιστώσας του συντελεστή οπισθοσκέδασης προς την παράλληλη συνιστώσα του συντελεστή οπισθοσκέδασης στο μήκος κύματος  $\lambda$  και δίνεται από την σχέση:

$$\delta(z, \lambda) = \frac{b_{\perp}(z, \lambda)}{b_{\parallel}(z, \lambda)}$$

Η συνεισφορά των μορίων μπορεί εύκολα να υπολογισθεί, και έτσι να προκύψει ο συντελεστής αποπόλωσης των αιωρούμενων σωματιδίων [Murayama et al., 1999]. Σύμφωνα με αυτό το μέγεθος μπορούμε να διακρίνουμε τα σωματίδια ανάλογα το σχήμα τους, δηλαδή πόσο σφαιρικά ή όχι είναι. Μεγάλες τιμές αυτής της παραμέτρου υποδεικνύουν μη σφαιρικά σωματίδια σκόνης από ερήμους, ενώ τα σωματίδια που προέρχονται από ανθρωπογενή δραστηριότητα δίνουν μικρές τιμές και άρα αμελητέα αποπόλωση της ακτινοβολίας. Ο πίνακας Müller περιγράφει την γραμμική αλληλεπίδραση του πολωμένου φωτός και των οπτικών στοιχείων του οργάνου lidar. Κάθε κατάσταση πόλωσης του φωτός περιγράφεται από ένα συγκεκριμένο διάνυσμα Stokes, το οποίο μετασχηματίζει ο πίνακας Müller σε ένα άλλο μοναδικό διάνυσμα Stokes. Ο πίνακας Müller F για μια μη πολωμένη δέσμη φωτός, ισούται με

$$F = \begin{pmatrix} F_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & F_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & F_{44} \end{pmatrix} = F_{11} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 - 2a \end{pmatrix} \text{ όπου } a \text{ η παράμετρος πόλωσης που ισούται}$$

με το κλάσμα του οπισθοσχεδαζόμενου φωτός που διατηρεί την πόλωση που είχε όταν εκπέμφθηκε.

Σύμφωνα με τον V. Freudenthaler [Volker Freudenthaler et.al., 2015] ο συντελεστής αποπόλωσης μπορεί να προκύψει, αν γνωρίζουμε τα στοιχεία  $F_{11, \lambda}(r, n)$  και  $F_{22, \lambda}(r, n)$  του πίνακα Muller :

$$\delta_{\lambda}^P = \frac{1 - F_{22, \lambda}(r, n, 180^\circ)/F_{11, \lambda}(r, n, 180^\circ)}{1 + F_{22, \lambda}(r, n, 180^\circ)/F_{11, \lambda}(r, n, 180^\circ)} = \frac{1 - a}{1 + a} \quad (2.6.2)$$

### 2.6.2.3 Εκθέτης Ångström αιωρούμενων σωματιδίων

Ο εκθέτης Ångström βασιζόμενος στους συντελεστές εξασθένησης των αιωρούμενων σωματιδίων υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\mathring{A}_{a, par} = -\frac{\ln\left[\frac{a_{par}(z, \lambda_1)}{a_{par}(z, \lambda_2)}\right]}{\ln\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)}$$

Ο εκθέτης Ångström θεωρείται ένα μέγεθος που σχετίζεται με το μέγεθος του σκεδαστή καθώς περιγράφει την φασματική εξάρτηση του συντελεστή εξασθένησης. Σε περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμος ο συντελεστής εξασθένησης των αιωρούμενων σωματιδίων τότε ο εκθέτης Ångström υπολογίζεται από τους συντελεστές οπισθοσκέδασης σύμφωνα με την σχέση:

$$\mathring{A}_{\beta, par} = -\frac{\ln\left[\frac{\beta_{par}(z, \lambda_1)}{\beta_{par}(z, \lambda_2)}\right]}{\ln\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)}$$

Οι δύο αυτοί εκθέτες δεν μπορούν να θεωρηθούν ισοδύναμοι μεταξύ τους, λόγω του λόγου lidar. Παρόλα αυτά και οι δύο αποτελούν χαρακτηριστική ένδειξη του μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων. Σε περιπτώσεις όπου επικρατούν στην ατμόσφαιρα σωματίδια διαμέτρου μικρότερης από 1  $\mu\text{m}$  (fine), ο εκθέτης Ångström παίρνει τιμές κοντά στο 2, ενώ για μεγαλύτερα σωματίδια διαμέτρου λίγων  $\mu\text{m}$  (coarse) λαμβάνει τιμές κοντά στο μηδέν.

### 3 Μεθοδολογία

#### 3.1 Γυροπαγίδα Hirst

Η συγκέντρωση των διαφόρων ειδών γύρης στην περιοχή μελέτης σε αυτή την εργασία πραγματοποιήθηκε από μια γυροπαγίδα τύπου Hirst. Ένας τέτοιου είδους μετρητής γύρης επιτρέπει την αυτοματοποιημένη καταγραφή των σωματιδίων γύρης ανά δύο ώρες, για μία εβδομάδα συνεχόμενα. Τοποθετείται συνήθως κοντά στο lidar που χρησιμοποιείται σε ένα σημείο αρκετά ψηλά από το έδαφος ώστε να μην εμποδίζεται η ροή του αέρα από φυσικά ή και τεχνητά εμπόδια (π.χ. δέντρα, κτίσματα). Ένας τέτοιου είδους μετρητής αξιοποιεί το μοντέλο που προτάθηκε από τον Hirst, σύμφωνα με το οποίο ο αέρας που εισέρχεται με ρυθμό 10 L/min από το στόμιο της συσκευής, επιτρέπει στα σωματίδια που συμπαρασύρει μαζί του να κολλήσουν πάνω σε μια πλαστική πλάκα η οποία είναι τοποθετημένη κάτω από το στόμιο και καλυμμένη με ένα κολλώδες υλικό. Η συσκευή αυτή τοποθετείται πάνω σε μια βάση η οποία μπορεί να περιστρέφεται ανάλογα με τη φορά του ανέμου που εντοπίζει ο ανεμοδείκτης για να εξασφαλίζεται πάντα η επαρκής ροή του αέρα από το στόμιο. Στη συνέχεια οι πλαστικές πλάκες αναλύονται σε μικροσκόπιο, προκειμένου να βρεθεί το είδος και το πλήθος των κόκκων γύρης που παγιδεύτηκαν από τον ανιχνευτή. Συνδυάζοντας το πλήθος των κόκκων γύρης με τον όγκο του αέρα που διήλθε από τον μετρητή μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί και η συγκέντρωση των διαφόρων ειδών της γύρης σε μία περιοχή [25].

#### 3.2 Raman Polly<sup>XT</sup> Lidar

Στο δίκτυο PollyNet εντάσσονται συστήματα lidar τύπου Polly<sup>XT</sup> (Portable Lidar sYstem eXTended). Το δίκτυο αυτό αναπτύχθηκε από το Ινστιτούτο TROPOS της Λειψίας και την τελευταία δεκαετία έχει καταφέρει να εντάξει στο δυναμικό του πάνω από 20 προηγμένης τεχνολογίας Lidar, τα οποία μπορούν να πραγματοποιούν μετρήσεις αυτοματοποιημένα παρέχοντας τη δυνατότητα παρατήρησης και λήψης δεδομένων για τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας όλο το 24ωρο.

Πιο συγκεκριμένα, τα δεδομένα τα οποία θα επεξεργαστούμε έχουν ληφθεί από ένα lidar Raman Polly<sup>XT</sup>, το οποίο μπορεί να παρέχει πολύ ακριβείς μετρήσεις τόσο χωρικά (30 m resolution) όσο και χρονικά (30 sec resolution). Οι φυσικές ποσότητες που μπορούμε να μετρήσουμε από ένα τέτοιο σύστημα είναι οι εξής: 1) ο συντελεστής οπισθοσκέδασης σωματιδίων στα 355, 532 και 1064nm, 2) ο συντελεστής εξασθένισης σωματιδίων στα 355 και 532nm, 3) ο συντελεστής αποπόλωσης στα 355 και 532nm, που επιτρέπει τον προσδιορισμό του σχήματος των αιωρούμενων σωματιδίων, 4) η συγκέντρωση υδρατμών στα 407nm τις μεταμεσονύκτιες ώρες, 5) ο εκθέτης Ångström (Å), αφού έχουμε δεδομένα σε πολλά

μήκη κύματος, ο οποίος μπορεί να μας δώσει μια εικόνα για το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων και β) ο λόγος του συντελεστή εξασθένησης προς το συντελεστή οπισθοσκέδασης ή αλλιώς ο λόγος lidar, ο οποίος δίνει πληροφορίες για την προέλευση των αιωρούμενων σωματιδίων. Εκπέμπει σε τρία μήκη κύματος (1064, 532, 355nm) και ανιχνεύει σε επτά μήκη κύματος. Για τις μετρήσεις που πραγματοποιούνται την νύχτα ο συντελεστής εξασθένησης και οπισθοσκέδασης στα 355 και 532nm προσδιορίζονται μέσω της μεθόδου Raman την οποία αναφέρουμε στο κεφάλαιο 2.4. Ένα τέτοιο σύστημα τοποθετείται σε προστατευμένο μέρος και είναι κατασκευασμένο με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορεί να λειτουργεί ανεξάρτητα των μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούν. Ένα lidar Polly<sup>XT</sup> απαρτίζεται από τρία βασικά εργαλεία για να λειτουργήσει: τον πομπό, τον δέκτη για την ανάκτηση των δεδομένων και τον κατάλληλο χώρο για την προστασία του συστήματος από τα καιρικά φαινόμενα και τη σκόνη. Ο πομπός, ένα Nd:YAG laser (Continuum Inlite III) εκπέμπει παλμό laser σε μήκος κύματος 1064, 532. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια της ημέρας για τον προσδιορισμό του συντελεστή εξασθένησης και οπισθοσκέδασης χρησιμοποιείται η μέθοδος Klett, η οποία αναλύεται στο κεφάλαιο. Όπως σε όλα τα διαζονικά lidar έτσι και σε αυτό εμφανίζεται το πρόβλημα της αλληλεπικάλυψης. Το ύψος όπου έχουμε πλήρη αλληλεπικάλυψη της δέσμης του laser με το τηλεσκόπιο βρίσκεται γύρω στο 1 Km. Επομένως για να μετρήσουμε σε μικρότερα ύψη πρέπει να εφαρμοστεί η τεχνική overlap correction [23], [24].

### 3.3 Δεδομένα- Περιοχή μελέτης

#### 3.3.1 Περιοχή μελέτης

Το κλίμα της Φινλανδίας παρουσιάζει μεγάλες εποχιακές διακυμάνσεις. Αυτό οφείλεται τόσο στην περίπλοκη τοπογραφία της, όσο και στην γειτνίαση της με μεγάλες εκτάσεις θάλασσας. Η μέση ετήσια θερμοκρασία της Φινλανδίας έχει όμως αυξηθεί κατά 2 °C από τα μέσα του 19ου αιώνα, επομένως είναι μια χώρα που έχει επηρεαστεί αρκετά από την τάση της Γης να θερμανθεί. Τα κλιματικά μοντέλα επιβεβαιώνουν ότι η θερμοκρασία της θα συνεχίσει να ανεβαίνει, η συχνότητα των βροχών θα αυξάνεται και η χιονόπτωση θα εμφανίζει μεγάλες διακυμάνσεις. Γενικότερα είναι μια χώρα η οποία βρίσκεται σε μια γεωγραφική περιοχή στην οποία συναντώνται συχνά τροπικές θερμές με ψυχρές πολικές αέριες μάζες με αποτέλεσμα να εμφανίζει μεγάλη αστάθεια και έντονα καιρικά φαινόμενα, τα οποία ακολουθούν την κατεύθυνση των δυτικών επικρατούντων ανέμων της περιοχής [2], [3]. Επομένως χώρες όπως αυτές, οι οποίες λόγω των καιρικών φαινομένων παρουσιάζουν έντονη χλωρίδα και πανίδα, αλλά ταυτόχρονα δεν παρουσιάζουν έντονη ρύπανση από ανθρωπογενή δραστηριότητα και μεταφορά σκόνης, μπορούν να θεωρηθούν κατάλληλες για τη μελέτη της γύρης .

### 3.3.2 Σταθμοί Δεδομένων

Αναλυτικότερα, στην παρούσα εργασία η χρονοσειρά των δεδομένων Lidar που θα επεξεργαστούμε περιλαμβάνει τη χρονική περίοδο 28/04/2016 με 28/08/2016 στο Vehmasmäki (62°44' N, 27°33' E, 190m.a.s.l.), στη Φινλανδία. Η συγκεκριμένη περιοχή είναι δασώδης και βρίσκεται 18 km ανατολικά της πόλης του Kuopio. Για τη λήψη των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ένα Raman lidar Polly<sup>XT</sup>, προκειμένου να παρατηρήσουμε τις κατακόρυφες κατανομές των ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων, σε συνδυασμό με μια γυροπαγίδα Hirst, που μας δίνει πληροφορίες για τη συγκέντρωση της γύρης στο έδαφος. Η συγκεκριμένη περιοχή θεωρείται κατάλληλη για τη μελέτη της γύρης καθώς δεν υπάρχει κάποιο έντονο υπόβαθρο από αιωρούμενα σωματίδια ανθρωπογενούς προέλευσης ή σκόνη που να δυσχεραίνουν την ανααγώριση των αιωρούμενων σωματιδίων στην περιοχή. Τα δεδομένα AERONET έχουν ληφθεί από ένα σταθμό που βρίσκεται στο Kuopio, μία αστική περιοχή περίπου 90.000 κατοίκων στην Φινλανδία. Ο σταθμός σε αυτή την περιοχή είναι τοποθετημένος στο πανεπιστήμιο του Kuopio, περίπου 2 χιλιόμετρα δυτικά από το κέντρο της πόλης. Γύρω από τον σταθμό υπάρχουν κάποια κτίρια τα οποία λειτουργούν ως εμπόδια. Αυτά είναι ο πύργος Puijo σε απόσταση 2.2 χλμ βορειοδυτικά καθώς και μία καμινάδα σε απόσταση 320 μέτρων νοτιοανατολικά με ύψος 140 μέτρα. Ως ημι-αστική περιοχή η κύρια πηγή ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι αυτή της κίνησης των αυτοκινήτων.

## 4 Δίκτυο AERONET και Ηλιακό Φωτόμετρο

### 4.1 Δίκτυο AERONET

Το δίκτυο AERONET (AErosol Robot Network) δημιουργήθηκε από τη NASA σε συνεργασία με εκπαιδευτικά ιδρύματα. Αποτελείται από πληθώρα ηλιακών φασματοφωτόμετρων εδάφους, τα οποία μπορούν να μετρήσουν διάφορες παραμέτρους αιωρούμενων σωματιδίων. Η πλατφόρμα αυτή παρέχει εύκολη πρόσβαση από τον οποιοδήποτε σε ατμοσφαιρικά δεδομένα για έρευνα, συνεργατικά με άλλες βάσεις δεδομένων. Όλα τα όργανα που αποτελούν το AERONET, καθώς και οι μέθοδοι βαθμονόμησης και επεξεργασίας δεδομένων, πρέπει να ακολουθούν μια κοινή αρχή λειτουργίας. Το AERONET παρέχει πολλές και διαφορετικές οπτικές και μικροφυσικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων, όπως το οπτικό βάθος, την ανακλαστικότητα μεμονωμένης σκέδασης κ.α. σε παγκόσμια εμβέλεια. Τα επίπεδα ποιότητας των δεδομένων που παρέχει είναι 4: Επίπεδο 1.0 (αφιλτράριστα – unscreened), Επίπεδο 1.5 (φιλτραρισμένα όσον αφορά τα νέφη – cloud- screened) και Επίπεδο 2.0 (φιλτραρισμένα για τα νέφη και ποιοτικώς εξασφαλισμένα – quality-assured). Στο Επίπεδο 3 προστέθηκαν στη λίστα των ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων που παρέχονται, ο σωματιδιακός δείκτης αποπόλωσης και ο λόγος lidar. Στη συγκεκριμένη εργασία τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν είναι του επιπέδου 1.5.



Σχήμα 4.1.1: Παγκόσμιοι Σταθμοί Δεδομένων AERONET



## 4.2 Ηλιακό φωτόμετρο Cimel

Το ηλιακό φωτόμετρο Cimel είναι ένα ρομποτικό ανθεκτικό φωτομέτρο που μπορεί να αξιοποιήσει την ηλιακή ενέργεια για να λειτουργήσει. Ακολουθεί τη διαδρομή του ήλιου και στοχεύει στον ουρανό με αυτόματο τρόπο. Ένας αισθητήρας έχει προγραμματιστεί έτσι ώστε να αναγκάζει τη ρομποτική βάση του να στρέφεται και να ευθυγραμμίζεται με τον ήλιο. Το όργανο προστατεύεται κατάλληλα από τα έντονα καιρικά φαινόμενα από ένα ανθεκτικό κουτί που τοποθετείται γύρω από τα πιο ευαίσθητα εξαρτήματα του οργάνου (μπαταρία, ρυθιστής, εξοπλισμός μετάδοσης δεδομένων μέσω δορυφόρου). Με την αντιστροφή του σήματος της άμεσης ακτινοβολίας ο χρήστης μπορεί να λάβει προϊόντα αφού έχει προηγηθεί η επίλυση ιδιαίτερα περίπλοκων μαθηματικών εξισώσεων και λαβάνοντας υπόψη τρεις βασικές παραδοχές:

- Τα αιωρούμενα σωματίδια χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: σφαιρικά και μη σφαιρικά
- Η ατμόσφαιρα θεωρείται επίπεδη και παράλληλη (plane-parallel)
- Η κατακόρυφη κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων θεωρείται ομογενής κατά την διάρκεια της μέτρησης.

## 4.3 Μεθοδολογία

Τα φασματοφωτόμετρα του δικτύου AERONET μετρούν την απευθείας ηλιακή ακτινοβολία. Οι μετρήσεις αυτές αναλύονται χρησιμοποιώντας τον κατάλληλο αλγόριθμο αναστροφής. Πιο συγκεκριμένα για τον υπολογισμό του λόγου Lidar για κάθε μέτρηση υπολογίζονται τα στοιχεία  $F_{11,\lambda}(r, n)$  και  $F_{22,\lambda}(r, n)$  του πίνακα Müller χρησιμοποιώντας την κατανομή μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων και τον δείκτη διάθλασης  $n = n_r + in_i$ , οι οποίοι έχουν ανακτηθεί από τα δεδομένα του Aeronet [Bohren et.al 1983]. Το στοιχείο  $F_{11,\lambda}(r, n)$  είναι ανάλογο της ροής του σχεδασόμενου φωτός, ενώ το στοιχείο  $F_{22,\lambda}(r, n)$  εξαρτάται από την γωνιακή και φασματική κατανομή της έντασης της ακτινοβολίας όπως αυτή έχει ανακτηθεί από τα δεδομένα του Aeronet. Έτσι υπολογίζεται ο λόγος lidar χρησιμοποιώντας και την ανακλαστικότητα μεμονωμένης σκέδασης  $\omega_\lambda$  από τον τύπο:

$$S_\lambda^P = \frac{4\pi}{\omega_\lambda F_{11,\lambda}(r, n, 180^\circ)} \quad (4.3.1)$$

## 5 Αποτελέσματα

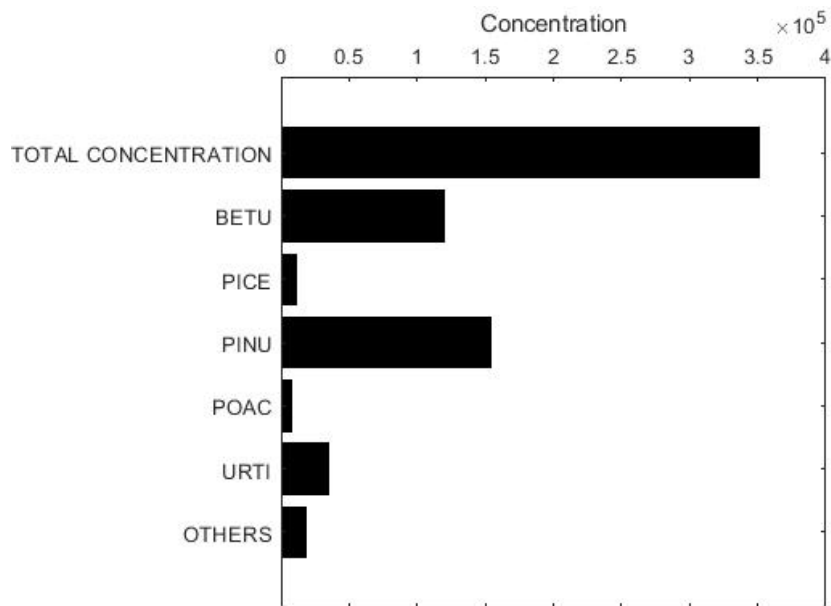
### 5.1 Συγκέντρωση και είδη ατμοσφαιρικής γύρης

Από τα δεδομένα της γυροπαγίδας κατά τη διάρκεια λειτουργίας της από 29/04/2016 έως 29/08/2016 αναγνωρίστηκαν 20 διαφορετικά είδη γύρης. Στον παρακάτω Πίνακα 5.1.1 παρουσιάζονται συνοπτικά το κοινό όνομα, το γένος, η οικογένεια και η ελληνική ονομασία των ειδών γύρης που επικράτησαν κατά τις 4 περιόδους έντονης εμφάνισης γύρης.

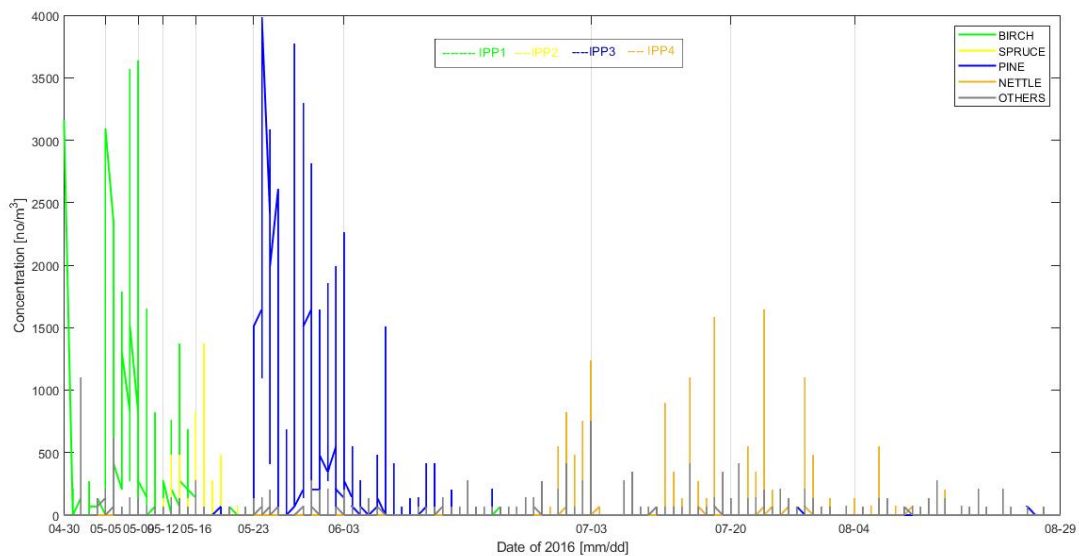
Πίνακας 5.1.1: Κυρίαρχα είδη γύρης

Κοινό Όνομα	Γένος	Οικογένεια	Ελληνική Ονομασία
Birch	Betula	Betulaceae	Σημύδα
Spruce	Picea	Pinaceae	Έλατο
Pine	Pinus	Pinaceae	Πεύκο
Nettle	Urtica	Urticaceae	Τσουκνίδα

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.1.1, τα είδη της γύρης που κυριάρχησαν κατά την διάρκεια της λειτουργίας της γυροπαγίδας είναι της σημύδας, του ελάτου, του πεύκου και της τσουκνίδας. Παρόλο που η περιοχή εμφανίζει τεράστια βιοποικιλότητα θα αναμέναμε την ταυτόχρονη εμφάνιση πολλών ειδών γύρης, παρόλα αυτά όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα 5.1.2, διαφορετικές χρονικές περίοδοι εμφανίζουν μέγιστες συγκεντρώσεις διαφορετικών ειδών γύρης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κάθε είδος γύρης ξεκινά να παράγεται υπό διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας.

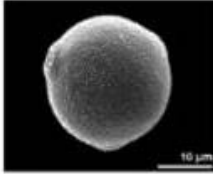
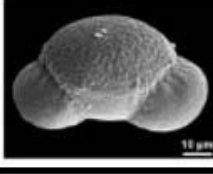
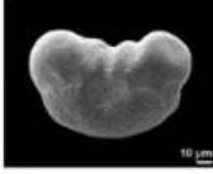
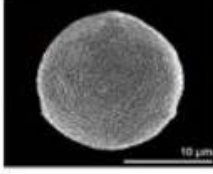



Σχήμα 5.1.1: Συγκέντρωση γύρης ανά είδος κατά την περίοδο 29/04/2016-29/08/2016



Σχήμα 5.1.2: Συγκέντρωση γύρης κατά την περίοδο 29/04/2016-29/08/2016

Στο σχήμα 5.1.3 παρουσιάζονται μικροφωτογραφίες των ειδών της γύρης που κυριαρχούν. Όπως είναι εμφανές η σημύδα είναι ένα είδος γύρης με σφαιρικά μικρά σωματίδια, το οποίο όμως θεωρείται αρκετά αλλεργιογόνο [27]. Αντίθετα η γύρη από πεύκο και από έλατο έχουν σακκοειδές επίμηκες σχήμα, είναι αρκετά μεγαλύτερα σε μέγεθος και δεν θεωρούνται ιδιαίτερα αλλεργιογόνα. Τέλος, η γύρη από τσουκνίδα αποτελείται από μικρά σφαιροειδή σωματίδια με μέτριες αλλεργικές επιπτώσεις.

Γένος	Είδος	Διάμετρος	Σχήμα	Μικρογραφία	Αναφορά
Betula pendula	Birch	21-25 μm	σφαιροειδές		Halbritter and Ojethan, 2016
Pinus sylvestrus	Pine	1-100 μm	σακκοειδές		Halbrner and Heigl, 2020b
Piceaables	Spruce	>100μm	σακκοειδές		Halbrnerand Heigl, 2020a
Urtica	Nettle	10-25 μm	σφαιροειδές		Halbritter et al., 2020
Poa annua (Poaceae)	Grass	10-25 μm	σφαιροειδές		Halbritterand Schneider, 2015

Σχήμα 5.1.3: Μικροφωτογραφίες ειδών γύρης που κυριάρχησαν

Για την επεξεργασία των δεδομένων ορίσαμε 4 περιόδους έντονης εμφάνισης γύρης (IPPs), ώστε κάθε μία από αυτές να χαρακτηρίζεται κυρίως από ένα συγκεκριμένο είδος γύρης. Τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για τον διαχωρισμό των περιόδων αυτών είναι τόσο η διαθεσιμότητα δεδομένων lidar, όσο και η μέση ημερήσια συγκέντρωση γύρης να ξεπερνά τα  $300 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$  κατά την πρώτη και τρίτη περίοδο και για την δεύτερη και τέταρτη η μέση ημερήσια συγκέντρωση να ξεπερνά τα  $20 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ . Στον Πίνακα 5.1.2 παρουσιάζεται η έναρξη και η λήξη κάθε περιόδου, αλλά και το είδος της γύρης που κυριαρχεί σε κάθε μία από αυτές.

Πίνακας 5.1.2: Χρονικές περίοδοι μελέτης

Χρονικές περίοδοι μελέτης		
IPP-1	05.05–09.05	Birch
IPP-2	12.05–16.05	Κυρίως Birch και spruce
IPP-3	23.05–25.05 - 28.05–03.06	Pine
IPP-4	01.07–03.07, 14.07–18.07, 24.07–04.08	Nettle

Κατά τη διάρκεια της πρώτης περιόδου κυριαρχεί η γύρη από σημύδα με ποσοστό μεγαλύτερο του 90%, κατά τη διάρκεια της δεύτερης περιόδου εμφανίζεται συνδυαστικά με τη γύρη από σημύδα και γύρη από έλατο με 15% συνεισφορά, κατά τη διάρκεια της τρίτης περιόδου κυριαρχεί η γύρη από έλατο και κατά τη διάρκεια της τέταρτης περιόδου η γύρη από τσουκνίδα.

## 5.2 Προσδιορισμός των στρώματων και case studies

### 5.2.1 Μεθοδολογία εύρεσης του πρώτου στρώματος της ατμόσφαιρα

Η τεχνική που είχε αναπτυχθεί ήδη από το 1979 από τον Endlich για να μπορέσει κανείς να αναγνωρίσει τα στρώματα των αιωρούμενων σωματιδίων, βασίζεται στην εύρεση των ακρότατων σημείων στο προφίλ του συντελεστή οπισθοσκέδασης. Αυτή η μέθοδος ονομάστηκε μέθοδος βαθμίδας (gradient method). Παρόλα αυτά, σε περίπτωση που θέλουμε να εντοπίσουμε ένα συγκεκριμένο στρώμα αιωρούμενων σωματιδίων, τότε η μέθοδος δεν είναι η κατάλληλη, λόγω των πολλαπλών βαθμίδων που θα εμφανίζονται στην κορυφή του κάθε στρώματος αιωρούμενων σωματιδίων. Προκειμένου να έχουμε την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια, η μέθοδος της βαθμίδας θα έπρεπε να χρησιμοποιεί την κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης και όχι το διορθωμένο με την απόσταση σήμα (RCS), διότι για να χρησιμοποιηθεί αυτό έχουμε κάνει την υπόθεση ότι η εξασθένιση λόγω μορίων είναι αμελητέα, κάτι το οποίο

δεν ισχύει πάντα. Επομένως η εξίσωση lidar μπορεί να γραφτεί ξανά με τον εξής τρόπο:

$$S(z) = O(z) \frac{C}{z^2} [\beta_m(z) + \beta_d(z)] T_m^2(z) T_d^2(z) \quad (5.2.1)$$

όπου  $b_m$  και  $b_a$  αντιπροσωπεύουν όπως έχουμε αναφέρει ξανά στο κεφάλαιο 2.2 τους συντελεστές οπισθοσκέδασης των μορίων και των αιωρούμενων σωματιδίων αντίστοιχα. Με  $T_i(z) = \exp^{-2 \int_0^z \alpha_i(r) dr}$  ορίζεται η διαπερατότητα της ατμόσφαιρας, στην οποία εμφανίζεται ο συντελεστής εξασθένησης  $\alpha$  για τα σωματίδια και τα μόρια αντίστοιχα. Τον όρο  $O(z)$  τον έχουμε ονομάσει από πριν συντελεστή αλληλεπικάλυψης και για λόγους απλοποίησης θεωρούμε ότι είναι σταθερός και ισούται με 1. Το range-corrected σήμα υπολογίζεται από τον τύπο  $RCS = S(z)z^2$ . Επομένως η εξίσωση lidar απλοποιείται ως εξής:

$$RCS(z) = C[\beta_m(z) + \beta_a(z)] T_m^2(z) T_a^2(z) \quad (5.2.2)$$

Η εξασθένηση από τα μόρια της ατμόσφαιρας και από τα αιωρούμενα σωματίδια μπορεί να θεωρηθεί σταθερά μεταβαλλόμενη με το ύψος και να απλοποιηθεί. Αντίθετα ο συντελεστής οπισθοσκέδασης εμφανίζει πολύ μεγάλες διακυμάνσεις. Ο συντελεστής οπισθοσκέδασης των μορίων  $\beta_m$  στο εκπεμπόμενο μήκος κύματος υπολογίζεται ως το γινόμενο της μοριακής αριθμητικής πυκνότητας  $N_0$  του αζώτου ή του οξυγόνου με την ενεργό διατομή οπισθοσκέδασης και ως  $H$  ορίζουμε το ύψος που η ατμόσφαιρα μπορεί να θεωρηθεί μοριακή. Επομένως η εξίσωση lidar μπορεί να απλοποιηθεί ακόμα περισσότερο ως εξής:

$$\ln(RCS) = \ln[\beta_\alpha + \frac{d\sigma}{d\Omega} N_0 \exp^{-\frac{z}{H}}] \quad (5.2.3)$$

Αν θέλουμε να απλοποιήσουμε κι άλλο την εξίσωση μας μπορούμε να θεωρήσουμε μια μοριακή ατμόσφαιρα χωρίς αιωρούμενα σωματίδια, δηλαδή  $b_a = 0$  επομένως:

$$\ln(RCS) = \ln[\frac{d\sigma}{d\Omega} N_0] - \frac{z}{H} \quad (5.2.4)$$

Λογαριθμίζοντας την εξίσωση 5.2.2 καταλήγουμε στην εξίσωση 5.2.4, η οποία ναί μεν είναι πολύ χρήσιμη για την εφαρμογή της μεθόδου βαθμίδας, αλλά όχι αντιπροσωπευτική για μια ατμόσφαιρα με πολλά αιωρούμενα σωματίδια, καθώς έχουμε απλοποιήσει την εξασθένηση μορίων και αιωρούμενων σωματιδίων και τον συντελεστή οπισθοσκέδασης των αιωρούμενων σωματιδίων.

Με τον όρο signal-to-noise ratio (SNR) αναφερόμαστε στον λόγο του επιθυμητού σήματος που θέλουμε να λάβουμε προς τον «θόρυβο» που δημιουργείται από σήματα σε μήκη κύματος εκτός του επιθυμητού. Για την αποκοπή του θορύβου χρησιμοποιούνται κατάλληλα φίλτρα συμβολής. Παρόλα αυτά, τα δεδομένα από συστήματα που εμφανίζουν μικρό SNR πρέπει να περάσουν από τη διαδικασία της

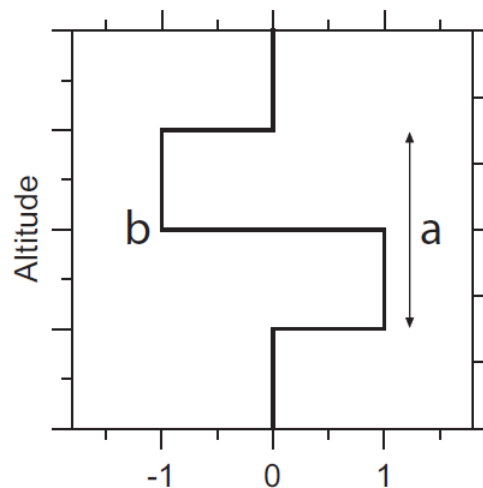
μεσοποίησης (scaling), ώστε να μειωθεί να μην ο θόρυβος αλλά να μην πάρουμε τόσο μεγάλες κλίμακες μελέτης ώστε να χάνεται σημαντική πληροφορία [20], [21], [22]. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκαν αλγόριθμοι οι οποίοι καταφέρνουν να αποβάλλουν τέτοιου είδους προβλήματα. Προκειμένου να επεξεργαστούμε τα δεδομένα μας και να βρούμε την στρωμάτωση των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα τη χρονική περίοδο μελέτης μας για το 2016 χρησιμοποιήσαμε την μέθοδο που πρώτος όρισε ο Brooks (2003) και ονομάστηκε Wavelet Covariance Transform (WCT). Με τον τρόπο αυτό μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε αυτοματοποιημένα το ύψος κάθε στρώματος αιωρούμενων σωματιδίων. Η μέθοδος WCT χρησιμοποιεί την εξίσωση:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{a} \int_{z_b}^{z_t} f(z) h\left(\frac{z-b}{a}\right) dz \quad (5.2.5)$$

με την εξίσωση Haars να ορίζεται ως

$$h\left(\frac{z-b}{a}\right) = \begin{cases} +1, & b - \frac{a}{2} \leq z \leq b, \\ -1, & b \leq z \leq b + \frac{a}{2}, \\ 0, & \text{αλλου} \end{cases} \quad (5.2.6)$$

όπου  $f(z)$  το διορθωμένο σήμα οπισθοσκέδασης του lidar  $P(z)z^2$ . Με  $z_b$  και  $z_t$  ορίζεται το υψηλότερο και χαμηλότερο όριο της ατμόσφαιρας στην κάθε μέτρηση. Η συνάρτηση βήματος  $h\left(\frac{z-b}{a}\right)$  απεικονίζεται γραφικά στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 5.2.1: Γραφική απεικόνιση εξίσωσης Haar

Ο μετασχηματισμός συνδιακύμανσης  $W_f(a, b)$  συγκρίνει το διορθωμένο με την απόσταση σήμα οπισθοσκέδασης με τη συνάρτηση που έχει με την συνάρτηση Haar. Μεγάλη προσοχή χρειάζεται στον προσδιορισμό του όρου  $a$ , επειδή προσδιορίζεται από τον χρήστη και οφείλει να είναι το κατάλληλο για την κάθε

περίπτωση. Ιδανικό  $a$  θεωρείται αυτό που ισούται περίπου με το transition zone για την εύρεση του οριακού στρώματος, ειδικά ο θόρυβος από το σήμα επικρατεί, για μικρές τιμές, ενώ για μεγάλες τιμές χάνεται σημαντική πληροφορία στη βάση και την κορυφή του προφίλ του συντελεστή οπισθοσκέδασης. Η συγκεκριμένη μέθοδος όμως παρουσιάζει και αρκετά μειονεκτήματα, τα οποία οφείλονται στην δυσκολία επιλογής της κατάλληλης τιμής του όρου  $a$ , καθώς τα δεδομένα lidar, λόγω της συνάρτησης αλληλεπικάλυψης δεν μας δίνουν πληροφορίες σε χαμηλά ύψη. Επίσης προβλήματα εμφανίζει όταν συνυπάρχουν ταυτόχρονα πολλά στρώματα αιωρούμενων σωματιδίων ή και νέφη. Για την επίλυση αυτών των προβλημάτων ο Brooks ανέπτυξε μια προσεγγιστική μέθοδο σύμφωνα με την οποία η προσέγγιση ξεκινά με ένα τυχαίο αρκετά μεγάλο όρο  $a$ , ο οποίος αντικαθίσταται κάθε φορά από το πλάτος στο μέσον του μέγιστου  $W_f(b)$  μέχρι το  $a$  να σταθεροποιηθεί. Για τον προσδιορισμό της κορυφής του στρώματος αιωρούμενων σωματιδίων αρκεί να εντοπίσουμε την πρώτη μέγιστη παράγωγο της κατανομής του συντελεστή οπισθοσκέδασης ή ιδανικότερα του διορθωμένου με την απόσταση σήμα lidar ξεκινώντας από το έδαφος. Χρειάζεται όμως να εισάγουμε ένα όριο ώστε να μην λαμβάνουμε υπόψη μας τις ασθενέστερες παραγώγους. Επομένως η εξίσωση γίνεται:

$$\begin{aligned} W_f(a, b) &= \frac{1}{a} \int_{z_b}^{z_t} f(z) h\left(\frac{z-b}{a}\right) dz = \\ &= \frac{1}{a} \int_{z_b}^{b-\frac{a}{2}} f(z) h\left(\frac{z-b}{a}\right) dz + \frac{1}{a} \int_{b-\frac{a}{2}}^b f(z) h\left(\frac{z-b}{a}\right) dz \\ &+ \frac{1}{a} \int_b^{b+\frac{a}{2}} f(z) h\left(\frac{z-b}{a}\right) dz + \frac{1}{a} \int_{b+\frac{a}{2}}^{z_t} f(z) h\left(\frac{z-b}{a}\right) dz \end{aligned} \quad (5.2.7)$$

Γνωρίζοντας ότι η συνάρτηση Haar ισούται με 0 για  $z_b \leq z \leq \frac{b-a}{2}$  και  $\frac{b-a}{2} \leq z \leq z_t$ , 1 για  $\frac{b-a}{2} \leq z \leq b$  και -1 για  $b \leq z \leq \frac{b+a}{2}$ , οι πράξεις συνεχίζονται ως εξής:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{a} \int_{b-\frac{a}{2}}^b f(z) dz - \frac{1}{a} \int_b^{b+\frac{a}{2}} f(z) dz \quad (5.2.8)$$

Για κάθε ξεχωριστό σήμα lidar το  $a$  προσδιορίζεται ως  $a = n\Delta z$ , με  $n = 2, 4, 6, \dots$  και η θέση του translation  $b$  πρέπει να επιλεγεί κατάλληλα ώστε να μην είναι μικρότερο από την κάθετη διακριτική ικανότητα του συστήματος lidar (στην δική μας περίπτωση 30m). Επίσης είναι πολύ σημαντικό να επιλεγεί κατάλληλα το  $a$ . Έχει βρεθεί ότι μια κατάλληλη τιμή είναι  $a = 12\Delta z$ , καθώς προσδιορίζει με καλή ακρίβεια το ζητούμενο στρώμα αιωρούμενων σωματιδίων κάθε φορά. Η συγκεκριμένη τιμή  $a$  προτείνεται για την εύρεση του οριακού στρώματος από τον Baars παρόλα αυτά και στη δική μας περίπτωση που θέλουμε να εντοπίσουμε το πρώτο στρώμα αιωρούμενων σωματιδίων φαίνεται να είναι αποδοτική. Επομένως, εφαρμόζοντας τη διαδικασία της διακριτοποίησης της συνεχούς συνάρτησης η μέθοδος WCT



προσδιορίζεται ως:

$$\begin{aligned} W_f(a, b) &= \frac{1}{n\Delta z} \left( \int_{b-\frac{a}{2}}^b P(z)z^2 \Delta z - \int_b^{b+\frac{a}{2}} P(z)z^2 \Delta z \right) = \\ &= \frac{1}{n} \left( \int_{b-\frac{a}{2}}^b P(z)z^2 - \int_b^{b+\frac{a}{2}} P(z)z^2 \right) \end{aligned} \quad (5.2.9)$$

εξίσωση που ουσιαστικά ισούται με την μέση τιμή «πάνω» και «κάτω» από το ύψος του όρου  $b$ . Επομένως:

$$\begin{aligned} W_f(a, b) &= \frac{1}{n} \left( \int_{b-\frac{a}{2}}^b P(z)z^2 - \int_b^{b+\frac{a}{2}} P(z)z^2 \right) = \\ &= \frac{1}{2} = \left( \overline{P(z)z^2}^{below} - \overline{P(z)z^2}^{above} \right) \\ &= \frac{1}{2} \Delta(\overline{P(z)z^2}) \end{aligned} \quad (5.2.10)$$

Στη συνέχεια για να κάνουμε κανονικοποίηση το διορθωμένο με την απόσταση σήμα, βρίσκουμε την πρώτη μέγιστη τιμή που λαμβάνει στα πρώτα 1000 m, η οποία συνήθως ταυτίζεται και με την μέγιστη τιμή όλης της κατακόρυφης κατανομής μιας και αυτή τις περισσότερες φορές εντοπίζεται εντός του οριακού στρώματος. Έτσι με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζουμε την αποτελεσματικότητα της μεθόδου ανεξάρτητα από το υπόβαθρο τις ημέρες των μετρήσεων (π.χ. ρυπασμένο περιβάλλον, αφρικανική σκόνη). Το όριο που χρησιμοποιήσαμε στην εύρεση του πρώτου στρώματος σωματιδίων γύρης είναι το  $W_f(a, b)$  να ξεπερνά το 0.05. Δηλαδή, το πρώτο ύψος στο οποίο το  $W_f(a, b)$  ξεπερνά αυτή την τιμή το ορίζουμε ως την κορυφή του στρώματος.

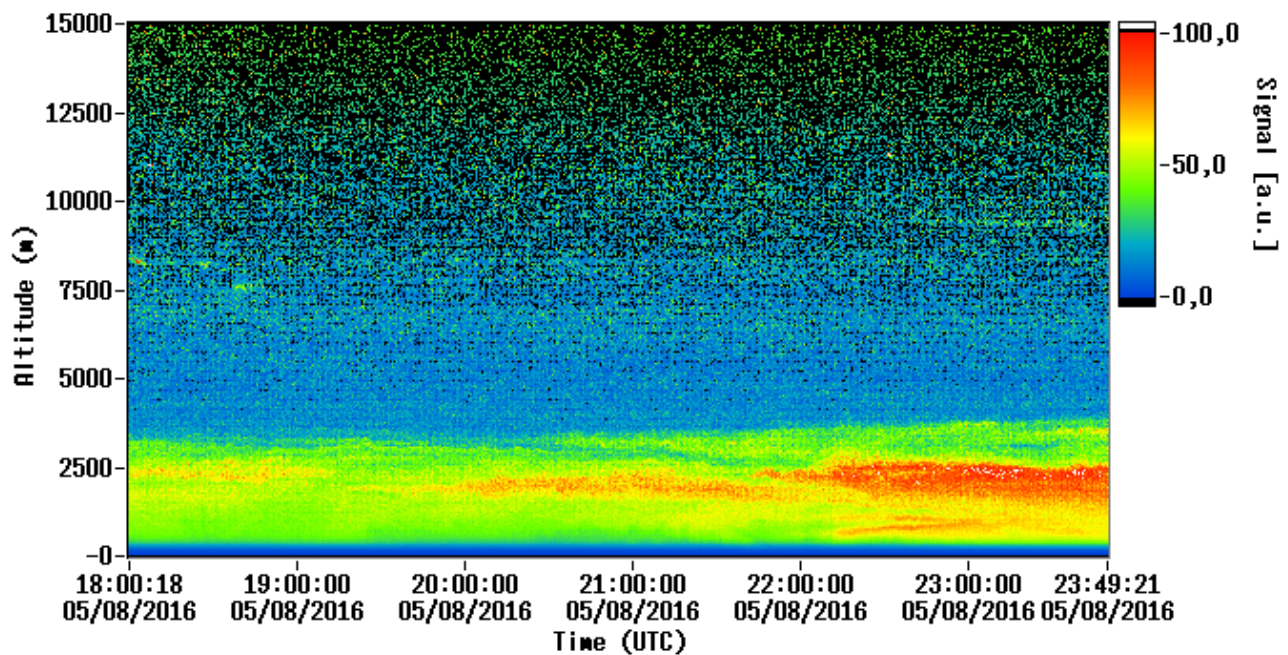
### 5.2.2 Μελέτη περιπτώσεων

Στην συνέχεια εφαρμόζουμε την μέθοδο WCT για την εύρεση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της ατμοσφαιρικής γύρης από τις κατακόρυφες κατανομές των οπτικών ιδιοτήτων σε δύο τυπικές περιπτώσεις της περιόδου 1 και 3 αντίστοιχα. Στην χωροχρονική αποτύπωση του διορθωμένου με την απόσταση σήματος στα 1064 nm (σχήμα 5.2.2) της 08/05/2016 της περιόδου IPP1 παρατηρείται ένα έντονο οπισθοσχεδαζόμενο σήμα που εκτείνεται μέχρι τα 2.5km περίπου. Η ανάλυση των οπτικών ιδιοτήτων την περίοδο 08/05/2016 20:00-22:00 παρουσιάζεται στο σχήμα 5.2.3. Στο ίδιο σχήμα έγινε υπέρθεση της γεωμετρικής πληροφορίας της βάσης και της κορυφής του πρώτου στρώματος όπως προέκυψε από την μέθοδο WCT και αποτυπώνεται στο γράφημα με γκρι γραμμοσκιασμένο. Το στρώμα αυτό παρουσιάζει μέσο λόγο lidar  $50 \pm 7$  sr και συντελεστή αποπόλωσης  $0.07 \pm 0.02$ , τιμές που αποδίδονται στην επίδραση της ατμοσφαιρικής γύρης από σύμηδα. Όμως καθώς αυξάνεται το ύψος, ο συντελεστής αποπόλωσης μειώνεται ακόμα περισσότερο σε αντίθεση με τον λόγο lidar που παρόλο που όσο βρισκόμαστε πιο μακριά από το έδαφος η συγκέντρωση γύρης μειώνεται, αυτό δεν φαίνεται να αποτυπώνεται στο σχήμα.

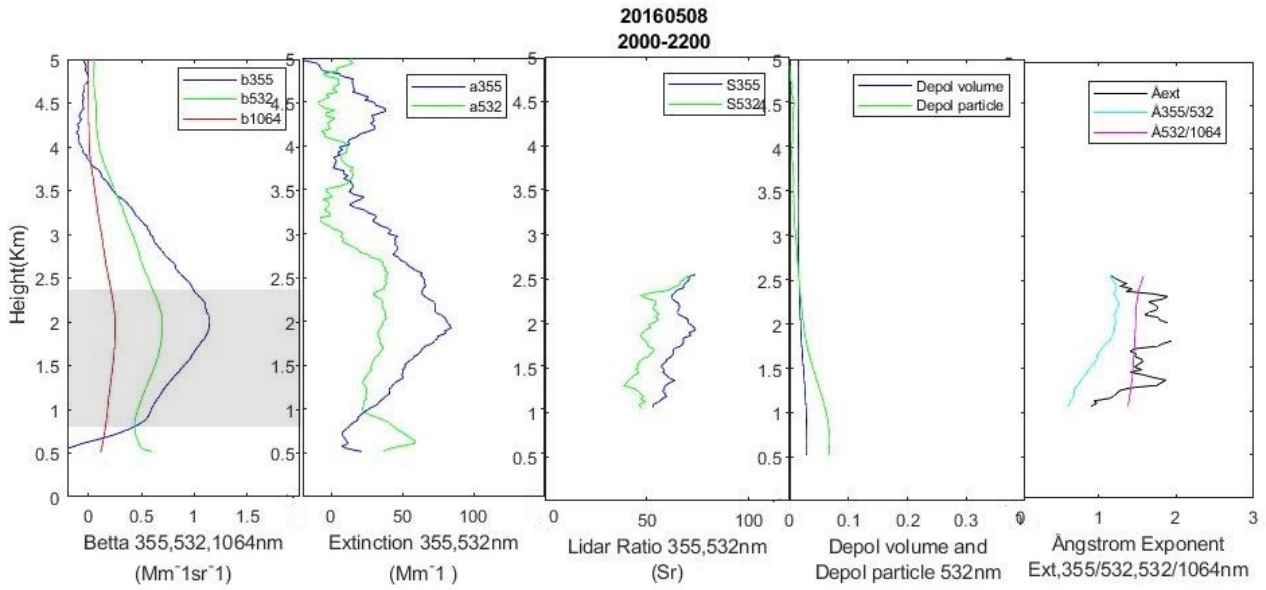
Στα σχήματα 5.2.4 και 5.2.5 αποτυπώνονται η χωροχρονική αποτύπωση του διορθωμένου με την απόσταση σήματος στα 1064 nm και η κατακόρυφη κατανομή των οπτικών ιδιοτήτων αντίστοιχα για την 24/05/2016 19:20-20:00 που ανήκει στην τρίτη περίοδο μελέτης, στην οποία κυριαρχεί η γύρη από πεύκο. Την ημέρα εκείνη το στρώμα που εντοπίσαμε εκτείνεται από 0.5 έως 1.6 km. Ο συντελεστής αποπόλωσης λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές ( $0.13 \pm 0.02$ ) λόγω της απόκλισης από την σφαιρική δομής αυτού του είδους γύρης, ο οποίος και πάλι εμφανίζεται να μειώνεται με το ύψος, ενώ ο λόγος lidar ισούται με  $55 \pm 12sr$ .

Οι τιμές του λόγου lidar και στις δύο των περιπτώσεων δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές. Αντίθετα, ο εκθέτης Ångström παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές και ο συντελεστής αποπόλωσης είναι μικρότερος για την περίπτωση της IPP1 γεγονός που αποδίδεται στα ελαφρώς μικρότερα και πιο σφαιρικά σωματίδια της σύμμηδας. Επιπλέον η γύρη από έλατο είναι πολύ μεγαλύτερη ( $>100\mu m$ ) σε σχέση με την γύρη από σημύδα ( $20 - 30\mu m$ ), γεγονός που αιτιολογεί τις μεγαλύτερες τιμές Ångström στις 08/05/2016.

Range-corrected signal@1064nm, PollyXT\_FHI, Kuopio, Finland

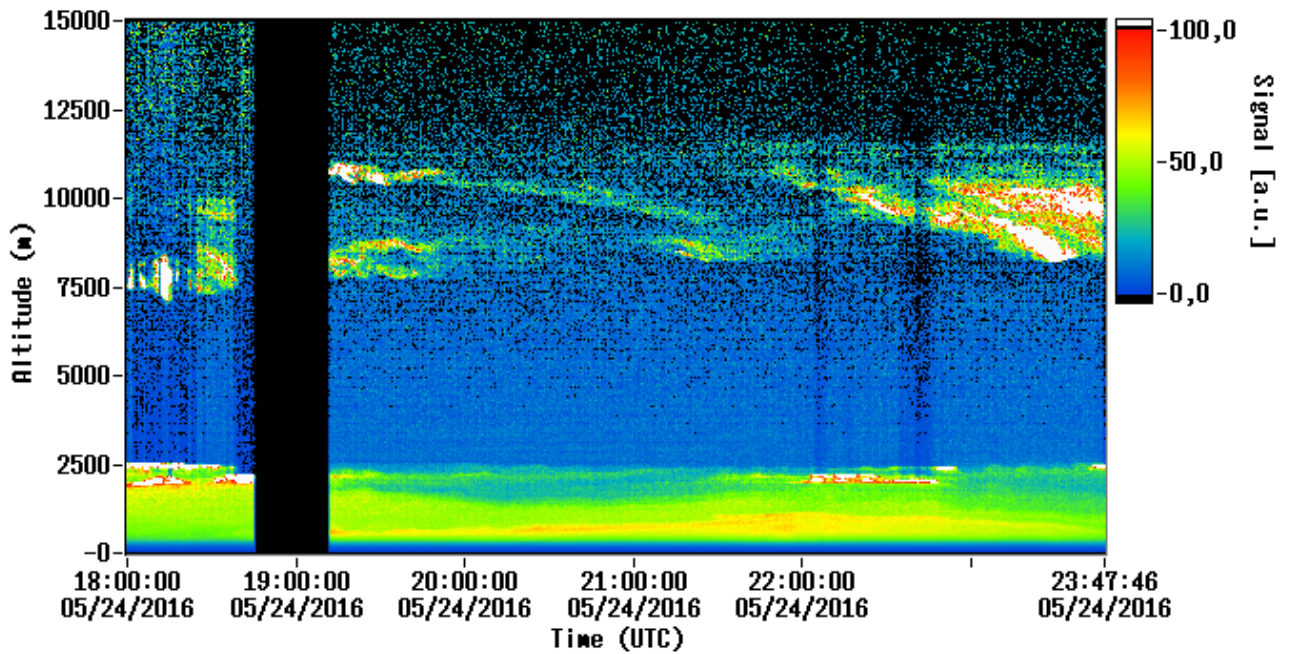


Σχήμα 5.2.2: Color Plot του διορθωμένου με την απόσταση σήμα για 08/05/2016

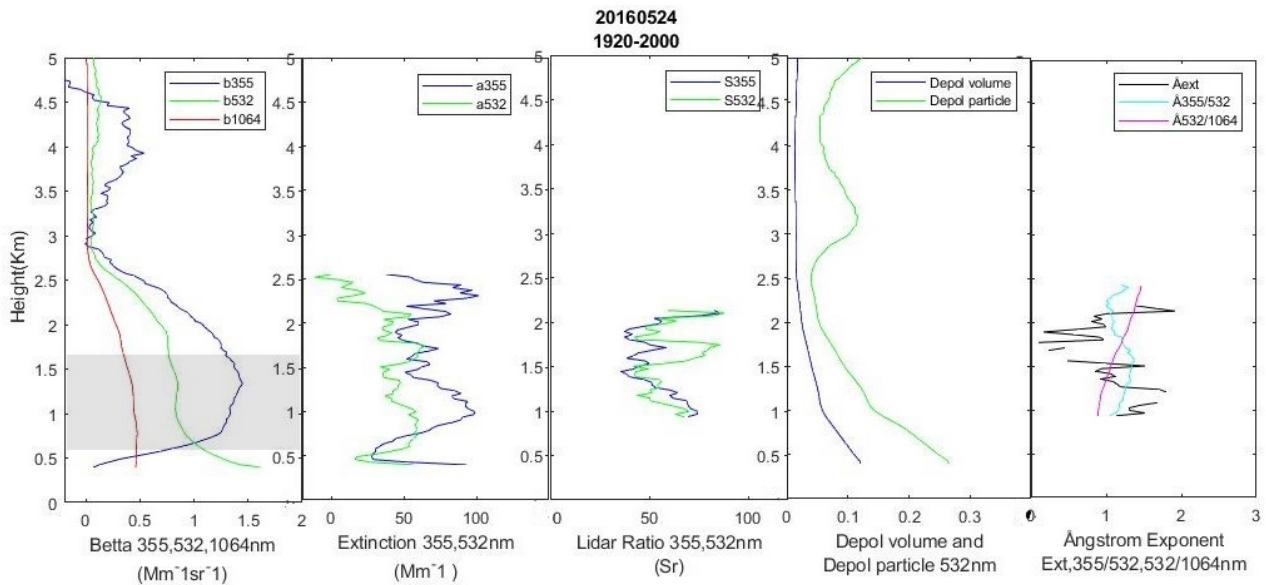


Σχήμα 5.2.3: Κατακόρυφες κατανομές οπτικών ιδιοτήτων αιωρούμενων σωματιδίων 08/05/2020

Range-corrected signal@1064nm, PollyXT\_FHI, Kuopio, Finland



Σχήμα 5.2.4: Color Plot του διορθωμένου με την απόσταση σήμα για 24/05/2016



Σχήμα 5.2.5: Κατακόρυφες κατανομές οπτικών ιδιοτήτων αιωρούμενων σωματιδίων 24/05/2016

### 5.3 Γεωμετρικές και Οπτικές Ιδιότητες Lidar του στρώματος της ατμοσφαιρικής γύρης

Θεωρώντας ότι το χαμηλότερο στρώμα στην ατμόσφαιρα είναι αυτό που περιέχει και την μεγαλύτερη συγκέντρωση σωματιδίων γύρης και χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της WCT όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 5.2.1, προσδιορίσαμε την βάση και την κορυφή των στρωμάτων της ατμόσφαιρας καθώς και τις μέσες τιμές των οπτικών ιδιοτήτων εντός αυτών. Ως βάση του στρώματος επιλέξαμε το ύψος εκείνο, στο οποίο η  $W_f(a, b)$  είναι μικρότερη από ένα όριο που ορίσαμε 0.05. Για την θέση της κορυφής του στρώματος επιλέξαμε το ύψος εκείνο, στο οποίο η  $W_f(a, b)$  ξεπερνά το 0.05. Και στις δύο περιπτώσεις λάβαμε υπόψη μας το πρόβλημα του overlap για κάτω από 450m.

Σε όλα τα σχήματα με πράσινο έχουν απεικονιστεί τα δεδομένα της πρώτης περιόδου IPP-1, με κίτρινο της δεύτερης περιόδου IPP-2 και με μπλε τα δεδομένα της τρίτης περιόδου IPP-3. Με την τέταρτη περίοδο IPP-4 δεν θα ασχοληθούμε στην παρούσα εργασία, καθώς δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα AERONET για να μπορέσει στη συνέχεια να γίνει η κατάλληλη σύγκριση των δεδομένων. Όπως παρατηρούμε οι κορυφές των στρωμάτων δεν ξεπερνούν τα 3 Km. Στον παρακάτω Πίνακα 5.3.1 παρουσιάζονται και οι μέσες τιμές των μεγεθών μαζί με την διακύμανσή τους.

Πίνακας 5.3.1: Μέσες τιμές οπτικών ιδιοτήτων του στρώματος για κάθε χρονική περίοδο

	BOTTOM	TOP	LR355	LR532	Aext	A355/532	A532/1064	VDR	PDR
IPP1	$0.63 \pm 0.1$	$1.99 \pm 0.8$	$38 \pm 17$	$75 \pm 29$	$1.46 \pm 0.3$	$1.15 \pm 0.4$	$1.24 \pm 0.2$	$0.027 \pm 0.004$	$0.077 \pm 0.034$
IPP2	$0.64 \pm 0.1$	$2.01 \pm 0.2$	$67 \pm 15$	$100 \pm 33$	$0.38 \pm 0.3$	$0.91 \pm 0.4$	$0.89 \pm 0.2$	$0.053 \pm 0.012$	$0.188 \pm 0.037$
IPP3	$0.63 \pm 0.1$	$1.72 \pm 0.4$	$53 \pm 15$	$62 \pm 22$	$1.12 \pm 0.8$	$1.08 \pm 0.3$	$0.96 \pm 0.2$	$0.039 \pm 0.013$	$0.121 \pm 0.046$

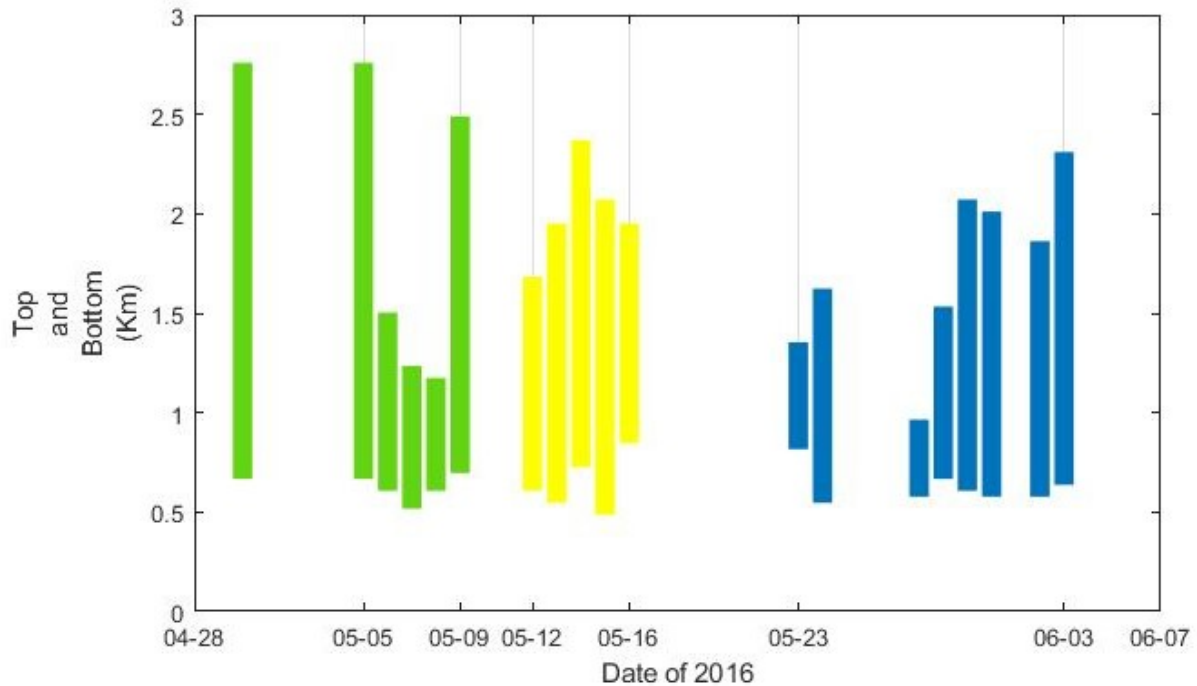
Πίνακας 5.3.2: Αριθμός δεδομένων για κάθε χρονική περίοδο

Number of Raman Cases	
IPP1	5
IPP2	5
IPP3	8

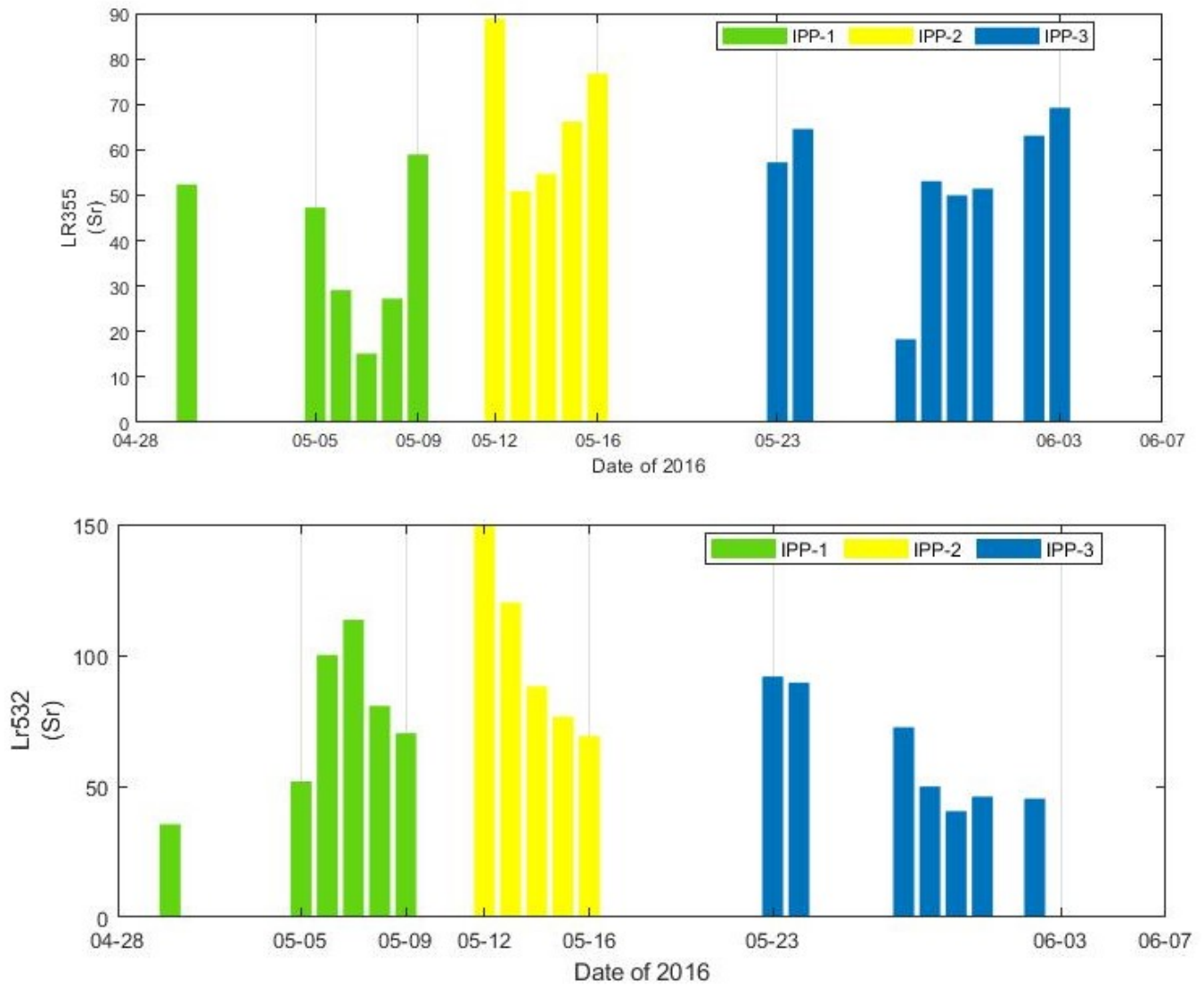
Όπως είναι εμφανές και από το σχήμα 5.1.2, κατά τη διάρκεια την πρώτης περιόδου εμφανίστηκαν μεγάλες τιμές συγκεντρώσεων γύρης, οι οποίες έφταναν τα  $3400 \frac{\text{grains}}{\text{m}^3}$ , με την συντριπτική πλειοψηφία αυτών (>90%) να ανήκουν στο είδος Birch. Παρατηρώντας τις μέσες τιμές από τις οπτικές ιδιότητες των σωματιδίων μέσα σε κάθε στρώμα μπορούμε να βγάλουμε κάποια συμπεράσματα. Πιο συγκεκριμένα, για την πρώτη περίοδο η μέση τιμή του λόγου lidar υπολογίστηκε να είναι  $38 \pm 17$  και  $75 \pm 29$  sr στα 355 και 532nm αντίστοιχα. Ο συντελεστής αποπόλωσης υπολογίστηκε να είναι  $0.077 \pm 0.034$ , που είναι αναμενόμενο αφού η γύρη του γένους Betula είναι σχεδόν σφαιρική (Σχήμα 5.1.3).

Κατά τη διάρκεια της δεύτερης περιόδου εκτός από τη γύρη της σημύδας που ήταν και πάλι κυρίαρχη εμφανίστηκε ένα μικρό ποσοστό συγκέντρωσης και σε γύρη από έλατο. Όπως παρατηρούμε και από το σχήμα 5.1.3 η γύρη του γένους Picea είναι μη σφαιρική, επομένως η μέση τιμή του σωματιδιακού συντελεστή αποπόλωσης αναμένεται να είναι μεγαλύτερη. Πράγματι, οι τιμές που μετρήθηκαν είναι  $0.18 \pm 0.03$ . Επιπλέον αυξήθηκαν και οι τιμές του λόγου lidar τόσο στα 355nm όσο και στα 532nm με τιμές  $67 \pm 15$ sr και  $100 \pm 33$ sr αντίστοιχα.

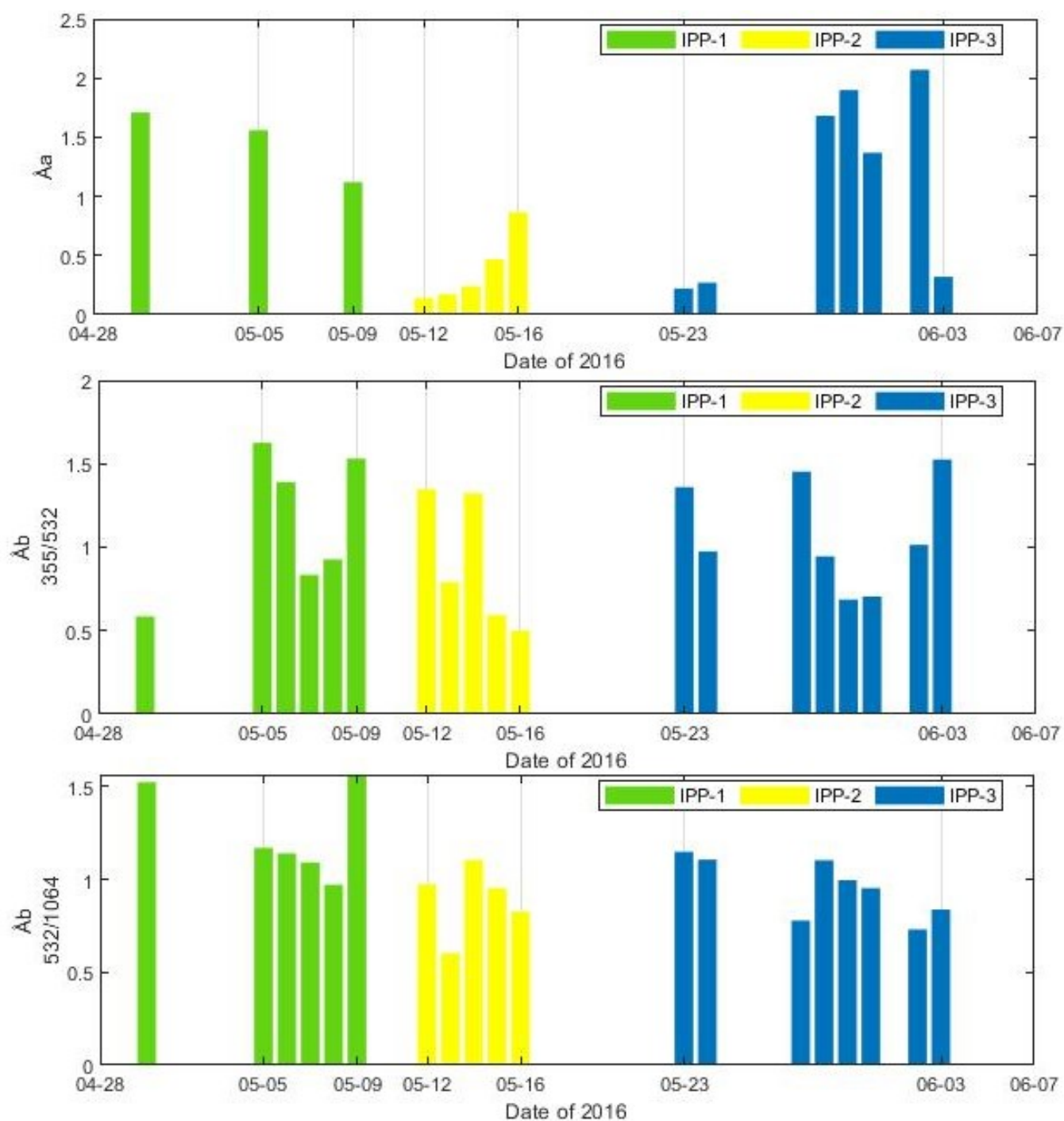
Τέλος, κατά τη διάρκεια της τρίτης περιόδου κυριαρχεί η γύρη από πεύκο με μεγάλες συγκεντρώσεις ( $2900 \frac{grains}{m^3}$ ). Και αυτό το είδος γύρης είναι μη σφαιρικό επομένως ο συντελεστής αποπόλωσης παραμένει μεγάλος ( $0.18 \pm 0.03$ ), παρόλα αυτά ο λόγος lidar είναι πιο μικρός, υποδεικνύοντας σωματίδια με λιγότερη απορροφητικότητα τόσο στα 355nm ( $53 \pm 15sr$ ) όσο και στα 532nm ( $62 \pm 22sr$ ).



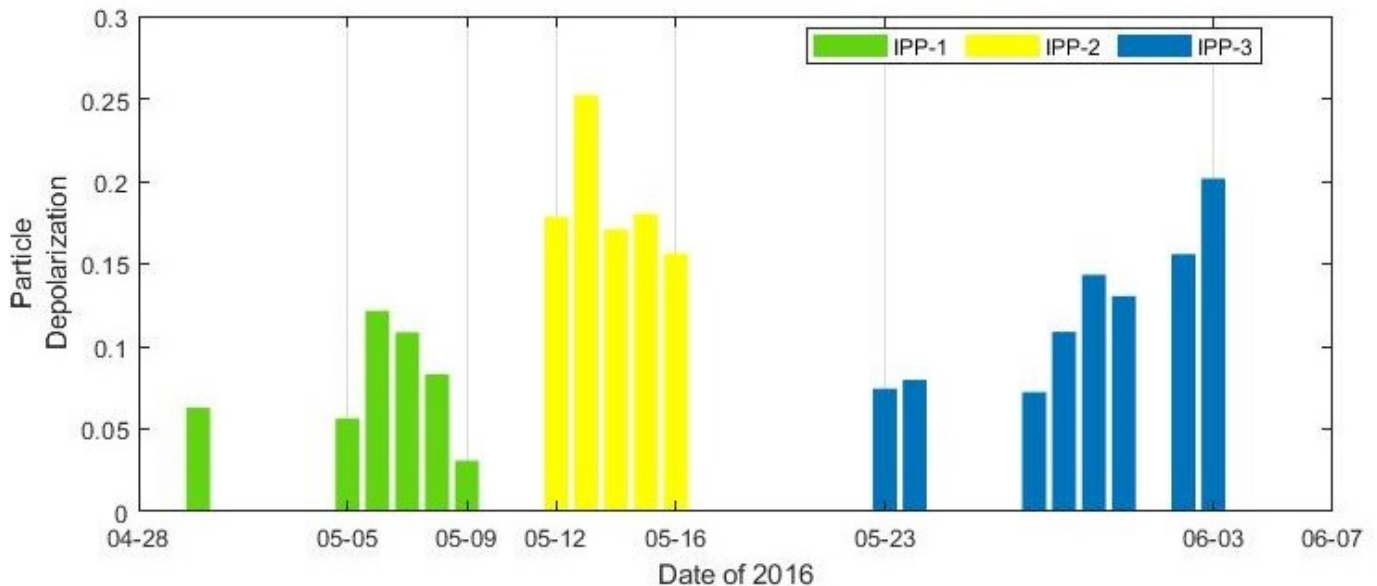
Σχήμα 5.3.1: Κορυφή και Βάση στρωμάτων. Με κάθετες γραμμές ορίζονται η αρχή και το τέλος κάθε περιόδου



Σχήμα 5.3.2: Μέσες τιμές λόγου Lidar 355nm και 532nm

Σχήμα 5.3.3: Μέσες τιμές A<sub>ext</sub>, A<sub>355/532</sub> και A<sub>532/1064</sub>





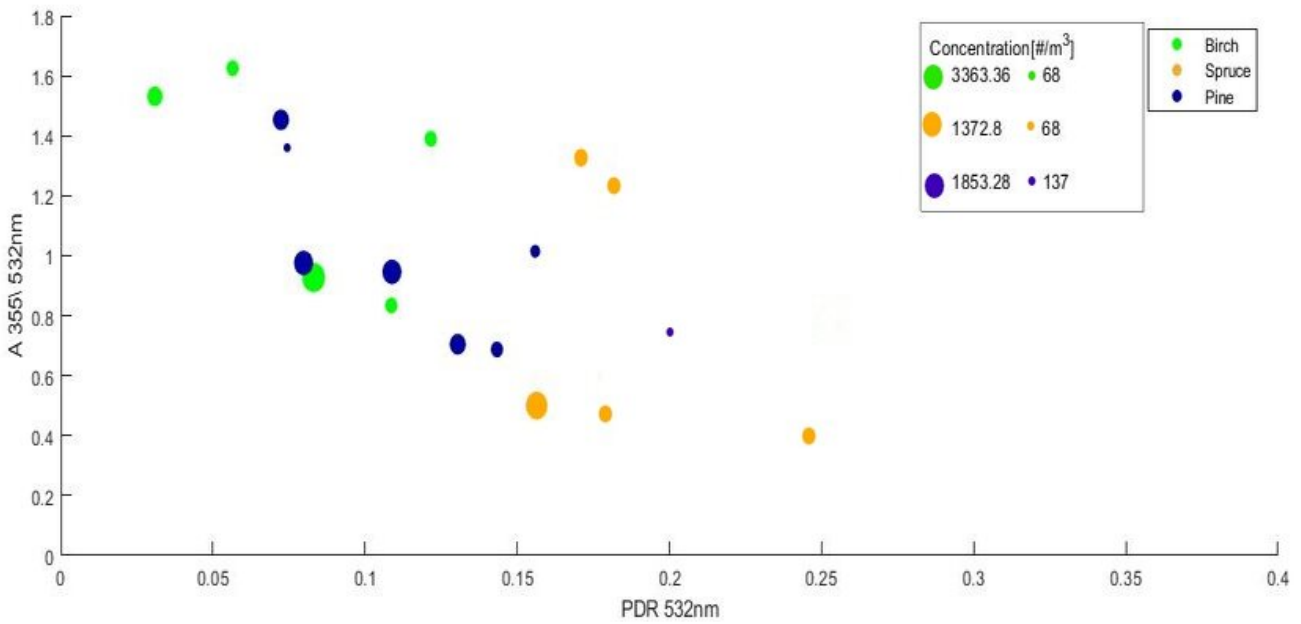
Σχήμα 5.3.4: Μέσες τιμές Volume και σωματιδιακού συντελεστή αποπόλωσης

Στην συνέχεια ερευνούμε την πιθανή συσχέτιση μεταξύ των οπτικών ιδιοτήτων τους για κάθε είδος ατμοσφαιρικής γύρης ώστε να μπορέσουμε να την χαρακτηρίσουμε για όλες τις μετρήσεις Raman που διαθέταμε. Στα σχήματα 5.3.6 και 5.3.5 αποτυπώνεται ο λόγος lidar 532nm και ο εκθέτης Ångström 355/532nm με τον σωματιδιακό συντελεστή αποπόλωσης 532nm για τις διαφορετικές περιόδους έντονης εμφάνισης γύρης που έχουμε επιλέξει. Με πράσινο έχει αποτυπωθεί η γύρη σημύδας κατά την IPP1 περίοδο, με πορτοκαλί η γύρη από σημύδας και ελάτου κατά την IPP2 και με μπλε η γύρη πεύκου κατά την IPP3. Το μέγεθος των σημείων είναι αντιπροσωπευτικό της συγκέντρωσης κάθε είδους γύρης κάθε φορά. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.3.6 ο λόγος lidar παρουσιάζει μεγάλο εύρος τιμών κατά τη διάρκεια όλων των χρονικών περιόδων σε αντίθεση με τον συντελεστή αποπόλωσης, ο οποίος για κάθε χρονική περίοδο παρουσιάζει μικρότερη μεταβλητότητα. Επομένως, για να μπορέσουμε να διακρίνουμε τα διάφορα είδη της γύρης πρέπει να βρούμε ένα μέγεθος που να λαμβάνει συγκεκριμένο εύρος τιμών για κάθε είδος γύρης ξεχωριστά. Παρόλα αυτά πρέπει να λάβουμε υπόψη μας ότι είναι δύσκολο να είμαστε σίγουροι ότι τα αποτελέσματά μας είναι ακριβή, διότι πάντα συνυπάρχουν ταυτόχρονα πολλά είδη γύρης μαζί με άλλα είδη αιωρούμενων σωματιδίων όπως αυτά από καύση βιομάζας, ανθρωπογενούς δραστηριότητας, σκόνης κλπ. Επιπλέον, αναφορικά με τον λόγο lidar παρόμοιες τιμές στο εύρος που αποτυπώνεται στα σχήματά μας παρουσιάζουν και άλλα είδη αιωρούμενων σωματιδίων, επομένως δεν μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι ο λόγος lidar είναι ο πλέον κατάλληλος για τον χαρακτηρισμό της γύρης.

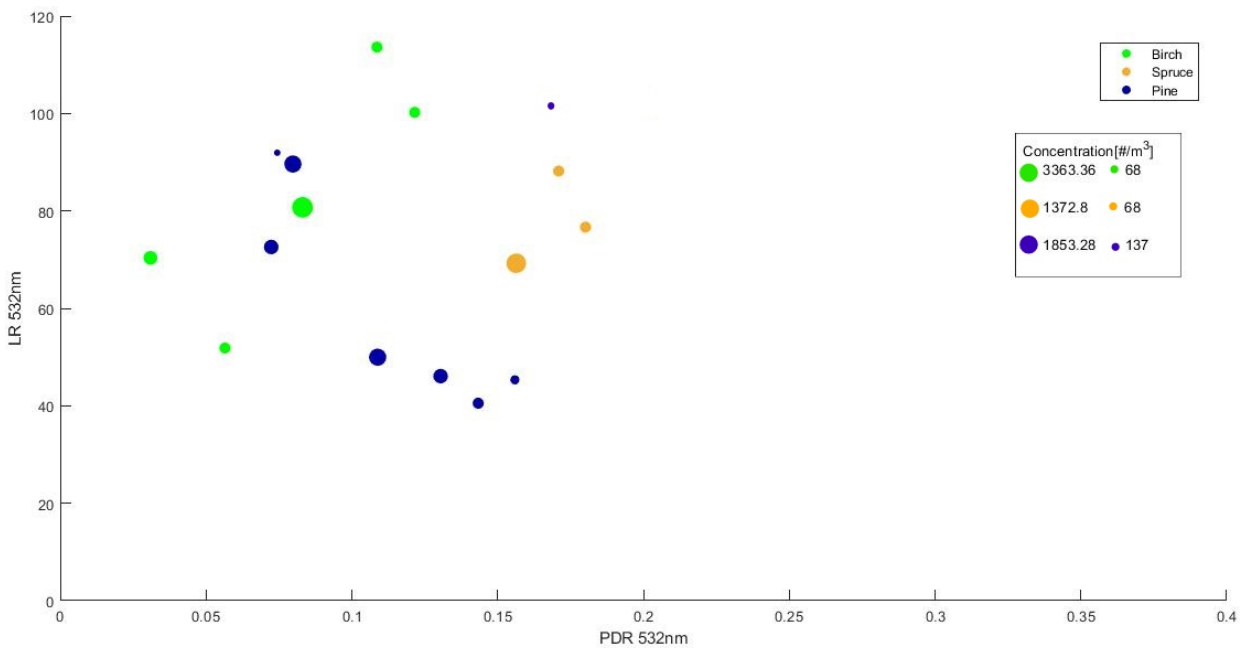
Στον Πίνακα 5.3.1 εμφανίζονται οι μέσες τιμές των οπτικών ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων για κάθε χρονική περίοδο μέσα στα στρώματα. Θεωρώντας ότι η περιοχή μελέτης δεν έχει κάποια έντονη επιβάρυνση από άλλου είδους αιωρούμενα σωματίδια και συγκρίνοντας τις τρεις περιόδους, παρατηρούμε

ότι ο μεγαλύτερος συντελεστής αποπόλωσης εμφανίζεται την δεύτερη χρονική περίοδο, στην οποία έχουμε συνδυασμό ειδών γύρης, γεγονός που υποδηλώνει την ύπαρξη μη σφαιρικών σωματιδίων γύρης, αν λάβουμε υπόψη μας ότι η περιοχή εκείνη δεν επηρεάζεται από άλλα αιωρούμενα σωματίδια που αποπολώνουν έντονα, όπως η σκόνη. Επίσης, βλέποντας τις τιμές των λόγων lidar στα 355nm και 532nm, γίνεται εμφανές το μεγάλο εύρος που παρουσιάζουν και πως και πάλι μεγαλύτερες τιμές εμφανίζονται την δεύτερη χρονική περίοδο. Παρόλα αυτά ο σωματιδιακός συντελεστής αποπόλωσης στα 532nm εμφανίζεται αρκετά μικρότερος συγκριτικά με άλλες μελέτες [Sassen et.al.,2008], οι οποίες είχαν υπολογίσει τιμές του συντελεστή αποπόλωσης γύρω στο 0.3 για την γύρη απο σημύδα. Όπως θα αναφέρουμε και στη συνέχεια ο μόνος τρόπος για να αλλάξει το σχήμα ενός είδους γύρης και συνεπώς να μπορέσει να εξηγηθεί αυτή η απόκλιση μεταξύ των τιμών του συντελεστή αποπόλωσης που υπολογίσαμε και αυτού που έχει υπολογιστεί από άλλες έρευνες είναι λόγω ξηρότητας της ατμόσφαιρας. Οι κόκκοι της γύρης σε περιόδους χαμηλής υγρασίας προκειμένου να διατηρηθούν τα επίπεδα υγρασίας τους σταθερά μπορούν να αναδιπλωθούν, να χάσουν τη σφαιρική τους δομή και κατ' επέκταση να δώσουν μεγαλύτερες τιμές αποπόλωσης.

Στο σχήμα 5.3.5 στο οποίο απεικονίζεται η συσχέτιση μεταξύ του Ångström 355/532nm με τον σωματιδιακό συντελεστή αποπόλωσης στα 532nm για τις Raman βραδινές μετρήσεις, βλέπουμε ότι οι τρεις περίοδοι μελέτης εμφανίζουν μικρότερες τιμές Ångström για μεγαλύτερες τιμές σωματιδιακού συντελεστή αποπόλωσης. Επομένως όσο πιο μικρό εκθέτη Ångström έχουμε, δηλαδή όσο πιο μικρά σωματίδια παρουσιάζονται, δηλαδή όσο πιο μεγάλος είναι ο σωματιδιακός συντελεστής αποπόλωσης, τόσο μεγαλύτερο ρόλο παίζουν τα μη σφαιρικά σωματίδια. Παρατηρώντας τις μέσες τιμές του εκθέτη Ångström για τις τρεις περιόδους, η πρώτη περίοδος στην οποία κυριαρχεί η γύρη της σημύδας που είναι πιο μικρή σε μέγεθος δίνει μεγαλύτερες τιμές του εκθέτη Ångström ( $1.15 \pm 0.4$ ). Κατά τη διάρκεια της δεύτερης περιόδου παρόλο τη μικρότερη συγκέντρωση γύρης από έλατο σε σχέση με τη γύρη απο σημύδα, το μεγάλο μέγεθος των κόκκων γύρης από έλατο καταφέρνει να μειώσει τις τιμές του εκθέτη Ångström ( $0.91 \pm 0.4$ ). Κατά την τρίτη περίοδο οι τιμές του εκθέτη Ångström μειώνονται συγκριτικά με την πρώτη περίοδο  $1.08 \pm 0.3$ , επομένως αναφερόμαστε σε σωματίδια γύρης από πεύκο μεγαλύτερου μεγέθους από αυτά του ελάτου και μικρότερου μεγέθους από αυτά της σημύδας. Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι ο εκθέτης Ångström δεν μπορεί να βοηθήσει στην χαρακτηρισμό της γύρης όσο ο συντελεστής αποπόλωσης, καθώς μπορεί εύκολα να επηρεαστεί από άλλων ειδών αιωρούμενα σωματίδια που συνυπάρχουν στην περιοχή με παρόμοιες τιμές.



Σχήμα 5.3.5: Συσχέτιση εκθέτη Ångström 355/532nm και σωματιδιακού συντελεστή αποπόλωσης 532nm

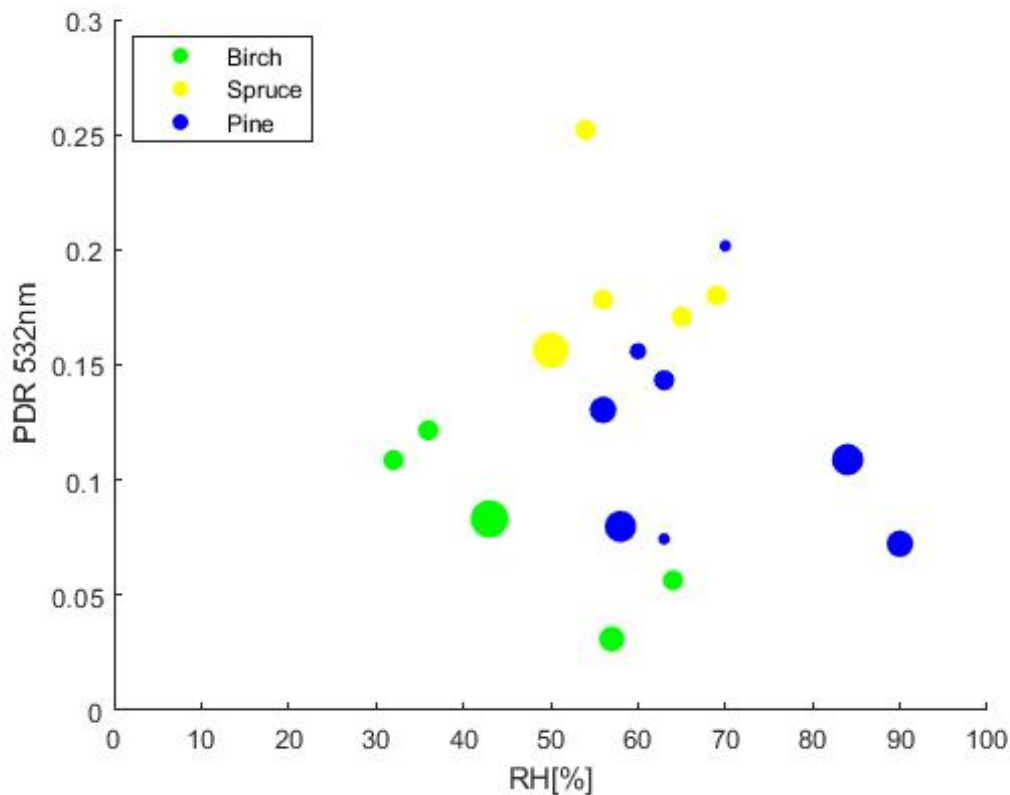


Σχήμα 5.3.6: Συσχέτιση λόγου Lidar 532nm και σωματιδιακού συντελεστή αποπόλωσης 532nm

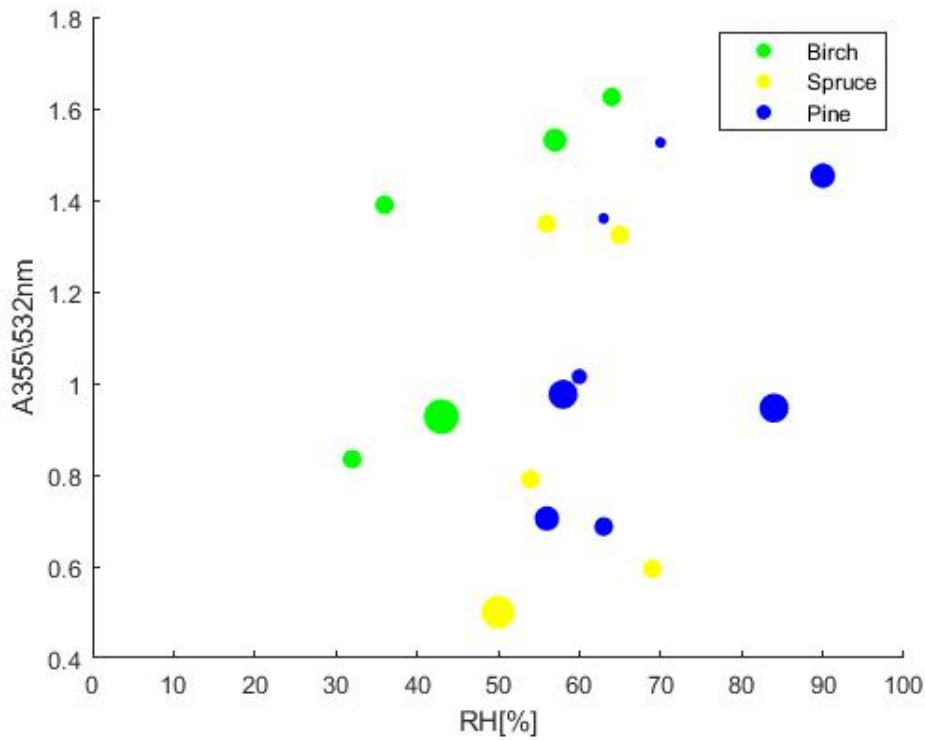
Τέλος, θα μελετήσουμε τον τρόπο με τον οποίο η υγρασία μπορεί να επηρεάσει το μέγεθος και το σχήμα των αιωρούμενων σωματιδίων της γύρης. Όπως αναφέραμε και στην θεωρία τα κύτταρα μέσω της διαδικασίας της όσμωσης προσλαμβάνουν υγρασία από το περιβάλλον τους, μέχρι να φτάσουν στα όρια η χωρητικότητάς τους και να «σπάσουν». Αυτή η διαδικασία έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του αριθμού μικρότερων κόκκων γύρης, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει και τις οπτικές ιδιότητες τους.

Επιπλέον, κατά τη διάρκεια του πολλαπλασιασμού των φυτών, οι κόκκοι της γύρης υφίστανται μεγάλες αλλαγές στα ποσοστά υγρασίας που περιέχουν, γεγονός που καθιστά αναγκαία την μελέτη της σύνδεσης της υγρασίας με την ύπαρξη γύρης στην ατμόσφαιρα. Αναλυτικότερα, οι κόκκοι της γύρης τείνουν να απορροφούν υγρασία αυξάνοντας το μέγεθός τους κατά τη διάρκεια της παραγωγής τους, ενώ στη συνέχεια αφυδατώνονται. Οι ώριμοι κόκκοι γύρης που έχουν αφυδατωθεί μπορούν να επιβιώσουν σε περιόδους χαμηλής σχετικής υγρασίας πιο εύκολα [27]. Για να μπορέσουν να επιβιώσουν σε καταστάσεις ξηρασίας από την στιγμή που οι κόκκοι απελευθερώνονται από τον ανθήρα, το κυτταρικό τοίχωμα των κόκκων "αναδιπλώνεται", προκειμένου να διατηρήσει έστω και ένα μικρό ποσοστό υγρασίας. Ο μηχανισμός αυτός ονομάζεται μηχανισμός συρρίκνωσης (harmomegathic mechanism) [28]. Είναι λοιπόν προφανές ότι τέτοιες διαδικασίες, οι οποίες μεταβάλλουν το μέγεθος των κόκκων της γύρης, μπορούν να επηρεάσουν τόσο τον συντελεστή αποπόλωσης όσο και τον εκθέτη Ångström, που σχετίζονται με το σχήμα και μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων αντίστοιχα.

Για να ερευνήσουμε την αλληλεπίδραση της υγρασίας με τον σωματιδιακό συντελεστή αποπόλωσης και τον εκθέτη Ångström κατασκευάσαμε τα σχήματα 5.3.7 και 5.3.8.



Σχήμα 5.3.7: Συσχέτιση σωματιδιακού συντελεστή αποπόλωσης 532nm και σχετικής υγρασίας [%]

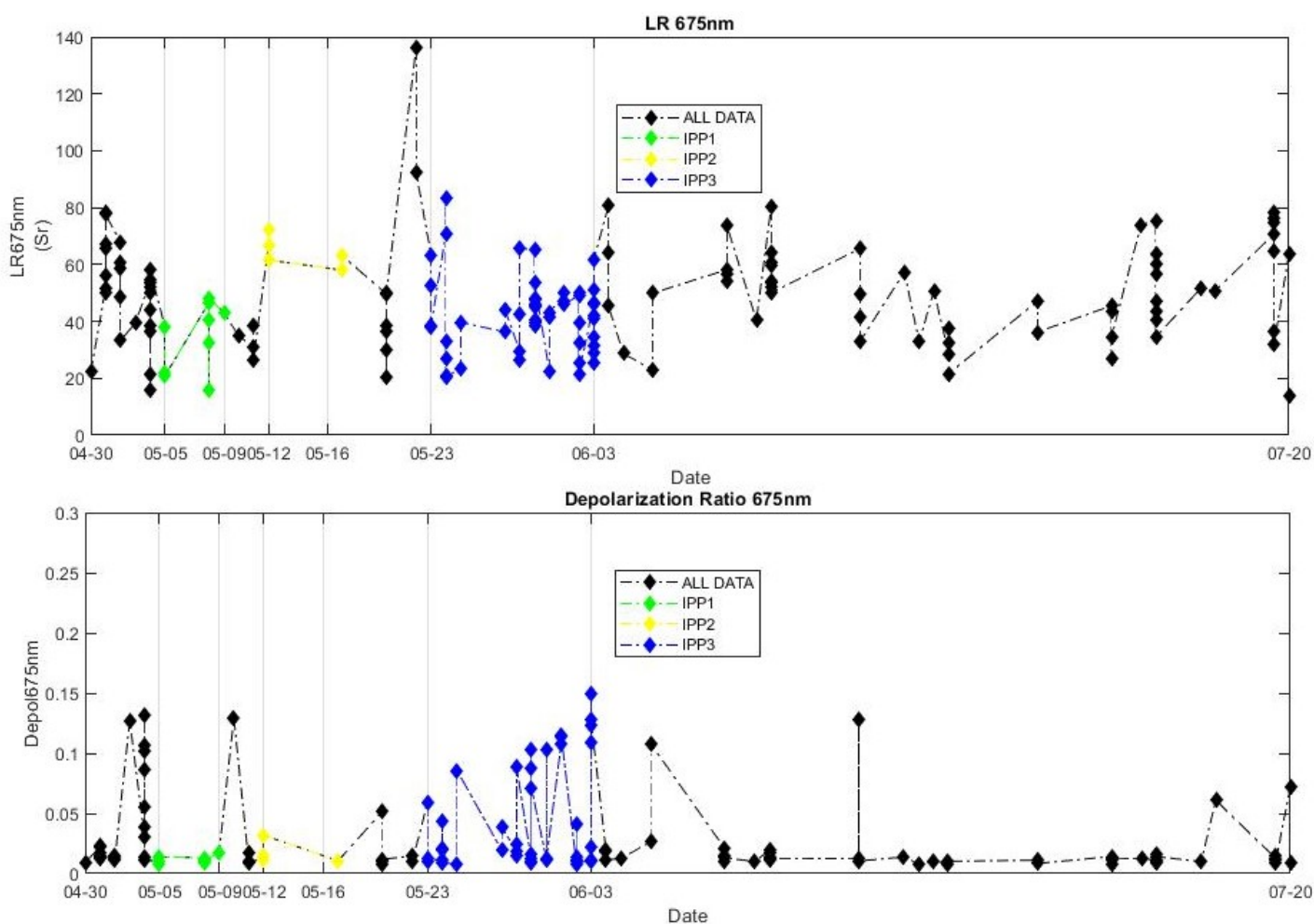


Σχήμα 5.3.8: Συσχέτιση εκθέτη Ångström 355/532nm και σχετικής υγρασίας [%]

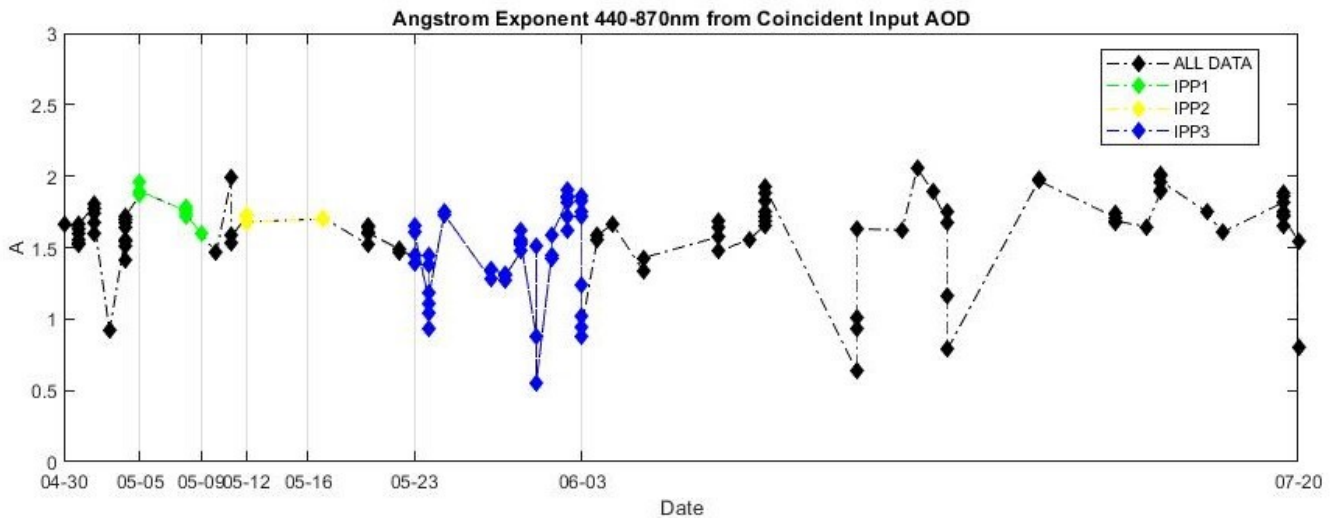
Παρατηρούμε ότι κατά τη διάρκεια και των 3 περιόδων η σχετική υγρασία κυμαίνεται μεταξύ 30-90%. Από τα σχήματα δεν εμφανίζεται κάποια συσχέτιση μεταξύ της υγρασίας, του σωματιδιακού συντελεστή αποπόλωσης 532 και του Ångström 355/532nm. Επομένως μπορούμε να εξάγουμε το συμπέρασμα ότι τα δεδομένα μας δεν σχετίζονται με κάποιον τρόπο με την ποσότητα της υγρασίας του περιβάλλοντος, σε ότι αφορά τις Raman βραδυνές μετρήσεις. Βέβαια πρέπει να λάβουμε υπόψη μας ότι η σχετική υγρασία αναφέρεται στο περιβάλλον γύρω από την περιοχή μελέτης και όχι στο περιβάλλον γύρω από το φυτό στο οποίο παράγεται η γύρη, για αυτό να μην εντοπίζουμε κάποια συσχέτιση.

## 5.4 Οπτικές Ιδιότητες Φωτόμετρου Cimel

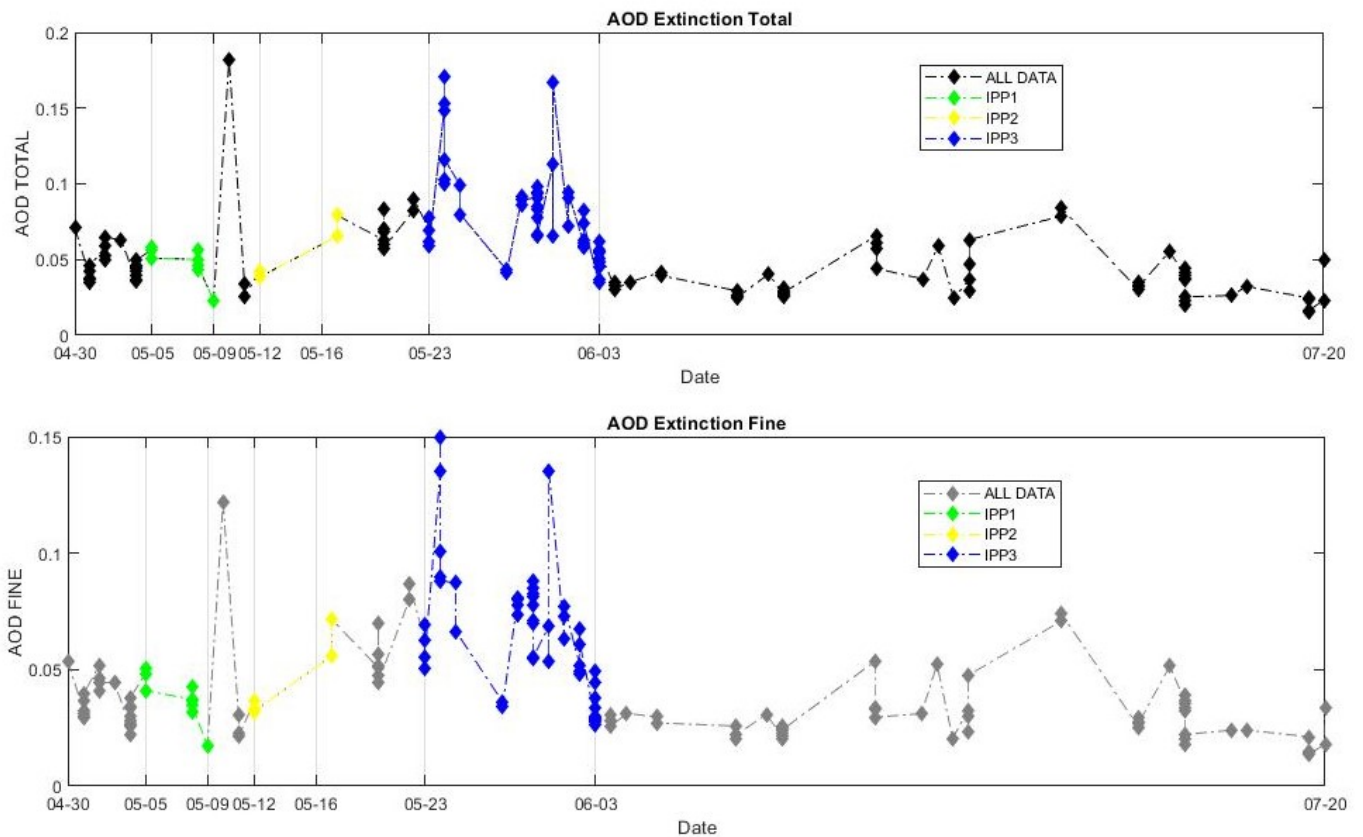
Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε μελέτη των οπτικών και μικροφυσικών ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων για την ίδια χρονική περίοδο με το lidar χρησιμοποιώντας δεδομένα από το φωτόμετρο Cimel του δικτύου AERONET. Χωρίσαμε και πάλι τις περιόδους σε 3 IPP's. Οι χρονοσειρές του λόγου Lidar, του δείκτη αποπόλωσης, του εκθέτη Ångström 440/870nm, του οπτικού βάρους λόγω εξασθένησης και απορρόφησης, του δείκτη διάθλασης, του συντελεστή μεμονωμένης σκέδασης, του μεγέθους Total (0.05 $\mu\text{m}$ -15 $\mu\text{m}$ ), Fine (0.05 $\mu\text{m}$ -0.6 $\mu\text{m}$ ) και Coarse (0.6 $\mu\text{m}$ -15 $\mu\text{m}$ ) σωματιδίων, της ενεργού ακτίνας και του Volume median Radius αποτυπώνονται στα παρακάτω σχήματα. Με τον όρο Volume Median Radius αναφερόμαστε στην τιμή της ακτίνας των αιωρούμενων σωματιδίων, η οποία χωρίζει στη μέση τον όγκο των αιωρούμενων σωματιδίων με μικρότερη και μεγαλύτερη ακτίνα από αυτή την τιμή. Η διαθεσιμότητα των δεδομένων της γυροπαγίδας Hisrt εκτείνεται από 29/4/2016 μέχρι 29/8/2016. Παρόλα αυτά, για την περιοχή του Κιουριο η διαθεσιμότητα των δεδομένων περιορίζεται από 29/4/2016 μέχρι 20/7/2016. Στα σχήματα με πράσινο, κίτρινο και μπλε έχουν επισημανθεί αντίστοιχα οι IPP – 1, IPP – 2 και IPP – 3.



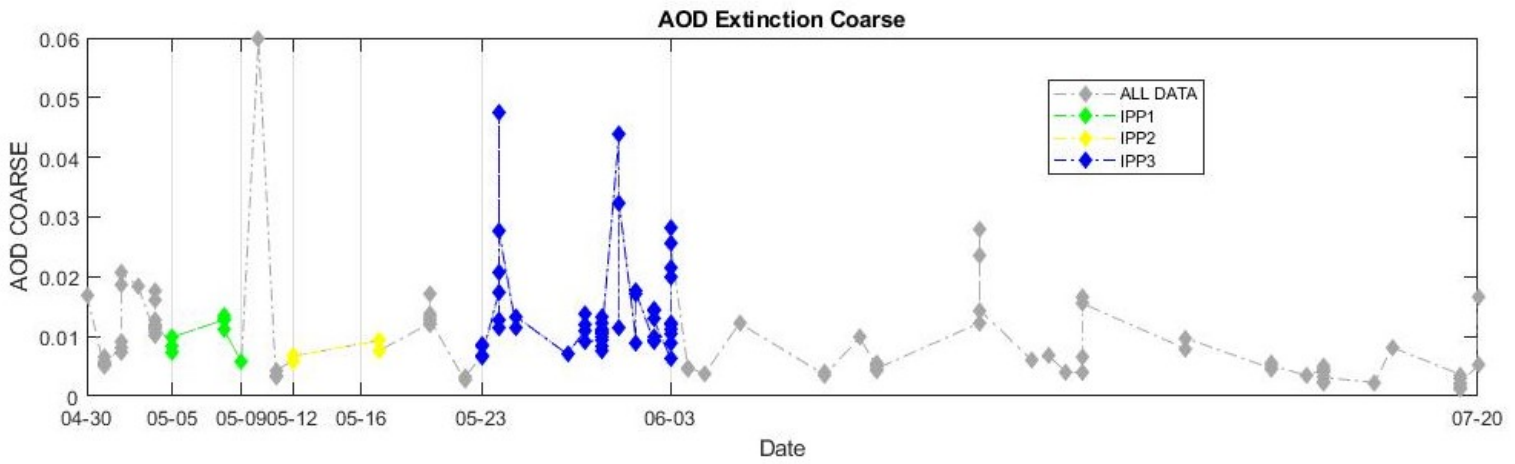
Σχήμα 5.4.1: Χρονοσειρά λόγου lidar και συντελεστή αποπόλωσης 675nm



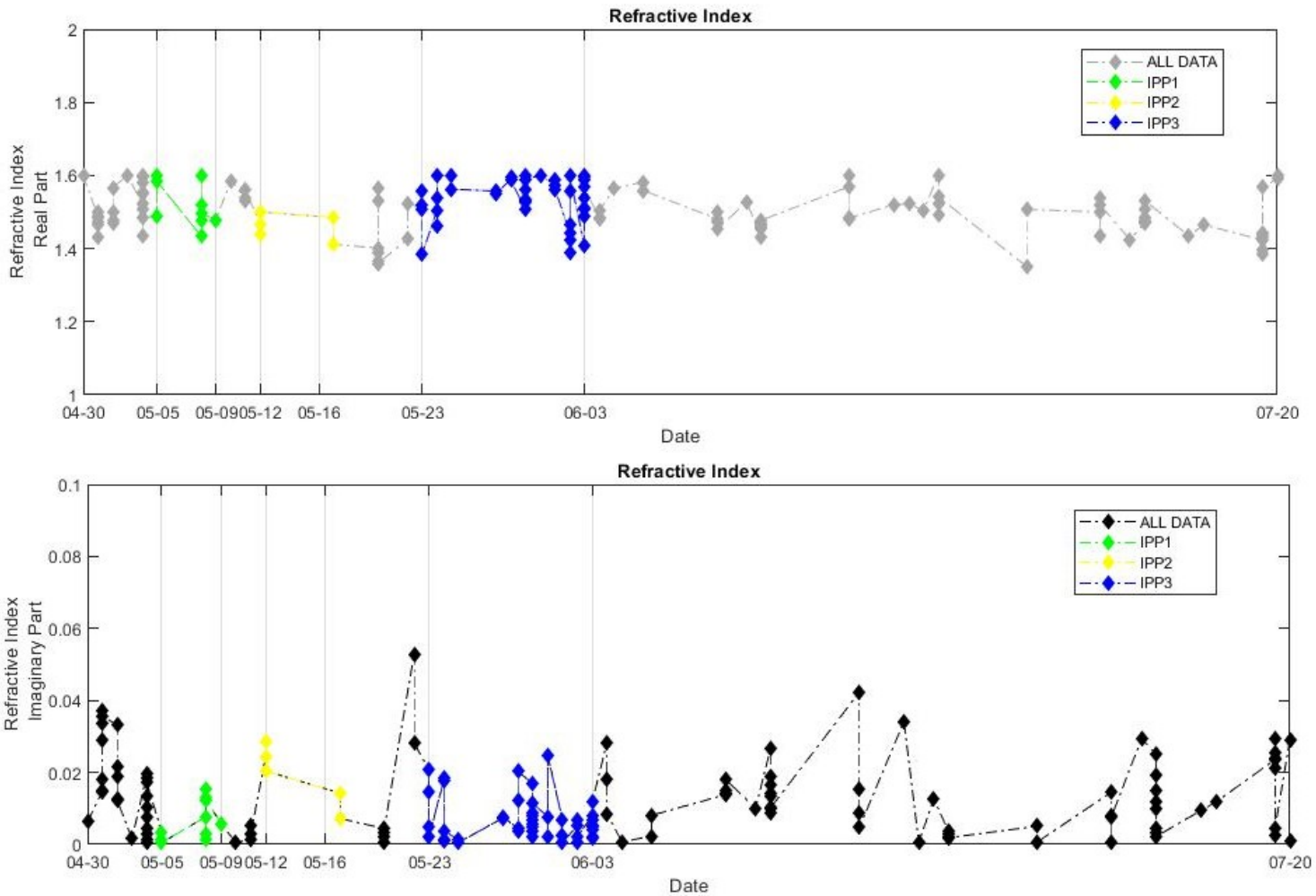
Σχήμα 5.4.2: Χρονοσειρά εκθέτη Ångström 440/870nm και οπτικού βάθους λόγω εξασθένισης. (Με μαύρο απεικονίζονται τα δεδομένα Total, με γκρι σκούρο τα δεδομένα Fine και με γκρι ανοιχτό τα δεδομένα Coarse)



Σχήμα 5.4.3: Χρονοσειρά οπτικού βάθους λόγω εξασθένισης Total και Fine

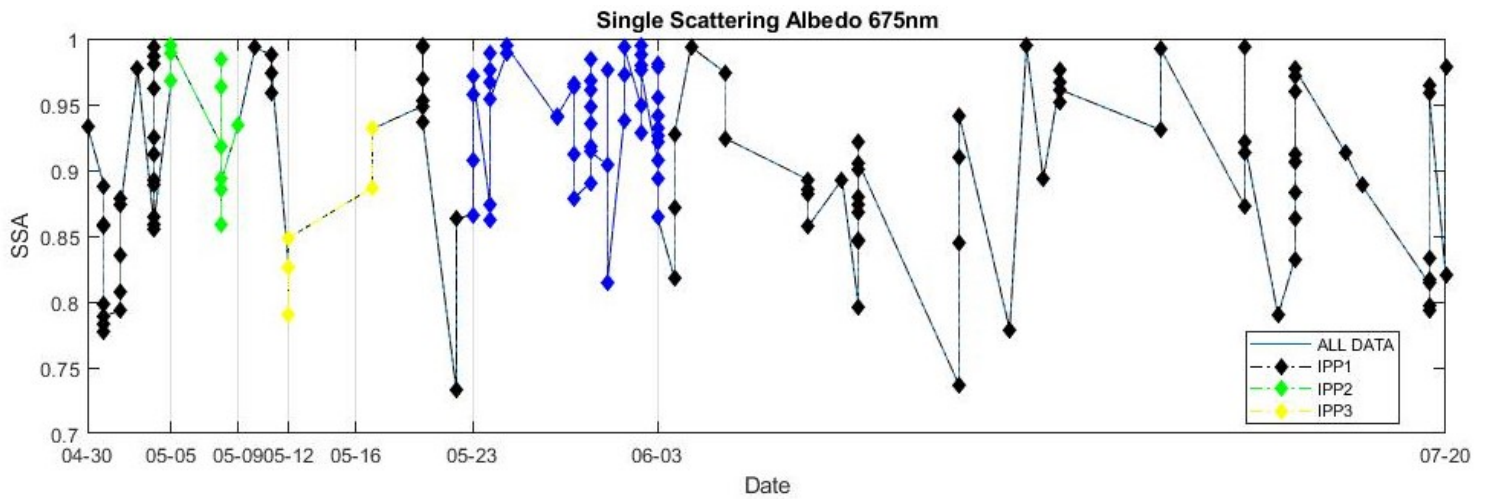


Σχήμα 5.4.4: Χρονοσειρά οπτικού βάθους λόγω εξασθένησης Coarse

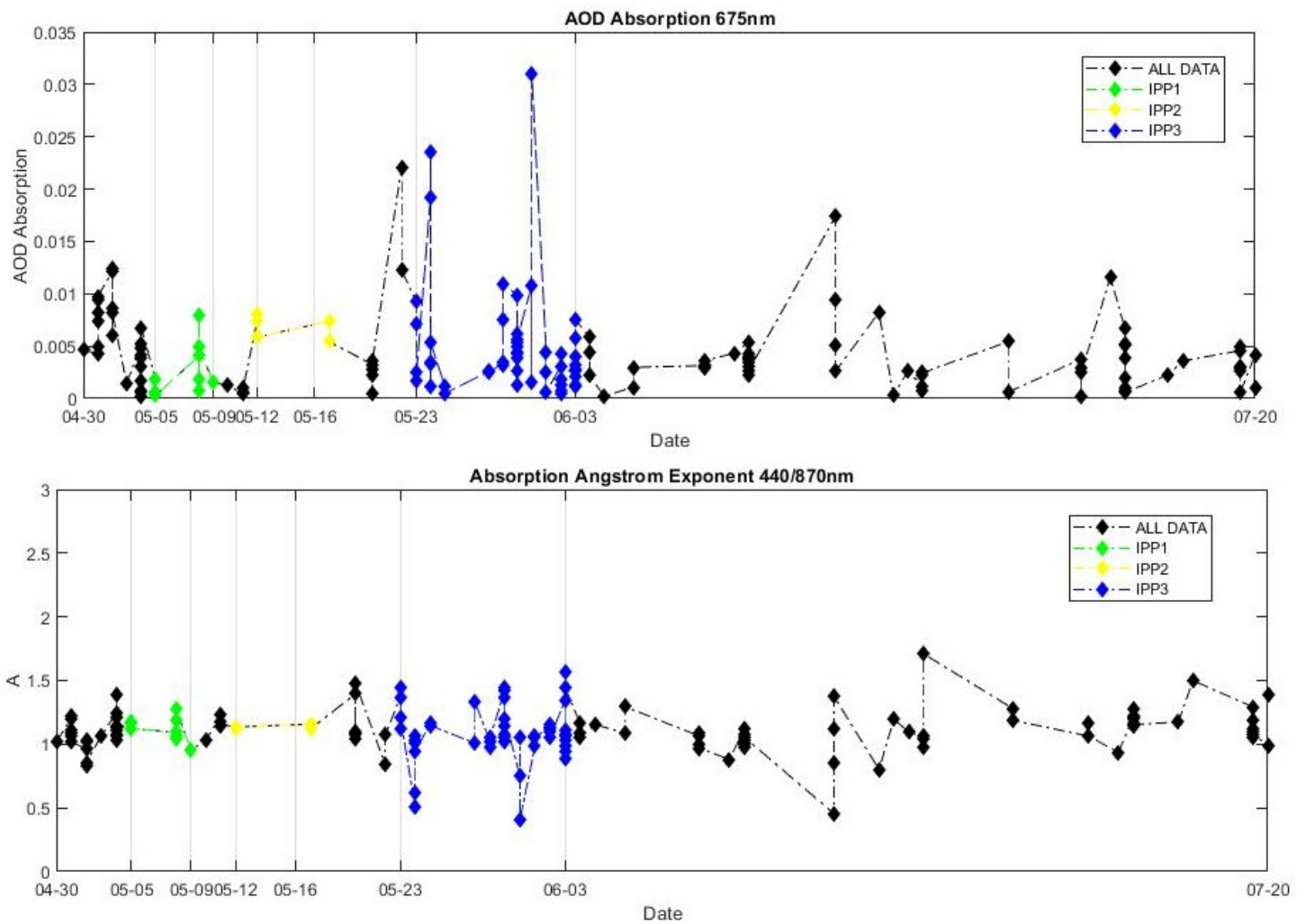


Σχήμα 5.4.5: Χρονοσειρά του φανταστικού και πραγματικού δείκτη διάθλασης (Με μαύρο απεικονίζεται το φανταστικό μέρος και με γκρι σκούρο το πραγματικό)

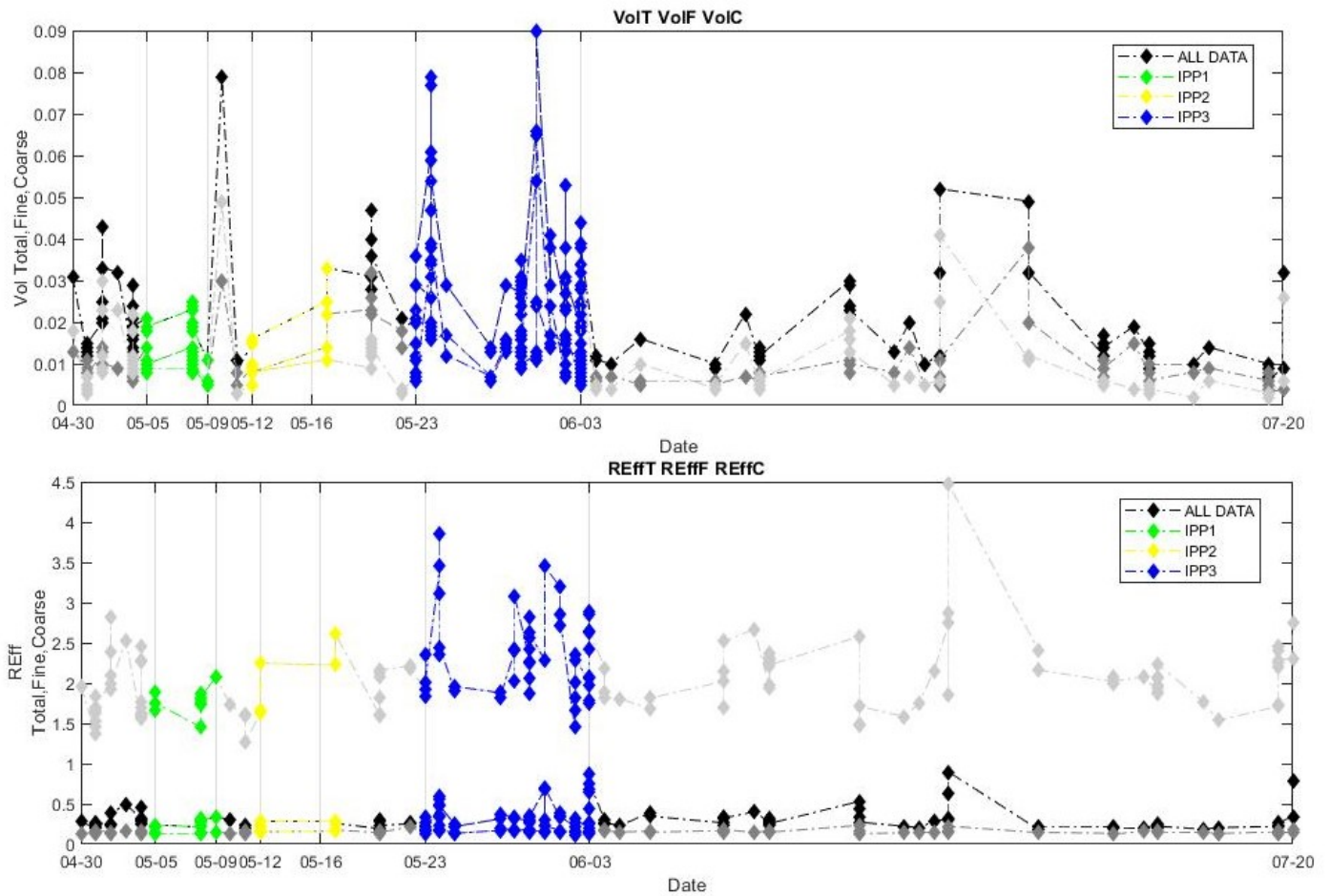




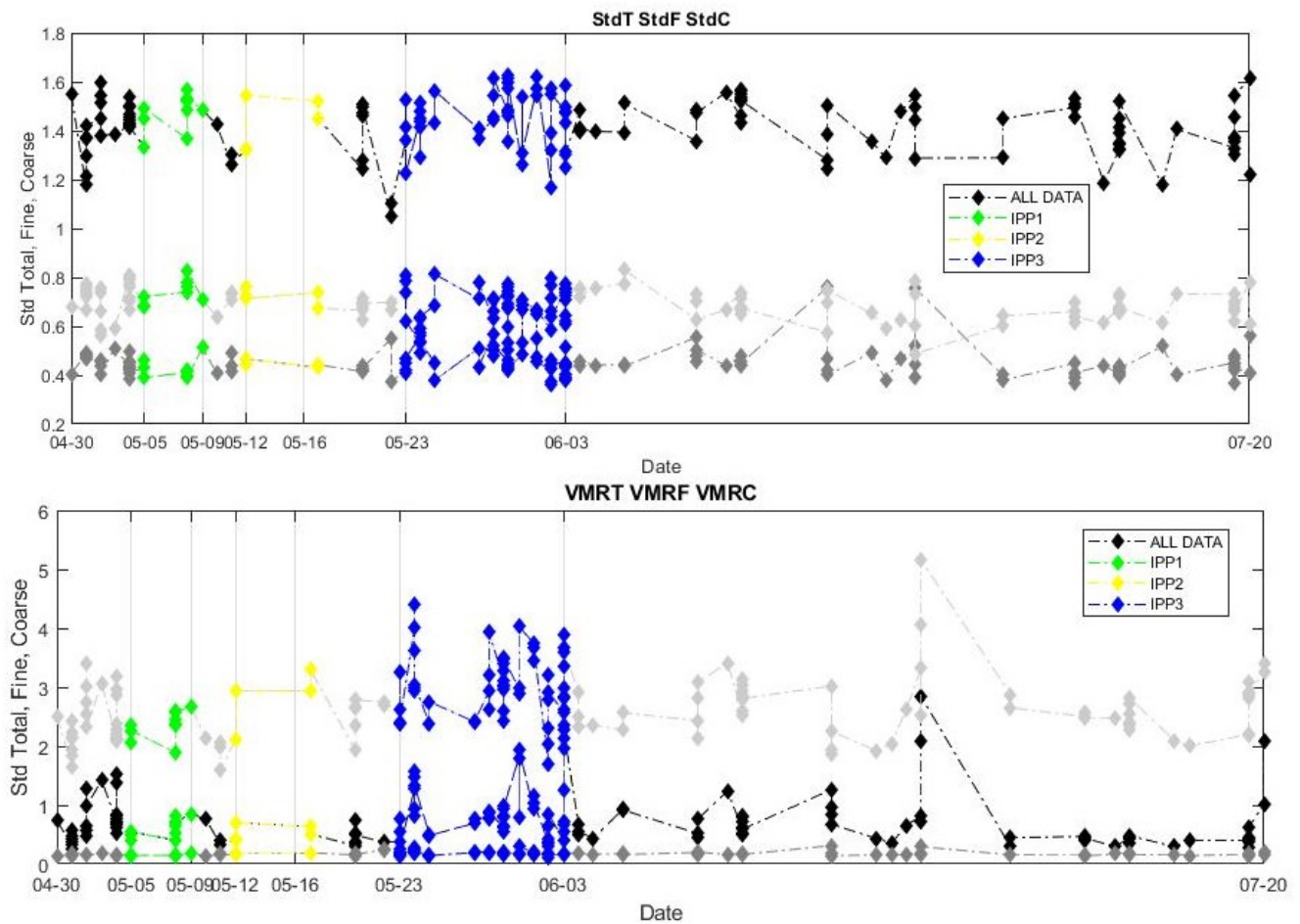
Σχήμα 5.4.6: Χρονοσειρά του συντελεστή μεμονωμένης σκέδασης 675nm



Σχήμα 5.4.7: Χρονοσειρά του οπτικού βάθους λόγω απορρόφησης και του εκθέτη Ångström 440/870nm λόγω απορρόφησης.



Σχήμα 5.4.8: Χρονοσειρές Συγκέντρωσης όγκου και ενεργού ακτίνας (Με μαύρο απεικονίζονται τα δεδομένα Total, με γκρι σκούρο τα δεδομένα Fine και με γκρι ανοιχτό τα δεδομένα Coarse)



Σχήμα 5.4.9: Χρονοσειρά τυπικής απόκλισης ακτίνας και Volume Median Radius (Με μαύρο απεικονίζονται τα δεδομένα Total, με γκρι σκούρο τα δεδομένα Fine και με γκρι ανοιχτό τα δεδομένα Coarse)

Πίνακας 5.4.1: (α) Μέσες τιμές οπτικών ιδιοτήτων των στρωμάτων για κάθε χρονική περίοδο από δεδομένα AERONET

	LR675	$\delta_{675}$	A440/870 coincident	AOD ex- tinction	AOD ex- tinction	AOD extinc- tion
				TOTAL	FINE	COARSE
IPP1	$35 \pm 12$	$0.012 \pm 0.003$	$1.77 \pm 0.103$	$0.048 \pm 0.01$	$0.038 \pm 0.009$	$0.011 \pm 0.03$
IPP2	$64 \pm 5$	$0.016 \pm 0.009$	$1.707 \pm 0.018$	$0.053 \pm 0.01$	$0.046 \pm 0.017$	$0.07 \pm 0.03$
IPP3	$42 \pm 13$	$0.040 \pm 0.042$	$1.442 \pm 0.308$	$0.080 \pm 0.031$	$0.066 \pm 0.027$	$0.014 \pm 0.03$

Πίνακας 5.4.2: (b) Μέσες τιμές οπτικών και μικροφυσικών ιδιοτήτων των στρωμάτων για κάθε χρονική περίοδο από δεδομένα AERONET

	Refractive index		SSA	AOD abs	A 440/870 abs
	Imaginary Part	Real Part			
IPP1	0.06 ± 0.006	1.52 ± 0.06	0.94 ± 0.05	0.003 ± 0.002	1.12 ± 0.09
IPP2	0.019 ± 0.008	1.46 ± 0.04	0.86 ± 0.05	0.007 ± 0.0003	1.13 ± 0.015
IPP3	0.007 ± 0.006	1.55 ± 0.06	0.94 ± 0.04	0.005 ± 0.006	1.09 ± 0.22

Πίνακας 5.4.3: (c) Μέσες τιμές μικροφυσικών ιδιοτήτων των σωματιδίων των στρωμάτων για κάθε χρονική περίοδο από δεδομένα AERONET

		VolC	REff	VMR
		IPP1	TOTAL	0.02 ± 0.004
	FINE	0.01 ± 0.003	0.14 ± 0.008	0.15 ± 0.01
	COARSE	0.01 ± 0.002	1.78 ± 0.16	2.35 ± 0.24
IPP2	TOTAL	0.02 ± 0.004	0.26 ± 0.03	0.53 ± 0.13
	FINE	0.01 ± 0.003	0.14 ± 0.009	0.17 ± 0.01
	COARSE	0.008 ± 0.002	2.07 ± 0.42	2.68 ± 0.53
IPP3	TOTAL	0.03 ± 0.004	0.36 ± 0.16	0.92 ± 0.54
	FINE	0.01 ± 0.003	0.16 ± 0.002	0.18 ± 0.03
	COARSE	0.02 ± 0.002	2.36 ± 0.5	3.02 ± 0.57

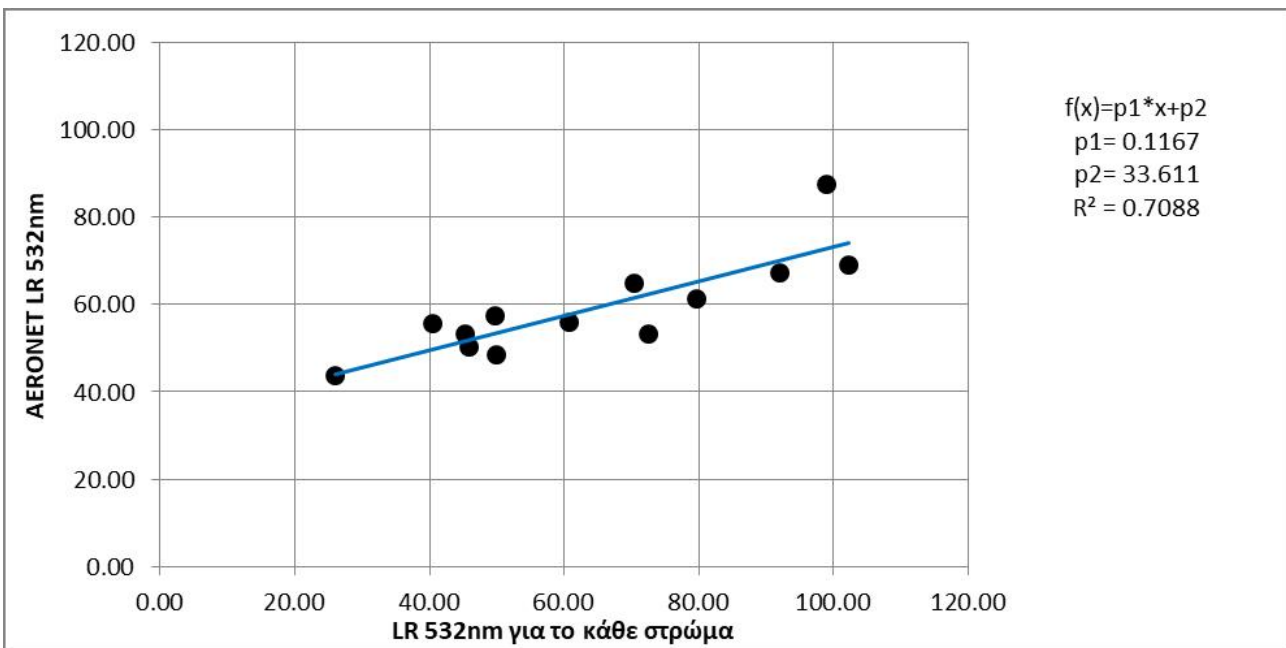
Πίνακας 5.4.4: Αριθμός δεδομένων για κάθε χρονική περίοδο

Number of AERONET Cases	
IPP1	7
IPP2	5
IPP3	48

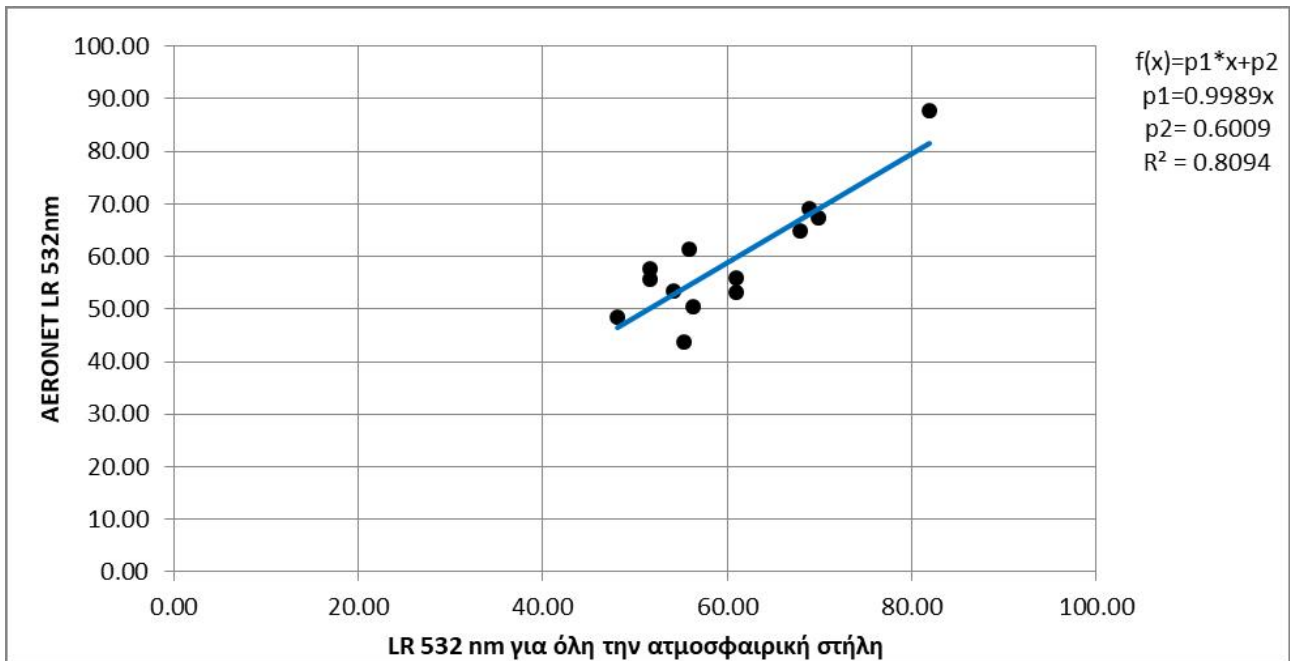
Όπως βλέπουμε από τον πίνακα 5.4.1(a) και 5.4.2(b) οι μεγαλύτερες τιμές του λόγου lidar εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της δεύτερης περιόδου όπως και στα δεδομένα του lidar, κατά την οποία έχουμε μίξη γύρης από σημύδα και έλατο. Ο συντελεστής αποπόλωσης όμως εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές κατά την διάρκεια της τρίτης περιόδου μελέτης, αρκετά μεγαλύτερες από αυτές που έχουν μετρηθεί από το lidar. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι κατά τη διάρκεια της πρώτης περιόδου εμφανίζονται σωματίδια γύρης μέτριας απορροφητικότητας ( $35 \pm 12$ ) στα 675nm, τα οποία είναι περισσότερο σφαιρικά από όλες τις άλλες περιόδους γύρη από σημύδα ( $\delta = 0.012 \pm 0.003$ ). Αντίθετα, την τρίτη περίοδο, που κυριαρχεί η γύρη από πεύκο τα σωματίδια είναι λιγότερο σφαιρικά ( $\delta = 0.04 \pm 0.04$ ). Η τεράστια τυπική απόκλιση όμως αποτυπώνει μεγάλη αβεβαιότητα στην συγκεκριμένη μέτρηση, επομένως δεν μπορούμε να στηριχθούμε σε αυτή την μέτρηση για τον προσδιορισμό της σφαιρικότητας των σωματιδίων την τρίτη περίοδο. Τέλος την δεύτερη περίοδο τα σωματίδια γύρης εμφανίζονται να είναι τα πιο απορροφητικά ( $64 \pm 5$ ). Η μικρή τυπική απόκλιση του λόγου lidar στην συγκεκριμένη περίπτωση οφείλεται στα ελάχιστα δεδομένα που είχαμε για αυτές τις μέρες (5 cases). Επίσης την περίοδο αυτή τα σωματίδια είναι λιγότερο σφαιρικά από την πρώτη περίοδο, κάτι που αναμενόταν αφού η σφαιρική γύρη από σημύδα αρχίζει να αναμιγνύεται με μικρές ποσότητες μη σφαιρικής γύρης από έλατο. Βλέποντας τον συντελεστή μεμονωμένης σκέδασης οι ιδιαίτερα υψηλές τιμές του φανερώνουν σωματίδια με έντονη σχεδαστικότητα και μικρότερη απορρόφηση, ανεξάρτητα από το είδος της γύρης που κυριαρχεί. Σε ότι αφορά τον δείκτη διάθλασης, σύμφωνα με τον οποίο το πραγματικό μέρος αποτυπώνει την σκέδαση και το φανταστικό μέρος την απορρόφηση, επιβεβαιώνεται η έντονη σχεδαστική φύση των σωματιδίων και κατ' επέκταση η μικρή απορροφητική τους ικανότητα.

### 5.5 Σύγκριση του λόγου Lidar 532nm όπως προκύπτει από μετρήσεις Lidar και φωτόμετρου Cimel μέσω γραμμικής παρεμβολής

Στην συνέχεια, εκτιμήθηκε η τιμή του λόγου lidar στα 532nm με την χρήση γραμμικής παρεμβολής από τις μετρήσεις στα 440nm και 870nm και συγκρίθηκε με τη μέση τιμή της παραμέτρου όπως προκύπτει από τις μετρήσεις lidar για το πρώτο ατμοσφαιρικό στρώμα. Από τη σύγκριση προκύπτει συσχέτιση 0.7088, η οποία θεωρείται καλή, δεδομένης της χρονικής διαφοράς των δύο συνόλων μέτρησης. Η σύγκριση παρουσιάζει κλίση της τάξης του 0.1, με τις τιμές από το φασματοφωτομέτρο να υποεκτιμούν το λόγο lidar. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το όργανο παθητικής τηλεπισκόπησης αναφέρεται σε ολόκληρη την ατμοσφαιρική κολώνα, υπολογίσαμε τη μέση τιμή από το lidar και προέκυψε κλίση που πλησιάζει τη μονάδα. Η διαφορά των 2 κλίσεων είναι πιθανό να εμπεριέχει πληροφορίες για τη σχετική ποσότητα σε σωματίδια ατμοσφαιρικής γύρης και θα αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής μελέτης .



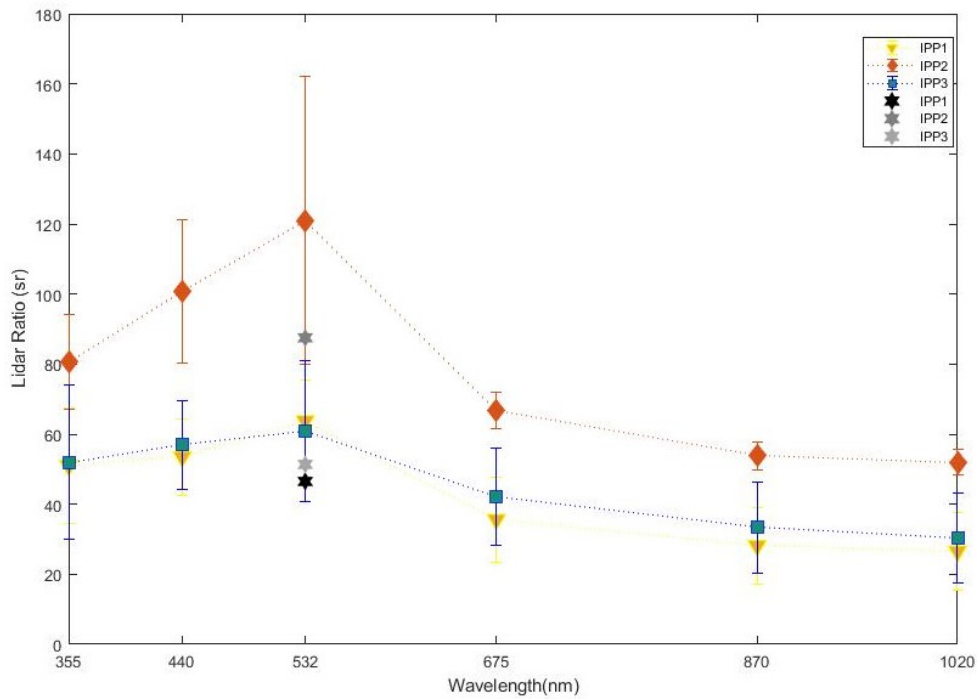
Σχήμα 5.5.1: Συσχέτιση του λόγου Lidar 532nm και λόγου Lidar από AERONET 532nm για κάθε στρώμα



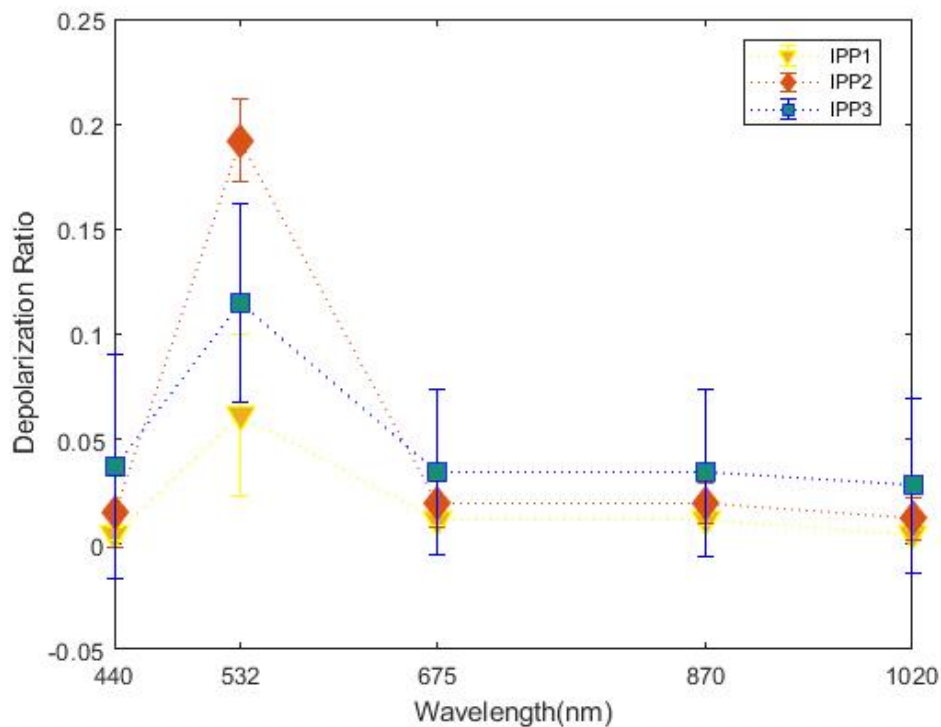
Σχήμα 5.5.2: Συσχέτιση του λόγου Lidar 532nm και λόγου Lidar από AERONET 532nm για όλη την ατμοσφαιρική στήλη

## 5.6 Φασματική εξάρτηση λόγου Lidar και συντελεστή αποπόλωσης

Λαμβάνοντας υπόψη μας παλαιότερες μελέτες, διαφορετικά είδη αιωρούμενων σωματιδίων εμφανίζουν διαφορετική φασματική εξάρτηση του λόγου lidar και του συντελεστή αποπόλωσης. Για παράδειγμα, σωματίδια με έντονη αποπόλωση όπως αυτά της σκόνης από την Σαχάρα εμφανίζουν αυξητική τάση του συντελεστή αποπόλωσης με το μήκος κύματος (Gross et al., 2011) ή και ένα τοπικό μέγιστο στα 532nm (Burton et al., 2015). Αντίθετα, σωματίδια από καύση βιομάζας εμφανίζουν μια πτώση του συντελεστή αποπόλωσης με την αύξηση του μήκους κύματος (Burton et al., 2015). Πολλά όμως είναι τα είδη αιωρούμενων σωματιδίων που δεν έχει βρεθεί η φασματική εξάρτηση του συντελεστή αποπόλωσης του π.χ. τα θαλάσσια σωματίδια (Gross et al., 2011). Στη συνέχεια ερευνούμε την φασματική εξάρτηση του συντελεστή αποπόλωσης για τις περιόδους μελέτης IPP1, IPP2 και IPP3, όπως απεικονίζεται στα Σχήματα 5.6.1 και 5.6.2.



Σχήμα 5.6.1: Φασματική εξάρτηση λόγου Lidar ανά περίοδο μελέτης. Με μαύρο, σκούρο γκρι και ανοιχτό γκρι έχουν επισημανθεί οι τιμές του λόγου lidar που προέκυψαν μέσω γραμμικής παρεμβολής από δεδομένα του AERONET. Τα δεδομένα στα 355 και 532nm προκύπτουν από το Lidar, ενώ τα υπόλοιπα από τα products του AERONET



Σχήμα 5.6.2: Φασματική εξάρτηση συντελεστή αποπόλωσης ανά περίοδο μελέτης



Και στις 3 περιόδους (IPP1, IPP2, IPP3) εμφανίζεται ένα ολικό μέγιστο του συντελεστή αποπόλωσης και του λόγου lidar στα 532nm. Στη συνέχεια ο συντελεστής αποπόλωσης φαίνεται να παραμένει σχεδόν σταθερός με μια ελαφριά τάση να μειωθεί, ενώ ο λόγος lidar τείνει να μειωθεί με την αύξηση του μήκους κύματος. Αυτή η φασματική εξάρτηση, η οποία είναι ιδιαίτερα εμφανής για την περίοδο IPP2 και IPP3, στην οποία κυριαρχούν μη σφαιρικά, μεγάλου μεγέθους σωματίδια γύρης, μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι τα μεγαλύτερα μήκη κύματος είναι πιο ευαίσθητα σε μεγαλύτερα σωματίδια γύρης, όπως η γύρη από έλατο και πεύκο. Επομένως καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι τα 532nm είναι το πιο κατάλληλο μήκος κύματος για να μελετηθεί η γύρη.

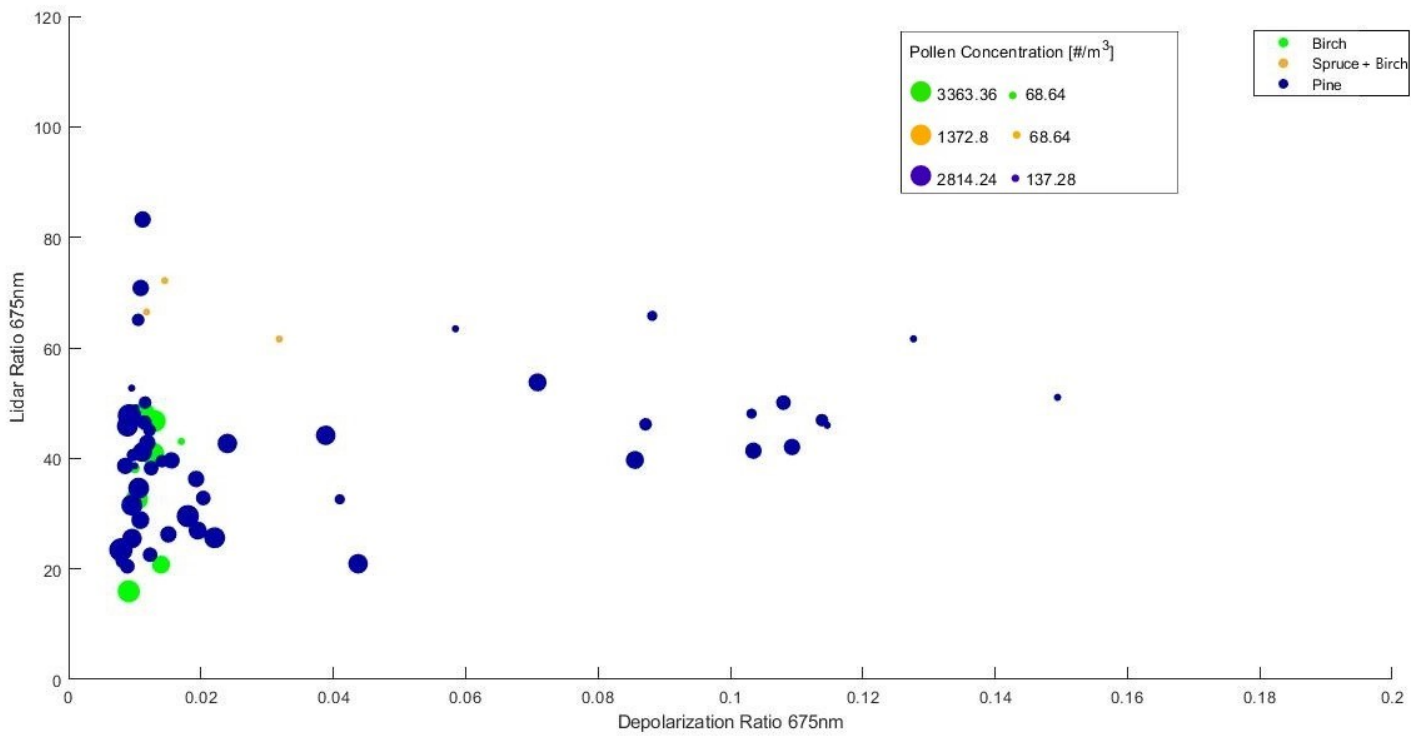
## 5.7 Συσχέτιση του λόγου Lidar του συντελεστή αποπόλωσης και του εκθέτη Ångström από AERONET

Ερευνήσαμε επίσης την συσχέτιση του συντελεστή αποπόλωσης με τον λόγο lidar και τον εκθέτη Ångström και κατασκευάσαμε τα γραφήματα 5.7.1 και 5.7.2.

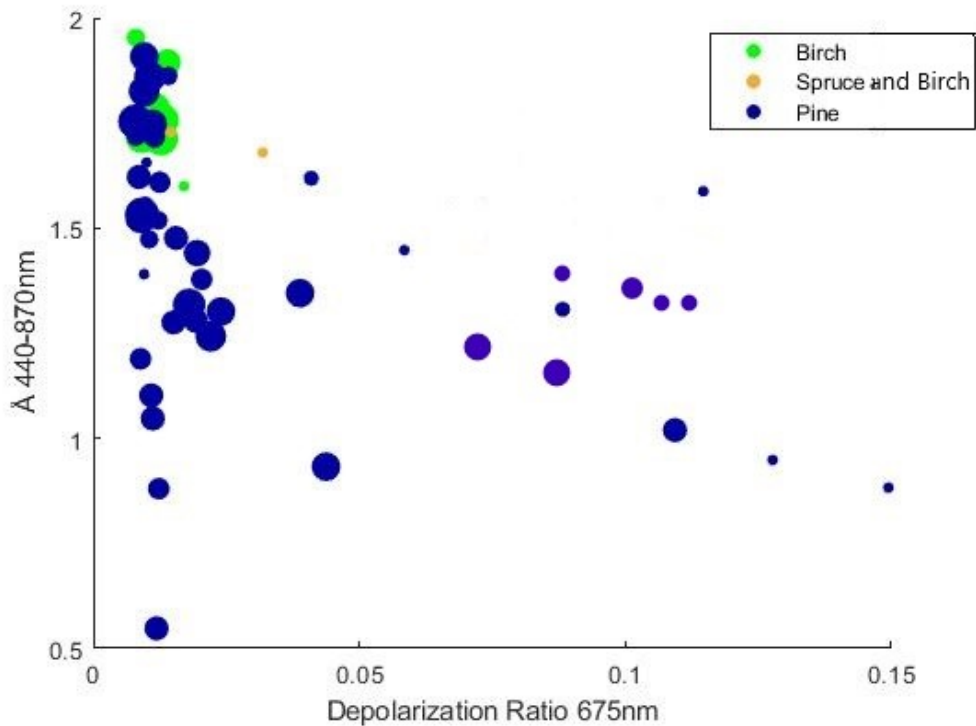
Σε ότι αφορά τον coincident εκθέτη Ångström επιβεβαιώνεται και το αποτέλεσμά μας από τα δεδομένα του lidar, ότι μεγαλύτερες τιμές Ångström συνδέονται με μικρότερες τιμές του συντελεστή αποπόλωσης (Σχήμα 5.7.2). Επομένως καταλήγουμε και πάλι στο συμπέρασμα ότι η χρήση του εκθέτη Ångström για το χαρακτηρισμό της γύρης εξαρτάται από την συνύπαρξη σωματιδίων παρόμοιου μεγέθους στην ατμόσφαιρα και πρέπει πάντα να λαμβάνουμε υπόψη μας το υπόβαθρο.

Ο λόγος lidar για την πρώτη και την δεύτερη περίοδο εμφανίζει μεγάλο εύρος τιμών του λόγου lidar, σε αντίθεση με το μικρό εύρος τιμών του συντελεστή αποπόλωσης. Σε ότι αφορά την IPP3 αν εξαιρέσουμε κάποιες μεμονωμένες μεγάλες τιμές του συντελεστή αποπόλωσης τότε συμβαδίζει με τα αποτελέσματα από την πρώτη και τρίτη περίοδο μελέτης .

5.7 Συσχέτιση του λόγου Lidar του συντελεστή αποπόλωσης και του εκθέτη Ångström από AERONET 65



Σχήμα 5.7.1: Συσχέτιση του λόγου Lidar και του συντελεστή αποπόλωσης 675nm ανά περίοδο μελέτης. Το μέγεθος των κουκκίδων δηλώνει την συγκέντρωση σε αιωρούμενα σωματίδια



Σχήμα 5.7.2: Συσχέτιση του εκθέτη Ångström 440 – 870nm και του συντελεστή αποπόλωσης 675nm ανά περίοδο μελέτης. Το μέγεθος των κουκκίδων δηλώνει την συγκέντρωση σε αιωρούμενα σωματίδια

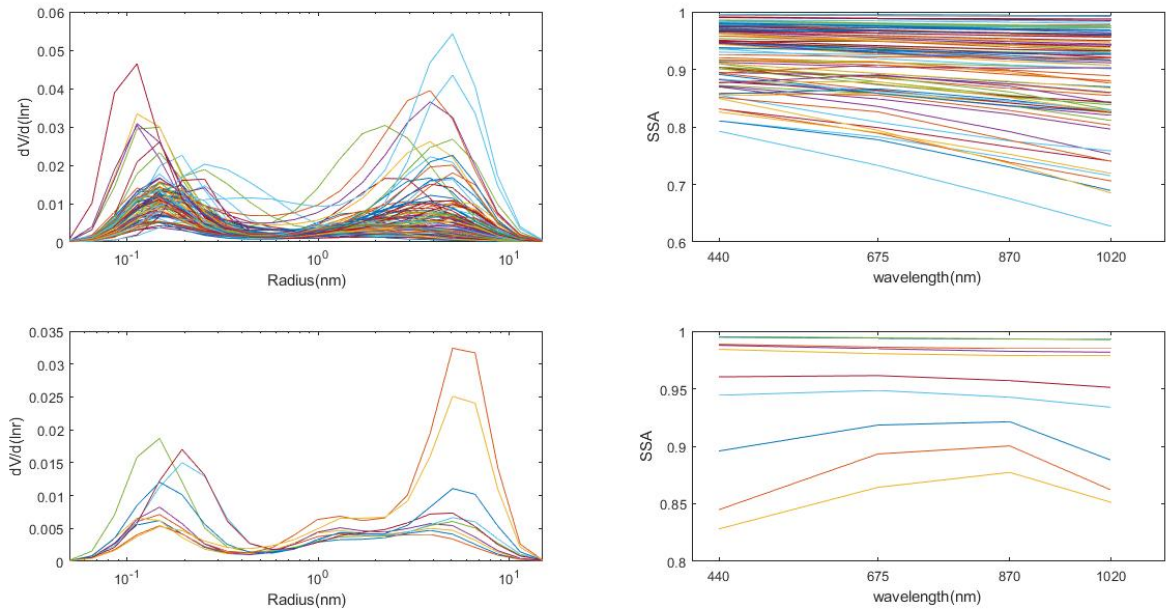
## 5.8 Συσχέτιση Κατανομής μεγεθών και συντελεστή μεμονωμένης σκέδασης

Οι κατανομές μεγεθών του φασματοφωτομέτρου AERONET για την περίοδο μελέτης αποτυπώνονται στο σχήμα 5.8.1. Είναι αξιοσημείωτη η παρουσία μιας αύξησης μεταξύ του fine και coarse mode για 13 από τις συνολικά 160 κατανομές που αντιστοιχούν στις ημέρες και ώρες του πίνακα 5.8.1.

Πίνακας 5.8.1: Ημέρες με αυξημένες τιμές κατανομής μεγεθών μεταξύ fine και coarse mode

Ημέρα	Ώρα
5/4/2016	11:08:13
5/4/2016	12:08:10
5/4/2016	13:08:12
5/8/2016	11:07:57
5/25/2016	08:08:36
5/30/2016	06:39:21
5/30/2016	07:09:12
5/30/2016	16:07:36
6/3/2016	16:12:22
6/3/2016	16:58:09
6/7/2016	06:32:18
6/15/2016	06:29:13
6/21/2016	04:01:48

Στην δεξιά στήλη του ίδιου Σχήματος 5.8.1 παρουσιάζεται η φασματική εξάρτηση του συντελεστή μεμονωμένης σκέδασης για τις ημέρες του πίνακα σε σχέση με τις υπόλοιπες ημέρες. Είναι αξιοσημείωτη η διαφορετική φασματική απόκριση με μεγαλύτερες τιμές να παρουσιάζονται στο ορατό. Η αιτία της παρατήρησης αυτής δεν είναι ακόμα κατανοητή, αλλά θεωρούμε ότι σχετίζεται με την κατανομή μεγεθών και πιθανώς την παρουσία γύρης και θα αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής μελέτης.



Σχήμα 5.8.1: Κατανομή μεγεθών και συντελεστής μεμονωμένης σκέδασης

## 6 Συμπεράσματα

Ο στόχος της εργασίας αυτής ήταν η μελέτη των οπτικών ιδιοτήτων της γύρης στην περιοχή της Φινλανδίας από μετρήσεις από ένα σύστημα lidar και από μία γυροπαγίδα Hirst. Η ελλιπής επιστημονική γνώση πάνω στην αλληλεπίδραση της γύρης με το κλίμα και τα αιωρούμενα σωματίδια οδηγεί στην ανάγκη για περαιτέρω μελέτη πάνω σε αυτό τον τομέα από την σκοπιά της φυσικής επιστήμης. Εκτός αυτού η γύρη αποτελεί και έναν παράγοντα που επηρεάζει όλο και περισσότερο την καθημερινότητα των ανθρώπων, προκαλώντας αλλεργίες και αναπνευστικά προβλήματα. Επομένως, η μελέτη της γύρης αποσκοπεί στην έγκαιρη πρόβλεψη παραγωγής της ώστε να είναι προετοιμασμένοι οι άνθρωποι με τέτοιου είδους προβλήματα υγείας. Η γύρη είναι ένα είδος αιωρούμενων σωματιδίων το οποίο παρουσιάζει τεράστια ποικιλία σε μέγεθος και σχήμα, με αποτέλεσμα να κρίνεται αναγκαία η κατηγοριοποίηση της για την αποτελεσματικότερη μελέτη της.

Τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των μετρήσεων της γυροπαγίδας Hirst από τον Απρίλιο μέχρι τον Αύγουστο του 2016 αναδεικνύουν μία εποχική διακύμανση στις μέγιστες τιμές της συγκέντρωσης διαφορετικών ειδών γύρης με την σημύδα να εμφανίζει μέγιστες συγκεντρώσεις αρχές Μαΐου, στη συνέχεια να εμφανίζονται μικρές συγκεντρώσεις της γύρης του ελάτου, προς το τέλος Μαΐου να ενισχύεται η εμφάνιση της γύρης από πεύκο, ενώ μέχρι τέλος Αυγούστου να κυριαρχεί η γύρη από τσουκνίδα.

Για την στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων Raman lidar που πραγματοποιήθηκαν στο Vehmas-

mäki της Φινλανδίας, αρχικά αναζητήσαμε για κάθε ημέρα από τις τρεις περιόδους έντονης εμφάνισης γύρης που ορίσαμε το πρώτο στρώμα της ατμόσφαιρας με την μέθοδο WCT, θεωρώντας ότι αυτό περιέχει τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις γύρης. Επομένως, από την κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι το πρώτο στρώμα της ατμόσφαιρας δεν ξεπερνά σε καμία από τις περιόδους τα 2 Km. Οι μέσες τιμές των οπτικών ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων για κάθε περίοδο, επιβεβαίωσαν την ύπαρξη σφαιρικής, μέτριας απορροφητικότητας γύρης στην πρώτη περίοδο. Την δεύτερη περίοδο ο συντελεστής lidar παρουσίασε τις μεγαλύτερες τιμές φτάνοντας τα  $67 \pm 15$  sr και τις μεγαλύτερες τιμές σωματιδιακού συντελεστή αποπόλωσης ( $0.18 \pm 0.03$ ), αποδεικνύοντας τον καθοριστικό ρόλο στην εμφάνιση μικρής συγκέντρωσης γύρης από έλατο. Η τρίτη περίοδος με την γύρη από πεύκο εμφανίζει παρόμοιες τιμές του συντελεστή αποπόλωσης με την πρώτη περίοδο, αλλά τα σωματίδια φαίνονται ελαφρώς πιο απορροφητικά, λόγω της μεγαλύτερης τιμής του λόγου lidar.

Από την συσχέτιση του σωματιδιακού συντελεστή αποπόλωσης με τον εκθέτη Ångström καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι εμφανίζουν μια αντιστρόφως ανάλογη σχέση. Ο εκθέτης Ångström βρέθηκε να παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές κατά την πρώτη περίοδο κατά την οποία επικρατούσε η γύρη από σημύδα ( $r=20-25\mu\text{m}$ ).

Από την συσχέτιση του σωματιδιακού συντελεστή αποπόλωσης με τον λόγο Lidar δεν καταλήξαμε σε κάποια σαφή συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών, παρά μόνο ότι ο λόγος lidar λαμβάνει ένα πολύ μεγάλο εύρος τιμών σε κάθε περίοδο έντονης εμφάνισης γύρης, με αποτέλεσμα να είναι λιγότερο κατάλληλος για τον χαρακτηρισμό της γύρης.

Η συσχέτιση του λόγου lidar και του σωματιδιακού συντελεστή αποπόλωσης με την σχετική υγρασία δεν έδειξε κάποιο σαφές αποτέλεσμα, γεγονός που είναι λογικό αφού χρειαζόμαστε τιμές σχετικής υγρασίας μεγαλύτερης του 80% για να εμφανιστεί κάποια πιθανή συσχέτιση. Τα αποτελέσματα της μελέτης μας συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα του αλγορίθμου αναστροφής του AERONET, τα οποία φαίνεται να συμπίπτουν, με μικρές αποκλίσεις που οφείλονται στο γεγονός ότι το AERONET μετρά τις τιμές των οπτικών ιδιοτήτων σε όλη την ατμοσφαιρική στήλη και όχι μόνο μέσα στο πρώτο στρώμα .

Η φασματική εξάρτηση του λόγου lidar και του συντελεστή αποπόλωσης, εμφανίζεται να παρουσιάζει παρόμοια πορεία και στις δύο περιπτώσεις με ένα μέγιστο να εμφανίζεται στα 532nm.

Τέλος, ο συντελεστής μεμονωμένης σκέδασης εμφανίζει διαφορετική φασματική απόκριση με μεγαλύτερες τιμές να παρουσιάζονται στο ορατό, γεγονός που πιθανώς συνδέεται με την κατανομή μεγεθών των αιωρούμενων σωματιδίων και θα αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.

## References

- [1] Eija Yli-Panula et al. “Analysis of Airborne Betula Pollen in Finland a 31-Year Perspective”. In: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 6.6 (2009), pp. 1706–1723. DOI: 10.3390/ijerph6061706.
- [2] T. Biedermann et al. “Birch pollen allergy in Europe”. In: *Allergy* (2019). DOI: 10.1111/all.13758.
- [3] In: <https://ilmasto-opas.fi/en/ilmastonmuutos/suomen-muuttuva-ilmasto/-/artikkeli/1c8d317b-5e65-4146-acda-f7171a0304e1/nykyinen-ilmasto-30-vuoden-keskiarvot.html> ().
- [4] Y. M. Noh et al. “Investigation of the diurnal pattern of the vertical distribution of pollen in the lower troposphere using LIDAR”. In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 13.15 (2013), pp. 7619–7629. DOI: 10.5194/acp-13-7619-2013.
- [5] Charles W. Schmidt. “Pollen Overload: Seasonal Allergies in a Changing Climate”. In: *Environmental Health Perspectives* 124.4 (2016). DOI: 10.1289/ehp.124-a70.
- [6] C. Arden Pope et al. “Respiratory Health and PM10 Pollution: A Daily Time Series Analysis”. In: *American Review of Respiratory Disease* 144.3\_pt\_1 (1991), pp. 668–674. DOI: 10.1164/ajrccm/144.3\_pt\_1.668.
- [7] J. Bousquet et al. “Allergic Rhinitis and its Impact on Asthma (ARIA) 2008”. In: *Allergy* 63 (2008), pp. 8–160. DOI: 10.1111/j.1398-9995.2007.01620.x.
- [8] Allison L. Steiner et al. “Pollen as atmospheric cloud condensation nuclei”. In: *Geophysical Research Letters* 42.9 (2015), pp. 3596–3602. DOI: 10.1002/2015gl1064060.
- [9] Ann G. Miguel et al. “Meteorological Influences on Respirable Fragment Release from Chinese Elm Pollen”. In: *Aerosol Science and Technology* 40.9 (2006), pp. 690–696. DOI: 10.1080/02786820600798869.
- [10] Ilo Hiller; Texas Parks and Wildlife Department. *Young naturalist : from Texas parks and wildlife magazine*. College Station : Texas A and M University Press., 1983.
- [11] Stephanie Bohlmann et al. “Detection and characterization of birch pollen in the atmosphere using multi-wavelength Raman lidar in Finland”. In: (2019). DOI: 10.5194/acp-2019-635.
- [12] Jose Oteros et al. “Automatic and Online Pollen Monitoring”. In: *International Archives of Allergy and Immunology* 167.3 (2015), pp. 158–166. DOI: 10.1159/000436968.

- [13] Herminia Garcia-Mozo, Jose Antonio Oteros, and Carmen Galan. “Impact of land cover changes and climate on the main airborne pollen types in Southern Spain”. In: *Science of The Total Environment* 548-549 (2016), pp. 221–228. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.005.
- [14] Peter J. Adams, John H. Seinfeld, and Dorothy M. Koch. “Global concentrations of tropospheric sulfate, nitrate, and ammonium aerosol simulated in a general circulation model”. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 104.D11 (1999), pp. 13791–13823. DOI: 10.1029/1999jd900083.
- [15] Lewis H. Ziska and Paul J. Beggs. “Anthropogenic climate change and allergen exposure: The role of plant biology”. In: *Journal of Allergy and Clinical Immunology* 129.1 (2012), pp. 27–32. DOI: 10.1016/j.jaci.2011.10.032.
- [16] Spyros N. Pandis John H. Seinfeld. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change, 3rd Edition*. John Wiley & Sons, Inc, 2016.
- [17] E CLELAND et al. “Shifting plant phenology in response to global change”. In: *Trends in Ecology & Evolution* 22.7 (2007), pp. 357–365. DOI: 10.1016/j.tree.2007.04.003.
- [18] Lewis H. Ziska and Jeffrey S. Dukes. *Weed Biology and Climate Change*. Wiley-Blackwell, 2010. DOI: 10.1002/9780470958674.
- [19] L. Ziska et al. “Recent warming by latitude associated with increased length of ragweed pollen season in central North America”. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108.10 (2011), pp. 4248–4251. DOI: 10.1073/pnas.1014107108.
- [20] Ian M. Brooks. “Finding Boundary Layer Top: Application of a Wavelet Covariance Transform to Lidar Backscatter Profiles”. In: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 20.8 (2003), pp. 1092–1105. DOI: 10.1175/1520-0426(2003)020<1092:fb1tao>2.0.co;2.
- [21] Federico Angelini and Gian Paolo Gobbi. “Some remarks about lidar data preprocessing and different implementations of the gradient method for determining the aerosol layers”. In: *Annals of Geophysics* 57 (2014). ISSN: 2037416, 15935213. DOI: 10.4401/ag-6408.
- [22] Baars H. “Continuous monitoring of the planetary-boundary-layer depth with lidar”. MA thesis. Universität Leipzig, Germany, 2007.
- [23] Dietrich Althausen et al. “Portable Raman Lidar PollyXT for Automated Profiling of Aerosol Backscatter, Extinction, and Depolarization”. In: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 26.11 (2009), pp. 2366–2378. DOI: 10.1175/2009jtecha1304.1.
- [24] Ronny Engelmann et al. “The automated multiwavelength Raman polarization and water-vapor lidar PollyXT: the neXT generation”. In: *Atmospheric Measurement Techniques* 9.4 (2016), pp. 1767–1784. DOI: 10.5194/amt-9-1767-2016.

- [25] Jose Oteros et al. “Errors in determining the flow rate of Hirst-type pollen traps”. In: *Aerobiologia* 33.2 (2016), pp. 201–210. DOI: 10.1007/s10453-016-9467-x.
- [26] Zhimin Rao et al. “Ultraviolet laser-induced fluorescence lidar for pollen detection”. In: *Optik* 136 (2017), pp. 497–502. DOI: 10.1016/j.ijleo.2017.02.075.
- [27] Nurit Firon, Massimo Nepi, and Ettore Pacini. “Water status and associated processes mark critical stages in pollen development and functioning”. In: *Annals of Botany* 109.7 (2012), pp. 1201–1214. DOI: 10.1093/aob/mcs070.
- [28] Olga A. Volkova, Elena E. Severova, and Svetlana V. Polevova. “Structural basis of harmogamy: evidence from Boraginaceae pollen”. In: *Plant Systematics and Evolution* 299.9 (2013), pp. 1769–1779. DOI: 10.1007/s00606-013-0832-8.
- [29] Xiaoxia Shang et al. “Optical characterization of pure pollen types using a multi-wavelength Raman polarization lidar”. In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 20.23 (2020), pp. 15323–15339. DOI: 10.5194/acp-20-15323-2020.
- [30] Aron Jozsef Deak et al. “Climate sensitivity of allergenic taxa in Central Europe associated with new climate change related forces”. In: *Science of The Total Environment* 442 (2013), pp. 36–47. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.10.067.
- [31] M. L. Hart, J. E. Wentworth, and J. P. Bailey. “The effects of trap height and weather variables on recorded pollen concentration at leicester”. In: *Grana* 33.2 (1994), pp. 100–103. DOI: 10.1080/00173139409427840.
- [32] S.C. Richardson et al. “Bioaerosol detection over Athens, Greece using the laser induced fluorescence technique”. In: *Science of The Total Environment* 696 (2019), p. 133906. ISSN: 0048-9697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133906>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719338562>.