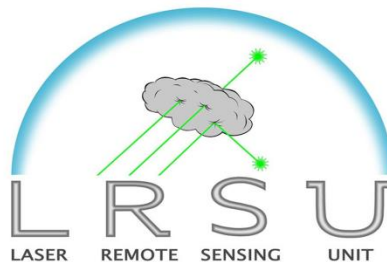




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ, ΛΕΙΖΕΡ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΟΥΣ  
ΜΟΝΑΔΑ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ LASER



**ΜΕΛΕΤΗ O<sub>3</sub> ΚΑΙ ΒΙΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ LIDAR**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

**ΣΤΕΦΑΝΟΥ Κ. ΡΙΤΣΑΡΝΤΣΟΝ**

**ge12104**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

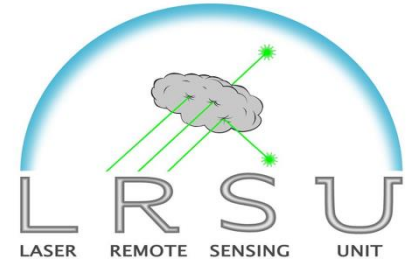
**Δρ. ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΠΑΠΑΓΙΑΝΝΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

Αθήνα, Ιούνιος 2018





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ, ΛΕΙΖΕΡ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΟΥΣ

ΜΟΝΑΔΑ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ LASER

**ΜΕΛΕΤΗ  $O_3$  ΚΑΙ ΒΙΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ LIDAR**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

**ΣΤΕΦΑΝΟΥ Κ. ΡΙΤΣΑΡΝΤΣΟΝ**

**ge12104**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

**Δρ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΠΑΠΑΓΙΑΝΝΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

ΕΓΚΡΙΘΗΚΕ ΑΠΟ ΤΗΝ ΤΡΙΜΕΛΗ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΤΟΝ ΙΟΥΝΙΟ ΤΟΥ 2018.

-----  
Α. ΠΑΠΑΓΙΑΝΝΗΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

-----  
Μ. ΜΑΚΡΟΠΟΥΛΟΥ

ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Ε.Μ.Π.

-----  
Ε. ΓΙΑΝΝΑΚΑΚΗ

ΛΕΚΤΟΡΑΣ, Ε.Κ.Π.Α.

Αθήνα, Ιούνιος 2018



*στους γονείς μου, Χρυσή και Κλάιβ,*

*στην αδερφή μου, Ελένη,*

*και*

*στον αδερφό μου, Μάρκο*

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2017-2018 στο πλαίσιο ολοκλήρωσης του προπτυχιακού επιπέδου της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών. Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου και την εκτίμηση μου προς όλα τα άτομα που γνώρισα κατά τη διάρκεια αυτού του «ταξιδιού» και στάθηκαν δίπλα μου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα «πληρώματα» επιστημόνων της Μονάδας Τηλεπισκόπησης Laser, του Εργαστηρίου Οπτοηλεκτρονικής, Λέιζερ και Εφαρμογών τους, του παρατηρητήριου Maido της Reunion, της εταιρείας Raymetrics και της εταιρείας Licel, την παροχή χρήσιμων επιστημονικών πληροφοριών και γνώσεων και την παροχή υλικής υποδομής.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην Χριστίνα Γιαννακουδάκη, φοιτήτρια της Σ.Ε.Μ.Φ.Ε., για την υπομονή της και τη στήριξή της καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης και για τις χρήσιμες συμβουλές της.

Έπειτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Μάριο Δανάσκο, φοιτητή του Τμήματος Επιστήμης Φυτικής Παραγωγής του Γ.Π.Α, για τη διαφώτισή του σε θέματα βιολογίας των φυτών, καθώς και για την παροχή χρήσιμων συγγραμμάτων.

Ακολούθως, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Δρ. Ιωάννα Πυρρή και το Τμήμα Βιολογίας του Ε.Κ.Π.Α. που συμμερίστηκαν τον ενθουσιασμό μου και είχαν ενεργό συμμετοχή και πολύ όρεξη για να εξερευνήσουν το «πάντρεμα» της Εφαρμοσμένης Φυσικής και της Βιολογίας.

Ύστερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Μιχάλη Μυτιληναίο, διπλωματούχο Φυσικό Περιβάλλοντος του Ε.Κ.Π.Α., για τον χρόνο του και την αφοσίωσή του, καθώς και για τις ανεκτίμητες συμβουλές και που συμμερίστηκε την επιμονή μου. Μαζί του αναπτύχθηκε μία ασταμάτητη ομάδα.

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες και ευγνωμοσύνη μου στον Καθηγητή Δρ. Αλέξανδρο Παπαγιάννη του Ε.Μ.Π.. Τον ευχαριστώ που μου έδωσε την ευκαιρία να αποδείξω τις αξίες μου, για την υπομονή του, για τη στήριξή του σε πολλαπλά θέματα που με απασχολούσαν, που μου γνώρισε έναν καινούριο κόσμο των LASER, για τη συνεργασία και, ιδιαίτερα, τον ευχαριστώ για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε.

Τέλος, ευχαριστώ και είμαι ευγνώμων στον εκλίποντα νονό μου, τον Φυσικό Ηλία Καρώνη, που συνεχίζει να με εμπνέει να ασχολούμαι με τα LASER και να τα αγαπώ...

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της κατακόρυφης κατανομής της αριθμητικής συγκέντρωσης του τροποσφαιρικού όζοντος στην ανώτερη τροπόσφαιρα χρησιμοποιώντας την τεχνική της Διαφορικής Απορρόφησης LiDAR (Differential Absorption LiDAR-DIAL) και η μελέτη φασμάτων φθορισμού βιοσωματιδίων, τόσο στο εργαστήριο με την τεχνική επαγόμενου φθορισμού Laser (Laser-Induced Fluorescence-LIF), όσο και στην ατμόσφαιρα με την τεχνική του πολυ-φασματικού LIF LiDAR (Multi-Spectral LIF LiDAR).

Στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο εισάγονται συνοπτικά οι βασικές έννοιες που αφορούν την ατμόσφαιρα, τη σύσταση της ατμόσφαιρας ως προς τα μόρια και τους ρυπαντές, τα φαινόμενα ανέμου που συναντώνται τοπικά και στην ανώτερη τροπόσφαιρα και η αλληλεπίδραση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρα. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη φυσική και στη χημεία του τροποσφαιρικού όζοντος και, επίσης, τονίζονται αρκετά τα βιολογικά χαρακτηριστικά της γύρης, των μυκήτων και των βακτηρίων. Τέλος, συνοψίζονται τα μοντέλα και τα συστήματα δεδομένων που ενισχύουν τη μελέτη του τροποσφαιρικού όζοντος και των ατμοσφαιρικών βιο-σωματιδίων.

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφεται η τεχνική LiDAR ως προς τη φυσική και την τεχνολογία (σύστημα ελαστικής σκέδασης), καθώς και οι επι μέρους τεχνικές της, δηλαδή τα συστήματα DIAL, Multi-Spectral LIF LiDAR και Depolarisation LiDAR (LiDAR αποπόλωσης).

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζεται η μελέτη του τροποσφαιρικού όζοντος πάνω από τη νήσο της Reunion στον Ινδικό Ωκεανό. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται ολόκληρη η διαδικασία της μελέτης, από τη σημασία μελέτης του τροποσφαιρικού όζοντος στην πειραματική διάταξη και από την ανάλυση των δεδομένων στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων και την παρουσίαση των συμπερασμάτων.

Τέλος, στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζεται η μελέτη των βιοσωματιδίων και πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι δύο πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποιήσαμε: in-situ και LiDAR, και αναφέρονται η σημασία μελέτης των βιοαερολυμάτων, τα φάσματα φθορισμού και οπτικών φασμάτων των δειγμάτων, οι ενεργές διατομές σκέδασης των δειγμάτων για τα 355 nm και η απόπειρα εφαρμογής της τεχνικής αποπόλωσης και ελαστικής σκέδασης LiDAR. Η έμφαση δίνεται στη χρήση της τεχνικής Multi-Spectral LIF LiDAR, καθώς τα λαμβανόμενα σήματα φθορισμού συγκρίνονται με τα εργαστηριακά φάσματα

λαμβάνοντας υπόψη τις συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών βιοαερολυμάτων που παγιδεύονται με χρήση ειδικής παγίδας.

## ABSTRACT

The aim of this thesis is to investigate the tropospheric ozone vertical profiles in the upper-troposphere with respect to its number density using the Differential Absorption LiDAR technique (DIAL) and, also, to investigate the fluorescence spectra of bioaerosols using an in-situ laser-induced fluorescence technique (LIF) and a Multi-Spectral LIF LiDAR system for atmospheric fluorescence detection.

The 1<sup>st</sup> chapter is an introduction to basic concepts revolving the atmosphere, the atmospheric components, both molecular and pollutants, the local and upper-troposphere wind phenomena and the atmospheric-electromagnetic radiation interaction. The chapter emphasizes on the physics and chemistry of tropospheric ozone and on the biological characteristics of pollen, fungi and bacteria. What is more, models and real-time data systems which assist with the investigations are introduced.

The 2<sup>nd</sup> chapter describes the basic Elastic Scattering LiDAR system from a physical and technical point of view as well as the system's variety techniques including the DIAL system, the Multi-Spectral LIF LiDAR system and, finally, the Depolarisation LiDAR system.

The 3<sup>rd</sup> chapter focuses on the investigation of the tropospheric ozone vertical profiles from air masses arriving over Reunion Island in the Indian Ocean. This includes the importance of studying tropospheric ozone, the experimental set-up, data analysis, result presentation and discussion and concluding remarks.

The final chapter is about bioaerosol investigation regarding both in-situ and real-time experiments in the atmosphere over Athens, Greece. The chapter begins with a note on the importance of bioaerosol research and continues on with in-situ and LiDAR experimental set-ups, presentation of fluorescence and optical spectra of the investigated bioparticles, bioparticle scattering coefficient regarding the 3<sup>rd</sup> harmonic of an Nd:YAG laser, an attempt of deriving results from a combination of the Elastic Scattering LiDAR and the Depolarisation LiDAR systems. It mainly focuses on the fluorescence spectra obtained from the Multi-Spectral LIF LiDAR system and their comparison with the in-situ derived spectra having in mind the amount of atmospheric bioaerosols trapped with an air sampler.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

1.1 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ.....	1
1.2 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ USSA 1976.....	4
1.3 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ-Η/Μ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.....	5
1.4 ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΑ-ΒΙΟΑΕΡΟΛΥΜΑΤΑ.....	8
1.5 ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΟΖΟΝ.....	11
1.6 ΜΟΝΤΕΛΟ HYSPLIT ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ FIRE MAPPER.....	15
1.7 ΓΥΡΗ-ΒΙΟΛΟΓΙΑ ΦΥΤΙΚΟΥ ΚΥΤΤΑΡΟΥ.....	16
1.8 ΠΡΟΓΝΩΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ SILAM.....	19
1.9 ΒΑΚΤΗΡΙΑ.....	20
1.10 ΜΥΚΗΤΕΣ.....	21

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΤΕΧΝΙΚΗ LiDAR

2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.....	23
2.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΥΠΙΚΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ LiDAR.....	23
2.3 ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΣΚΕΔΑΣΗΣ LiDAR.....	27
2.4 ΤΕΧΝΙΚΗ DIAL.....	27
2.5 ΤΕΧΝΙΚΗ MULTI-SPECTRAL LIF LiDAR.....	29
2.6 ΤΕΧΝΙΚΗ ΑΠΟΠΟΛΩΣΗΣ LiDAR.....	30

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΜΕΤΡΗΣΗ O<sub>3</sub> ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ DIAL**

3.1 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	33
3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....	35
3.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	38
3.4 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	45
3.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	68

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΜΕΛΕΤΗ ΒΙΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ LIF**

4.1 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	71
4.2 ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ LIF.....	72
4.3 ΦΑΣΜΑΤΑ ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ.....	82
4.4 ΦΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ/ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ/ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ.....	99
4.5 ΕΝΕΡΓΟΣ ΔΙΑΤΟΜΗ ΣΚΕΔΑΣΗΣ.....	102
4.6 ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΒΙΟΑΕΡΟΛΥΜΑΤΩΝ.....	103
4.7 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ-ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	108
4.8 ΑΠΟΠΟΛΩΣΗ ΒΙΟΓΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ.....	120
4.9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	122

<b>ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....</b>	<b>125</b>
----------------------	------------

<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>127</b>
--------------------------	------------

<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....</b>	<b>134</b>
-------------------------	------------

<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....</b>	<b>137</b>
-------------------------	------------





# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

### 1.1 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Το στερεό τμήμα της Γης περικλείεται από μία συμπεριστρεφόμενη αέρια μάζα που ονομάζεται «ατμόσφαιρα». Η ατμόσφαιρα εκτείνεται από την επιφάνεια της θάλασσας έως και το σύνορο της με το διάστημα στα 500 km. Αποτελείται από αέρια μόρια που συγκροτούν τον ξηρό αέρα (Πίνακας 1.1.1), από νερό σε αέρια, στερεή και υγρή μορφή και από στερεά ή υγρά σωματίδια που ονομάζονται «αερολύματα».

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1.1:** Ο ξηρός αέρας μέχρι τα 86 km (USSA, 1976).

Αέριο	Μοριακό βάρος (kg/kmol)	Αναλογία Μείξης (αδιάστατο)
$N_2$	28.0134	0.78084
$O_2$	31.9988	0.209476
$Ar$	39.948	0.00934
$CO_2$	44.00995	0.000314
$Ne$	20.183	0.00001818
$He$	4.0026	0.00000524
$Kr$	83.80	0.00000114
$Xe$	131.30	0.000000087
$CH_4$	16.04303	0.000002
$H_2$	2.01594	0.0000005

Η ατμόσφαιρα χωρίζεται σε επί μέρους στρωματώσεις με βάση τη θερμοκρασία καθώς ποικίλλει με το υψόμετρο. Το κατώτερό της αποτελεί η τροπόσφαιρα, η οποία περιέχει το 75 % του ατμοσφαιρικού αέρα και εμπερέχει την περισσότερη ποσότητα

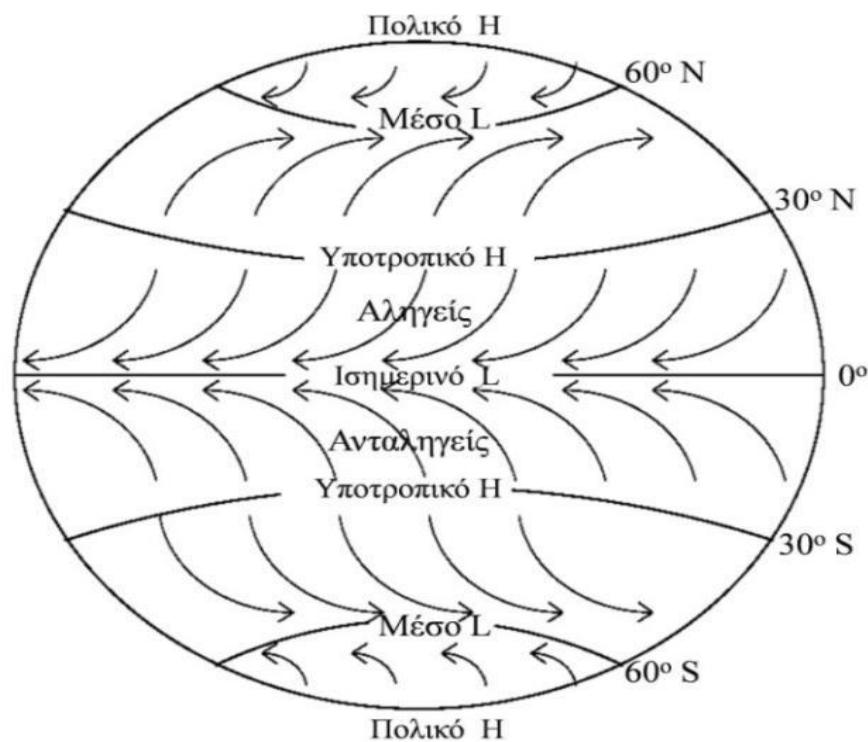
υδρατμών. Η τροπόσφαιρα θερμαίνεται κυρίως από τη γήινη ακτινοβολία και γι'αυτό η θερμοκρασία της μειώνεται με το ύψος. Εκτείνεται μέχρι τα 8 km στους Πόλους, τα 12 km στα μέσα γεωγραφικά πλάτη και τα 18 km στα τροπικά. Στην τροπόσφαιρα, επίσης, βρίσκεται το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (ΑΟΣ), ένα στρώμα που εκτείνεται από το έδαφος έως τα 2 – 4 km (Stull, 1988) και επηρεάζεται άμεσα από τη δραστηριότητα του ανθρώπου, της χλωρίδας και της πανίδας και του εδάφους. Ακολουθεί μία λεπτή ζώνη που ονομάζεται «τροπόπαυση» και χαρακτηρίζεται από μικρότερο ρυθμό μείωσης της θερμοκρασίας σε σχέση με την τροπόσφαιρα. Η στρατόσφαιρα εκτείνεται από την τροπόπαυση έως τα 50 km όπου απουσιάζουν οι υδρατμοί και έχει σταθερή θερμοκρασία μέχρι τα 20 km και έπειτα αυξάνει καθ'ύψος λόγω αυξημένης συγκέντρωσης όζονος (90 %) που απορροφά έντονα την ηλιακή UV ακτινοβολία. Η λεπτή ζώνη μετά τη στρατόσφαιρα ονομάζεται «στρατόπαυση» και χαρακτηρίζεται από σταθερή θερμοκρασία. Το υπερκείμενο ατμοσφαιρικό στρώμα είναι η μεσόσφαιρα, όπου λόγω απουσίας του όζοντος η θερμοκρασία ελαττώνεται και εκτείνεται έως τα 80 km, δηλαδή ως τη μεσόπαυση, όπου η θερμοκρασία συνεχίζει να μειώνεται και σημειώνεται το ψυχρότερο σημείο της Γης. Πιο πάνω βρίσκεται η θερμόσφαιρα που εκτείνεται έως τα 400 km, όπου σημειώνεται αύξηση της θερμοκρασίας λόγω απορρόφησης της ηλιακής υπεριώδους ακτινοβολίας από το οξυγόνο και το άζωτο. Το τελικό εξωτερικό στρώμα που ακολουθεί είναι η εξώσφαιρα έως τα 500 km που χαρακτηρίζεται από σταθερή θερμοκρασία και την δυνατότητα διαφυγής ατόμων από τη Γη (Λαζαρίδης, 2010; Μακρογιάννης et al., 2014). Η μεταβολή της θερμοκρασίας είναι κυρίως γραμμική στο κάθε ατμοσφαιρικό στρώμα:

$$T(z) = T(z_o) + L(z - z_o) \quad (1.1.1)$$

όπου  $z$ ,  $T(z_o)$  και  $L$  είναι αντίστοιχα το υψόμετρο, η θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας και ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας καθ' ύψος. Αν η ποσότητα  $L$  είναι θετική, τότε η θερμοκρασία αυξάνεται με το ύψος και η ατμόσφαιρα χαρακτηρίζεται ως ευσταθής, ενώ όταν είναι αρνητική η θερμοκρασία μειώνεται με το ύψος και η ατμόσφαιρα είναι ασταθής. Η αστάθεια συνεπάγεται έντονες κατακόρυφες κινήσεις του αέρα και κατ'επέκταση εμφανίζονται οι καιρικές συνθήκες και η ανάπτυξη ανέμων. Οι άνεμοι ιδανικά ακολουθούν το πλανητικό μοντέλο κυκλοφορίας ανέμων (Lutgens et al., 1989, 2010; Σχήμα 1.1.1) και αναπτύσσονται τοπικά φαινόμενα, όπως η απόγειος αύρα, η θαλάσσια αύρα, οι τυρβώδεις ροές, η αύρα των κοιλάδων και η αύρα των βουνών.

Τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα μπορεί να είναι και εποχιακά, όπως οι μουσσώνες (στο

πλαίσιο της διπλωματικής αυτής είναι σκόπιμο να συμπεριληφθεί η επεξήγησή τους), οι οποίοι αποτελούν μία ανωμαλία στη γενική κυκλοφορία και είναι άνεμοι που αναπτύσσονται στην περιοχή του Ινδικού Ωκεανού-Ινδονησίας. Κατά τη χειμερινή περίοδο ο αέρας ρέει από τη ξηρά προς τη θάλασσα (ξηροί και ψυχροί άνεμοι), ενώ τη θερινή η ροή είναι ανάποδη και οι πνέοντες άνεμοι είναι υγροί και δροσεροί. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στη μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά (και άρα πίεσης) μεταξύ ξηράς και θάλασσας ανάλογα με την εποχή.



**ΣΧΗΜΑ 1.1.1:** Κατανομή πίεσης και οι ροές ανέμων (Χαλδούπης, 2015 για την εικόνα). Τα βαρομετρικά υψηλά (συνθήκες υψηλής πίεσης) συμβολίζονται με H (high) και τα βαρομετρικά χαμηλά (συνθήκες χαμηλής πίεσης) με L (low). Οι περιστροφές των ροϊκών γραμμών του ανέμου οφείλονται στη φαινομενική δύναμη Coriolis. Οι άνεμοι κινούνται από τις υψηλές πιέσεις προς τις χαμηλές (Salby, 2012).

Τέλος, είναι αξιοσημείωτο να αναφερθούν και οι αεροχείμαρροι (jet streams), οι οποίοι αποτελούν ένα ισχυρό, λεπτό ρεύμα αέρος στην ανώτερη τροπόσφαιρα ή κατώτερη στρατόσφαιρα και χαρακτηρίζονται από μεγάλες κατακόρυφες και οριζόντιες βαθμίδες ταχύτητας και παρουσιάζουν μεγάλες ταχύτητες και μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας. Σε κάθε ημισφαίριο διακρίνονται δύο αεροχείμαρροι, οι πολικοί (polar) και οι υποτροπικοί (sub-tropical). Οι υποτροπικοί εμφανίζονται μεταξύ των μέσων γεωγραφικών

πλατών και των τροπικών τροποπαύσεων (μεταξύ των 25° και 30° πλατών τον χειμώνα και βορειότερα και νοτιότερα το καλοκαίρι σε ύψη 12 – 13 km), ενώ οι πολικοί συναντώνται μεταξύ πολικής και μέσης τροπόπαυσης (σε ύψη 9 – 10 km) και χαρακτηρίζεται από έντονη θερμοβαθμίδα (και, επομένως, έντονη βαροβαθμίδα). Οι αεροχείμαρροι αυτοί εντάσσονται στα κύματα Rossby (κυματισμοί δυτικών ανέμων στη μέση και ανώτερη τροπόσφαιρα). Οι κυματισμοί αυτοί εμφανίζονται στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa ή 500mbar και άνω καθώς πιο κάτω επηρεάζονται από την τριβή και την τοπογραφία (Μακρογιάννης et al., 2014).

## 1.2 TO MONTELO USSA 1976

Το ατμοσφαιρικό μοντέλο των ΗΠΑ (United States Standard Atmosphere, 1976) αναπτύχθηκε με στόχο την παρουσίαση μίας συλλογικής μελέτης της ατμόσφαιρας. Πιο συγκεκριμένα αφορά τον υπολογισμό ατμοσφαιρικών παραμέτρων, την παρουσίαση σταθερών μεγεθών που εμφανίζονται και την επεξήγηση ορισμών και την παρουσίαση γραφικών παραστάσεων και πινάκων με τις τιμές των ατμοσφαιρικών παραμέτρων για αρκετές τιμές του ύψους. Στο μοντέλο αυτό, μεγέθη όπως η πίεση και η πυκνότητα μειώνονται εκθετικά με το υψόμετρο, ενώ η θερμοκρασία αυξάνεται και μειώνεται γραμμικά (όπως παρατέθηκε στο Υποκεφάλαιο 1.1). Ένα μέγεθος, όμως, που παίζει σημαντικό ρόλο για την παρούσα εργασία είναι η αριθμητική πυκνότητα του ξηρού αέρα:

$$N(z) = \frac{N_A}{M_o} d(z_o) \exp \left\{ -\frac{g(z)(z-z_o)}{RT(z)} \right\} \quad (1.2.1)$$

όπου  $N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ,  $M_o = 28.9644 \text{ kg/kmol}$ ,  $d(z_o) = 1.2250 \text{ kg/m}^3$ ,  $R = 287 \text{ J/kg} \times K$  και  $g(z)$  είναι αντίστοιχα ο αριθμός Avogadro, το μέσο μοριακό βάρος στην επιφάνεια της θάλασσας, η πυκνότητα του αέρα στην επιφάνεια της θάλασσας, η παγκόσμια σταθερά αερίων ανά μονάδα μάζας και η βαρυτική επιτάχυνση συναρτήσει του υψομέτρου:

$$g(z) = g(z_o) \left\{ \frac{r_o}{r_o+z} \right\}^2 \quad (1.2.2)$$

όπου  $r_o = 6356766 \text{ m}$  και  $g(z_o) = 9.80665 \text{ m/sec}^2$  η ακτίνα της Γης και η επιτάχυνση της βαρύτητας στην επιφάνεια της θάλασσας αντίστοιχα. Η θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας (Σχέση 1.1.1) με βάση το μοντέλο αυτό είναι 288.15 K.



### 1.3 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ – Η/Μ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, κατά τη διάδοσής της στην ατμόσφαιρα, αλληλεπιδρά με τα αέρια και τα σωματίδια της ατμόσφαιρας και υφίσταται ανάκλαση, απορρόφηση ή και διάθλαση, ακολουθώντας τη σχέση αθροίσματος συντελεστών των τριών φαινομένων:

$$R + A + T = 1 \quad (1.3.1)$$

όπου  $R$ ,  $A$  και  $T$  η ανακλαστικότητα, η απορροφητικότητα και η διαπερατότητα αντίστοιχα στο μέσο. Οι συντελεστές  $R$  και  $A$  συνδέονται με τη λευκότητα μεμονωμένης σκέδασης (single scattering albedo),  $\omega$ , ένα συντελεστή που καθορίζει πόσο έντονα σκεδάζουν τα σωματίδια και ορίζεται ως ο λόγος της ενεργού διατομής σκέδασης αερολυμάτων προς την ενεργό διατομή εξασθένησης αερολυμάτων, η οποία είναι το άθροισμα των ενεργών διατομών σκέδασης και απορρόφησης αερολυμάτων. Όσο αυξάνεται ο λόγος αυτός τόσο εντονότερα σκεδάζουν τα σωματίδια (λευκά νέφη). Η πιθανότητα να μη σκεδάζουν έντονα είναι  $1 - \omega$  και όταν αυξάνεται ο όρος αυτός τότε η απορρόφηση είναι εντονότερη (σκούρα νέφη). Η σκέδαση (πολλαπλή ανάκλαση) και η απορρόφηση καθορίζουν την εξασθένηση της ακτινοβολίας, η οποία κατά τη διάδοσή της στην ατμόσφαιρα ακολουθεί το νόμο Beer-Lambert:

$$I(z) = I(z_0) \exp \left\{ - \int_{z_0}^z a(\lambda, r) dr \right\} \quad (1.3.2)$$

όπου  $I(z_0)$  και  $a(\lambda, r)$  η αρχική ένταση της ακτινοβολίας στη θέση  $z_0$  και ο συντελεστής εξασθένησης στο πάχος  $z - z_0$  για το μήκος κύματος,  $\lambda$ . Ο εκθετικός όρος δηλώνει τη διαπερατότητα του μέσου, ενώ ο εκθέτης δηλώνει το οπτικό βάθος του μέσου (χωρίς το αρνητικό πρόσημο). Η Σχέση 1.3.2 ισχύει για μη ομοιογενή ατμόσφαιρα, ενώ για ομοιογενή ατμόσφαιρα ο συντελεστής εξασθένησης είναι σταθερός στο ατμοσφαιρικό στρώμα.

Λόγω της εξασθένησης ο δείκτης διάθλασης λαμβάνει μιγαδική μορφή:

$$k = n(1 - ja) \quad (1.3.3)$$

όπου  $n$  και  $a$  είναι αντίστοιχα ο πραγματικός δείκτης διάθλασης και η παράμετρος μεγέθους του σκεδάζοντος αερολύματος που είναι ανάλογη της διαμέτρου του σωματιδίου,  $d$ . Όταν  $d \sim \lambda$  ( $a \sim 1$ ) η ακτινοβολία σκεδάζεται κατά Mie (ελαστική σκέδαση) από τα σωματίδια, όπου επιτυγχάνεται εμπρόσθια σκέδαση αν  $d > \lambda$  (Seinfeld et al., 2006). Όταν  $d > 100 \mu\text{m}$  ( $a \gg 1$ ) παρατηρούνται φαινόμενα γεωμετρικής οπτικής, στην οποία συμπεριλαμβάνονται και φαινόμενα πολλαπλής σκέδασης (π.χ. για σταγονίδια βροχής). Όταν  $d < \lambda$  ( $a \ll 1$ ) η

ακτινοβολία σκεδάζεται κατά Rayleigh (ελαστική σκέδαση) από τα ατμοσφαιρικά μόρια. Όσο πιο μικρά τα μήκη κύματος, τόσο πιο μεγάλη η ένταση των συντελεστών σκεδάσεων με μεγαλύτερη τη σκέδαση Rayleigh καθώς είναι αντιστρόφως ανάλογη της τέταρτης δύναμης του μήκους κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, ενώ η σκέδαση Mie είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους κύματος. Τελικά, ο συντελεστής εξασθένησης είναι το άθροισμα των συντελεστών σκεδάσης και απορρόφησης κατά Mie και κατά Rayleigh. Για τα δύο είδη σκεδάσεων ο συντελεστής εξασθένησης εξαρτάται από το μήκος κύματος. Για τα σωματίδια η σχέση που συνδέει δύο διαφορετικούς συντελεστές εξασθένησης με τα αντίστοιχα μήκη κύματος είναι:

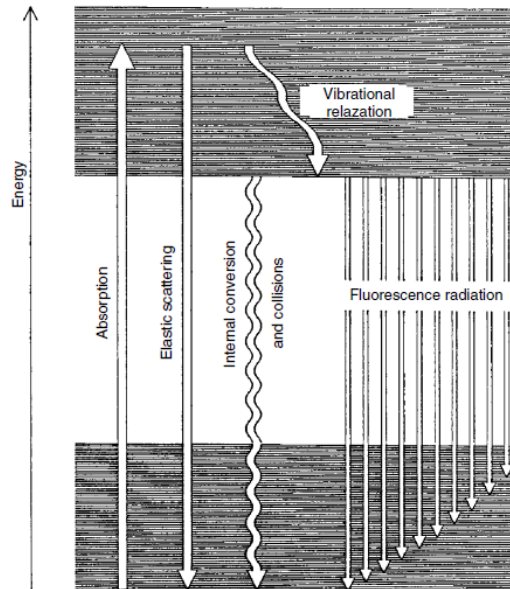
$$a_M(\lambda_1) = a_M(\lambda_2)[\lambda_1/\lambda_2]^{-m} \quad (1.3.4)$$

όπου  $m$  ο εκθέτης Ångstroem που στην περιοχή της υπεριώδους ακτινοβολίας λαμβάνει τυπικές τιμές μεταξύ 0.6 και 1.5.

Η ατμοσφαιρική σκέδαση μπορεί να είναι και μη ελαστική από τα μόρια της ατμόσφαιρας, η λεγόμενη σκέδαση Raman, η οποία παρατηρείται στην περίπτωση διάδοσης ισχυρής παλμικής λειτουργίας laser. Τα μόρια διεγείρονται από μία δέσμη συχνότητας  $f_0$ , σε ένα εικονικό ενεργειακό επίπεδο και μεταπίπτουν σε μία τελική ταλαντωτική ενεργειακή στάθμη. Όταν βρίσκονται στη θεμελιώδη ενεργειακή κατάσταση, αλληλεπιδρούν με τη δέσμη laser και αποδιεγείρονται σε ανώτερη τελική, προκύπτει η σκέδαση Raman Stokes (εκπομπή φωτονίων μικρότερων συχνοτήτων), ενώ όταν είναι ήδη διεγερμένα, διεγείρονται από τη δέσμη laser και μεταπίπτουν σε ένα τελικό κατώτερο επίπεδο, προκύπτει η σκέδαση Raman Anti-Stokes (εκπομπή φωτονίων μεγαλύτερων συχνοτήτων).

Να σημειωθεί ότι οι μεταβάσεις δεν γίνονται μόνο μεταξύ των ταλαντικών ενεργειακών επιπέδων, αλλά και μεταξύ των περιστροφικών και, επομένως, προκύπτει ένα φάσμα πολλαπλών μεταβάσεων.

Επιπλέον, εάν ένα μόριο ή σωματίδιο είναι οργανικό ή σωματίδιο που φέρει οργανική ύλη ή και στερεά ή υγρά που έχουν ισχυρές μοριακές αλληλεπιδράσεις (οι οποίες δίνουν ένα ευρύ φάσμα απορρόφησης και εκπομπής) και αλληλεπιδράσουν με υπεριώδη ακτινοβολία (ή και ελάχιστα ορατό), τότε αυτά φθορίζουν (και σκεδάζουν ελαστικά την αρχική ακτινοβολία), δηλαδή κατά τη μετάπτωση εκπέμπουν φωτόνια σε μεγαλύτερα μήκη κύματος από την προσπίπτουσα ακτινοβολία που σημαίνει ότι παράγεται υπεριώδης ή ορατή ακτινοβολία (Σχήμα 1.3.1).



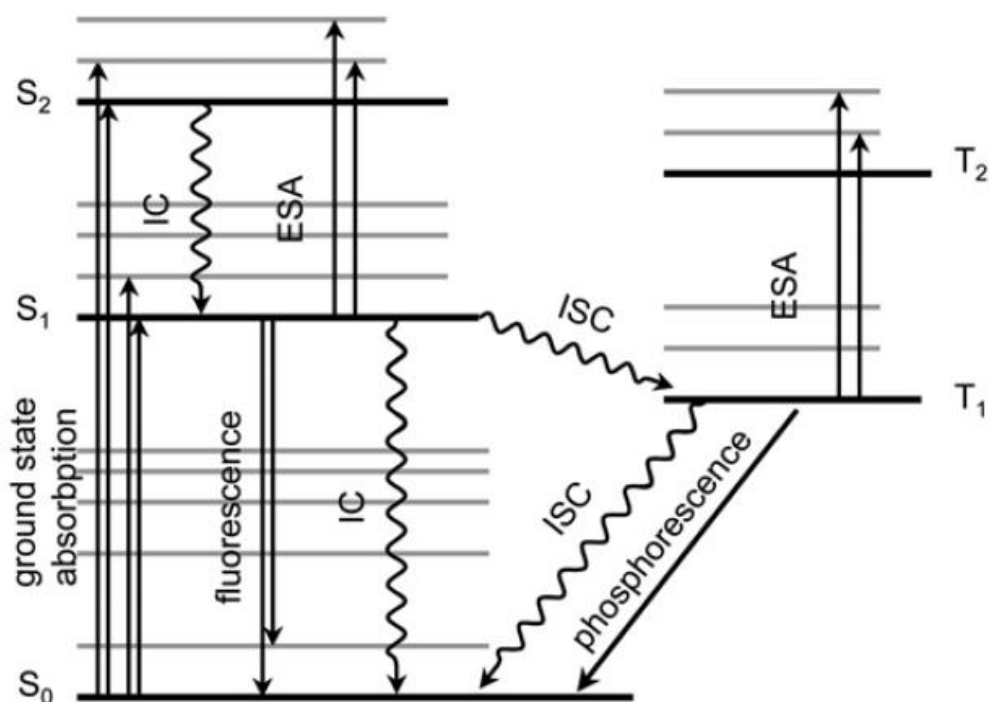
ΣΧΗΜΑ 1.3.1: Η διαδικασία φθορισμού (Fujii et al., 2005).

Ο φθορισμός διευκολύνει τη μελέτη περίπλοκων οργανικών μορίων καθώς οι δεσμοί του «καταπιέζουν» τα περιστροφικά ενεργειακά επίπεδα και κατ'επέκταση τα ταλαντωτικά ενεργειακά επίπεδα των ηλεκτρονίων και για να επιτευχθεί η διέγερση των επιπέδων, πρέπει η προσπίπτουσα ακτινοβολία να βρίσκεται εντός του φάσματος απορρόφησης. Η διέγερση μπορεί να μην είναι αρκετά αποτελεσματική πολλές φορές λόγω της διαφοράς στην απορροφητικότητα (δεν απορροφά παντού το ίδιο ένα υλικό) και ανεξάρτητα από αυτή, όσο πιο έντονη είναι η αρχική ακτινοβολία τόσο πιο έντονο είναι το φαινόμενο του φθορισμού. Όσο πιο μικρό μήκος κύματος χρησιμοποιηθεί στο φάσμα της υπεριώδης ακτινοβολίας τόσο περισσότερο θα φαίνεται ολόκληρο το αποτύπωμα του φθορισμού, όμως είναι σημαντικό για κάθε ουσία να εξετάζεται η απορροφητικότητά της, καθώς μπορεί ένα μήκος κύματος να είναι κατάλληλο για ένα μέρος του φάσματος του φθορισμού και ένα άλλο να είναι κατάλληλο για το υπόλοιπο (Fujii et al., 2005).

Η ακτινοβολία που εκπέμπεται είναι χρονικής διάρκειας τάξης μεγέθους  $nsec$ , είναι χαμηλότερης έντασης από αυτήν της διεγείρουσας ακτινοβολίας και αποτελεί ένα συνεχές φάσμα. Να σημειωθεί ότι στα φάσματα φθορισμού δειγμάτων, που εμπεριέχονται μέσα σε νερό ή είναι νερό, είναι πιθανή η ύπαρξη κορυφής λόγω σκέδασης Raman (πιο συγκεκριμένα τα  $355\text{ nm}$  δίνουν κορυφή Raman στα  $407\text{ nm}$ ; Fujii et al., 2005). Το διάγραμμα Jablonski (Σχήμα 1.3.2) εξηγεί εικονικά το φαινόμενο του φθορισμού.

Ο φθορισμός χαρακτηρίζεται από δύο μεγέθη, την κβαντική απόδοση και τον χρόνο

ζωής της μετάπτωσης. Η κβαντική απόδοση ορίζεται ως ο λόγος του ρυθμού των εκπεμπόμενων φωτονίων προς όλες τις κατευθύνσεις (αυθόρμητη εκπομπή) προς το ρυθμό απορρόφηση φωτονίων ή προς το άθροισμα του ρυθμού αυθόρμητης εκπομπής και του ρυθμού μη-ακτινοβολιακής εκπομπής (θερμότητα). Ο νεκρός χρόνος είναι το χρονικό διάστημα της μετάβασης από τη θεμελιώδη στη διεγερμένη κατάσταση και της εκπομπής της φθορίζουσας ακτινοβολίας και ορίζεται ως το ανάστροφο άθροισμα των ρυθμών ακτινοβολιακής και μη εκπομπής.



**ΣΧΗΜΑ 1.3.2:** Το διάγραμμα Jablonski (Zimmermann et al., 2003). Η θεμελιώδης, 1<sup>η</sup> και 2<sup>η</sup> ενεργειακή μονήρη (singlet) στάθμη συμβολίζονται με  $S_0$ ,  $S_1$  και  $S_2$  αντίστοιχα. Άλλοι συμβολισμοί όπως IC, ESA και ISC σημαίνουν αντίστοιχα Internal Conversion (εσωτερική μετατροπή-κλασική μετάπτωση) η οποία αφορά την αποδιέγερση κατά την H/M αλληλεπίδραση ενός ηλεκτρονίου με τον πυρήνα, Excited State Absorption (απορρόφηση στην ήδη διεγερμένη κατάσταση) η οποία αφορά την πιθανή απορρόφηση ακτινοβολίας όταν το μόριο είναι ήδη διεγερμένο (διεγείροντάς το περισσότερο) και InterSystem Crossing (διασυστηματική μετάπτωση) όπου παρατηρείται αποδιέγερση (χωρίς την αποβολή φωτονίου) από τις διεγερμένες καταστάσεις σε μία τριπλή (triplet) κατάσταση,  $T_1$ . Κατά την αποδιέγερση στη θεμελιώδη κατάσταση παρατηρείται η εσωτερική μετατροπή και φθορισμός από τη μονήρη κατάσταση, ενώ διασυστηματική μετάπτωση και φωσφορισμός (παρόμοιο και πιο αργό φαινόμενο σε σχέση με τον φθορισμό και μπορεί να προκληθεί από το ορατό φως) με από την τριπλή κατάσταση.

## 1.4 ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΑ-ΒΙΟΑΕΡΟΛΥΜΑΤΑ

Η ατμόσφαιρα αποτελείται και από πρωτογενείς και δευτερογενείς αέριους ρύπους, κάποιοι από αυτούς είναι αέρια όπως το μεθάνιο και το διοξείδιο του άνθρακα, αλλά και

στερεά ή υγρά αιωρούμενα σωματίδια (αερολύματα-aerosols) που ποικίλλουν στο μέγεθός τους, τα χαρακτηριστικά τους, τη συγκέντρωσή τους και την πηγή προέλευσης. Δρουν ως φορείς βιολογικών ρυπαντών (βιοαερολύματα) και μπορεί να είναι ραδιενεργά. Συμβάλλουν στην Παγκόσμια Κλιματική Αλλαγή (ΠΚΑ) άμεσα ή και έμμεσα (IPCC, 2007) και ανάλογα με το μέγεθός τους προκαλούν προβλήματα υγείας (Araujo et al., 2009; Λαζαρίδης, 2015; Donaldson et al., 2000; Hughes, 1996). Με βάση το μέγεθός τους τα αιωρούμενα σωματίδια διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες (Seinfeld et al., 2006):

- Μικροί Πυρήνες: σωματίδια με διάμετρο  $3 \text{ nm} < d < 10 \text{ nm}$ .
- Σωματίδια Aitken: σωματίδια με διάμετρο  $10 \text{ nm} < d < 0.1 \text{ }\mu\text{m}$ .
- Συσσωματώματα: σωματίδια με διάμετρο  $0.1 \text{ }\mu\text{m} < d < 2 \text{ }\mu\text{m}$ .
- Γιγάντια Σωματίδια: σωματίδια με διάμετρο  $2 \text{ }\mu\text{m} < d$ .

Η παραμονή των σωματιδίων μεγάλης διαμέτρου είναι βραχυχρόνια λόγω βαρυτικής έλξης. Τα μικρότερα σωματίδια διαχέονται πιο εύκολα. Οι μικροί πυρήνες και τα σωματίδια Aitken εντάσσονται στα υπέρλεπτα σωματίδια. Τα υπέρλεπτα σωματίδια με τα συσσωματώματα αποτελούν τα λεπτά σωματίδια. Τα αερολύματα μπορούν να διακριθούν και με βάση την προέλευσή τους:

- Θαλάσσια προέλευση (θαλάσσια σωματίδια)
- Ηπειρωτική προέλευση (ηπειρωτικά σωματίδια)
- Πολική προέλευση (πολικά σωματίδια)

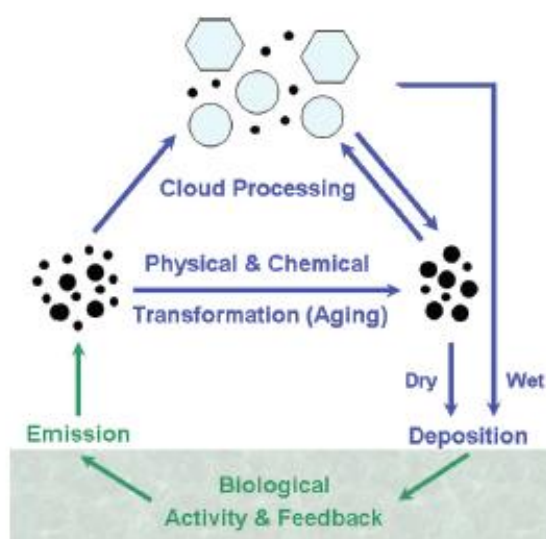
Τα ηπειρωτικά σωματίδια μπορούν να χωριστούν στα αστικά (καυσαέρια πόλης), στα αγροτικά (αγροτική δραστηριότητα, καύση βιομάζας), στα χερσαία (σκόνη από χώμα, βουνά κτλ), στα ερημικά (προέλευση από ερήμους) και στα ηφαιστειακά (στάχτη, θραύσματα, ηφαιστειακά αέρια).

Ως βιοαερολύματα (bioaerosols) ή αλλιώς βιογενή σωματίδια ορίζονται εκείνα τα σωματίδια τα οποία είναι βιολογικής προέλευσης μικροβιακής, φυτικής ή ζωϊκής. Μπορεί να είναι ζωντανοί οργανισμοί, προϊόντα ή τμήματα αυτών. Το βιοαερόλυμα περιλαμβάνει ιούς, βακτήρια, μύκητες, γυρεόκοκκους, έντομα, φυτικές ίνες, ενδοτοξίνες, μυκοτοξίνες, πεπτιδογλυκάνες κ.ά. Στον Πίνακα 1.4.1 φαίνονται χαρακτηριστικά αυτών. Όσο πιο μεγάλη είναι η διάμετρός τους τόσο λιγότερο χρόνο παραμένουν στην ατμόσφαιρα.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1.4.1:** Συνήθεις στοιχεία βιοαερολυμάτων (Λαζαρίδης, 2015).

Βιογενή Σωματίδια	Διάμετρος ( $\mu m$ )	Συγκέντρωση ( $m^{-3}$ )
Ιοί	0.02-0.3	---
Βακτήρια	0.3-10	0.5-1000
Σπόρια Μυκήτων	1-100	0-10000
Γύρη	10-100	0-1000

Τα βιοαερολύματα όταν εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα συμμετέχουν σε φυσικές και χημικές διεργασίες, δρουν ως πυρήνες συμπύκνωσης για το σχηματισμό νεφών και εναποτίθενται ξήρα ή υγρά και αλληλεπιδρούν με τα χερσαία οικοσυστήματα όπου εκπέμπονται και άλλα βιοαερολύματα και επαναλαμβάνεται ο κύκλος (Σχήμα 1.4.1). Οι περισσότερες πηγές που εκπεμπούν βιοαερολύματα είναι η χλωρίδα, η πανίδα, οι βράχοι και το χώμα που περιέχουν πολλούς μικροοργανισμούς και η δημιουργία μικροοργανισμών για βιολογικό πόλεμο.



**ΣΧΗΜΑ 1.4.1:** Η ανακύκλωση των βιοαερολυμάτων (Despres et al., 2012).

## 1.5 ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΟΖΟΝ

Το τροποσφαιρικό όζον είναι ένας δευτερογενής ρύπος προερχόμενος κυρίως από φωτοχημικές αντιδράσεις πρωτογενών ρύπων και κυρίως οξειδίων του αζώτου, υδρογονανθράκων και πτητικών οργανικών υδρογονανθράκων ή προέρχεται από στρατοσφαιρική διείσδυση (stratospheric intrusion ή S.T.E. event =stratosphere-troposphere exchange; Holton et al., 1995). Η παρακολούθηση και μελέτη του όζοντος στην τροπόσφαιρα έχει σημασία καθώς το όζον συμβάλλει στην Παγκόσμια Κλιματική Αλλαγή (WMO, 1988; Wang et al., 1994), προκαλεί προβλήματα υγείας (Molfino et al., 1991; Lippmann, 1989) και επιδρά αρνητικά στην ανάπτυξη της βλάστησης (Krupa et al., 1988).

Το μόριο του όζοντος αποτελείται από τρία άτομα οξυγόνου συνδεδεμένα με ομοιοπολικούς δεσμούς με τη γωνία του τύπου να είναι  $116.8^\circ$  και μήκος  $128 \text{ pm}$ . Το φάσμα του όζοντος προκύπτει από ηλεκτρονιακές, δονητικές και περιστροφικές μεταβάσεις από τη φασματοσκοπία Raman. Το όζον είναι ένας αέριος ρύπος που προκύπτει από τη φωτόλυση του διοξειδίου του αζώτου (ένα αέριο μεγάλο σε ποσότητα σε ρυπασμένες περιοχές) (Jacob, 1999; Παπαγιάννης, 2014):



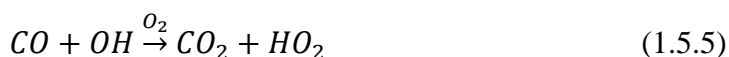
όπου  $M$  είναι συνήθως  $N_2$  ή  $O_2$  που απορροφά την επιπλέον ενέργεια ταλάντωσης της αντίδρασης και σταθεροποιεί το μόριο του όζοντος. Η απομάκρυνση του όζοντος γίνεται με την αντίδραση 1.5.3:



Το βράδυ η απομάκρυνση του όζοντος γίνεται με την αντίδραση 1.5.4 καθώς απουσιάζει η ηλιακή ακτινοβολία:



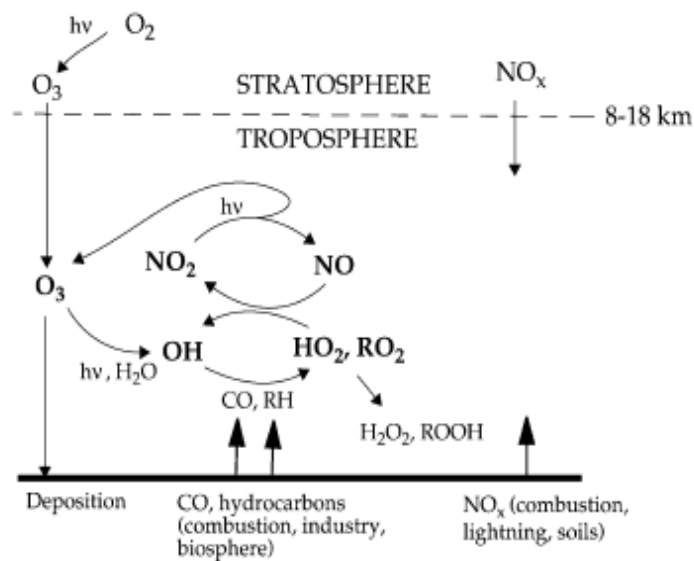
Η χημική αλυσίδα είναι πιο αναλυτική (Jacob, 1999) όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.5.1. Η αντίδραση 1.5.1 και 1.5.2 είναι πιο γρήγορες απ'ό,τι η 1.5.3 και γι'αυτό υπάρχουν μεγάλες συγκεντρώσεις όζοντος. Μία επιπρόσθετη χημική αντίδραση είναι αυτή που συμβάλλει στην παραγωγή  $O_3$  από την καύση βιομάζας:





Από την αντίδραση 1.5.7 παράγεται ατομικό οξυγόνο, που με τη σειρά του συμμετέχει στην αντίδραση 1.5.2 όπου παράγεται όζον.

Σε περιοχές όπου επικρατεί έντονη ανθρώπινη δραστηριότητα, όπως τα μέσα γεωγραφικά πλάτη του Β. Ημισφαιρίου επικρατούν μεγάλες συγκεντρώσεις τροποσφαιρικού όζοντος. Σε πιο απομακρυσμένες περιοχές όπου εξακολουθεί να υπάρχει ανθρώπινη δραστηριότητα, αλλά η φυσική δραστηριότητα υπερισχύει, δεν υπάρχουν συνήθως μεγάλες συγκεντρώσεις όζοντος εκτός και αν η φυσική δραστηριότητα οφείλεται σε καύση βιομάζας (από κεραυνούς) ή σε μεταφορά λόγω ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας (από άλλες ηπείρους ή από τη στρατόσφαιρα).



ΣΧΗΜΑ 1.5.1: Χημική αλυσίδα τροποσφαιρικού όζοντος (Jacob, 1999).

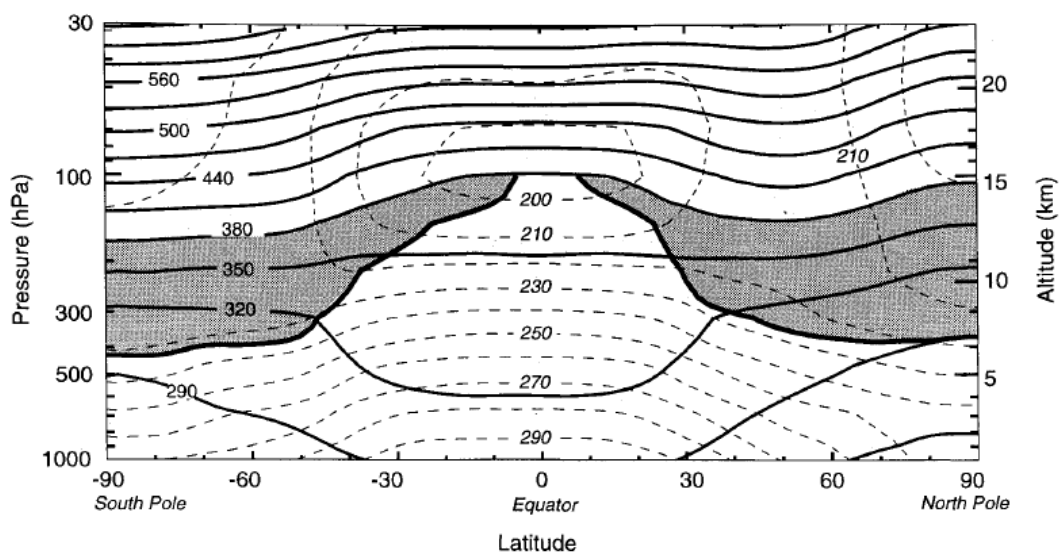
Όσον αφορά τα γεγονότα STE πρέπει να ληφθεί η υπόψη το γεγονός ότι η θερμοκρασία μεταβάλλεται πιο γρήγορα στη στρατόσφαιρα απ'ό,τι στην τροπόσφαιρα (USSA, 1976) και δεν παρουσιάζει τόσες διακυμάνσεις λόγω ευστάθειας και ότι η πίεση μειώνεται με το υψόμετρο. Η στρατόσφαιρα και η τροπόσφαιρα θεωρούνται ως δύο δοχεία που περιέχουν αέρα, διαφέρουν ως προς τη χημική τους σύσταση και την ευστάθεια και ανάμεσά τους βρίσκεται η τροπόπαυση, η οποία ορίζεται ως εκείνο το στρώμα που



παρουσιάζει μείωση του ρυθμού μεταβολής θερμοκρασίας σε  $2 K km^{-1}$  ή λιγότερο και αρχίζει η στατική ευστάθεια (Holton et al., 1995; WMO). Εισάγοντας τη δυναμική θερμοκρασία (potential temperature) αποφεύγεται η παραπάνω σύγχυση. Η δυναμική θερμοκρασία ορίζεται ως εκείνη που θα είχε μια ατμοσφαιρική μάζα εάν είχε υποβληθεί σε μία αδιαβατική ή ισεντροπική διαδικασία (adiabatic or isentropic process) από μία κατάσταση  $(P, T)$  σε μία κατάσταση  $(1000 hPa, \theta)$ :

$$\theta = T \left( \frac{1000 hPa}{P} \right)^k \quad (1.5.8)$$

όπου  $k$  ένας συντελεστής που εξαρτάται από τη δομή του αερίου. Η Σχέση 1.5.8 δε λαμβάνει υπόψη τη διαφορά των τριών στρωμάτων και ούτε την ύπαρξη υγρασίας (στη στρατόσφαιρα απουσιάζουν και στην τροπόσφαιρα γίνονται αρκετά γρήγορα οι κατακόρυφες κινήσεις που δεν προλαβαίνουν να συμπυκνωθούν οι υδρατμοί-η λανθάνουσα θερμότητα απουσιάζει). Με την αύξηση του ύψους αυξάνεται η εντροπία και με βάση τα προαναφερόμενα του υποκεφαλαίου οι ισεντροπικές καμπύλες γίνονται πιο πυκνές στη στρατόσφαιρα (Σχήμα 1.5.2).



**ΣΧΗΜΑ 1.5.3:** Απεικονίζονται οι ισεντροπικές καμπύλες (μαύρες καμπύλες), οι ισόθερμες καμπύλες (διακεκομμένες καμπύλες) και σκιαγραφημένες περιοχές δηλώνουν τα χαμηλότερα επίπεδα της στρατόσφαιρας. Όπως είναι αναμενόμενο η τροπόπαυση κατέρχεται κοντά στους πόλους (μεταξύ  $290 K$  και  $320 K$ ) και ανέρχεται στον Τροπικό (η μέγιστη ισεντροπική καμπύλη της τροπόπαυσης αντιστοιχεί σε δυναμική θερμοκρασία  $380 K$ ). Φαίνεται, επίσης, το πύκνωμα των ισεντροπικών καμπυλών εντός της στρατόσφαιρας σε σχέση με αυτών της τροπόσφαιρας. Είναι πιο πιθανό η διεύθυνση να προκύψει στα μεσαία γεωγραφικά πλάτη καθώς οι ισεντροπικές γραμμές τέμνουν την τροπόπαυση (Holton et al., 1995).

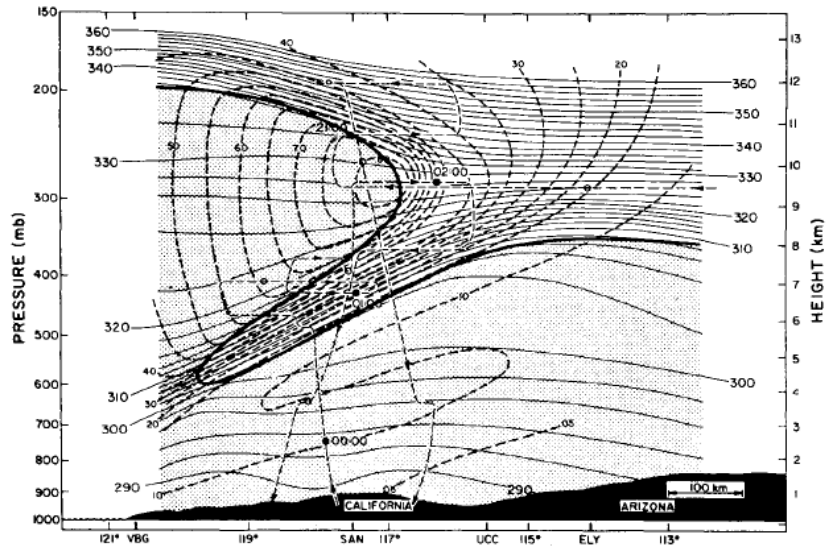
Στο σημείο αυτό είναι χρήσιμο να εισαχθεί και η έννοια του δυναμικού στροβιλισμού, PV (που δηλώνει potential vorticity), όπου ισχύει  $1 PVU (potential\ vorticity\ unit) = 10^{-6} m^2 s^{-1} K kg^{-1}$ , και δηλώνει την απόλυτη κυκλοφορία ενός τμήματος αέρα ο οποίος βρίσκεται μεταξύ δύο ισημερινικών επιφανειών. Στην ισημερινική καμπύλη που αντιστοιχεί σε  $\theta = 380 K$  ισχύει  $PV = 2 PVU$  (Σχήμα 1.5.3) (Holton et al., 1995). Ο δυναμικός στροβιλισμός δίνεται από την ακόλουθη σχέση (Holton et al., 1995):

$$PV = -g \frac{\partial \theta}{\partial p} (\zeta_{\theta} + f) \quad (1.5.9)$$

όπου  $g$ ,  $\frac{\partial \theta}{\partial p}$ ,  $\zeta_{\theta}$  και  $f$  είναι αντίστοιχα η επιτάχυνση της βαρύτητας, η βαθμίδα δυναμικής θερμοκρασίας, ο σχετικός ισημερινικός στροβιλισμός και η παράμετρος Coriolis. Το άθροισμα δίνει τον απόλυτο στροβιλισμό (absolute vorticity). Από τη Σχέση 1.5.9 είναι ξεκάθαρο ότι ο δυναμικός στροβιλισμός είναι ανάλογος της μεταβολής δυναμικής θερμοκρασίας ως προς την πίεση, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι αυξάνεται με το ύψος.

Η στρατοσφαιρική διείσδυση προκύπτει στα μέσα γεωγραφικά πλάτη όπου οι ισημερινικές καμπύλες της στρατόσφαιρας τέμνουν την τροπόπαυση και το ανάποδο, ένα φαινόμενο που είναι γνωστό ως αναδίπλωση τροπόπαυσης (tropopause folding; Σχήμα 1.5.4). Όσο πιο απότομες οι κλίσεις των ισημερινικών επιφανειών, τόσο πιο βέβαιο είναι να παρουσιαστεί το φαινόμενο. Αυτό το φαινόμενο ενδεχομένως οφείλεται στους ετήσιους πολικούς και υποτροπικούς αεροχειμάρρους (ή αλλιώς λέγεται κατάρρευση των κυμάτων Rossby-απόκλιση από τους δυτικούς ανέμους; Holton et al., 1995; Μυτιλιναίος, 2017; Ancellet et al., 1994).

Ένας άλλος σημαντικός μηχανισμός διανταλλαγής STE είναι λόγω των αποκομμένων βαρομετρικών χαμηλών (cut off low) (Ancellet et al., 1991; 1994; Davies et al., 1994; Mytilinaios et al., 2018). Είναι αρκετά πιθανό να προκύψουν βαρομετρικά χαμηλά στην ενδιάμεση και ανώτερη τροπόσφαιρα. Καθώς η μετωπική ύφεση μπορεί να προκαλέσει το παραπάνω φαινόμενο. Το πολικό μέτωπο εισρέει στην κοιλάδα (trough) του κύματος Rossby και όντας, πλέον, πιο βαρύ τμήμα κατέρχεται και αποκόπτεται από τη δυτική κίνηση του ανέμου. Πλέον ο κατερχόμενος ψυχρός πυρήνας θερμαίνεται διαβατικά και αυξάνεται σε ένταση με τη μείωση του ύψους με αποτέλεσμα να σχηματίζονται βαρομετρικά χαμηλά.



ΣΧΗΜΑ 1.5.4: Αναδίπλωση τροπόπαυσης (Holton et al., 1995).

## 1.6 ΜΟΝΤΕΛΟ HYSPLIT ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ FIRE MAPPER

Για τον προσδιορισμό της πηγής του όζοντος (Shan et al., 2009) και γενικά αερίων και σωματιδίων χρησιμοποιούνται αρκετά δύο μοντέλα, το HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) και το FIRMS (Fire Information for Resource Management System) Web Fire Mapper. Το πρώτο αναπτύχθηκε από το περιβαλλοντικό ινστιτούτο NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) με σκοπό τον προσδιορισμό της προέλευσης της αέριας μάζας. Εισάγονται οι συντεταγμένες του εργαστηρίου, η ημερομηνία πραγματοποίησης μετρήσεων, το υψόμετρο στο οποίο εντοπίστηκε στρώμα αέριων ρύπων (κατά προτίμηση το υψόμετρο επάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας, a.m.s.l.), η ώρα που έληξε το πείραμα (σε UTC-universal coordinated time; να σημειωθεί ως παράδειγμα, αν το πείραμα έληξε 20.34 UTC τότε η ώρα που θα συμπληρωθεί θα είναι 20.00 και όχι 21.00 καθώς αυτή διαφορά μπορεί να οδηγήσει σε λάθος συμπεράσματα), η ισοκαμπύλη που ακολουθεί η μάζα (ισοβαρείς, ισητροπικές, κατακόρυφες κινήσεις) και το πλήθος ημερών πριν φτάσει η αέρια μάζα επάνω από το εργαστήριο (εφτά μέρες πριν είναι μία συνήθης επιλογή, ωστόσο εξαρτάται από την περίπτωση). Γίνονται οι υπολογισμοί και παρουσιάζονται οι τροχιές των μαζών, από πιο ύψος ξεκίνησαν και τι κατακόρυφη διαδρομή ακολούθησαν.

Το μοντέλο Fire Mapper αναπτύχθηκε από τη NASA (North Atlantic Space Agency) με σκοπό την παρουσίαση κατανομών πηγών φωτιάς σε όλο τον πλανήτη. Οι εικόνες

προκύπτουν από δορυφορικές τηλεπισκοπήσεις. Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται ο VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), ένας φωρατής τοποθετημένος στο δορυφόρο της NASA και NOAA που ανιχνεύει το ορατό και υπέρυθρο φάσμα για την ανίχνευση φωτιάς με χωρική διακριτική ικανότητα 375 m. Πάλι εισάγεται η ημερομηνία πραγματοποίησης μετρήσεων και το πλήθος ωρών (ή οι μέρες πριν) και παρουσιάζεται η ποσότητα φωτιών ανά τις χώρες. Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω μοντέλων μπορεί να βοηθήσει στο αν η αέρια μάζα προήλθε από φωτιά ή από άλλες πηγές (στην περίπτωση του όζοντος η προέλευση του μπορεί να είναι από καύση βιομάζας ή στρατοσφαιρική διείδυση).

Τέλος, άλλες ιστοσελίδες που χρησιμεύουν για τη μελέτη του όζοντος είναι δορυφορικές εικόνες ή απεικονίσεις με τις κατανομές όζοντος από τους οργανισμούς NASA, WMO, ESA και άλλους. Η μόνη πληροφορία που εισάγεται είναι η επιθυμητή ημερομηνία ή μήνας (μηνιαία μέση τιμή) για να παρθεί η κατανομή όζοντος.

## 1.7 ΓΥΡΗ - ΒΙΟΛΟΓΙΑ ΦΥΤΙΚΟΥ ΚΥΤΤΑΡΟΥ

Η γύρη (pollen) είναι το σύνολο γυρεόκοκκων (pollen grains) που παράγονται στους ανθήρες των ανθών και αποτελούν τους αρσενικούς γαμέτες απαραίτητους για την αναπαραγωγή των φυτών. Ένας γυρεόκοκκος αποτελείται από ένα φυτικό κύτταρο (ενδεχομένως και δύο με τρία φυτικά κύτταρα; Bedinger, 1992) και σε συνθήκες υψηλής υγρασίας αυτά μπορούν να διαρρηχθούν σε κομμάτια διαμέτρου 30 nm – 5 μm (Despres et al., 2012). Η διασπορά της γύρης στην ατμόσφαιρα γίνεται με την ανακύκλωση της ήδη εναποθετόντος γύρης στις διάφορες επιφάνειες, ενώ η εναπόθεση της επιτυγχάνεται με τη θερμοκρασία, την υγρασία, τον άνεμο και τη βαρύτητα και ο χρόνος παραμονής εξαρτάται από τον άνεμο, την πυκνότητα και το μέγεθος του γυρεόκοκκου (Despres et al., 2012). Η παραγωγή γύρης είναι εποχιακή ανάλογα με το φυτό, ωστόσο η ΠΚΑ και τα αποτελέσματά της και οι αλλαγές στο έδαφος μεταβάλλουν ή και παρατείνουν την εποχή παραγωγής της γύρης. Απόρροια αυτού είναι η μακροχρόνια έκθεση αλλεργικών ανθρώπων και η αύξηση πιο βλαβερών συμπτωμάτων ή και ακόμη θνησιμότητα, καθώς η γύρη μπορεί να συνδυαστεί και με άλλους αέριους ρύπους όπως το όζον (Despres et al., 2012).

Τα κύτταρα του γυρεόκοκκου είναι ευκαρυωτικά (eukaryotes), τα οποία αποτελούνται από τον πρωτοπλάστη (protoplast) και το κυτταρικό τοίχωμα (cell wall). Ο πρωτοπλάστης αποτελείται από το κυτόπλασμα (cytoplasm) και τον πυρήνα (nucleus) (Raven et al., 2014). Το κυτταρικό τοίχωμα είναι το εξωτερικό περίβλημα που παρέχει

ακαμψία, στερεότητα, αντοχή στις μηχανικές καταπονήσεις, περιορίζει την επέκτασή του (όταν προσλαμβάνει νερό -χαμηλή υγρασία- το κύτταρο) και εμποδίζει τη ρήξη της πλασματικής μεμβράνης. Όλα τα φυτικά κύτταρα έχουν πρωτογενές κυτταρικό τοίχωμα και δευτερογενές μεταξύ πρωτογενή και πρωτοπλάστη όταν έχει ολοκληρωθεί η κυτταρική αύξηση (Raven et al., 2014). Επίσης, οι πρωτοπλάστες γειτονικών κυττάρων συνδεούνται με πλασμοδέσμες με σκοπό τη μεταφορά ορισμένων συστατικών όπως την καλλόζη (callose), ένας πολυσακχαρίτης, η οποία φράζει τις πλασμοδέσμες σε αντίδραση τραυματισμού ή άλλης καταπόνησης. Το 1 % του κυττάρου είναι νερό και το υπόλοιπο οργανικά μόρια. Τα οργανικά μόρια χωρίζονται σε υδατάνθρακες (carbohydrates), λιπίδια (lipids), πρωτεΐνες (proteins) και νουκλεϊκά οξέα (nucleic acids).

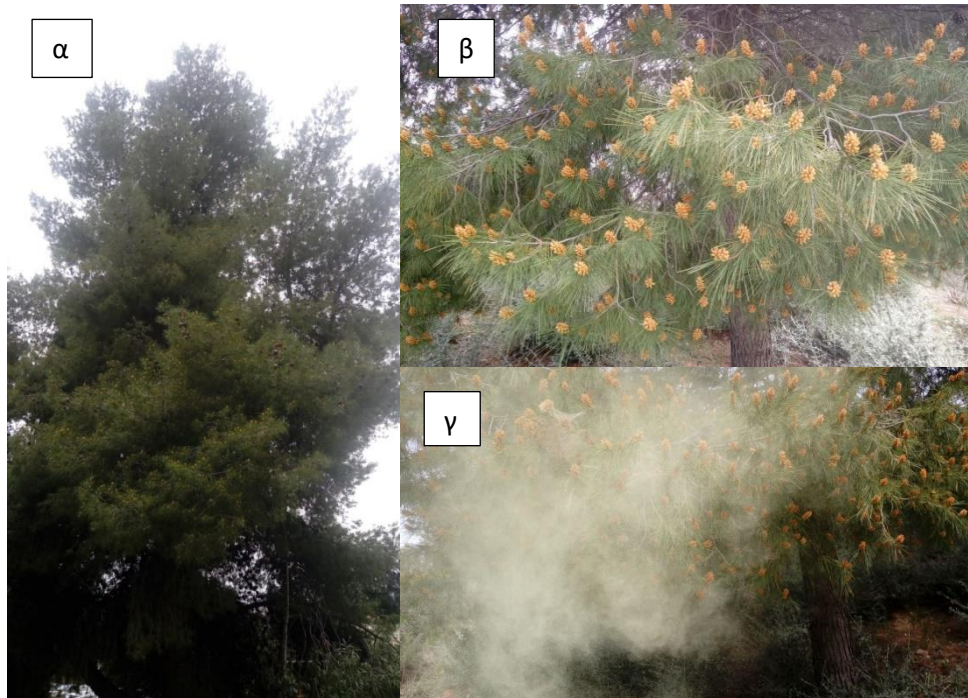
Οι υδατάνθρακες είναι μονοσακχαρίτες (monosaccharides; ριβόζη, γλυκόζη, φρουκτόζη), δισακχαρίτες (disaccharides; σακχαρόζη, μαλτόζη, γαλακτόζη) και πολυσακχαρίτες (polysaccharites; άμυλο, κυτταρίνη). Ο χημικός τύπος των μονοσακχαρίτων είναι  $(CH_2O)_n$  όπου  $n = 3, \dots, 7$ . Ο κάθε άνθρακας ενώνεται με  $OH$  (υδροξυλομάδα) εκτός από έναν, ο οποίος ενώνεται με οξυγόνο (καρβονυλική ομάδα), με τις δύο ομάδες να είναι υδρόφιλες. Ο δισακχαρίτης είναι το παράγωγο του ομοιοπολικού δεσμού δύο μονοσακχαρίτων κατά το οποίο έχει απομακρυνθεί ένα μόριο νερού. Ο πολυσακχαρίτης είναι κυρίως άμυλο (αλυσίδες μορίων γλυκόζης) και κυτταρίνη (cellulose), η οποία αποτελεί δομική ένωση του κυτταρικού τοιχώματος των φυτών. Η κυτταρίνη ως πολυμερές γλυκόζης αποτελεί το δύσκαμπτο ινώδες τμήμα του κυτταρικού τοιχώματος, της οποίας τα μόρια συνδυάζονται για να σχηματίσουν τα μικροϊνίδια (microfibrils). Αυτά είναι εμβαπτισμένα σε ένα στρώμα που περιέχει δύο σύνθετους διακλαδισμένους πολυσακχαρίτες, τις ημικυτταρίνες (hemicelluloses) και τις πηκτίνες (pectins). Οι ημικυτταρίνες σταθεροποιούν το τοίχωμα σχηματίζοντας δεσμούς υδρογόνου με τα μικροϊνίδια, ενώ οι πηκτίνες σχηματίζουν το μεγαλύτερο μέρος της μέσης πλάκας, μία στιβάδα που ενώνει και σταθεροποιεί γειτονικά κυτταρικά τοιχώματα. Να σημειωθεί ότι το πρωτογενές τοίχωμα αποτελείται από τις ημικυτταρίνες, τις πηκτίνες και τις γλυκοπρωτεΐνες (υδροξυπρολίνη), ενώ στο δευτερογενές τοίχωμα βρίσκονται οι ημικυτταρίνες και η λιγνίνη (lignin), η οποία συνεισφέρει στην αντοχή συμπίεσης και στο λύγισμα.

Τα λιπίδια είναι υδρόφοβα μόρια που αποταμιεύουν ενέργεια με τη μορφή ελαίων (κυρίως σε σπέρματα και καρπούς) και είναι δομικοί λίθοι της κυτταρικής μεμβράνης. Η υμενίνη (cutin) και η φελλίνη (suberin) για παράδειγμα είναι μοναδικά λιπίδια και σημαντικά δομικά συστατικά των φυτικών κυττάρων. Τα οποία σχηματίζουν ένα στρώμα εμβαπτισμένο σε κηρούς (waxes), δηλαδή λιπιδικές ενώσεις μεγάλου μήκους αλυσίδες ατόμων άνθρακα.

Οι πρωτεΐνες αποτελούνται από αμινοξέα (aminoacids), οι οποίες είναι πολυμερή μορίων αζώτου. Αποτελούνται από την αμινομάδα,  $NH_2$ , την καρβοξυλομάδα,  $COOH$  και ένα υδρογόνο, όλα ενωμένα με ένα κεντρικό άνθρακα. Κάποια αμινοξέα είναι η γλυκίνη, η ισολευκίνη και η γλουταμίνη.

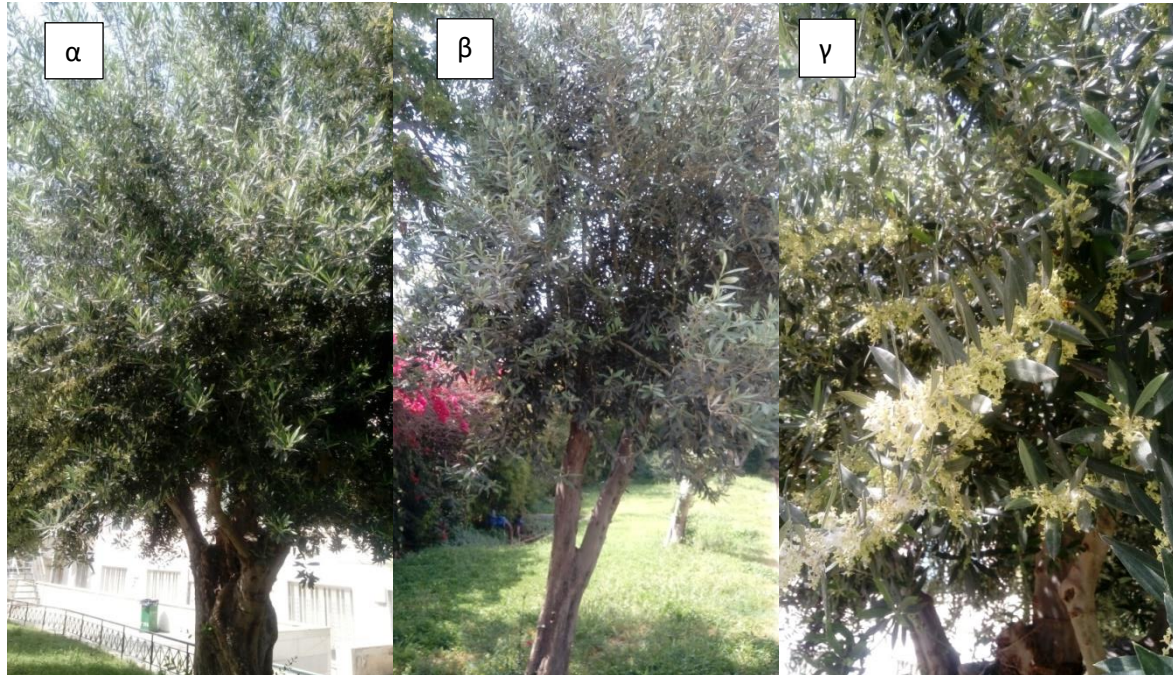
Τα νουκλεϊκά οξέα αποτελούνται από τα νουκλεοτίδια (nucleotides), δηλαδή τη φωσφορική ομάδα, τη ριβόζη (για RNA) ή τη δεοξυριβόζη (για DNA) και την αζωτούχα βάση (αδενίνη), και σε αυτή κωδικοποιείται και μεταφράζεται η πληροφορία που υπαγορεύει τις δομές των πρωτεϊνών.

Δόθηκε περισσότερη έμφαση στους υδατάνθρακες και κατ' επέκταση στα κυτταρικά τοιχώματα καθώς αυτά αλληλεπιδρούν άμεσα εξ επαφής με το περιβάλλον. Στο Κεφάλαιο 4 της παρούσας εργασίας θα δοθεί περισσότερη έμφαση στην απόκριση της γύρης, αφού αλληλεπιδράσει με υπεριώδη ακτινοβολία και θα αιτιολογηθεί με βάση της χημικές ενώσεις που δομούν τα κύτταρα. Θα μελετηθεί η γύρη τριών ειδών φυτών, του κοινού πεύκου της Ελλάδας, *Pinus halepensis* (Σχήμα 1.7.1 α, β, γ), ένα είδος γυμνοσπέρμων που ανήκει στο άθροισμα κωνοφόρων. Ο βιολογικός τους κύκλος διαρκεί δύο χρόνια, ενώ η επικονίαση (pollination) των πεύκων γίνεται την άνοιξη.



ΣΧΗΜΑ 1.7.1: (α) Το δέντρο *Pinus halepensis*. (β) Οι ανθίρες του δέντρου. (γ) Απελευθέρωση της γύρης.

Το δεύτερο είδος που μελετάται είναι το ελαιόδεντρο της Αττικής-Ευρώπης, *Olea europaea* (Σχήμα 1.7.2 α, β, γ), ένα είδος που ανήκει στα αγγειόσπερμα (ανθοφόρα), καθώς σχηματίζει άνθη. Το τρίτο είδος που μελετάται είναι, επίσης, αγγειόσπερμο και είναι η μιμόζα, *Acacia dealbata*. Η επικονίαση της ελιάς και της μιμόζας, επίσης, πραγματοποιείται την άνοιξη.



**ΣΧΗΜΑ 1.7.2:** (α), (β) Δύο ποικιλίες του ελαιόδεντρου *Olea europaea*. (γ) Τα άνθη της ελιάς, όπου και διακρίνεται μία μέλισσα (μέση και δεξιά) που τα επισκέπτεται.

## 1.8 ΠΡΟΓΝΩΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ SILAM

Το προγνωστικό μοντέλο SILAM (System for Integrated modeLLing of Atmospheric coMposition) μοντελοποιεί τη μεταφορά αέριων ρύπων (όζον, οξειδία αζώτου και άλλα), γύρης διάφορων φυτών (ελαιόδενδρων, γρασιδιού και άλλα) και σωματιδίων από πυρκαγιές (καπνός) στην περιοχή της Ευρώπης. Είναι κατάλληλο για ερευνητική δραστηριότητα (Prank et al., 2013) και θέματα εκτάτου ανάγκης. Σε κάθε πρόγνωση παρουσιάζεται η αναμενόμενη αριθμητική πυκνότητα σε  $m^{-3}$ , η ώρα πρόβλεψης και η ημερομηνία στην επιθυμητή περιοχή (Ευρώπη και Βόρεια Ευρώπη). Να σημειωθεί ότι δε λαμβάνει υπόψη τους νετούς.

## 1.9 ΒΑΚΤΗΡΙΑ

Τα βακτήρια είναι προκαρυωτικοί (prokaryotic) οργανισμοί και αποτελούνται από ένα μόνο κύτταρο. Στερούνται πυρήνα που περιβάλλεται από πυρηνικό φάκελο, ωστόσο εντοπίζεται ένα συνεχές μόριο DNA, συνδεδεμένο με μη ιστονικές πρωτεΐνες, στην περιοχή του πυρηνοειδούς (nucleoid). Περιέχει χρωμόσωμα (chromosome) καθώς και ένα ή περισσότερα μικρότερα κυκλικά μόρια DNA που ονομάζονται πλασμίδια (plasmids), τα οποία αναπαράγονται ανεξάρτητα από το χρωμόσωμα και μεταφέρουν σημαντικά γενετικά χαρακτηριστικά. Η πλασματική μεμβράνη του κυττάρου σχηματίζεται από μία λιπιδική διπλοστιβάδα, ωστόσο δεν έχουν στερόλες (είδος λιπιδίου). Όπως και η γύρη, έτσι και τα βακτήρια έχουν κυτταρικό τοίχωμα, αλλά διαφέρει, και δίνει τη χαρακτηριστική μορφή τους. Το κυτταρικό τοίχωμα των βακτηρίων αποτελείται από πεπτιδογλυκάνες (peptidoglycans or murein), οι οποίες αποτελούνται από σάκχαρα και αμινοξέα και είναι υπεύθυνες για την μηχανική αντοχή. Από τα κυτταρικά τοιχώματα (για τους περισσότερους προκαρυώτες) εκκρίνονται κολλώδεις ουσίες, οι οποίες αποτελούνται από πολυσακχαρίτες και κάποιες από πρωτεΐνες και σχηματίζουν ένα στρώμα επάνω στο τοίχωμα γνωστό ως «γλυκοκάλυκας» (glycocalyx) και παίζει καθοριστικό ρόλο στη λοίμωξη (μόλυνση) καθώς επιτρέπει σε ορισμένα παθογόνα βακτήρια να προσκολλώνται σε συγκεκριμένους ιστούς του ξενιστή. Ο γλυκοκάλυκας, επίσης, προστατεύει τα βακτήρια από την ξηρασία.

Επιπρόσθετα χαρακτηριστικά που έχουν τα βακτήρια, πέρα από το γεγονός ότι μπορούν και επιβιώνουν και προσαρμόζονται σε διάφορα περιβάλλοντα (και στα πιο ακραία), είναι τα κοκκία και τα μαστίγια. Τα αποθηκευτικά κοκκία (λιπιδικής σύστασης, πολυ-β-υδροξυβουτυρικό οξύ; poly-β-hydroxybutyric acid) ή τα «αμυλόμορφα» κοκκία (γλυκογόνο; glycogen) χρησιμεύουν ως αποθέματα άνθρακα και ενέργειας, ενώ κάποιοι προκαρυώτες έχουν κοκκία από πολυφωσφορικά άλατα και κοκκία θείου (έχουν παρομοιες λειτουργίες). Τα μαστίγια (flagella) χρησιμοποιούνται από τα βακτήρια (δεν έχουν απαραίτητα όλα) για μετακίνηση, αποτελούνται από πρωτεΐνες, τη λεγόμενη φλαγγελίνη (flagellin) και κατανέμονται σε όλη την επιφάνεια των κυττάρων, ενώ σε άλλα συναντώνται μεμονωμένα ή σε θυσάνους (στο ένα ή και στα δύο άκρα του κυττάρου).

Τα βακτήρια λόγω του μικρού τους μεγέθους παραμένουν περισσότερο χρόνο στην ατμόσφαιρα σε συγκεντρώσεις  $10^4 m^{-3}$  επάνω από την ξηρά και  $10 - 100 m^{-3}$  επάνω από τη θάλασσα (Despres et al., 2012) και συνήθως βρίσκονται προσκολλημένα επάνω σε άλλα σωματίδια (άβια ή έμβια). Δρουν ως παθογόνοι μικροοργανισμοί για τους ανθρώπους και τα ζώα προκαλώντας πνευμονία, φαρυγγίτιδα κ.ά., αλλά και στα φυτά. Πολλαπλασιάζονται



μέσω της κυτταρικής διαίρεσης όταν τρέφονται και συναντώνται και στις τέσσερις γωνίες της Γης, ακόμη και στα πιο απομονωμένα σημεία. Ωστόσο, ανάλογα με την περιοχή θα συναντώται συγκεκριμένα είδη που χτίζει το ερώτημα κατά πόσο ο ανθρώπινος παράγοντας ή η κλιματική αλλαγή επηρεάζει τον αποικισμό των βακτηριών. Η παρουσία των βακτηρίων στον αέρα εξαρτάται από την ανθρώπινη δραστηριότητα, την εποχή, τους μετεωρολογικούς παράγοντες κ.ά., με τα νούμερά τους σε συγκέντρωση να εκτοξεύονται το καλοκαίρι και τον φθινόπωρο κατά το πρωί και το απόγευμα (Despres et al., 2012). Το χειμώνα οι συγκεντρώσεις είναι μέγιστες παράκτια και εντός πόλεων παρατηρείται μεγάλη διακύμανση (Despres et al., 2012). Όταν παρατηρούνται στα βουνά θεωρείται ότι προήλθαν από τα μεγάλα ύψη ή και μεταφέρθηκαν από αέρια ρεύματα, με τις κατακόρυφες μεταφορές τους να οφείλονται σε ανθρώπινη δραστηριότητα ή έκρηξη ηφαιστειών ή καταιγίδων κ.ά..

Στην παρούσα εργασία θα μελετηθούν δύο είδη του γένους *Bacillus*.

## 1.10 ΜΥΚΗΤΕΣ

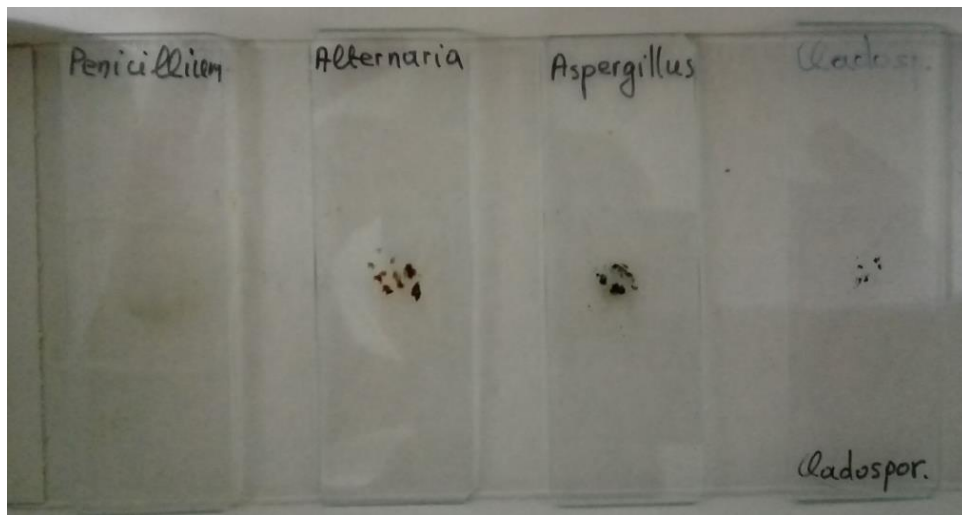
Οι μύκητες είναι ευκαρυωτικοί, ετερότροφοι οργανισμοί, οι οποίοι είναι πολυκύτταροι και λίγοι από αυτούς είναι μονοκύτταροι. Ζουν κυρίως στο έδαφος με τους περισσότερους να είναι νηματοειδείς σχηματίζοντας σωληνοειδή νημάτια τις υφές (hyphae), το σύνολο των οποίων αποτελεί το μυκήλιο (mycelium). Οι υφές διαιρούνται με εγκάρσια διαφράγματα, τα οποία ονομάζονται «σέπτα» (septa), ενώ αυτές που δεν έχουν σέπτα (aseptate) σημαίνει ότι περιέχουν ένα κοινό κυτόπλασμα με πολλούς πυρήνες.

Οι μύκητες έχουν κυτταρικό τοίχωμα, το οποίο συνιστάται κυρίως από χιτίνη (chitin). Διακρίνονται σε σαπροτροφικούς οι οποίοι τρέφονται με νεκρή οργανική ύλη, σε παρασιτικούς και σε συμβιωτικούς. Ο ρόλος των μυκήτων ως σαπροτροφικοί οργανισμοί είναι πολύ σημαντικός. Αποικοδομούν τις πολύπλοκες οργανικές ενώσεις σε απλούστερες συμβάλλοντας στην ανοργανοποίηση τους και κλείνοντας έτσι τον κύκλο του αζώτου και του άνθρακα. Πολύπλοκα οργανικά μόρια όπως η λιγνίνη μπορούν να αποικοδομηθούν κυρίως και πιο αποτελεσματικά από τους μύκητες.

Οι μύκητες αναπαράγονται με τον σχηματισμό σπορίων που παράγονται αγενώς ή εγγενώς. Πολλοί μύκητες είναι πλειομορφικοί, δηλαδή σχηματίζουν διαφορετικούς τύπους σπορίων κατά τη διάρκεια του βιολογικού τους κύκλου. Η παραγωγή των σπορίων με μείωση και μίτωση αντιστοιχούν στο εγγενές στάδιο (τελειόμορφη) και στο αγενές στάδιο (ανάμορφη), ενώ ολόκληρος ο οργανισμός με όλες τις μορφές του χαρακτηρίζεται ως

ολομορφή (μπορεί ο μύκητας να έχει και τα δύο στάδια ταυτόχρονα; Alexopoulos et al., 1996). Κάποια σπόρια είναι ξηρά και μπορούν και παραμένουν για μεγάλο χρονικό διάστημα στον αέρα με αποτέλεσμα να διανύουν μεγάλες κατακόρυφες και οριζόντιες αποστάσεις (εύρυτατη εξάπλωση μυκήτων). Η απελευθέρωση των σπορίων γίνεται, λοιπόν, με δύο τρόπους, ενεργητικά και παθητικά. Ενεργητικά οι μύκητες δαπανούν ενέργεια, ενώ παθητικά το περιβάλλον δαπανά ενέργεια (φως, βαρύτητα, βροχή, αέρας κ.τ.λ.).

Τα γένη που παρατηρούνται σε μεγάλες συγκεντρώσεις στον αέρα είναι τα *Cladosporium*, *Alternaria*, *Penicillium*, *Aspergillus* (τα οποία και μελετώνται στην παρούσα εργασία; Σχήμα 1.10.1) και τα *Epicoccum* (Despres et al., 2012; Πυρρή, 2008; Λαζαρίδης, 2015).



**ΣΧΗΜΑ 1.10.1:** Τα τέσσερα είδη μυκήτων που μελετώνται. Με τη σειρά εμφανίζονται τα *Penicillium chrysogenum*, *Alternaria alternata*, *Aspergillus niger* και τα *Cladosporium cladosporioides*.

Τα σπόρια των μυκήτων σε ένα αστικό περιβάλλον μπορεί να προέρχονται από τοπικές πηγές παραγωγής, να μεταφέρονται από μεγαλύτερες αποστάσεις (φυσικά οικοσυστήματα, περιοχές με αγροτική δραστηριότητα κ.ά.) ή ακόμη και από αποστάσεις μεγάλης εμβέλειας (π.χ. μεταφοράς σκόνης και βιοσωματιδίων από τη Σαχάρα) (Πυρρή, 2008). Το σχήμα και το μέγεθος των σπορίων των μυκήτων επηρεάζει την αεροδυναμική τους και συνεπώς την παραμονή τους σε αιώρηση στην ατμόσφαιρα. Η συγκέντρωση των σπορίων των μυκήτων στην ατμόσφαιρα κυμαίνεται από  $10^3 - 10^4 m^{-3}$  μύκητες, ενώ η συγκέντρωση της μάζας από  $0.1 - 1 \mu g \times m^{-3}$  (Despres et al., 2012).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΤΕΧΝΙΚΗ LiDAR

#### 2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Η τεχνική LiDAR (Light Detection and Ranging) είναι μία ενεργητική μέθοδος τηλεπισκόπησης με σκοπό την ανίχνευση και παρακολούθηση αέριων ρύπων και αιωρούμενων (βιο)σωματιδίων και τον προσδιορισμό οπτικών παραμέτρων τους, συγκεντρώσεών τους και ατμοσφαιρικών παραμέτρων συναρτήσει του υψομέτρου που εντοπίστηκαν. Η πηγή φωτός είναι το LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) που ανάλογα με την εφαρμογή εκπέμπει στο υπεριώδης ή ορατό ή υπέρυθρο φάσμα. Το laser είναι κατάλληλο για ατμοσφαιρικές εφαρμογές χάρη στις ιδιότητές του: την κατευθυντικότητα, τη μονοχρωματικότητα, τη λαμπρότητα, τη συμφωνία και την πολωσιμότητα (για κάποια laser λόγω της φύσης ή της γεωμετρίας του ενεργού υλικού ή επειδή έχουν προστεθεί πολωτικά οπτικά στο οπτικό αντηχείο τους; Siegman, 1986). Επίσης, η ικανοποιητική χωρική και χρονική διακριτική ικανότητα, οι μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο και στις τρεις διαστάσεις, η μέτρηση πολλαπλών αέριων ρύπων ταυτόχρονα και η δυνατότητα να πραγματοποιούνται μετρήσεις σε αρκετά μεγάλα ύψη της ατμόσφαιρας καθιστούν τα lasers και κατ'επέκταση την τεχνική LiDAR ένα κατάλληλο όργανο για τα πειράματα που ακολουθούν στα Κεφάλαια 3 και 4.

#### 2.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΥΠΙΚΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ LiDAR

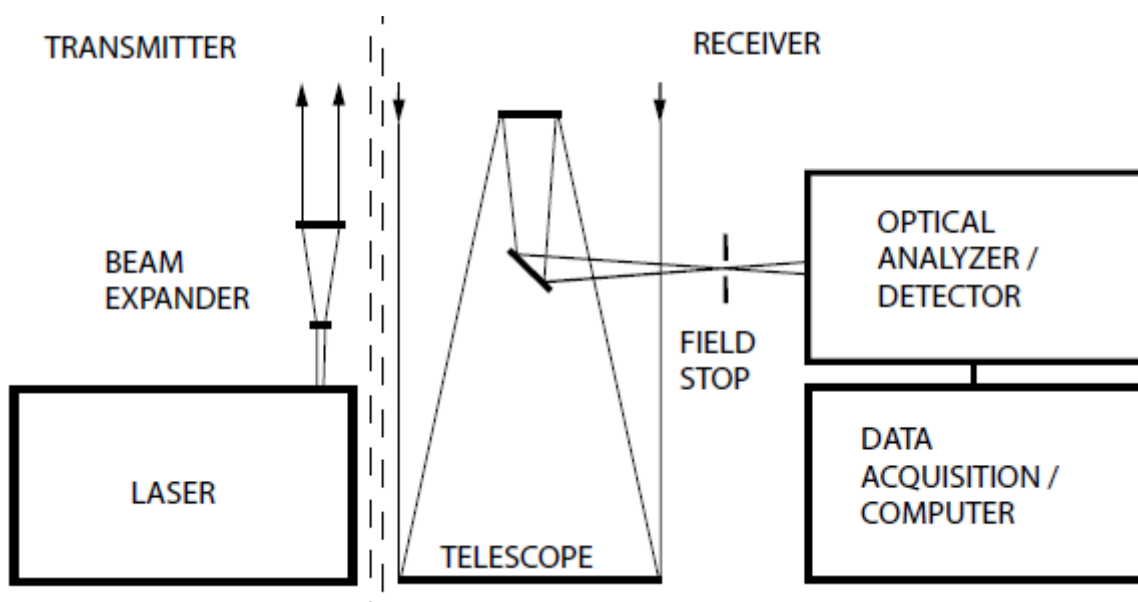
Η δέσμη laser καθώς διαδίδεται στην ατμόσφαιρα και εξασθενεί από τα αέρια και τους ρυπαντές. Ένα μέρος της σκεδάζεται, με το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα να συλλέγεται από το σύστημα λήψης του συστήματος. Τα συγκεντρωμένα φωτόνια μετατρέπονται σε ηλεκτρόνια από τα οποία λαμβάνονται τα δεδομένα και είναι έτοιμα προς επεξεργασία.

Ένα σύστημα lidar αποτελείται από δύο επί μέρους συστήματα (Σχήμα 2.2.1), τον πομπό και το δέκτη. Ο πομπός περιλαμβάνει το laser που πολλές φορές είναι ένα Nd:YAG (που εκπέμπει στο υπέρυθρο και με τη χρήση μη γραμμικών κρυστάλλων εκπέμπει στο ορατό και υπεριώδης), τα οπτικά επέκτασης της δέσμης (για τη μείωση της απόκλισης της

δέσμης και ταυτόχρονα της αύξησης της διαμέτρου της για να καλυφθεί μεγαλύτερη περιοχή) και τη φωτοδίοδο. Πιο συγκεκριμένα, τα συστήματα lidar βασίζονται κυρίως στην παλμική λειτουργία (μέθοδος Q-Switch) για την απόκτηση μεγαλύτερης ενέργειας κορυφής, αλλά και για την καταγραφή του υψομέτρου. Ο παλμός εκκίνησης καταγράφεται από μία φωτοδίοδο και με μια σειρά από ηλεκτρονικά μετράται ο χρόνος μέχρι να επιστρέψει η οπισθοσκεδαζόμενη δέσμη που αντιστοιχεί σε εκείνο τον παλμό κάτι που δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί με ένα σύστημα laser συνεχούς λειτουργίας καθώς δεν είναι γνωστός ο χρόνος εκκίνησης-άφιξης του παλμού. Η ταχύτητα του φωτός είναι γνωστή για τον αέρα και το κενό,  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/sec}$ , ώστε εάν ο χρόνος προσδιορίζεται,  $\Delta t$ , συνεπώς η απόσταση του στόχου υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$d = \frac{c \Delta t}{2} \quad (2.2.1)$$

Ο παράγοντας 2 έχει συμπεριληφθεί διότι η δέσμη διανύει δύο φορές την απόσταση από την πηγή έως τον δέκτη.



ΣΧΗΜΑ 2.2.1: Το σύστημα διάδοσης και λήψης του LiDAR (Weitkamp, 2005).

Ο δέκτης αποτελείται από το τηλεσκόπιο λήψης που είναι, συνήθως, εξοπλισμένος με παραβολικό κάτοπτρο για να εστιάζει τη συλλεγόμενη δέσμη στον οπτικό αναλυτή, είτε άμεσα είτε έμμεσα, μέσω οπτικής ίνας. Στην περίπτωση αυτή το οπτικό πεδίο του

τηλεσκοπίου περιορίζεται σε ένα συγκεκριμένο κωνικό πεδίο όρασης, γνωστό ως πεδίο όρασης (field of view) του τηλεσκοπίου. Αυτομάτως, το τηλεσκόπιο «καλύπτει» μία μεγαλύτερη επιφάνεια στην ατμόσφαιρα απ'ό,τι η ίδια η δέσμη. Ο δέκτης μπορεί να περιέχει μία σειρά από οπτικά συστήματα που καθοδηγούν τη δέσμη μετά τη συλλογή από το τηλεσκόπιο, αλλά αρκετές φορές το κάτοπτρο εστιάζει την οπισθοσκεδαζόμενη δέσμη στο άνοιγμα μίας οπτικής ίνας.

Η χρήση της οπτικής ίνας επιτρέπει την κυματοδότηση της δέσμης στο σύστημα οπτικού διαχωρισμού σε διαφορετικά μήκη κύματος και ακολούθως, τα οποία και ανιχνεύονται με τη χρήση φωτοπολλαπλασιαστών (PMTs-photomultiplier tubes). Η ανίχνευση των σημάτων πραγματοποιείται είτε αναλογικά είτε με καταμέτρηση φωτονίων. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι στα χαμηλά ύψη, όπου η οπισθοσκέδαση είναι πιο ισχυρή, είναι αρκετά δύσκολο να διαχωρισθούν τα φωτόνια στην καταμέτρηση και γι'αυτό λαμβάνεται η συνολική κυματομορφή (αναλογική καταγραφή), ενώ στα μεγαλύτερη ύψη όπου τα σήματα είναι πιο ασθενή είναι εύκολο να καταγραφούν τα φωτόνια καθώς τα φωτοηλεκτρόνια είναι χρονικά διακριτά και ανιχνεύσιμα ένα προς ένα (Hamamatsu, 2001; Παπαγιάννης, 2014). Να σημειωθεί ότι η καταμέτρηση φωτονίων είναι πιο αξιόπιστη λόγω της σταθερότητας του σήματος και του μικρότερου θορύβου. Ακολούθως, τα σήματα αυτά ψηφιοποιούνται και καταγράφονται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Η χρήση των σημάτων lidar με καταμέτρηση φωτονίων, απαιτεί την εφαρμογή της τεχνικής της διόρθωσης του νεκρού χρόνου. Ο νεκρός χρόνος είναι μία χρονική παράμετρος του ψηφιοποιητή η οποία δηλώνει την αδυναμία διάκρισης και καταγραφής ενός φωτονίου στην περίπτωση που δύο φωτόνια καταγράφονται σχεδόν ταυτόχρονα προερχόμενα από την ίδια απόσταση. Η διόρθωση είναι μη γραμμική, και είτε έχει εκθετική μορφή οπότε το σύστημα χαρακτηρίζεται ως paralyzable, είτε έχει κλασματική μορφή οπότε το σύστημα χαρακτηρίζεται ως non paralyzable.

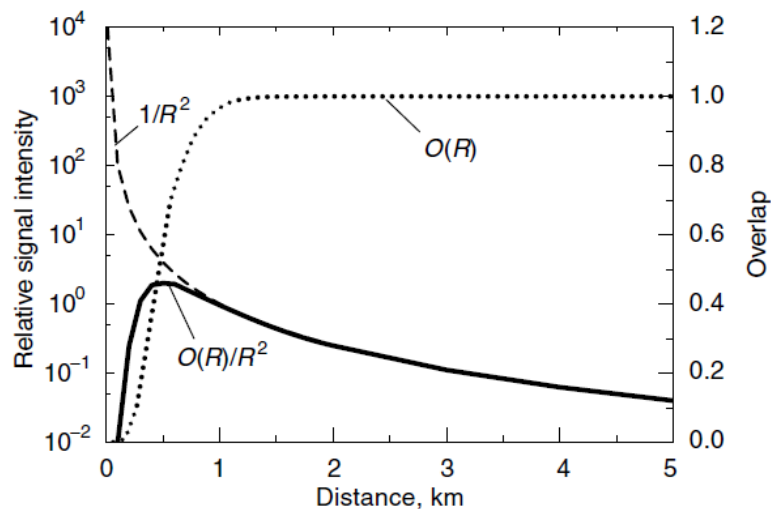
Ένα σύστημα lidar, επίσης, μπορεί να χαρακτηριστεί με βάση τη διάταξη του πομπού (laser) και του δέκτη (τηλεσκοπίου) στο χώρο. Εάν ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται υπό γωνία και είναι αρκετά απομακρυσμένοι, τότε το σύστημα χαρακτηρίζεται ως δι-στατικό (bi-static). Εάν οι οπτικοί άξονες του πομπού και του δέκτη ταυτίζονται, τότε το σύστημα χαρακτηρίζεται ως μονο-στατικό ομο-αξονικό (mono-static co-axial). Εάν οι οπτικοί άξονες του πομπού και του δέκτη είναι παράλληλοι, τότε το σύστημα lidar χαρακτηρίζονται ως μονο-στατικό δι-αξονικό (bi-axial). Το τελευταίο σύστημα είναι προτιμότερο ως προς το μικρότερο θόρυβο, ενώ το άλλο είναι προτιμότερο ως προς τη γεωμετρική επικάλυψη, ωστόσο και τα δύο συλλέγουν πληροφορία από αρκετά χαμηλά ύψη μέχρι και μεγάλα

(τυπικά από μερικές δεκάδες μέτρα έως και μερικά χιλιόμετρα).

Η δέσμη laser που συλλέγεται από το σύστημα λήψης ακολουθεί την εξίσωση lidar στην περίπτωση της ελαστικής σκέδασης (χωρίς μεταβολή του μήκους κύματος) (Weitkamp, 2005):

$$P(r, \lambda) = P_0 \Delta R A \eta \frac{O(r)}{r^2} \beta(r, \lambda) \exp\{-2 \int_0^r a(r', \lambda) dr'\} \quad (2.2.2)$$

όπου  $r$ ,  $\lambda$ ,  $P(r, \lambda)$ ,  $P_0$ ,  $\Delta R$ ,  $A$ ,  $\eta$ ,  $O(r)$ ,  $r^2$ ,  $\beta(r, \lambda)$  και  $\exp\{-2 \int_0^r a(r', \lambda) dr'\}$  είναι αντίστοιχα, η απόσταση του στόχου, το μήκος κύματος της δέσμης, η ισχύς του σήματος κατά τη λήψη, η αρχική ισχύς της δέσμης laser, η χωρική διακριτική ικανότητα, η επιφάνεια του τηλεσκοπίου, η ολική απόδοση του συστήματος, η συνάρτηση επικάλυψης, ο όρος εξασθένησης της δέσμης με το ύψος, ο συντελεστής οπισθοσκέδασης και η διαπερατότητα του μέσου (Σχέση 1.3.2) με έναν παράγοντα 2 καθώς η απόσταση συστήματος lidar-στόχου διανύεται δύο φορές. Σημειώνεται ότι ο λόγος  $A/r^2$  είναι η στερεά γωνία που δηλώνει την ικανότητα ανίχνευσης του σκεδαζόμενου φωτός από απόσταση  $r$  από το τηλεσκόπιο λήψης. Τέλος, ο συντελεστής γεωμετρικής επικάλυψης λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1 και δηλώνει την πιθανότητα η δέσμη laser να βρίσκεται εκτός ή πλήρως εντός του πεδίου οράσης του τηλεσκοπίου. Στην περίπτωση του ομο-αξονικού συστήματος lidar, ο συντελεστής γεωμετρικής επικάλυψης είναι μονίμως 1. Στην περίπτωση δι-αξονικού συστήματος lidar η ένταση ακτινοβολίας που συλλέγεται από το τηλεσκόπιο αυξάνεται αρχικά λόγω ισχυρής σκέδασης και, έπειτα, μειώνεται λόγω εξασθένησης κατά τη διάδοση της δέσμης laser στην ατμόσφαιρα (Σχήμα 2.2.2).



ΣΧΗΜΑ 2.2.2: Η επίδραση του συντελεστή επικάλυψης στο σήμα (Weitkamp, 2005).

### 2.3 ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΣΚΕΔΑΣΗΣ LiDAR

Η απλούστερη μορφή της τεχνικής βασίζεται στην ελαστική σκέδαση της ακτινοβολίας από την ατμόσφαιρα (μόρια και σωματίδια). Η δέσμη laser καθώς διαδίδεται στην ατμόσφαιρα και εξασθεί, δηλαδή ένα μέρος της απορροφάται και το υπόλοιπο σκεδάζεται. Παράλληλα με την ελαστική σκέδαση υφίσταται και η μη ελαστική σκέδαση Raman από τα ατμοσφαιρικά μόρια, ωστόσο το σήμα Raman είναι αρκετά ασθενές και παρατηρείται κυρίως κατά τη νύχτα με τη χρήση κατάλληλων καναλιών.

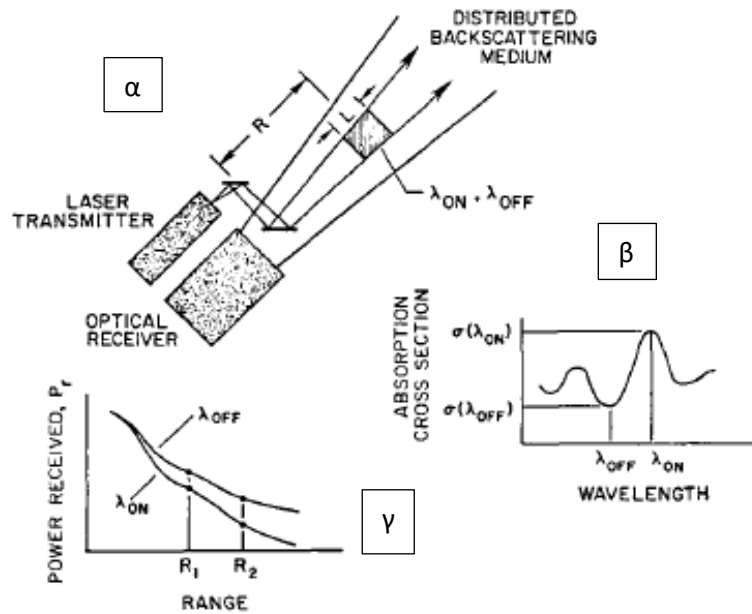
### 2.4 ΤΕΧΝΙΚΗ DIAL

Στην τεχνική Διαφορικής Απορρόφησης LiDAR (DIAL-Differential Absorption Lidar; Σχήμα 2.4.1) εκπέμπονται ταυτόχρονα δύο δέσμες laser με παραπλήσια μήκη κύματος: το ένα να απορροφάται πιο έντονα από το άλλο από το μελετούμενο μόριο, και έτσι μπορεί προσδιοριστεί η αριθμητική πυκνότητα ενός επιθυμητού μοριακού ρυπαντή. Το μήκος κύματος που απορροφάται πιο έντονα συμβολίζεται ως  $\lambda_{on}$ , ενώ το άλλο ως  $\lambda_{off}$ . Ο λόγος των δύο σημάτων δίνει την αριθμητική πυκνότητα του ρυπαντή από τη σχέση DIAL (Weitkamp, 2005):

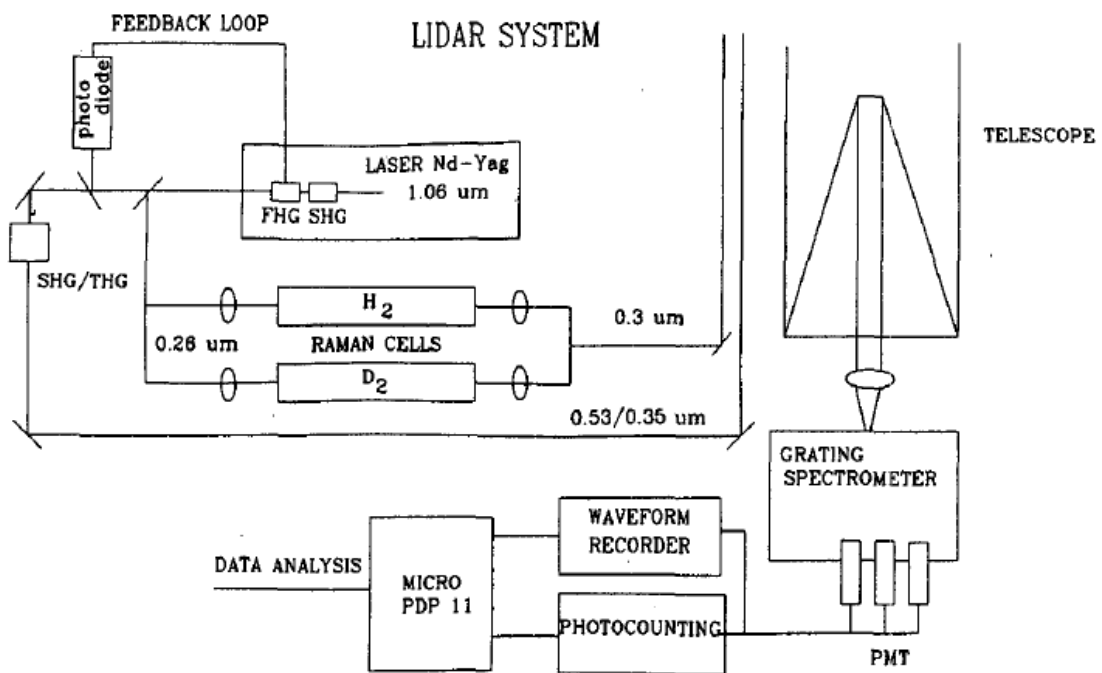
$$n = \frac{1}{2\Delta\sigma} \left\{ \frac{d}{dr} \ln \left( \frac{P_{on}}{P_{off}} \right) \right\} \quad (2.4.1)$$

όπου  $\Delta\sigma = \sigma(\lambda_{on}) - \sigma(\lambda_{off})$ ,  $P_{on}$  και  $P_{off}$  είναι αντίστοιχα η διαφορά των ενεργών διατομών απορρόφησης του μοριακού ρύπου στα δύο μήκη κύματος, η ισχύς του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος στο  $\lambda_{on}$  και στο  $\lambda_{off}$ .

Η παραγωγή των δύο παραπλήσιων μηκών κύματος μπορεί να πραγματοποιηθεί με κυψελίδων Raman (Raman cells) μέσω της τεχνικής της εξαναγκασμένης σκέδασης Raman (Σχήμα 2.4.2). Η σκέδαση πραγματοποιείται σε κυψελίδες υψηλής πίεσης, όπου παράγονται μήκη κύματος μέσω 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> τάξης σκέδασης Raman (π.χ. 266 nm σε 289 nm και 316 nm) (Ancellet et al., 1989; Tzortzakis et al., 2004).



**ΣΧΗΜΑ 2.4.1:** Στην εικόνα απεικονίζεται (α) μία γενική πειραματική διάταξη του συστήματος DIAL, (β) η διαφορά στην ενεργό διατομή απορρόφησης στα  $\lambda_{on}$  και  $\lambda_{off}$  και (γ) η διαφορά ισχύος των δύο οπισθοσκεδαζόμενων σημάτων, η κλίση του  $\lambda_{on}$  σήματος είναι πιο απότομη καθώς απορροφάται περισσότερο (Browell, 1989).



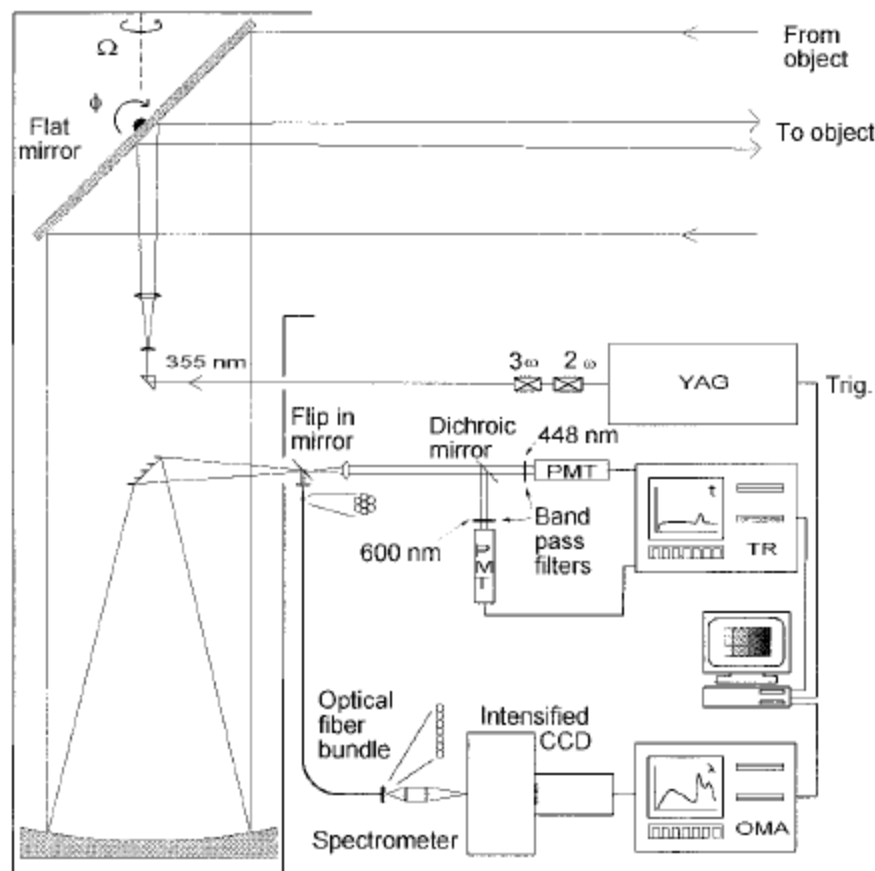
**ΣΧΗΜΑ 2.4.2:** Ένα τυπικό σύστημα DIAL για τη μελέτη τροποσφαιρικού όζοντος λειτουργώντας στο UV-φάσμα. Διακρίνονται οι δύο κυψελίδες Raman, οι οποίες αποτελούνται από υδρογόνο και δευτέριο αντίστοιχα (Ancellet et al., 1989).



## 2.5 ΤΕΧΝΙΚΗ MULTI-SPECTRAL LIF LiDAR

Η τεχνική laser-επαγόμενου φθορισμού (LIF: laser-induced fluorescence) χρησιμοποιείται ευρέως για τη μελέτη της οργανικής ύλης. Ο φθορισμός είναι ένα συχνό φαινόμενο των βιολογικών μορίων που το καθένα δίνει το δικό του σήμα απόκρισης όταν αλληλεπιδράσει με την υπεριώδη ακτινοβολία. Η διάταξη lidar (Σχήμα 2.5.1) ουσιαστικά δεν αλλάζει πέρα από το γεγονός ότι η εκπεμπόμενη μονοχρωματική ακτινοβολία πρέπει οπωσδήποτε να ευρίσκεται στο υπεριώδες φάσμα και να χρησιμοποιηθεί κατάλληλο φίλτρο έτσι ώστε το φασματόμετρο λήψης να ανιχνεύει και να διαβάζει μόνο το σήμα που έχει προέλθει από το φθορισμό και όχι από την ελαστική σκέδαση στο μήκος κύματος εκπομπής της δέσμης laser.

Στην περίπτωση της τεχνικής LIF, η ανιχνευόμενη ακτινοβολία προσπίπτει σε ένα φράγμα περίθλασης, αναλύεται φασματικά και καταγράφεται από έναν ανιχνευτή (π.χ. CCD ή PMT), ο οποίος με τη σειρά του μετατρέπει το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό. Επειδή το σήμα φθορισμού είναι πολύ ασθενές σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία, οι μετρήσεις φθορισμού περιορίζονται στις βραδινές μετρήσεις.



ΣΧΗΜΑ 2.5.1: Μία τυπική διάταξη LIF LiDAR (Weibring et al., 2001).

Η εξίσωση LIF LiDAR είναι παρόμοια με την εξίσωση LiDAR (Fujii et al., 2005; Rao et al., 2017), μόνο που το σήμα που ανιχνεύεται αντιστοιχεί σε ένα φάσμα μηκών κύματος και παράλληλα υπάρχει ένας επιπρόσθετος όρος:

$$\int_{\lambda' - \frac{\Delta\lambda}{2}}^{\lambda' + \frac{\Delta\lambda}{2}} \frac{d^2\sigma}{d\Omega d\lambda} (\lambda', \lambda) d\lambda \quad (2.5.1)$$

όπου  $\lambda'$ ,  $\Delta\lambda$ ,  $\sigma$  και  $\Omega$  είναι αντίστοιχα το μήκος κύματος λόγω φθορισμού, το εύρος του φίλτρου, η ενεργός διατομή και η στερεά γωνία και ισχύει για τη δεύτερη παράγωγο:

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega d\lambda} = \frac{\Psi(\lambda_o)A_1}{4\pi} L(\lambda', \lambda) \quad (2.5.2)$$

όπου  $\Psi(\lambda_o)$  η κβαντική απόδοση που ορίζεται ως ο λόγος των φωτονίων που έχουν εκπεμφθεί προς τα φωτόνια που έχουν απορροφηθεί και:

$$L(\lambda', \lambda) = \frac{2}{\Delta\lambda'} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \exp \left\{ -4 \ln 2 \left( \frac{\lambda - \lambda'}{\Delta\lambda'} \right)^2 \right\} \quad (2.5.3)$$

όπου  $\Delta\lambda'$  το FWHM της φασματικής καμπύλης και  $A_1$  η ενεργή επιφάνεια του στόχου. Η ενεργή επιφάνεια του στόχου δίνεται από τον εξής τύπο:

$$A_1 = \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2 \quad (2.5.4)$$

Ο όρος  $D$  δηλώνει το μέσο μέγεθος –διάμετρο- του βιοαερολύματος.

## 2.6 ΤΕΧΝΙΚΗ ΑΠΟΠΟΛΩΣΗΣ LiDAR

Στην περίπτωση εφαρμογής της τεχνικής αποπόλωσης lidar, η εκπεμπόμενη δέσμη laser είναι συνήθως γραμμικά πολωμένη και κατά τη λήψη του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος χρησιμοποιείται ένας διαχωριστής δέσμης που διαχωρίζει τη συνιστώσα της δέσμης στο κατακόρυφο επίπεδο, s-πόλωση, και στο παράλληλο επίπεδο, p-πόλωση. Ο λόγος των δύο σημάτων δίνει το λόγο αποπόλωσης  $\delta$  (depolarisation ratio):

$$\delta = \frac{P_s}{P_p} \quad (2.6.1)$$

Ο λόγος 2.6.1 μπορεί να γραφεί και ως εξής:

$$\delta = \frac{\beta_s}{\beta_p} \times \exp(T_p - T_s) \quad (2.6.2)$$

όπου  $\beta$  και  $T$  είναι ο συντελεστής οπισθοσκέδασης και η διαπερατότητα της ατμόσφαιρας αντίστοιχα στο κατακόρυφο και το παράλληλο επίπεδο. Η Σχέση 2.6.2 προκύπτει με διαίρεση της 2.2.2 στις δύο περιπτώσεις. Ο εκθετικός όρος αγνοείται καθώς χρησιμοποιείται μόνο στην περίπτωση ανισότροπου υλικού (αλλιώς οι διαπερατότητες της δέσμης στην ατμόσφαιρα θα είναι ίδιες) όπως οι παγοκρύσταλλοι. Από την στιγμή που ο λόγος αποπόλωσης εμπεριέχει τον συντελεστή οπισθοσκέδασης, θα είναι διαφορετικός στα διάφορα μήκη κύματος (ανάλογα την εφαρμογή). Εάν τα μελετούμενα ατμοσφαιρικά μόρια ή σωματίδια είναι σφαιρικά, αναμένεται να προκύψει ένα αρκετά μικρό ή και μηδενικό ποσοστό αποπόλωσης, ωστόσο για ελλειπτικά ή ν-εδρα σωματίδια αναμένεται να αυξηθεί η τιμή του  $\delta$ , τυπικά έως και 0.4 (Weitkamp, 2005). Σε κάθε περίπτωση το λαμβανόμενο σήμα lidar αναλύεται από το διαχωριστή δέσμης σε δύο σήματα: στην s-πόλωση και στην p-πόλωση, με αποτέλεσμα να προκύπτουν διάφορες τιμές του  $\delta$  ανάλογα με το σχήμα του οπισθοσκεδάζοντος σωματιδίου). Ένα σύστημα lidar αποπόλωσης επιτρέπει τον χαρακτηρισμό των αερολυμάτων, ωστόσο δεν αρκεί καθώς χρειάζεται γνώση της αναλογίας διαστάσεων (aspect ratio) (Κεφάλαιο 4), καθώς και ο λόγος lidar (Weitkamp, 2005).



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

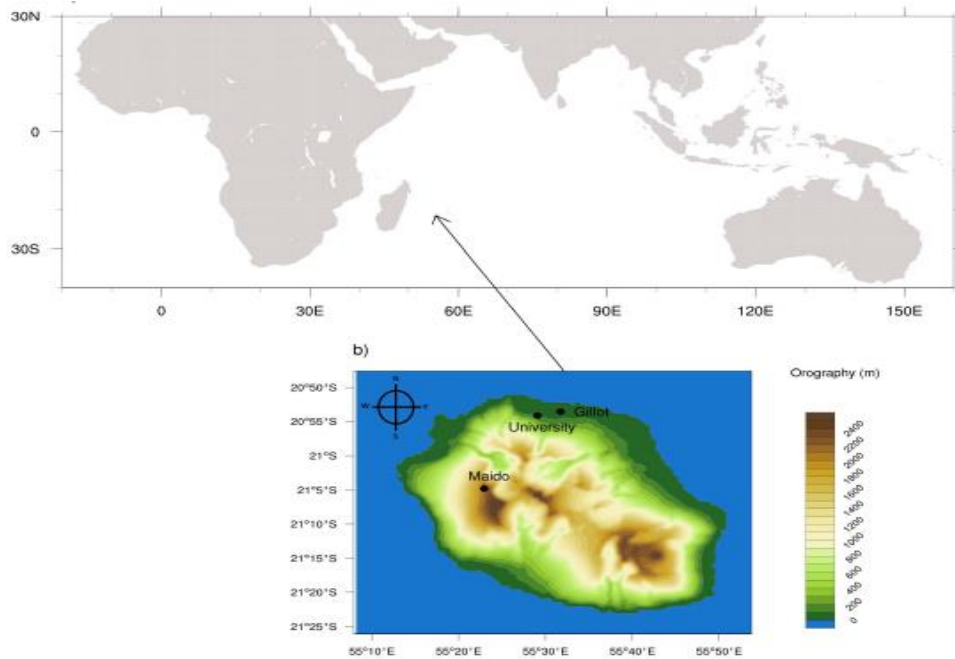
### ΜΕΤΡΗΣΗ $O_3$ ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ DIAL

#### 3.1 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

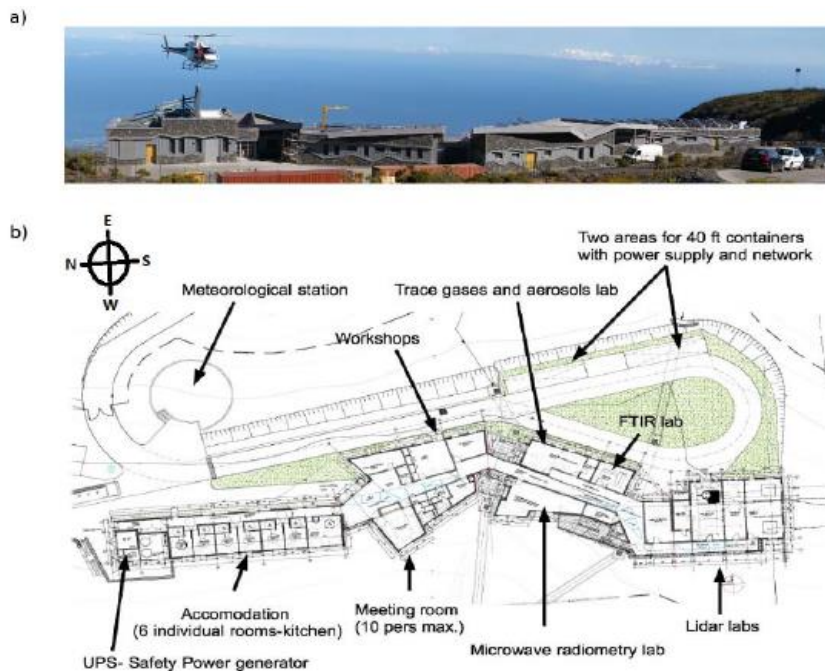
Η σημασία της συστηματικής παρακολούθησης της συγκέντρωσης του όζοντος στην τροπόσφαιρα συζητήθηκε στο Υποκεφάλαιο 1.5. Στην ατμόσφαιρα οι πυκνότητες του όζοντος κυμαίνονται  $(6 - 13) \times 10^{11} \text{ μόρια} \times \text{cm}^{-3}$  στην τροπόσφαιρα και  $(13 \times 10^{11} - 5 \times 10^{12}) \text{ μόρια} \times \text{cm}^{-3}$  στη στρατόσφαιρα, στα μέσα γεωγραφικά πλάτη (Kueger et al., 1976). Άμεσο ενδιαφέρον έχει η αυξημένη ποσότητα όζοντος σε σχέση με τις τυπικές τροποσφαιρικές τιμές, αλλά και η καταγραφή του στη στρατόσφαιρα λόγω της φυσικοχημικής καταστροφής του. Αναφέρθηκε στο Υποκεφάλαιο 1.5 ότι τοπική πηγή του τροποσφαιρικού όζοντος είναι μεταξύ άλλων η εκπομπή υδρογονανθράκων (π.χ. από την καύση βιομάζας), αλλά και η στρατοσφαιρική διείδυση, καθώς και η μεταφορά του από μακρινές αποστάσεις στην ατμόσφαιρα.

Στο Β. Ημισφαίριο σε αντίθεση με το Ν. Ημισφαίριο υπάρχουν αρκετές μελέτες για το όζον, καθώς υπάρχουν αρκετοί μετεωρολογικοί σταθμοί και συστήματα lidar, τα οποία καταγράφουν συστηματικά τις συγκεντρώσεις του ατμοσφαιρικού όζοντος και οι περισσότερες βιομηχανίες του πλανήτη. Στο Ν. Ημισφαίριο υπάρχουν λιγότεροι σταθμοί, επομένως οι αντίστοιχες μετρήσεις να είναι αρκετά χρονικά περιορισμένες. Η περίπτωση του σταθμού καταγραφής του τροποσφαιρικού/ στρατόσφαιρικού όζοντος, στη νήσο Reunion της Γαλλίας (Σχήμα 3.1.1), αποτελεί μια πολύ σημαντική προσπάθεια δημιουργίας μιας μακροχρόνιας καταγραφής της κατακόρυφης κατανομής του όζοντος στο Ν. Ημισφαίριο. Η νήσος Reunion βρίσκεται στον Ισημερινό, στον Ινδικό Ωκεανό, δυτικά της Μαδαγασκάρης. Σε υψόμετρο 2158 m επάνω από την επιφάνεια της θάλασσας (above sea level = a.s.l.) με γεωγραφικές συντεταγμένες  $21.07960^{\circ}S$  και  $55.38410^{\circ}E$  έχει εγκατασταθεί το παρατηρητήριο Maida (Maida Observatory-Σχήμα 3.1.2), εξοπλισμένο με τη δυνατότητα καταγραφής της κατακόρυφης κατανομής της ταχύτητας του ανέμου, διάφορων ατμοσφαιρικών παραμέτρων, αλλά και του όζοντος (Baray et al., 2013). Η τοποθεσία του παρατηρητηρίου το καθιστά ύψιστης σημασίας για την παρακολούθηση του όζοντος καθώς καταφτάνουν σε αυτό αέριες μάζες που διέσχισαν την Αφρική και τη Ν. Αμερική πιθανώς

μεταφέροντας αέριους ρυπαντές που προήλθαν από την καύση βιομάζας (Giannakaki et al., 2016; Cahoon et al., 1992) αλλά και άλλες προερχόμενες από την στρατόσφαιρα μέσω διαδικασιών STE (Baray et al., 2006; Ndarana et al., 2010; Clain et al., 2009).



ΣΧΗΜΑ 3.1.1: Το νησί της Reunion στον Ινδικό Ωκεανό (Baray et al., 2013).



ΣΧΗΜΑ 3.1.2: (α) Το παρατηρητήριο και (β) κάτοψη και περιοχές του παρατηρητηρίου (Baray et al., 2013).

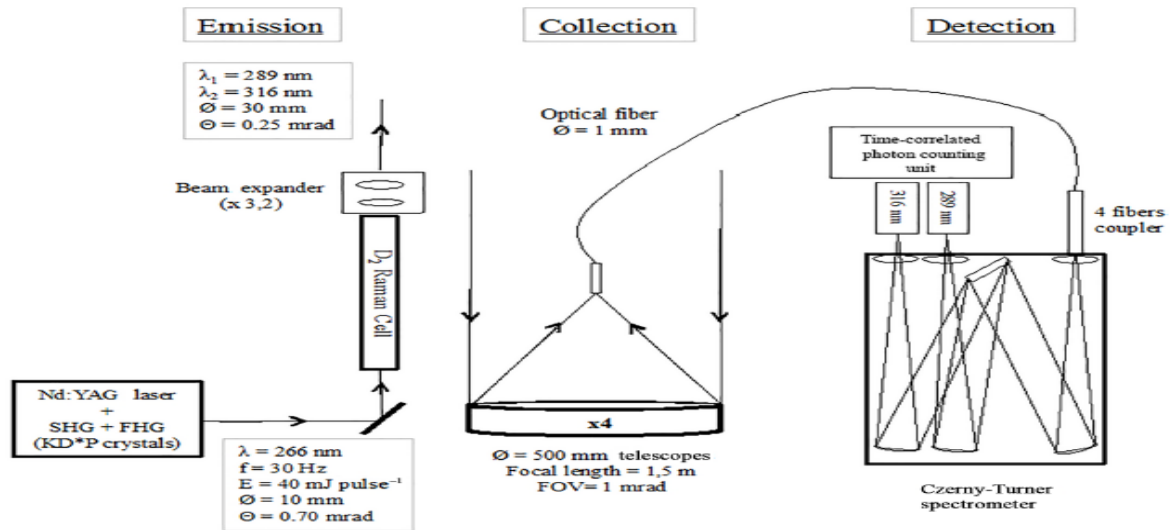
Στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού προγράμματος ACTRIS 2 την χρονική περίοδο 15-30 Μαΐου 2017 πραγματοποιήθηκε ερευνητική αποστολή από μέλος της Μονάδας Τηλεπισκόπησης Laser (Laser Remote Sensing Unit = L.R.S.U.) του Εργαστηρίου Οπτοηλεκτρονικής, Laser και των Εφαρμογών τους (Laboratory of Optoelectronics, Lasers and their Applications), του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π., National Technical University of Athens = N.T.U.A.) με σκοπό την αναγνώριση των αέριων μαζών που καταφτάνουν στην Reunion δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στα σωματίδια καύσης βιομάζας (biomass burning particles = B.B.P.) χρησιμοποιώντας την τεχνική LiDAR (“Identification of Air Masses Arriving Over Mado Observatory with Emphasis on Biomass Burning Particles using Aerosol and Ozone LiDAR techniques”).

Η διαδικασία αφορά την αξιοποίηση των συστημάτων DIAL (Υποκεφάλαιο 2.4) που είναι εγκατεστημένα στο παρατηρητήριο αυτό για την καταγραφή της κατακόρυφης κατανομής του όζοντος στην τροπόσφαιρα, αλλά και την στρατόσφαιρα, σύμφωνα με την αρχή της τεχνικής DIAL. Τέλος, εάν σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρηθούν αυξημένες συγκεντρώσεις όζοντος, τότε αυτές δημιουργούν το έρεισμα για περαιτέρω ανάλυση και μελέτη του φαινομένου, με τη χρήση δορυφορικών και διαγνωστικών ατμοσφαιρικών μοντέλων (OMI, HYSPLIT, κλπ.) προκειμένου να εντοπισθεί η πηγή προέλευσης των μελετούμενων αερίων μαζών.

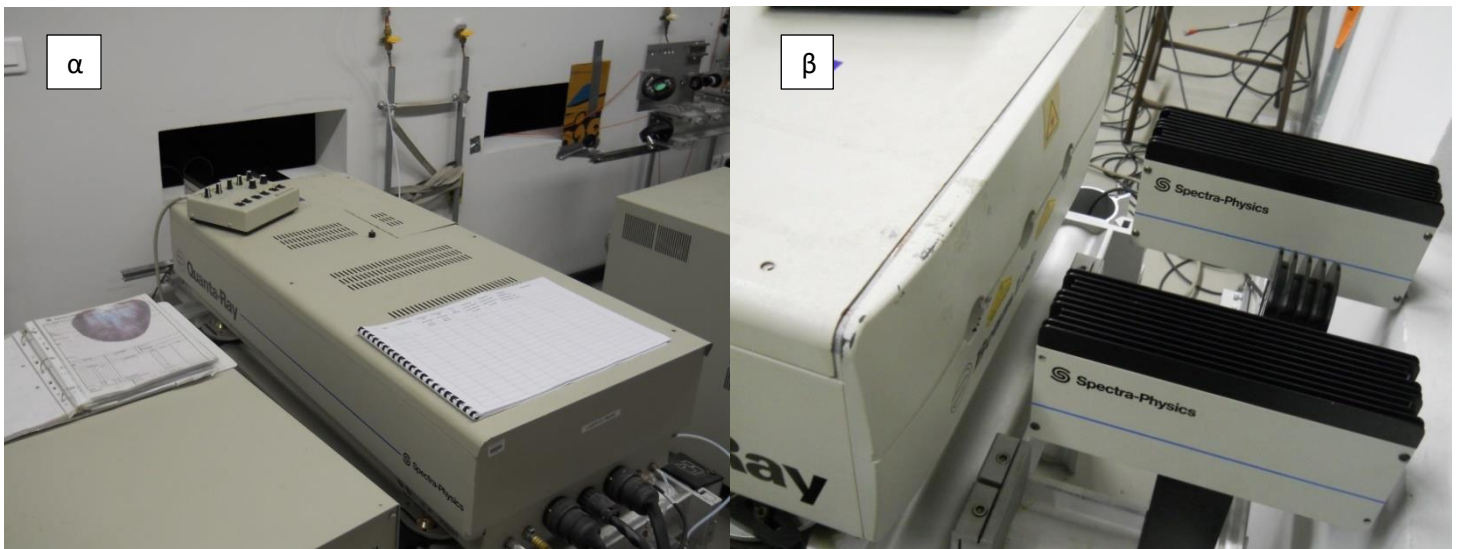
### 3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Για την πραγματοποίηση κατακόρυφων μετρήσεων εντός της τροπόσφαιρας (5 – 17km; Baray et al., 2013; Dufлот et al., 2017; Σχήμα 3.2.1) χρησιμοποιείται το Nd:YAG laser της σειράς Quanta-Ray Pro Series της Spectra-Physics (Σχήμα 3.2.2), ένα laser στερεάς κατάστασης, του οποίου το ενεργό υλικό είναι ένας κρύσταλλος  $Y_3Al_5O_{12}$  (YAG = Yttrium Aluminium Garnet) όπου τα ιόντα  $Y^{3+}$  έχουν αντικατασταθεί από  $Nd^{3+}$  (νεοδύμιο). Η αντιστροφή πληθυσμού επιτυγχάνεται με την άντληση δύο ράβδων του παραπάνω κρυστάλλου από δύο παράλληλες λυχνίες, τοποθετημένες εντός επίχρυσου ελλειπτικού θαλάμου. Από το laser εκπέμπεται υπέρυθρη ακτινοβολία στα 1064 nm, η οποία με την προσθήκη μη γραμμικών κρυστάλλων (SHG + FHG) παράγεται η τέταρτη αρμονική του laser στα 266 nm, η οποία εμπίπτει στην υπεριώδη ακτινοβολία. Η ενέργεια, η συχνότητα, η απόκλιση δέσμης και η διάμετρος της δέσμης είναι αντίστοιχα 40 mJ/pulse, 30 Hz, 0.70 mrad και 10 mm. Η δέσμη διαδίδεται εντός μίας κυψελίδας Raman για την παραγωγή

των μηκών κυμάτων  $289\text{ nm}$  και  $316\text{ nm}$  από την μετατόπιση του αρχικού μήκους λόγω της σκέδασης Raman. Εντός της κυψελίδας (μήκους  $1500\text{ mm}$ , διαμέτρου εισόδου και εξόδου αντίστοιχα  $20\text{ mm}$  και  $55\text{ mm}$ ) εμπεριέχεται δευτέριο,  $D_2$ , υψηλής πίεσης (Tzortzakis et al., 2004).



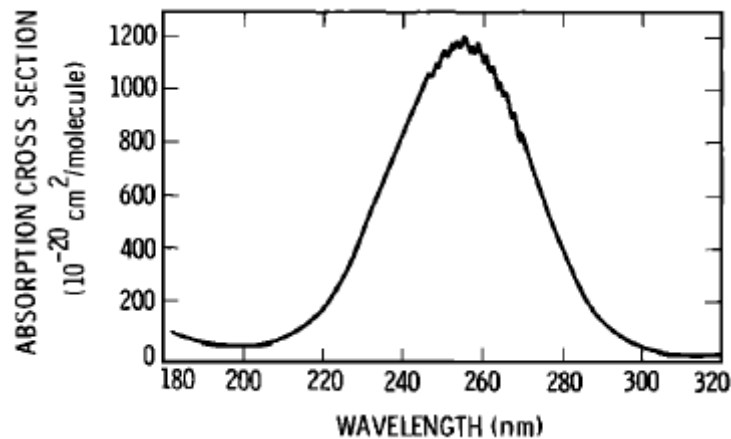
**ΣΧΗΜΑ 3.2.1:** Η πειραματική διάταξη του DIAL του παρατηρητηρίου Mado για τη μελέτη του τροποσφαιρικού όζοντος (Duflo et al., 2017). Ο χώρος των συστημάτων lidar χωρίζεται σε τέσσερα μέρη, το δωμάτιο με τα laser, το δωμάτιο με τα οπτικά διάδοσης και λήψης, το δωμάτιο με τους ψηφιοποιητές και, τέλος, το δωμάτιο με τους υπολογιστές.



**ΣΧΗΜΑ 3.2.2:** (α), (β) Το Nd:YAG laser που χρησιμοποιείται για την τηλεσκοπία του τροποσφαιρικού όζοντος. Από τη μεσαία οπή στη δεξιά εικόνα εκπέμπεται η ακτινοβολία laser στα  $266\text{ nm}$ . Το laser έχει εγκαταστημένο το σύστημα BeamLok, το οποίο μειώνει τις εκτροπές-διακυμάνσεις (λόγω θέρμανσης ενεργού υλικού και μηχανικών δονήσεων) της αρχικά εκπεμπόμενης δέσμης που προέρχεται από την οπτική κοιλότητα.



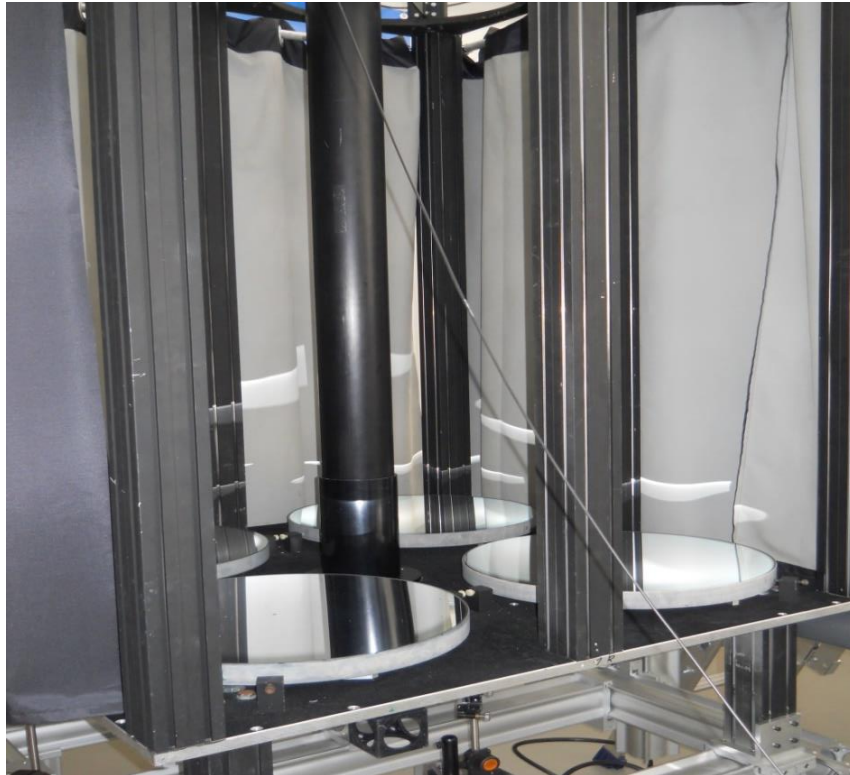
Η εκπομπή των δεσμών 289 και 316 (Ancellet et al., 1989) εκπληρώνουν την προϋπόθεση της τεχνικής DIAL για το γεγονός ότι τα μήκη κύματος πρέπει να είναι παραπλήσια και είναι κατάλληλα για τον εντοπισμό του όζοντος. Το μόριο του όζοντος απορροφά λιγότερο αυτά τα δύο μήκη κύματος σε σχέση με την 4<sup>η</sup> αρμονική συχνότητα (266nm) και μεταξύ τους το ένα απορροφάται περισσότερο από το άλλο (Molina et al., 1986; Σχήμα 3.2.3). Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα ισχύει  $\lambda_{on} = 289 \text{ nm}$  και  $\lambda_{off} = 316 \text{ nm}$ .



**ΣΧΗΜΑ 3.2.3:** Η ενεργός διατομή του  $O_3$  συναρτήσει του μήκους κύματος. Στο εύρος 240 – 270 nm η απορρόφηση είναι αρκετά μεγάλη (Molina et al., 1986). Η ενεργός διατομή απορρόφησης των 289 nm είναι μεγαλύτερη από την ενεργό διατομή απορρόφησης των 316 nm.

Ακολούθως, οι παραγόμενες δέσμες διευρύνονται (μέσω ενός διευρυντή δέσμης) σε διάμετρο 30 mm με τελική απόκλιση δέσμης 0.25 mrad. Τα οπισθοσκεδαζόμενα σήματα lidar συλλέγονται από ένα σύνθετο τηλεσκόπιο τεσσάρων κατόπτρων (διαμέτρου 500 mm έκαστο; Σχήμα 3.2.5) και εστιάζονται στις εισόδους 4 οπτικών ινών με διάμετρο πυρήνα 1.5 mm. Η εστιακή απόσταση και το πεδίο όρασης (FOV) του κάθε κατόπτρου είναι αντίστοιχα, 1.5 m και 1 mrad. Οι τέσσερις οπτικές ίνες καταλήγουν σε έναν συζεύκτη, όπου και ενώνονται. Ακολούθως, η συνολική δέσμη αναλύεται φασματικά από έναν μονοχρωμάτορα τύπου Czerny-Turner, ο οποίος επιτυγχάνει το διαχωρισμό των δεσμών 289 και 316 nm. Οι δύο δέσμες ανιχνεύονται ξεχωριστά από δύο φωτοπολλαπλασιαστές (HamamatsuR9880-110 για τη δέσμη 289nm και HamamatsuR7400P-03 για τη δέσμη 316nm), των οποίων τα σήματα εξόδου ψηφιοποιούνται μέσω των ψηφιακών μετατροπέων της Licel GmbH καταγραφόμενα τόσο με την αναλογική μέθοδο όσο και τη μέθοδο καταμέτρησης φωτονίων. Επιπλέον, χρησιμοποιείται και μία φωτοδίοδος για την καταμέτρηση του χρόνου έναρξης/άφιξης του παλμού laser, καθώς και ένας απορροφητής

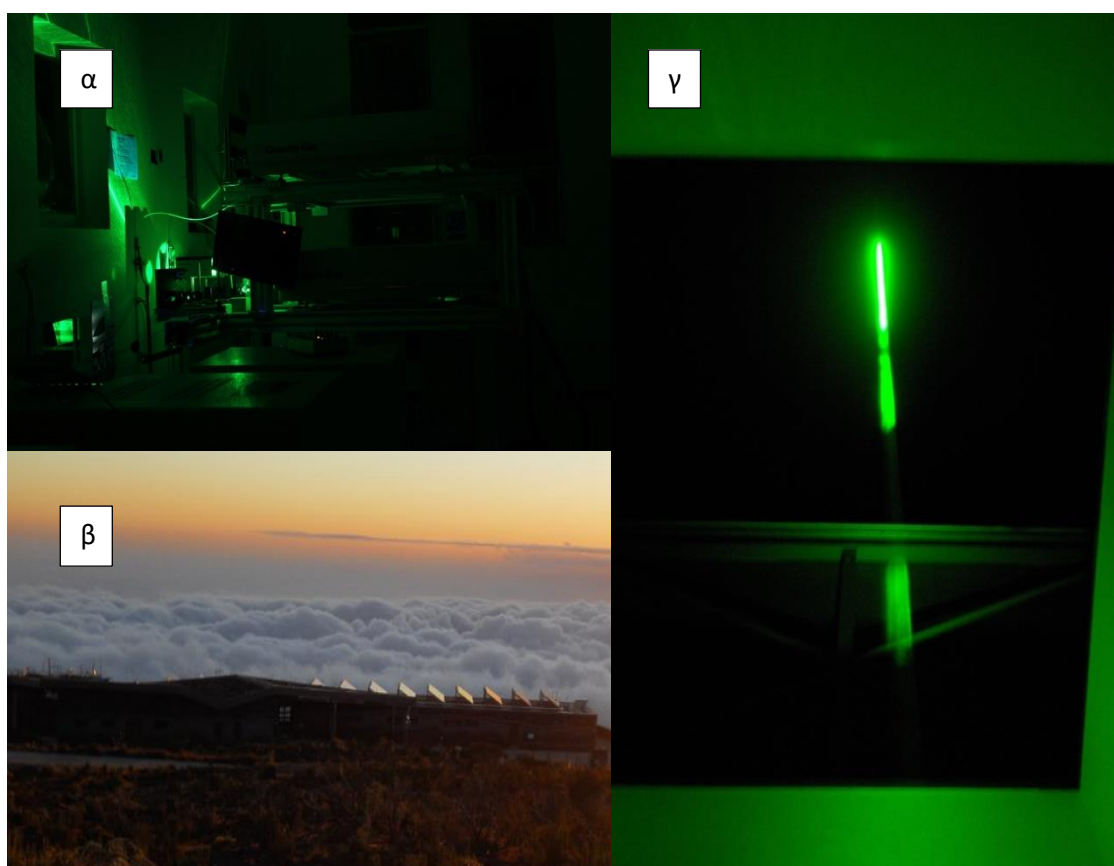
(beamdump) για να απορροφηθούν οι ανεπιθύμητες δέσμες των αρχικών αρμονικών (π.χ. 532 και 1064 nm) που δεν χρησιμοποιούνται.



**ΣΧΗΜΑ 3.2.5:** Τα τέσσερα κάτοπτρα του συστήματος λήψης του τροποσφαιρικού  $O_3$  DIAL. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων το τηλεσκόπιο περικλύεται από μία μαύρη κουρτίνα.

### 3.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας καταγράφηκαν δεδομένα μετρήσεων κατά τη διάρκεια ερευνητικής εκστρατείας στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου ACTRIS, αλλά και από συστηματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν το 2016. Το πλεονέκτημα του παρατηρητηρίου Maido να βρίσκεται σε μεγάλο υψόμετρο έγκειται στο γεγονός ότι η τροπόσφαιρα χαρακτηρίζεται «ελεύθερη», δηλαδή δεν επηρεάζεται άμεσα από τους αέριους ρύπους που παράγονται από ανθρωπογενείς και φυσικές πηγές (ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα; Υποκεφάλαιο 1.1). Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται το απόγευμα με νύχτα (Σχήμα 3.3.1α) για την αποφυγή της ηλιακής ακτινοβολίας (μείωση του ατμοσφαιρικού υποβάθρου/θορύβου), ενώ οι καταβατικοί άνεμοι από τα βουνά, σε συνδυασμό με την ακτινοβολητική ψύξη της ατμόσφαιρας, δημιουργούν νέφη στα χαμηλότερα, από το παρατηρητήριο, υψόμετρα (Σχήμα 3.3.1β). Συνεπώς επάνω από το κτήριο απουσιάζουν σχεδόν 100 % τα νέφη (Σχήμα 3.3.1γ).



**ΣΧΗΜΑ 3.3.1:** (α; Picture by Dr. Guillaume Payen, Reunion Island) Λειτουργία τριών Nd:YAG laser κατά τη νύχτα για την ανάκτηση κατακόρυφων κατανομών της υγρασίας, της θερμοκρασίας και του τροποσφαιρικού όζοντος. (β) Η κάθοδος των σύννεφων κατά το απόγευμα. (γ) Ένα αχνό νέφος διασταυρώνεται με την πορεία της δέσμης των 532 nm (για την ανάκτηση των οπτικών παραμέτρων των σωματιδίων) με την οποία και αλληλεπιδρά (έντονο πράσινο).

Η επεξεργασία των δεδομένων lidar, ύστερα από την ψηφιοποίησή τους, ακολουθεί τα εξής στάδια προκειμένου να παραχθεί η κατακόρυφη κατανομή της αριθμητικής πυκνότητας του όζοντος:

- Ανάγνωση των αρχείων που παρέχει ο ψηφιοποιητής και μέση τιμή δεδομένων.
- Διόρθωση δεδομένων κατά το υπόβαθρο και το υψόμετρο.
- Αφαίρεση των μιγαδικών δεδομένων.
- Εξομάλυνση σήματος.
- Χρήση του USSA (1976) για τον υπολογισμό της μοριακής ατμόσφαιρας.
- Εφαρμογή της μεθόδου του Klett (Klett, 1981; Klett, 1985) για την ανάκτηση της κατακόρυφης κατανομής των αερολυμάτων από το μήκος κύματος 316nm.

- Υπολογισμός της αριθμητικής πυκνότητας όζοντος μέσω της εξίσωσης DIAL (Σχέση 2.4.1).
- Διόρθωση της αριθμητικής πυκνότητας λόγω της διαφορικής εξασθένησης των ατμοσφαιρικών μορίων και των αερολυμάτων και κατά το συνολικό συντελεστή ατμοσφαιρικής οπισθοσκέδασης (Parayannis et al., 1990).

Τα παραπάνω βήματα χρειάζονται για να γίνει η περαιτέρω μελέτη των κατακόρυφων κατανομών του όζοντος. Η ανάλυση των δεδομένων έγινε με την χρήση του λογισμικού MATLAB (έκδοση 2013b) της MathWorks, Inc. Όλοι οι απαραίτητοι κώδικες αναπτύχθηκαν από την αρχή με εξαίρεση την χρήση έτοιμων κωδίκων για την ανάγνωση των αρχείων του ψηφιοποιητή (τους παρείχαν οι επιστήμονες του παρατηρητηρίου) και την χρήση έτοιμου κώδικα για το φιλτράρισμα των δεδομένων (Parayannis, 1989).

Ο χρόνος καταγραφής κάθε πλήρους αρχείου δεδομένων (integration time) ήταν περίπου 2 λεπτά, που αντιστοιχεί σε ένα σύνολο 3600 παλμών laser. Από τα αρχεία έγινε χρήση μόνο των αναλογικών σημάτων των 289nm και 316nm, καθώς τα σήματα από την καταμέτρηση φωτονίων ήταν προβληματικά. Τα αναλογικά σήματα σε κάθε μήκος κύματος του κάθε αρχείου τοποθετήθηκαν, τελικά, σε έναν ενιαίο μονοδιάστατο πίνακα, καθώς υπολογίστηκε η μέση τιμή ανά γραμμή. Η μέση τιμή των αρχείων που αντιστοιχούν σε ένα ευρύ χρονικό διάστημα το απόγευμα-βράδυ δεν προκαλεί πρόβλημα, καθώς δεν παρατηρούνται υπό κανονικές συνθήκες μεγάλες μεταβολές του όζοντος, σε αντίθεση με τις πρωϊνές και μεσημεριανές ώρες όπου η μεταβλητότητα της συγκέντρωσης του όζοντος είναι αυξημένη.

Το εύρος υψών που θεωρήθηκε κατάλληλο για ανάλυση αντιστοιχεί στο υψόμετρο 2158 m – 39996 m (το διάνυσμα ύψους κατασκευάστηκε με αρχική τιμή το ύψος του παρατηρητηρίου και κάθε φορά αυξανόταν κατά τη διακριτική ικανότητα των 7.5 m για κάθε σημείο μέτρησης). Για να μην προκαλείται σύγχυση στην ανάλυση, αλλά και για να εκτελεί πιο γρήγορα τις πράξεις το λογισμικό, η επεξεργασία έγινε με υψόμετρο αναφοράς τα 2158 m (above ground level = a.g.l.) και, άρα, κάθε τιμή του υψομέτρου αφαιρέθηκε με το ύψος αναφοράς (0 m – 37838 m).

Για τη διόρθωση κατά το υπόβαθρο (ηλεκτρονικός θόρυβος, ηλιακή ακτινοβολία, ρεύμα σκότους PMT κ.α.), χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή των δεδομένων που αντιστοιχούν στο υψόμετρο 50342 m – 72842 m a.g.l., στο οποίο δεν παρατηρείται μεταβολή των δεδομένων (σταθερά σε όλο το υψόμετρο) και δεν βρίσκεται στα μεγαλύτερα υψόμετρα (συνολικό μήκος 16380 bins), καθώς δεν θεωρείται αξιόπιστο ως θόρυβος. Η τιμή

υποβάθρου για κάθε αναλογικό σήμα αφαιρείται από τα δεδομένα προς περαιτέρω επεξεργασία:

$$S(289/316) = ANALOG(289/316) - BACKGROUND(289/316) \quad (3.3.1)$$

Η εξίσωση lidar εμπεριέχει τον όρο  $R^2$  στον παρανομαστή, για να διορθωθεί ως προς αυτόν τον όρο χρειάζεται να υψωθούν τα ύψη a.g.l. στο τετράγωνο και να πολλαπλασιαστούν με τα διορθωμένα κατά θόρυβο σήματα:

$$S'(289/316) = S(289/316) \times R^2 \quad (3.3.2)$$

Για να απλοποιηθούν τα νούμερα και να εκτελούνται πιο γρήγορα οι πράξεις, στο σήμα θα εφαρμοστεί ο λογάριθμος  $\log_e \equiv \ln$ , ο οποίος χρειάζεται για να εφαρμοστεί στη συνέχεια η μέθοδος του Klett. Είναι απαραίτητο να αφαιρεθεί η πρώτη τιμή των δεδομένων, αφού έχει πολλαπλασιαστεί με μηδενικό ύψος. Να σημειωθεί ότι παρατηρήθηκε με τη χρήση του λογαρίθμου αύξηση του θορύβου, ωστόσο διευκολύνει στην απόρριψη δεδομένων. Με την αφαίρεση του υποβάθρου προέκυπταν αρνητικές τιμές στα μεγαλύτερα υψόμετρα και με την εφαρμογή λογαρίθμου παρουσιαζόταν μιγαδικός αριθμός (συνήθως επάνω από τα 11 km a.s.l.). Αυτές οι τιμές δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και, άρα, διαγράφονταν. Τα διορθωμένα κατά ύψος σήματα (range corrected lidar signals; Σχήμα 3.3.2) δίνονται από την ακόλουθη σχέση:

$$RCLS(289/316) = \ln(S'(289/316)) \quad (3.3.3)$$

Τα σήματα lidar εξομαλύνθηκαν (smoothing), ακολούθως, με τη χρήση διωνυμικής και πολυωνυμικής παρεμβολής (Papayannis, 1989).

Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας για το USSA 1976 (Υποκεφάλαιο 1.2) για τον υπολογισμό της αριθμητικής πυκνότητας  $N(z)$  της ατμόσφαιρας (Σχέση 1.2.1) σε μόρια  $\times cm^{-3}$ . Η ποσότητα αυτή έπειτα πολλαπλασιάζεται με την ενεργό διατομή εξασθένησης λόγω σκέδασης Rayleigh, η οποία δίνεται από τον εμπειρικό τύπο παρακάτω για μήκη κύματος  $0.2\mu m - 0.55\mu m$  (Nicolet, 1984):

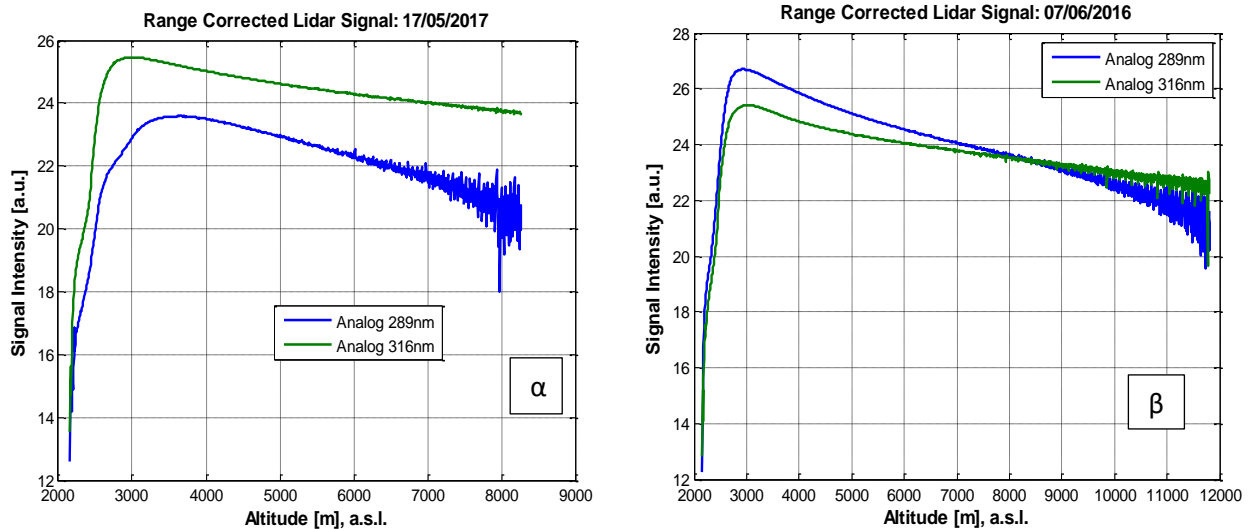
$$\sigma_{RS}(\lambda) = 4.02 \times 10^{-28} \lambda^{-(\chi+4)} \quad (3.3.4)$$

Η παράμετρος  $\chi$  δίνεται από τη σχέση:

$$\chi(\lambda) = 0.389\lambda + 0.09426\lambda^{-1} - 0.3228 \quad (3.3.5)$$

Ακολούθως, υπολογίζεται η ολική μοριακή εξασθένηση (σχήμα 3.3.3):

$$\alpha_R(\lambda, z) = \sigma_R(\lambda)N(z) \quad (3.3.6)$$



**ΣΧΗΜΑ 3.3.2:** Η (α) εικόνα παρουσιάζει την αναμενόμενη συμπεριφορά των σημάτων με την κλίση του 289 να είναι πιο απότομη καθώς απορροφάται πιο έντονα. Εκ πρώτης όψης αμφισβητείται η συμπεριφορά της (β) εικόνας, ωστόσο φαίνεται ξεκάθαρα ότι πάλι το σήμα του 289 έχει πιο απότομη κλίση. Τέλος, διαπιστώνεται ότι η επικάλυψη laser-τηλεσκοπίου γίνεται περίπου στα 3 km, όμως έπειτα από συστηματική παρακολούθηση και επιβεβαίωση από τους επιστήμονες, τα αξιόπιστα δεδομένα βρίσκονται επάνω από τα 5 km.

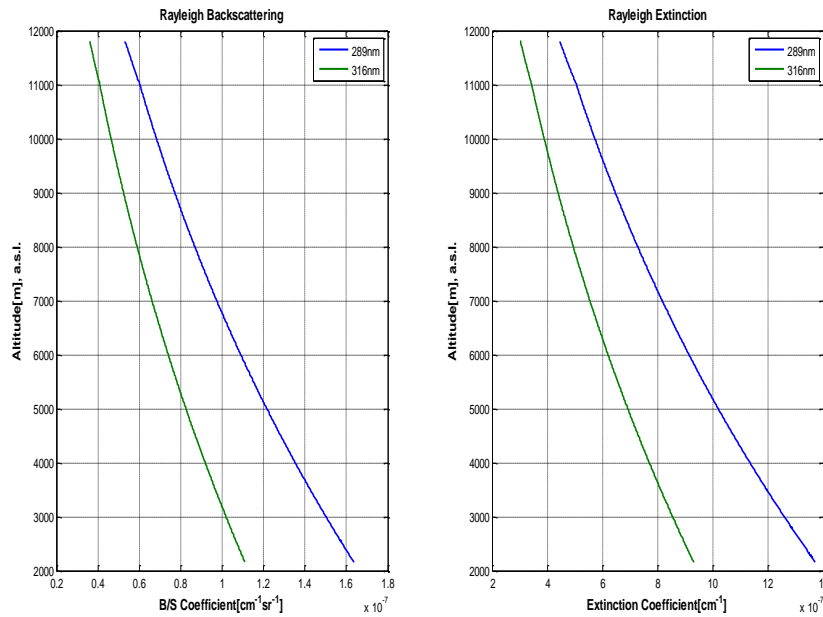
Όπως έχει ειπωθεί προηγουμένως η συγκέντρωση του όζοντος πρέπει να διορθωθεί κατά την διαφορική εξασθένηση από τα ατμοσφαιρικά μόρια. Διαπιστώθηκε από τους πίνακες τιμών (USSA, 1976; Kueger et al., 1976) ότι ο λόγος της αριθμητικής πυκνότητας του αέρα και του όζοντος είναι της τάξης του  $10^8$  έως τα 10 km, πράγμα το οποίο σημαίνει μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα η συνεισφορά του. Ακολούθως, υπολογίζεται η ατμοσφαιρική μοριακή οπισθοσκέδαση (Σχήμα 3.3.3) μέσω της σχέσης:

$$\beta_R(\lambda, z) = \frac{3}{8\pi} \alpha_R(\lambda, z) \quad (3.3.7)$$

Ακολούθως, χρησιμοποιείται η μέθοδος Klett για να υπολογισθεί ο συντελεστής οπισθοσκέδασης αερολυμάτων (Σχήμα 3.3.4) και συντελεστής εξασθένησής τους (Σχήμα 3.3.4) μέσω του λόγου lidar (lidar ratio):

$$LR = \alpha_M(\lambda, z) / \beta_M(\lambda, z) \quad (3.3.8)$$

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής θα χρησιμοποιηθεί μια μέση τιμή 40 sr που αντιπροσωπεύει τυπικές τιμές για ηπειρωτικά σωματίδια (Weitkamp, 2005; Παπαγιάννης, 2014).



**ΣΧΗΜΑ 3.3.3:** Τα προφίλ μοριακών εξασθηήσεων και οπισθοσκεδάσεων για κάθε μήκος κύματος. Οι δύο συντελεστές είναι τάξης μεγέθους  $10^{-7}$ .

Τέλος, ο σωματιδιακός συντελεστής οπισθοσκέδασης υπολογίζεται από την σχέση:

$$\beta_M(\lambda, z) = \frac{\exp[RCLS'(z) - RCLS'(z_{ref})]}{\frac{1}{\beta_{tot}(z_{ref})} + 2 \int_z^{z_{ref}} \exp[RCLS'(r) - RCLS'(z_{ref})] dr} - \beta_R(\lambda, z) \quad (3.3.9)$$

Ως  $z_{ref}$  ορίζεται το ύψος και πέρα στο οποίο απουσιάζουν τα αερολύματα και, επομένως, θα ισχύει  $\beta_{tot}(z_{ref}) = \beta_R(\lambda, z_{ref})$ . Το  $z_{ref}$  θα λαμβάνει τη μεγαλύτερη τιμή του ύψους για κάθε μέτρηση. Ο εκθέτης  $RCLS'(z) - RCLS'(z_{ref})$  είναι ίσος με:

$$RCLS(z) - RCLS(z_{ref}) - \frac{16\pi}{3} \int_z^{z_{ref}} \beta_R(\lambda, r) \left(1 - \frac{3}{8\pi \times LR^{-1}}\right) dr \quad (3.3.10)$$

Τα ολοκληρώματα υπολογίζονται διακριτά (αριθμητική ολοκλήρωση) με τη χρήση λογισμικών και συγκεκριμένα χρησιμοποιείται η μέθοδος του τραπεζίου:

$$\int_{x_{n-1}}^{x_n} f(x) dx = \frac{h}{2} \{f(x_n) + f(x_{n-1})\} \quad (3.3.11)$$

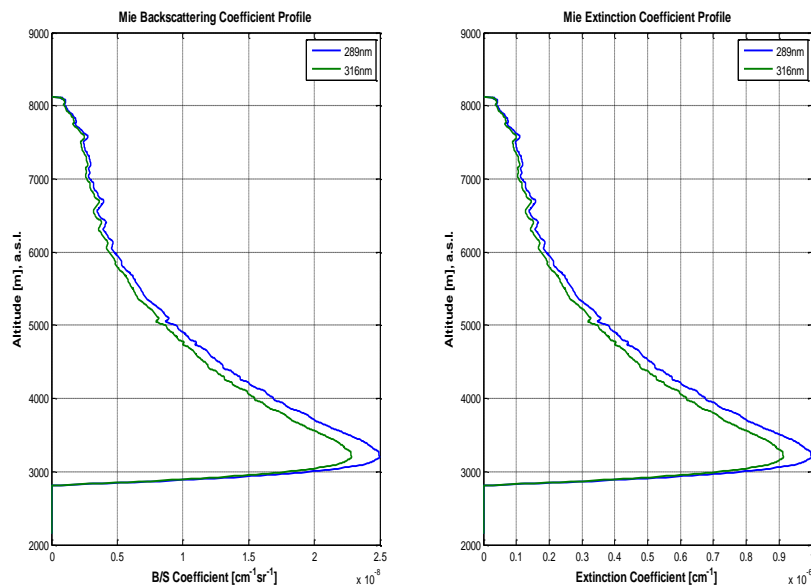
όπου  $h$  είναι το ύψος κάθε τραπεζίου ( $7.5\text{ m}$ ),  $n = 1, \dots$  δηλώνει τη θέση του πίνακα κάθε δεδομένου και  $f(x_n)$  η ένταση του σήματος στο ύψος  $x_n$ . Είναι αντιληπτό ότι υποχρεωτικά «θυσιάζεται» η τελευταία τιμή δεδομένων.

Η μέθοδος Klett χρησιμοποιείται για την ανάκτηση της κατακόρυφης κατανομής του συντελεστή οπισθοσκέδασης των αερολυμάτων στα  $316\text{ nm}$ , καθώς το μήκος κύματος αυτό, απορροφάται λιγότερο από το όζον. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται η Σχέση 1.3.4 για να υπολογιστεί ο συντελεστής εξασθένησης στο άλλο μήκος κύματος, θεωρώντας ότι ο εκθέτης Angstrom λαμβάνει τη τιμή 1 (Παπαγιάννης, 2014).

Η ανάλυση των δεδομένων ολοκληρώνεται με τον υπολογισμό της αριθμητικής πυκνότητας του όζοντος. Η Σχέση 2.4.1 (όπως στην περίπτωση των παραπάνω ολοκληρωμάτων) δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα, πρέπει να λάβει τη διακριτή της μορφή (κάνοντας χρήση του ορισμού της παραγώγου; Weitkamp, 2005):

$$n = \frac{1}{2\Delta\sigma\Delta R} \ln \left\{ \frac{P_{off}(z+\Delta R)}{P_{off}(z)} \frac{P_{on}(z)}{P_{on}(z+\Delta R)} \right\} \quad (3.3.12)$$

όπου  $\Delta R$  η διακριτική ικανότητα της μέτρησης ( $7.5\text{ m}$ ) και  $\Delta\sigma = \sigma(\lambda_{on}) - \sigma(\lambda_{off})$  η διαφορά ενεργών διατομών του όζοντος, με  $\sigma(\lambda_{on}) = 143 \times 10^{-20}\text{ cm}^2$  και  $\sigma(\lambda_{off}) = 5 \times 10^{-20}\text{ cm}^2$  (Papayannis et al., 1990).



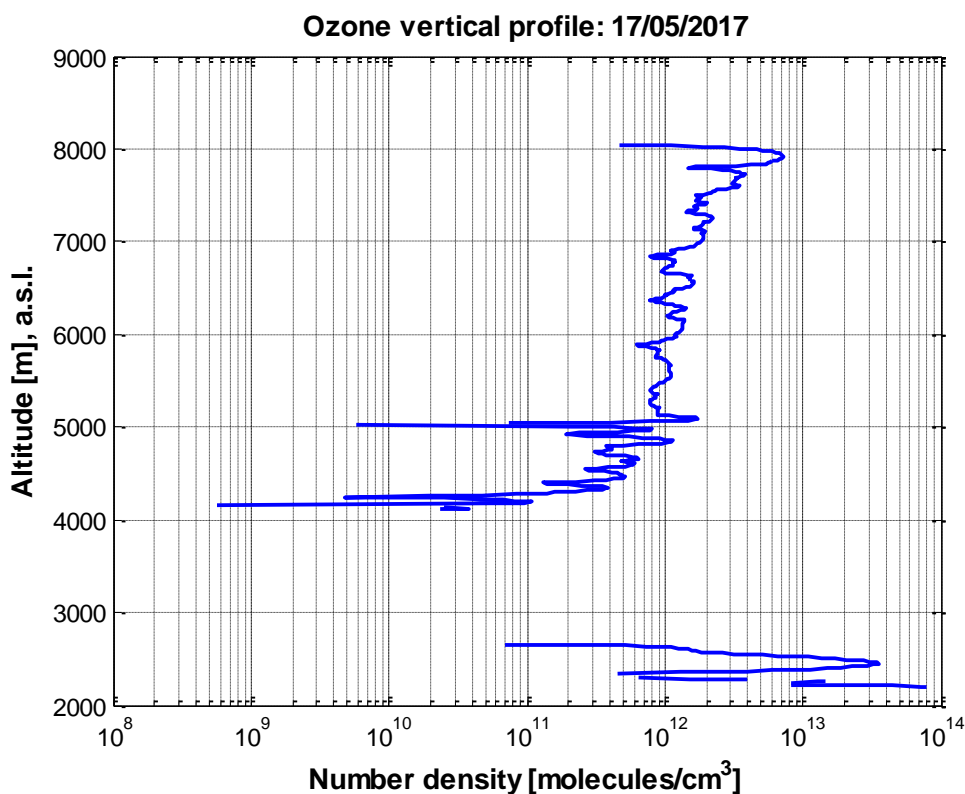
**ΣΧΗΜΑ 3.3.4:** Οι κατακόρυφες κατανομές εξασθενήσεων και οπισθοσκέδασεων των αερολυμάτων για τις 17/05/2017. Η πρώτη κορυφή δεν είναι αξιόπιστη, από τα  $5\text{ km}$  και άνω λαμβάνονται υπόψη οι τιμές. Ο συντελεστής οπισθοσκέδασης και εξασθένησης είναι αντίστοιχα τάξης μεγέθους  $10^{-8}$  και  $10^{-6}$ .



Η αριθμητική πυκνότητα του όζοντος, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, επιδέχεται διορθώσεις κατά το μοριακό συντελεστή εξασθένησης, το συντελεστή εξασθένησης αερολυμάτων και το συνολικό συντελεστή οπισθοσκέδασης,  $\beta(\lambda, z) = \beta_R(\lambda, z) + \beta_M(\lambda, z)$ . Επομένως, η τελική πυκνότητα (Σχήμα 3.3.5) θα δίνεται από τη σχέση (Weitkamp, 2005):

$$n = \frac{1}{2\Delta\sigma\Delta R} \left[ \ln \left\{ \frac{P_{off}(z+\Delta R)}{P_{off}(z)} \frac{P_{on}(z)}{P_{on}(z+\Delta R)} \right\} - \ln \left\{ \frac{\beta_{off}(z+\Delta R)}{\beta_{off}(z)} \frac{\beta_{on}(z)}{\beta_{on}(z+\Delta R)} \right\} \right] - \Delta - E \quad (3.3.13)$$

όπου  $\Delta = (\Delta\alpha_R(z))/\Delta\sigma$  και  $E = (\Delta\alpha_M(z))/\Delta\sigma$ . Στο επόμενο υποκεφάλαιο θα συζητηθούν αναλυτικά τα λαμβανόμενα αποτελέσματα.



**ΣΧΗΜΑ 3.3.5:** Η κατακόρυφη κατανομή του όζοντος πάνω από το παρατηρητήριο στις 17/05/2017. Στο επόμενο υποκεφάλαιο θα χρησιμοποιούνται τα αξιόπιστα δεδομένα μόνο.

### 3.4 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Συγκεκριμένες περιπτώσεις (case studies) από τις μετρήσεις lidar από την Reunion την περίοδο Ιούνιο-Νοέμβριο 2016, καθώς, επίσης και αποτελέσματα των ημερών του Μαΐου 2017 επιλέχθηκαν για παρουσίαση και περαιτέρω ανάλυση. Επιπλέον, για την πιστοποίηση της ακρίβειας των μετρήσεων με την τεχνική DIAL, συγκρίθηκαν οι ανακτηθείσες

κατακόρυφες κατανομές όζοντος με τις αντίστοιχες που έχουν προκύψει από οζοντοβολίσεις (ozonesondes) και αν είχαν πραγματοποιηθεί εκείνες τις ημέρες. Οι ημέρες που παρουσιάζονται είναι οι ακόλουθες: 06/06/2016, 07/06/2016, 08/06/2016, 09/06/2016, 17/08/2016, 14/11/2016, 15/11/2016, 15/05/2017, 16/05/2017, 17/05/2017 και 18/05/2017, όπου οι αναγραφόμενες εκφράζονται σε UTC ή Z (Coordinated Universal Time). Η τοπική ώρα της Reunion είναι UTC + 4 h.

Η μονάδα μέτρησης της αναλογίας ανάμειξης του όζοντος από τις οζοντοβολίσεις εκφράζεται σε ppbv (parts per million per volume). Για να συγκριθούν πιο εύκολα οι κατακόρυφες κατανομές αυτές με εκείνες που προκύπτουν από την τεχνική DIAL (αριθμητική πυκνότητα σε μόρια  $\times cm^{-3}$ ) οι αριθμητικές πυκνότητες μετατράπηκαν σε ppbv ( $\nu_{O_3}$ ), μέσω της σχέσης (Παπαγιάννης, 2014):

$$\nu_{O_3} = \frac{N_{O_3}(z)}{N(z)} \times 10^9 \quad (3.4.1)$$

όπου  $N(z)$  και  $N_{O_3}(z)$  είναι αντίστοιχα η αριθμητική πυκνότητα της μοριακής ατμόσφαιρας (Σχέση 1.2.1) και η αριθμητική πυκνότητα του όζοντος (Σχέση 3.3.13).

Από τις ραδιοβολίσεις (radiosondes) που πραγματοποιήθηκαν στο αεροδρόμιο της Reunion (Roland Garros Airport) θα αξιοποιηθούν οι κατακόρυφες κατανομές της σχετικής υγρασίας (relative humidity-RH). Για τις ημέρες που παρατηρείται έντονη αύξηση της ποσότητας όζοντος θα εξεταστεί αν υπάρχει, αντίστοιχη, έντονη μείωση της σχετικής υγρασίας, οπότε υπάρχει μεγάλη πιθανότητα στρατοσφαιρικής διείδυσης ξηρών αερίων μαζών στην τροπόσφαιρα.

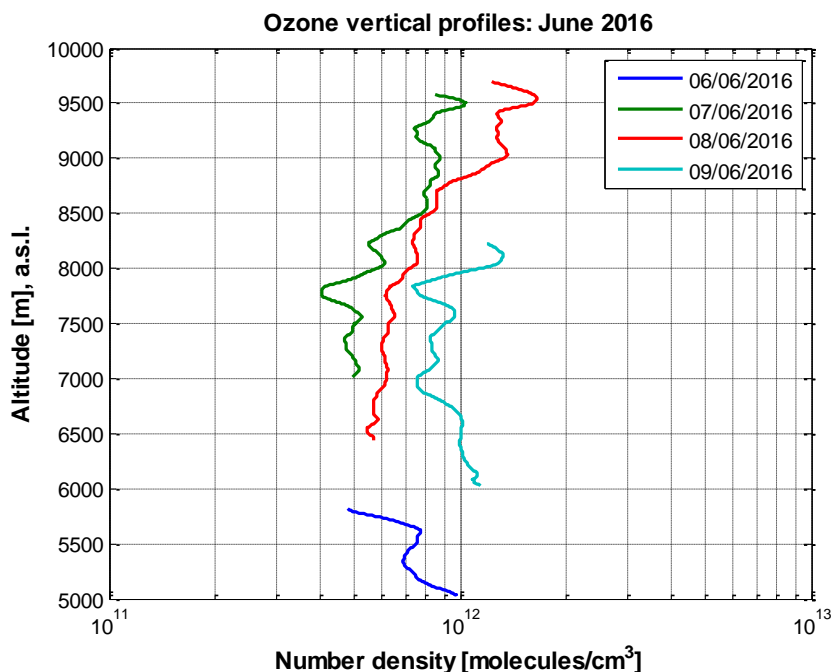
Τέλος, όλες οι κατανομές έχουν εξομαλυνθεί με την χρήση πολυωνυμικού φίλτρου Savitzky-Golay, βαθμού 2 και με εύρος τιμών 71. Η εξομάλυνση αυτή μειώνει τη χωρική διακριτική ικανότητα καθύψος, αλλά ταυτόχρονα ελαχιστοποιεί τη στατιστική διακύμανση της συγκέντρωσης του όζοντος, χωρίς να διαγράφονται τα διακριτά τοπικά μέγιστα των κατανομών και, επομένως, δεν υπάρχει απώλεια πληροφορίας.

## **ΜΕΛΕΤΗ ΧΩΡΟΧΡΟΝΙΚΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ**

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται δύο περιπτώσεις μεταβολής της κατακόρυφης κατανομής του όζοντος, προκειμένου να κατανοηθούν οι τυπικές-αναμενόμενες κατανομές και να παρατηρηθούν οι οποιεσδήποτε μεταβολές. Οι μελετηθείσες

περιπτώσεις αντιστοιχούν στους μήνες Ιούνιος 2016 (06-09/06) και Μάιος 2017 (15-18/05). Στα Σχήματα 3.4.1 και 3.4.2 απεικονίζονται οι αντίστοιχες κατακόρυφες κατανομές του τροποσφαιρικού όζοντος. Και στις δύο περιπτώσεις, όσες κατανομές είναι της τάξης του  $4 - 9 \times 10^{11}$  μόρια  $\times$   $cm^{-3}$ , είναι στο πλαίσιο τυπικών μετρήσεων, όπως ακριβώς προβλέπεται από τις παρόμοιες μελέτες (Baray et al., 1999; Baray et al., 2006; Baray et al., 2013; Dufлот et al., 2017). Η όποια υπέρβαση ή τάση στη τάξη μεγέθους  $10^{12}$  μόρια  $\times$   $cm^{-3}$  δηλώνει είτε ανθρωπογενή παραγωγή, είτε στρατοσφαιρική διείσδυση στην τροπόσφαιρα..

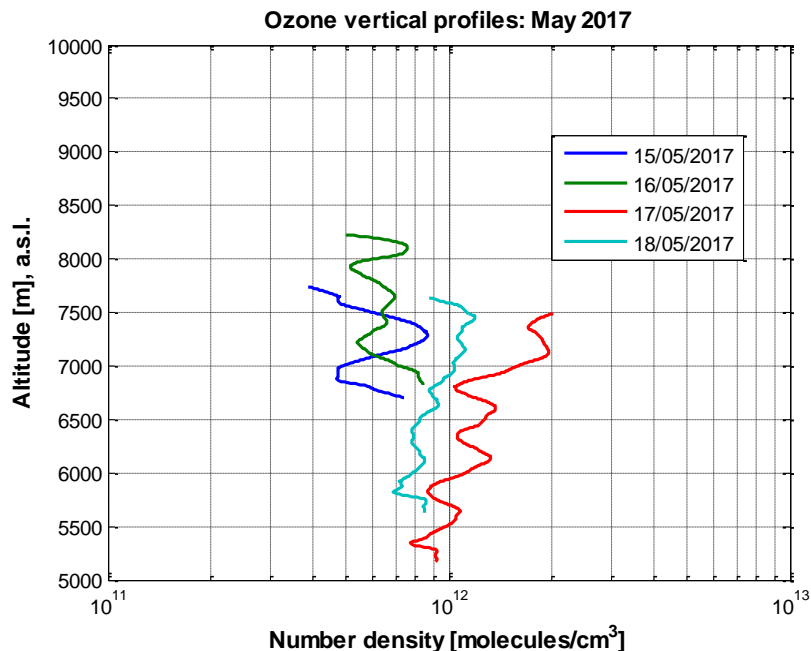
Στην περίπτωση των 06-07/06/2016 (Σχήμα 3.4.1) παρατηρούνται τυπικές τιμές του τροποσφαιρικού όζοντος. Αντίθετα, στις περιπτώσεις 08-09/06/2016 η αριθμητική συγκέντρωση του  $O_3$  παρουσιάζεται αυξημένη, κυρίως για ύψη μεγαλύτερα από τα 8.5 km που ενδεχομένως να οφείλεται επάνω σε στρατοσφαιρική διείσδυση.



ΣΧΗΜΑ 3.4.1: Εξέλιξη τεσσάρων κατακόρυφων κατανομών τροποσφαιρικού όζοντος τον Ιούνιο του 2016.

Στις 09/06/2016 παρατηρείται μία αύξηση της κατανομής του  $O_3$  από τα 6 km κιόλας, έπειτα επιστρέφει στις φυσιολογικές τιμές και ξανά αυξάνεται στα 8 km. Να σημειωθεί ότι η οποιαδήποτε μεταβολή δεν οφείλεται μόνο στη τοπική διακύμανση της συγκέντρωσης, αλλά ενδεχομένως και σε ύπαρξη θορύβου (κυρίως κατά τη διάρκεια επεξεργασίας των μετρήσεων).

Στην περίπτωση του Μαΐου 2017, παρατηρείται πιο έντονη διακύμανση και αύξηση της συγκέντρωσης καθ' ύψος σε σχέση με τις μετρήσεις του Ιουνίου 2016. Η κατανομή στις 16/05/2017 δεν παρουσιάζει κάποια ιδιαιτερότητα και η κατανομή στις 18/05/2017 αν και εμπίπτει στη τάξη μεγέθους  $10^{12}$  μεταξύ 6.5 km και 8 km, φαίνεται ότι η διακύμανσή βρίσκεται γύρω από τις τυπικά αναμενόμενες τιμές. Η κατανομή της 15/05/2017 παρουσιάζει ένα τοπικό μέγιστο σε σχέση με επάνω και κάτω από την κορυφή και θα μπορούσε να μελετηθεί περαιτέρω, ωστόσο πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι εμπεριέχεται εντός αναμενόμενου εύρους. Τέλος, η περίπτωση της 17/05/2017 δείχνει μία έντονη αυξητική τάση σε όλη την έκταση της κατανομής και, ως εκ τούτου αξίζει να αναλυθεί περισσότερο παρακάτω.



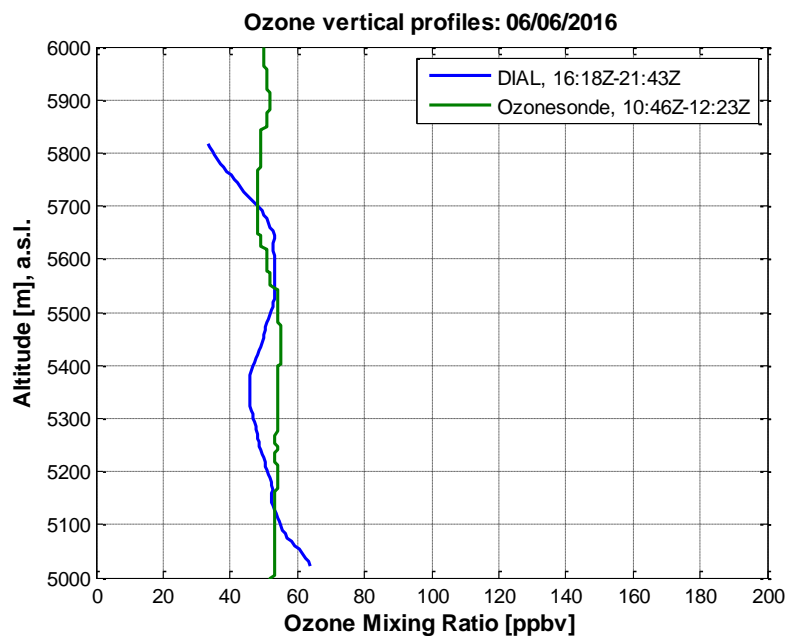
ΣΧΗΜΑ 3.4.2: Εξέλιξη τεσσάρων κατακόρυφων κατανομών τροποσφαιρικού όζοντος τον Μάιο του 2017.

### **ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΔΙΑΛ ΜΕ ΟΖΟΝΤΟΒΟΛΙΣΕΙΣ**

Από τις μετρήσεις που επιλέχθηκαν προς παρουσίαση μόνο σε δύο μετρήσεις υπάρχουν και αντίστοιχες οζοντοβολίσεις. Οι περιπτώσεις που εξετάζονται είναι οι κατανομές των 06/06/2016 και 14/11/2016. Για τις ανάγκες σύγκρισης, οι κατανομές θα μετασχηματιστούν με βάση τη Σχέση 3.4.1 και θα εκφραστούν σε μονάδες ppbv. Με βάση τη βιβλιογραφία (Parayannis et al., 2005; Clain et al., 2009; Clain et al., 2010) οι αναμενόμενες τιμές στην τροπόσφαιρα κυμαίνονται μεταξύ 40 – 60 ppbv, ενώ οι μεγάλες συγκεντρώσεις

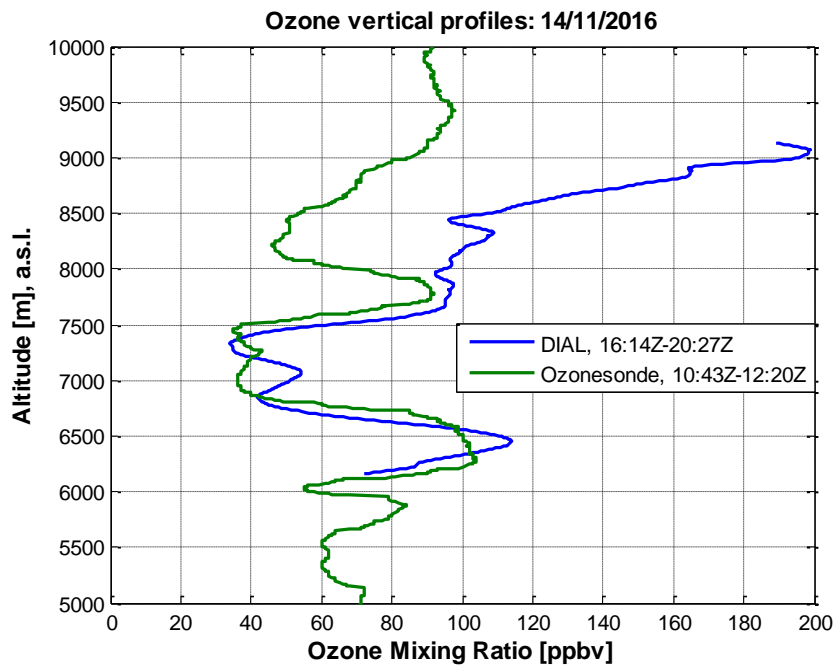
μπορούν να αγγίξουν και τα 200 ppbv σε περιπτώσεις έντονων φωτοχημικών επεισοδίων, αλλά και στην περίπτωση των στρατοσφαιρικών αερίων μαζών.

Στις 06/06/2016 (Σχήμα 3.4.3), η κατανομή όζοντος από το σύστημα DIAL τείνει να ταυτιστεί με αυτήν της οζοντοβόλισης, η οποία θεωρείται πολύ ακριβής τεχνικής επιτόπιας μέτρησης του O<sub>3</sub>. Είναι λογικό, όμως, λόγω διαφοράς μερικών ωρών να μην υπάρχει απόλυτη ταύτιση μεταξύ των δύο τεχνικών μέτρησης. Στη ραδιοβόλιση παρουσιάζεται μεγαλύτερη συγκέντρωση στα 5.2 km – 5.5 km και στα 5.7 km και άνω, καθώς τις ώρες που πραγματοποιήθηκε υπάρχει έντονη ηλιακή δραστηριότητα που οδηγεί στην παραγωγή τροποσφαιρικού O<sub>3</sub>.

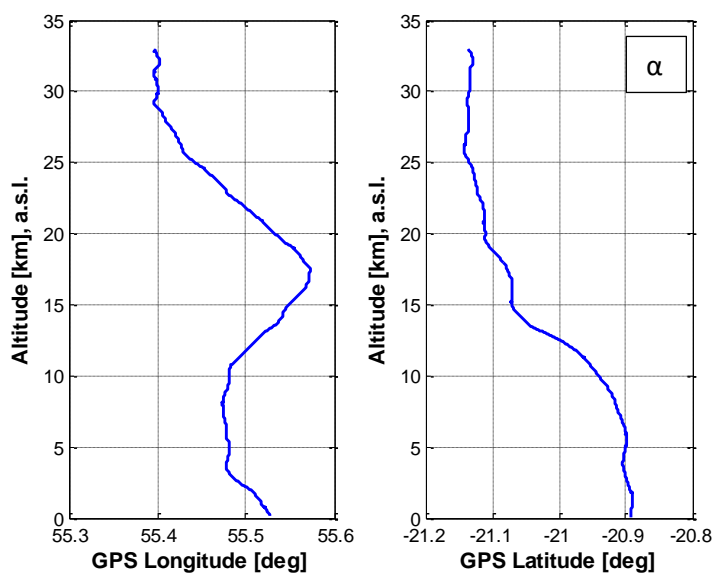


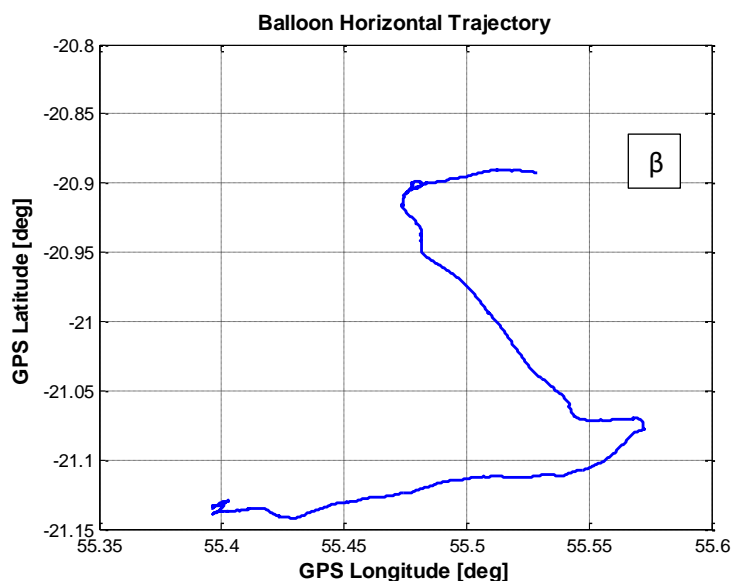
ΣΧΗΜΑ 3.4.3: Οι κατακόρυφες κατανομές όζοντος της ραδιοβόλισης και του DIAL (06/06/2016).

Η επόμενη περίπτωση που θα αναλυθεί παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον (Σχήμα 3.4.4), καθώς σε αρκετά σημεία παρουσιάζεται συμφωνία μεταξύ των δύο κατακόρυφων κατανομών, κυρίως μεταξύ 6 – 8 km ύψος. Οι αποκλίσεις των κατακόρυφων κατανομών στα ύψη άνω των 8 km θα διερευνηθούν λεπτομερώς παρακάτω. Να σημειωθεί εδώ ότι η τεχνική της οζοντοβόλισης δεν μπορεί πάντοτε να θεωρηθεί ότι μετρά τις ίδιες μάζες με εκείνες του DIAL, λόγω της αλλαγής της θέσης του όταν πνέουν οριζόντιοι άνεμοι και μεταβάλλεται το γεωγραφικό μήκος και πλάτος της θέσης του επάνω (Σχήμα 3.4.5).



ΣΧΗΜΑ 3.4.4: Οι κατακόρυφες κατανομές όζοντος της ραδιοβόλισης και του DIAL (14/11/2016).





**ΣΧΗΜΑ 3.4.5:** (α) Μετακίνηση της οζοντοβολίδας οριζόντια (αριστερά: γεωγραφικό μήκος και δεξιά: γεωγραφικό πλάτος) και κατακόρυφα στις 14/11/2016. Οι δύο γραφικές παραστάσεις αποδεικνύουν την παρουσία ατμοσφαιρικών ρευμάτων που μετακινούν το μπαλόνι της οζοντοβόλισης. (β) Οριζόντιας κίνηση της οζοντοβολίδας επάνω από την Reunion.

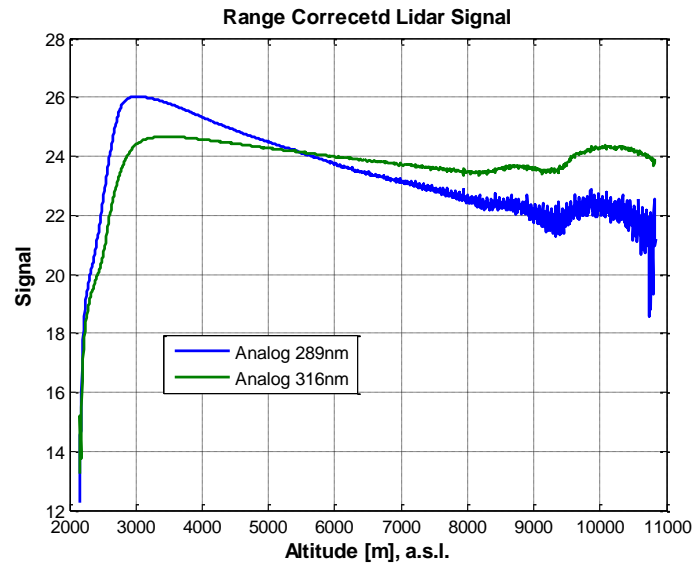
## **ΕΠΕΙΣΟΔΙΑ ΚΑΥΣΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ**

Σε αυτήν την ενότητα θα εξεταστούν τέσσερις περιπτώσεις καύσης βιομάζας και πιο συγκεκριμένα θα εξεταστούν οι υψηλές συγκεντρώσεις όζοντος που εμφανίζονται επάνω από την Reunion. Η καύση βιομάζας δεν αναφέρεται τόσο στο ίδιο το νησί, αλλά περισσότερο στην Αφρικανική Ήπειρο. Τον Φεβρουάριο με Μάρτιο ο νετός αυξάνεται σταδιακά από τον νότο προς το βορρά στην Αφρική, ενώ στο διάστημα Μάρτιος-Ιούνιος μπαίνει η ξηρή περίοδος (dry season) όπου και σημειώνονται αρκετές πυρκαγιές (Cahoon et al., 1992). Τον Απρίλιο δεν αναμένονται πολλές πυρκαγιές και στο διάστημα Ιούλιος-Οκτώβριος οι πυρκαγιές αυξάνονται ανατολικά της ηπείρου και συνεχίζουν μέχρι και τον Νοέμβριο, αλλά τον Δεκέμβριο αναμένεται να σταματήσουν, ενώ δυτικά της ηπείρου θα αυξηθούν πάλι (Cahoon et al., 1992).

Οι περιπτώσεις που εξετάζονται αντιστοιχούν στις ημερομηνίες 14/11/2016, 15/11/2016 και 17/05/2017. Οι περιπτώσεις αυτές εξετάζονται ως προς τα range corrected lidar signals (RCLS), τη σχετική υγρασία από τις ραδιοβολίσεις, τις περιπτώσεις καύσης βιομάζας 7 ημέρες πριν με χρήση του FireMapper της NASA (Κεφάλαιο 1) και την κίνηση των αερίων μαζών με τη χρήση του μοντέλου HYSPLIT της NOAA (Κεφάλαιο 1).

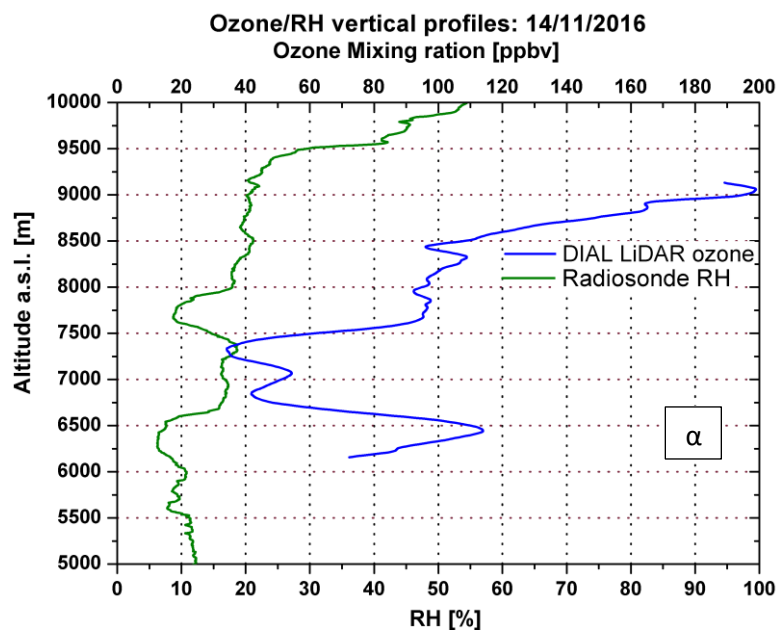
Από τα σήματα RCLS μόνο η περίπτωση στις 15/11/2016 παρουσιάζεται

ιδιαιτερότητα (Σχήμα 3.4.6). Καθώς στο σχήμα αυτό εμφανίζονται δύο κορυφές μεταξύ 8 – 11 km που οφείλονται στην ύπαρξη σωματιδίων. Η ταυτόχρονη ύπαρξη υψηλής σχετικής υγρασίας στα ύψη αυτά (Σχήμα 3.4.7β) υποδηλώνει, ενδεχομένως την άφιξη τροποσφαιρικού O<sub>3</sub> επάνω από ηπειρωτική καύση βιομάζας.

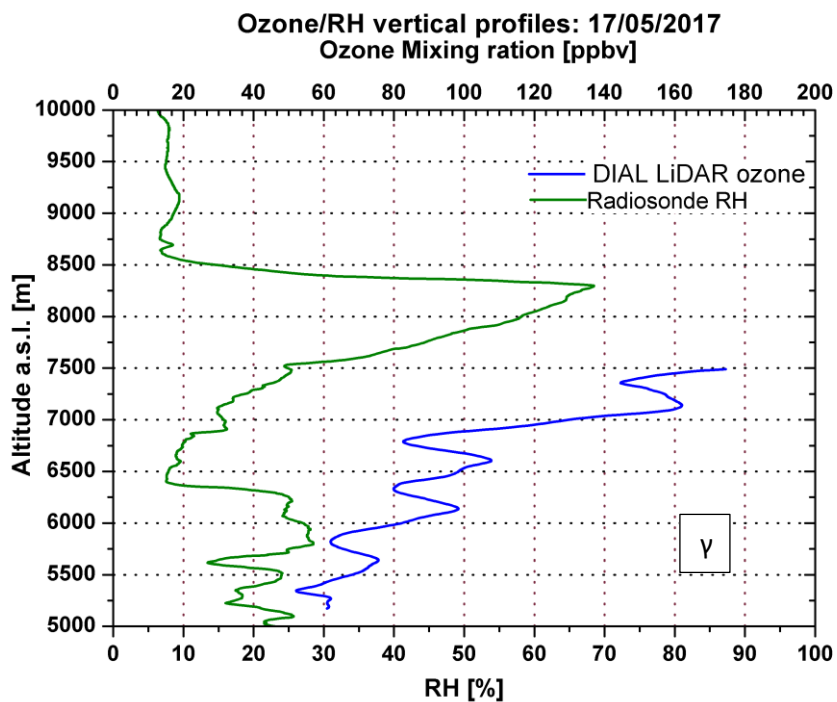
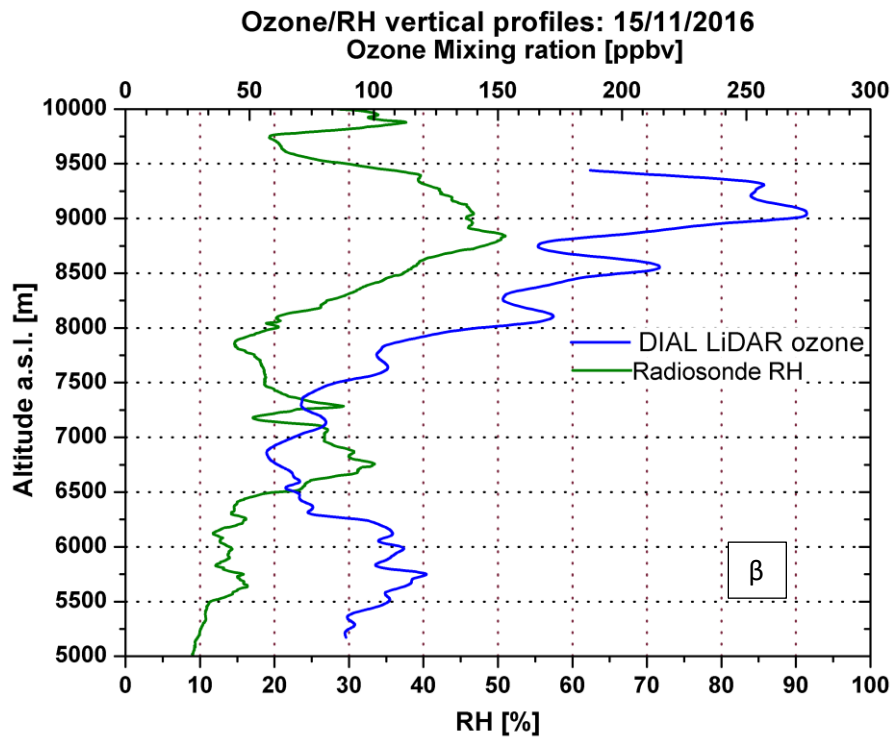


ΣΧΗΜΑ 3.4.6: Το ανεστραμμένο LiDAR σήμα διορθωμένο κατά το ύψος στις 15/11/2016.

Ακολουθούν οι κατανομές του όζοντος (Σχήμα 3.4.7 α, β και γ), οι οποίες συγκρίνονται με τις κατακόρυφες κατανομές σχετικής υγρασίας από τις ραδιοβολίσεις που πραγματοποιήθηκαν κυρίως τις απογευματινές ώρες.







**ΣΧΗΜΑ 3.4.7:** Στις γραφικές παραστάσεις (α), (β) και (γ) απεικονίζονται οι κατακόρυφες κατανομές της σχετικής υγρασίας και του όζοντος σε κάθε περίπτωση.

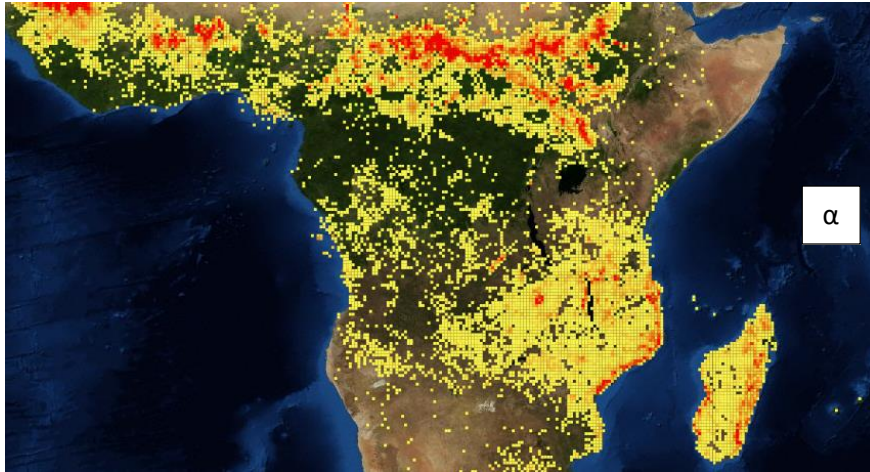
Από τις τρεις γραφικές παραστάσεις του Σχήματος 3.4.7 η σχετική υγρασία δεν τείνει να μειωθεί απότομα προς χαμηλές τιμές ή να διατηρεί χαμηλές τιμές κάτι που θα δήλωνε πιθανή

στρατοσφαιρική διείσδυση. Ωστόσο, στο Σχήμα 3.4.7 γ στα 6.5 km σημειώνεται χαμηλή τιμή της σχετικής υγρασίας στο 7.5 % και ταυτόχρονα παρατηρείται έντονη αύξηση του όζοντος. Δεν είναι δυνατή η θεώρηση μόνο μιας πιθανής στρατοσφαιρικής διείσδυσης γύρω στα 6.5 και 8.5 – 10 km, αλλά και η πιθανότητα μεταφοράς O<sub>3</sub> από καύση βιομάζας μεταξύ 6.5 – 8.5 km.

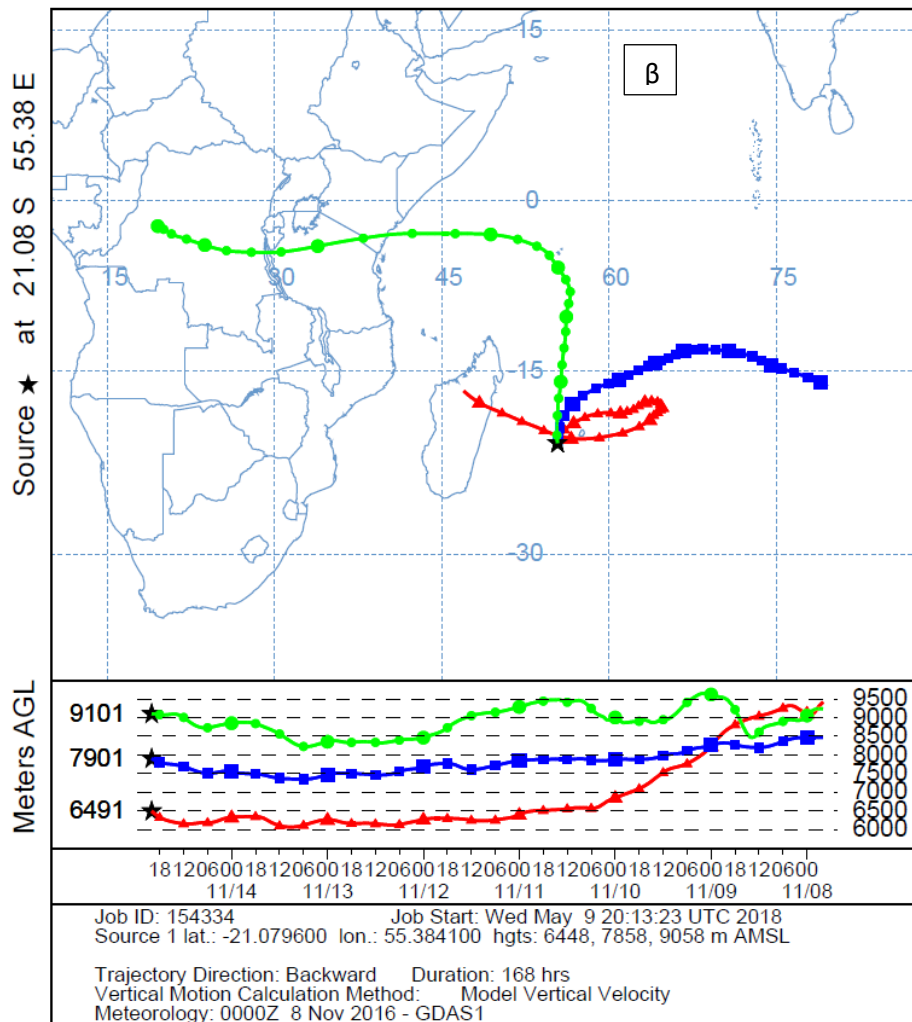
Ακολούθως, θα αναλυθεί η υπερβολική αύξηση του όζοντος στα 250 ppbv στις 15/11/2016 στα 8 – 9 km επάνω. Η αυξημένη τιμή θα μπορούσε να οφείλεται στην παρουσία αερολυμάτων, τα οποία, εάν δε γίνει σωστή διόρθωση, προκαλούν μια τοπική (λανθασμένη) αύξηση του O<sub>3</sub>, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι τα δεδομένα αυτής της ημέρας χρειαζόντουσαν περισσότερη προσοχή στη διόρθωση ως προς την οπισθοσκέδαση και εξασθένηση λόγω της ύπαρξης αερολυμάτων.

Ο συνδυασμός του FireMapper και του μοντέλου HYSPLIT μπορούν να δώσουν χρήσιμες πληροφορίες για την εξήγηση της ύπαρξης υψηλών συγκεντρώσεων όζοντος επάνω από την Reunion. Στους χάρτες του FireMapper παρουσιάζονται το σύνολο εστιών φωτιάς έως και 7 ημέρες πριν.

Στις 14/11/2016, τα τρία τοπικά μέγιστα (τρεις κορυφές που παρουσιάζουν μεγάλη συγκέντρωση όζοντος) αντιστοιχούν στις κορυφές 6448 m, 7858 m και 9058 m. Με βάση τα Σχήματα 3.4.8 α και β φαίνεται ότι η αέρια μάζα που καταφθάνει στο μεγαλύτερο ύψος (πράσινη καμπύλη) ξεκινά από μεγάλο ύψος (9km) επάνω από τη Δημοκρατία του Κονγκό, όπου και παρουσιάζονται διασκορπισμένες εστίες φωτιάς. Η αέρια μάζα περνά στη συνέχεια επάνω από την Τανζανία, η οποία φαίνεται να έχει περισσότερες περιπτώσεις πυρκαγιών, όπως, άλλωστε, αναμένεται τον Νοέμβριο (Cahoon et al., 1992). Η μπλε καμπύλη προέρχεται από μεγάλα ύψη επάνω από τον Ινδικό Ωκεανό και η μεταφορά της οφείλεται στους χειμερινούς μουσώνες (Μακρογιάννης et al., 2014). Τέλος, η κόκκινη καμπύλη μετακινείται από μεγάλα ύψη σε χαμηλότερα ξεκινώντας επάνω από τη Μαδαγασκάρη, όπου φαίνεται ότι υπάρχει πιο έντονη δραστηριότητα φωτιών και ειδικά στις ανατολικές ακτές της.

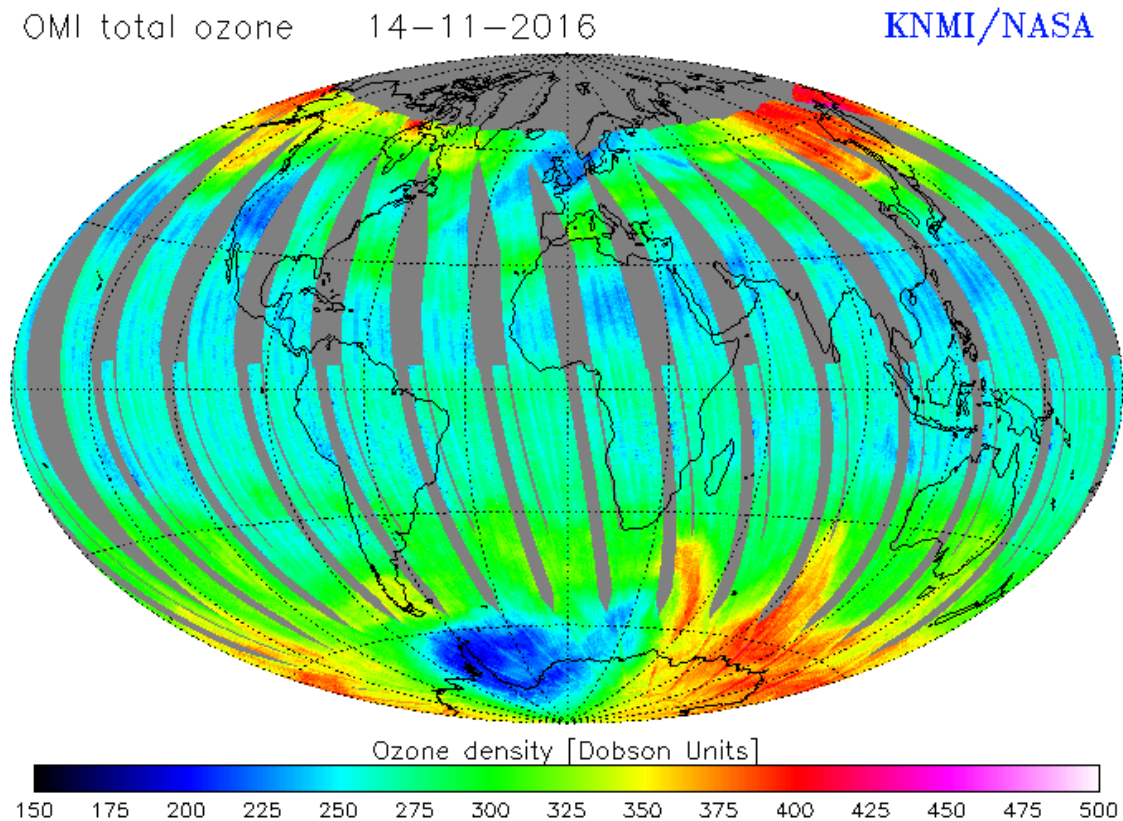


NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 2000 UTC 14 Nov 16  
 GDAS Meteorological Data



ΣΧΗΜΑ 3.4.8: (α) Ο χάρτης εστιών φωτιάς για τις 14/11/2016 και (β) το μοντέλο HYSPLIT για την ίδια ημερομηνία.

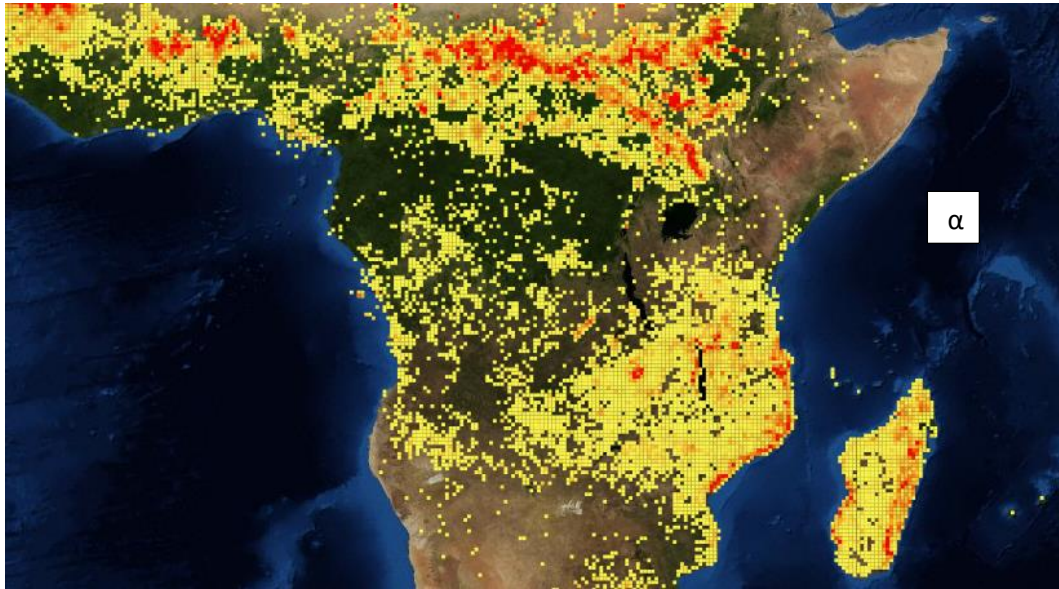
Το διαστημικό όργανο OMI (OzoneMonitoringInstrument) είναι τοποθετημένο επάνω στον δορυφόρο AURA της NASA και μετρά την ολική ποσότητα του  $O_3$ . Στο Σχήμα 3.4.9 γύρω από το νησί της Reunion εμφανίζονται ποσότητες γύρω στα 300 DU που δείχνουν την παρουσία αυξημένης ποσότητας ολικού όζοντος.



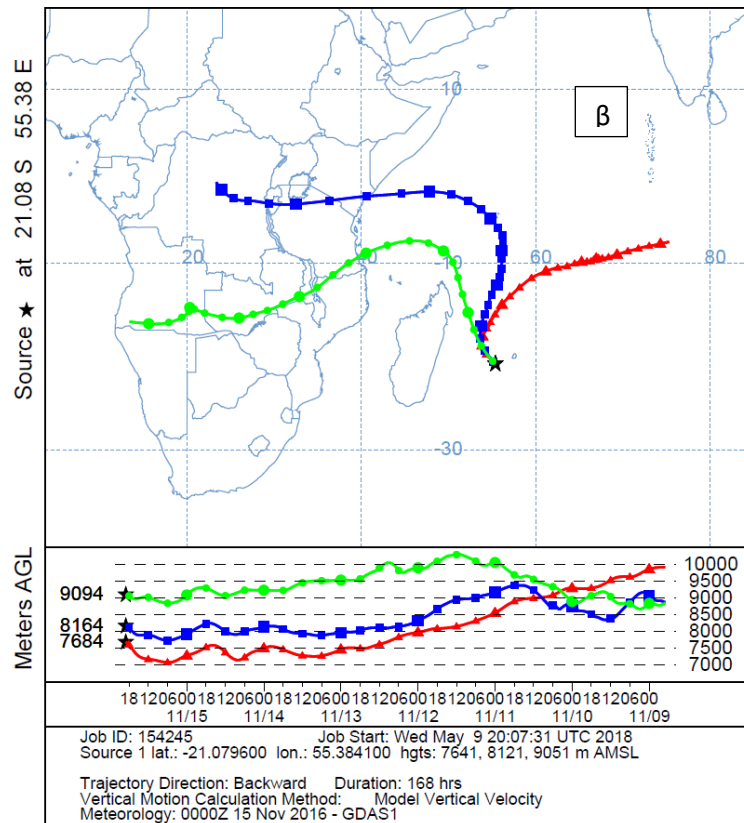
ΣΧΗΜΑ 3.4.9: Ο χάρτης ολικού όζοντος στις 14/11/2016.

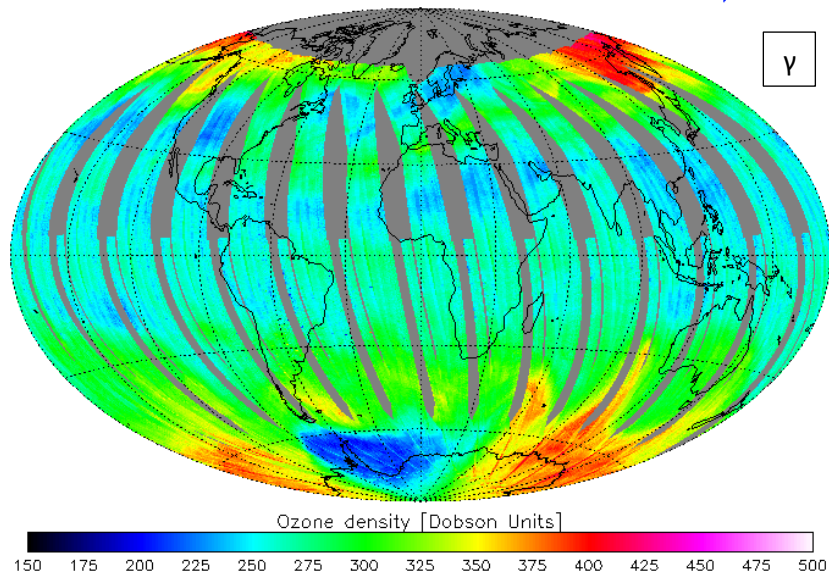
Στις 15/11/2016 (Σχήμα 3.4.10 α, β και γ) τα τοπικά μέγιστα του  $O_3$  βρίσκονται στα ύψη 7641 m, 8121 m και 9051 m. Η πράσινη καμπύλη αρχίζει από την Ανγκόλα και διασχίζει την ανατολική πλευρά της Αφρικής, περνώντας επάνω από όλες τις εστίες φωτιάς της ανατολικής ακτής, ενώ η μπλε καμπύλη αρχίζει επάνω από τη Δημοκρατία του Κονγκό και περνάει επάνω από την Τανζανία (στο άνω άκρο της) όπου σημειώνεται μικρότερη δραστηριότητα φωτιάς (όπου σημειώνεται μικρότερη ποσότητα όζοντος σε σχέση με την ποσότητα που αντιστοιχεί στην πράσινη καμπύλη-Σχήμα 3.4.7 β). Η κόκκινη καμπύλη ξεκινάει επάνω από τον Ινδικό Ωκεανό σε αρκετά μεγάλα ύψη (10 km) και κατέρχεται στα 7.5 km πλησιάζοντας περισσότερο στη θάλασσα και καταφθάνει στη Reunion

ακολουθώντας τη ροή των χειμερινών μουσσόνων. Το Σχήμα 3.4.10 γ παρουσιάζει την παρουσία όζοντος φτάνοντας σε τιμές  $\sim 300 \text{ DU}$ .



NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectories ending at 1900 UTC 15 Nov 16  
GDAS Meteorological Data

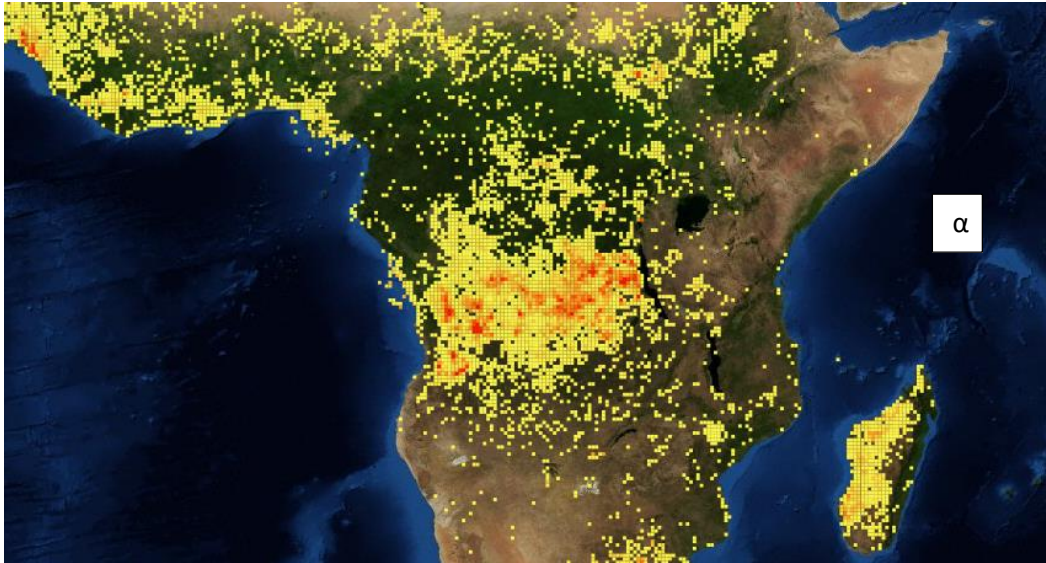




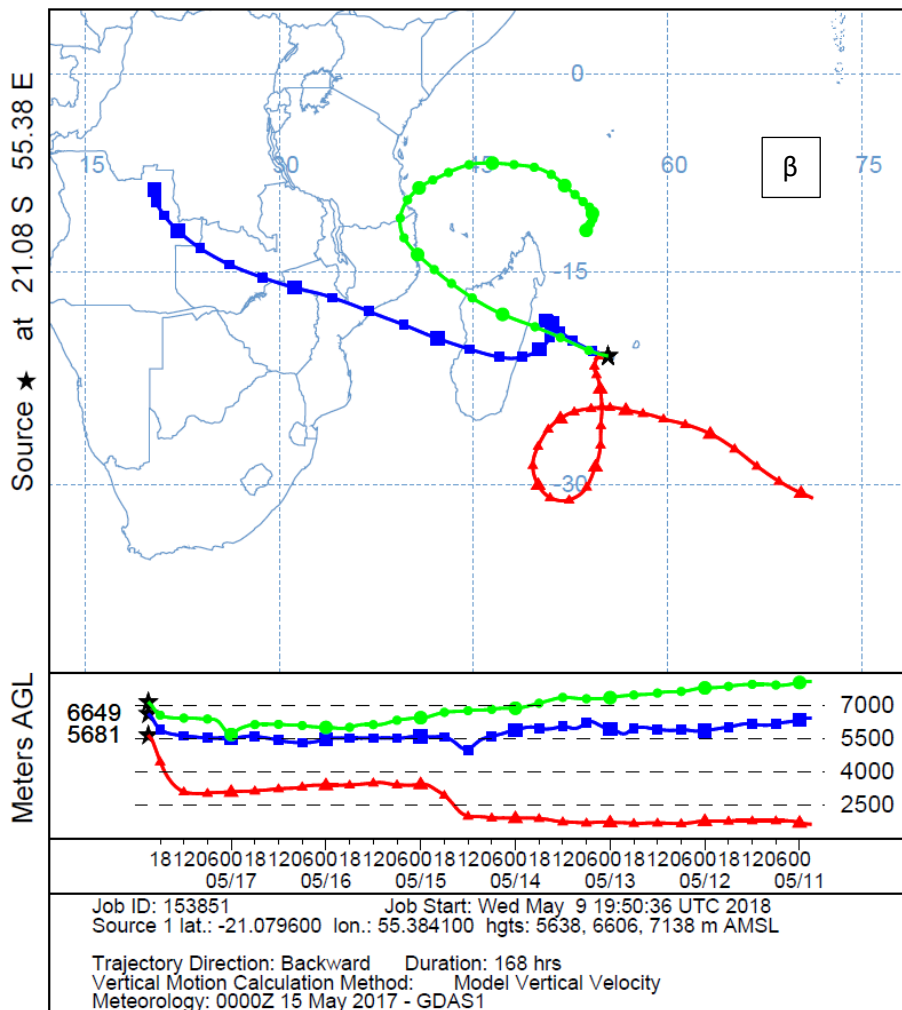
ΣΧΗΜΑ 3.4.10: (α) Ο χάρτης εστιών φωτιάς, (β) το μοντέλο HYSPLIT και (γ) ο χάρτης ολικού όζοντος στις 15/11/2016.

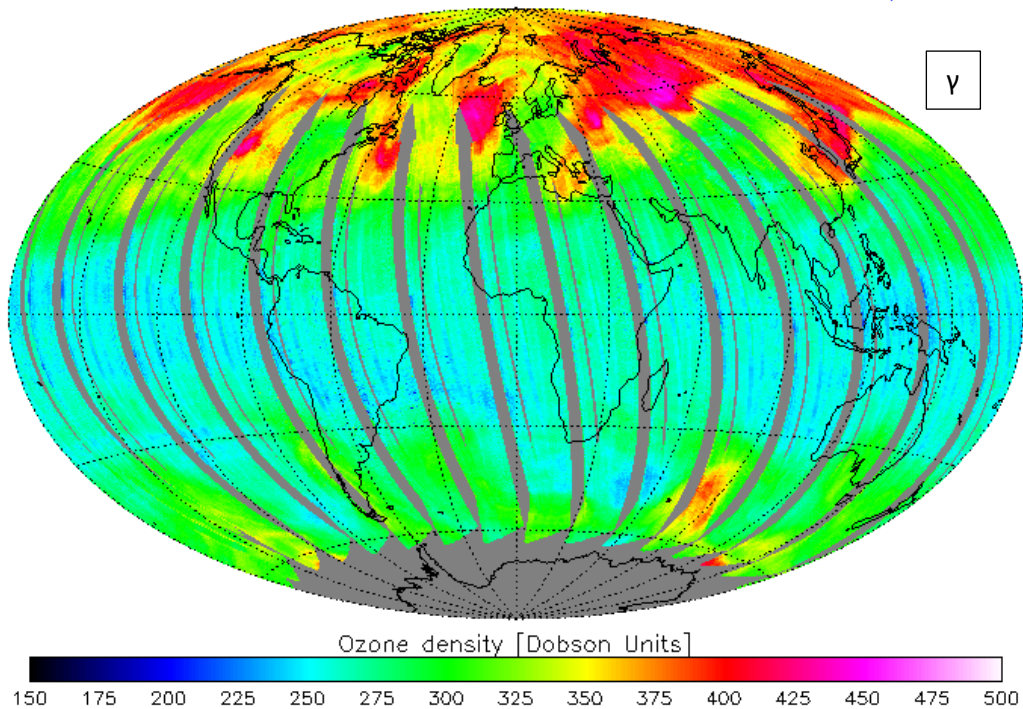
Στις 17/05/2017 (Σχήμα 3.4.11 α, β και γ) τα τοπικά μέγιστα αντιστοιχούν στα ύψη 5638 m, 6606 m και 7138 m. Στο Σχήμα 3.4.11 α έχει μπει η ξηρή περίοδος όπου παρουσιάζονται πολλές εστίες φωτιάς στην Αγκόλα και στη Δημοκρατία του Κονγκό. Η μπλε καμπύλη ξεκινά από τις δύο χώρες και διασχίζει τη Μαδαγασκάρη η οποία εμφανίζει εστίες φωτιάς στις δυτικές ακτές και στην ενδοχώρα. Η πράσινη καμπύλη αρχίζει επάνω από τον Ινδικό Ωκεανό και κατέρχεται διασχίζοντας ένα μικρό μέρος της Αφρικανικής ανατολικής ακτής, η οποία δεν έχει σχεδόν καθόλου φωτιές και συνεχίζει την πορεία της επάνω από τη Μαδαγασκάρη. Η κόκκινη καμπύλη ξεκινά από αρκετά χαμηλά ύψη (κάτω από 2.5 km), καθιστώντας σίγουρη δραστηριότητα πλοίων. Στο Σχήμα 3.4.11 γ εμφανίζεται μία αυξημένη ποσότητα όζοντος γύρω από το νησί σε εύρος τιμών 275 – 300 DU.

Τέλος, να σημειωθεί ότι το νησί είναι ηφαιστειογενές και ορεινό. Το νησί είναι πηγή σχηματισμού βαρομετρικού χαμηλού και υψηλού καθώς όταν προσπίπτει άνεμος, στην προσήνεμη πλευρά σχηματίζεται βαρομετρικό υψηλό, ενώ στην υπήνεμη βαρομετρικό χαμηλό, καθιστώντας το ιδανικό για τη συλλογή αέριων μαζών (σύγκλιση αυτών χαμηλά-βαρομετρικό χαμηλό- και ψηλά-βαρομετρικό υψηλό).



NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 2100 UTC 17 May 17  
 GDAS Meteorological Data





ΣΧΗΜΑ 3.4.11: (α) Ο χάρτης εστιών φωτιάς, (β) το μοντέλο HYSPLIT και (γ) το ολικό όζον στις 17/05/17.

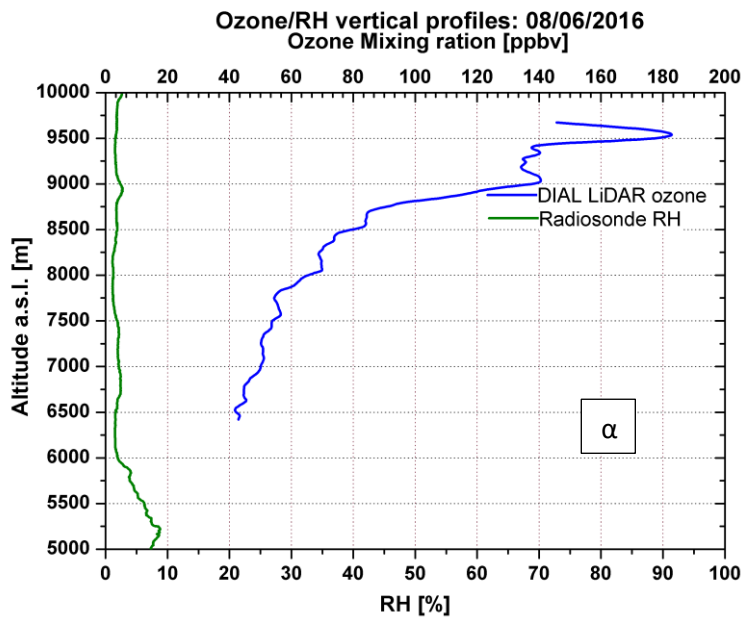
### **ΕΠΕΙΣΟΔΙΑ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ**

Η νήσος Reunion είναι αρκετά κοντά στον τροπικό του Αιγοκέρου, το σύνορο μεταξύ των τροπικών και υποτροπικών γεωγραφικών πλατών στο Ν. Ημισφαίριο, όπου οι υποτροπικοί αεροχείμαρροι κινούνται προς τα δεξιά (Clain et al., 2009) και είναι ικανοί να προκαλέσουν τη ρήξη των κυμάτων Rossby όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1, επιτρέποντας τη στρατοσφαιρική διείσδυση. Επίσης, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1, οι υφέσεις στα άνω ύψη (από 500 hPa και άνω) είναι ικανές να προκαλέσουν μια στρατοσφαιρική διείσδυση (κατακόρυφη μετακίνηση αερίων; Holton et al., 1995; Baray et al., 2006).

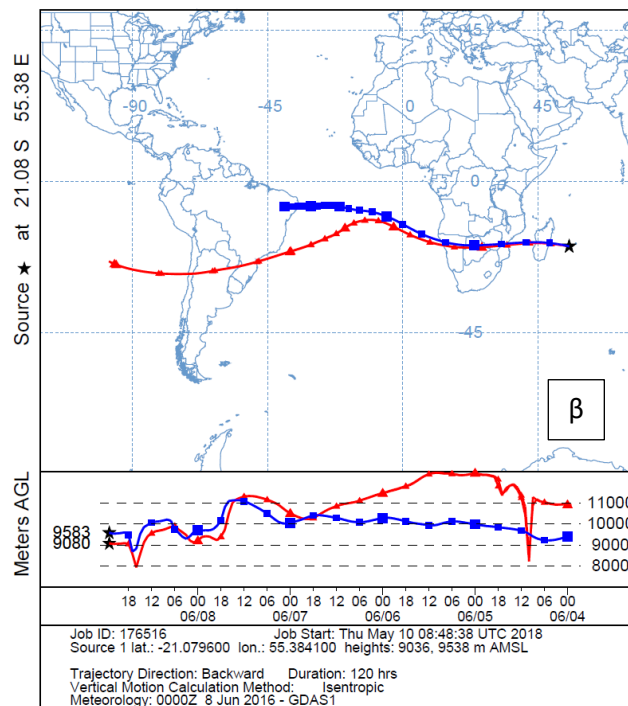
Στις 08/06/2016 (Σχήμα 3.4.12 α και β), στο Σχήμα 3.4.12 α σημειώνεται μια απότομη αύξηση της συγκέντρωσης του όζοντος με ταυτόχρονη μείωση της σχετικής υγρασίας κάτω από 10 % στην περιοχή 6.5 – 10 km. Αυτό το γεγονός κινεί το ενδιαφέρον καθώς είναι μία ισχυρή ένδειξη ότι η αύξηση του όζοντος οφείλεται σε διανταλλαγή αερίων μεταξύ της στρατόσφαιρας και της τροπόσφαιρας. Η στρατοσφαιρική διείσδυση δεν έχει λάβει χώρα κατ'ανάγκη την ίδια μέρα των μετρήσεων. Επειδή η μελέτη γίνεται σε μεγάλα ύψη, η μάζα που προήλθε από τη στρατόσφαιρα μπορεί να παραμείνει αρκετό καιρό ξηρή. Για αυτό το επεισόδιο εξετάζεται να έγινε μέχρι και πέντε μέρες πριν την άφιξη της



αέριαζμάζας επάνω από τη Reunion. Δύο κορυφές μελετώνται στην παρούσα φάση, οι οποίες αντιστοιχούν στα ύψη 9036 m και 9538 m.



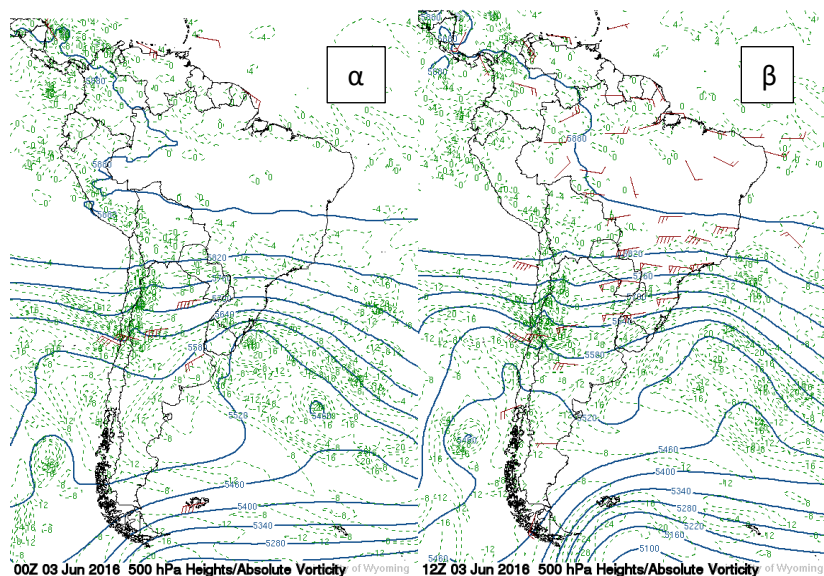
NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectories ending at 2300 UTC 08 Jun 16  
GDAS Meteorological Data

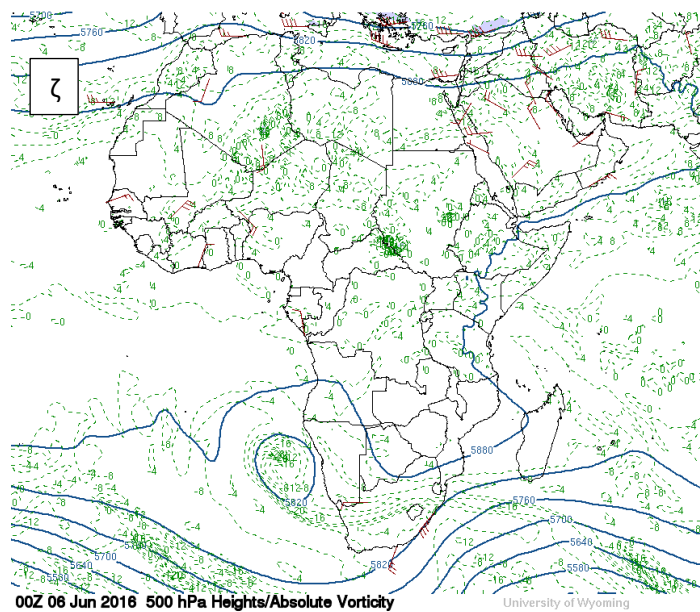
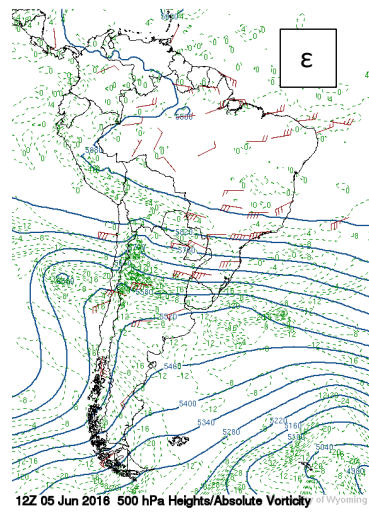
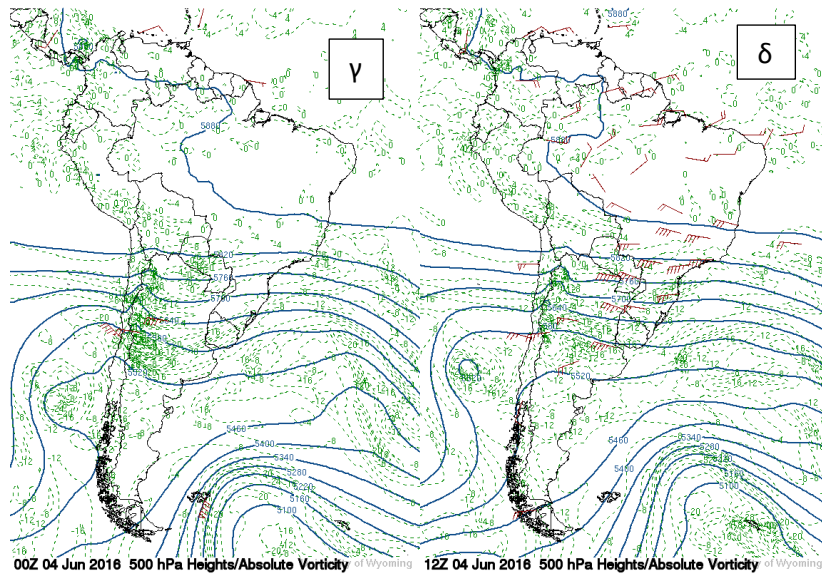


ΣΧΗΜΑ 3.4.12: (α) Οι κατακόρυφες κατανομές RH και  $O_3$  και (β) το μοντέλο HYSPLIT στις 08/06/2016.

Το μοντέλο HYSPLIT «έτρεξε» με την επιλογή οι αέριες μάζες να κινούνται στην ελεύθερη τροπόσφαιρα ισηντροπικά. Το μέγιστο που αντιστοιχεί στην πρώτη κορυφή δεν φαίνεται να παρουσιάζει κάποια ιδιαιτερότητα και ενδεχομένως να έχει προκύψει από καύση βιομάζας (μπλε καμπύλη). Αντιθέτως, η κόκκινη καμπύλη παρουσιάζει ποικιλία στη συμπεριφορά της. Καθώς κατέρχεται απότομα στην αρχή της πορείας της, ανέρχεται απότομα σε αρκετά μεγάλα ύψη (άνω των 11 km) και κατεβαίνει σταδιακά προς τα 10 km. Όσο πιο απότομη είναι η ισηντροπική καμπύλη τόσο πιο πιθανή είναι η στρατοσφαιρική διείδυση. Η κόκκινη καμπύλη παρουσιάζει αρκετά μεγάλο ενδιαφέρον, καθώς, επίσης, στην αρχή της πορείας της κινείται διαμήκως (περίπου) του τροπικού του Αιγοκέρου, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι πρόκειται για υποτροπικός αεροχέιμαρρος και, άρα, είναι πιο πιθανή μια στρατοσφαιρική διείδυση.

Στα Σχήματα 3.4.13 α, β, γ, δ, ε και ζ απεικονίζονται οι ισοϋψείς χάρτες σε πίεση 500hPa συμπεριλαμβανομένου και του απόλυτου στροβιλισμού, PV (Κεφάλαιο 1). Οι χάρτες προέκυψαν από την ιστοσελίδα Wyoming Weather Web του Πανεπιστήμιου του Wyoming. Οι ώρες και ηπείρους που τράβηξαν το ενδιαφέρον με βάση το μοντέλο HYSPLIT είναι: 00 Z 03/06/2016 επάνω από τη Νότια Αμερική, 12 Z 03/06/2016 επάνω από τη Ν. Αμερική, 00 Z 04/06/2016 επάνω από τη Ν. Αμερική, 12 Z 04/06/2016 επάνω από τη Ν. Αμερική, 12 Z 05/06/2016 επάνω από τη Ν. Αμερική-Ατλαντικό Ωκεανό και 00 Z 06/06/2016 επάνω από τον Ατλαντικό Ωκεανό-Αφρική.

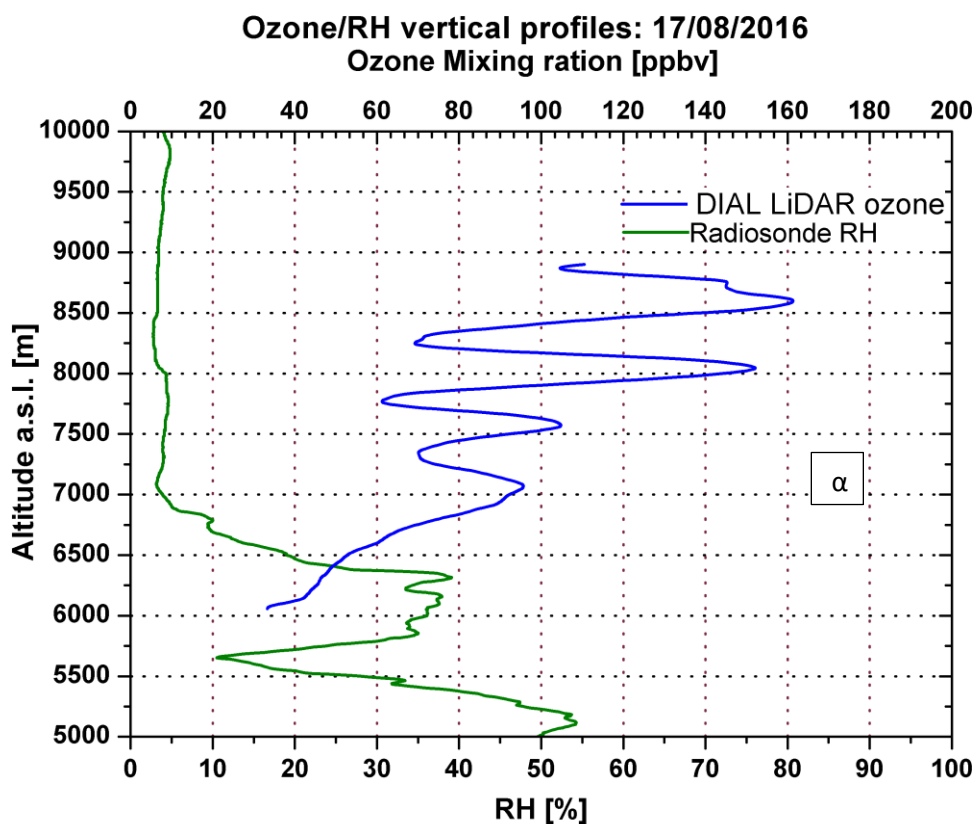




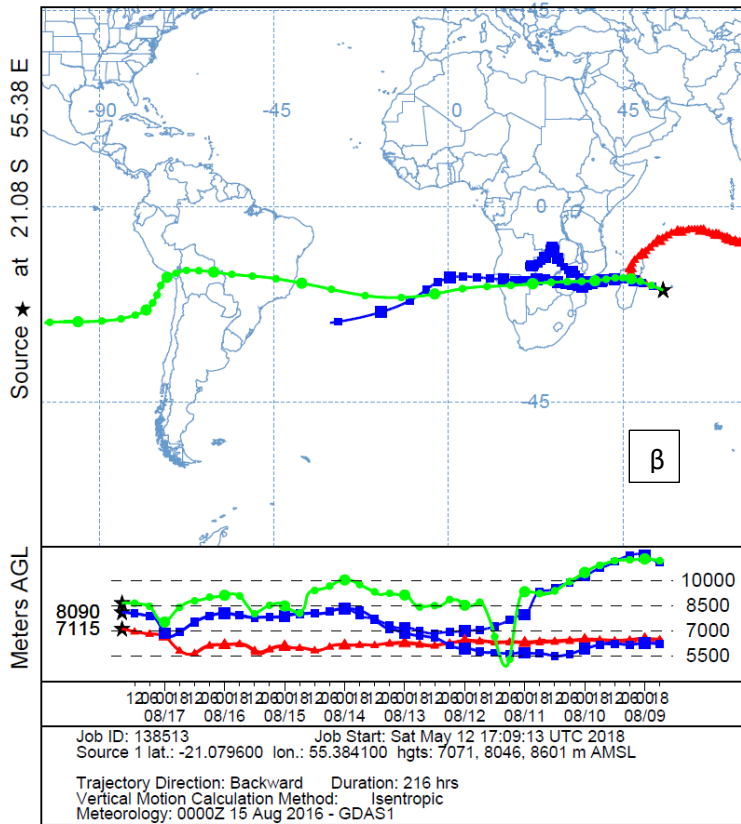
ΣΧΗΜΑ 3.4.13: (α)-(ζ) Ισοψείς χάρτες που αντιστοιχούν σε πίεση 500hPa.

Στους χάρτες 3.4.13 α-ε φαίνεται ότι ο άνεμος είναι δυτικός και κινείται προς τα ανατολικά και ότι οι ισοϋψείς έχουν πυκνώσει, πράγμα το οποίο δηλώνει ότι εκεί ο άνεμος θα είναι μεγαλύτερης έντασης. Σε εκείνες τις περιοχές ο απόλυτος στροβιλισμός είναι έντονος (πράσινες διακεκομμένες καμπύλες). Επίσης, νοτιοδυτικά της Ν. Αμερικής φαίνεται η εξέλιξη της αποκοπής βαρομετρικού χαμηλού, πράγμα το οποίο επιβεβαιώνει την πιθανή στρατοσφαιρική διείδυση. Η αέρια μάζα ταξιδεύει με μεγάλη ένταση (επιβεβαιώνεται και από την πορεία στο HYSPLIT) (Σχήμα 3.4.13 α-ζ), καθώς οι ισοϋψείς παραμένουν πυκνές και καταφτάνουν στο νησί.

Στις 17/08/2016 παρατηρείται μία ακόμη περίπτωση στρατοσφαιρικής διείδυσης, καθώς στο Σχήμα 3.4.14 α η σχετική υγρασία μειώνεται απότομα κάτω από το 10 % και παραμένει χαμηλή έως τα 10 km, ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται αρκετά η ποσότητα όζοντος. Το μοντέλο HYSPLIT (έτρεξε έως και 9 μέρες πριν και ισημερινά) δείχνει τρεις αέριες μάζες που καταλήγουν σε τρία τοπικά μέγιστα της κατανομής όζοντος που αντιστοιχούν στα ύψη 7071 m (κόκκινη τροχιά), 8046 m (μπλε τροχιά) και 8601 m (πράσινη).

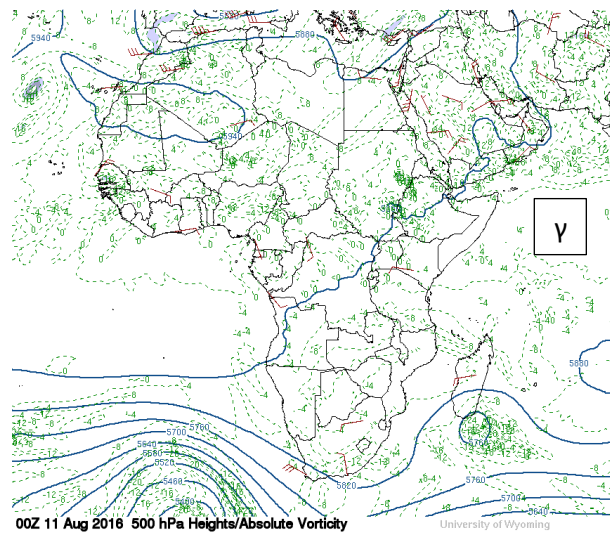
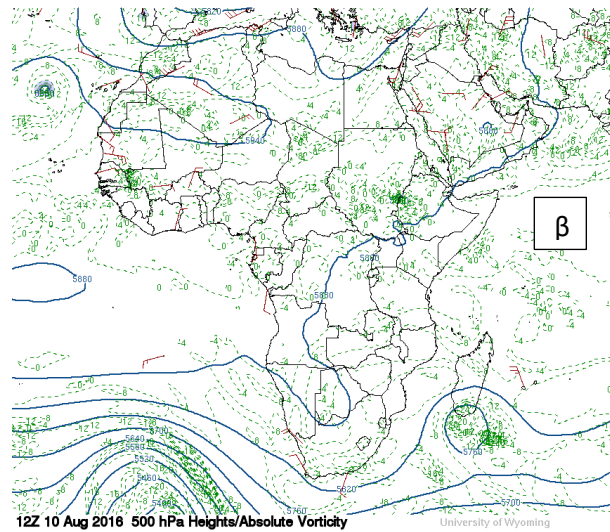
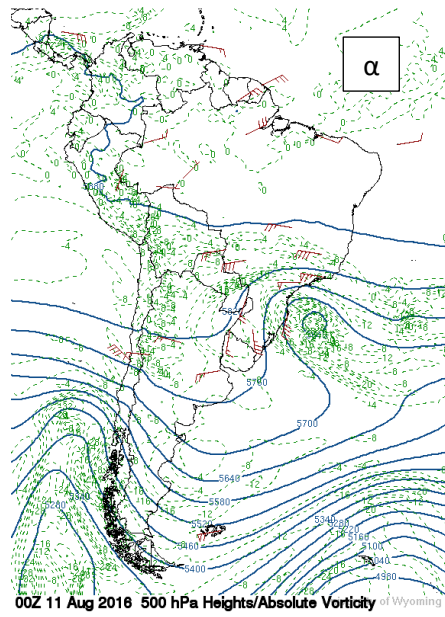


NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1700 UTC 17 Aug 16  
 GDAS Meteorological Data



**ΣΧΗΜΑ 3.4.14:** (α) Οι κατακόρυφες κατανομές RH και  $O_3$ , όπου διακρίνονται τα νήματα (filaments) του νέφους όζοντος, και (β) το μοντέλο HYSPLIT στις 17/08/2016.

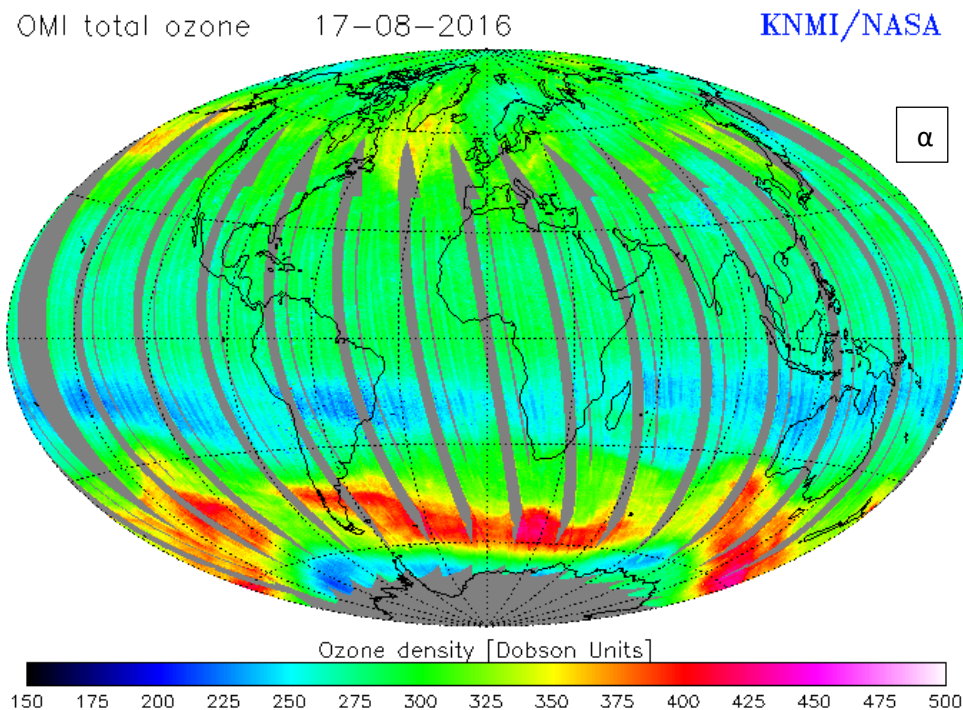
Η κόκκινη καμπύλη δεν φαίνεται να προκύπτει από STE και το ίδιο μία πηγή προέλευσης της μπλε καμπύλης, η άλλη μπλε καμπύλη κάνει μία πτώση από τα 10 km έως τα 7 km. Επίσης, η πράσινη τροχιά κατέρχεται από μεγάλα ύψη και φαίνεται να κάνει μία απότομη πτώση από τα 9 km έως τα 5 km. Η διέλευση του αέρα σε αυτό το υψόμετρο είναι επίφοβη, καθώς σε αυτό το ύψος υπάρχει υγρασία, ωστόσο η παραμονή του ήταν πολύ σύντομη, διότι ανέρχεται απότομα στα 8 – 9 km. Στα Σχήματα 3.4.15 α, β και γ παρουσιάζονται δύο χάρτες ισοϋψών καμπυλών πίεσης 500 hPa με απόλυτο στροβιλισμό για τις ώρες και ηπειρούς με βάση το μοντέλο HYSPLIT: 00 Z 11/08/2016 επάνω από τη Ν. Αμερική και 12 Z 10/08/2016 επάνω από την Αφρική και 00 Z 11/08/2016 επάνω από την Αφρική. Στην Εικόνα 3.4.15 α έχουν πυκνώσει αρκετά οι ισοϋψείς καμπύλες και έχει σχηματιστεί ένα cut off low (έντονοι απόλυτοι στροβιλισμοί) κέντρο και ανατολικά της ηπείρου αυτής.

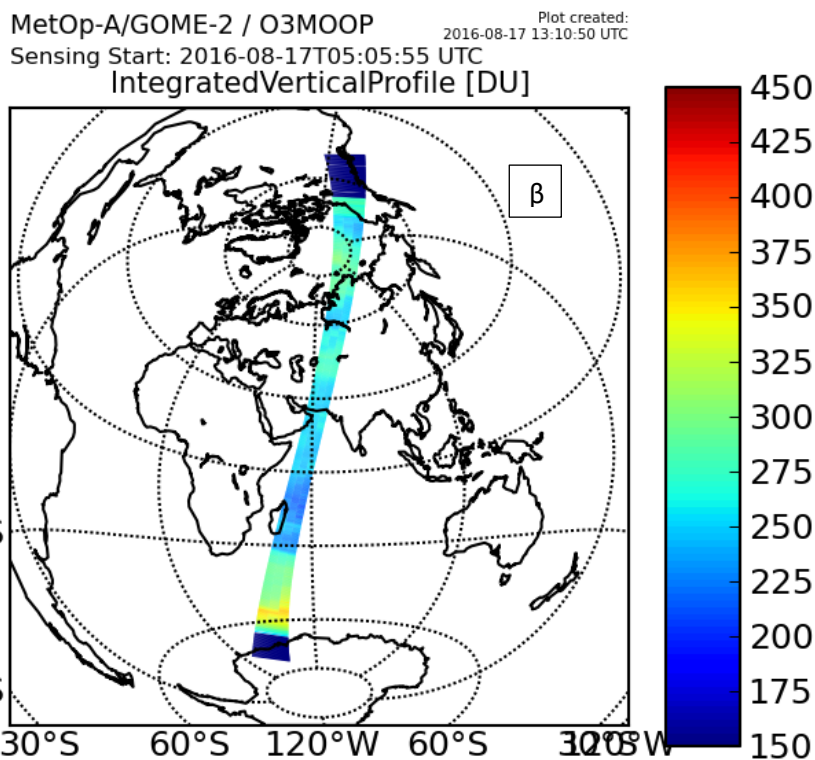


ΣΧΗΜΑ 3.4.15: (α)-(γ) Ισοψείς χάρτες που αντιστοιχούν σε πίεση 500hPa.

Η απότομη μπλε καμπύλη αντιστοιχεί στην αέρια μάζα που ξεκινά επάνω από την Αφρική διότι παραμένει αρκετά επάνω από μία περιοχή και για να κατέβει γρήγορα όπως υποδεικνύει το μοντέλο πρέπει να γίνει απότομη πτώση. Όμως, το Σχήμα 3.4.15 γ δε φαίνεται να υπάρχει ένδειξη πυκνώσεων ή αποκοπής επάνω από την Αφρική. Η πράσινη τροχιά από την άλλη φαίνεται να προέρχεται οριακά από απότομη κατάβαση στον Ειρηνικό Ωκεανό (Σχήμα 3.4.15 α), περνά δίπλα από ένα cut off low κέντροανατολικά της Ν. Αμερικής (Σχήμα 3.4.15 α) και ακολουθεί τις πυκνές ισοϋψείς όπως φαίνεται στις Εικόνες 3.4.15 α και β. Επίσης, στις Εικόνες 3.4.15 β και γ απεικονίζεται ένα cut off low κάτω από τη Μαδαγασκάρη. Στο μοντέλο HYSPLIT δεν φαίνεται κάτι τέτοιο, αλλά είναι πιθανό να επηρεάζει την ολική συγκέντρωση του όζοντος επάνω από τη Reunion.

Επιπρόσθετα, η αύξηση του ολικού όζοντος φαίνεται στο δορυφορικό όργανο OMI και GOME-2 (Global Ozone Monitoring Experiment-2) το οποίο καταγράφει ς όζοντος). Στην περίπτωση του OMI (Σχήμα 3.4.16 α) διακρίνεται μία πράσινη νησίδα μεταξύ 275 DU και 300 DU και στην περίπτωση του GOME-2 μία γαλάζια νησίδα στα 250 – 275 DU.





ΣΧΗΜΑ 3.4.16: Δορυφορικές κατανομές όζοντος από (α) OMI και (β) GOME-2.

### 3.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη μελέτη προκύπτουν τα εξής:

- Από τη σύγκριση της τεχνικής DIAL με ραδιοβολίσεις, επιβεβαιώνεται ότι η τεχνική DIAL είναι κατάλληλη για την ανάκτηση της κατακόρυφης κατανομής του όζοντος, έως τα ύψη στα οποία ο λόγος σήματος/θορύβου παραμένει αρκετά ισχυρός.
- Ο συνδυασμός διάφορων μοντέλων και δεδομένων από διαφορετικές τεχνικές μέτρησης με δεδομένα από την τεχνική DIAL σαφώς βοηθούν στην καλύτερη δυνατή ανάλυση των λαμβανόμενων αποτελεσμάτων και τον εντοπισμό των πηγών που συνεισφέρουν στο τροποσφαιρικό  $O_3$  στην περιοχή αυτή.
- Το πρόγραμμα επεξεργασίας δεδομένων στο μέλλον χρειάζεται να συμπεριλάβει και τη διάδοση σφαλμάτων έτσι, ώστε οι τελικές κατανομές να τα εμπεριέχουν.
- Αποδεικνύεται ότι η νήσος Reunion βρίσκεται σε στρατηγική θέση για τη μελέτη του όζοντος, λόγω μεταφοράς από καύση βιομάζας που προέρχεται από την Αφρική, αλλά και λόγω των STE από τους αεροχειμάρρους και τις αποκοπές βαρομετρικών χαμηλών. Από αυτές τις μελέτες ενδεχομένως μπορούν να προκύψουν χρήσιμες



πληροφορίες για τις κινήσεις των αερίων μαζών και γενικά για τη δυναμική της τροπόσφαιρας, αλλά και τη φύση της τροπόπαυσης λόγω των STE.

- Η Reunion είναι ένα νησί που δεν έχει μεγάλα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Όμως, οι αέριες μάζες που καταφθάνουν εκεί, μεταφέρουν αερολύματα και αέριους ρύπους (όπως το όζον) και συνεισφέρουν στην αύξηση των επιπέδων του τροποσφαιρικού O<sub>3</sub>. Με τις κατάλληλες μελέτες, είναι πιο εύκολο, σε σχέση με μία περιοχή που έχει μεγάλα ποσοστά ρύπανσης, να ελεγχθεί κατά πόσο αυτοί οι ρυπαντές επιδρούν στην Παγκόσμια Κλιματική Αλλαγή (ΠΚΑ) και στην υγεία και ανάπτυξη των οργανισμών.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

# ΜΕΛΕΤΗ ΒΙΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ LIF

### 4.1 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Τα βιοσωματίδια μπορούν να αποτελέσουν πηγή αρκετών προβλημάτων για τον άνθρωπο, τα ζώα και τα φυτά, όταν έρχονται σε επαφή μαζί τους, ανάλογα με το είδος, τη δόση-συγκέντρωσή και τον χρόνο έκθεσης. Όλοι οι ζωντανοί οργανισμοί περιέχουν εσωτερικά μικροοργανισμούς (βιοσωματίδια) οι οποίοι επιτελούν συγκεκριμένες λειτουργίες στο πλαίσιο βιωσιμότητας των οργανισμών. Για παράδειγμα τα αέρια του εντέρου προκαλούνται από βακτηριακή δράση, ωστόσο εάν αυξηθεί αυτός ο πληθυσμός στην περιοχή εσωτερικά του οργανισμού ή μετακινηθεί σε μία άλλη περιοχή μπορεί να υπάρξουν αναταράξεις. Τα βιοσωματίδια που βρίσκονται εκτός οργανισμών, αποτελούν ακόμη πιο μεγάλο κίνδυνο για αυτούς καθώς ο οργανισμός δεν είναι οικείος με αυτά και όταν προσβληθεί το εκδηλώνει με διάφορα συμπτώματα και ενεργοποιεί το αμυντικό σύστημα (π.χ. πυρετός). Υπάρχουν βιοσωματίδια που σε συνδυασμό με αέριους ρύπους μπορούν να προκαλέσουν άσθμα και θνησιμότητα. Οι άνθρωποι με χαμηλό ανοσοποιητικό σύστημα είναι ευάλωτοι σε βακτήρια, ιούς και μύκητες. Ιδιαίτερα σε ασθενείς που έχουν μολυνθεί από μύκητες και παράλληλα το ανοσοποιητικό τους σύστημα βρίσκεται σε καταστολή (π.χ. λόγω AIDS). Η περίπτωση του μύκητα *Pneumocystis carinii* προκαλεί πνευμονία και με τη σειρά του τον θάνατο (Raven et al., 2014).

Με βάση τα παραπάνω, η μελέτη των βιοσωματιδίων είναι ύψιστης σημασίας για τη διατήρηση της έμβιας ζωής του πλανήτη. Η μελέτη αυτή μπορεί να αφορά τη δομή τους, τη δράση τους, την αντοχή τους σε συνθήκες, το μέγεθός τους, την αναπαραγωγή τους, την αλληλεπίδρασή τους με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, τη μεταφορά τους στο περιβάλλον και την εξέλιξή τους, διότι αυτά και κυρίως τα βακτήρια (όπως αναφέρθηκε στο Υποκ. 1.9) μπορούν και επιβιώνουν και να προσαρμόζονται σε οποιοδήποτε περιβάλλον μακροχρόνια ή βραχυχρόνια.

Το Εργαστήριο Οπτοηλεκτρονικής, Laser και Εφαρμογών τους (Laboratory of Optoelectronics, Lasers and their Applications) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (National Technical University of Athens) έχει ως στόχο να μελετήσει τα προαναφερόμενα (Υποκ. 1.7, 1.9 και 1.10) βιοσωματίδια ως προς το σήμα απόκρισης μετά την

αλληλεπίδραση τους με υπεριώδης (Ultra violet-UV) ακτινοβολία. Η απόκριση αυτή χαρακτηρίζεται από τον φθορισμό τους, ο οποίος είναι χαρακτηριστικός για κάθε είδος (ίσως να υπάρχουν και ομοιότητες ή και να ταυτίζονται), με αποτέλεσμα να αποτελεί το «δακτυλικό τους αποτύπωμα». Ο φθορισμός θα προκληθεί από την UV ακτινοβολία laser και το σήμα απόκρισης θα ανιχνευτεί από μία διαδικασία γνωστή ως «φασματοσκοπία του laser-επαγόμενου φθορισμού» (Laser Induced Fluorescence spectroscopy-L.I.F.).

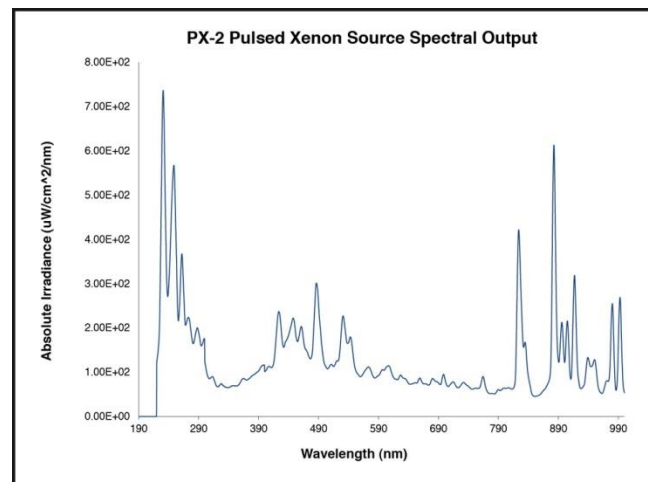
Στη συνέχεια, η Μονάδα Ατμοσφαιρικής Τηλεπισκόπησης με Laser του Εργαστηρίου Οπτοηλεκτρονικής, Laser και Εφαρμογών (Laser Remote Sensing Unit-LRSU) καλύπτεται να αξιοποιήσει αυτά τα δεδομένα για να τα εντοπίσει στην ατμόσφαιρα με τις τεχνικές lidar που περιγράφηκαν στα Υποκεφάλαια 2.3, 2.5 και 2.6 (elastic lidar, lif lidar και depolarisation lidar). Η ιδιαίτερης σημασία τεχνική είναι η LIF LiDAR, καθώς θα εντοπίζει τον φθορισμό βιοσωματιδίων στην ατμόσφαιρα και είναι μία τεχνική που τα τελευταία χρόνια αρχίζει και γίνεται γνωστή γιατί θα μπορεί να ταυτοποιεί το βιοσωματίδιο και να το παρακολουθεί σε πραγματικό χρόνο.

## **4.2 ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ LIF**

Για την απόκτηση των φασμάτων φθορισμού φθοριζόντων υλικών χρησιμοποιήθηκαν δύο πηγές φωτός, μία λυχνία και ένα σύστημα laser. Πιο συγκεκριμένα, στα αρχικά στάδια του πειράματος χρησιμοποιήθηκε μία λυχνία PX-2 Pulsed Xenon Source Spectral της Ocean Optics για να ελεγχθεί ότι όντως μπορεί να παρατηρηθεί ο φθορισμός με τα τεχνικά μέσα του εργαστηρίου. Η συγκεκριμένη λάμπα εκπέμπει σε ένα μεγάλο φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (UV-IR, Σχήμα 4.2.1), στο οποίο περιέχονται τα κατάλληλα μήκη κύματος για να προκληθεί το φάσμα του φθορισμού. Είναι γνωστό ότι φθορισμός αναμένεται σε μεγαλύτερα μήκη κύματος της υπεριώδους ακτινοβολίας και κυρίως στο ορατό φάσμα. Για τις ανάγκες διάδοσης ακτινοβολίας που προκύπτει μετά την αλληλεπίδραση του φωτός με τα δείγματα χρησιμοποιείται μία γραμμική οπτική ίνα τύπου P400-025-SR και μία μορφής «Υ» τύπου R600-7-UV-125F της Ocean Optics. Παρακάτω θα αναφερθούν περισσότερες λεπτομέρειες, ωστόσο και οι δύο συνδέονται με ένα φασματόμετρο USB4000-FL της Ocean Optics.

Η ακτινοβολία που εισέρχεται στο φασματόμετρο διέρχεται από ένα ζωνοπερατό φίλτρο και έπειτα ένα κάτοπτρο ευθυγραμμίζει τη δέσμη (collimated beam) την οποία και στέλνει σε ένα φράγμα περίθλασης (diffraction grating), το οποίο και αναλύει το φως στα επί

μέρους μήκη κύματος. Κατόπιν το φως προσπίπτει σε ένα κάτοπτρο εστίασης και εστιάζεται πάνω σε μία CCD (Charge-Coupled Device) κάμερα καταγράφοντας την ένταση του φωτός του κάθε μήκους κύματος σε pixel. Το φασματόμετρο είναι συνδεδεμένο με έναν υπολογιστή, στο οποίο είναι εγκατεστημένο το λογισμικό Spectra Suite της Ocean Optics.



ΣΧΗΜΑ 4.2.1: Το φάσμα εκπομπής της λυχνίας (Ocean Optics).

Τα ηλεκτρονικά μετασχηματίζουν τα ανιχνεύόμενα pixels και εμφανίζουν ολόκληρο το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην οθόνη του λογισμικού. Με το που ανοίγει το λογισμικό, η λειτουργία στην οποία βρίσκεται ονομάζεται “scope mode”. Αυτή η λειτουργία αποτελεί τα raw data, τα οποία μπορούν να σωθούν ως αρχείο .txt (tab delimited) και ακολούθως να επεξεργαστούν. Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα και για άλλες λειτουργίες που παρέχουν επεξεργασμένα σήματα ανάλογα με την ανάγκη (φάσματα απορρόφησης κ.τ.λ.). Στην παρούσα εργασία όλα τα φάσματα ελήφθησαν από το scope mode. Στην οθόνη δίνεται η επιλογή για τον προσδιορισμό του χρόνου καταγραφής (integration time) και της σάρωσης (scanning) και ο πολλαπλασιασμός τους δίνει το συνολικό χρόνο καταγραφής των φασμάτων, για παράδειγμα εάν ο χρόνος καταγραφής είναι 5 sec και η σάρωση είναι 5, τότε ο συνολικός χρόνος καταγραφής είναι 25 sec και, άρα, το σήμα που θα παρουσιαστεί στην οθόνη είναι μία μέση τιμή όλων των σημάτων που καταγράφηκαν σε αυτό το χρονικό διάστημα.

Στην οθόνη δίνεται, επίσης, η επιλογή να ενεργοποιηθούν οι διορθώσεις για «ανεπιθύμητο» φως (stray light) και ηλεκτρονικό θόρυβο (electrical dark noise), οι οποίες

και συνιστώνται αυστηρά να ενεργοποιηθούν. Η πρώτη διόρθωση αφορά την επίδραση της ακτινοβολίας που προήλθε από περιθλάσεις  $2^{ns}$  και  $3^{ns}$  τάξης, τις ατέλειες του φράγματος περίθλασης, ή τις εσωτερικές ανακλάσεις στο φασματομέτρο και διαρροές ακτινοβολίας εντός του φασματομέτρου. Η δεύτερη διόρθωση αφορά την ομάδα pixels που έχει το φασματομέτρο και αποτρέπουν να φτάσει το φως σε αυτά (σκοτεινά), λαμβάνεται η μέση τιμή τους κάθε φορά και αφαιρείται από όλα τα pixels που δίνουν σήμα, με αποτέλεσμα να μειώνουν το φάσμα κοντά στην περίπτωση που θα απουσίαζε η ακτινοβολία και ουσιαστικά να επανορθώνουν για την περίπτωση που υπάρχει μεταβολή της στάθμης μηδενικών counts.

Στην οθόνη του λογισμικού υπάρχουν τρεις κόμβοι που επιτρέπουν τη συνεχόμενη καταγραφή φασμάτων (play), διακοπή καταγραφής φασμάτων (pause) και καταγραφή μίας φοράς (συνδυασμός play-pause). Να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια της καταγραφής μπορεί να αλλάξει ο αριθμός σαρώσεων και ο χρόνος καταγραφής, αλλά από την στιγμή που αυτές οι δύο μεταβλητές αλλάξουν, οι αλλαγές θα πραγματοποιηθούν μετά από δύο φασματικές μετρήσεις. Επίσης, να σημειωθεί ότι όταν πατηθεί το pause κατά τη διάρκεια καταγραφής το λογισμικό δεν θα σταματήσει να καταγράφει, παρά μόνο αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία καταγραφής.

Τα λαμβανόμενα φάσματα παρουσιάζονται σε ένα δισδιάστατο σύστημα αξόνων με τον οριζόντιο άξονα να περιλαμβάνει τις τιμές του μήκους κύματος στο εύρος  $346.20\text{ nm} - 1039.30\text{ nm}$  (είναι το spectral range που δίνει το diffraction grating) και με τον κατακόρυφο άξονα να παρουσιάζει τις μετρούμενες εντάσεις της ανιχνευόμενης ακτινοβολίας σε counts. Δύο σημαντικές σημειώσεις πριν συνεχιστεί η περιγραφή του πειράματος, είναι η διασφάλιση του ορίου των  $60000\text{ counts}$  σε ένταση, για να μην καταστραφεί ο CCD, και η απαραίτητη βαθμονόμηση του φασματομέτρου. Αναφορικά με την πρώτη σημείωση για να αποφευχθεί σύγχυση, όταν θα λαμβάνονται φάσματα από μέσες τιμές (averaging) είναι λογικό να ξεπεραστούν τα  $60000\text{ counts}$ .

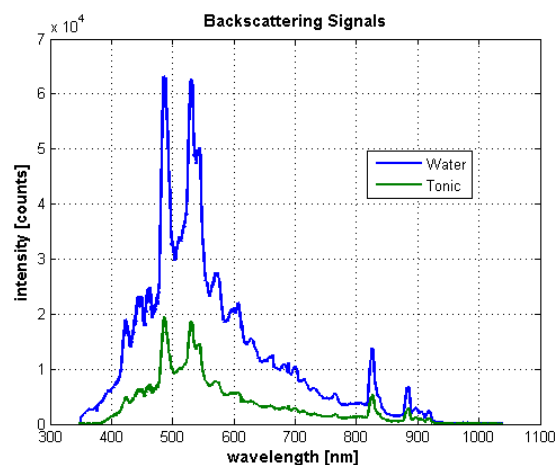
Τα φάσματα ελήφθησαν σε συνθήκες συσκότισης και οι λοιπές πηγές φωτός καλύπτονταν όσο το δυνατόν καλύτερα. Κλείνοντας την είσοδο του φασματομέτρου με το καπάκι και έχοντας πάλι συνθήκες σκοταδιού, λαμβανόταν το φάσμα του υποβάθρου, το οποίο και αφαιρείτο από τα φάσματα των δειγμάτων. Η οποιαδήποτε επεξεργασία των φασμάτων, καθώς και η διεξαγωγή γραφικών παραστάσεων έγινε με την χρήση του λογισμικού MATLAB (Υποκεφάλαιο 3.3).

Ακολούθως, έπρεπε να εξεταστεί ο βέλτιστος τρόπος για να προκληθεί και να ανιχνευθεί ο φθορισμός των δειγμάτων. Για αυτό το λόγο, δοκιμάστηκαν δύο τρόποι, αρχικά

να λαμβάνεται το σήμα υπό  $180^\circ$  και έπειτα υπό  $90^\circ$ . Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε η οπτική ίνα «Υ», η οποία έχει τρεις εισόδους-εξόδους. Η μία συνδέεται στη λυχνία και μεταφέρει το φως στο δείγμα. Το φως αυτό εξέρχεται από την ίνα ελέγχου (μακριά μεταλλική άκρη), η οποία είναι τοποθετημένη πάνω από το δείγμα. Οι οπισθοσκεδάσεις εισέρχονται στην ίνα ελέγχου και εξέρχονται από την τρίτη οπή, η οποία αποτελεί μία σύζευξη ινών και συνδέεται με το φασματόμετρο. Η γραμμική ίνα χρησιμοποιήθηκε για τη δεύτερη περίπτωση, της οποίας η μία άκρη είναι στερεωμένη δίπλα στο δείγμα και η άλλη είναι συνδεδεμένη με το φασματόμετρο.

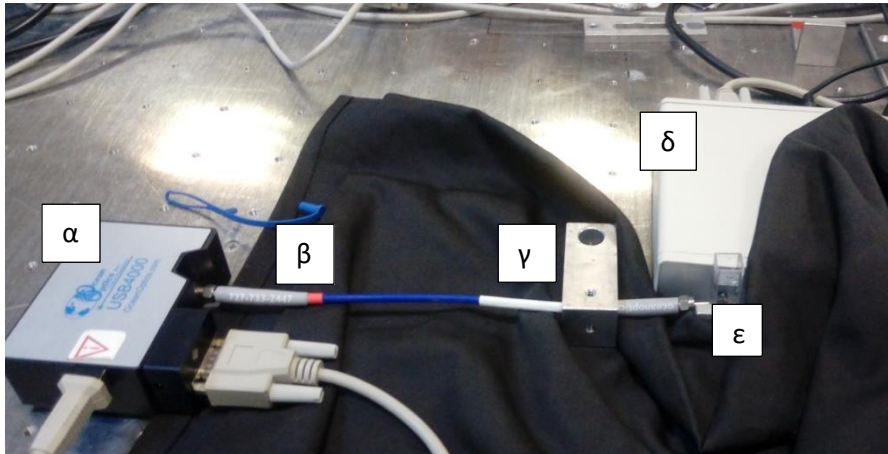
Το δείγμα που επιλέχθηκε για τον έλεγχο του φθορισμού ήταν το τονωτικό νερό (tonic water), ένα υγρό το οποίο αποτελείται κυρίως από  $CO_2$ , νερό, ζάχαρη, κιτρικό οξύ και την φθορίζουσα ουσία κινίνη (quinine). Το φάσμα του και στις δύο περιπτώσεις συγκρίθηκε με το φάσμα αποσταγμένου νερού, έπειτα από την αλληλεπίδρασή του με το προσπίτον φως. Τα δείγματα είχαν τοποθετηθεί σε μη φθορίζουσες πλαστικές κυβέτες (cuvettes) και περικλύονταν από ένα μαύρο πανί για την ελαχιστοποίηση του θορύβου και τυχόν ανακλάσεων.

Στην πρώτη περίπτωση, τα φάσματα που προέκυψαν έπειτα από 5 sec και 10 scans (Σχήμα 4.2.2) ήταν παρόμοια σε μορφή, αλλά διαφορετικά σε ένταση. Οι 8 πρώτες κορυφές (ξεκινώντας από τα αριστερά) συγκρίθηκαν με αυτές του φάσματος εκπομπής της λυχνίας και ήταν ακριβώς οι ίδιες στα μήκη κύματος  $424.21\text{ nm}$ ,  $449.21\text{ nm}$ ,  $462.37\text{ nm}$ ,  $490.00\text{ nm}$ ,  $512.37\text{ nm}$ ,  $532.11\text{ nm}$ ,  $545.26\text{ nm}$  και  $574.21\text{ nm}$ , πράγμα το οποίο σημαίνει ότι η οπισθοσκέδαση στη συλλογή του φωτός υπό  $180^\circ$  ευνοείται έναντι του φθορισμού. Η μείωση της έντασης της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας στην περίπτωση του τονωτικού νερού οφείλεται στην απορρόφηση λόγω κινίνης.

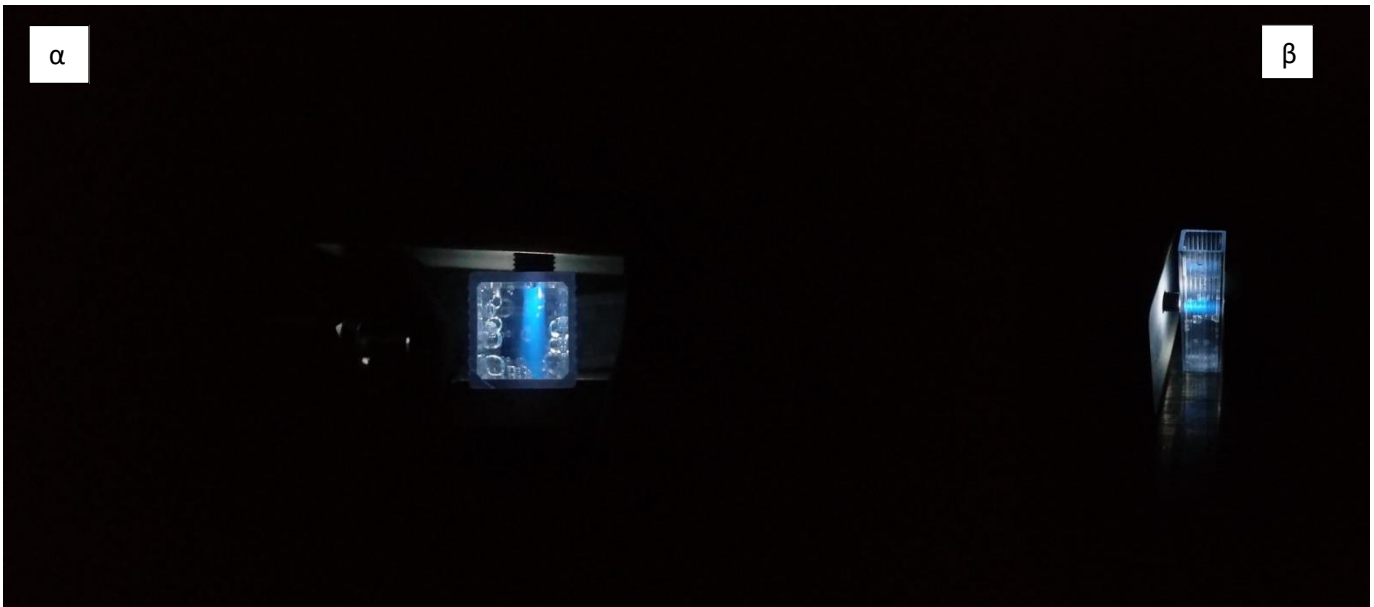


ΣΧΗΜΑ 4.2.2: Οι οπισθοσκεδάσεις του απεσταγμένου και τονωτικού νερού.

Στην δεύτερη περίπτωση (Σχήμα 4.2.3) παρατηρήθηκε το μπλε χρώμα από το φθορισμό της κινίνης (Σχήματα 4.2.4 α και β). Το μπλε χρώμα δεν ήταν ενιαίο, αλλά παρατηρούνταν αποχρώσεις του, κάτι που θα επιβεβαιωθεί με το φάσμα του μετά την επεξεργασία των δεδομένων.



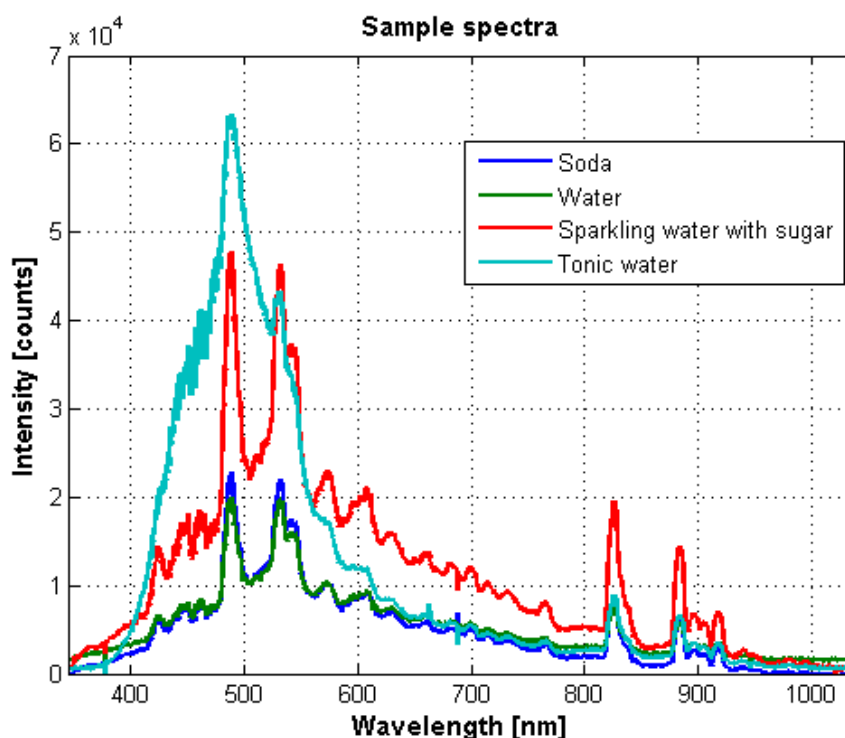
**ΣΧΗΜΑ 4.2.3:** Η διάταξη επαγόμενου φθορισμού από τη λυχνία. Φαίνεται (α) το φασματόμετρο, (β) η γραμμική οπτική ίνα και (γ) το στήριγμά της, (δ) η λυχνία και μπροστά της (ε) η κυβέτα. Η κυβέτα προσεκτικά περικλύεται από το μαύρο πανί.



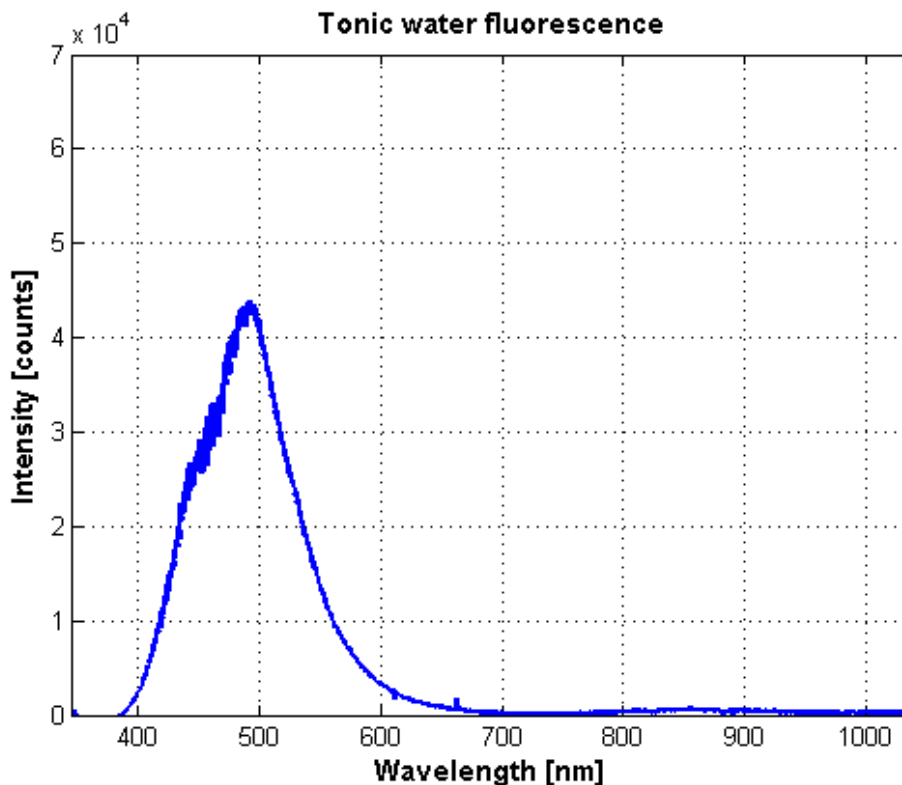
**ΣΧΗΜΑ 4.2.4:** (α) κάτω και (β) πλάγια όψη. Η ακτινοβολία της λυχνίας αλληλεπιδρά με το τονωτικό νερό σε συνθήκες σκοταδιού. Το υπεριώδες φάσμα της λυχνίας φθορίζει την κινίνη και αποκρίνει το όμορφο μπλε σε διάφορες αποχρώσεις.



Η απόκριση του τονωτικού νερού συγκρίθηκε με αυτήν του απεσταγμένου (distilled water), της σόδας και του ανθρακούχου νερού με προσμίξεις ζάχαρης (Σχήμα 4.2.5). Η σύγκριση αυτή έγινε με στόχο την επιβεβαίωση της διαφοράς που κάνει η κινίνη σε σχέση με τις άλλες ουσίες. Στο Σχήμα 4.2.5 φαίνονται τα διάφορα φάσματα. Το φάσμα του νερού και της σόδας δεν έχουν καμία διαφορά, ενώ το ανθρακούχο νερό με τις προσμίξεις ζάχαρης φαίνεται να σκεδάζει πιο έντονα το φως λόγω ζάχαρης. Με τη μέθοδο των τριών παρασκευάστηκε το κατάλληλο μείγμα ανθρακούχου νερού-ζάχαρης γνωρίζοντας ότι σε 330 mL τονωτικού νερού αντιστοιχούν 26.1 g σάκχαρα. Το φάσμα του τονωτικού νερού έχει μεγάλη διαφορά με τα άλλα τρία φάσματα λόγω παρουσίας της κινίνης, που σημαίνει ότι υπερσχύει ο φθορισμός έναντι των σκεδάσεων. Από το φάσμα του τονωτικού νερού αφαιρέθηκε το φάσμα του ανθρακούχου νερού αναμειγμένου με ζάχαρη, μιας και περιέχονται τρία από τα τέσσερα βασικά συστατικά του τονωτικού νερού, για να αφαιρεθεί η συνεισφορά τους από τις σκεδάσεις. Το σήμα που προκύπτει (Σχήμα 4.2.6) είναι το φάσμα φθορισμού της κινίνης, το οποίο και εμπίπτει σε ευρύ διάστημα του μπλε, ωστόσο να σημειωθεί ότι συνεισφέρουν ελάχιστα και οι σκεδάσεις των λοιπών ουσιών του τονωτικού νερού.



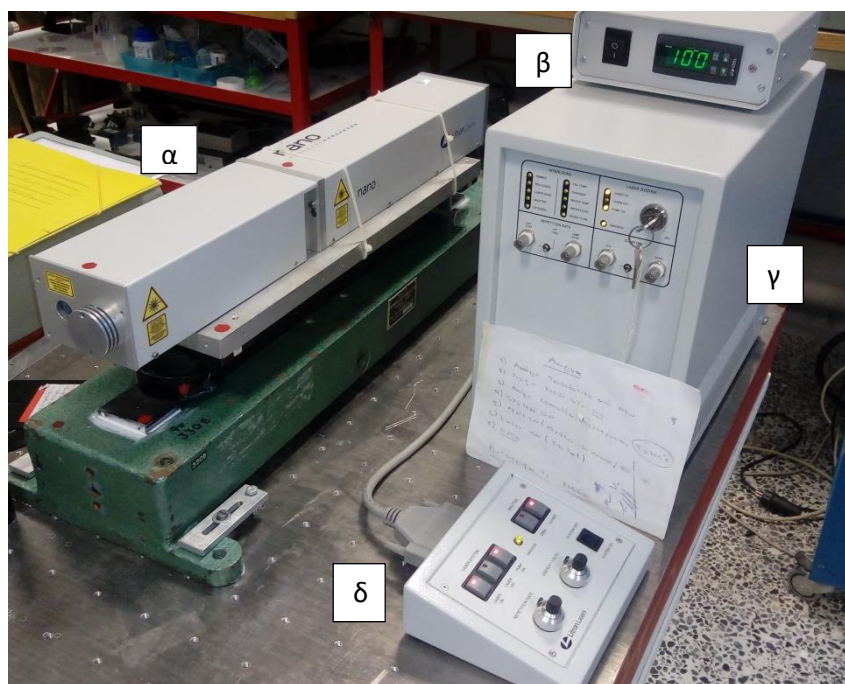
ΣΧΗΜΑ 4.2.5: Τα σήματα των τεσσάρων δειγμάτων διορθωμένα κατά το φάσμα υποβάθρου.



ΣΧΗΜΑ 4.2.6: Ο φθορισμός της κινίνης. Καλύπτεται ολόκληρο το φάσμα του μπλε.

Αξίζει να σημειωθεί ότι πριν αφαιρεθεί το φάσμα του ανθρακούχου νερού με τη ζάχαρη από το φάσμα του τονωτικού νερού, κανονικοποιήθηκε με βάση το φάσμα του τονωτικού νερού με την εφαρμογή ενός (0.44), έτσι ώστε να αφαιρεθεί και η επίδραση του υπερύθρου της λυχνίας.

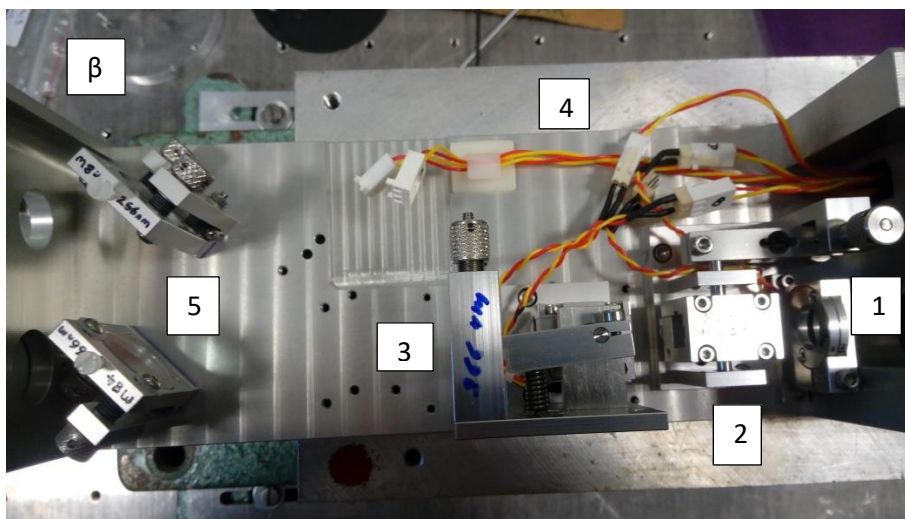
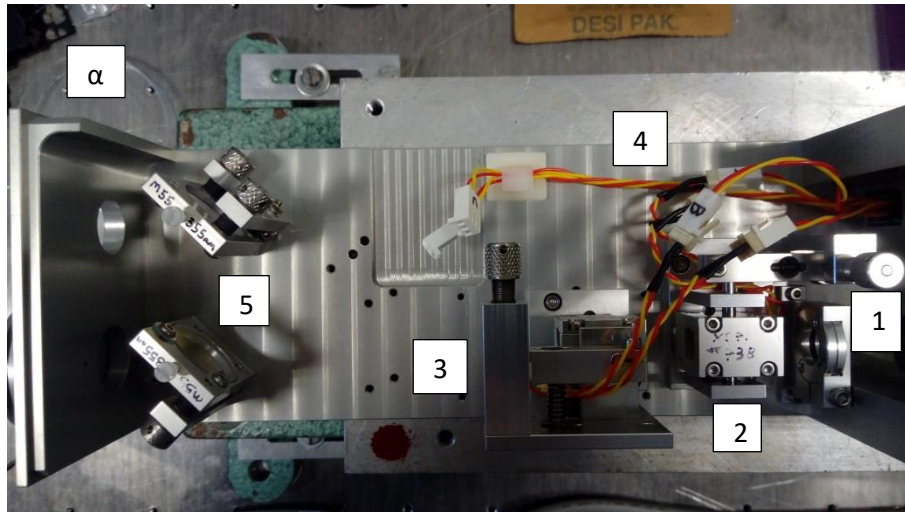
Στην παρούσα φάση, το επόμενο διαθέσιμο και εύκολο στη συλλογή του δείγμα ήταν η γύρη του *Pinus halepensis*. Όταν η συλλογή φασμάτων πραγματοποιούνταν στις 90° (Υποκ. 4.3), διαπιστώθηκε ότι η ενέργεια της λυχνίας δεν επαρκεί για να προκαλέσει έντονο φθορισμό της γύρης. Αυτός ήταν και ο λόγος που οι κορυφές του φάσματος εκπομπής της λυχνίας ήταν πολύ έντονες. Η λυχνία αντικαθίσταται με ένα Nd:YAG laser (Υποκ. 3.3 για τη φυσική του) της σειράς Nano L-200-10 της Litron Lasers Ltd. (Σχήμα 4.2.7).



**ΣΧΗΜΑ 4.2.7:** Το Nd:YAG laser της σημειακής πειραματικής διάταξης. Φαίνεται (α) η κεφαλή laser, (β) ο ελεγκτής θερμοκρασίας, (γ) η μονάδα τροφοδοσίας-ψύξης και (δ) η μονάδα χειρισμού.

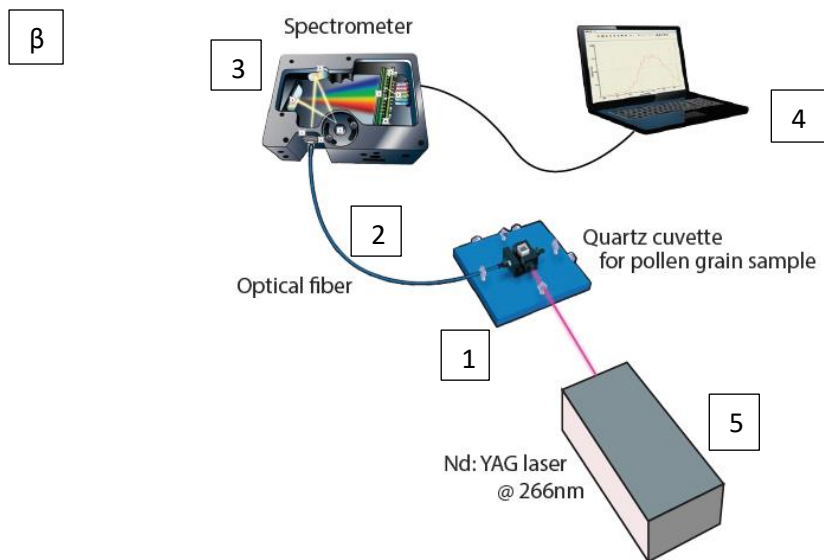
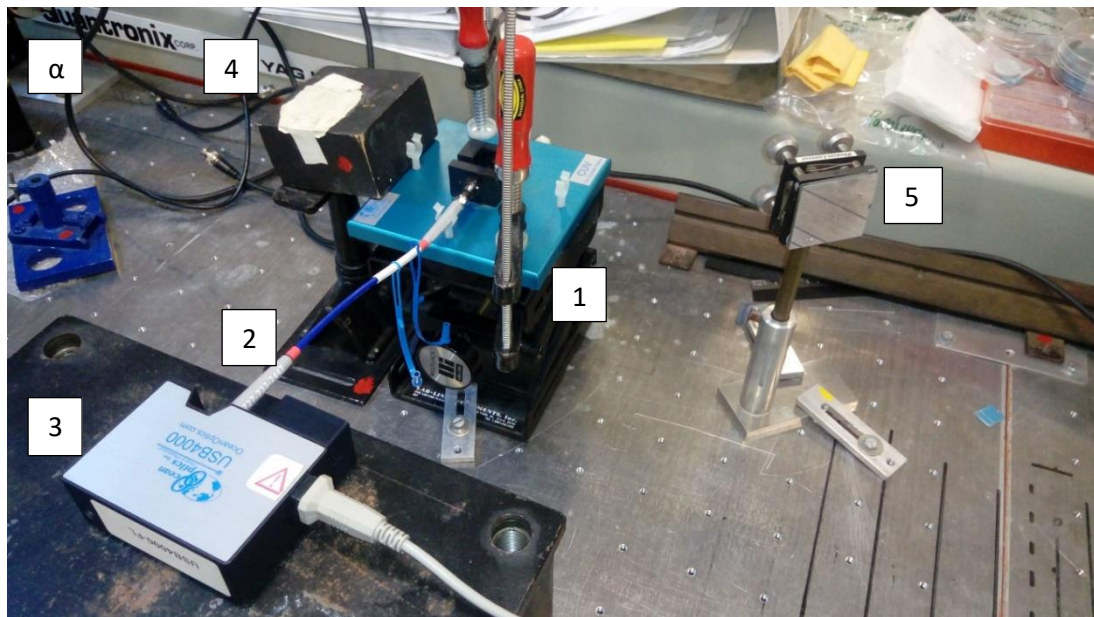
Το σύστημα αποτελείται από την κεφαλή του laser, τη μονάδα τροφοδοσίας και ψύξης και τη μονάδα χειρισμού-ελέγχου. Η μονάδα ψύξης-τροφοδοσίας συνδέεται με την κεφαλή με καλώδιο παροχής υψηλής τάσης και σωληνώσεις ψύξης (για τη ψύξη χρησιμοποιείται απεσταγμένο νερό). Το σύστημα ψύξης είναι υποχρεωτικό για την αποφυγή υπερθέρμανσης και καταστροφής των κρυστάλλων της παραγωγής της δέσμης laser. Η ρύθμιση και διατήρηση θερμοκρασίας των κρυστάλλων στους  $100^{\circ}C$  γίνεται με έναν ελεγκτή θερμοκρασίας, ενώ η μονάδα τροφοδοσίας παρέχει την απαιτούμενη τάση στις λυχνίες στην οπτική κοιλότητα για την επιτευξη της οπτικής άντλησης. Η ρύθμιση της τάσης και του ρυθμού επαναληψιμότητας (repetition rate) γίνεται με τη μονάδα χειρισμού με την τάση και τη συχνότητα να φτάνουν έως και  $1000 V$  και  $10 Hz$  αντίστοιχα.

Το laser λειτουργούσε παλμικά (Q-Switch) στο σκοτάδι στην 3<sup>η</sup> και 4<sup>η</sup> αρμονική, δηλαδή  $355 nm$  (μέγιστη ενέργεια ανά παλμό  $22.6 mJ$ ) και  $266 nm$  (μέγιστη ενέργεια ανά παλμό  $14.8 mJ$ ) αντίστοιχα για την λήψη των φασμάτων φθορισμού. Για την εναλλαγή μεταξύ των δύο μηκών κύματος χρειαζόταν τροποποίηση τα οπτικά στοιχεία εντός της κεφαλής (Σχήμα 4.2.8 α και β).



**ΣΧΗΜΑ 4.2.8:** (α) Διακρίνεται (1) το πλακίδιο  $\lambda/2$  για την πόλωση της 1<sup>ης</sup> αρμονικής, (2) ο κρύσταλλος 532 nm, (3) ο κρύσταλλος 355 nm, (4) τα καλώδια παροχής τάσης και ελέγχου θερμοκρασίας και (5) τα διχρωϊκά κάτοπτρα για την υπολειπόμενη 1<sup>η</sup> αρμονική. (β) Διακρίνεται τα ίδια με τη διαφορά ότι στη θέση (3) υπάρχει ο κρύσταλλος για την παραγωγή της 4<sup>ης</sup> αρμονικής.

Η διαμορφωμένη διάταξη αποτελείται από το laser, του οποίου η δέσμη εισέρχεται στο στατώ (Σχήμα 4.2.9 α), το οποίο φέρει την κυβέτα με το δείγμα. η ακτινοβολία που προκύπτει από την αλληλεπίδραση του φωτός με την ύλη συλλέγεται υπό  $90^\circ$  και κατευθύνεται εντός του φασματοφωτόμετρου και, τέλος, καταγράφεται ηλεκτρονικά από τον υπολογιστή (Σχήμα 4.2.9 α και β).



**ΣΧΗΜΑ 4.2.9:** (α) Φωτογραφία της διάταξης. Φαίνεται (1) το στατό, (2) η γραμμική οπτική ίνα, (3) το φασματόμετρο, (4) ο απορροφητής (beam dump) της υπολειπόμενης ακτινοβολίας και (5) το οπτικό διάφραγμα για την αποκοπή της 2<sup>ης</sup> αρμονικής. (β) Σχηματικό της διάταξης. Φαίνονται τα ίδια με τη διαφορά ότι στη θέση (4) και (5) βρίσκεται αντίστοιχα ο υπολογιστής και το laser. Η διάταξη είναι ίδια και για τα 355nm.

Δύο διαφορετικές κυβέτες χρησιμοποιήθηκαν (για το laser), μία από χαλαζία (quartz) της Sigma-Aldrich, η οποία παρουσίαζε φθορισμό σε μεγάλες συχνότητες PRF (Pulse Repetition Frequency), και οι υπόλοιπες από πολυστυρένιο της Sigma-Aldrich (BRAND standard disposable cuvettes), οι οποίες φθόριζαν σε οποιοδήποτε PRF. Η πρώτη κυβέτα επιτρέπει τη διέλευση από τα 266 nm και άνω, ενώ η δεύτερη για τα 355 nm (δεν επιτρέπει

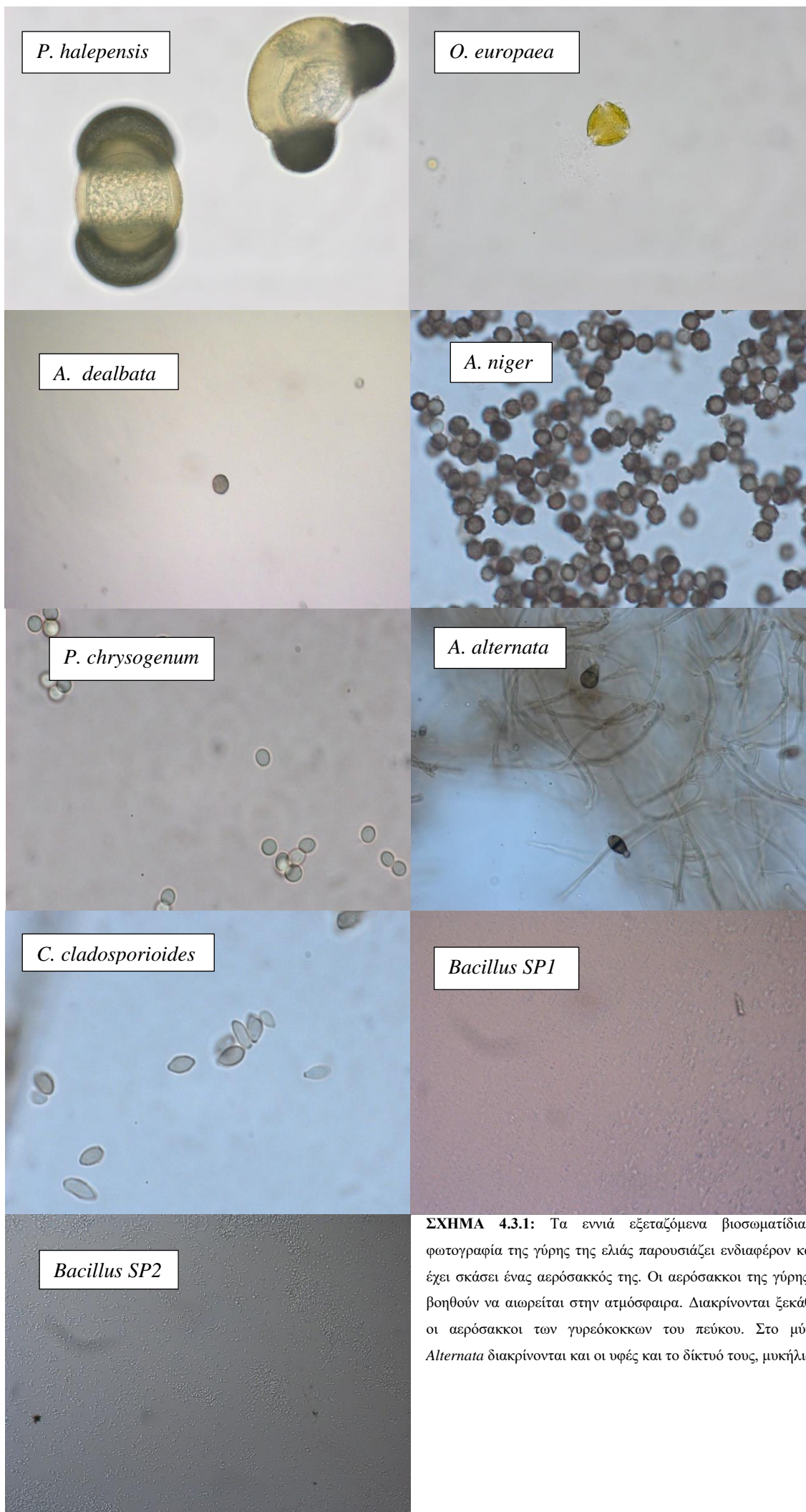
καθόλου τη διέλευση στα 266 nm).

Τέλος, δύο φίλτρα χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διεξαγωγή του πειράματος. Στην περίπτωση των 266 nm χρησιμοποιήθηκε το υπεριώδες φίλτρο 3650XALP της Omega Optical Inc, το οποίο επιτρέπει διέλευση με διαπερατότητα περισσότερο από 80 % από τα 355.3 nm και άνω. Για την 3<sup>η</sup> αρμονική χρησιμοποιήθηκε το υπεριώδες φίλτρο FEL0400 της ThorLabs, το οποίο επιτρέπει τη διέλευση από τα 400 nm και άνω.

### 4.3 ΦΑΣΜΑΤΑ ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ

Εννέα είδη βιογενών σωματιδίων (Σχήμα 4.3.1) μελετήθηκαν με το Nd:YAG laser, οι γυρεόκοκκοι *Pinus halepensis*, *Olea europaea* και *Acacia dealbata*, οι μύκητες *Aspergillus niger*, *Penicillium chrysogenum*, *Alternaria alternata* και *Cladosporium cladosporioides* και τα δύο βακτήρια του γένους *Bacillus*. Αναφορικά με τα βακτήρια δεν είναι εύκολος ο διαχωρισμός των ειδών και για τις ανάγκες της εργασίας χαρακτηρίζονται ως *SPecimen 1 (SP1)* και *SPecimen 2 (SP2)*. Επιπλέον, εξετάζεται και ο φθορισμός που μπορεί να δώσει ο κόκκος άμμου από τη Σαχάρα. Σε αυτήν την περίπτωση ο φθορισμός δεν προκύπτει από τον κόκκο άμμου, αλλά από τις διάφορες ουσίες που προσκολλούνται πάνω σε αυτούς, τουλάχιστον σίγουρα κατά την εναέρια μεταφορά (Prospero et al., 2005; Reichardt et al. 2018).

Οι διαστάσεις του κάθε σωματιδίου μετρήθηκαν πάνω σε εικόνες που πάρθηκαν σε απλό φωτισμό με το μικροσκόπιο AxioImager.A1 της Zeiss στον Τομέα Οικολογίας και Ταξινομικής του Τμήματος Βιολογίας (Department of Ecology and Systematics, Faculty of Biology) του ΕΚΠΑ (Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών-National and Kapodistrian University of Athens). Οι τιμές προέρχονται από μέσες τιμές και τις τυπικές αποκλίσεις των μετρήσεων, καθώς σωματίδια του ίδιου είδους παρουσιάζουν διακύμανση αναφορικά με μέγεθός τους. Να σημειωθεί ότι δεν ήταν δυνατή η αναλυτική φωτογράφιση και μέτρηση των διαστάσεων των βακτηρίων. Επίσης, η μιμόζα συλλέχθηκε νωρίτερα από την περίοδο επικονίασής της και γι'αυτό οι γυρεόκοκκοι αποτελούν ακόμη ένα συσσωμάτωμα (ελάχιστοι είναι διάσπαρτοι) και γι'αυτό δε μετρήθηκαν οι διαστάσεις.



**ΣΧΗΜΑ 4.3.1:** Τα εννιά εξεταζόμενα βιοσωματίδια. Η φωτογραφία της γύρης της ελιάς παρουσιάζει ενδιαφέρον καθώς έχει σκάσει ένας αερόσακκός της. Οι αερόσακκοι της γύρης την βοηθούν να αιωρείται στην ατμόσφαιρα. Διακρίνονται ξεκάθαρα οι αερόσακκοι των γυρεόκοκκων του πεύκου. Στο μύκητα *Alternata* διακρίνονται και οι υφές και το δίκτυό τους, μυκήλιο.

Οι γυρεόκοκκοι του πεύκου έχουν δύο αερόσακκους και το κύτταρο έχει ελλειπτικό σχήμα. Στο σύνολο είναι όλο ελλειπτικό. Η μεγαλύτερη διάστασή τους (με τους αερόσακκους) είναι  $143.138 \pm 3.526 \mu\text{m}$ , χωρίς τους αερόσακκους είναι  $108.988 \pm 0.960 \mu\text{m}$  και η μικρότερη απόσταση είναι  $91.914 \pm 4.386 \mu\text{m}$ . Ο γυρεόκοκκος της ελιάς είναι τριγωνικός με καμπυλωμένες πλευρές με τις μεγαλύτερες πλευρές να είναι  $40.798 \pm 0.405 \mu\text{m}$  και τις μικρότερες  $37.265 \pm 1.364 \mu\text{m}$ . Ο μύκητας *Aspergillus* είναι σφαιρικός και αγκαθωτός. Για αυτό εκτιμήθηκαν τρεις διαφορετικές διαστάσεις,  $4.892 \pm 0.088 \mu\text{m}$ ,  $5.504 \pm 0.285 \mu\text{m}$  και  $6.330 \pm 0.180 \mu\text{m}$ . Ο μύκητας *Penicillium* είναι σφαιρικός και ελαφρώς ελλειπτικός. Δύο εκτιμήσεις των διαμέτρων του είναι  $4.537 \pm 0.249 \mu\text{m}$  και  $5.439 \pm 0.275 \mu\text{m}$  καθώς παρατηρήθηκαν και περιπτώσεις διαμέτρων που κυμαίνονται στο εύρος των  $6 - 9 \mu\text{m}$ . Το σχήμα του μύκητα *Alternaria* θυμίζει αρκετά το αχλάδι με τις μεγάλες του πλευρές να είναι  $19.536 \pm 1.956 \mu\text{m}$  και  $32.149 \pm 3.400 \mu\text{m}$  με ιδιαίτερες περιπτώσεις να εμπίπτουν στο εύρος  $12 - 14 \mu\text{m}$  και  $40 - 54 \mu\text{m}$  αντίστοιχα. Η μικρή του απόσταση (μέση του μύκητα) εκτιμήθηκε να είναι  $12.907 \pm 1.711 \mu\text{m}$  με μία περίπτωση να είναι  $13.924 \mu\text{m}$ . Ο μύκητας *Cladosporium* μοιάζει με το λεμόνι. Η μεγάλη του απόσταση αντιστοιχεί στα  $9.873 \pm 2.778 \mu\text{m}$  και η μικρή του (στη μέση του μύκητα) στα  $4.849 \pm 0.509 \mu\text{m}$ . Οι διαστάσεις ενός μύκητα *Cladosporium* έφτασαν τα  $37.129 \times 6.957 \mu\text{m}^2$ . Η μιμόζα είναι συγκρίσιμη με τα  $20 \mu\text{m}$ , ενώ τα δύο βακτήρια είναι μικρότερα από αυτή την τιμή (Παράρτημα Α).

Ακολούθως, παρουσιάζονται τα φάσματα φθορισμού του κάθε βιοσωματιδίου με τη διάταξη laser που προτάθηκε στο Υποκεφάλαιο 4.2 (τα φάσματα πάρθηκαν για χρόνο ολοκλήρωσης  $5\text{sec} \times 5\text{scans}$ ). Αυτά τα φάσματα θα συγκριθούν με εικόνες φθορισμού που προκύπτουν από το μικροσκόπιο AxioPlan της Zeiss του Τμήματος Βιολογίας του ΕΚΠΑ, του οποίου χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3.1.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3.1:** Χαρακτηριστικά του μικροσκοπίου AxioPlan.

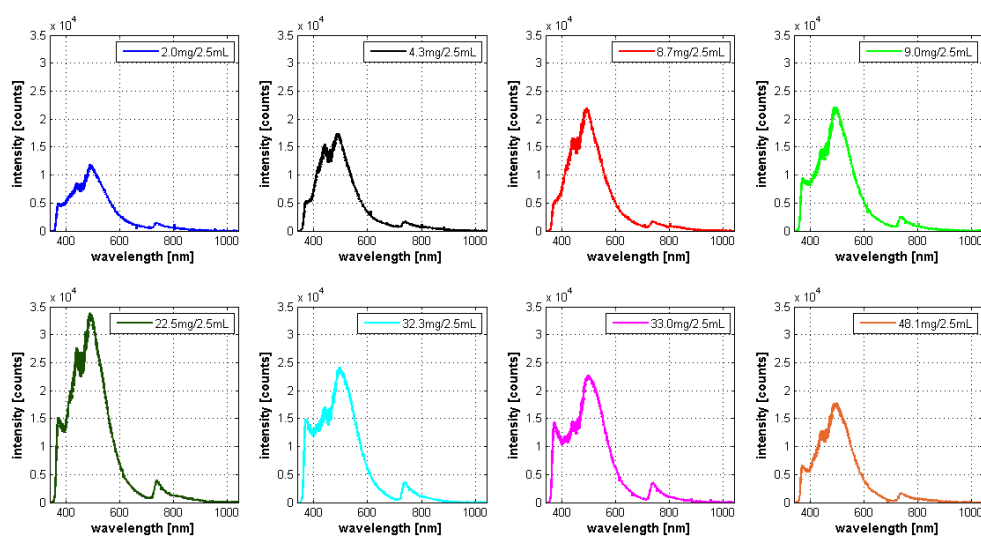
Σετ φίλτρων	Φίλτρο διέγερσης	Διχρωϊκό κάτοπτρο	Φίλτρο εκπομπής	Φθοροφόρες ουσίες
Zeiss FS02	G365	FT395	LP420	DAPI, Hoechst (Blue)
Zeiss FS10	BP450-490	FT510	BP515-565	FITC, GFP (Green)
Zeiss FS26	BP575-625	FT640	BP660-690	Cy5, Alexa594 (Red)



Τα δείγματα διεγείρονται με υπεριώδη ακτινοβολία, προερχόμενη από πηγή που διαθέτει το μικροσκόπιο. Τα φίλτρα διέγερσης (excitation filters) επιτρέπουν ζωνοπερατά τη διέλευση μηκών κύματος που απορροφούν τα αντίστοιχα φθοροφόρα (Πίνακας 4.3.1). Τα διχρωϊκά κάτοπτρα επιτρέπουν τη διέλευση μόνο των μηκών κύματος που προκύπτουν από τον φθορισμό και, τέλος, τα φίλτρα εκπομπής (emission filters) επιτρέπουν μόνο τη διέλευση του φθορισμού και όχι ανεπιθύμητου φωτός (Εταιρεία Semrock).

### ***ΓΥΡΕΟΚΟΚΚΟΙ PINUS HALEPENSIS***

Τα πρώτα βιοαερολύματα που μελετήθηκαν ήταν οι γυρεόκοκκοι του *P. halepensis*, λόγω της αφθονίας του και της εύκολης πρόσβασης και συλλογής τους. Αφού υπήρχε μεγάλη ποσότητα ήταν πιο εύκολο να παρασκευαστούν δείγματα διαφόρων συγκεντρώσεων. Πιο συγκεκριμένα παρασκευάστηκαν οχτώ διαφορετικά δείγματα με συγκεντρώσεις 2.0, 4.3, 8.7, 9.0, 22.5, 32.3, 33.0 και 48.1 mg/2.5 mL. Οι μάζες ζυγίστηκαν με μία ζυγαριά ακριβείας SAE 200 της Bosch. Αρχικά εξετάστηκε ο φθορισμός τους στα 266nm (Σχήμα 4.3.2) και παρατηρήθηκε ότι σκεδάζεται έντονα στα 532nm (η οποία αφαιρέθηκε έπειτα από τα φάσματα) και ότι η συγκέντρωση των 22.5mg/2.5mL είναι ιδανική (λογικά και οι γειτονικές συγκεντρώσεις) για την απόκριση του φθορισμού. Οι χαμηλές συγκεντρώσεις δεν εμπεριέχουν αρκετά σωματίδια έτσι, ώστε να αλληλεπιδράσει η δέσμη μαζί τους και να δώσουν φθορισμό και στις μεγάλες συγκεντρώσεις υπάρχουν τόσα σωματίδια που απορροφούν τον φθορισμό όσων αλληλεπιδρούν με τη δέσμη.

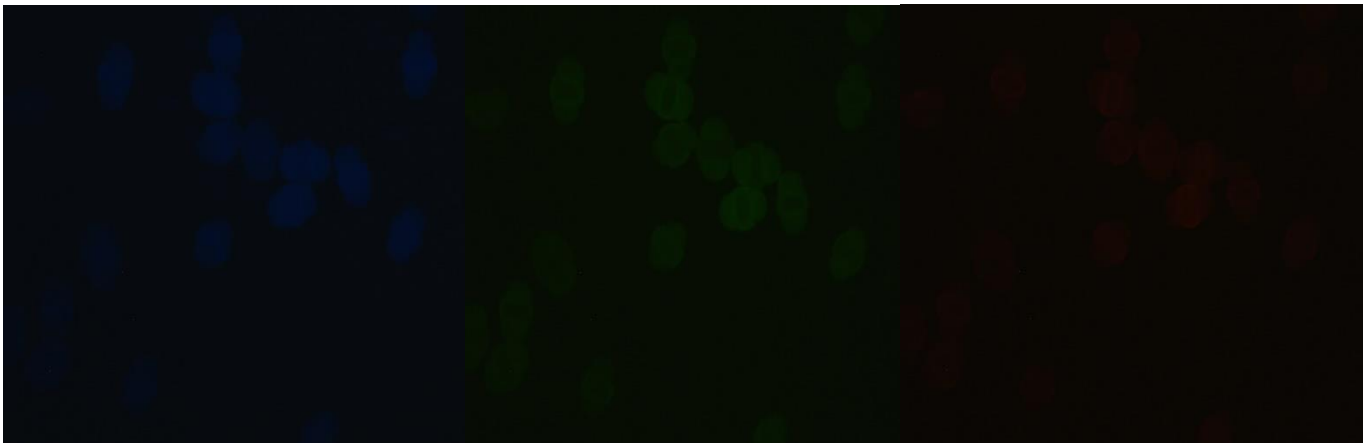


**ΣΧΗΜΑ 4.3.2:** Τα φάσματα φθορισμού της γύρης πεύκου για διάφορες συγκεντρώσεις προερχόμενα από την 4<sup>η</sup> αρμονική.

Στα φάσματα διακρίνονται τέσσερις κορυφές στις φασματικές περιοχές 370 – 376 nm, 441 – 444 nm, 488 – 500 nm και 737 – 741 nm. Η πρώτη περιοχή αντιστοιχεί σε φθορισμό τυροσίνης (tyrosine) και τρυπτοφάνης (tryptophan) (Pan, 2015; Hill et al., 2009), η δεύτερη ίσως να οφείλεται σε συνδυασμό φθορισμού DNA και κυτταρίνης και η μεγάλη ένταση οφείλεται σε υπέρθεση φασμάτων (καθώς ο φθορισμός του DNA είναι χαμηλός σε σχέση με της κυτταρίνης) (O'Connor, 2011) ή μπορεί να οφείλεται σε κάποια μετάπτωση, το τρίτο εύρος οφείλεται σε φθορισμό NADH/NADPH και κυτταρίνης (O'Connor, 2011) και, τέλος, το τέταρτο εύρος ενδέχεται να οφείλεται σε μετάπτωση Paschen, χωρίς ωστόσο αυτό να είναι απόλυτο, καθώς η σειρά Paschen όταν προκύπτει από το άπειρο εκπέμπει ενέργεια με μέγιστο μήκος κύματος 820.4 nm. Αυτό που παρατηρήθηκε στην 4<sup>η</sup> φασματική περιοχή είναι ότι για χαμηλές ενέργειες δεν εμφανιζόταν. Όλα τα φάσματα για την 4<sup>η</sup> αρμονική ελήφθησαν με την ένδειξη της τάσης να είναι στα 950 V και την επαναληψιμότητα στα 1.2 Hz, αλλιώς υπήρχε κίνδυνος να καεί η CCD. Αυτές οι τιμές επιλέχθηκαν με βάση το δείγμα μεγαλύτερης συγκέντρωσης διότι αυτό σκέδαζε περισσότερο την 2<sup>η</sup> αρμονική.

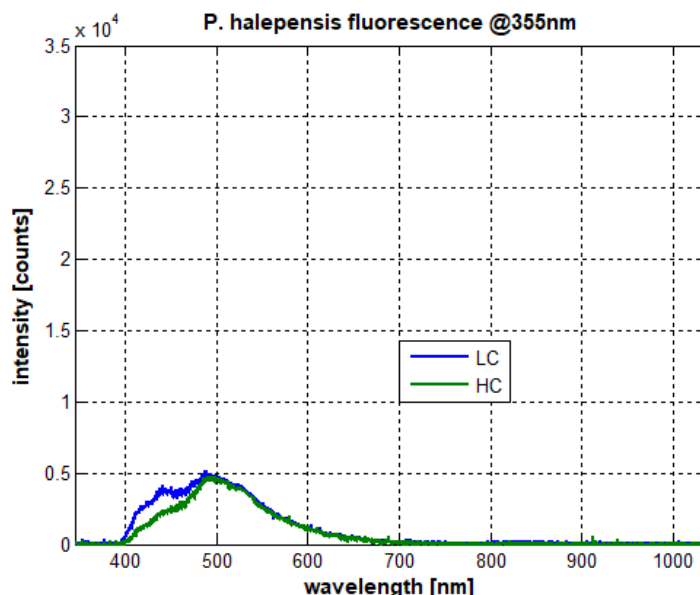
Εξετάστηκε η περίπτωση που το δείγμα περνά από διαδικασία σουρώματος (διότι στη συλλογή του παρόλο που είχε σουρωθεί και είχαν φύγει ξένα σώματα, παρέμειναν ελάχιστα), ωστόσο δεν διαπιστώθηκε διαφορά στα φάσματα φθορισμού.

Οι εικόνες φθορισμού που προκύπτουν από το Τμήμα Βιολογίας (Σχήμα 4.3.3) συμφωνούν αρκετά με τα φάσματα φθορισμού λόγω laser.



**ΣΧΗΜΑ 4.3.3:** Οι τρεις εικόνες αποδεικνύουν το μπλε και πράσινο χρώμα του φθορισμού της γύρης του πεύκου και, επίσης, επιβεβαιώνουν ότι το κόκκινο είναι αρκετά χαμηλής έντασης, επειδή πλέον η ζωή του φθορισμού έχει τελειώσει.

Για την 3<sup>η</sup> αρμονική, από τα 8 παραπάνω δείγματα επιλέχθηκε το δεύτερο και τέταρτο (μικρή και μεγάλη συγκέντρωση αντίστοιχα) όπου από τα καθένα πάρθηκε 2 mL του μείγματος (η κυβέτα πολυστυρενίου χωρά λιγότερα λίτρα απ'ό,τι η κυβέτα χαλαζία). Ο φθορισμός που αποκρίνουν τα δείγματα (Σχήμα 4.3.4) είναι σαφώς χαμηλότερης έντασης σε σχέση με αυτόν στην περίπτωση της 4<sup>ης</sup> αρμονικής, διότι απορράφεται λιγότερο.



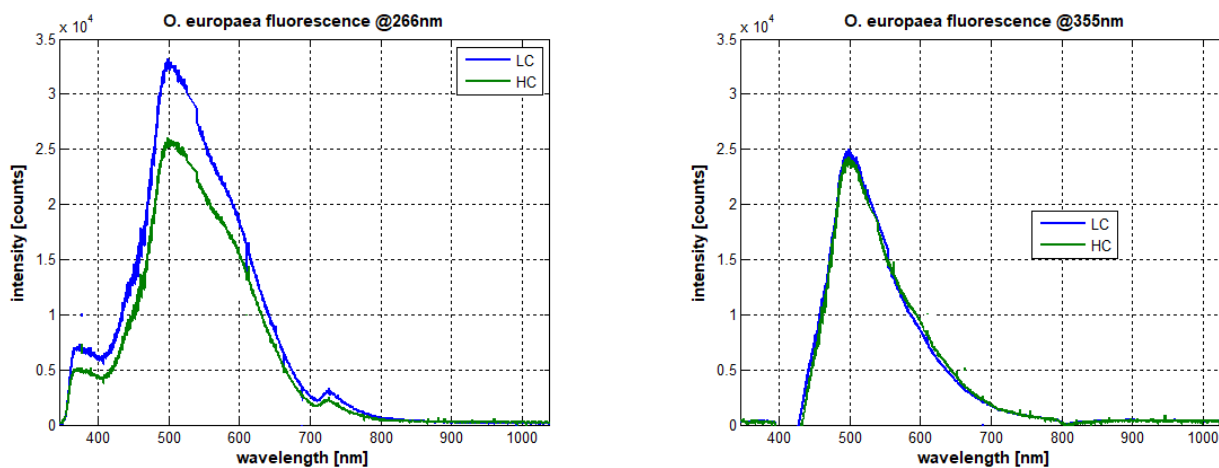
**ΣΧΗΜΑ 4.3.4:** Τα φάσματα φθορισμού χαμηλής και υψηλής συγκέντρωσης (low concentration –LC- and high concentration –HC) για το μήκος κύματος 355 nm.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3.4 τα δύο φάσματα σχεδόν ταυτίζονται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μόνο στην περίπτωση της γύρης του πεύκου το μείγμα χρειαζόταν συνεχώς ανάμιξη, διότι οι γυρεόκοκκοι είχαν την τάση να ανεβαίνουν στην επιφάνεια του μείγματος. Λιγότερη ανάμιξη, έως και καθόλου, χρειαζόταν όταν έμενε αρκετή ώρα το μείγμα στο ψυγείο. Συνεπώς, μετά την ανάμιξη, ίσως λόγω της κίνησης των σωματιδίων μέσα στο μείγμα, η δέσμη laser να συναντούσε κάποιες φορές λιγότερα σωματίδια και άλλες περισσότερα. Ωστόσο, γινόταν έλεγχος σταθεροποίησης του συστήματος, όπου βρέθηκε να είναι γύρω στα 2 min (πάντα παγωμένο δείγμα). Να σημειωθεί, επίσης, ότι απουσιάζει σημαντικά η τέταρτη κορυφή στο υπέρυθρο.

Τέλος, καθώς υπήρχαν περισσότερα περιθώρια για την 3<sup>η</sup> αρμονική, οι ενδείξεις τάσης και συχνότητας ήταν 820 V και 1.2 Hz, αντίστοιχα.

## ΓΥΡΕΟΚΟΚΚΟΙ OLEA EUROPAEA

Η γύρη της ελιάς ήταν πιο δύσκολη στη συλλογή της, σε σχέση με τη συλλογή των ανθέων της. Συνεπώς, δεν υπήρχε η δυνατότητα παρασκευής πολλαπλών δειγμάτων όπως στη γύρη του πεύκου. Το δείγμα έπρεπε να φιλτραριστεί για να απομακρυνθούν περιττά κομμάτια. Η υψηλή συγκέντρωση στην περίπτωση της 3<sup>ης</sup> αρμονικής ήταν 1.5 mL και η χαμηλή (αραιώση) ήταν +0.5 mL απεσταγμένου νερού. Η αραιωμένη συγκέντρωση αποτελεί την υψηλή για την περίπτωση της 4<sup>ης</sup> αρμονικής και η χαμηλή της εμπεριέχει 0.5 mL επιπλέον απεσταγμένο νερό. Οι ενδείξεις τάσης και συχνότητας και στην 3<sup>η</sup> αρμονική ήταν 1000 V και 1.2 Hz αντίστοιχα, ενώ στην 4<sup>η</sup> ήταν 1000 V και 3.0 Hz, αντίστοιχα. Στα Σχήματα 4.3.5 και 4.3.6 απεικονίζονται τα φάσματα για κάθε αρμονική και οι εικόνες φθορισμού από το μικροσκόπιο αντίστοιχα.



ΣΧΗΜΑ 4.3.5: Τα φάσματα φθορισμού της γύρης της ελιάς για κάθε αρμονική.

Παρατηρούνται τρεις κορυφές συνολικά στις φασματικές περιοχές 360 – 406 nm, 487 – 527 nm και 709 – 748 nm. Η πρώτη κορυφή απουσιάζει στα 355nm λόγω διαφορετικού φίλτρου, καθώς, επίσης, απουσιάζει και η τρίτη κορυφή, κάτι που φαίνεται να εμφανίζεται στην περίπτωση των 266nm μόνο (όπως στη γύρη του πεύκου). Η δεύτερη κορυφή οφείλεται στην κυτταρίνη του κυτταρικού τοιχώματος, σε καροτένιο, λιπίδια χρωστικών και φλαβίνη (O'Connor et al., 2011), ενώ η πρώτη κορυφή πολύ πιθανόν να αντιστοιχεί σε τυροσίνη και τρυπτοφάνη (Pan, 2015; Hill et al., 2009). Με τα φάσματα φθορισμού συμφωνούν και οι τρεις εικόνες του μικροσκοπίου. Στο μπλε δεν υπάρχει έντονος φθορισμός ακόμη, δίνει έντονα το πράσινο στην κορυφή και, τέλος, στο κόκκινο δεν υπάρχει σχεδόν καθόλου απόκριση διότι έχει τελειώσει η ζωή του φαινομένου.

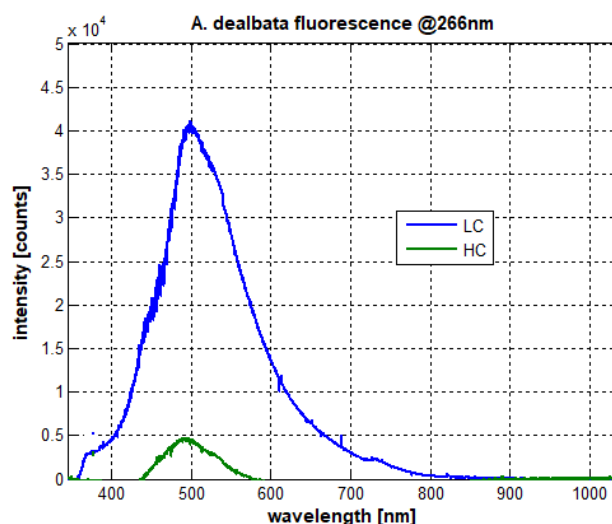


ΣΧΗΜΑ 4.3.6: Οι αποκρίσεις χρωμάτων των γυρεόκοκκων ελιάς από το μικροσκόπιο του Τμήματος Βιολογίας.

### **ΓΥΡΕΟΚΟΚΚΟΙ ACACIA DEALBATA**

Η μμόζα δεν υπήρχε σε αφθονία και συλλέχθηκε πιο νωρίς απ'ό,τι έπρεπε, καθώς δεν είχε απελευθερωθεί ακόμη η γύρη και βρισκόταν η περισσότερη σε μορφή συσσωματώματος (το οποίο φυσικά δεν φεύγει από το άνθος: Παράρτημα Α). Πάλι δεν παρασκευάστηκαν διάφορα δείγματα και φιλτραρίστηκε για να απομακρυνθούν νήματα και ανθήρες και λοιπά σώματα. Οι όγκοι των μειγμάτων είναι ίδια για κάθε περίπτωση όπως ήταν της ελιάς (ισχύει και για τα επόμενα βιοσωματίδια).

Με τη χρήση των 355nm δεν παρατηρήθηκε κανένα φάσμα φθορισμού, καταδεικνύοντας ότι οι ουσίες εντός του μείγματος δεν απορροφούν αυτό το μήκος κύματος. Στην περίπτωση χρήσης των 266nm παρατηρήθηκε φάσμα φθορισμού (Σχήμα 4.3.7) και ελήφθησαν οι φωτογραφίες φθορισμού με το μικροσκόπιο του Τμήματος Βιολογίας (Σχήμα 4.3.8). Αυτό που, επίσης, παρατηρήθηκε ήταν ότι τα 532nm σκεδάζεται πολύ έντονα.



ΣΧΗΜΑ 4.3.7: Τα φάσματα φθορισμού της μμόζας λόγω διέγερσης από τα 266 nm.

Τα φάσματα φθορισμού της γραφικής παράστασης στο Σχήμα 4.3.7 Αντιστοιχούν στην ύπαρξη ελάχιστων γυρεόκοκκων. Οι κορυφές αντιστοιχούν στα διαστήματα 470 – 526 nm, λόγω κυτταρίνης, καροτενίου, λιπιδίων από χρωστικές ουσίες, NADH, NADPH, φλαβίνης και άλλα (O'Connor et al., 2011) και 715 – 750 nm. Στις εικόνες του Σχήματος 4.3.8 τα αποτελέσματα φαίνεται να συμφωνούν, καθώς παρατηρείται χαμηλής έντασης φθορισμός στο μπλε, πιο έντονος στο πράσινο και πιο αδύναμο στο κόκκινο.



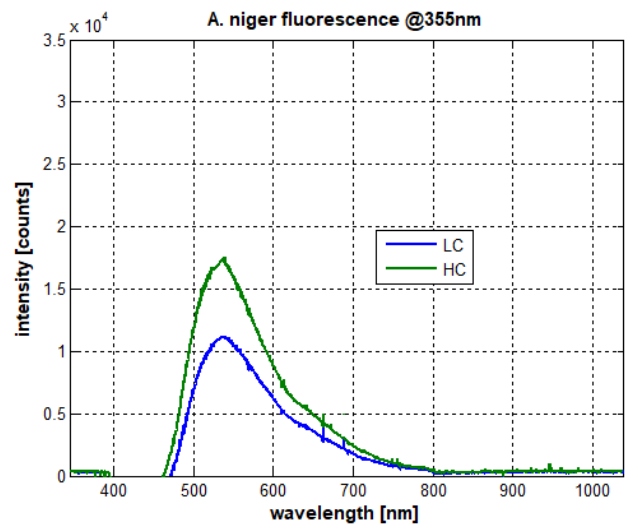
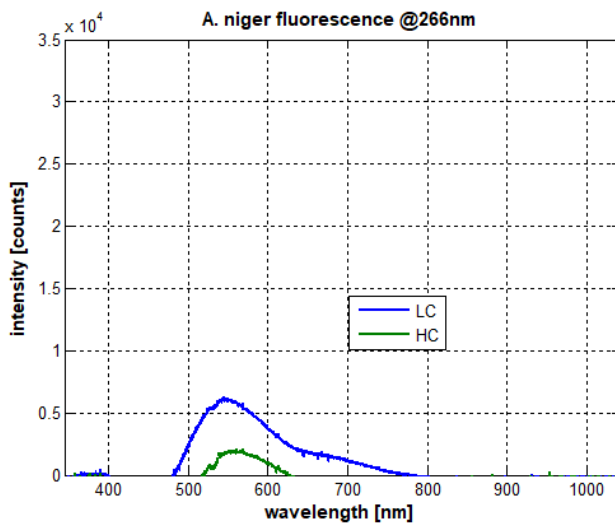
ΣΧΗΜΑ 4.3.8: Οι εικόνες φθορισμού της μιμόζας από το μικροσκόπιο.

### ***ΜΥΚΗΤΑΣ ASPERGILLUS NIGER***

Όλοι οι μύκητες και τα βακτήρια δόθηκαν αναμειγμένα με απεσταγμένο νερό από το Τμήμα Βιολογίας του ΕΚΠΑ, επομένως ούτε με αυτά ήταν δυνατή η παρασκευή πολλών δειγμάτων. Υπάρχουν σαφώς σε αφθονία στην ατμόσφαιρα, αλλά δεν υπήρχε η δυνατότητα απομόνωσης και καλλιέργειας.

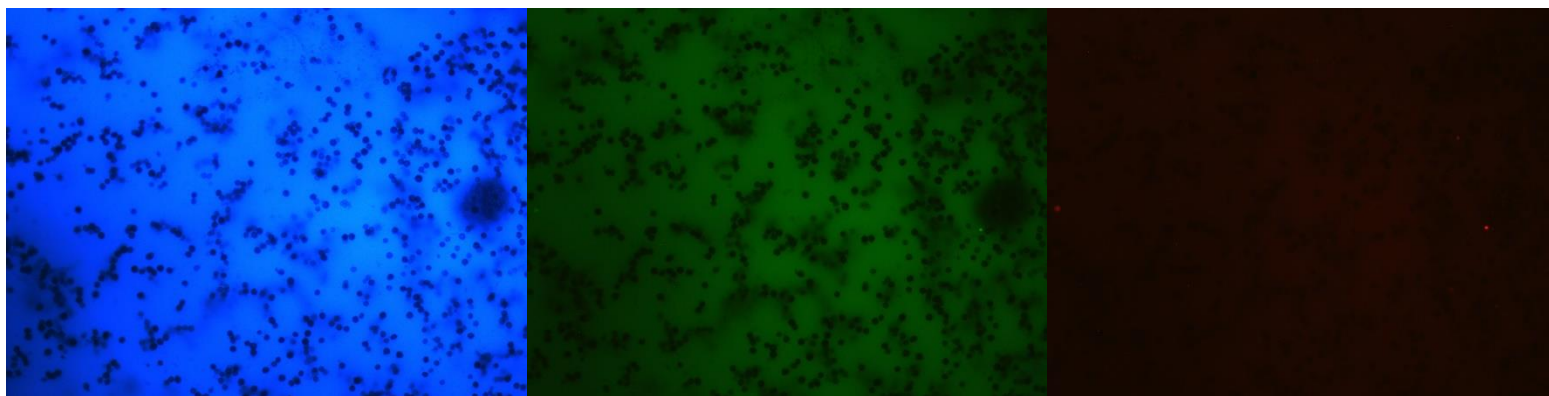
Στην περίπτωση χρήσης των 355nm οι ενδείξεις ήταν 1000 V και 1.2 Hz, ενώ για τα 266nm ήταν 1000 V και 3 Hz. Στην περίπτωση των 266nm εξετάστηκαν και οι ενδείξεις να είναι 1000 V και 10 Hz, αφού ο συγκεκριμένος μύκητας απορροφούσε αρκετά τα 532nm. Ο τελευταίος συνδυασμός απέτυχε διότι η απόκριση της κυβέτας ήταν πιο έντονη σε σχέση με τον φθορισμό του δείγματος και, επομένως, η αφαίρεση του φάσματος της κυβέτας από τον φθορισμό του δείγματος έδινε αρνητικό αποτέλεσμα.

Στα Σχήματα 4.3.10 και 4.3.11 παρουσιάζονται τα φάσματα φθορισμού λόγω δέσμης laser και του μικροσκοπίου.



**ΣΧΗΜΑ 4.3.10:** Τα φάσματα φθορισμού για τα δύο μήκη κύματος. Φαίνεται ότι ο συγκεκριμένος μύκητας δεν απορροφά τόσο τα 266nm (αριστερά) σε σχέση με τα 355nm (δεξιά).

Στο Σχήμα 4.3.10, εκ πρώτης όψεως φαίνεται ότι ο συγκεκριμένος μύκητας δεν απορροφά τόσο πολύ στα 266 nm σε σχέση με τα 355nm. Αυτό γίνεται αντιληπτό από την ένταση του φθορισμού. Επιπρόσθετα, στα 266nm, ο φθορισμός της υψηλής συγκέντρωσης είναι χαμηλότερος σε ένταση απ’ότι της χαμηλής συγκέντρωσης, ενώ για τα 355nm ισχύει το αντίστροφο. Αυτό ενδέχεται να οφείλεται στη διαδικασία αναδεύματος του διαλύματος, αλλά μία πιο πιθανή εξήγηση είναι ότι όσο πιο πολύ ακτινοβολείται με υπεριώδη ακτινοβολία ένα βιοσωματίδιο δε σημαίνει ότι απαραίτητα θα αυξάνεται και το σήμα φθορισμού του. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων παρατηρήθηκε ότι η ένταση του φάσματος αυξομειωνόταν ομοιόμορφα. Επομένως, σε αυτήν την περίπτωση ίσως να διασώθηκε το αρχείο με την χαμηλότερη ένταση. Παρόλα αυτά, οι κορυφές βρίσκονται στην περιοχή 511 – 590 nm (πράσινο).

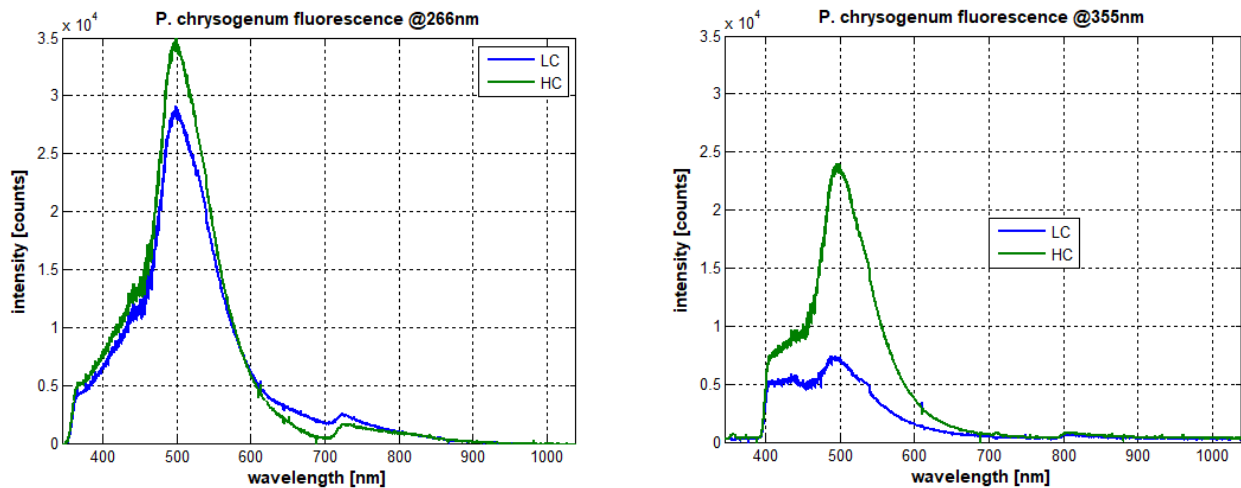


**ΣΧΗΜΑ 4.3.11:** Οι αποκρίσεις φθορισμού από το μικροσκόπιο.

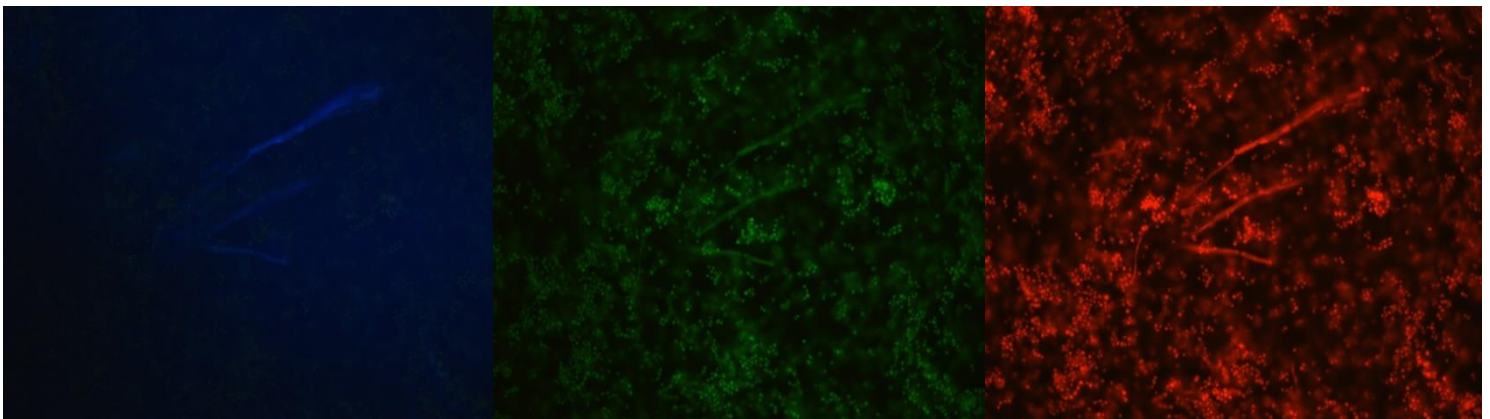
Αυτή, όμως, η κορυφή είναι χαμηλής έντασης και δεν παρουσιάζεται ιδιαίτερα στο Σχήμα 4.3.11. Στο μπλε και κόκκινο δεν αποκρίνει καθόλου, ωστόσο και στο πράσινο φαίνεται να μην δίνει φθορισμό, αλλά φαίνεται ένα ασθενές σήμα δηλώνοντας έτσι την χαμηλή ένταση της απόκρισης. Η κορυφή αυτή οφείλεται σε λιπίδια που προέρχονται από χρωστικές ουσίες (lipopigments), στο καροτένιο (carotene) και στο ένζυμο φλαβίνη (flavin; FAD; FMN) (O'Connor, 2011).

### ΜΥΚΗΤΑΣ *PENICILLIUM CHRYSOGENUM*

Η ένταση και η συχνότητα επαναληψιμότητας παλμού του laser, καθώς και οι συγκεντρώσεις είναι ίδιες με την περίπτωση του προηγούμενου μύκητα. Στις Εικόνες 4.3.12 και 4.3.13 απεικονίζονται αντίστοιχα, τα φάσματα φθορισμού του μύκητα *P. chrysogenum* και οι αποκρίσεις φθορισμού όπως φαίνονται στο μικροσκόπιο.



ΣΧΗΜΑ 4.3.12: Τα φάσματα φθορισμού του μύκητα *P. chrysogenum*.



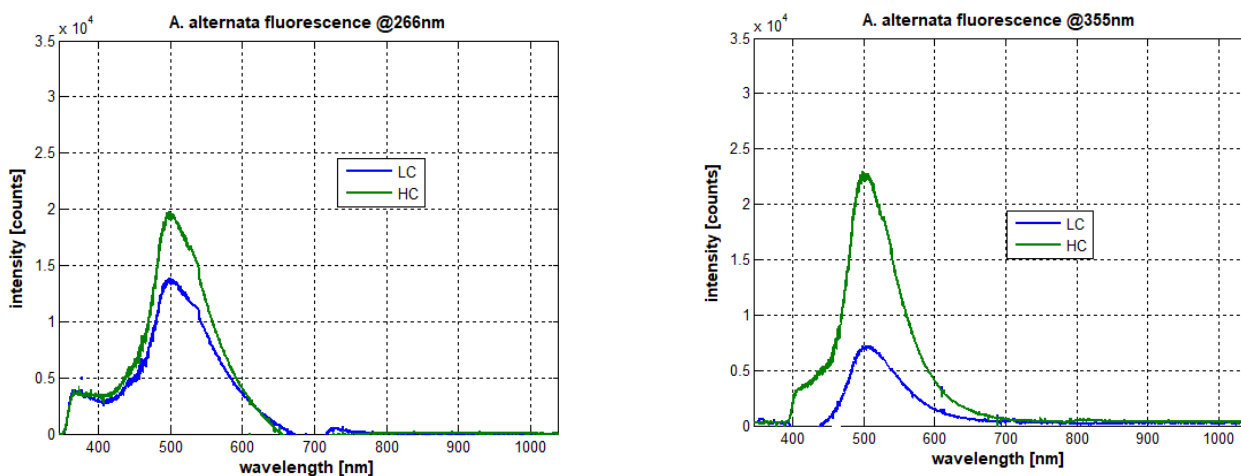
ΣΧΗΜΑ 4.3.13: Ο φθορισμός του μύκητα μέσα από το μικροσκόπιο.



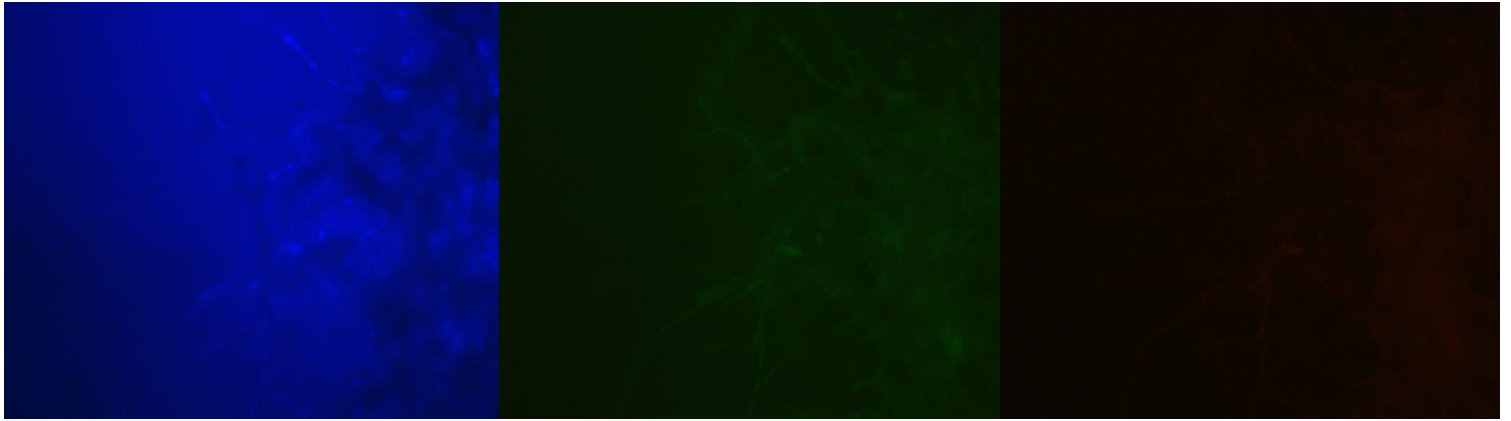
Να σημειωθεί ότι η απότομη αποκοπή του φθορισμού για ακτινοβολία στα 355nm οφείλεται στο οπτικό φίλτρο αποκοπής. Στα φάσματα φθορισμού παρατηρείται μία κοινή κορυφή στην περιοχή 476 – 527 nm, η οποία πιθανώς να οφείλεται σε φθορισμό ενός συνδυασμού συστατικών όπως NADH/NADPH, κυτταρίνη, καροτένιο, φλαβίνη, λιπιδίων που προέρχονται από χρωστικές ουσίες και άλλα (O'Connor et al., 2011). Αποκλειστικά στα 266 nm παρατηρείται μία κορυφή στην περιοχή 713 – 748 nm, η οποία συμπίπτει μερικώς με αυτήν της γύρης του πεύκου και της ελιάς, και στα 355 nm μία κορυφή στην περιοχή 792 – 837 nm, η οποία είναι αρκετά πιθανό να αντιστοιχεί σε μετάπτωση Paschen. Ωστόσο, πάλι παρατηρείται μία διαφορά με τις αποκρίσεις των Εικόνων του Σχήματος 4.3.13. Το μπλε είναι αρκετά ασθενές, το πράσινο αρκετά έντονο, πράγμα το οποίο συμφωνεί με την κορυφή στο Σχήμα 4.3.12 ως ένα βαθμό, ενώ υπάρχει και έντονο κόκκινο κάτι που στα φάσματα του Σχήματος 4.3.12 δεν ισχύει και πιο ειδικά στην περίπτωση της 3<sup>ης</sup> αρμονικής.

### **ΜΥΚΗΤΑΣ *ALTERNARIA ALTERNATA***

Εξακολουθούν να ισχύουν οι ίδιες αρχικές συνθήκες (ενέργειες laser, όγκοι δειγμάτων) με τους δύο προηγούμενους μύκητες. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι εξετάστηκε (για τις ίδιες ενδείξεις) η περίπτωση να μην έχει αναδευθεί ο μύκητας. Αυτό γιατί ο μύκητας είχε ήδη αναπτύξει ένα μεγάλο μαύρο σώμα (τα σπόρια και οι υφές εξακολουθούν να υπάρχουν μέσα στο απεσταγμένο νερό). Χωρίς ανάδευση η αλληλεπίδραση με τη δέσμη laser έδινε φθορισμό  $5.2 \times 10^4$  counts. Τα ενδιαφερόμενα στοιχεία, όμως, είναι τα σπόρια, των οποίων φάσματα φθορισμού φαίνονται στα Σχήματα 4.3.14 και 4.3.15. Να τονιστεί ότι σκεδάζουν έντονα το μήκος κύματος 532 nm.



ΣΧΗΜΑ 4.3.14: Τα φάσματα φθορισμού του μύκητα *A. alternata*.



ΣΧΗΜΑ 4.3.15: Ο φθορισμός του μύκητα μέσα από το μικροσκόπιο.

Από τα ανιχνευθέντα φάσματα προκύπτουν τρεις κορυφές. Η πρώτη στα 360 – 380 nm, αν και έχει μερικώς αποκοπεί απ' το οπτικό φίλτρο (στην 3<sup>η</sup> αρμονική έχει αποκοπή πλήρως), όμως, τείνει να συμπεριφερθεί αυξητικά, αντιστοιχεί σε φθορισμό λόγω τυροσίνης και τρυπτοφάνης (Pan, 2015; Hill et al., 2009). Η δεύτερη κορυφή εμπίπτει στο φάσμα 486 – 520 nm και αντιστοιχεί σε συνδυασμό κυτταρίνης, καροτενίου, λιπιδίων από χρωστικές ουσίες, NADH, NADPH, φλαβίνης και άλλα (O'Connor et al., 2011). Η τρίτη κορυφή στο υπέρυθρο εμφανίζεται πάλι μόνο στην ακτινοβολία με 266nm στην περιοχή 717 – 764 nm.

Δυστυχώς, οι τρεις εικόνες του Σχήματος 4.3.15 δεν φαίνεται να συμφωνούν στις εντάσεις των φασμάτων LIF (εκτός από την αμελητέα κόκκινη απόκριση), ωστόσο έπειτα από σύγκριση με τα προηγούμενα δεδομένα, ίσως αυτή η ασυμφωνία να οφείλεται στην ποσότητα συγκέντρωσης (Υποκεφ. 4.8).

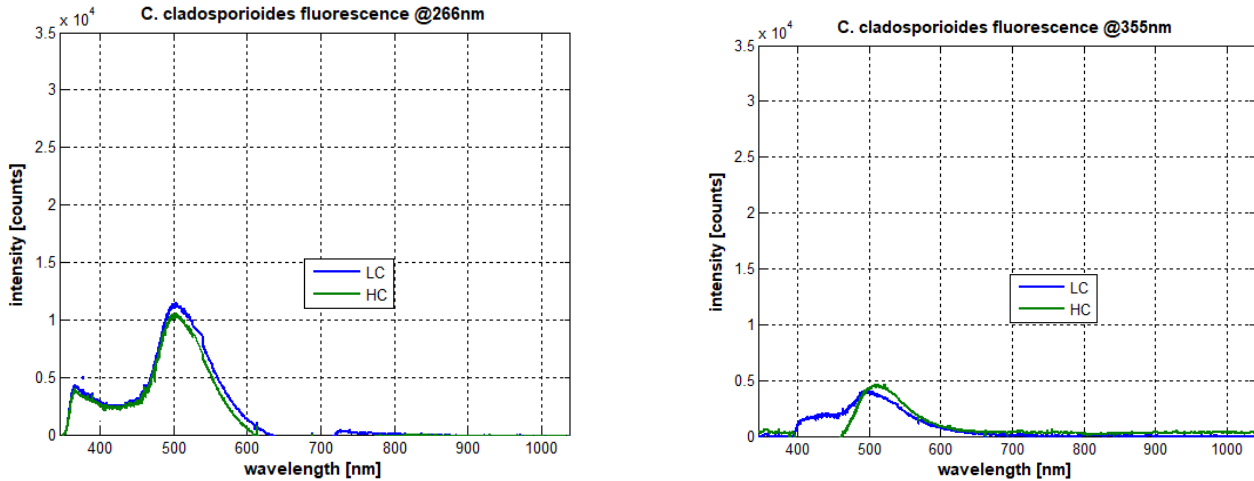
Τέλος, να σημειωθεί ότι παρατηρήθηκε ελάχιστη σκέδαση των 532nm στην περίπτωση 355nm και έντονη σκέδαση στην άλλη.

### **ΜΥΚΗΤΑΣ CLADOSPORIUM CLADOSPORIOIDES**

Στα φάσματα φθορισμού LIF (Σχήμα 4.3.16) παρατηρήθηκε έντονη σκέδαση στα 532nm.

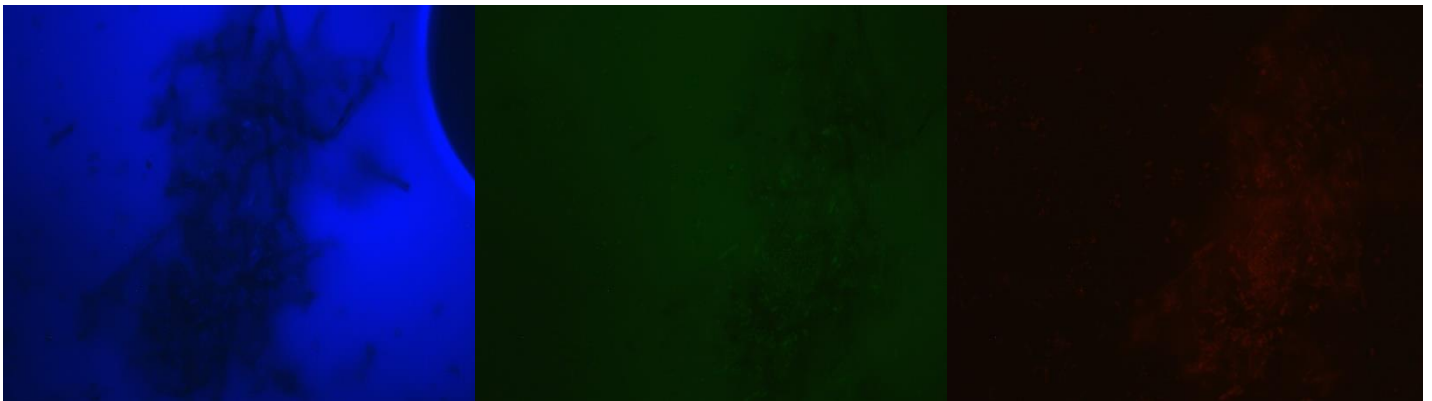
Στις γραφικές παραστάσεις της εικόνας 4.3.16 προέκυψαν τρεις εμφανείς κορυφές στα 360 – 383 nm, 487 – 517 nm και 721 – 760 nm. Η αυξημένη ένταση της καμπύλης στα αριστερά της μεγάλης κορυφής στην περίπτωση των 355nm (το οποίο φαίνεται και σε άλλες περιπτώσεις) θα εξηγηθεί στο Υποκεφάλαιο 4.9. Η πρώτη κορυφή που παρατηρείται μόνο στη χρήση των 266nm (στην άλλη κόβεται από το φίλτρο) οφείλεται σε τυροσίνη και

τρυπτοφάνη (Pan, 2015; Hill et al., 2009), ενώ η 2<sup>η</sup> σε συνδυασμό κυτταρίνης, καροτενίου, λιπιδίων από χρωστικές ουσίες, NADH, NADPH, φλαβίνης και άλλα (O'Connor et al., 2011). Η 3<sup>η</sup> κορυφή εμφανίζεται πάλι μόνο κατά τη διέγερση από τα 266nm.



ΣΧΗΜΑ 4.3.16: Τα φάσματα φθορισμού λόγω LIF για το μύκητα *C. cladosporioides*.

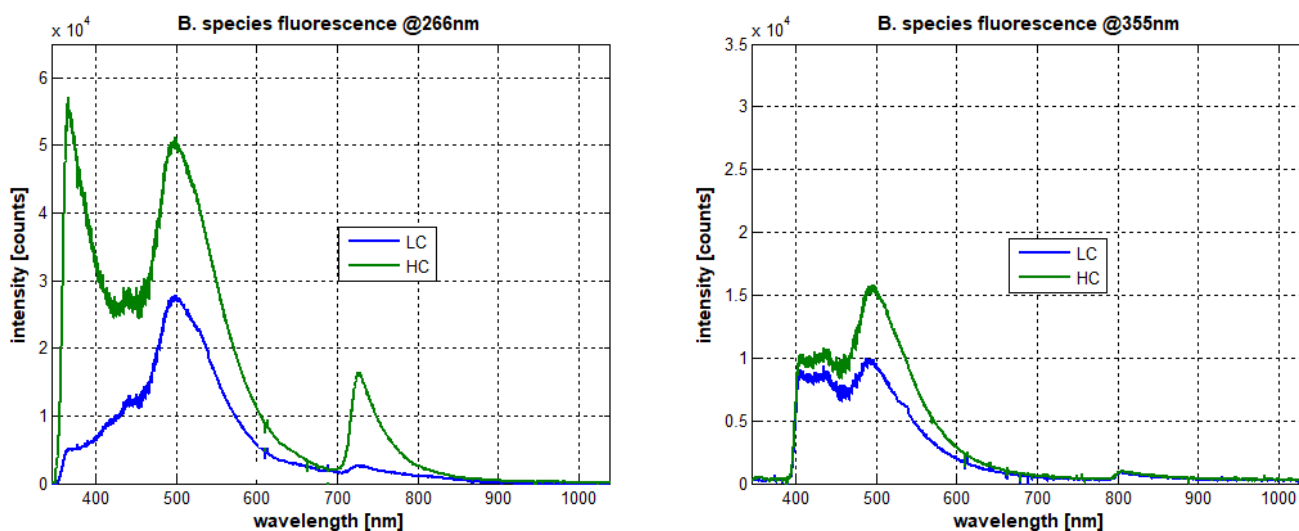
Φαίνεται ότι και στις δύο περιπτώσεις του Σχήματος 4.3.16 οι εντάσεις φθορισμού είναι χαμηλές. Αυτό επιβεβαιώνεται και με τις εικόνες του μικροσκοπίου (Σχήμα 4.3.17). Στο Σχήμα 4.3.17 διακρίνονται οι χαμηλές εντάσεις του μπλε και πράσινου φωτός, όμως φαίνεται να υπάρχει και μία ένδειξη ότι ο συγκεκριμένος μύκητας προκαλεί φθορισμό και στο κόκκινο χρώμα (ασθενές).



ΣΧΗΜΑ 4.3.17: Οι εικόνες φθορισμού από το μικρόσκοπιο.

## ΒΑΚΤΗΡΙΑ BACILLUS

Αρχικά, θεωρήθηκε ότι υπήρχε ένα είδος του γένους *Bacillus*, το *SP2*. Μετά διαπιστώθηκε ότι υπήρχαν δύο ξεχωριστά είδη του γένους αυτού, το *SP1* και *SP2*. Η διαφορά ήταν ξεκάθαρη καθώς το *SP1* ήταν πιο πυκνό. Και τα δύο είδη σκεδάζουν έντονα τα 532nm. Δυστυχώς, στην περίπτωση των 355nm μελετήθηκε μόνο το *SP2*. Στο Σχήμα 4.3.18 φαίνεται ο φθορισμός του *SP2* και του *SP1* (το οποίο χαρακτηρίζεται ως HC για τα 266nm).



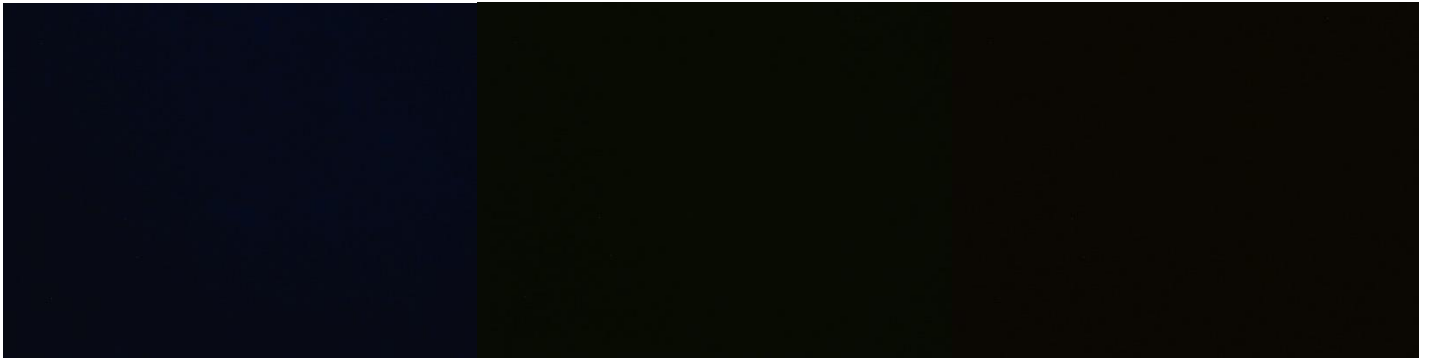
**ΣΧΗΜΑ 4.3.18:** Τα φάσματα φθορισμού των δύο βακτηρίων. Το *SP1* έδωσε το μεγαλύτερο σε ένταση φάσμα φθορισμού. Πάλι έχει προκύψει το φούσκωμα στην περίπτωση της 3<sup>ης</sup> αρμονικής (Υποκεφάλαιο 4.8). Οι ενδείξεις στην 3<sup>η</sup> αρμονική είναι ίδιες με τα προηγούμενα πειράματα, ενώ για τα δύο δείγματα στην 4<sup>η</sup> αρμονική είναι 2.0 Hz και 1000 V για το *SP1* και 3.0 Hz και 1000 V για το *SP2*.

Στην περίπτωση του *SP2* προκύπτουν τρεις κορυφές συνολικά στα εύρη 480 – 527 nm, 715 – 749 nm (από την 4<sup>η</sup> αρμονική) και 791 – 835 nm (από τα 355nm; εμπεριέχεται η μετάπτωση Paschen). Η πρώτη κορυφή αντιπροσωπεύει και το *SP1*, του οποίου η αντίστοιχη κορυφή στο υπέρυθρο βρίσκεται στα 719 – 742 nm. Η κορυφή που βρίσκεται στο μπλε και πράσινο του ορατού φάσματος έχει αιτιολογηθεί στα προηγούμενα παραδείγματα και η κορυφή στο υπέρυθρο θα αναλυθεί περισσότερο στο Υποκεφάλαιο 4.8. Το είδος *SP1* αποκρίνει, επίσης, μία έντονη κορυφή (σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις) στα 362 – 377 nm, που είναι χαρακτηριστική του φθορισμού της τυροσίνης και της τρυπτοφάνης.

Στις εικόνες των Σχημάτων 4.3.19 και 4.3.20 διακρίνονται οι φωτογραφίες φθορισμού των δύο δειγμάτων που καταγράφηκαν από το μικροσκόπιο του Τμήματος Βιολογίας του ΕΚΠΑ.



ΣΧΗΜΑ 4.3.19: Οι εικόνες φθορισμού για το είδος SPI.

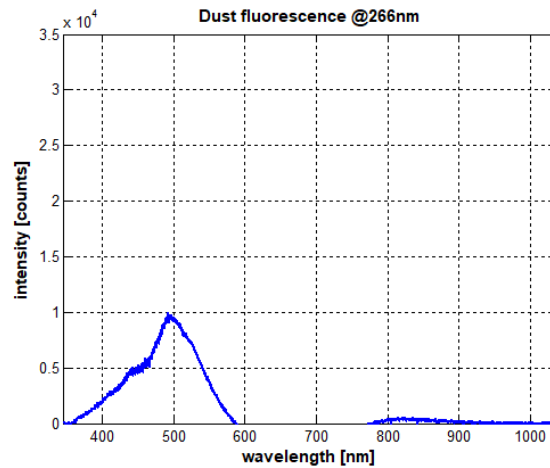


ΣΧΗΜΑ 4.3.20: Οι εικόνες φθορισμού για το είδος SP2.

Δυστυχώς, οι εικόνες δεν δείχνουν τα χρώματα που δίνουν τα δύο είδη λόγω φθορισμού. Αυτό μπορεί να οφείλεται στη διαφορά συγκέντρωσης (Υποκεφάλαιο 4.8).

### **ΑΜΜΟΣ ΣΑΧΑΡΑΣ**

Το 2010 είχαν συλλεχθεί κόκκοι άμμου από την έρημο Σαχάρα και εξετάστηκαν ως προς το φθορισμό τους μόνο με διέγερση από τα 266 nm (με ενδείξεις 4.8 Hz και 1000 V). Οι κόκκοι αυτοί ήταν απομονωμένοι μέχρι και το 2018 από το περιβάλλον, ωστόσο θεωρήθηκε ότι εξακολουθούν να υπάρχουν βακτήρια και, ίσως, σπόρια μυκήτων προσκολλημένα πάνω τους, καθώς αυτά μπορούν να επιβιώσουν σε οποιοδήποτε περιβάλλον. Στο σύνολο, ο συνδυασμός άμμου, βιοσωματιδίων και άλλων σωματιδίων αποτελούν τη λεγόμενη σκόνη. Στο Σχήμα 4.3.21 παρουσιάζεται το φάσμα φθορισμού της σκόνης με ενδεικτικές κορυφές στα διαστήματα 471 – 526 nm και 774 – 869. Η τελευταία κορυφή συμπεριλαμβάνει και το φαινόμενο μετάπτωσης Paschen, ενώ η πρώτη κορυφή δείχνει ότι υπάρχει μεγάλη πιθανότητα παρουσίας οργανικής ύλης με βάση τις κορυφές των προηγούμενων δειγμάτων, καθώς σκέτη η άμμος δεν είναι οργανική ύλη.



ΣΧΗΜΑ 4.3.21: Φθορισμός σκόνης με την τεχνική LIF.

Το Σχήμα 4.3.21 επιβεβαιώνει τις μελέτες που έχουν γίνει πάνω σε θέματα που αφορούν την αερομεταφορά σκόνης και βιοσωματιδίων (Prospero et al., 2005; Reichardt et al., 2018).

### **ΣΚΕΔΑΣΗ RAMAN**

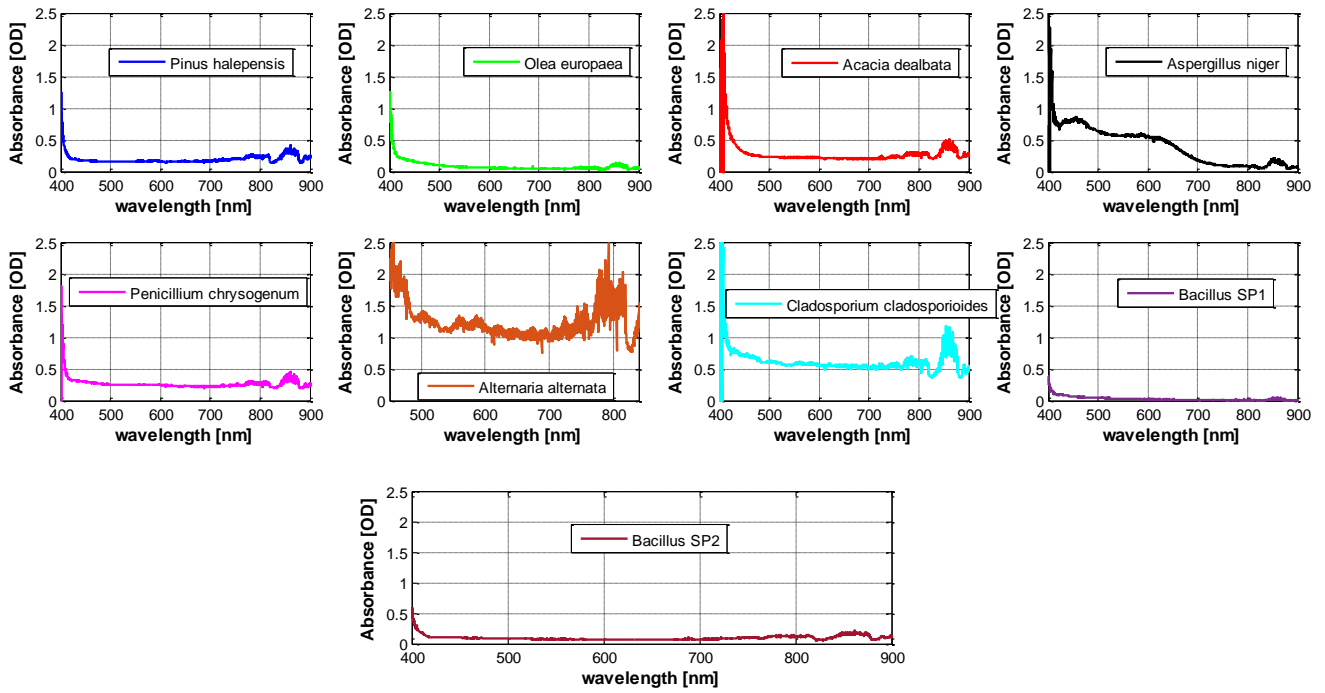
Οι δύο κορυφές που καταγράφηκαν στο υπέρυθρο δεν είναι φθορισμός. Εξετάστηκε η περίπτωση να προκύπτουν από σκέδαση Raman. Η συχνότητα που αντιστοιχεί στα 266- και 355-nm είναι αντίστοιχα  $37594\text{ cm}^{-1}$  και  $28169\text{ cm}^{-1}$ . Προσεγγιστικά οι δύο κορυφές για όλα τα δείγματα βρίσκονται στις φασματικές περιοχές  $719 - 750\text{ nm}$  και  $792 - 836\text{ nm}$ , τα οποία σε συχνότητες είναι  $13908 - 13333\text{ cm}^{-1}$  και  $12626 - 11962\text{ cm}^{-1}$ , αντίστοιχα. Με την υπόθεση ότι κάθε κορυφή βρίσκεται στο κέντρο των διαστημάτων, τότε οι κυματαριθμοί που αντιστοιχούν στις κορυφές για τα 266nm και τα 355nm είναι αντίστοιχα,  $13621\text{ cm}^{-1}$  και  $12294\text{ cm}^{-1}$ . Συνεπώς, οι δύο διαφορές είναι  $\Delta_{266} = 23973\text{ cm}^{-1}$  και  $\Delta_{355} = 15875\text{ cm}^{-1}$ . Πέρα από το γεγονός ότι αυτές οι διαφορές είναι αρκετά μεγάλες για να εκφράσουν τη σκέδαση Raman, οι διαφορές δεν είναι ίδιες. Με βάση αυτά, βγαίνει το συμπέρασμα ότι οι δύο κορυφές δεν αποτελούν σκέδαση Raman. Από την στιγμή που δεν είναι ούτε φθορισμός, καθώς είναι πολύ μακριά από τα διεγείρον μήκη κύματος, πιθανώς να είναι οπτικές μεταπτώσεις, όπου η μία προκύπτει από τη διέγερση στα 266nm και η άλλη στα 355nm.

#### 4.4 ΦΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ/ ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ/ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ

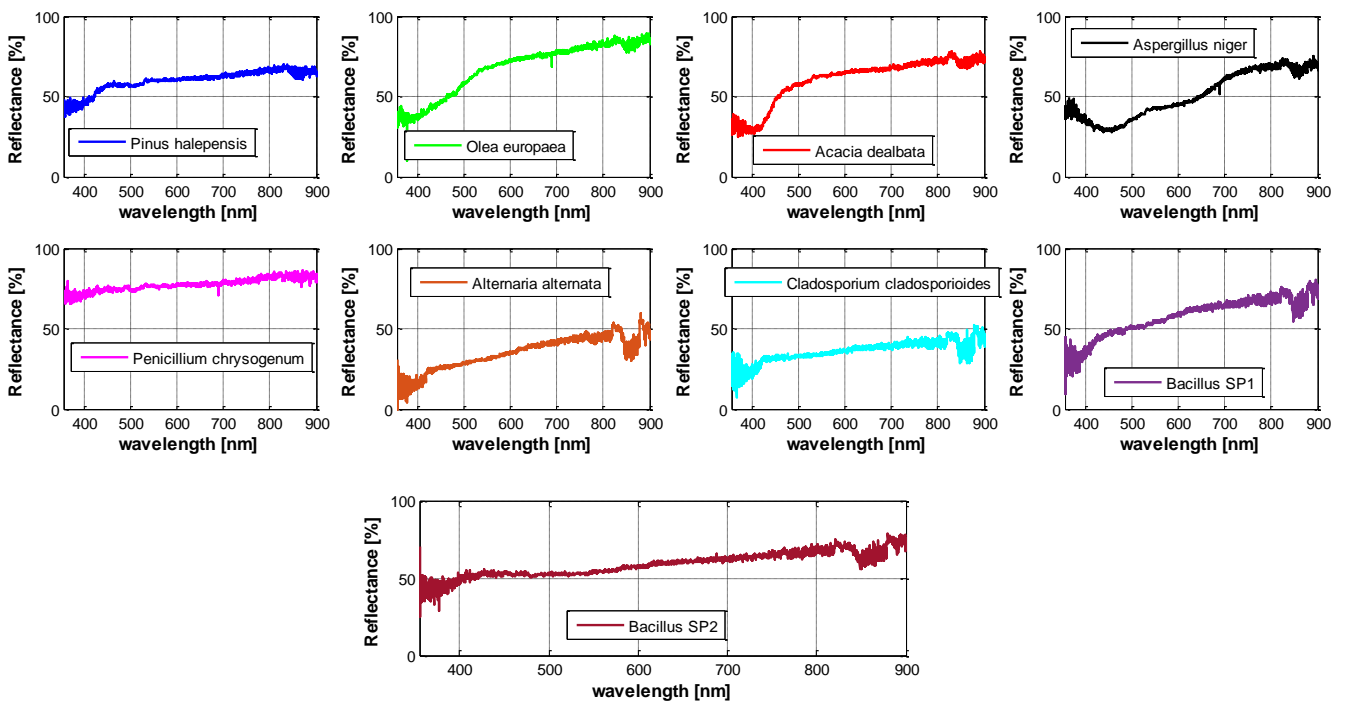
Για την περαιτέρω μελέτη και κατανόηση της φύσης των βιοσωματιδίων, μετρήθηκαν τα φάσματα απορρόφησης (Σχήμα 4.4.1), ανακλαστικότητας (Σχήμα 4.4.2) και διαπερατότητας (Σχήμα 4.4.3) των βιοσωματιδίων αυτών.

Τα φάσματα απορρόφησης και διαπερατότητας προέκυψαν από τις λειτουργίες “Absorbance Mode” και “Reflectance Mode” του λογισμικού SpectraSuite. Πιο συγκεκριμένα, για την απορροφητικότητα τοποθετήθηκαν αντικειμενοφόρες πλάκες μεταξύ της γραμμικής ίνας και της λυχνίας Xenon, οι οποίες έφεραν τα δείγματα μέσα σε γέλη γλυκερόλης (glycerine gel, το οποίο αποτελείται από 54 mL glycerol, 10 g gelatin και 60 mL απεσταγμένο νερό). Για την ανακλαστικότητα, χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες πλάκες με τη διαφορά ότι ήταν τοποθετημένες πάνω σε ένα μαύρο πανί και η μεταφορά και συλλογή του φωτός προς και από το δείγμα γινόταν με την άκρη ελέγχου της ίνας «Υ».

Δυστυχώς για τα φάσματα των Σχημάτων 4.4.1 και 4.4.2 δεν μπορούσαν να παρουσιαστούν περισσότερα μήκη κύματος καθώς επικρατούσε ο θόρυβος. Ωστόσο, στα 355 nm (που είναι άμεσου ενδιαφέροντος) φαινόταν να υπήρχε μία αυξητική τάση ως προς την απορροφητικότητα. Για τα 266 nm δεν ήταν ξεκάθαρο λόγω ύπαρξης θορύβου. Όμως από τα πειράματα φθορισμού ήταν ξεκάθαρο ότι όλα τα δείγματα απορροφούν αρκετά και τα δύο μήκη κύματος (όπως και ήταν αναμενόμενο από αντίστοιχες μελέτες στα ίδια και παραπλήσια μήκη κύματος; Southworth, 1969; O’Connor et al., 2011; Pan, 2015).



ΣΧΗΜΑ 4.4.1: Φάσματα απορρόφησης διαφόρων βιοσωματιδίων στη φασματική περιοχή 400 – 900 nm.

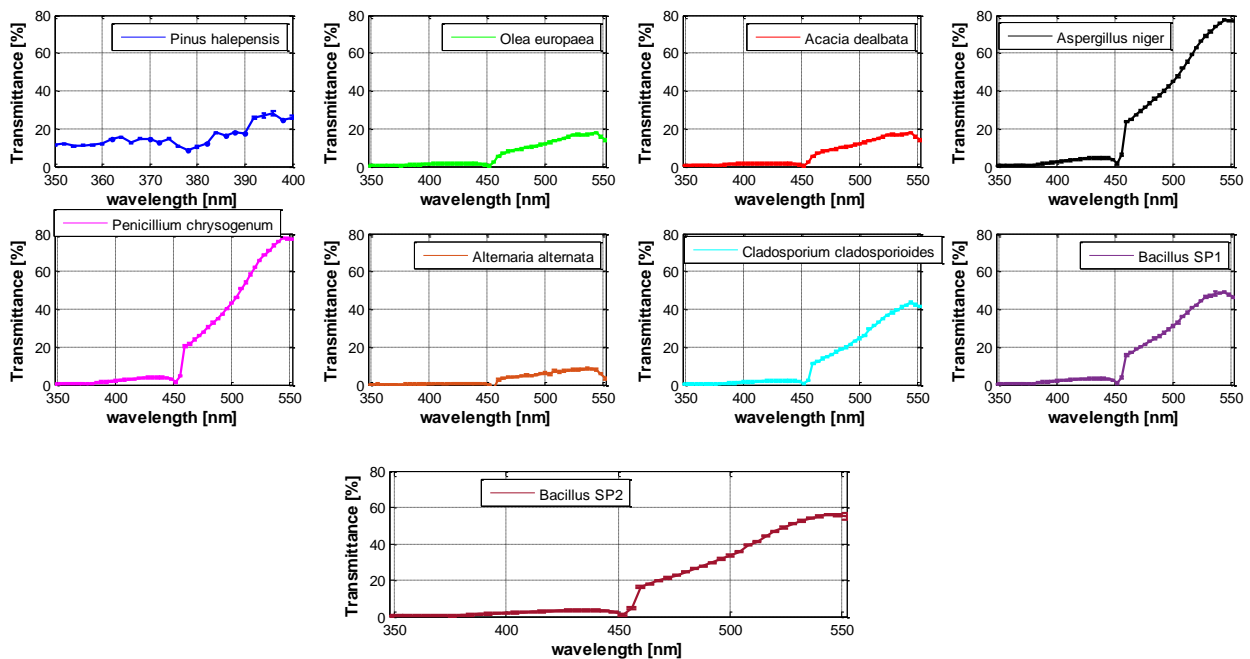


ΣΧΗΜΑ 4.4.2: Φάσματα ανακλαστικότητας διαφόρων βιοσωματιδίων στη φασματική περιοχή 355 – 900 nm.

Τα φάσματα αποδεικνύουν και την απορρόφηση της 2<sup>ης</sup> αρμονικής του laser από τα υπό εξέταση βιοσωματίδια, με κυριότερα αυτά που αντιστοιχούν στο *A. alternata*, *A. niger* και *C. cladosporioides*.



Τα φάσματα διαπερατότητας ελήφθησαν με το φασματοφωτόμετρο Cole Parmer's 1100 Series Spectrophotometer. Τα δείγματα αναμείχθηκαν με απεσταγμένο νερό και τοποθετήθηκαν σε δοκιμαστικούς σωλήνες. Αρχικά ελήφθη το φάσμα διαπερατότητας του απεσταγμένου νερού και από αυτό αφαιρέθηκαν τα φάσματα των δειγμάτων με αποτέλεσμα να δίνονται προσεγγιστικά οι διαπερατότητες των βιοσωματιδίων. Το σφάλμα που εκτιμήθηκε για κάθε τιμή ξεχωριστά, εμπεριέχει και την αβεβαιότητα του όργανο. Τα φασματικά εύρη μετρήσεων για το γυρεόκοκκο *Pinus halepensis* και όλα τα υπόλοιπα είναι αντίστοιχα 350 – 400 nm και 348 – 552 nm.



**ΣΧΗΜΑ 4.4.3:** Τα φάσματα διαπερατότητας διαφόρων βιοσωματιδίων στις φασματικές περιοχές 350 – 400 nm (*P. halepensis*) και 348 – 552 nm (τα άλλα).

Κάποια φάσματα διαπερατότητας αποκλίνουν από τη συμφωνία των φασμάτων απορρόφησης και ανακλαστικότητας, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση του μύκητα *A. niger*. Η ασυμφωνία έγκειται στο γεγονός ότι έπρεπε να εκτιμηθεί μεγαλύτερο σφάλμα ή να προτιμηθεί η λειτουργία “Transmittance Mode” του SpectraSuite.

Να σημειωθεί, επίσης, ότι και για τα τρία μεγέθη δεν υπάρχει απόλυτη αξιοπιστία όσον αφορά τους μύκητες *C. cladosporioides* και *A. alternata*, καθώς η ανθεκτική βλαστική φάση (μυκήλιο) και μικρή αποσύνθεση μέσα στις ημέρες ευνοούν την ύπαρξη μεγάλων σωμάτων παρά σπόρων.

#### 4.5 ΕΝΕΡΓΟΣ ΔΙΑΤΟΜΗ ΣΚΕΔΑΣΗΣ

Ακολούθως, επιχειρήθηκε ο προσδιορισμός των ενεργών διατομών σκέδασης των εννιά εξεταζόμενων βιο-σωματιδίων στα 355 nm. Για τον προσδιορισμό μετρήθηκε η σκεδαζόμενη ακτινοβολία υπό συγκεκριμένη γωνία και πιο συγκεκριμένα η οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία (180°).

Η διάταξη είναι ίδια με αυτή που αναπτύχθηκε για τις μετρήσεις ανακλαστικότητας (Υποκεφάλαιο 4.4), ωστόσο αντί για λειτουργία “Reflectance Mode” χρησιμοποιήθηκε η λειτουργία “Scope Mode”. Επιπρόσθετα, για το μήκος κύματος 355 nm χρησιμοποιήθηκε το φασματόμετρο USB4000-FL. Δυστυχώς δεν ήταν δυνατή η συλλογή ακτινοβολίας της 4<sup>ης</sup> αρμονικής καθώς την απορροφούσε η γυάλινη πλάκα.

Η μερική ενεργός διατομή σκέδασης έχει μονάδες φωτονίων ανά χρόνο (ροή-flux) ανά στερεά γωνία (sr) (Gaigalas et al., 2012). Με βάση τα στοιχεία της Ocean Optics, η διάμετρος της οπτικής ίνας «Υ» είναι 600 μm και, επομένως, της ίνας ελέγχου είναι αντίστοιχα 1800 μm. Για τις επί μέρους ίνες αντιστοιχεί ένα πεδίο οράσεως (field of view, FOV) περίπου 25° και, άρα, για την ίνα ελέγχου ισχύει (με την παραδοχή ότι υπάρχει γραμμική συμπεριφορά) 75°, δηλαδή 1.31 sr. Επομένως, οι τιμές του Πίνακα 4.5.1 προκύπτουν από τα φωτόνια που υπολογίζονται προς τον χρόνο ολοκλήρωσης της κάθε μέτρησης,  $512514 \mu\text{sec} \times 5 \text{ scans} = 2.56257 \text{ sec}$ , προς το FOV της ίνας ελέγχου.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα τιμών 4.5.1, τα δύο είδη βακτηρίων του γένους *Bacillus*, έχουν παραπλήσιες ενεργές διατομές σκέδασης, ενώ υπάρχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ των μυκήτων και των γυρεόκοκκων. Σε αυτό το σημείο, πρέπει να τονιστούν κάποια στοιχεία πάλι. Η τιμή που αντιστοιχεί στη μιμόζα δεν αντιπροσωπεύει 100 % στους γυρεόκοκκούς της καθώς συλλέχθηκε νωρίτερα από την εποχή επικοινωνίας. Πέρα από τους γυρεόκοκκους περιλαμβάνονται ανθήρες και νήματα. Για τους δύο μύκητες, *A. alternata* και *C. cladosporioides*, οι τιμές των διατομών δεν αντιστοιχούν απολύτως σε σπόρια μυκήτων, αλλά περισσότερο σε υφές (μεγάλα σώματα).

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.5.1:** Οι ενεργές διατομές σκεδάσεως,  $\sigma_{sp}$  [*counts/(sec × sr)*].

<b>Είδη</b>	<b>354.98 nm</b>
<i>P. halepensis</i>	152.3935
<i>O. europaea</i>	155.5511
<i>A. dealbata</i>	174.3300
<i>A. niger</i>	146.6175
<i>P. chrysogenum</i>	451.6875
<i>A. alternata</i>	21.9752
<i>C. cladosporioides</i>	119.4382
<i>B. SP1</i>	145.0893
<i>B. SP2</i>	148.8189

#### 4.6 ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΒΙΟΑΕΡΟΛΥΜΑΤΩΝ

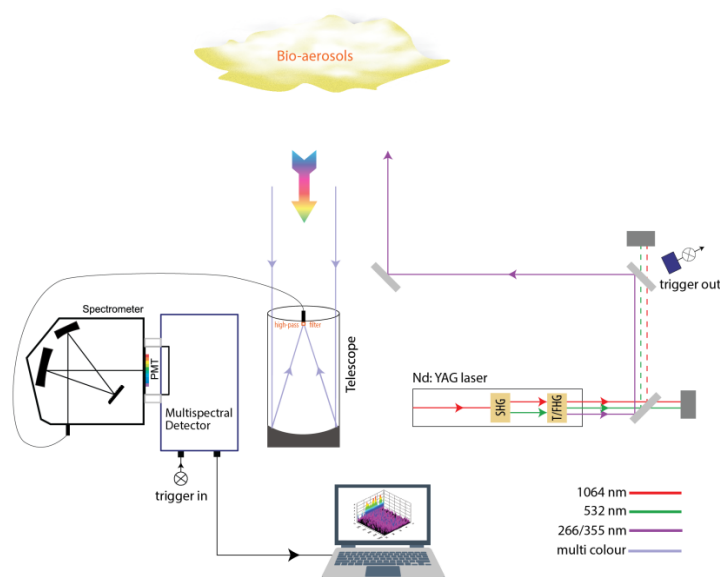
Η ανίχνευση βιοαερολυμάτων στην ατμόσφαιρα μπορεί να γίνει με διάφορες τεχνικές lidar, η ελαστική οπισθοσκέδαση με παράλληλη μέτρηση της αποπόλωσης (Υποκεφάλαιο 4.7), στην περίπτωση που τα μοναδικά σωματίδια στην ατμόσφαιρα είναι τα βιοσωματίδια, και κυρίως θα χρησιμοποιηθεί η τεχνική ανίχνευσης με χρήση της τεχνικής του επαγόμενου φθορισμού με το σύστημα Multi-Spectral LIF LiDAR. Συνδυάζοντας τις τεχνικές LIF και LiDAR είναι δυνατός ο εντοπισμός φθοροφόρας οργανικής ύλης στην ατμόσφαιρα, της οποίας το φάσμα θα συγκριθεί με τα φάσματα των in-situ πειραμάτων, αν πρόκειται για τα εννιά δείγματα που μελετήθηκαν εργαστηριακά.

Η θέση της Μονάδας Τηλεπισκόπησης LASER του ΕΜΠ (37.96° N, 23.78° E, υψόμετρο 212 m, a.s.l.) στο Λεκανοπέδιο Αθηνών, το οποίο περικλείεται από βουνά και θάλασσα, αλλά και μια μεγάλη ζώνη πρασίνου (με πεύκα, ελαιόδενδρα, κλπ.), την καθιστά ύψιστης σημασίας για τη μελέτη των αερομεταφερόμεων σωματιδίων (Πυρρή, 2007) καθώς έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύσει και παρακολουθήσει-μελετήσει την ύπαρξη βιοσωματιδίων. Τα σωματίδια αυτά μαζί με άλλα, όπως σωματίδια από καύση βιομάζας,

ερημικά, ηπειρωτικά, θαλάσσια, κλπ, μεταφέρονται προς και από το Λεκανοπέδιο μέσω συνοπτικής ή τοπικής (θαλάσσια ή απόγειος αύρα) ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας. Τις νύχτες όταν δημιουργείται η αστική νησίδα θερμότητας (Παπαγιάννης, 2014) με αποτέλεσμα να παγιδεύονται τα σωματίδια αυτά στα χαμηλότερα στρώματα του ΑΟΣ.

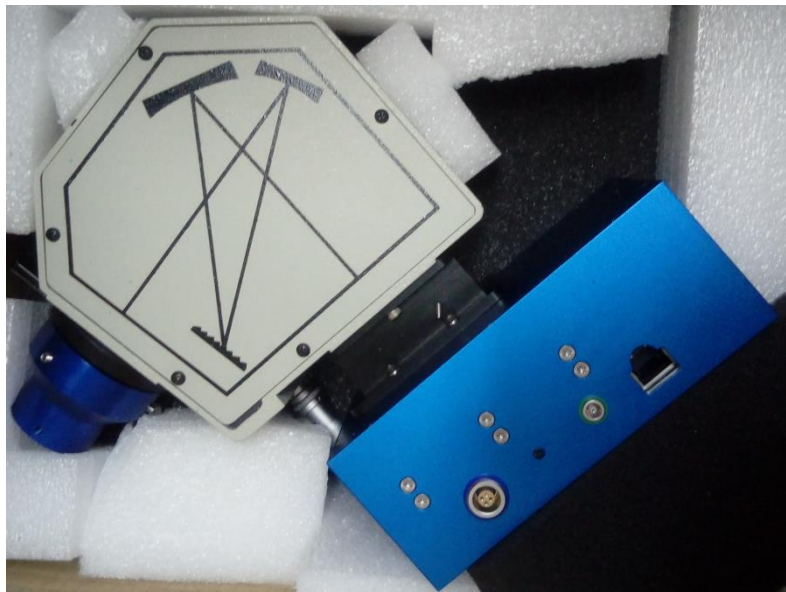
Τα πειράματα πραγματοποιούνταν βραδινές ώρες για την αποφυγή του θορύβου της ηλιακής ακτινοβολίας (20.30 – 21.30 τοπική ώρα), καθώς η ένταση του λαμβανόμενου σήματος φθορισμού είναι σημαντικά χαμηλότερη από αυτήν της ηλιακής ακτινοβολίας. Επομένως, τα σωματίδια που περνούσαν πάνω από το παρατηρητήριο έχουν μεταφερθεί λόγω τοπικού φαινομένου, της αύρας των βουνών από τον Υμηττό.

Για την ανάκτηση δεδομένων από την ατμόσφαιρα, χρησιμοποιήθηκε η δέσμη ενός Nd:YAG laser (Υποκεφάλαιο 3.2) τύπου Brilliant της Quantel λειτουργώντας παλμικά με τη μέθοδο Q-Switch στα 355 nm ή στα 266 nm, αντίστοιχα. Οι ενέργειες ανά παλμό 80 mJ για τα 355nm και 24.7 mJ για τα 266nm με ρυθμό επαναληψιμότητας 10 Hz. Διχρωϊκά κάτοπτρα κατευθύνουν τη δέσμη laser κατακόρυφα στην ατμόσφαιρα. Οι οπισθοσκεδαζόμενες ακτινοβολίες συλλέγονται από ένα Newtonian τηλεσκόπιο διαμέτρου 250 mm, εστιακής απόστασης 1125 mm (Mytilinaios et al., 2018; Σχήμα 4.6.1) και εστιάζονται στην είσοδο μίας οπτικής ίνας από χαλαζία (Licel GmbH) με αριθμητικό άνοιγμα  $NA = 0.22$  και διάμετρο 1.15 mm. Πριν από την είσοδο της ίνας είναι τοποθετημένο το οπτικό φίλτρο αποκοπής FEL0400 (Υποκεφάλαιο 4.2) που εφαρμόζεται και στις δύο εκπεμπόμενες δέσμες.



ΣΧΗΜΑ 4.6.1: Η πειραματική διάταξη Multi-Spectral LIF LiDAR του LRSU.

Η λαμβανόμενη ακτινοβολία κατά την έξοδό της από την οπτική ίνα κυματοδηγείται σε ένα φασματογράφο τύπου 77400 MS125 (Newport, Inc) με δυνατότητα ανίχνευσης στο φάσμα εύρους  $180\text{ nm} - 24\ \mu\text{m}$ , με διακριτική ικανότητα  $0.22\text{ nm}$  και ακρίβεια μήκους κύματος  $1\text{ nm}$ . Στον φασματογράφο υπάρχουν ένα φράγμα περίθλασης και δύο κάτοπτρα ευθυγράμμισης δέσμης. Η πρώτη ευθυγράμμιση γίνεται αφού εξέλθει η ακτινοβολία από την οπτική ίνα και η δεύτερη γίνεται αφού υποστεί περίθλαση από το φράγμα (Σχήμα 4.6.2). Το φράγμα περίθλασης τοποθετείται στη θέση που υποδεικνύεται στο Σχήμα 4.6.2 και μπορεί να στραφεί με τη χρήση μικρομετρικού βερνιέρου (Σχήμα 4.6.2).



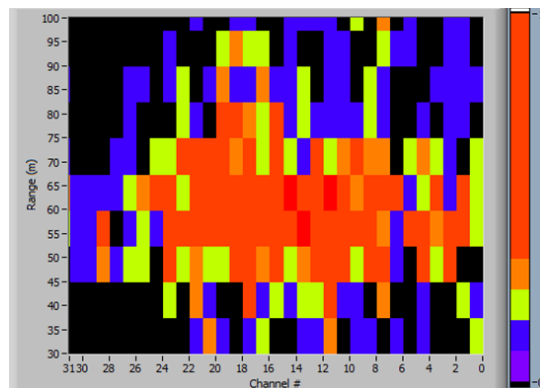
**ΣΧΗΜΑ 4.6.2:** Στο καπάκι του φασματογράφου είναι σχεδιασμένη η πορεία της δέσμης αφού εξέλθει από την οπτική ίνα. Δίπλα στο φράγμα περίθλασης φαίνεται το ασημένιο μικρόμετρο που μεταβάλλει τη γωνία του φράγματος. Το μπλε κουτί αποτελεί τον ανιχνευτή Multispectral Lidar Detector.

Το οπτικό φράγμα περίθλασης που επίσης, χρησιμοποιήθηκε είναι το 77411 MS125 (Newport, Inc) και έχει σχεδιαστεί κατάλληλα για να τοποθετείται στο φασματογράφο. Το φράγμα περίθλασης αποτελείται από σηματογραφίες ή χαραγιές (blazings) με το εύρος κάθε χαρακώσης να είναι  $360\text{ nm}$  και η πυκνότητα γραμμών είναι  $1200\text{ χαραγιές/mm}$ . Το φάσμα που μπορεί να αναλύσει, θεωρητικά, εκτείνεται από  $200$  έως  $1000\text{ nm}$ .

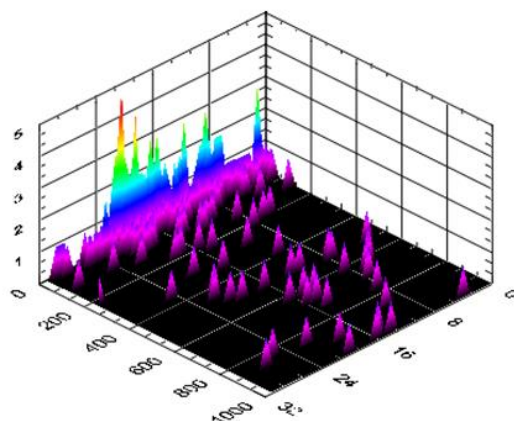
Το δεύτερο κάτοπτρο, εντός του φασματομέτρου, κατευθύνει την αναλυμένη ακτινοβολία στην είσοδο του ανιχνευτή-ψηφιοποιητή Multispectral Lidar Detector της Licel GmbH (Σχήμα 4.6.2). Στην είσοδο της συσκευής είναι τοποθετημένος ένας γραμμικός φωτοπολλαπλασιαστής με γραμμικό διάνυσμα 32 ανόδων (32 Multi-anode PMT) της Hamamatsu. Κάθε άνοδος αντιστοιχεί σε ένα κανάλι της αναλυμένης ακτινοβολίας και έτσι η

συσκευή μπορεί να καταγράφει ταυτόχρονα και στα 32 κανάλια της τα φωτόνια που προσπίπτουν επιτρέποντας φασματική καταγραφή εύρους  $170\text{ nm}$  με φασματική διακριτική ικανότητα  $6.2\text{ nm}$ . Ο ανιχνευτής τροφοδοτείται από ένα τροφοδοτικό υψηλής τάσης εύρους  $0 - 900\text{ V}$ , με τα  $850\text{ V}$  να είναι κατάλληλη τάση για τον συγκεκριμένο PMT.

Η δισδιάστατη γραφική παράσταση που παράγει το λογισμικό της συσκευής αφορά την απεικόνιση φασμάτων με οριζόντιο άξονα τα κανάλια των μηκών κύματος και κατακόρυφο άξονα το ύψος εμφανίζεται στο Σχήμα 4.6.3, ενώ η τρισδιάστατη εικόνα (Σχήμα 4.6.4) απεικονίζει το λαμβανόμενο φάσμα με τους άξονες στο επίπεδο να είναι τα κανάλια των μηκών κύματος και τις θέσεις (bins) του ύψους, ενώ ο κατακόρυφος άξονας αποτελεί την ένταση του λαμβανόμενου σήματος. Να σημειωθεί ότι η χωρική διακριτική ικανότητα του συστήματος είναι  $7.5\text{ m}$  και κάθε αρχείο καταγραφόταν μετά από 4090 παλμούς (περίπου 7 λεπτά).



**ΣΧΗΜΑ 4.6.3:** Η δισδιάστατη απεικόνιση φάσματος φθορισμού με εφαρμογή της 4<sup>ης</sup> αρμονικής στις 17/05/2018. Τα κανάλια είναι κατά φθίνουσα σειρά, δηλαδή το κανάλι 0 αντιστοιχεί σε μεγαλύτερο μήκος κύματος απ'ό,τι το κανάλι 31.



**ΣΧΗΜΑ 4.6.4:** Η τρισδιάστατη απεικόνιση φάσματος φθορισμού με εφαρμογή της 3<sup>ης</sup> αρμονικής στις 04/05/2018. Για τα κανάλια ισχύει το ίδιο με την εικόνα 4.6.3.

Παράλληλα με την καταγραφή των φασμάτων φθορισμού λειτουργούσε και μια γυρεοπαγίδα/σποριοπαγίδα (Burkard, UK) που παγιδεύει τα αερομεταφερόμενα βιοσωματίδια (Σχήμα 4.6.5 α και β) και μη, στην οποία τοποθετείται αντικειμενοφόρος πλάκα με την ίδια κολλώδη ουσία (Πυρρή, 2008) (Υποκεφάλαιο 4.4). Η αντικειμενοφόρος πλάκα τοποθετείται στη σχισμή του περιστρεφόμενου δακτυλίου. Η λειτουργία της παγίδας βασίζεται σε ένα μικρό μότερ που ρουφά αέρα από τη σχισμή που βρίσκεται επάνω από το θάλαμο της πλάκας και εξέρχεται από τις περιφερειακές τρύπες, με αποτέλεσμα τα σωματίδια να εναποτίθενται πάνω στη γέλη. Ο ρυθμός απορρόφησης της παγίδας είναι 10 L το λεπτό (Πυρρή, 2008).



**ΣΧΗΜΑ 4.6.5:** (α) Απεικονίζεται η παγίδα βιοαερολυμάτων και φαίνονται οι περιφερειακές τρύπες εκροής αέρα, η σχισμή του επιστρεφόμενου δακτυλίου και η σχισμή επάνω από το θάλαμο της πλάκας. (β) Νυχτερινή λειτουργία της παγίδας και πιο μπροστά βρίσκεται το παράθυρο της οροφής του LRSU, απ'όπου και εξέρχεται η δέσμη laser.

#### 4.7 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ-ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Θα παρουσιαστούν τα φάσματα φθορισμού και οι αριθμητικές πυκνότητες των βιοσωματιδίων για ένα σύνολο 12 ημερών, εκ των οποίων οι 5 αντιστοιχούν σε ακτινοβόληση στα 355nm και οι υπόλοιπες 7 αντιστοιχούν σε ακτινοβόληση στα 266nm. Όλα τα φάσματα φθορισμού επεξεργάστηκαν ως ακολούθως:

- Ανάγνωση αρχείων με τη βοήθεια του λογισμικού.
- Υπολογισμός μέσων τιμών των αρχείων.
- Διόρθωση κατά το υπόβαθρο/θόρυβο.
- Διόρθωση κατά την απόσταση και την μοριακή απορρόφηση (Rao et al., 2017).
- Εξομάλυνση των σημάτων.

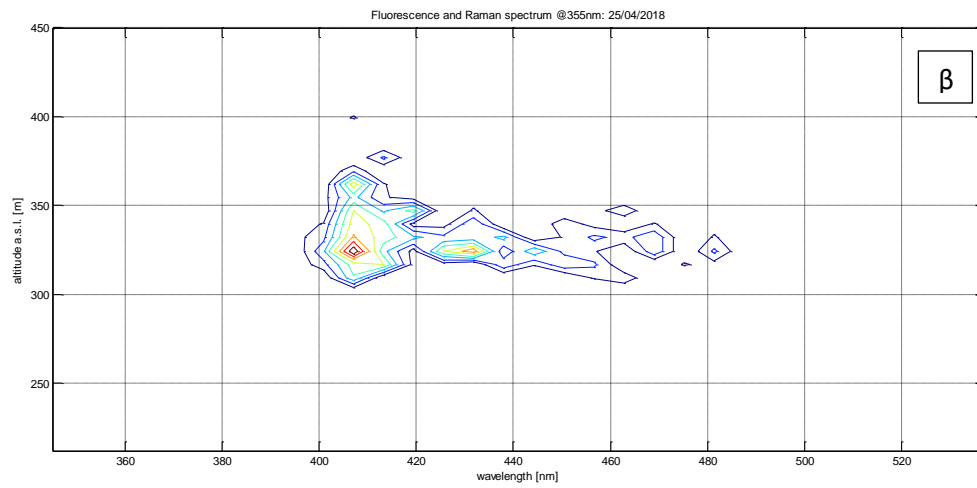
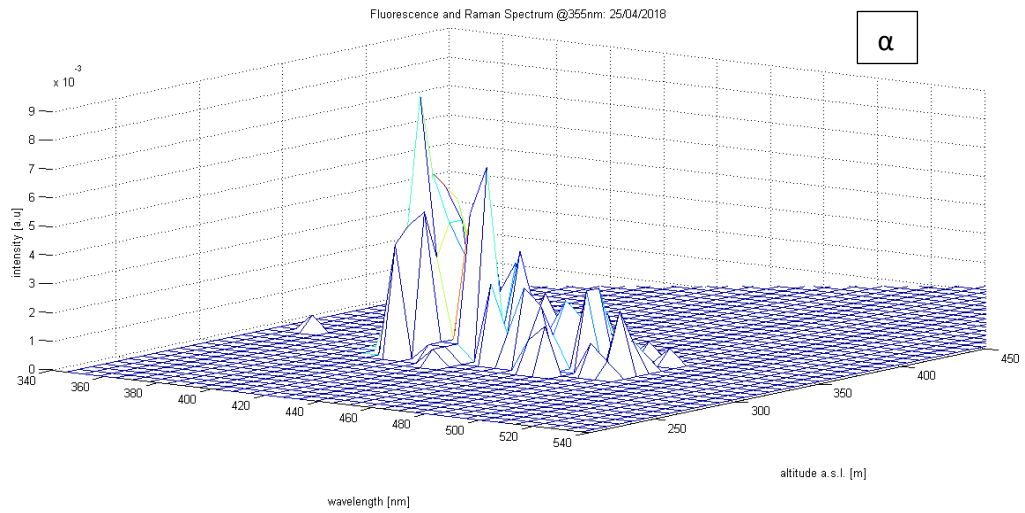
Στα Σχήματα 4.7.1 α και β, 4.7.2 και 4.7.3 α και β, παρουσιάζονται τα φάσματα φθορισμού για τις 25/04/2018 (355nm), 04/05/2018 (355nm) και 15/05/2018 (266nm) στο χώρο (καθ' ύψος, μήκος κύματος και ένταση) και στο επίπεδο (καθ' ύψος ανά μήκος κύματος). Τα φάσματα σε αυτά τα Σχήματα έχουν επεξεργαστεί μέχρι το στάδιο της διόρθωσης κατά το υπόβαθρο/θόρυβο.

Τα σήματα φθορισμού για την περίπτωση των 355 nm προέκυπταν από ένα εύρος υψών 330-470 m πάνω από τη μέση επιφάνεια της θάλασσας, ενώ για την περίπτωση χρήσης των 266nm το εύρος υψών είναι χαμηλότερο, δηλαδή τα στρώματα φθορισμού εντοπίζονται μεταξύ 240m και 300m πάνω από τη μέση επιφάνεια της θάλασσας λόγω της έντονης απορρόφησης από το τροποσφαιρικό όζον και, τέλος, οποιοσδήποτε φθορισμός προέκυπτε σε μεγαλύτερα ύψη θα ήταν αρκετά ασθενέστερος, καθώς θα απορροφούνταν από τα ατμοσφαιρικά μόρια και αερολύματα και ό,τι θα έφτανε θα θεωρούνταν θόρυβος.

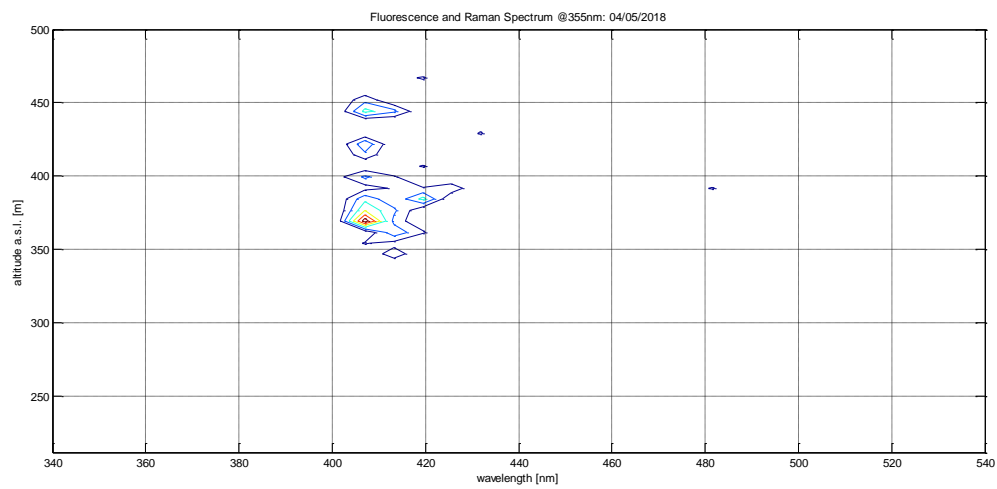
Στα Σχήματα 4.7.1, 4.7.2 και 4.7.3 η αποκοπή λόγω του φίλτρου χαρακτηρίζεται με την απότομη αύξηση στα 380 nm περίπου και έπειτα ακολουθεί μία ομαλή μείωση. Αυτή η μείωση δεν οφείλεται στην απουσία βιοαερολυμάτων, αλλά λόγω του παραθύρου που επιτρέπει τη διέλευση συγκεκριμένου φάσματος.

Στην περίπτωση χρήσης ακτινοβολίας των 355nm παρατηρήθηκε η κορυφή Raman του νερού στα 407nm, η οποία είναι μεγαλύτερη σε ένταση από τον φθορισμό. Η κορυφή Raman στα 387nm δεν παρατηρείται λόγω απόκοπής από το οπτικό φίλτρο.

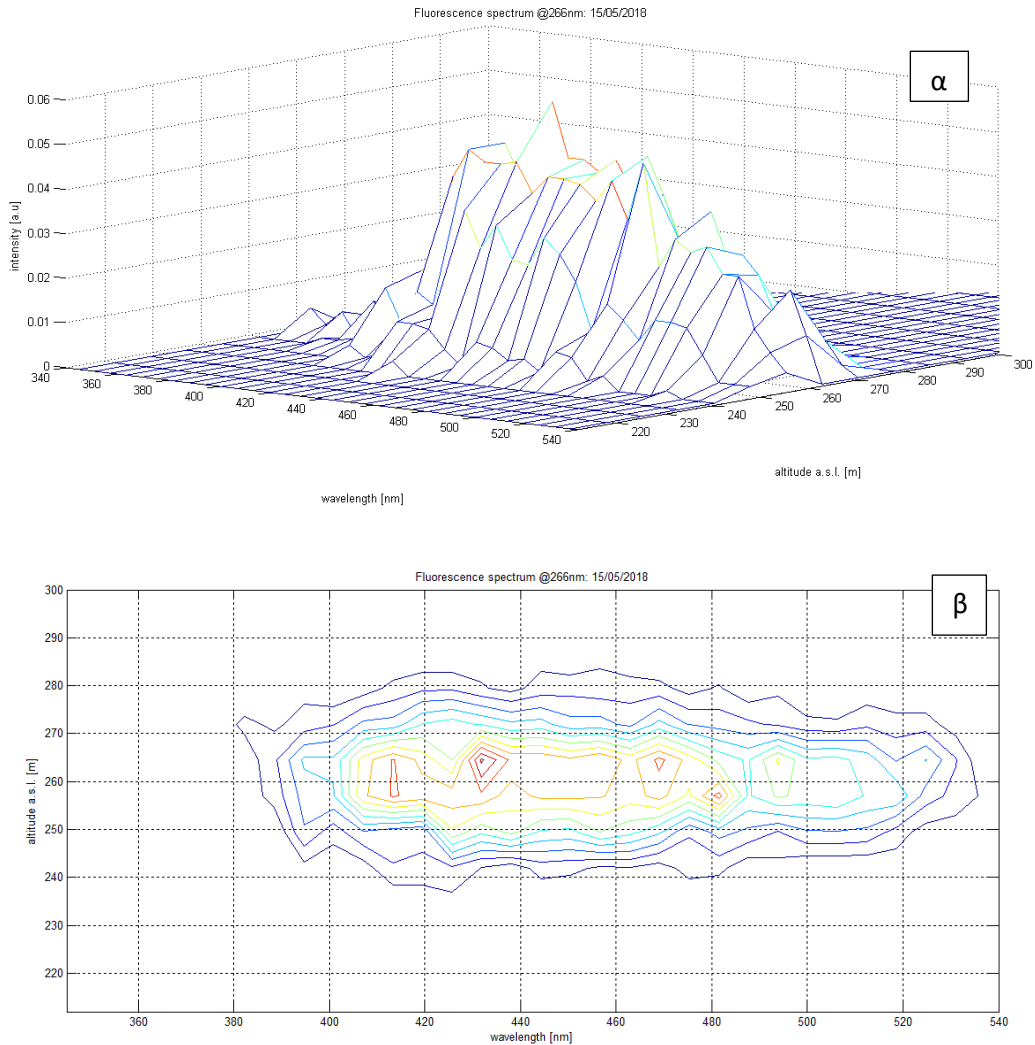




**ΣΧΗΜΑ 4.7.1:** Η περίπτωση εφαρμογής των 355nm στις 25/04/2018. (α) Απεικονίζεται το τρισδιάστατο φάσμα φθορισμού. (β) Απεικονίζεται το διδιάστατο φάσμα φθορισμού.



**ΣΧΗΜΑ 4.7.2:** Μία περίπτωση όπου παρατηρούνται πολλαπλά στρώματα βιοσωματιδίων με την εφαρμογή των 355nm στις 04/05/2018.



**ΣΧΗΜΑ 4.7.3:** Περίπτωση εφαρμογής των 266nm στις 15/05/2018. (α) Απεικονίζεται το τρισδιάστατο φάσμα φθορισμού και (β) απεικονίζεται το διασδιάστατο φάσμα φθορισμού.

Το Σχήμα 4.7.2 παρουσιάζεται για να δείξει η εμφάνιση πολλαπλών στρωμάτων φθορισμού. Ίσως, με την εφαρμογή των 266nm να προέκυπτε ένα ενιαίο φάσμα φθορισμού.

Η πρώτη απόπειρα μετρήσεων ήταν στις 20/04/2018, όμως το μόνο που καταγραφόταν ήταν σποραδικός θόρυβος διότι στην ατμόσφαιρα συνεχόμενα φυσούσε ΒΑ με ένταση 6Bf. Συνεπώς, τα βιοσωματίδια δεν κατακάθονταν αρκετή ώρα πάνω από το σύστημα LiDAR με αποτέλεσμα η δέσμη laser να αλληλεπιδρά ελάχιστα έως και καθόλου με αυτά. Ωστόσο, στις 21/05/2018 παρόλο που είχε 4Bf καταγράφονταν φάσματα, αλλά χαμηλής έντασης. Φαίνεται, επομένως, ότι η ανάκτηση φασμάτων φθορισμού εξαρτάται άμεσα από την ένταση του ανέμου.

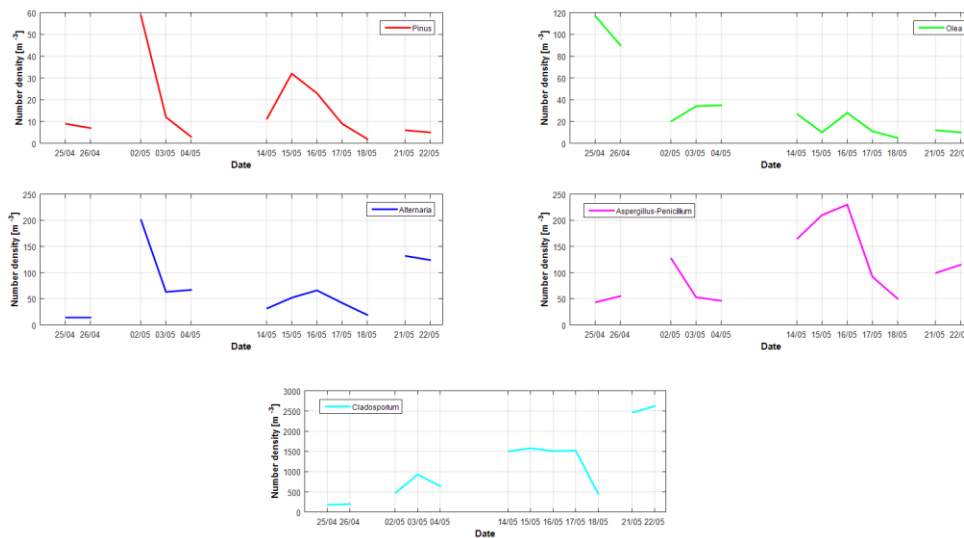
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα συγκεντρώσεων διάφορων σωματιδίων που προέκυψαν από την παγίδα, τα φάσματα φθορισμού μέγιστων εντάσεων κατά χρήση αρμονικής και η επεξήγηση αυτών με βάση τις συγκεντρώσεις των βιοσωματιδίων, η σύγκριση κάποιων φασμάτων με τα φάσματα φθορισμού των in-situ πειραμάτων και, τέλος, ένας πίνακας με τα βασικά στοιχεία.

### **ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΕΣ ΒΙΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ**

Με την χρήση του αναλυτή αέρα κατέστη δυνατή η καταμέτρηση και η ταυτοποίηση πλήθους βιοσωματιδίων και η μετατροπή αυτών σε αριθμητική πυκνότητα. Από τις παγίδες προέκυψαν πλήθη γυρεόκκων προερχόμενα από πεύκα, ελιές, κυπαρίσσι κ.ά. και πλήθη μύκητων προερχόμενα από τα 4 εξεταζόμενα είδη, αλλά και άλλα. Λόγω μορφολογίας, οι μύκητες *Aspergillus* και *Penicillium* καταγράφονται μαζί. Τέλος, η καταγραφή βακτηρίων δεν είναι δυνατή σε αυτές τις περιπτώσεις διότι είναι πολύ μικρότερα από τους μύκητες και τη γύρη. Στο Σχήμα 4.7.4 παρουσιάζονται οι χρονοσειρές μεταβολής μέσω των τιμών αριθμητικών πυκνοτήτων των 6 ειδών που έχουν μελετηθεί εργαστηριακά και όπως καταγράφηκαν από την παγίδα, δηλαδή οι γύρεις των πεύκων και ελαιών και οι μύκητες *Aspergillus*, *Penicillium*, *Alternaria* και *Cladosporium*. Στο Σχήμα 4.7.4 παρατηρούνται τα εξής:

- Χαμηλές συγκεντρώσεις γύρης πεύκου, αφενός επειδή κατά το Μάιο 2018 έχει ήδη λήξει η εποχή επικονίασής του και αφετέρου επειδή εντός μίας εβδομάδας τον Απρίλιο έβρεξε 4 φορές, με αποτέλεσμα την υγρή εναπόθεση στο έδαφος της γύρεως. Η γύρη που επαναιωρήθηκε, μάλλον προήλθε από την βόρεια Ευρώπη, με βάση το μοντέλο SILAM. Παρά τις βροχές, στην Πεντέλη υπήρχαν ακόμη πεύκα που έκκριναν γύρη.
- Η ελιά παρουσίασε υψηλές συγκεντρώσεις στις τελευταίες ημέρες του Απριλίου 2018 καθώς εξακολουθούσε να επικρατεί η εποχή επικονίασής της, η οποία συνεχίζει και τον Μάιο 2018, αλλά δεν αναμένονται μεγάλες συγκεντρώσεις αυτής όπως και δείχνουν τα δεδομένα. Με βάση το μοντέλο SILAM, η ελιά θα έπρεπε να έχει μεγαλύτερες συγκεντρώσεις απ'ό,τι παρουσιάζονται παρακάτω. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων επικρατούσε κατά κύριο λόγο άπνοια, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι δεν μεταφέρονται σωματίδια από τα σημεία έκκρισης της γύρης.

- Οι 4 μύκητες επικρατούν περισσότερο και κυριότερα το *Cladosporium*, καθώς αναπτύσσονται και πολλαπλασιάζονται σε οποιοδήποτε περιβάλλον και ειδικά την περίοδο της άνοιξης. Να σημειωθεί ότι εκείνες τις μέρες είχε ζέστη και άπνοια.

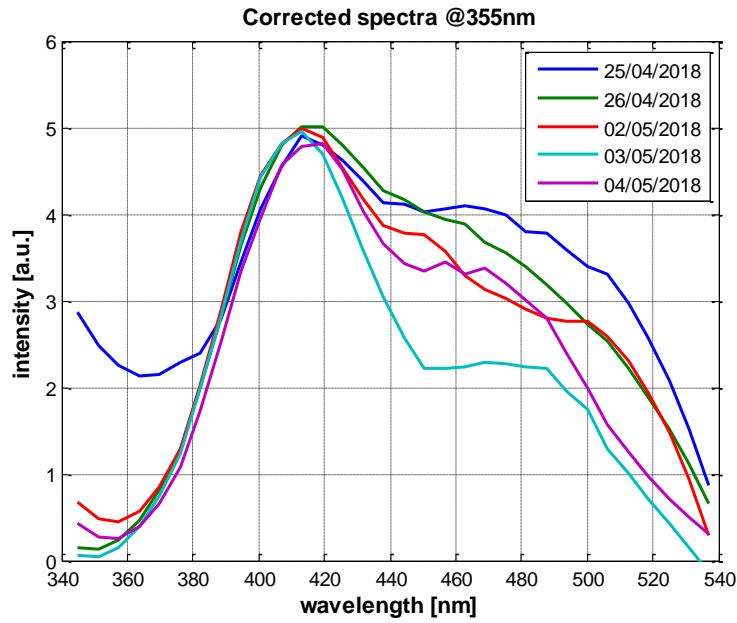


**ΣΧΗΜΑ 4.7.4:** Οι χρονοσειρές των μέσων τιμών αριθμητικών πυκνοτήτων των 6 γενών βιοσωματιδίων κατά τη διάρκεια μετρήσεων του συστήματος LiDAR.

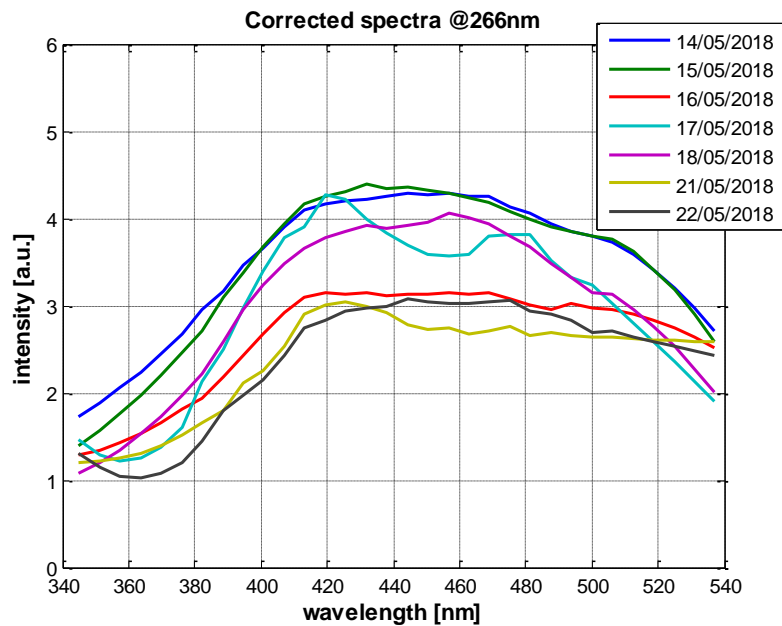
## ΦΑΣΜΑΤΑ ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ LiDAR

Τα φάσματα που παρουσιάζονται σε αυτήν την παράγραφο αντιστοιχούν στις μέσες τιμές των ολικών τρισδιάστατων φασμάτων και έχουν υποστεί όλες τις διορθώσεις (Rao et al., 2017) και έχουν εξομαλυνθεί με φίλτρο Savitzky-Golay, βαθμού 2 και εύρος τιμών 11 χωρίς να χάνεται η πληροφορία. Στις Εικόνες 4.7.5 και 4.7.6 απεικονίζονται τα φάσματα αυτά στην φασματική περιοχή 340 – 540 nm.

Τα σήματα φθορισμού LiDAR προέκυψαν από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν τις ακόλουθες νύχτες: 25/04/2018, 26/05/2018, 02/05/2018, 03/05/2018, 04/05/2018, 14/05/2018, 15/05/2018, 16/05/2018, 17/05/2018, 18/05/2018, 21/05/2018 και 22/05/2018. Οι εντάσεις των λαμβανόμενων ακτινοβολιών εξαρτώνται άμεσα από τη συγκέντρωση των βιοσωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Υπενθυμίζεται ότι η παγίδα δεν κατέγραψε μόνο τα 6 από τα 9 υπό εξέταση βιοαερόλυμα, αλλά και πολλά άλλα, όπως τη γύρη της βελανιδιάς, τη γύρη του κυπαρισσιού και πολλούς επιπλέον γυρεόκοκκους και μύκητες (Παράρτημα Β). Επιπρόσθετα, παγιδεύτηκαν στις 16-17-18/05 και κόκκοι άμμου από τη Σαχάρα.



ΣΧΗΜΑ 4.7.5: Τα φάσματα φθορισμού με διέγερση τα 355nm. Διακρίνεται η Raman κορυφή του νερού στα 407nm.



ΣΧΗΜΑ 4.7.6: Τα φάσματα φθορισμού με διέγερση τα 266nm.

Ακολούθως, υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές των αριθμητικών πυκνοτήτων που προέκυψαν από τις μετρήσεις της γυρεο-σποροεπαγίδας για όλα τα βιοσωματίδια συνολικά για κάθε μέτρηση και προέκυψαν τα εξής: 25/04/2018- $400\text{m}^{-3}$ , 26/04/2018- $500\text{m}^{-3}$ ,

02/05/2018-605 m<sup>-3</sup>, 03/05/2018-742 m<sup>-3</sup>, 04/05/2018-584 m<sup>-3</sup>, 14/05/2018-1107 m<sup>-3</sup>, 15/05/2018-1116 m<sup>-3</sup>, 16/05/2018-1111 m<sup>-3</sup>, 17/05/2018-970 m<sup>-3</sup>, 18/05/2018-349 m<sup>-3</sup>, 21/05/2018-1649 m<sup>-3</sup> και 22/05/2018-1690 m<sup>-3</sup>. Παρόλα αυτά δε μπορεί να διεξαχθεί συμπέρασμα με βάση της παραπάνω τιμές, αλλά να εξεταστούν μεμονωμένα τα 6 είδη των βιοσωματιδίων.

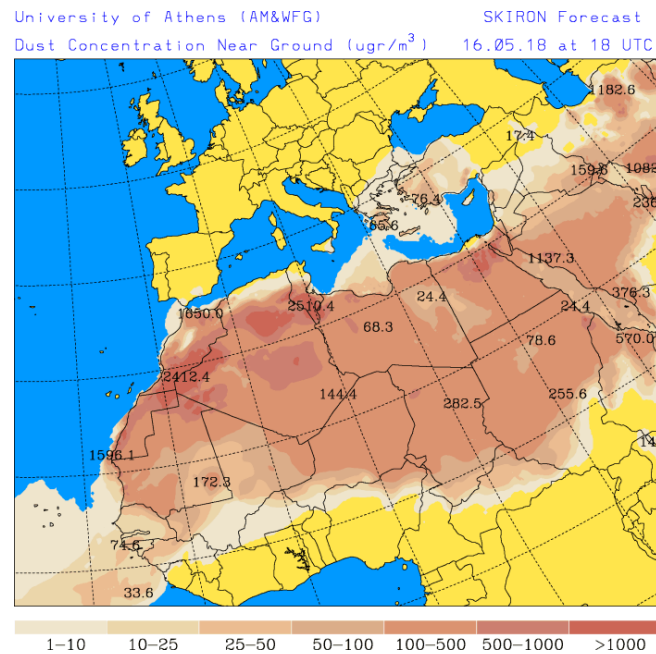
Στο Σχήμα 4.7.5, τα φάσματα εμπεριέχουν την κορυφή Raman του νερού στα 407nm (Fujii et al., 2005), με την οποία και βαθμονομήστηκε το φασματόμετρο. Παρατηρείται ότι είναι μεγαλύτερης έντασης από αυτή του φθορισμού. Από τα 440nm έως και τα 540nm παρατηρείται ο φθορισμός των βιοαερολυμάτων. Στις 25/05/2018 υπάρχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς υπάρχει μεγαλύτερη συγκέντρωση γύρης ελιάς (117 m<sup>-3</sup>), η οποία απορροφά ικανοποιητικά τα 355nm. Λόγω της αυξημένης του παρουσίας, πιθανώς να εξηγείται η αύξηση έντασης φθορισμού του συγκεκριμένου φάσματος φθορισμού προς τα 500nm.

Η ακτινοβολία των 266nm απορροφάται περισσότερο από τα περισσότερα εξεταζόμενα βιοαερολύματα και γι'αυτό προκύπτουν πιο «φουσκωμένα» φάσματα φθορισμού στο Σχήμα 4.7.6 συγκριτικά με εκείνα του Σχήματος 4.7.5. Στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά τις αναφερόμενες νύχτες στο Σχήμα 4.7.6 επικρατούσαν μεγάλες ποσότητες του μύκητα *Cladosporium* (Σχήμα 4.7.4) σε σχέση με τα υπόλοιπα βιοσωματίδια. Ειδικά οι πτώσεις στις εντάσεις των μετρήσεων 21/05/2018 και 22/05/2018 οφείλονται στο γεγονός ότι ο μύκητας *Cladosporium* επικρατεί αρκετά φτάνοντας την τιμή συγκέντρωσης 2620 m<sup>-3</sup> και ότι δεν απορροφά αρκετά ούτε στα 266nm και ούτε στα 355nm. Επίσης, το πλήθος τους είναι τόσο μεγάλο εκείνες τις δύο νύχτες που μπορεί να απορροφούν τα όποια φάσματα φθορισμού προκύπτουν.

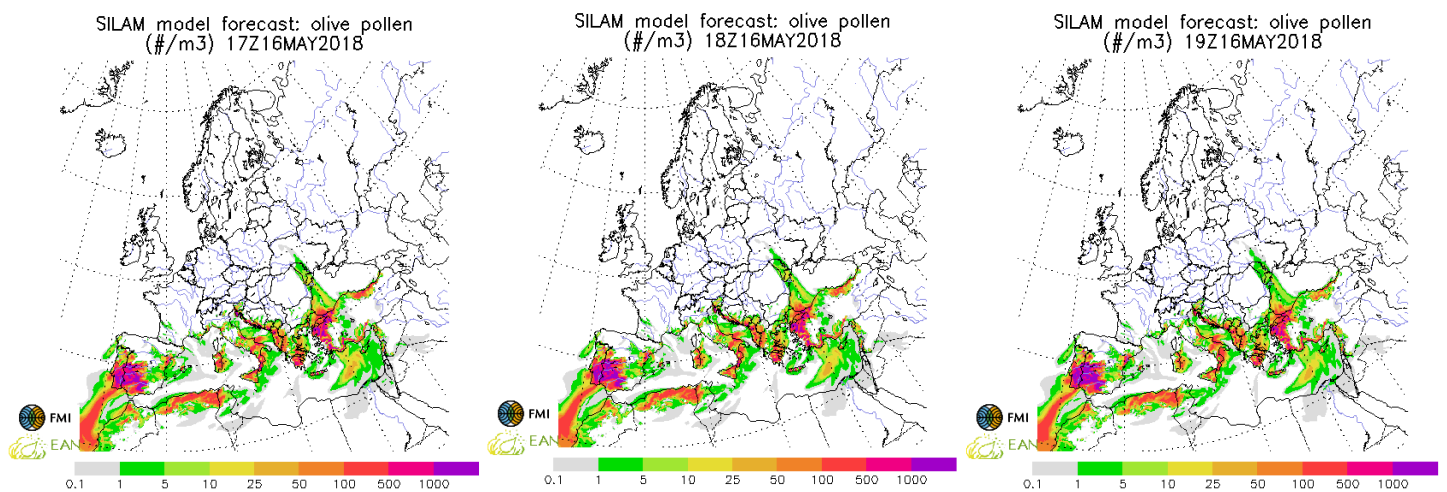
Στο Σχήμα 4.7.6, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η καμπύλη στις 16/05/2018 (όπως και οι καμπύλες στις 14/05/2018 και 15/05/2018, οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω), καθώς παρουσιάζεται μία αύξηση του μεγέθους της καμπύλης στα 500 nm. Από τα φάσματα φθορισμού του Υποκεφαλαίου 4.3, η γύρη ελιάς, όλοι οι μύκητες εκτός από τον *Apergillus* και η σκόνη (πού βρέθηκε στις πλάκες τη συγκεκριμένη ημερομηνία) αποκρίνουν τη μέγιστη έντασή τους στα 500 nm. Οι συγκεντρώσεις αυτών εκείνο το βράδυ είναι: *Olea*-28m<sup>-3</sup>, *Alternaria*- 66 m<sup>-3</sup>, *Aspergillus-Penicillium*- 230 m<sup>-3</sup> και *Cladosporium*- 1509 m<sup>-3</sup>. Παρευρισκόταν σκόνη Σαχάρας πάνω από την Αθήνα με βάση το μοντέλο ΣΚΙΡΩΝ (Σχήμα 4.7.7) και με βάση το μοντέλο SILAM η ελιά θα έπρεπε να είχε φτάσει τα επίπεδα 50-100m<sup>-3</sup> (Σχήμα 4.7.8), όμως λόγω άπνοιας δε μεταφερόταν από τις πηγές προέλευσής της.

Τέλος, να σημειωθεί ότι μαζί με τα 355nm και τα 266nm εκπέμπονταν και τα 532nm,

ωστόσο δεν εμφανίζεται σε εκείνο το μήκος κύματος έντονη κορυφή στα φάσματα, καθώς η ευθυγράμμιση του τηλεσκοπίου με την εξερχόμενη δέση laser γινόταν με βάση τα 355nm και τα 266nm. Επομένως, το FOV για τα 532nm είναι διαφορετικό.



ΣΧΗΜΑ 4.7.7: Η σκόνη της Σαχάρας πάνω από την Ελλάδα στις 21.00 τοπική ώρα.

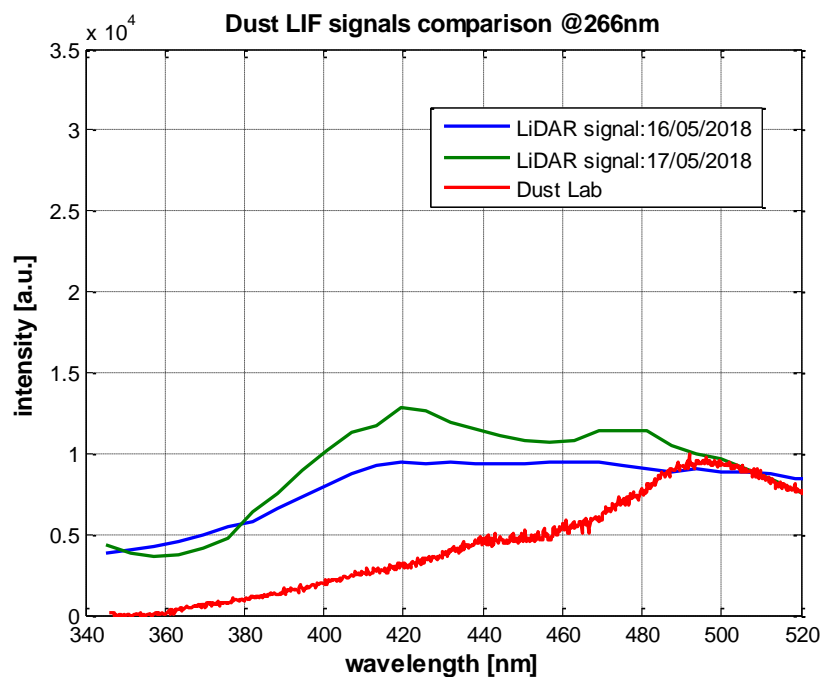


ΣΧΗΜΑ 4.7.8: Χωροχρονική μεταβολή της γύρης της ελιάς με βάση το μοντέλο SILAM, για τις ώρες 20.00, 21.00 και 22.00 τοπική ώρα.

## ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ

Στο σημείο αυτό, συγκρίνονται ενδεικτικά τα εργαστηριακά φάσματα φθορισμού της σκόνης (στα 266nm) με εκείνα που ελήφθησαν από την τεχνική LIF LiDAR κατά τις ημέρες 16/05/2018 και 17/05/2018 και της γύρης του πεύκου (στα 266nm) με εκείνα που ελήφθησαν από την τεχνική LIF LiDAR κατά τις ημέρες 14/05/2018 και 15/05/2018.

Στο Σχήμα 4.7.8 συγκρίνονται τα φάσματα φθορισμού LiDAR των ημερών 16/05/2018 και 17/05/2018 με το εργαστηριακό φάσμα της σκόνης με μήκος κύματος διέγερσης τα 266nm. Οι συγκεκριμένες μέρες συγκρίθηκαν με το φάσμα φθορισμού της σκόνης, καθώς εκείνες τις ημέρες παρουσιάστηκε σκόνη πάνω το σύστημα LiDAR,  $76\text{m}^{-3}$  και  $16\text{m}^{-3}$ , αντίστοιχα. Η πρώτη κορυφή των σημάτων LiDAR που εμφανίζεται στα 420nm μπορεί να αντιστοιχεί εν μέρη στην κορυφή της σκόνης στα 440nm, ενώ το «φούσκωμα» στα 460-490nm μπορεί να αντιστοιχεί εν μέρη στην κορυφή της σκόνης στα 480-500nm.

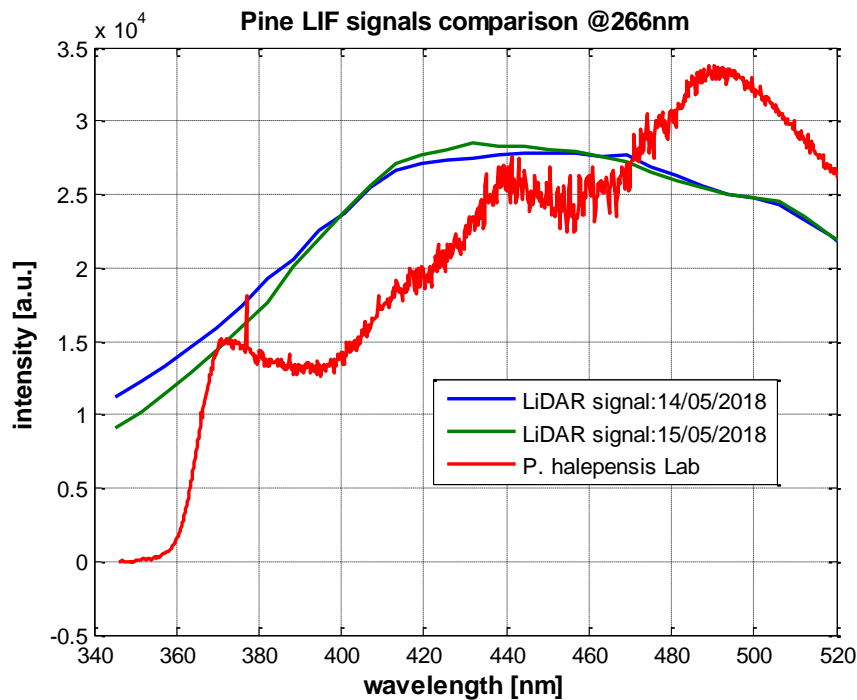


ΣΧΗΜΑ 4.7.8: Η σύγκριση φασμάτων φθορισμού για τη χρήση των 266nm.

Στο Σχήμα 4.7.9 συγκρίνονται τα φάσματα φθορισμού των 14/05/2018 και 15/05/2018 με το εργαστηριακό φάσμα φθορισμού της γύρης του πεύκου για μήκος κύματος διέγερσης τα 266nm. Η πρώτη κορυφή των δύο σημάτων φθορισμού LiDAR εμπίπτει στην περιοχή 400-420, η οποία μπορεί να οφείλεται σε DNA, τρυπτοφάνη, τυροσίνη και άλλα (O'Connor et al., 2011; Pan, 2015). Η κορυφή του εργαστηριακού φάσματος της γύρης στα



440nm φαίνεται να συνοδεύεται από μία κορυφή λίγο πριν τα 440 nm (14/05/2018 και 15/05/2018). Η κορυφή του εργαστηριακού φάσματος στα 480-500nm αντιστοιχεί σε δύο κορυφές των σημάτων LiDAR στα 470nm και 510nm. Το προτελευταίο στοιχείο δηλώνει την πιθανότητα η δέσμη laser να αλληλεπίδρασε με γύρη πεύκου και επιβεβαιώνεται με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παγίδα, όπου στις 14/05/2018 η αριθμητική πυκνότητα ήταν  $11 m^{-3}$ , ενώ η αριθμητική πυκνότητα στις 15/05/2018 ήταν  $32 m^{-3}$ .



ΣΧΗΜΑ 4.7.9: Η σύγκριση φασμάτων φορισμού για τη χρήση των 266nm.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Στον Πίνακα 4.7.1 και 4.7.2 παρουσιάζονται όλα τα στοιχεία που αφορούν τις μετρήσεις με το σύστημα LiDAR, δηλαδή τις ώρες που λειτουργούσε το LiDAR και η παγίδα, τη χρήση αρμονικής του laser, την ένταση του ανέμου, τη συγκέντρωση σκόνης και ελιάς με βάση τα μοντέλα SILAM και ΣΚΙΡΩΝ και τις συγκεντρώσεις των 6 εξεταζόμενων βιοαερολυμάτων. Από το μετεωρολογικό σταθμό του LRSU, λαμβανόταν η μέση τιμή της έντασης του στιγμιαίου ανέμου και, επίσης, ελέγχονταν οι καιρικές προβλέψεις με τα μοντέλα του Foreca, ΣΚΙΡΩΝ και της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (Ε.Μ.Υ.).

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.7.1:** Τα στοιχεία που παρατηρούνταν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων (1<sup>ο</sup> Μέρος).

Ημερομηνία	Ώρες LiDAR [Z]	Ώρες Παγίδας [Z]	Μήκος Κύματος [nm]	Ένταση Ανέμου [Bf]	Σκόνη [ $\mu\text{g}/\text{m}^{-3}$ ]
25/04/2018	17.08-18.30	16.15-18.25	355	0-0	---
26/04/2018	17.35-18.36	15.34-18.38	355	---	---
02/05/2018	17.24-18.24	16.23-18.24	355	... -2	---
03/05/2018	17.37-18.24	16.55-18.32	355	3-2	25-50
04/05/2018	17.43-18.30	16.28-18.33	355	1-1	93.4
14/05/2018	17.45-18-26	16.40-18.36	266	0-1	10-25
15/05/2018	17.41-18.22	15.49-17.24	266	0-0	10-25
16/05/2018	17.44-18.25	15.58-18.35	266	0-0	10-25
17/05/2018	17.43-17.53	16.01-17.53	266	1-1	10-25
18/05/2018	17.50-18.31	16.02-18.34	266	1-1	10-25
21/05/2018	17.49-18.30	16.28-18.33	266	2-4	1-10
22/05/2018	17.57-18.31	16.10-18.35	266	1-1	1-10

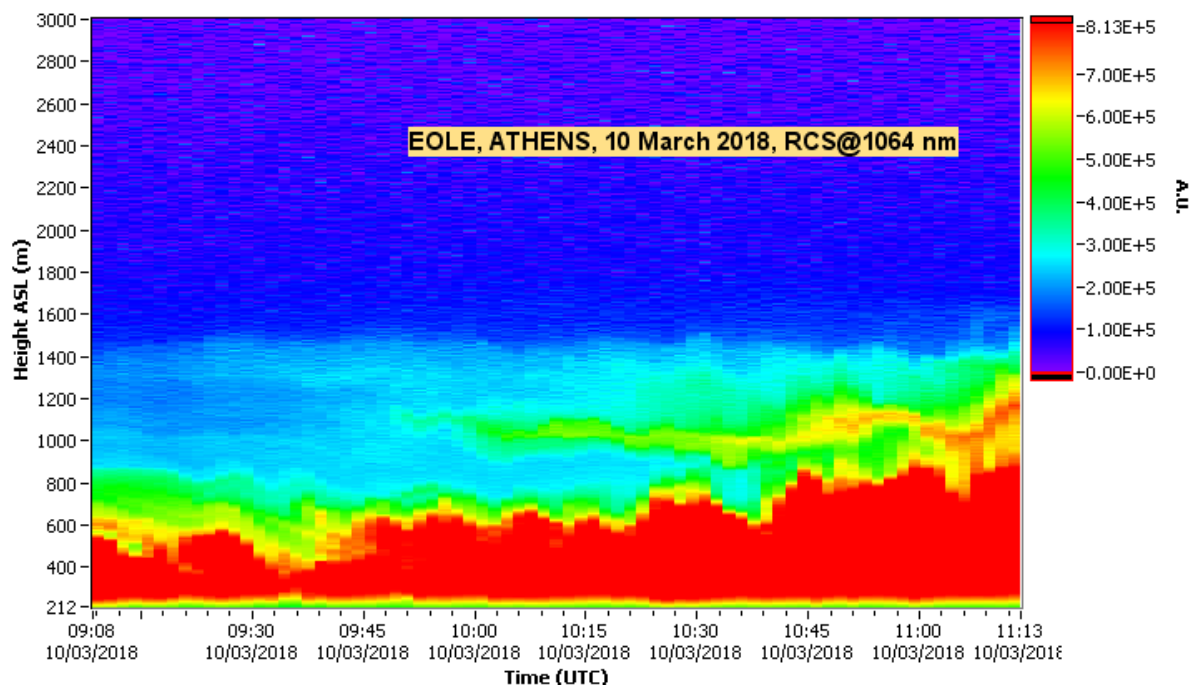
**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.7.2:** Τα στοιχεία που παρατηρούνταν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων (2<sup>ο</sup> Μέρος).

Ημερομηνία	Ελιά SILAM [m <sup>-3</sup> ]	Γύρη Ελιάς [m <sup>-3</sup> ]	Γύρη Πεύκου [m <sup>-3</sup> ]	Asper.-Penic. [m <sup>-3</sup> ]	Alter. [m <sup>-3</sup> ]	Clado. [m <sup>-3</sup> ]
25/04/2018	---	117	9	43	14	182
26/04/2018	---	90	7	55	14	199
02/05/2018	100-500	20	59	128	202	465
03/05/2018	100-500	34	12	53	63	929
04/05/2018	100-500	35	3	46	67	641
14/05/2018	25-50	27	11	164	31	1501
15/05/2018	50-100	10	32	210	52	1579
16/05/2018	100-500	28	23	230	66	1509
17/05/2018	10-25	11	9	92	42	1521
18/05/2018	1-5	5	2	50	19	453
21/05/2018	0.1-1	12	6	99	132	2461
22/05/2018	0.1-1	10	5	115	124	2620

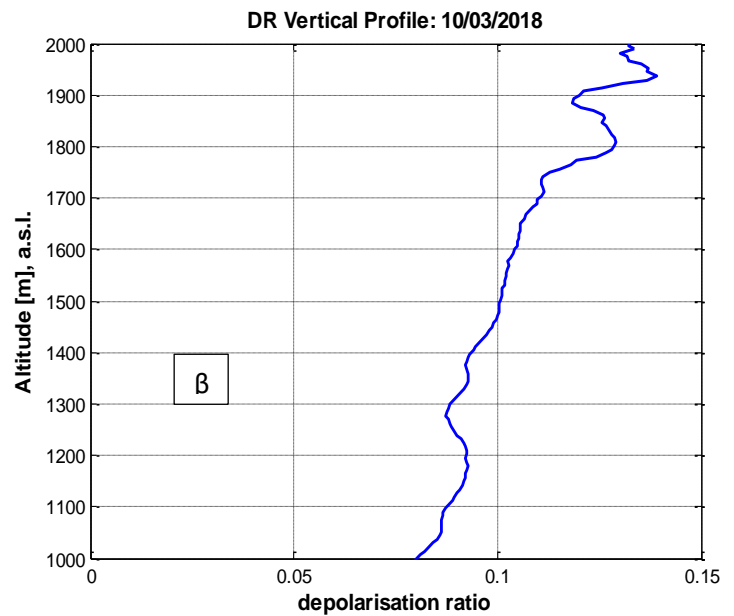
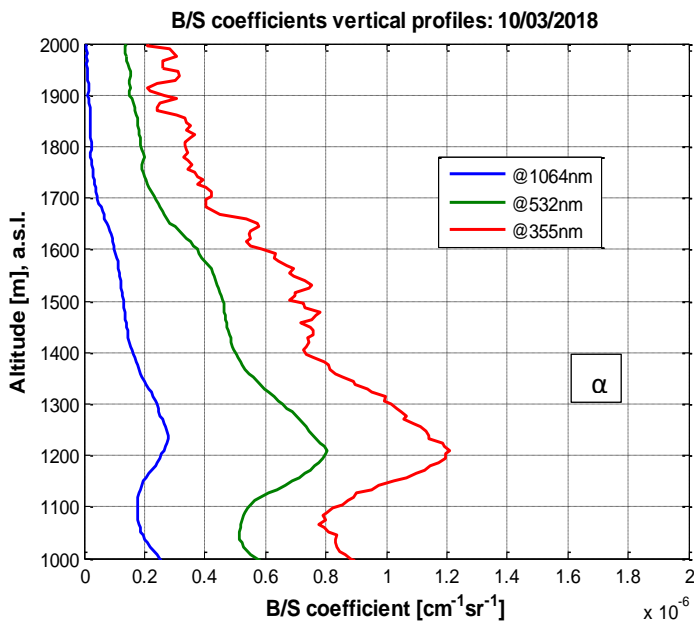
#### 4.8 ΑΠΟΠΟΛΩΣΗ ΒΙΟΓΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Στις 10/03/2018 πάνω από την Αθήνα παρατηρήθηκε ένα ατμοσφαιρικό στρώμα και μία μικρή αύξηση στη σωματιδιακή αποπόλωση. Οι παρατηρήσεις έγιναν με το σύστημα Raman-elastic lidar (355 nm, 532 nm, 1064 nm) (Σχήμα 4.8.1 και 4.8.2α για κατανομές συντελεστών οπισθοσκέδασης) και με το depolarisation lidar (355 nm) του LRSU (Σχήμα 4.8.2β). Για το elastic lidar, χρησιμοποιείται ένα Nd:YAG laser της σειράς Lab-170-10 Quanta-Ray (Spectra-Physics), ενώ για την αποπόλωση ένα Nd:YAG laser Quantel της σειράς Brilliant (Υποκεφάλαιο 4.6). Οι οπισθοσκεδαζόμενες ακτινοβολίες του elastic lidar συλλέγονται από ένα τηλεσκόπιο διαμέτρου 300 mm και αντίστοιχα του depolarisation lidar από ένα τηλεσκόπιο διαμέτρου 200 mm.

Ο συνδυασμός των τριών εικόνων φαίνεται να επιβεβαιώνουν την παρουσία ενός ιδιαίτερου στρώματος στα 1000 – 1400 m. Στις 10/03/2018 είχε ήδη ξεκινήσει η εποχή επικονιάσεις του πεύκου και δεν είχε καταφτάσει ακόμη Αφρικάνικη σκόνη. Το ατμοσφαιρικό στρώμα έως τα 800 m αντιπροσωπεύει το Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα (ΑΟΣ).



ΣΧΗΜΑ 4.8.1: Η εξέλιξη των αιωρούμενων σωματιδίων ως προς τον χρόνο και το υψόμετρο.



**ΣΧΗΜΑ 4.8.2:** (α) Οι κατακόρυφες κατανομές συντελεστών οπισθοσκέδασης αιωρούμενων σωματιδίων όπως προκύπτουν από το Raman-elastic lidar. (β) Η κατακόρυφη κατανομή του λόγου αποπόλωσης όπως προκύπτει από το lidar αποπόλωσης. Δεν είναι αξιόπιστα τα δεδομένα από τα 1500 m και άνω.

Η γύρη του πύκου έχει ένα λόγο διαστάσεων (aspect ratio) (με βάση τα δεδομένα του Υποκεφαλαίου 4.3)  $AR \sim 0.642$ , συμπεριλαμβανομένου και τους αερόσακκους. Με βάση τη βιβλιογραφία (Jones et al., 2000) αυτή η τιμή φαίνεται να αντιστοιχεί σε  $DR = 0.4 - 0.5$ , όπως και εκτιμάται να είναι γύρω στο  $0.41 - 0.42$  (Sicard et al., 2016). Αυτοί οι λόγοι αποπόλωσης αναφέρονται για έναν γυρέοκοκκο. Όταν υπάρχουν πολλά σωματίδια, τείνουν να μειώσουν το λόγο αποπόλωσης και γι'αυτό η κορυφή που είναι σχεδόν 10 % στην Εικόνα 4.8.2 β μπορεί να δηλώνει την παρουσία γυρέοκοκκων πύκου. Η παρουσία του στρώματος φαίνεται και στο τοπικό μέγιστο που απεικονίζεται στην Εικόνα 4.8.2 α, όπως ειπώθηκε και προηγουμένως.

Επιχειρήθηκε να προσδιοριστεί ο συντελεστής αποπόλωσης γνωστής συγκέντρωσης για όλα τα εξεταζόμενα βιοσωματίδια για το μήκος κύματος  $355 \text{ nm}$  με την in-situ πειραματική διάταξη, ωστόσο δεν βγήκαν σωστά αποτελέσματα, έτσι ώστε να συγκριθούν με το συντελεστή αποπόλωσης που εκτιμήθηκε με το σύστημα lidar. Να σημειωθεί, όμως, ότι για την αποπόλωση και την ελαστική σκέδαση συνιστάται η λειτουργία laser να είναι στο υπέρυθρο φάσμα της ακτινοβολίας (NATO, 2010), αφού η οργανική ύλη κατά κύριο λόγο απορροφά την υπεριώδη ακτινοβολία. Με βάση το τελευταίο δεδομένο, εκείνη τη μέρα δε μπορεί να ειπωθεί με σιγουρία ότι βρέθηκαν βιοσωματίδια πάνω από το παρατηρητήριο

καθώς φαίνεται να σκεδάζεται έντονα η 3<sup>η</sup> αρμονική σε σχέση με τα άλλα μήκη κύματος, ενώ θα ήταν αναμενόμενη η μείωση λόγω απορρόφησης.

Λόγω σχήματος, ο μύκητας *Penicillium* και η μιμόζα δεν πρέπει να αποπολώνουν την ακτινοβολία laser, ενώ η ελιά και οι μύκητες *Aspergillus* και *Cladosporium* αποπολώνουν ελαφρώς. Τα υπόλοιπα βιοσωματίδια της εργασίας αναμένεται να αποπολώνουν περισσότερο, ως μεμονωμένα σώματα.

#### 4.9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη μελέτη προκύπτουν τα εξής:

- Παρά το γεγονός ότι η υπεριώδης ακτινοβολία (και συγκεκριμένα η UV-C) μπορεί να προκαλέσει βλάβη στα κύτταρα (Stadler et al., 1936; Flint et al., 1983) ή και θάνατο (π.χ. για την αποστείρωση χειρουργικών εργαλείων –νέκρωση βακτηρίων και μυκήτων), τα φάσματα φθορισμού παρέμεναν αμετάβλητα.
- Οι φθορισμοί δεν ήταν πάντα εμφανείς ή μεγάλης έντασης, καθόσον η μάζα και κατ'επέκταση το πλήθος σωματιδίων, καθώς και η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας δεν επαρκούσαν για να παρατηρηθεί ικανοποιητικά το φαινόμενο αυτό.
- Απομένει να διερευνηθεί το αίτιο δημιουργίας κορυφών στο φάσμα φθορισμού του εγγύς υπέρυθρου.
- Είναι χρήσιμο να ελεγχθεί πώς (και εάν) μεταβάλλεται το φάσμα του φθορισμού με τη μεταβολή άλλων παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία και η πίεση.
- Είναι αναγκαία η εργαστηριακή μελέτη της αποπόλωσης των βιοσωματιδίων σε διάφορες συγκεντρώσεις. Στη συνέχεια μπορεί να κατασκευαστεί ένα σύστημα LiDAR αποπόλωσης που να λειτουργεί στο υπέρυθρο φάσμα της ακτινοβολίας, με την προϋπόθεση ότι δεν απορροφούν το μήκος κύματος αυτό. Γι'αυτό προτιμάται η μέση υπέρυθρη ακτινοβολία (NATO, 2010) όπως εκπέμπεται από το CO<sub>2</sub> laser.
- Για τα φάσματα φθορισμού που ελήφθησαν με διέγερση στα 355 nm δεν φαίνεται να αφαιρέθηκε αποτελεσματικά η επίδραση της κυβέτας σε όλες τις περιπτώσεις. Όπως αναφέρθηκε και στο Υποκεφάλαιο 4.3, η συνεχής διέγερση από την υπεριώδη ακτινοβολία δεν οδηγεί απαραίτητα σε ενισχυμένη ένταση φθορισμού, κάτι που βέβαια χρειάζεται περισσότερη διερεύνηση. Τα φάσματα (μετά τη σταθεροποίηση του δείγματος) μεταβάλλονταν λόγω μετακίνησης της φθορίζουσας ουσίας)

ομοιόμορφα και ενώ υπήρχε ένα κοινό αρχείο φάσματος νερού και κυβέτας δε φαίνεται να αποθηκευόταν ένα αντίστοιχο μέγιστο ή ελάχιστο φάσμα σε κάποια δείγματα. Το «φούσκωμα» είναι ξεκάθαρα λόγω της κυβέτας (επιβεβαιώθηκε και στο εργαστήριο).

- Τα δείγματα πρέπει να διατηρούνται σε κρύο περιβάλλον (8-10°C) προκειμένου να παραμένουν αδρανή κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και, επομένως, να μειώνεται ο χρόνος σταθεροποίησης. Το πρόβλημα είχε προκύψει κυρίως στη γύρη του πεύκου και λιγότερο στα άλλα και στον φθορισμό και στην ανάκτηση του φάσματος διαπερατότητας.
- Η χρήση φράγματος περίθλασης με μικρότερη διακριτική ικανότητα είναι υποχρεωτική για να προκύπτει ολόκληρο το φάσμα φθορισμού στο σύστημα Multi-Spectral LIF, LiDAR.
- Η χρήση πρισμάτων για να απομονωθεί η δέσμη διέγερσης βιοαερολυμάτων χρειάζεται για να μην προκαλούν οι άλλες σύγχυση στα τελικά φάσματα.
- Η δημιουργία μίας βάσης δεδομένων φασμάτων φθορισμού από γνωστά βιοαερολύματα είναι αναγκαία, καθώς με την αντίστροφη διαδικασία της συνέλιξης μπορεί να διαπιστωθεί κατά πόσο συνεισφέρει κάθε ουσία.
- Η παγίδα είναι χρήσιμη για τον προσδιορισμό συγκεντρώσεων των αερομεταφερόμενων βιοαερολυμάτων, ωστόσο μία ανάλογη συσκευή καταγραφής σε πραγματικό χρόνο τη συγκέντρωση και άμεσης αναγνώρισης των ειδών είναι αναγκαία για πιο αναλυτικά αποτελέσματα.
- Η τεχνική LIF LiDAR χρειάζεται περισσότερη διερεύνηση και ενασχόληση, καθώς είναι μία σχετικά καινούρια τεχνική και υποσχόμενη για τις μελλοντικές εφαρμογές της.
- Ο συνδυασμός της παγίδας, της τεχνικής LiDAR και του μοντέλου HYSPLIT μπορεί να επιφέρει μεγάλη διευκόλυνση στον προσδιορισμό του Ground Zero αγνώστου και επικίνδυνου αερομεταφερόμενου βιοσωματιδίου.





## ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Κλείνοντας την παρούσα εργασία, είναι αναγκαίο να παρουσιαστούν ορισμένες γενικές παρατηρήσεις και διαπιστώσεις που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της μελέτης αυτής.

Αρχικά, τα laser εξακολουθούν και θα παραμείνουν ως χρήσιμα και αναγκαία εργαλεία όχι μόνο για την επίτευξη επιστημονικών σκοπών, αλλά και για την καθημερινότητα των ανθρώπων και των άλλων έμβιων οργανισμών του πλανήτη. Η εφαρμογή τους στην ατμόσφαιρα, ως συστήματα LiDAR πλέον, τα καθιστά ακόμη πιο χρήσιμα διότι έτσι παρακολουθούνται ατμοσφαιρικές παράμετροι, αέριοι ρύποι και αερολύματα, συμπεριλαμβάνονται και τα βιοαερολύματα, και κατ'επέκταση παρακολουθούνται φαινόμενα που αποτελούν επίκαιρα ζητήματα, όπως είναι η κλιματική αλλαγή και υγεία των οργανισμών.

Μέσα από αυτήν την εργασία προέκυψε η ευκαιρία συνεργασίας με το Τμήμα Βιολογίας του ΕΚΠΑ. Μέσα από αυτή τη συνεργασία αποδείχτηκε ότι οι επιστήμες πρέπει να συνυπάρχουν και να μελετώνται αντικείμενα από διαφορετικές σκοπιές. Αυτό είναι σημαντικό, καθώς έτσι μπορούν να διεξαχθούν πιο ξεκάθαρα, ακριβή αποτελέσματα και συσφίγγουν οι σχέσεις της επιστημονικής κοινότητας.

Τέλος, ο δρόμος για τη διεξαγωγή αποτελεσμάτων είναι όμορφος, αλλά γίνεται ακόμη πιο όμορφος όταν φτάνει κανείς στο σημείο να εκτιμά αυτό που μελετά και να διεσθάνεται την ομορφιά αυτού και κατ'επέκταση της φύσης, ειδικά δεν έχει νόημα η εξερεύνηση αυτής.



# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

## ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

- [1] Ancellet, G., A. Papayannis, J. Pelon, G. Megie, “DIAL Tropospheric Ozone Measurement Using a Nd:YAG Laser and the Raman Shifting Technique”, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **6**, 832-839, 1989.
- [2] Ancellet, G., J. Pelon, M. Beekmann, A. Papayannis, G. Megie, “Ground-Based Lidar Studies of Ozone Exchanges Between the Stratosphere and the Troposphere”, *Journal of Geophysical Research*, **96**, 22401-22421, 1991.
- [3] Ancellet, G., M. Beekman, A. Papayannis, “Impact of a cutoff low development on downward transport of ozone in the troposphere”, *Journal of Geophysical Research*, **99**, 3451-3468, 1994.
- [4] Araujo, J. A., A. E. Nel, “Particulate matter and atherosclerosis: the role of particle size, composition and oxidative stress”, *Particle and Fibre Toxicology*, **6:24**, 1-19, 2009.
- [5] Baray, J.-L., et al., “Description and evaluation of a tropospheric ozone lidar implemented on an existing lidar in the southern subtropics”, *Applied Optics*, **38**, 6808-6817, 1999.
- [6] Baray, J.-L., et al., “An instrumental station for the survey of ozone and climate change in the southern tropics”, *J. Environ. Monit.*, **8**, 1020-1028, 2006.
- [7] Baray, J.-L., et al., “Maido observatory: a new high-altitude station facility at Reunion Island (21° S, 55° E) for long-term atmospheric remote sensing and in situ measurements”, *Atmos. Meas. Tech.*, **6**, 2865-2877, 2013.
- [8] Bedinger, P., “The Remarkable Biology of Pollen”, *The Plant Cell*, **4**, 879-887, 1992.
- [9] Browel, E. V., “Differential Absorption Lidar Sensing of Ozone”, *Proceedings of the IEEE*, **77**, 419-432, 1989.
- [10] Cahoon Jr., D. R., B. J. Stocks, J. S. Levine, W. R. Cofer, K. P. O’Neill, “Seasonal distribution of African savanna fires”, *Nature*, **359**, 812-815, 1992.
- [11] Clain, G., et al., “Tropospheric ozone climatology at two Southern Hemisphere tropical/subtropical sites, (Reunion Island and Irene, South Africa) from ozonesondes, LIDAR, and in situ aircraft measurements”, *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 1723-1734, 2009.

- [12] Clain, G., J.-L. Baray, R. Delmas, P. Keckhut, J.-P. Cammas, “A lagrangian approach to analyse the tropospheric ozone climatology in the tropics: Climatology of stratosphere-troposphere exchange at Reunion Island”, *Atmospheric Environment*, **44**, 968-975, 2010.
- [13] Crouzy, B., et al., “All-optical automatic pollen identification: towards an operational system”, *Atmospheric Environment*, **140**, 202-212, 2016.
- [14] Davies, T. D., E. Schuepbach, “Episodes of high ozone concentrations at the Earth’s surface resulting from transport down from the upper troposphere/ lower stratosphere: a review and case studies”, *Atmospheric Environment*, **28**, 53-68, 1994.
- [15] Despres, V. R., et al., “Primary biological aerosol particles in the atmosphere: a review”, *Tellus B*, **64**, 1-58, 2012.
- [16] Donaldson, K., V. Stone, P. S. Gilmour, D. M. Brown, W. Macnee, “Ultrafine particles: mechanisms of lung injury”, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, **358**, 2741-2749, 2000.
- [17] Dufлот, V., et al., “Tropospheric ozone profiles by DIAL at Maito Observatory (Reunion Island): system description, instrumental performance and result comparison with ozone external data set”, *Atmos. Meas. Tech.*, **10**, 3359-3373, 2017.
- [18] Flint, S. D., M. M. Caldwell, “Influence of floral optical properties on the ultraviolet radiation environment of pollen”, *Amer. J. Bot.*, **70**, 1416-1419, 1983.
- [19] Gaigalas, A. K., L. Wang, V. Karpiak, Y.-Z. Zhang, S. Choquette, “Measurement of Scattering Cross Section with a Spectrophotometer with an Integrating Sphere Detector”, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, **117**, 202-215, 2012.
- [20] Giannakaki, E., P. G. van Zyl, D. Muller, D. Balis, M. Komppula, “Optical and microphysical characterization of aerosol layers over South Africa by means of multi-wavelength depolarization and Raman lidar measurements”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **16**, 8109-8123, 2016.
- [21] Holton, J. R., P. H. Haynes, M. E. McIntyre, A. R. Douglass, R. B. Rood, L. Pfister, “Stratosphere-Troposphere Exchange”, *Reviews of Geophysics*, **33**, 403-439, 1995.
- [22] Jacob, D. J., “Heterogeneous chemistry and tropospheric ozone”, *Atmospheric Environment*, **34**, 2131-2159, 2000.
- [23] Jones, S. B., S. P. Friedman, “Particle shape effects on the effective permittivity of anisotropic or isotropic media consisting of aligned or randomly oriented ellipsoidal particles”, *Water Resources Research*, **36**, 2821-2833, 2000.

- [24] Klett, J. D., “Stable analytical inversion solution for processing lidar returns”, *Applied Optics*, **20**, 211-220, 1981.
- [25] Klett, J. D., “Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios”, *Applied Optics*, **24**, 1638-1643, 1985.
- [26] Krueger, A. J., R. A. Minzner, “A Mid-Latitude Ozone Model for the 1976 U. S. Standard Atmosphere”, *Journal of Geophysical Research*, **81**, 4477-4481, 1976.
- [27] Krupa, S. V., W. J. Manning, “Atmospheric Ozone: Formation and Effects on Vegetation”, *Environmental Pollution*, **50**, 101-137, 1988.
- [28] Lippmann, M., “Health effects of ozone: a critical review”, *Journal of the Air and Waste Management Association*, **39:5**, 672-695, 1989.
- [29] Logan, J. A., “Tropospheric Ozone: Seasonal Behaviour, Trends, and Anthropogenic Influence”, *Journal of Geophysical Research*, **90**, 10463-10482, 1985.
- [30] Molfino, N. A., et al., “Effect of low concentrations of ozone on inhaled allergen responses in asthmatic subjects”, *Lancet*, **338**, 199-203, 1991.
- [31] Molina, L. T., M. J. Molina, “Absolute Absorption Cross Sections of Ozone in the 185- to 355-nm Wavelength Range”, *Journal of Geophysical Research*, **91**, 14501-14508, 1986.
- [32] Mytilinaios, M., A. Papayannis, G. Tsaknakis, “Lower-Free Troposphere Ozone DIAL Measurements Over Athens, Greece”, *EPJ Web of Conferences, ILRC 2018*, **176**, 1-4, 2018.
- [33] Ndarana, T., D. W. Waugh, “The link between cut-off lows and Rossby wave breaking in the Southern Hemisphere”, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **136**, 869-885, 2010.
- [34] Nicolet, M., “On the Molecular Scattering in the Terrestrial Atmosphere: An Empirical Formula for its Calculation in the Homosphere”, *Planet. Space Sci.*, **32**, 1467-1468, 1984.
- [35] O’Connor, D. J., D. Iacopino, D. A. Healy, D. O’Sullivan, J. R. Sodeau, “The intrinsic fluorescence spectra of selected pollen and fungal spores”, *Atmospheric Environment*, **45**, 6451-6458, 2011.
- [36] Pan, Y.-L., “Detection and characterization of biological and other organic-carbon aerosol particles in atmosphere using fluorescence”, *Journal of Quant. Spectr. & Rad. Transfer*, **150**, 12-35, 2015.
- [37] Papayannis, A., G. Ancellet, J. Pelon, G. Megie, “Multiwavelength lidar for ozone measurements in the troposphere and the lower stratosphere”, *Applied Optics*, **29**, 467-476, 1990.

- [38] Papayannis, A., et al., “Sampling of an SST event over the Eastern Mediterranean region by lidar and electrochemical sonde”, *Annales Geophysicae*, **23**, 2039-2050, 2005.
- [39] Prank, M., et al., “An operational model for forecasting ragweed pollen release and dispersion in Europe”, *Agricultural and Forest Meteorology*, **182-183**, 43-53, 2013.
- [40] Prospero, J. M., E. Blades, G. Mathison, R. Naidu, “Interhemispheric transport of viable fungi and bacteria from Africa to the Caribbean with soil dust”, *Aerobiologia*, **21**, 1-19, 2005.
- [41] Rao, Z., D. Hua, T. He, Q. Wang, J. Le, “Ultraviolet Laser-Induced Fluorescence Lidar for Pollen Detection”, *Optik*, **136**, 497-502, 2017.
- [42] Reichardt, J., R. Leinweber, A. Schwebe, “Fluorescing aerosols and clouds: investigations of co-existence”, *EPJ Web of Conferences, ILRC 28*, **176**, 1-4, 2018.
- [43] Shan, W., Y. Yin, H. Lu, S. Liang, “A meteorological analysis of ozone episodes using HYSPLIT model and surface data”, *Atmospheric Research*, **93**, 767-776, 2009.
- [44] Sicard, M., R. Izquierdo, M. Alarcon, J. Belmonte, A. Comeron, J. M. Baldasano, “Near-surface and columnar measurements with a micro pulse of lidar of atmospheric pollen in Barcelona, Spain”, *Atmos. Chem. Phys.*, **16**, 6805-6821, 2016.
- [45] Southworth, D., “Ultraviolet Absorption Spectra of Pollen and Spore Walls”, *Grana Palynologica*, **9:1-3**, 5-15, 1969.
- [46] Stadler, L. J., G. F. Sprague, “Genetic effects of ultra-violet radiation in maize. I. Unfiltered radiation”, *Proc. N. A. S.*, **22**, 572-578, 1936.
- [47] Stadler, L. J., G. F. Sprague, “Genetic effects of ultra-violet radiation in maize. II. Filtered radiation”, *Proc. N. A. S.*, **22**, 579-583, 1936.
- [48] Stadler, L. J., G. F. Sprague, “Genetic effects of ultra-violet radiation in maize. III. Effects of nearly monochromatic  $\lambda$  2537, and comparison of effects of x-ray and ultra-violet treatment”, *Proc. N. A. S.*, **22**, 584-591, 1936.
- [49] Tzortzakis, S., G. Tsaknakis, A. Papayannis, A. A. Serafetinides, “Investigation of the spatial profile of stimulated Raman scattering beams in  $D_2$  and  $H_2$  gases using a pulsed Nd:YAG laser at 266 nm”, *Appl. Phys. B*, **79**, 71-75, 2004.
- [50] Wang, W.-C., X.-Z. Liang, M. P. Dudek, D. Pollard, S. L. Thompson, “Atmospheric ozone as a climate gas”, *Atmospheric Research*, **37**, 247-256, 1994.
- [51] Weibring, P., T. Johanson, H. Edner, S. Svanberg, B. Sundner, V. Raimondi, G. Cecchi, L. Pantani, “Fluorescence lidar imaging of historical monuments”, *Applied Physics*, **40**, 6111-6120, 2001.

- [52] Zimmermann, J., A. Zeug, B. Roder, “A generalization of the Jablonski diagram to account for polarization and anisotropy effects in time-resolved experiments”, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **5**, 2964-2969, 2003.

## ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΕΣ ΔΙΑΤΡΙΒΕΣ ΚΑΙ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

- [1] Papagiannis, A., “*Etude experimentale de la distribution verticale de l’ozone dans la troposphere par teledetection laser: application aux echanges stratosphere-troposphere et a la physicochimie de la couche limite atmospherique*”, Doctoral Thesis, L’Universite Paris VII, Paris, 1989.
- [2] Ευαγγελάτος, Χ. Η., «*Συντήρηση διαβρωμένων νομισμάτων μέσω καθαρισμού με ακτινοβολία laser*», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2013.
- [3] Μυτιληναίος, Μ., «*Μέτρηση της κατακόρυφης κατανομής του όζοντος στην κατώτερη τροπόσφαιρα με χρήση τεχνικής τηλεπισκόπησης laser (τεχνική lidar)*», Διπλωματική Εργασία, Ε.Κ.Π.Α., Αθήνα, 2017.
- [4] Πυρρή, Ι., «*Ταξινομική και οικολογική μελέτη αερομεταφερόμενων μυκήτων στην περιοχή Αθηνών*», Διδακτορική Διατριβή, Ε.Κ.Π.Α., Αθήνα, 2008.
- [5] Χριστοφάκη, Μ., «*Καταγραφή και μελέτη ρυπαντών σε υγρά δείγματα με τη μέθοδο της φασματοσκοπίας του επαγόμενου φθορισμού με laser*», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2011.

## ΙΣΤΟΤΟΠΟΙ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ

- [1] Διεθνής οργανισμός για τη μελέτη και εκτίμηση της κλιματικής αλλαγής. <http://www.ipcc.ch/>
- [2] Το πανεπιστήμιο της Wyoming παρέχει ισούψείς χάρτες για δεδομένη πίεση. <http://weather.uwyo.edu>
- [3] Παρέχονται δορυφορικές εικόνες με τις εστίες φωτιάς. <http://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>
- [4] Παρέχονται οι αεροτροχιές από το μοντέλο HYSPLIT. <https://ready.arl.noaa.gov>
- [5] Περιγραφή του συστήματος OMI. <https://aura.gsfc.nasa.gov>
- [6] Περιγραφή του συστήματος GOME-2. <https://www.eumetsat.int>
- [7] Παρέχονται οι χάρτες όζοντος του GOME-2 και OMI. <http://www.temis.nl>
- [8] Διεθνής Μετεωρολογική Υπηρεσία. <https://www.wmo.int>

- [9] Η εταιρεία οπτικών Ocean Optics. <https://oceanoptics.com/>
- [10] Συλλογή δεδομένων από ραδιοβολίσεις που πραγματοποιήθηκαν και συνεχίζουν στον Τροπικό και στο Ν. Ημισφαίριο. <https://tropo.gsfc.nasa.gov>
- [11] Το προγνωστικό μοντέλο γύρης της Φινλανδίας. <http://silam.fmi.fi/>
- [12] Το προγνωστικό μοντέλο ΣΚΙΡΩΝ του Εθνικού Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών (Ε.Κ.Π.Α.), το οποίο παρέχει χάρτες μετεωρολογικών παραμέτρων και συγκέντρωση σκόνης στην ατμόσφαιρα (και πολλά άλλα). <http://forecast.uoa.gr>
- [13] Οι καιρικές προβλέψεις της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (Ε.Μ.Υ). <http://www.hnms.gr>
- [14] Οι καιρικές προβλέψεις της φινλανδικής εταιρείας Foreca. <https://www.foreca.com>
- [15] Η εταιρεία οπτικών Semrock. <https://www.semrock.com>
- [16] Η εταιρεία της Licel GmbH. <http://licel.com/>
- [17] Η εταιρεία της Raymetrics S.A.. <http://www.raymetrics.com/>
- [18] Η Μονάδα Τηλεπισκόπησης Laser του ΕΜΠ. <http://lrsu.physics.ntua.gr/en>

#### ΣΥΓΓΡΑΜΜΑΤΑ – ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΑ - ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Alexopoulos, C. J., C. W. Mims, M. Blackwell, “*Introductory Mycology*”, 4<sup>th</sup> Edition, John Wiley & Sons, London, UK, 1996.
- [2] Atkins, P. W., «*Μοριακή Κβαντική Μηχανική*», Εκδόσεις Παπαζήση, Αθήνα, 1999.
- [3] Fujii, T., T. Fukuchi, “*Laser Remote Sensing*”, CRC Press, Taylor and Francis Group, 2005.
- [4] Hill, S. C., M. W. Mayo, R. K. Chang, “*Fluorescence of Bacteria, Pollens, and Naturally Occuring Airborne Particles: Excitation/Emission Spectra*”, Army Research Laboratory, 2009.
- [5] Hughes, W. W., “*Essentials of Environmental Toxicology: The Effects of Environmentally Hazardous Substances on Human Health*”, Taylor & Francis, Levittown, 1996.
- [6] Lutgens, F. K., E. J. Tarbuck, “*The Atmosphere: An Introduction to Meteorology*”, 10<sup>th</sup> Edition, Pearson/Prentice Hall, New Jersey, USA, 2010.
- [7] Manual, “*Installation and Operation Manual SpectraSuite Spectrometer Operating Software*”, Ocean Optics, 2009.
- [8] Manual “*Licel PM-HV Photomultiplier Module R7400*”, Licel, 2011.
- [9] Manual “*Operating Manual Axio Imager*”, Zeiss, 2005.

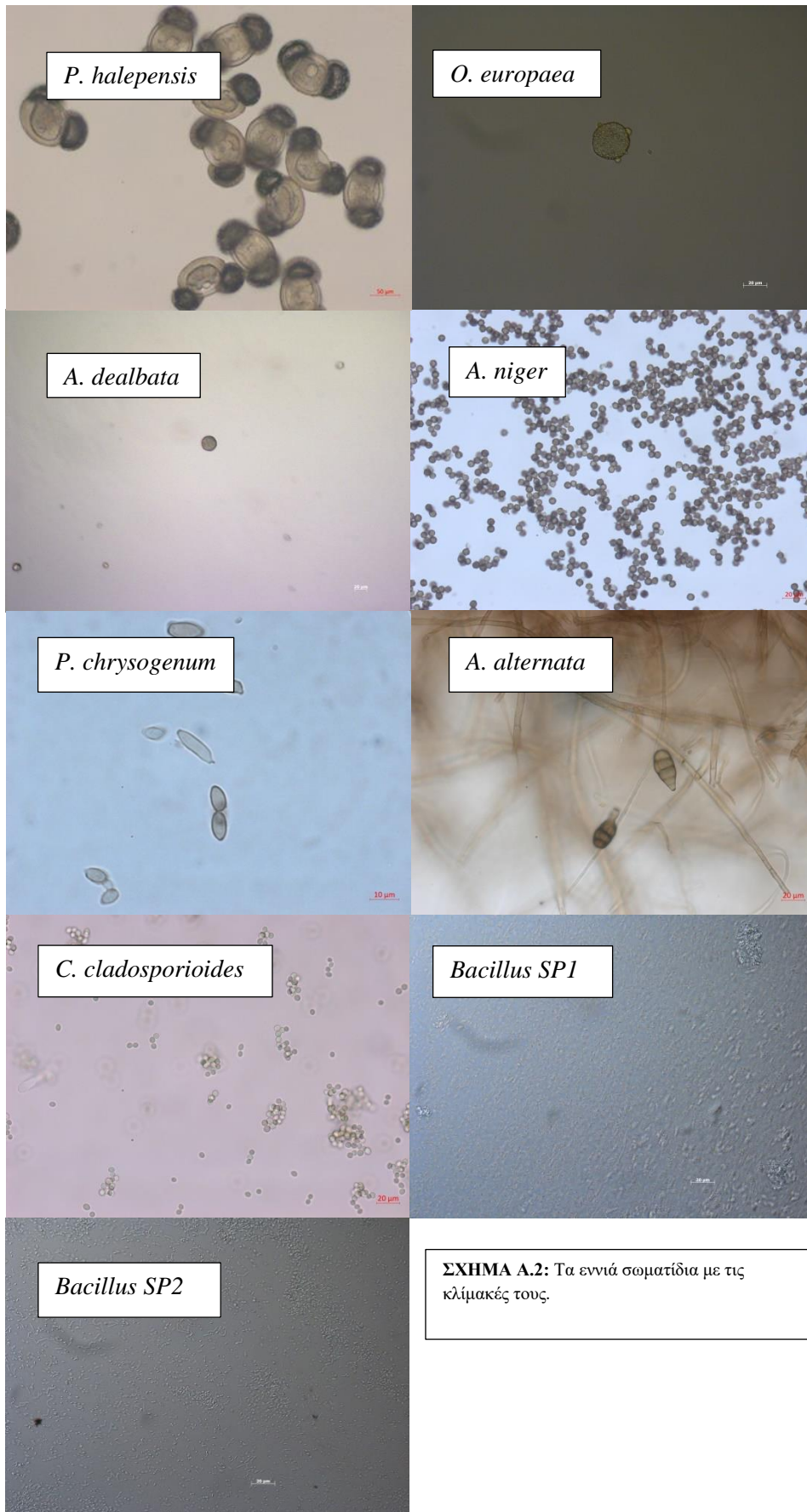


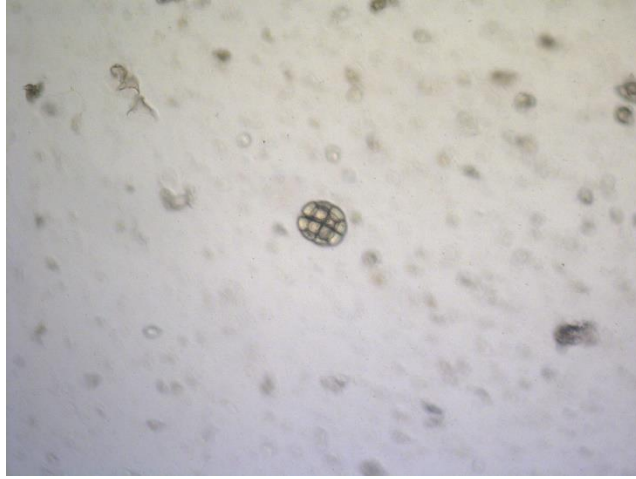
- [10] Manual, “*User’s Manual 1100 Series Spectrophotometer*”, Cole Parmer Instruments Company.
- [11] NATO, “*Laser Based Stand-Off Detection of Biological Agents*”, Final Report of Task Group, 2010.
- [12] Raven, P., R. F. Evert, S. E. Eichhorn, «*Βιολογία των Φυτών*», 8<sup>η</sup> Αμερικάνικη-1<sup>η</sup> Ελληνική Έκδοση, Utopia Εκδόσεις ΕΠΕ, 2014.
- [13] Salby, M. L., “*Physics of the Atmosphere and Climate*”, Cambridge University Press, New York, USA, 2012.
- [14] Seinfeld, J., S. Pandis, “*Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Global Change*”, 2<sup>nd</sup> Edition, J. Wiley & Sons, Inc., New York, 2006.
- [15] Siegman, A., “*Lasers*”, University Science Books, 1986.
- [16] Stull, R., “*An Introduction to Boundary Layer Meteorology*”, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holland, 1980.
- [17] Technical Information “*Photon Counting Using PMTs*”, Hamamatsu, 2001.
- [18] “*U. S. Standard Atmosphere 1976*”, NOAA, NASA, USAF, U. S. Govt. Printing Office, Washington, DC, 1976.
- [19] Weitkamp, C., “*Lidar Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*”, Springer, 2005.
- [20] Κατάκης, Δ., Κ. Μεθενίτης, Χ. Μητσοπούλου, Γ. Πνευματικάκης, «*Ανόργανη Χημεία Β’ Τα Στοιχεία*», Εκδόσεις Παπαζήση, Αθήνα, Ελλάδα, 2002.
- [21] Λαζαρίδης, Μ., «*Ατμοσφαιρική Ρύπανση με Στοιχεία Μετεωρολογίας*», 2<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα, 2010.
- [22] Λαζαρίδης, Μ. Ν., «*Βασικές Αρχές της Επιστήμης των Αεροζόλ*», Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα, 2015.
- [23] Μακρογιάννης, Τ. Ι., Χ. Σ. Σαχσαμάνογλου, «*Μαθήματα Γενικής Μετεωρολογίας*», ΧΑΡΙΣ Εκδόσεις ΕΠΕ, Αθήνα, Ελλάδα, 2014.
- [24] Μακροπούλου, Μ., Α. Παπαγιάννης, «*Εφαρμογές Lasers στη Βιοϊατρική και το Περιβάλλον*», Ε.Μ.Π., Αθήνα, Ελλάδα, 2014.
- [25] Μαργαρίτης, Λ. Χ., Β. Κ. Γαλανόπουλος, Κ. Ε. Κεραμάρης, Ε. Σ. Μαρίνος, Ι. Σ. Παπασιδέρη, Δ. Ι. Στραβοπόδης, Ι. Π. Τρουγκάκος, «*Βιολογία Κυττάρου*», 4<sup>η</sup> Έκδοση, Ιατρικές Εκδόσεις Λίτσας, Ελλάδα, 2008.
- [26] Παπαγιάννης, Α. Δ., «*Φυσική Περιβάλλοντος*», Ε.Μ.Π., Αθήνα, Ελλάδα, 2014.
- [27] Σεραφετινίδης, Α. Α., «*Εισαγωγή στην Οπτοηλεκτρονική*», Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, Ελλάδα, 1989.

- [28] Χαλδούπης, Χ., «Εισαγωγή στην Ατμοσφαιρική Φυσική», Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα, HEALLINK, 2015.
- [29] Χριστοδουλίδης, Κ., «Ανάλυση και Παρουσίαση Πειραματικών Αποτελεσμάτων», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, Ελλάδα, 2009.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

## ΕΠΠΡΟΣΘΕΤΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ





**ΣΧΗΜΑ Α.2:** Το συσσωμάτωμα της γύρης της μμύζας.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

### ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΒΙΟΑΕΡΟΛΥΜΑΤΩΝ

#### *ΓΥΡΕΟΚΟΚΚΟΙ -m<sup>-3</sup>*

	PINUS	OLEA	OAK	CUPRESSUS	POPULUS	PARIETARIA	ΑΓΝΩΣΤΟ
25/04/2018	9	117	27	119	19	30	31
26/04/2018	7	90	20	250	12	13	83
02/05/2018	59	20	2	2	2	50	7
03/05/2018	12	34	4	3	8	0	17
04/05/2018	3	35	6	6	3	0	21
14/05/2018	11	27	3	15	3	3	7
15/05/2018	32	10	2	26	0	8	8
16/05/2018	23	28	8	11	1	7	6
17/05/2018	9	11	1	2	0	9	3
18/05/2018	2	5	3	4	1	8	3
21/05/2018	6	12	3	3	0	10	4
22/05/2018	5	10	3	3	0	5	8

#### *ΣΚΟΝΗ -m<sup>-3</sup>*

	25/04	26/04	02/05	03/05	04/05	14/05	15/05	16/05	17/05	18/05	21/05	22/05
DUST	0	0	0	122	5	0	19	76	16	28	16	0

**ΣΠΟΡΙΑ ΜΥΚΗΤΩΝ  $-m^{-3}$  (ΜΕΡΟΣ 1<sup>ο</sup>)**

	Alternaria	Arthrinium	Asp.-Pen.	Cladosporium	Coprinus	Drechslera	Epicoccum	Ganoderma	Pithomyces
25/04/2018	14	4	43	182	13	2	1	1	0
26/04/2018	14	3	55	199	17	0	0	10	0
02/05/2018	202	0	128	465	1	2	2	0	0
03/05/2018	63	1	53	929	18	2	0	1	1
04/05/2018	67	10	46	641	16	1	3	5	0
14/05/2018	31	9	164	1501	122	1	0	3	0
15/05/2018	52	2	210	1579	29	0	0	1	0
16/05/2018	66	12	230	1509	55	5	1	4	0
17/05/2018	42	29	92	1521	58	3	1	4	0
18/05/2018	19	13	50	453	10	1	2	1	0
21/05/2018	132	27	99	2461	65	5	4	5	0
22/05/2018	124	21	115	2620	61	1	6	8	1

**ΣΠΟΡΙΑ ΜΥΚΗΤΩΝ  $-m^{-3}$  (ΜΕΡΟΣ 2<sup>ο</sup>)**

	Polythrincius	Stemphylium	Stachybotrys	Torula	Ascomycetes	Basidiomycetes	Erysiphales	Smuts	Hyphae
25/04/2018	3	1	0	11	6	6	1	105	17
26/04/2018	1	1	1	6	13	6	5	148	21
02/05/2018	0	2	0	3	105	50	52	35	20
03/05/2018	1	10	0	5	27	0	8	230	53
04/05/2018	0	11	0	8	19	5	4	197	50
14/05/2018	1	11	0	6	91	13	3	91	20
15/05/2018	0	3	0	0	24	31	12	40	102
16/05/2018	1	13	0	1	18	22	1	126	43
17/05/2018	0	2	4	3	17	20	3	47	38
18/05/2018	0	1	0	1	16	17	1	59	21
21/05/2018	0	9	3	1	47	26	5	244	79
22/05/2018	0	7	0	4	71	26	10	155	74

**ΣΠΟΡΙΑ ΜΥΚΗΤΩΝ  $-m^{-3}$  (ΜΕΡΟΣ 3<sup>ο</sup>)**

	25/04	26/04	02/05	03/05	04/05	14/05	15/05	16/05	17/05	18/05	21/05	22/05
ΑΓΝΩΣΤΟ	43	24	8	7	11	86	65	36	28	10	54	44



