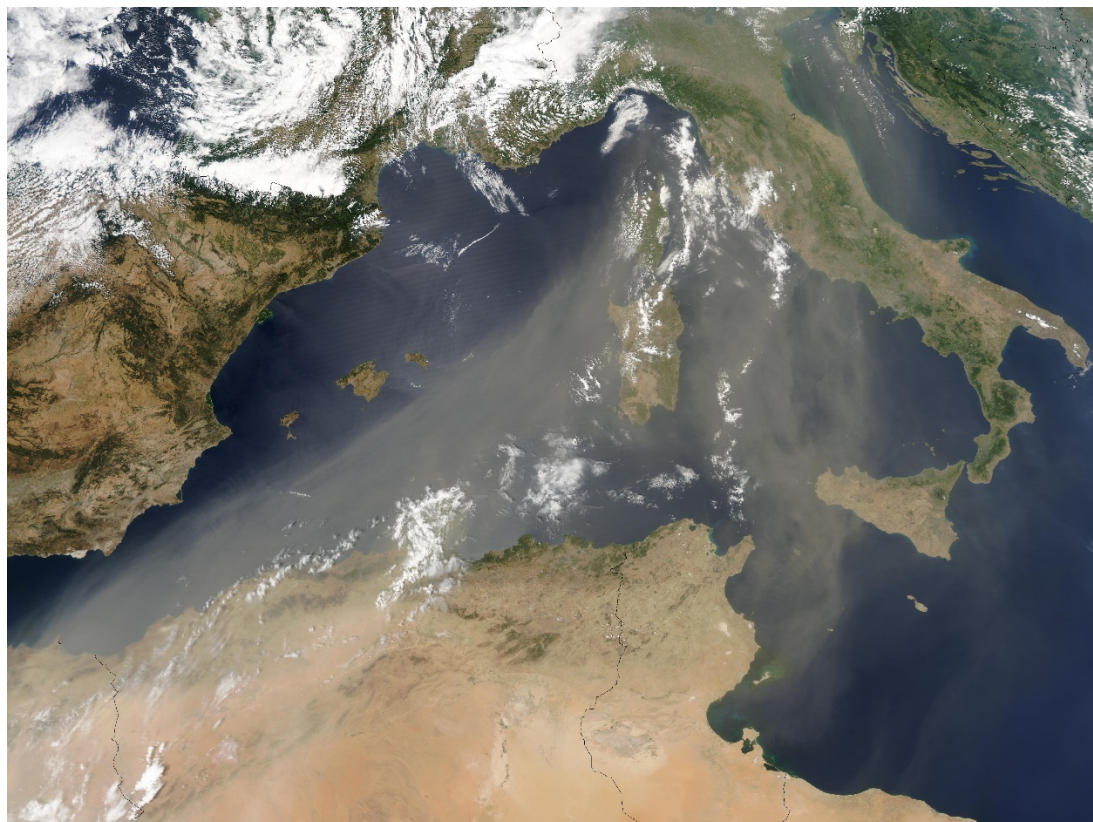


Ανάκτηση οπτικών ιδιοτήτων αερολυμάτων ερημικής σκόνης
στην περιοχή της Καρλσρούης της Γερμανίας
με χρήση vertical Raman Depolarization Lidar της Raymetrics S.A.

Το επεισόδιο της 24^{ης} – 27^{ης} Ιουνίου 2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

Διπλωματική Εργασία
της

Αφροδίτης Αργυρής Γιακουμάκη

Επιβλέπων: Αλέξανδρος Παπαγιάννης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2021

Εικόνα εξωφύλλου: “Saharan Dust over the Mediterranean Sea” (Photo Credit: Jeff Schmaltz, MODIS Rapid Response Team, NASA/GSFC, 2003 - <https://visibleearth.nasa.gov/images/67401/saharan-dust-over-the-mediterranean-sea> - accessed: 05/07/2021)

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

Ανάκτηση οπτικών ιδιοτήτων αερολυμάτων ερημικής σκόνης
στην περιοχή της Καρλσρούης της Γερμανίας
με χρήση vertical Raman Depolarization Lidar της Raymetrics S.A.

Διπλωματική Εργασία
Της
Αφροδίτης – Αργυρής Γιακουμάκη

Επιβλέπων: Αλέξανδρος Παπαγιάννης, Καθηγητής ΕΜΠ

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Α. Παπαγιάννης
Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

Μ. Μακροπούλου
Καθηγήτρια
Ε.Μ.Π.

Π. Κόκκαλης
Επ. Καθηγητής
Kuwait University

Αθήνα, Ιούλιος 2021

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρουσία των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα και ο ρόλος τους στην κλιματική αλλαγή και την ανθρώπινη υγεία καθιστά αναγκαία την καθημερινή παρακολούθηση των ατμοσφαιρικών αερολυματικών περιεχομένων. Αυτή η ανάγκη καλύπτεται με την ανάπτυξη μιας σύγχρονης τεχνολογίας (και ενός νέου ερευνητικού κλάδου) που ονομάζεται *τηλεπισκόπηση της ατμόσφαιρας* με χρήση διάταξης LIDAR (**L**ight **D**etection **A**nd **R**anging). Μία τέτοια διάταξη είναι σε θέση να «χαρτογραφήσει» την κατακόρυφη κατανομή ορατών και μη στρωματώσεων που διαμορφώνονται στην ατμόσφαιρα και κατ' επέκτασιν παρέχει πληροφορίες για τις οπτικές ιδιότητες και την ταυτότητα των αερολυμάτων σε πραγματικό χρόνο. Είναι αξιοσημείωτο ότι οι προσπάθειες για την πραγματοποίηση ατμοσφαιρικής μελέτης με τηλεπισκόπηση είχαν ήδη ξεκινήσει από τη δεκαετία του 1930 πριν καν ακόμη εφευρεθεί το πρώτο “Q-switched” παλμικό laser, πράγμα που επιτεύχθηκε το 1962, ενώ η πρώτη επίσημη αναφορά για τα lidar δημοσιεύθηκε το 1976 από τον E.D. Hinkley (Weitkamp, 2005, p. 22).

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη του τροποσφαιρικού αέρα της Καρλσρούης της Γερμανίας και η ανίχνευση αερολυμάτων (aerosols) που προέρχονται από μεταφορά ερημικής σκόνης (mineral dust). Για τη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από κατακόρυφο σύστημα “Raman Depolarization Lidar” (model LR111–ESS–D300) της εταιρείας «Raymetrics S.A.», τα οποία χορηγήθηκαν με την ευγενική συνεργασία του Dr. Frank Wagner, επιστήμονα και ερευνητή που, μεταξύ άλλων ερευνητικών αντικειμένων, επιβλέπει και χειρίζεται το σύστημα στο χώρο του Τεχνολογικού Ινστιτούτου της Καρλσρούης (Karlsruher Institut für Technologie – KIT) στη Γερμανία.

Η ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

- Στο **κεφάλαιο 1** παρουσιάζονται εισαγωγικά στοιχεία για τη δομή της ατμόσφαιρας και για τα κυρίαρχα είδη των αερολυμάτων που ενδιαφέρουν τις τροποσφαιρικές μελέτες. Η παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών τους εστιάζει στις πηγές τους, τη χημική τους σύσταση, καθώς και τους μηχανισμούς σχηματισμού και απομάκρυνσής τους από την ατμόσφαιρα.
- Στο **κεφάλαιο 2** περιγράφονται δύο στενά συσχετιζόμενα θέματα: η θεωρία της σκέδασης ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα και οι οπτικές ιδιότητες των αερολυμάτων, όπως προκύπτουν από τη συνδυαστική χρήση δύο βασικών τεχνικών Lidar: αντιστροφή σήματος κατά Klett και κατά Raman.
- Στο **κεφάλαιο 3** διαγράφεται αναλυτικά η δομή και η λειτουργία μιας τυπικής διάταξης lidar και, συγκεκριμένα, του μοντέλου “LR111–ESS–D300” που χρησιμοποιήθηκε για την εργασία.
- Το **κεφάλαιο 4** αφιερώνεται στην παρουσίαση της μεθόδου που υιοθετήθηκε για την επεξεργασία των δεδομένων lidar και των αποτελεσμάτων που συλλέχθηκαν για την περίοδο 24-27 Ιουνίου 2019 (case study).
- Στο τέλος συνοψίζονται η μέθοδος επεξεργασίας καθώς και τα ευρήματα της παρούσας μελέτης.

INTRODUCTION

The presence of particulate matter in the atmosphere and their role in climate change and human health necessitate daily monitoring of atmospheric aerosol contents. This need is being met by the development of state-of-the-art technology (and a new field of research) called *remote sensing of the atmosphere* using a device called the LIDAR (**L**ight **D**etection **A**nd **R**anging). Such a device is able to "map" the vertical distribution of visible and non-visible aerosol layers forming in the atmosphere and thus provides information on the optical properties and identity of aerosols, in real time. It is noteworthy that efforts to conduct atmospheric study by remote sensing had already begun in the 1930s before the first "Q-switched" pulse laser was even invented, which was achieved in 1962, while the first official report on the lidar was published in 1976 by ED Hinkley (Weitkamp, 2005, p. 22).

The object of the present work is the study of the tropospheric air over the city of Karlsruhe in Germany and the detection of aerosols resulting from the transport of mineral dust from the Saharan desert. Data from the vertical system "Raman Depolarization Lidar" (model LR111 – ESS – D300) of the company "Raymetrics S.A." were used for the study, which were kindly provided by Dr. Frank Wagner, a scientist and researcher who, at the time and among other research subjects, supervised and operated the system at the Karlsruher Institut für Technologie (KIT) in Germany.

THIS WORK'S STRUCTURE

- **Chapter 1** presents introductory information on the structure of the atmosphere and the predominant types of aerosols that spark the interest of tropospheric studies. The presentation focuses on their sources, their chemical composition, and the mechanisms of their formation and removal from the atmosphere.
- **Chapter 2** describes two closely related topics: the theory of elastic and inelastic radiation scattering and the optical properties of aerosols, as derived from the combined use of two basic Lidar techniques: Klett and Raman signal inversion.
- **Chapter 3** describes in detail the structure and operation of a standard lidar device and, specifically, the "LR111 – ESS – D300" model.
- **Chapter 4** is devoted to the presentation of the adopted method for the processing of the raw lidar data and the results collected for the mineral dust episode on the 24th – 27th June 2019 (case study).
- At the end there is a summary of the methodology as well as the findings of the present study.

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ – ABBREVIATIONS

ADC	Analog to Digital Converter
AN	Analogue mode
APD	Avalanche Photodiode
CCN	Cloud Condensation Nuclei
DWD	Deutscher Wetterdienst
EARLINET	European Aerosol Research Lidar Network
FoV	Field of View
IFF	Interference Filter
IN	Ice Nuclei
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
LIDAR	Light Detection And Ranging
NDF	Neutral Density filter
OD	Optical Density
PBL	Planetary Boundary Layer
PC	Photon Counting mode
PMT	Photomultiplier Tube
PRF	Pulse Repetition Frequency
PSCs	Polar Stratospheric Clouds
RCS	Range Corrected Signal
SCC	Single Calculus Chain
SR	Sampling Rate
TR	Transient recorder
WSU	Wavelength Separation Unit
ΑΣ	Αιωρούμενα σωματίδια
λ	Μήκος Κύματος
ΜΔΑ	Μονάδα Διαχωρισμού Ακτινοβολίας
ΧΔΙ	Χωρική Διακριτική Ικανότητα
ΧΡΔΙ	Χρονική Διακριτική Ικανότητα

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

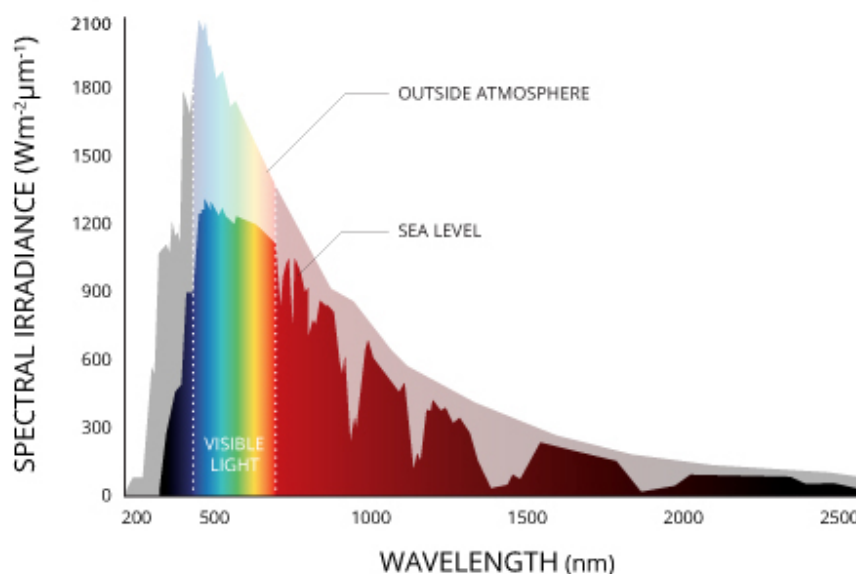
1	ΤΑ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ	1
1.1	Δομή και σύσταση της ατμόσφαιρας	1
1.2	Εισαγωγή στα αερολύματα.....	6
1.2.1	Κατηγοριοποίηση αερολυμάτων.....	7
1.2.2	Σχηματισμός.....	10
1.2.3	Απομάκρυνση από την ατμόσφαιρα	11
2	ΣΚΕΔΑΣΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ, ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΙΚΕΣ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ & ΒΑΣΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ LIDAR.....	13
2.1	Η σκέδαση της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα	13
2.1.1	Ελαστικές Σκεδάσεις Rayleigh & Mie.....	15
2.1.2	Σκέδαση Raman	17
2.1.3	Διάδοση της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα.....	22
2.2	Οπτικές Ιδιότητες Αερολυμάτων	23
2.2.1	Συντελεστές Οπισθοσκέδασης και Εξασθένησης (Backscatter & Extinction coefficients)	23
2.2.2	Λόγος Lidar (Lidar ratio).....	24
2.2.3	Συντελεστής Αποπόλωσης δ (Depolarization ratio)	24
2.2.4	Εκθέτης Ångström (Ångström exponent)	25
2.3	Τεχνικές lidar	26
2.3.1	Αρχές λειτουργίας και είδη συστημάτων lidar	26
2.3.2	Η ελαστική εξίσωση Lidar	27
2.3.3	Μέθοδος αντιστροφής σήματος Lidar κατά Klett	33
2.3.4	Μέθοδος αντιστροφής σήματος Lidar κατά Raman.....	33
2.3.5	Τεχνική Αποπόλωσης (Depolarization Technique).....	34
3	ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΝΟΣ LIDAR	37
3.1	Θεμελιώδη Στοιχεία της Διάταξης LR111-ESS-D300.....	37
3.1.1	Πηγή Laser (Laser Source).....	38
3.1.2	Διευρυντής Δέσμης (Beam Expander)	38
3.1.3	Τηλεσκόπιο (Telescope).....	40
3.1.4	Μονάδα Διαχωρισμού Ακτινοβολίας (Wavelength Separation Unit -WSU).....	42
3.1.5	Φωτοανιχνευτές (Photodetectors).....	43
3.1.6	Σύστημα ψηφιοποίησης και καταγραφής σήματος (Data Acquisition System)	49
3.2	Βελτιστοποίηση του σήματος lidar	52

3.3	Μορφή ενός αρχείου lidar	53
4	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ	56
4.1	Διαδικασία ανίχνευσης υποθέσεων	56
4.1.1	BSC (Barcelona Supercomputing Center) Dust Daily Forecast	56
4.1.2	HYSPLIT Backwards Trajectory Model & MODIS Satellite	58
4.2	Single Calculus Chain	59
4.3	Απεικόνιση κατακόρυφων κατανομών των οπτικών ιδιοτήτων	62
4.4	CASE STUDY: 24 - 27 Ιουνίου 2019.....	63
4.4.1	Παρακολούθηση του επεισοδίου μέσα από γραφήματα.....	70
4.4.2	24 June 20:00 UTC – 25 June 00:16 UTC.....	70
4.4.3	25 June 20:00 UTC – 26 June 01:00 UTC.....	72
4.4.4	26 June 20:00 UTC – 27 June 01:00 UTC.....	73
5	ΣΥΝΟΨΗ.....	75
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ & ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	77
7	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	79
7.1	ΚΑΤΆΛΟΓΟΣ ΕΙΚΌΝΩΝ.....	79
7.2	ΚΑΤΆΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΆΤΩΝ.....	81
7.3	ΚΑΤΆΛΟΓΟΣ ΠΙΝΆΚΩΝ.....	82

1 ΤΑ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

1.1 Δομή και σύσταση της ατμόσφαιρας

Το σύνολο της αέριας μάζας γύρω από τη Γη καλείται ατμόσφαιρα και είναι οργανωμένο σε επίπεδα ή στρώματα, καθένα από τα οποία χαρακτηρίζεται από διαφορετικές ιδιότητες, όλα όμως συντελούν στην εκπλήρωση του θεμελιώδους στόχου της ατμόσφαιρας που δεν είναι άλλος από τη διατήρηση της ζωής στον πλανήτη. Η ατμόσφαιρα δηλαδή δρα σαν ασπίδα υπέρ της φύσης έναντι στην επικίνδυνη αλλά αναγκαία ακτινοβολία του ηλίου –καθώς οι ακτίνες Χ και το κατώτερο τμήμα της υπεριώδους ακτινοβολίας απορροφώνται πριν φτάσουν στη επιφάνεια της Γης–, ενώ παράλληλα η χημική της σύνθεση επιτρέπει την αναπνοή στους οργανισμούς.



Εικόνα 1—1. Σύγκριση της κατανομής της έντασης ακτινοβολίας που εκπέμπει ο Ήλιος σε σχέση με την ένταση της ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης¹. Τα “κενά” που παρουσιάζονται στο φάσμα που φτάνει στη επιφάνεια της Γης οφείλονται στην έντονη απορρόφηση συγκεκριμένων μηκών κύματος από μόρια της ατμόσφαιρας (O₃, CO₂, H₂O κ.ά.).

Ο ατμοσφαιρικός αέρας αποτελείται από δύο γενικές κατηγορίες σκεδαστών, την ξηρή ατμόσφαιρα, δηλαδή μόρια και αιωρούμενα σωματίδια (ΑΣ), και τους υδρατμούς. Η συνδυαστική δράση της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία θερμαίνει και ανυψώνει τις αέριες μάζες, και της παράλληλης κίνησης της ατμόσφαιρας με την περιστροφή της Γης τροφοδοτεί τον λεγόμενο κύκλο του νερού (εξάτμιση υδάτων, ανύψωση και συμπύκνωση υδρατμών, βροχόπτωση), ο οποίος είναι απαραίτητος για την ανανέωση της σύνθεσής της. Οι μηχανισμοί κίνησης των αερίων στην ατμόσφαιρα, ειδικότερα στο κατώτερο στρώμα της (την τροπόσφαιρα), ευθύνονται για τη διασπορά και την απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων ενώ, γενικά, η μοριακή σύνθεση της ξηρής ατμόσφαιρας θεωρείται σταθερή.

¹ <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/weather/photosynthetically-active-radiation> (accessed: 05/07/2021).

1.1 Δομή και σύσταση της ατμόσφαιρας

Στον Πίνακα 1—1 παρουσιάζονται τα κυριότερα αέρια που συνθέτουν τον ατμοσφαιρικό αέρα και η ποσοστώςή τους κατ' όγκο. Τη μεγαλύτερη συγκέντρωση εμφανίζουν τα αέρια άζωτο, οξυγόνο και αργό που αποτελούν το 99.966% της ατμόσφαιρας. Παρότι το άζωτο και το οξυγόνο συμμετέχουν σε (φωτο)χημικές αντιδράσεις είτε ως αντιδρώντα είτε ως προϊόντα, ο μεγάλος χρόνος ζωής τους (εκατομμύρια / χιλιάδες χρόνια) ελαχιστοποιεί τον αντίκτυπο αυτών των μεταβολών.

*Πίνακας 1—1. Ογκομετρική σύνθεση του ατμοσφαιρικού αέρα^{2,3,4}. Με σκίαση εμφανίζονται τα αέρια με μεταβαλλόμενη συγκέντρωση. *Δεδομένα από την ιστοσελίδα: <https://www.co2.earth/daily-co2>, **το νερό παρατηρείται και στις τρεις φάσεις του: υγρό, αέριο, και στερεό με τη μορφή παγοκρυστάλλων.*

Αέριο	Ογκομετρική σύνθεση ξηρού αέρα	Σχόλια
Nitrogen (N ₂)	78.084	Βιολογικό
Oxygen (O ₂)	20.948	Βιολογικό
Argon (Ar)	0.934	Αδρανές
Carbon Dioxide (CO ₂)*	420 ppmv (0.042)	Καύσεις, Ωκεανοί, Βιόσφαιρα
Neon (Ne)	18.18 ppmv (0.001818)	Αδρανές
Helium (He)	5.24 ppmv (0.000524)	Αδρανές
Methane (CH ₄)	1.7 ppmv (0.00017)	Βιολογικό, ανθρωπογενές
Krypton (Kr)	1.14 ppmv (0.000114)	Αδρανές
Hydrogen (H ₂)	0.55 ppmv (0.000055)	Βιολογικό, ανθρωπογενές, φωτοχημικό
Nitrous Oxide (N ₂ O)	0.31 ppmv (0.000031)	Βιολογικό, ανθρωπογενές
Carbon Monoxide (CO)	50 – 200 ppbv	Φωτοχημικό, προϊόν καύσης ανθρωπογενές
Xenon (Xe)	0.087 ppmv (0.0000087)	Αδρανές
Ozone (O ₃) stratosphere	0.5 – 10 ppm	Φωτοχημικό
Ozone (O ₃) troposphere	10 – 500 ppbv	Φωτοχημικό
Water Vapor (H ₂ O)**	Μεταβλητή έως 4%	Ύδατα, φωτοχημικές αντιδράσεις

Η θερμοκρασία και η πίεση εμφανίζουν διακυμάνσεις καθ' ύψος της ατμόσφαιρας και αποτελούν κριτήρια για το διαχωρισμό της σε στρώματα, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλονται διαχωριστικές περιοχές μεταβλητού πάχους. Σύμφωνα με την Εικόνα 1—2, η ατμόσφαιρα υποδιαιρείται ως εξής:

- ❖ Τροπόσφαιρα
- ❖ Στρατόσφαιρα
- ❖ Μεσόσφαιρα
- ❖ Θερμόσφαιρα
- ❖ Εξώσφαιρα
- ❖ Τροπόπαυση
- ❖ Στρατόπαυση
- ❖ Μεσόπαυση
- ❖ Θερμόπαυση

² Παπαγιάννης Α., Φυσική Περιβάλλοντος, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, 2014.

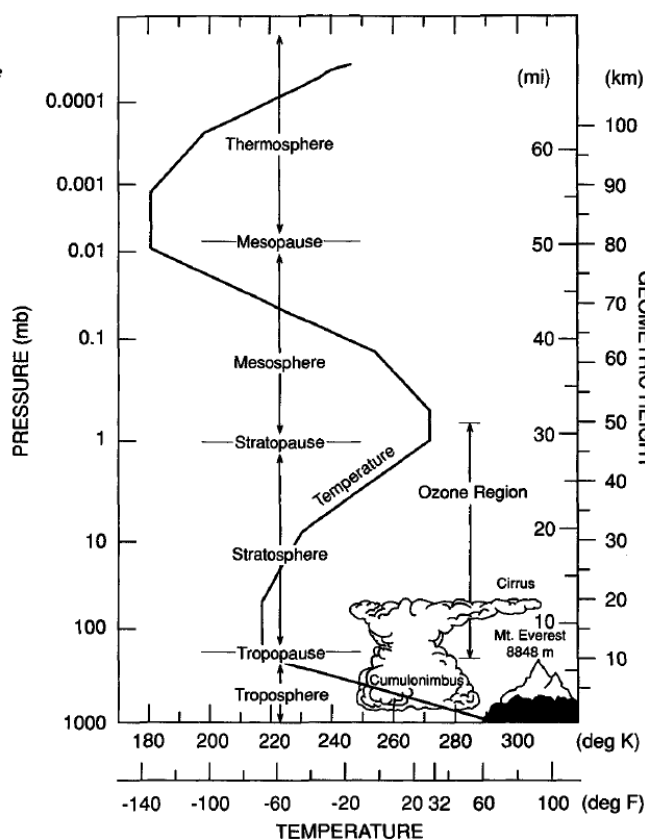
³ Λαζαρίδης Μ., Ατμοσφαιρική ρύπανση με στοιχεία μετεωρολογίας, 2^η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2010, σελ. 25.

⁴ Brasseur G. et al., Atmospheric Chemistry and Global Change, Oxford University Press, 1999, σελ. 9.

1.1 Δομή και σύσταση της ατμόσφαιρας

Όπως υποδεικνύεται στην Εικόνα 1—1, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που επιβιώνει έως την επιφάνεια της Γης διαφέρει από την ένταση που προσπίπτει στην εξώτερη ατμόσφαιρα. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στην εξασθένηση της ακτινοβολίας μέσω της απορρόφησης και της σκέδασής της από την ατμοσφαιρική ύλη. Ο Ήλιος εκπέμπει σχεδόν σε όλο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, από τις ακτίνες Χ έως τα ραδιοκύματα, ωστόσο με μεγαλύτερη ένταση εκπέμπει στο ορατό. Τα τμήματα που φτάνουν στο έδαφος –με μειωμένη ένταση– είναι:

- τα Ραδιοκύματα (1 m – 1000 m – ...)⁵
- τα Μικροκύματα (1 mm – 1 m)
- η Υπέρυθρη IR (0.75 μm – 100 μm)
- η Ορατή VIS (400 – 750 nm)
- η Υπεριώδης UV
- ✘ UVA (320 – 400 nm)
- ✘ UVB (280 – 320 nm)



Εικόνα 1—2. Αναπαράσταση της κατακόρυφης κατανομής (profile) της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας⁶. Η παρουσίαση αυτή βασίζεται στο U.S. Standard Atmosphere Model το οποίο οριστικοποιήθηκε το 1976⁷.

Λόγω της περιστροφής της Γης, η ατμοσφαιρική ύλη τείνει να διαφύγει προς το διάστημα, εντούτοις συγκρατείται από το γήινο βαρυτικό πεδίο. Το αποτέλεσμα αυτής της ισορροπίας είναι ότι η ατμόσφαιρα έχει μεγαλύτερο πάχος κοντά στον Ισημερινό από όσο έχει στους Πόλους. Το

⁵ Στα κάτω και άνω άκρα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, η ομαδοποίηση των μηκών κύματος δεν έχει σαφή όρια, αντίθετα συμβαίνει επικάλυψη αυτών. Επομένως, τα όρια που παρατίθενται δεν είναι αυστηρά.

⁶ Βλ. Brasseur G. et al., ό.π., σελ. 7.

⁷ NOAA, NASA, U.S. Air Force, U.S. Standard Atmosphere 1976, U.S. Government Printing Office, Washington D.C., October 1976.

1.1 Δομή και σύσταση της ατμόσφαιρας

πάχος των στρωμάτων, επομένως, διαφέρει ανάλογα το γεωγραφικό πλάτος, κάτι που εκδηλώνεται εντονότερα στην κατώτερη και μέση ατμόσφαιρα (τροπόσφαιρα και στρατόσφαιρα), οι οποίες περιέχουν το μεγαλύτερο μέρος της ατμοσφαιρικής μάζας.

Η τροπόσφαιρα αποτελεί το κατώτερο τμήμα της ατμόσφαιρας και εκτείνεται από το έδαφος έως την τροπόπαυση. Το υψόμετρο από το οποίο ξεκινά η τροπόπαυση είναι τα 6-8 km στους Πόλους, τα 11-12 km στα μέσα γεωγραφικά πλάτη και τα 17-18 km στον ισημερινό. Η τροπόσφαιρα χαρακτηρίζεται από *μείωση της θερμοκρασίας καθ' ύψος* (από μέση θερμοκρασία εδάφους 15 °C έως περίπου -50 °C) και από *έντονη κατακόρυφη ανάμειξη των αέριων μαζών*, ο κύκλος της οποίας οφείλεται στη θέρμανση και ανύψωση της ατμοσφαιρικής ύλης από την ηλιακή ακτινοβολία (και από την υπέρυθρη ακτινοβολία της Γης), και στην κάθοδο των αέριων μαζών που κατά την προηγούμενη ανοδική πορεία τους ψύχονται. Από το συνδυασμό της κατακόρυφης ανάμειξης αερίων μαζών, την εξάτμιση των υδάτων, την εποχή του χρόνου και τη γεωγραφική θέση αναδύονται τα *ποικίλα μετεωρολογικά φαινόμενα*, τα οποία λαμβάνουν χώρα μέσα στην τροπόσφαιρα. Όσον αφορά το περιεχόμενό της, η τροπόσφαιρα περιλαμβάνει περίπου το 80% της ατμοσφαιρικής ύλης του ξηρού αέρα και σχεδόν όλη την ποσότητα των υδρατμών⁸.

Η τροπόπαυση διαχωρίζει την τροπόσφαιρα από τη στρατόσφαιρα και χαρακτηρίζεται από τη σχεδόν μηδενική μεταβολή της θερμοκρασίας. Σύμφωνα με τον ορισμό της από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Μετεωρολογίας (World Meteorological Organization – WMO)⁹, η τροπόπαυση είναι το κατώτερο ατμοσφαιρικό στρώμα, στο οποίο η μείωση της θερμοκρασίας καθ' ύψος δεν υπερβαίνει τους δύο βαθμούς κελσίου ανά χιλιόμετρο:

$$\frac{dT}{dz} \leq -2 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{km}} \quad \{1.1\}$$

Παράλληλα, μεταξύ της τροπόπαυσης και ανωτέρων στρωμάτων εντός 2 km ισχύει και πάλι ότι η μέση κατακόρυφη μεταβολή της θερμοκρασίας δίνεται από την εξ. 1.1.

Το κατώτερο τμήμα της τροπόσφαιρας ονομάζεται πλανητικό οριακό στρώμα (planetary boundary layer – PBL) και το πάχος του ποικίλει από μερικές εκατοντάδες μέτρα έως 1-2 km από την επιφάνεια του εδάφους, αναλόγως την ώρα της ημέρας και τη γεωγραφική θέση¹⁰. Το PBL, περισσότερο από κάθε άλλο στρώμα της ατμόσφαιρας, χαρακτηρίζεται από *συνεχείς κινήσεις αερίων μαζών τόσο κατακόρυφες όσο και οριζόντιες*, οι οποίες οφείλονται σε παράγοντες, όπως η *θέρμανση* από την ηλιακή και γήινη ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της ημέρας και η σταδιακή *ψύξη* τους από τη δύση του ηλίου μέχρι την ανατολή, και η ανάπτυξη *τυρβώδους ροής* κατά την οριζόντια κίνηση των αερίων μαζών λόγω του ανάγλυφου της Γης. Όσον αφορά τη γεωγραφική θέση, ισχύει πως η ανταπόκριση του PBL στις θερμοκρασιακές μεταβολές της γήινης επιφάνειας είναι ταχεία πάνω από ηπειρωτικά εδάφη και, αντιθέτως, πολύ αργή πάνω από θαλάσσια σώματα, λόγω της

⁸ Βλ. Λαζαρίδης, ό.π., σελ.30.

⁹ World Meteorological Organization, WMO Bulletin, Vol. 6 No. 4, Oct. 1957, σελ. 137. (https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=6960 – accessed: 05/07/2021).

¹⁰ Stull R., An introduction to Boundary Layer Meteorology, Kluwer Academic Publishers, 1988.

1.1 Δομή και σύσταση της ατμόσφαιρας

θερμοχωρητικότητας του νερού. Ένα ακόμη ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του PBL είναι η *εμφάνιση θερμοκρασιακών αναστροφών*, επομένως και η ανάπτυξη ζωνών αποκλεισμού σε ύψος περίπου 1 km, οι οποίες εμποδίζουν την κίνηση των αέριων μαζών. Κατ' αποτέλεσμα, μεγάλος φόρτος αιωρούμενων σωματιδίων και ατμοσφαιρικών ρύπων παγιδεύεται κάτω από τις ζώνες αποκλεισμού και δημιουργείται υψηλή συγκέντρωση, συχνά ορατή κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Η στρατόσφαιρα ακολουθεί μετά την τροπόπαυση φτάνοντας σε ύψος 45-55 km και είναι το πρώτο στρώμα μετά την τροπόσφαιρα, στο οποίο η κίνηση των αέριων μαζών και η μεταβολή της θερμοκρασίας ακολουθούν αντίθετους κανόνες. Στην στρατόσφαιρα συμβαίνει *ελάχιστη κατακόρυφη ανάμειξη των αέριων μαζών* και κυριαρχεί στασιμότητα¹¹, γεγονός που οδηγεί στο μεγάλο χρόνο παραμονής ατμοσφαιρικών ρύπων και ΑΣ, τα οποία εισάγονται σε αυτήν είτε μέσω ηφαιστειακής έκρηξης είτε μέσω υψηλών νεφών που δημιουργούνται σε σφοδρές καταιγίδες¹². Η *σχεδόν τέλεια απουσία υδρατμών* στη στρατόσφαιρα δυσχεραίνει την απομάκρυνσή τους (βλ. ενότητα 1.2.3), η οποία επιτυγχάνεται τελικά σε βάθος μερικών χρόνων με τη βοήθεια των πολικών στρατοσφαιρικών νεφών (Polar Stratospheric Clouds – PSCs), οι επιφάνειες των οποίων λειτουργούν ως “εργαστήριο” χημικών αντιδράσεων μεταξύ των ρύπων¹³. Ταυτόχρονα, ο συνδυασμός της απουσίας υδρατμών και της στασιμότητας ως προς τις κατακόρυφες κινήσεις οδήγησε σε ένα ακόμη, εξέχουσας σημασίας για τη διατήρηση της ζωής, χαρακτηριστικό της στρατόσφαιρας: την *σταθερά υψηλή* (έως και πριν μισό αιώνα περίπου) *συγκέντρωση όζοντος O₃*. Στην στρατόσφαιρα βρίσκεται περίπου το 90% του ατμοσφαιρικού όζοντος το οποίο δρα ως απορροφητής της βλαβερής UVC ακτινοβολίας (100-280 nm), χρησιμοποιώντας την ως “καύσιμο” για τις φωτοχημικές αντιδράσεις στις οποίες συμμετέχει^{14,15}. Τέλος, η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας στη στρατόσφαιρα προκαλεί τη θέρμανσή της και έτσι η θερμοκρασία καθ' ύψος αυξάνεται από τους -55 °C μέχρι τους -3 °C περίπου, ενώ, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1–2, μεγαλύτερος ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας παρατηρείται από τα 30 km περίπου και πάνω (διαχωρισμός σε ανώτερη και κατώτερη στρατόσφαιρα).

¹¹ Ότι παρατηρήθηκε ανωτέρω (σχετικά με τις θερμοκρασιακές μεταβολές εντός του PBL και την εμπόδιση των κατακόρυφων κινήσεων των αέριων μαζών ως συνέπεια της εμφάνισής τους), συμβαίνει και με τη στρατόσφαιρα. Στην τροπόσφαιρα και στην μεσόσφαιρα η θερμοκρασία μειώνεται καθ' ύψος, ενώ στη στρατόσφαιρα, που βρίσκεται ανάμεσά τους, η θερμοκρασία αυξάνεται.

¹² Wallace J., Hobbs P., Atmospheric Science: An Introductory Survey, 2nd Edition, Elsevier Inc., 2006, σελ. 11.

¹³ Έτσι, όμως, τα PSCs συμμετέχουν στην καταστροφή του στρατοσφαιρικού όζοντος.

¹⁴ Η υπεριώδης ακτινοβολία συμμετέχει ενεργά τόσο στην φωτόλυση του όζοντος όσο και στην παραγωγή του. Ο κύκλος των αντίστοιχων αντιδράσεων έχει ως εξής: φωτόλυση του οξυγόνου $O_2 (O_2 + hv (\lambda < 240nm) \rightarrow O + O)$, εξώθερμη σύνθεση όζοντος $(O + O_2 + M (= N_2, O_2) \rightarrow O_3 + M + \Delta Q)$ και φωτόλυση του όζοντος $(O_3 + hv (180 < \lambda < 320 nm) \rightarrow O_2 + O)$.

¹⁵ Το ισοζύγιο των αντιδράσεων σύνθεσης και φωτόλυσης του όζοντος διαταράχθηκε, ωστόσο, σε δυσχερώς αναστρέψιμο βαθμό με την εισαγωγή της χρήσης ενώσεων που περιέχουν τα αέρια χλώριο (Cl), βρώμιο (Br), φθόριο (F) και ιώδιο (I) στη βιομηχανία και σε οικιακές συσκευές που λειτουργούν με ψυκτικά υγρά (κλιματιστικά, ψυγεία κ.λπ.). Η παρακολούθηση της εξέλιξης της “τρύπας του όζοντος” και της συγκέντρωσής τους όζοντος τόσο στη στρατόσφαιρα όσο και στην τροπόσφαιρα (στην οποία αποτελεί ρύπο) συγκεντρώνει ερευνητικό ενδιαφέρον παγκοσμίως.

1.2 Εισαγωγή στα αερολύματα

Παρόμοιες εναλλαγές στη συμπεριφορά των αέριων μαζών και της κατακόρυφης μεταβολής της θερμοκρασίας που παρατηρούνται μεταξύ τροπόσφαιρας και στρατόσφαιρας επαναλαμβάνονται και μεταξύ των ατμοσφαιρικών στρωμάτων που ακολουθούν, δηλαδή μεταξύ μεσόσφαιρας και θερμόσφαιρας. Στη μεν μεσόσφαιρα, η οποία εκτείνεται από τη στρατόπαυση έως τα ~85 km, παρατηρείται ξανά μείωση της θερμοκρασίας έως τους -90 °C περίπου και έντονη κατακόρυφη ανάμειξη των αέριων μαζών. Η δε θερμόσφαιρα εκτείνεται από τα 90 km έως τα 500-1000 km και χαρακτηρίζεται, αντίθετα, από ελάχιστη κατακόρυφη ανάμειξη των μαζών και αύξηση της θερμοκρασίας με το ύψος. Η ατμόσφαιρα εμφανίζει μεγάλη αραιώση και αποτελείται μονάχα από διατομικά μόρια και από άτομα, τα οποία προκύπτουν από τη διάσπαση των μορίων λόγω απορρόφησης ακτινοβολίας, η δε σύνθεσή της περιορίζεται σε οξυγόνο O, άζωτο N και ήλιο He¹⁶. Στο στρώμα αυτό απορροφώνται οι ακτίνες X και το κατώτερο φάσμα της υπεριώδους ακτινοβολίας· συνεπώς η θερμοκρασία, εξαρτώμενη και από την ηλιακή δραστηριότητα, μπορεί να ξεπερνά τους 500 °C¹⁷.

Τέλος, η εξώσφαιρα αποτελεί το απώτατο ατμοσφαιρικό στρώμα· ωστόσο, το μέγιστο ύψος στο οποίο εκτείνεται δεν είναι υπολογίσιμο με ακρίβεια. Μάλιστα, οι απόψεις δίστανται για το αν πράγματι είναι μέρος της ατμόσφαιρας ή του διαστήματος, καθώς η ένταση του βαρυτικού πεδίου της Γης είναι χαμηλή σε αυτά τα ύψη, η δε ατμοσφαιρική ύλη διαφεύγει εκτός της εξώσφαιρας προς το διάστημα. Μάλιστα, η πυκνότητα του αέρα είναι ακόμα πιο χαμηλή από όση είναι στη θερμόσφαιρα, ώστε τα αέρια άτομα και μόρια να ακολουθούν συγκεκριμένες τροχιές με τη μέση ελεύθερη διαδρομή μεταξύ των συγκρούσεών τους να ξεπερνά το 1 km¹⁸.

1.2 Εισαγωγή στα αερολύματα

Αιωρούμενα σωματίδια ή αλλιώς αερολύματα (aerosol) καλούνται σωματίδια σε στερεή ή υγρή μορφή που βρίσκονται ελεύθερα στην ατμόσφαιρα και έχουν διάμετρο της τάξης των μερικών νανομέτρων έως και 100 μm περίπου. Το μέγεθός τους επηρεάζει σημαντικά: α) το χρόνο παραμονής τους στην ατμόσφαιρα (μερικές ημέρες ή εβδομάδες¹⁹), β) τα ύψη στα οποία μπορούν να ανέλθουν και γ) τις αποστάσεις που μπορούν να διανύσουν από την πηγή τους καθώς υποκείνται στην βαρυτική έλξη της Γης και σε άλλους μηχανισμούς απομάκρυνσής τους από την ατμόσφαιρα.

Η ύπαρξη των ΑΣ σωματιδίων επηρεάζει σημαντικά τα μετεωρολογικά φαινόμενα, καθώς συνδέεται στενά με τον σχηματισμό νεφών και τις βροχοπτώσεις²⁰, ενώ παράλληλα τα αερολύματα

¹⁶ Το φαινόμενο της Ωρόρας (Βόρειο Σέλας) στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη λαμβάνει χώρα εντός του θερμοσφαιρικού στρώματος και προκαλείται από συγκρούσεις φορτισμένων κοσμικών σωματιδίων με τα άτομα και μόρια της θερμόσφαιρας, οι οποίες οδηγούν στη διέγερση και αποδιέγερση των τελευταίων και την παραγωγή των εντυπωσιακών σχηματισμών φωτός.

¹⁷ <https://scied.ucar.edu/learning-zone/atmosphere/thermosphere> (accessed: 05/07/2021).

¹⁸ <https://scied.ucar.edu/learning-zone/atmosphere/exosphere> (accessed: 05/07/2021).

¹⁹ Seinfeld J. H., Pandis S., Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2006.

²⁰ Η ανάμειξη των ΑΣ στα περιεχόμενα των σύννεφων επηρεάζει ταυτόχρονα και τη λευκότητά τους –δηλαδή το βαθμό στον οποίο οπισθοσκεδάζουν την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία προσφέροντας έτσι την τοπική ψύξη της

1.2 Εισαγωγή στα αερολύματα

αποτελούν σημαντικούς απορροφητές και οπισθοσκεδαστές τόσο της ηλιακής όσο και της γήινης ακτινοβολίας²¹. Επιπλέον, ενεργούν και ως μεταφορείς των μη πτητικών ενώσεων και ατμοσφαιρικών ρύπων από περιοχή σε περιοχή. Επομένως, η ανάμειξή τους στα τροποσφαιρικά δρώμενα (κυρίως) καθιστά αναγκαία την παρακολούθηση και μελέτη των συγκεντρώσεων και των επιπτώσεών τους σε βραχύ και μακρό χρονικό επίπεδο (καιρός/κλίμα).

1.2.1 Κατηγοριοποίηση αερολυμάτων

Η κατηγοριοποίηση των αερολυμάτων βασίζεται σε χαρακτηριστικές τους ιδιότητες, όπως η διάμετρος τους, η χημική τους σύσταση και η πηγή προέλευσής τους. Παράλληλα, οι οπτικές τους ιδιότητες, όπως αναφέρονται στο επόμενο κεφάλαιο, είναι εν πολλοίς αντιπροσωπευτικές του είδους τους.

1.2.1.1 Προέλευση

Τα χαρακτηριστικά των αερολυμάτων, ως επί το πλείστον, συνδέονται στενά με την πηγή προέλευσής τους ώστε κατά περίπτωση να αναμένεται συγκεκριμένος τύπος αερολύματος που ευρίσκεται πάνω από δεδομένη γεωγραφική περιοχή και υψόμετρο. Η κατηγοριοποίηση αυτή παρουσιάζεται στον Πίνακα 1—2. Κατά την ανίχνευση των ΑΣ δεν είναι σπάνιο να παρατηρηθούν μείγματα αυτών των τύπων αερολυμάτων.

Πίνακας 1—2. Είδη αιωρούμενων σωματιδίων βάσει της προέλευσής τους.

Ερημική σκόνη (Mineral Dust)
Καθαρά θαλάσσια σωματίδια (Clean marine)
Καθαρά ηπειρωτικά (Clean Continental)
Ρυπασμένα ηπειρωτικά (Polluted Continental)
Σωματίδια από καύση άνθρακα (Biomass Burning)
Ηφαιστειακή τέφρα (Volcanic Ash)

Οι πηγές των ΑΣ μπορούν να διαχωριστούν σε *φυσικές* και σε *ανθρωπογενείς*, με κριτήριο την ανάμειξη της ανθρώπινης δραστηριότητας στην απελευθέρωσή τους. Μερικές από τις πηγές είναι οι ακόλουθες:

- ✦ *Ερημικές εκτάσεις.* Εξαιρώντας τις πολικές ερήμους, η Σαχάρα είναι η μεγαλύτερη πηγή ερημικής σκόνης (με έκταση 9,200,200 km²) σε παγκόσμιο επίπεδο²². Τα μικρά σωματίδια σκόνης (διαμέτρου $\leq 1 \mu\text{m}$) μπορούν να φτάσουν σε απόσταση αρκετών χιλιομέτρων από

ατμόσφαιρας— και την ποσότητα νερού που μπορούν να συγκρατήσουν πριν τον υετό. Ένα λευκό σύννεφο χαρακτηρίζεται από υψηλή λευκότητα και περιορισμένη συγκέντρωση ΑΣ και νερού. Αντίθετα, ένα σκούρο σύννεφο έχει χαμηλή λευκότητα και μεγάλη περιεκτικότητα σε ΑΣ, τα οποία αποτελούν τους πυρήνες γύρω από τους οποίους συλλέγεται το νερό.

²¹ Οι συγκεντρώσεις ΑΣ στην ατμόσφαιρα μπορούν να προκαλέσουν είτε την τοπική θέρμανσή της (direct warming effect) είτε την τοπική της ψύξη (direct cooling effect), αναλόγως τη δράση των σωματιδίων ως απορροφητές ή σκεδαστές της ακτινοβολίας.

²² <https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/world/#geography> (accessed: 05/07/2021).

την πηγή τους²³ καθώς τα επεισόδια μεταφοράς οφείλονται στους διερχόμενους από την περιοχή ισχυρούς ανέμους, ενώ τα μεγαλύτερα σωματίδια εναποτίθενται κοντά στην πηγή τους²⁴. Η αφρικάνικη σκόνη μεταβάλλει το ενεργειακό ισοζύγιο της Γης, δρώντας ως απορροφητής της ηλιακής ακτινοβολίας και προκαλώντας θέρμανση της ατμόσφαιρας σε τοπικό επίπεδο. Επίσης, τα σωματίδια σκόνης συμμετέχουν στον υδρολογικό κύκλο ως πυρήνες συμπύκνωσης νεφών (Cloud Condensation Nuclei – CCN), και επηρεάζουν την ατμοσφαιρική ορατότητα και την ποιότητα ζωής, γενικότερα.

- ✧ *Θαλάσσια σώματα και ωκεανοί.* Σταγονίδια θαλασσινού νερού μεταφέρονται στην κατώτερη τροπόσφαιρα υπό την επίδραση ανέμων που κινούνται κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας. Τα σταγονίδια αυτά δρουν ως οπισθοσκεδαστές της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας και ως πυρήνες συμπύκνωσης νεφών. Όσον αφορά τη χημική τους σύσταση, περιέχουν ως επί το πλείστον ιόντα χλωρίου (Cl⁻), νατρίου (Na⁺) και θειικά ιόντα (SO₄²⁻) και ως εκ τούτου κατά την είσοδό τους στον ατμοσφαιρικό χώρο μεταβάλλουν την συγκέντρωση χημικών ενώσεων, όπως το θειικό οξύ (H₂SO₄), η αμμωνία (NH₃) και το υδροχλωρικό οξύ (HCl)²⁵. Λαμβανομένου υπόψιν του κύκλου του νερού, η χημική σύσταση των ωκεανών και κάθε ακτής ή όχθης διαμορφώνεται (σε ημι-επιφανειακό επίπεδο) επιπλέον από το σύνολο των ΑΣ που καταλήγουν στα ύδατα έπειτα από τη μεταφορά τους μέσω ανέμων, είτε αυτά παράγονται σε γειτονικές περιοχές είτε σε περιοχές που απέχουν χιλιάδες χιλιόμετρα. Για παράδειγμα, η ερημική σκόνη της Σαχάρας μπορεί να ανιχνευθεί στον Ατλαντικό Ωκεανό σε βάθος 3.5 km και σε απόσταση 4400 km από την ακτή της ερήμου²⁶.
- ✧ *Ηφαιστειακές εκπομπές.* Από τους κρατήρες ενεργών ηφαιστειών αναδύονται ατμοσφαιρικοί ρύποι, όπως διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), διοξείδιο του θείου (SO₂), υδρόθειο (H₂S), υδροφθόριο (HF), υδροχλώριο (HCl) κ.ά., υδρατμοί, τέφρα, πέτρες και υγρό μάγμα²⁷. Τα εκρηκτικά επεισόδια δεν είναι μικρής διάρκειας αποκλειστικά, ώστε να ολοκληρώνονται σε σύντομο χρονικό διάστημα (όπως άλλα φυσικά φαινόμενα/καταστροφές) αλλά αναλόγως την περίπτωση μπορούν να διαρκούν για παρατεταμένες περιόδους, ενώ η εκπομπή ατμοσφαιρικών ρύπων μπορεί να είναι καθημερινή²⁸. Κατά τη διάρκεια μιας έκρηξης και λαμβανομένου υπόψιν ότι η κορυφή ενός ηφαιστείου είναι ήδη σε μέσο ύψος μερικών χιλιομέτρων από την επιφάνεια της θάλασσας, η τέφρα μπορεί να εισαχθεί στη στρατόσφαιρα· μέχρι μάλιστα να απομακρυνθεί ολικά από τα ατμοσφαιρικά στρώματα, μπορεί να διανύσει χιλιάδες χιλιόμετρα.

²³ Στην περίπτωσή μας, η μέση απόσταση μεταξύ της Καρλσρούης και της Σαχάρας κυμαίνεται μεταξύ 2 - 4 χιλιάδων χιλιομέτρων.

²⁴ *Papayannis et al.*, Measurements of Saharan dust aerosols over the Eastern Mediterranean using elastic backscatter-Raman lidar, spectrophotometric and satellite observations in the frame of the EARLINET project, 2005.

²⁵ βλ. *Λαζαρίδης*, ό.π., σελ. 413.

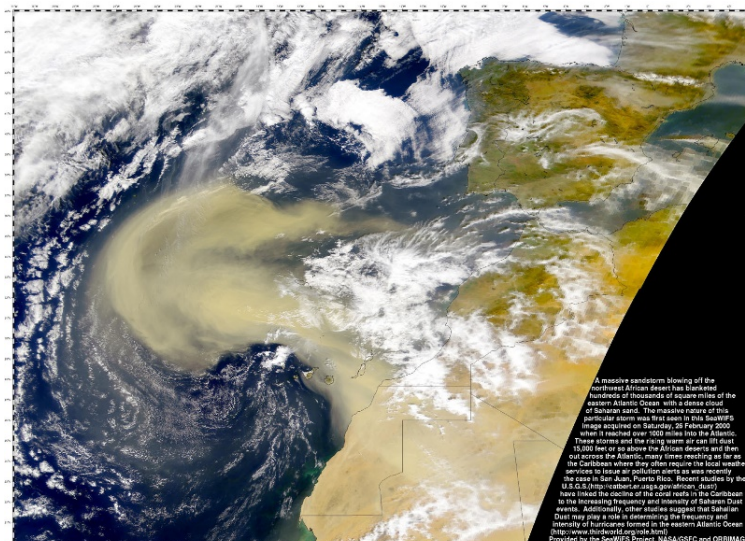
²⁶ *Michelle van der Does et al.*, Particle size traces modern Saharan dust transport and deposition across the equatorial North Atlantic, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 13697–13710, 2016

²⁷ *Loughlin S. et al.*, *Global Volcanic Hazards and Risk*, Cambridge University Press, 2015, σελ. 12 (DOI: 10.1017/CBO9781316276273.).

²⁸ Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί το ηφαιστείο Kīlauea της Χαβάης που εξερράγη το Μάρτιο του 2018. Τα πολλαπλά εκρηκτικά επεισόδια και οι επακόλουθοι σεισμοί έληξαν επισήμως το Σεπτέμβρη του ίδιου έτους.

1.2 Εισαγωγή στα αερολύματα

- ❏ **Δασικές Πυρκαγιές.** Οι πυρκαγιές σε φυσικούς βιότοπους αποτελούν πηγή αιωρούμενων σωματιδίων καύσης βιομάζας, τέφρας, υδρατμών και ατμοσφαιρικών ρύπων, όπως το CO₂, το μεθάνιο CH₄ και τα οξείδια του αζώτου NO_x κ.ά.²⁹ Εκτός από την βραδέως αναστρέψιμη περιβαλλοντική ζημία που προκαλείται στην χλωρίδα και την πανίδα, στην κατώτερη τροπόσφαιρα εκλύονται μεγάλες ποσότητες θερμότητας και αερίων του θερμοκηπίου που επιταχύνουν την υπερθέρμανση του πλανήτη, οι δε στάχτες από μία πυρκαγιά μπορούν να ταξιδέψουν για δεκάδες χιλιόμετρα.
- ❏ **Ηπειρωτικές εκτάσεις.** Η πηγή αυτή είναι κοινή αφενός μεν για τα καθαρά ηπειρωτικά ΑΣ, ήτοι σωματίδια φυσικής και αγροτικής προέλευσης, όπως είναι η γύρη, το χώμα ή η σκόνη, τα οποία εισάγονται στην ατμόσφαιρα από διάβρωση, τριβή και κατακερματισμό υλικών σε φυσικούς βιότοπους, αφετέρου δε για τα ρυπασμένα ηπειρωτικά ΑΣ που εισάγονται από τις πόλεις και οφείλονται στην ανθρώπινη δραστηριότητα. Παραδείγματα αποτελούν η καύση ορυκτών καυσίμων (βιομηχανία, αυτοκίνηση, θέρμανση κ.τ.λ.), οι σκαπτικές και οικοδομικές εργασίες κ.ά.



Εικόνα 1—3. “Dust Storm Sweeps from Africa into Atlantic” (Photo Credit: Norman Kuring)³⁰

1.2.1.2 Χημική Σύσταση

Τα στοιχεία και οι χημικές ενώσεις που συνθέτουν τα αιωρούμενα σωματίδια είναι τα εξής:

- ❖ Θεϊικά ιόντα (sulfate – SO₄²⁻), νιτρικά ιόντα (nitrate – NO₃⁻) και ιόντα αμμωνίου (ammonium – NH₄⁺)
- ❖ Νάτριο (sodium – Na⁺) και χλώριο (chloride – Cl⁻) από τα θαλάσσια σωματίδια
- ❖ Μεταλλικά στοιχεία, όπως σίδηρος (iron – Fe), πυρίτιο (silica – Si), ασβέστιο (calcium – Ca) κ.ά., από σκόνη και τέφρα

²⁹ Mylonaki M. et al., AEROSOL OPTICAL PROPERTIES VARIABILITY DURING BIOMASS BURNING EVENTS OBSERVED BY THE EOLE-AIAS DEPOLARIZATION LIDARS OVER ATHENS, GREECE (2007-2016), EPJ Web of Conferences 176, 05022 (2018).

³⁰ <https://visibleearth.nasa.gov/images/53872/dust-storm-sweeps-from-africa-into-atlantic> (accessed: 05/07/2021).

1.2 Εισαγωγή στα αερολύματα

- ❖ Οργανικός άνθρακας (organic carbon) από διαδικασίες καύσης
- ❖ Μαύρος άνθρακας (black carbon) από καύση ορυκτών καυσίμων και βιομάζας

Η χημική σύσταση των ΑΣ αποτελεί ένα μεταβλητό χαρακτηριστικό τους καθώς, από τη στιγμή της εισόδου τους στην ατμόσφαιρα έως και την απομάκρυνσή τους, έρχονται σε επαφή με πολλά άλλα αέρια, χημικές ενώσεις και, κυρίως, υδρατμούς.

1.2.2 Σχηματισμός

Η ανάμιξη των ΑΣ στους μηχανισμούς σχηματισμού τους στηρίζεται προεχόντως στο μέγεθός τους. Βάσει της διαμέτρου τους –αν και πρόκειται για σύμβαση περί της ισοδύναμης διαμέτρου, αφού το σχήμα τους δεν είναι σφαιρικό– τα ΑΣ διακρίνονται σε δύο γενικές κατηγορίες:

- ✧ Λεπτόκοκκα (fine particles):
 - ✧ Πυρήνες συμπύκνωσης / Aitken (nucleation/Aitken mode) διαμέτρου $d < 0.1 \mu\text{m}$
 - ✧ Συσσωματώματα (accumulation mode) διάμετρο $0.1 < d < 2.0 \mu\text{m}$
- ✧ Χονδρόκοκκα (coarse mode) με διάμετρο $d > 2.0 \mu\text{m}$

Τα αερολύματα διακρίνονται περαιτέρω σε *πρωτογενή* και *δευτερογενή*, ανάλογα τον τρόπο απελευθέρωσής του στην ατμόσφαιρα. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα σωματίδια που έχουν βρεθεί στην ατμόσφαιρα απευθείας από την πηγή τους. Τέτοια σωματίδια είναι τα χονδρόκοκκα και προκύπτουν από φυσικές και ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως, υδροσταγονίδια της θάλασσας (από παφλασμό κυμάτων), ερημική σκόνη (από ισχυρό άνεμο), ηφαιστειακή τέφρα (λόγω έκρηξης ηφαιστείου) αλλά και σωματίδια από λάστιχα αυτοκινήτων. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα λεπτόκοκκα σωματίδια, τα οποία έχουν δημιουργηθεί εντός της ατμόσφαιρας ως αποτέλεσμα κάποιας φυσικής μεταβολής ή χημικής αντίδρασης. Μία τέτοια διαδικασία είναι η μετατροπή “gas-to-particle” κατά την οποία ένα αέριο που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα μπορεί να διασπαστεί περαιτέρω σε τμήματά του (π.χ. το θειικό οξύ H_2SO_4 μπορεί να αποδώσει θειικά ανιόντα SO_4^{2-}) που μεταξύ τους δύνανται να συσσωματωθούν και να συγκροτηθούν σε σωματίδια ή να προσκολληθούν σε έτερα, ήδη υπάρχοντα³¹.

Οι διεργασίες σχηματισμού των αιωρούμενων σωματιδίων είναι τρεις:

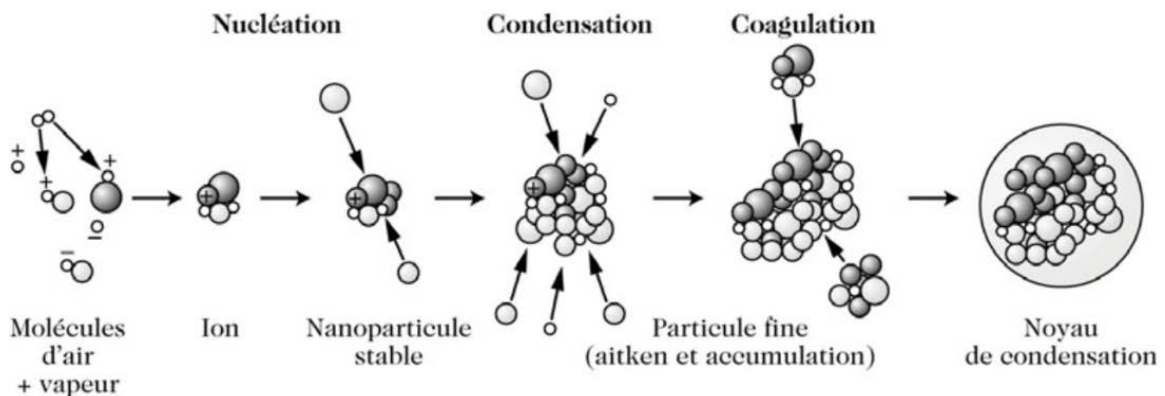
- ✧ *Πυρηνοποίηση (Nucleation)*: έμμεση μετάβαση από μία φάση της ύλης σε άλλη (π.χ. από αέρια σε υγρή φάση) μέσω της δημιουργίας μικρών συσσωματώσεων που ονομάζονται πυρήνες (clusters). Οι πυρήνες αυτοί αποτελούν τη βάση για τη δημιουργία νέων σωματιδίων (πυρήνες Aitken) και νεφών. Η διαδικασία αυτή δεν είναι ταχεία αφού λόγω της ύπαρξης σωματιδίων και στις τρεις κατηγορίες μεγέθους, τα μόρια και τα ιόντα είναι πιθανότερο να προσκολληθούν σε υπάρχοντα σωματίδια ή να ενσωματωθούν σε υδροσταγονίδια, αντί να δημιουργήσουν νέα.
- ✧ *Συμπύκνωση (Condensation)*: διαδικασία κατά την οποία συγκεντρώνονται αέρια και υδρατμοί γύρω από ένα σωματίδιο, περικλείοντάς το με αποτέλεσμα να αυξάνονται η διάμετρος του και η σφαιρικότητά του. Η επικάλυψη των σωματιδίων με νερό εξαρτάται

³¹ Βλ. Brasseur G. et al., ό.π.

1.2 Εισαγωγή στα αερολύματα

από τη σχετική υγρασία, το μέγεθος του σωματιδίου, καθώς και από το μήκος της ελεύθερης διαδρομής του σωματιδίου σε σχέση με το μέγεθός του.

- ✧ **Συσσωμάτωση (Coagulation):** κατά τη σύγκρουσή τους δύο σωματίδια αθροίζονται, σχηματίζοντας μεγαλύτερα συσσωματώματα. Αυτό συμβαίνει κυρίως μεταξύ των πυρήνων Aitken, οι οποίοι, λόγω της μεγάλης συγκέντρωσής τους, συγκρούονται με μεγάλη συχνότητα και γρήγορα δημιουργούν συσσωματώματα.



Εικόνα 1—4. Η διαδικασία της δημιουργίας πυρήνων συμπύκνωσης. Μόρια του αέρα συνθέτουν τους πυρήνες Aitken με τη διαδικασία της πυρηνοποίησης. Μέσω της συμπύκνωσης και της πρόσκρουσης των σωματιδίων προκύπτουν συσσωματώματα. Τέλος, η επικάλυψη των σωματιδίων/συσσωματωμάτων με νερό οδηγεί στους πυρήνες συμπύκνωσης³².

1.2.3 Απομάκρυνση από την ατμόσφαιρα

Δύο είναι οι γενικές κατηγορίες των μηχανισμών απομάκρυνσης των ΑΣ από την ατμόσφαιρα: η υγρή και η ξηρή εναπόθεση (*wet and dry deposition*).

- ❖ Κατά την *υγρή εναπόθεση*, τα σωματίδια μεταφέρονται στο έδαφος συνεπεία της αλληλεπίδρασής τους με το νερό της ατμόσφαιρας και στις τρεις φάσεις του. Τα ΑΣ μπορούν να κατακρημνιστούν είτε άμεσα: α) παρασυρόμενα από τη βροχή ή β) αφότου έχουν προσκολληθεί σε σωματίδια ομίχλης ή χιονιού, είτε έμμεσα: δρουν, δηλαδή πρώτα ως πυρήνες συμπύκνωσης νεφών ή ως πυρήνες παγοποίησης (*ice nuclei – IN*) και μετέπειτα κατακρημνίζονται, ακολουθώντας την εξέλιξη των νεφών. Στην υγρή εναπόθεση αποδίδεται η απομάκρυνση περίπου του 80-90 % των ΑΣ³³.
- ❖ Κατά την *ξηρή εναπόθεση*, η καθίζηση των σωματιδίων δεν οφείλεται στην βροχή αλλά βαρύτητα και τη ροή των ανέμων. Τα σωματίδια επικολλώνται στα εμπόδια που συναντούν, όπως τα κτίρια, τα βουνά, η βλάστηση και οι υγρές επιφάνειες.

Ο χρόνος παραμονής των ΑΣ στην ατμόσφαιρα σχετίζεται στενά τόσο με το μέγεθός τους όσο και με τους μηχανισμούς απομάκρυνσής τους από την τελευταία. Οι πυρήνες Aitken παραμένουν στην

³² Monod A., Liu Y., Aerosol formation and heterogeneous chemistry in the atmosphere, EPJ Web of Conferences 18, 04002 (2011).

³³ βλ. Wallace J., Hobbs P., ό.π.

1.2 Εισαγωγή στα αερολύματα

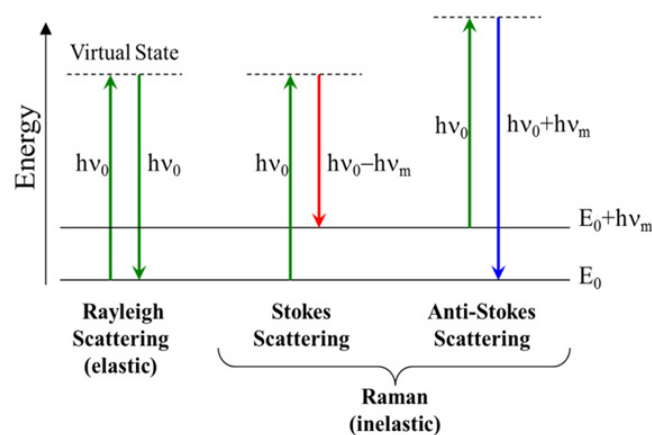
ατμόσφαιρα περίπου για μία μέρα ή και λιγότερο, με βασικούς τρόπους απομάκρυνσης τη δημιουργία συσσωματωμάτων (επομένως ανήκουν πια στην επόμενη κατάταξη μεγέθους) και τη ανάμειξή τους στα νέφη. Τα χονδρόκοκκα σωματίδια επίσης παραμένουν για μία μέρα ή λιγότερο και απομακρύνονται κυρίως με ξηρή εναπόθεση (εν τη απουσία υετού). Τα σωματίδια με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση και χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα είναι τα συσσωματώματα τα οποία επιβιώνουν μεν για εβδομάδες στη μέση και κατώτερη τροπόσφαιρα, για πολλούς μήνες δε στην ανώτερη τροπόσφαιρα· αυτά απομακρύνονται κυρίως με την υγρή εναπόθεση.

2 ΣΚΕΔΑΣΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ, ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΙΚΕΣ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ & ΒΑΣΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ LIDAR

2.1 Η σκέδαση της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα

Η ακτινοβολία, κατά τη διάδοσή της διαμέσου της ατμόσφαιρας, αλληλεπιδρά με την ύλη και εν συνεχεία εξασθενεί συνεπεία είτε φαινομένων απορρόφησής της είτε φαινομένων σκέδασης. Αφότου ένα φωτόνιο προσπέσει σε κάποιο μόριο της ατμόσφαιρας, η ενέργειά του $E = hc/\lambda$ αξιοποιείται από το μόριο, το οποίο μεταβαίνει από τη βασική του κατάσταση σε μια επιτρεπόμενη διεγερμένη. Η ενεργειακή διαφορά μεταξύ των δύο καταστάσεων αντιστοιχεί στην λαμβανόμενη φωτονική ενέργεια.

Στην περίπτωση των φαινομένων απορρόφησης, η ενέργεια χρησιμοποιείται για τη μοριακή μετάβαση μεταξύ επιτρεπόμενων περιστροφικών ή/και ταλαντωτικών ενεργειακών στάθμων, με αποτέλεσμα την περιστροφή του μορίου γύρω από το κέντρο μάζας του ή την ταλάντωση των ατόμων του. Κατά την αποδιέγερση των μορίων, η επανεκπεμπόμενη διαφορά ενέργειας μπορεί να μετατραπεί σε άλλες μορφές ενέργειας, όπως η κινητική. Ένα άλλο ενδεχόμενο είναι η απορρόφηση της φωτονικής ενέργειας να οδηγήσει σε φωτόλυση του μορίου. Ως προς αμφότερα τα ενδεχόμενα π.χ. μεγάλο μέρος της ηλιακής υπεριώδους ακτινοβολίας απορροφάται από τα ατμοσφαιρικά στρώματα, πριν καν φτάσει στην επιφάνεια της Γης, προκαλώντας στη διαδρομή του φαινόμενα φωτοϊονισμού και φωτοδιάσπασης των μορίων (ενδεχόμενα α' και β' , αντιστοιχώς), κατ' επέκταση δε ευεργετικές αλλά και βλαπτικές φωτοχημικές αντιδράσεις³⁴.



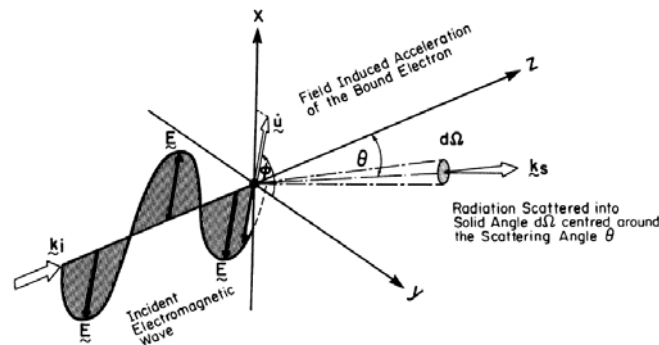
Εικόνα 2—1. Διάγραμμα Jablonski για τις μεταβάσεις μεταξύ ενεργειακών επιπέδων κατά την ελαστική σκέδαση ακτινοβολίας Rayleigh και την ανελαστικής σκέδαση Raman Stokes & Raman Anti-Stokes³⁵.

³⁴ Παράδειγμα της ευεργετικής συμμετοχής της ηλιακής ακτινοβολίας στην στρατοσφαιρική χημεία δόθηκε στην υποσ. 11. Στον αντίποδα, η φωτοδιάσπαση του τροποσφαιρικού ρύπου NO_2 από τις υπεριώδεις UVB/UVA οδηγεί στην παραγωγή ατομικού οξυγόνου [$\text{NO} + \text{O}^3(\text{P})$]. Στη συνέχεια το ατομικό οξυγόνο αντιδρά με το μόριο του οξυγόνου και συνθέτουν όζον το οποίο αποτελεί ρύπο για την τροπόσφαιρα [$\text{O}^3(\text{P}) + \text{O}_2 + \text{M}(=\text{N}_2 \text{ ή } \text{O}_2) \rightarrow \text{O}_3 + \text{M}$]. Έτσι, οι αντιδράσεις στις οποίες συμμετέχει η ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι πάντοτε εξ ολοκλήρου ωφέλιμες.

³⁵ B&W Tek, Raman Knowledge - An Introduction to Raman Spectroscopy, 2016, (<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=13372> accessed: 05/07/2021).

2.1 Η σκέδαση της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα

Με τον όρο σκέδαση εννοείται η διέγερση και αποδιέγερση ενός μορίου και η επανεκπομπή φωτονίων είτε ενέργειας E , δηλαδή ίσης με την αρχική, είτε ενέργειας $E \pm \Delta E$, δηλαδή ελαφρώς διαφοροποιημένης από την αρχική (ελαστική / ανελαστική σκέδαση). Στην παρούσα μελέτη τρεις είναι οι σκεδάσεις που εξετάζονται: οι ελαστικές σκεδάσεις Rayleigh και Mie, και η ανελαστική σκέδαση Raman³⁶. Όπως θα καταστεί σαφές στο παρόν και στο επόμενο κεφάλαιο, η λειτουργία ενός lidar βασίζεται στην μεμονωμένη ελαστική και ανελαστική σκέδαση (single elastic / inelastic scattering)³⁷ της ακτινοβολίας laser από την ατμοσφαιρική ύλη, δηλαδή από τα μόρια της ατμόσφαιρας και από τα αιωρούμενα σωματίδια.



Εικόνα 2—2. Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία προσπίπτει σε δεσμευμένο ηλεκτρόνιο και σκεδάζεται υπό γωνίες (θ, φ) σε στερεά γωνία $d\Omega$ (Measures R., 1992, σελ. 39).

Η ειδοποιός διαφορά των δύο ελαστικών σκεδάσεων βρίσκεται στη σύγκριση μεταξύ μεγέθους³⁸ ατμοσφαιρικής ύλης και μήκους κύματος λ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Επειδή οι ανωτέρω σκεδάσεις διαχωρίζονται λόγω του μεγέθους του σκεδαστή, θεμελιώθηκε η έννοια της παραμέτρου μεγέθους, η οποία ορίζεται ως εξής:

$$\rho = \frac{2\pi r}{\lambda} = \frac{\pi D_p}{\lambda} \quad \{2.1\}$$

Ακολούθως, η σκέδαση της ακτινοβολίας από ατμοσφαιρική ύλη διαμέτρου συγκρίσιμης με το μήκος κύματος λ ($\rho \approx 1$) αποδίδεται με τον όρο “σκέδαση Mie”, ενώ η σκέδαση από ατμοσφαιρική ύλη πολύ μικρότερης διαμέτρου συγκριτικά με το λ ($\rho < 0.5$) αποδίδεται με το όρο “σκέδαση

³⁶ Ο Sir Chandrasekhara Venkata Raman FRS έλαβε το βραβείο Nobel Φυσικής το 1930 για τη ανακάλυψη και θεμελίωση της ανελαστικής σκέδασης του φωτός από σωματίδια σε αέρια, υγρή και στέρεα φάση. Για τη συνεχή συμβολή του στον επιστημονικό κόσμο τιμήθηκε με πολυάριθμα βραβεία και τίτλους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η εκλογή του ως “Fellow of the Royal Society” (1924) και ο ιπποτικός τίτλος (1929).

³⁷ Η διάδοση της ακτινοβολίας μέσω πυκνής ατμοσφαιρικής μάζας, όπως σύννεφο ή εκτενής ομίχλη, συνοδεύεται από φαινόμενα πολλαπλής σκέδασης (multiple scattering), μεγάλη εξασθένηση της δέσμης και εντονότερη εμπρόσθια σκέδαση. Για το λόγο αυτό, αποφεύγεται η λήψη μετρήσεων σε ομιχλώδη ή/και συννεφιασμένο καιρό.

³⁸ Γίνεται αναφορά στο “μέγεθος” και στη “διάμετρο” της ατμοσφαιρικής ύλης. Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά κανόνα τα μόρια και τα αερολύματα δεν έχουν απολύτως σφαιρικό σχήμα και μάλιστα τα μη σφαιρικά σωματίδια εμπλέκονται στο φαινόμενο της αποπόλωσης της δέσμης. Έτσι, η παρουσία τους κατά τη διάρκεια των μετρήσεων lidar γίνεται εμμέσως αισθητή με τρόπο που θα εξηγηθεί στη συνέχεια.

2.1 Η σκέδαση της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα

Rayleigh". Στον ερευνητικό τομέα της ατμοσφαιρικής τηλεπισκόπησης³⁹ με lidar, όπου το μήκος κύματος που αποστέλλεται προς σκέδαση έχει δεδομένη τιμή (συνήθως στις περιοχές του υπεριώδους, ορατού και κοντινού υπερύθρου), η ατμοσφαιρική ύλη που σκεδάζει κατά Rayleigh είναι τα μόρια της ατμόσφαιρας, ενώ κατά Mie σκεδάζουν τα αερολύματα.

Άλλος ένας παράγοντας που επηρεάζει τη σκέδαση είναι ο δείκτης διάθλασης της ατμόσφαιρας:

$$m = n + ik \quad \{2.2\}$$

όπου το πραγματικό μέρος n σχετίζεται με την ταχύτητα φάσης του φωτός, δηλαδή την ταχύτητά του διαμέσου ενός υλικού, και το φανταστικό μέρος k σχετίζεται με την απορροφητικότητα του υλικού, επομένως δε με την εξασθένηση του φωτός κατά τη διάθλαση. Ο δείκτης διάθλασης δεν έχει μοναδική τιμή για κάθε υλικό, αλλά είναι συνάρτηση του μήκους κύματος που συμμετέχει στη διάθλαση. Στην περίπτωση της ατμόσφαιρας, οι τιμές του δείκτη διάθλασης όχι μόνο διακυμαίνονται λόγω της εξάρτησης από το μήκος κύματος, αλλά και επειδή η σύστασή της και η πυκνότητά της αλλάζουν καθ' ύψος⁴⁰.

2.1.1 Ελαστικές Σκεδάσεις Rayleigh & Mie

Η μοριακή σκέδαση της ακτινοβολίας περιγράφηκε από τον Λόρδο Rayleigh⁴¹ το 1871, ενώ χάρη στη μελέτη του εξηγήθηκε το γαλάζιο χρώμα του ουρανού τις πρωινές ώρες και το πορτοκαλί κατά την ανατολή και τη δύση του ηλίου⁴². Συγκεκριμένα, η διαφορική ενεργός διατομή της σκέδασης ακτινοβολίας από μόρια δίνεται από την παρακάτω σχέση⁴³:

³⁹ Με τον όρο τηλεπισκόπηση, εννοείται μέτρηση που πραγματοποιείται απομακρυσμένα, δηλαδή χωρίς μέρος της διάταξης να ταξιδεύει καθ' ύψος της ατμόσφαιρας ώστε να λαμβάνει δεδομένα, όπως συμβαίνει στις ραδιοβολήσεις (radiosonde). Οι πρώτες προσπάθειες για την μέτρηση βασικών ατμοσφαιρικών παραμέτρων καθ' ύψος, όπως η πίεση και η θερμοκρασία, χρονολογούνται ήδη από το τέλος του 19^{ου} αιώνα με την αποστολή του μετεωρολογικού οργάνου, με τη χρήση χαρταετών, ενώ η πρώτη αποστολή οργάνου με χρήση λαστιχένιου μπαλονιού (όπως στις σύγχρονες ραδιοβολήσεις) αποδίδεται στους Γάλλους Gustave Hermite και Georges Besançon το 1901.

⁴⁰ Είναι δε γνωστό ότι, εξαιτίας της ανομοιογένειας της πυκνότητας και συνεπώς του δείκτη διάθλασης, το φως δεν ακολουθεί απολύτως ευθεία διαδρομή μετά την είσοδο στην ατμόσφαιρα αλλά καμπυλώνεται.

⁴¹ Γεννηθείς ως John William Strutt (1846), αφιέρωσε το μεγαλύτερο μέρος της ζωής του στην επιστήμη της φυσικής, της χημείας και των μαθηματικών, ανακαλύπτοντας νόμους και εξισώσεις που φέρουν το όνομά του, ενώ το 1904 τιμήθηκε με το βραβείο Nobel Φυσικής για την ανακάλυψη του Αργού (Argon, Ar).

⁴² Επιστρέφοντας στην επεξήγηση των χρωματικών φαινομένων του ουράνιου θόλου, έμφαση πρέπει να δοθεί στην αντιστρόφως ανάλογη εξάρτηση της ενεργού διατομής της σκέδασης από το μήκος κύματος λ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και μάλιστα στην 4^η δύναμη, ώστε όσο πιο μικρό το μήκος κύματος, τόσο πιο έντονο το φαινόμενο της σκέδασης. Έτσι, τα μπλε μήκη κύματος που βρίσκονται στο κάτω όριο του ορατού φάσματος σκεδάζονται περισσότερο και, λόγω της θέσης του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας, "σκεπάζουν" τον ουρανό, δίνοντάς του ενιαίο γαλάζιο χρώμα. Από την σκοπιά ενός παρατηρητή της ανατολής και της δύσης του ηλίου –όταν οι ακτίνες πρέπει να διαπεράσουν μεγαλύτερο ατμοσφαιρικό πάχος– τα μπλε μήκη κύματος που σκεδάζονται εντονότερα εξασθενούν από τις πολλαπλές σκεδάσεις, ενώ παράλληλα διαφεύγουν στα υψηλότερα ατμοσφαιρικά στρώματα, αφήνοντας πίσω τους τα χαμηλότερα στρώματα του ορίζοντα για τα μεγάλα μήκη κύματος του ορατού φάσματος, δηλαδή τα πορτοκαλί και τα κόκκινα, τα οποία δεν σκεδάζονται τόσο και έτσι "επιβιώνουν".

⁴³ *Measures R.*, Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications, Krieger, 1992.

2.1 Η σκέδαση της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα

$$\frac{d\sigma_{\text{mol}}(\theta, \varphi)}{d\Omega} = \frac{\pi^2(n^2 - 1)^2}{N^2\lambda^4} [\cos^2(\varphi)\cos^2(\theta) + \sin^2(\varphi)] \quad \{2.3\}$$

όπου: θ , φ είναι οι γωνίες σκεδαζόμενης ακτινοβολίας σε σχέση με την προσπίπτουσα, n το πραγματικός μέρος του δείκτη διάθλασης της ατμόσφαιρας και N η αριθμητική πυκνότητα (συγκέντρωση) των σκεδαστών.

Ολοκληρώνοντας την παραπάνω σχέση στην πλήρη στερεά γωνία 4π , εξάγεται η ολική ενεργός διατομή της μοριακής σκέδασης Rayleigh ως εξής:

$$\sigma_{\text{mol}}^{\text{tot}}(\lambda) = \frac{8\pi}{3} \frac{\pi^2(n^2 - 1)^2}{N^2\lambda^4} \quad \{2.4\}$$

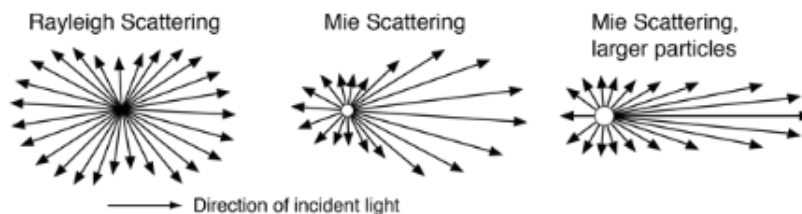
Για τις εφαρμογές lidar, όπου η μέτρηση στηρίζεται στη συλλογή οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας, ορίζεται η ενεργός διατομή οπισθοσκέδασης Rayleigh θέτοντας $\vartheta = \pi$ στη σχέση 2.3:

$$\sigma_{\text{mol}}^{\text{bsc}}(\lambda) = \frac{d\sigma_{\text{mol}}(\theta = \pi)}{d\Omega} = \frac{\pi^2(n^2 - 1)^2}{N^2\lambda^4} \quad \{2.5\}$$

Τέλος, η ενεργός διατομή οπισθοσκέδασης Rayleigh σχετίζεται αναλογικά με τον μοριακό συντελεστή οπισθοσκέδασης όγκου β_{mol} (volume backscattering coefficient) ως εξής:

$$\beta_{\text{mol}}(z, \lambda_L) = N \sigma_{\text{mol}}^{\text{bsc}}(\lambda_L) \quad \{2.6\}$$

όπου: $N = 2.55 \cdot 10^{19} \text{ mol/cm}^3$ είναι η μέση αριθμητική πυκνότητα της ατμόσφαιρας κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας⁴⁴.



Εικόνα 2—3. Αναπαράσταση της κατανομής της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας στο χώρο κατά τη σκέδαση Rayleigh ($\rho < 1$), την απλή σκέδαση Mie ($\rho \approx 1$) και την πολλαπλή σκέδαση Mie ($\rho \gg 1$).⁴⁵

Η πρώτη θεωρία για τη σκέδαση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από διηλεκτρικές σφαίρες μεγέθους συγκρίσιμου με το μήκος κύματος λ της ακτινοβολίας διατυπώθηκε από τον Γερμανό φυσικό Gustav Mie το 1908. Η διαφορική ενεργός διατομή της σκέδασης Mie έχει ως εξής:

⁴⁴ Η τιμή προκύπτει χρησιμοποιώντας την εξίσωση: $N = \frac{p_0 N_A}{RT}$ όπου $p_0 = 1.013 \text{ hPa}$ η ατμοσφαιρική πίεση σε κανονικές συνθήκες και $T = 288 \text{ K}$ η ατμοσφαιρική θερμοκρασία κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας, βάσει του U.S. Standard Atmosphere Model (1976). Βλ. *Seinfeld*, ό.π., σελ. 10.

⁴⁵ <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html> (accessed: 05/07/2021).

2.1 Η σκέδαση της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα

$$\frac{d\sigma_{\text{par}}(\theta, \varphi)}{d\Omega} = \frac{\lambda^2}{4\pi^2} [i_2(\theta, \rho, m) \cos^2(\varphi) + i_1(\theta, \rho, m) \sin^2(\varphi)] \quad \{2.7\}$$

όπου: $i_2(\theta, \rho, m)$ και $i_1(\theta, \rho, m)$ είναι η κάθετη και η παράλληλη συνάρτηση έντασης της σκέδασης Mie, οι οποίες περιγράφουν της γωνιακή κατανομή της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας. Στην περίπτωση της οπισθοσκέδασης όπου $\vartheta = \pi$, η απόδοση της οπισθοσκέδασης κατά Mie δίνεται από τη σχέση:

$$Q_{\pi}(\rho, m) = \frac{1}{\pi\rho^2} \frac{d\sigma_{\text{par}}(\theta = \pi)}{d\Omega} \quad \{2.8\}$$

Η σκέδαση του φωτός από σωματίδια με διάμετρο συγκρίσιμη του λ δεν έχει αντιστρόφως ανάλογη εξάρτηση από το μήκος κύματος, όπως η σκέδαση κατά Rayleigh, συνεπώς δεν απομειώνεται η σκέδαση κάποιων λ έναντι άλλων. Ένα γνωστό παράδειγμα σκέδασης κατά Mie είναι το λευκό χρώμα των συννέφων, καθώς, αποτελούμενα αυτά από μεγάλα σφαιρικά σωματίδια, σκεδάζουν όλα τα μήκη κύματος του ήλιου.

2.1.2 Σκέδαση Raman

Ο μηχανισμός της ανελαστικής σκέδασης Raman διαφέρει σημαντικά από τον αντίστοιχο της ελαστικής σκέδασης Rayleigh, παρότι και στους δύο μηχανισμούς τα φωτόνια προσπίπτουν σε μόρια της ατμόσφαιρας (όπως N_2 , O_2 , O_3 , H_2O κ.λπ.) και επανεκπέμπονται. Δύο είναι οι βασικές τους διαφορές και αυτές αφορούν αφενός μεν τον τρόπο που σκεδάζεται το τελικό φωτόνιο, αφετέρου δε την ενεργό διατομή των φαινομένων, ή αλλιώς την πιθανότητα να συμβεί η μία ή η άλλη σκέδαση.

Όπως αναφέρθηκε, στην ελαστική σκέδαση όλη η ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου απορροφάται από το μόριο, με αποτέλεσμα τη μετάβασή του σε διεγερμένη ηλεκτρονική κατάσταση. Έπειτα, κατά την αποδιέγερση του μορίου, εκπέμπεται ένα φωτόνιο ίσης ενέργειας με την ενεργειακή διαφορά μεταξύ της βασικής κατάστασης και της διεγερμένης. Αντιθέτως, στην ανελαστική σκέδαση Raman, η απορροφώμενη ενέργεια δεν ισοδυναμεί με την απαιτούμενη ενέργεια για μετάβαση σε διεγερμένη ηλεκτρονική κατάσταση και αντ' αυτού, παρατηρείται μετάβαση μεταξύ των ταλαντωτικών ($\Delta u = u_{\text{final}} - u_{\text{initial}}$) ή/και περιστροφικών ($\Delta J = J_{\text{final}} - J_{\text{initial}}$) ενεργειακών επιπέδων του μορίου.

Βασικό σημείο του μηχανισμού της ανελαστικής σκέδασης είναι η διέγερση του μορίου από την αρχική του (initial) ενεργειακή στάθμη έως ένα "εικονικό" (virtual) ενεργειακό επίπεδο, από το οποίο το μόριο μεταπίπτει στην τελική (final) ενεργειακή στάθμη· οι δύο στάθμες αυτές, όμως, δεν ταυτίζονται. Επομένως, η ενέργεια του σκεδαζόμενου σωματιδίου και κατ' επέκτασιν η συχνότητα και το μήκος κύματός του διαφέρουν από τα χαρακτηριστικά του αρχικού φωτονίου. Αυτή η διαφορά στη συχνότητα, καλούμενη μετατόπιση Raman (Raman shift), είναι χαρακτηριστική για κάθε μόριο και, όπως θα εξηγηθεί παρακάτω, χρησιμεύει στον υπολογισμό του μήκους κύματος του σκεδαζόμενου κατά Raman φωτονίου.

2.1 Η σκέδαση της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα

Η ενέργεια του σκεδαζόμενου φωτονίου, εφόσον δεν ταυτίζεται με την ενέργεια του προσπίπτοντος, μπορεί να είναι είτε μικρότερη –οπότε μέρος αυτής αξιοποιείται στη διέγερση του μορίου– είτε μεγαλύτερη –στην οποία περίπτωση το μόριο ήταν ήδη σε διεγερμένη κατάσταση και με τη σκέδαση αποδιεγείρεται. Πιο συγκεκριμένα, δύο είναι οι κύριες ενδεχόμενες “διαδρομές” που μπορεί να ακολουθήσει ο μηχανισμός:

- ✧ Στην πρώτη περίπτωση, η αρχική ενεργειακή στάθμη ταυτίζεται με την στάθμη της βασικής ταλαντωτικής/περιστροφικής κατάστασης του μορίου και έτσι, μεταπίπτοντας από το εικονικό ενεργειακό επίπεδο, το μόριο μεταβαίνει στη τελική του ενεργειακή στάθμη που αντιστοιχεί σε διεγερμένη ταλαντωτική/περιστροφική κατάσταση. Κατ’ αποτέλεσμα, το εκπεμπόμενο φωτόνιο χαρακτηρίζεται από μικρότερη ενέργεια της απορροφώμενης (Raman Stokes), ώστε για την ενεργειακή διαφορά να ισχύει:

$$\Delta E_{\text{Stokes}} = h (\nu_0 - \nu_S) \quad \{2.9\}$$

και

$$\nu_S < \nu_0 \ \& \ \lambda_S > \lambda_0 \quad \{2.10\}$$

- ✧ Στην δεύτερη περίπτωση αντίθετα, η αρχική στάθμη αντιστοιχεί σε διεγερμένη ταλαντωτική/περιστροφική κατάσταση και το μόριο μεταβαίνει τελικά στη βασική κατάσταση με αποτέλεσμα το φωτόνιο να έχει μεγαλύτερη ενέργεια από όση απορροφήθηκε (Raman Anti-Stokes). Για την ενεργειακή διαφορά ισχύει:

$$\Delta E_{\text{Anti-Stokes}} = h (\nu_{AS} - \nu_0) \quad \{2.11\}$$

και

$$\nu_{AS} > \nu_0 \ \& \ \lambda_{AS} < \lambda_0 \quad \{2.12\}$$

όπου h η σταθερά του Planck, ν_0 είναι η συχνότητα του προσπίπτοντος φωτονίου (συχνότητα διέγερσης), ν_S και ν_{AS} είναι οι συχνότητες των σκεδαζόμενων φωτονίων κατά Stokes και Anti-Stokes, λ_S και λ_{AS} είναι τα μήκη κύματος των σκεδαζόμενων φωτονίων κατά Stokes και Anti-Stokes και λ_0 είναι το μήκος κύματος διέγερσης.

Οι επιτρεπτές μεταβάσεις μεταξύ ταλαντωτικών και περιστροφικών ενεργειακών επιπέδων, παρότι πολυάριθμες, είναι συγκεκριμένες και υπαγορεύονται από τους κανόνες επιλογής⁴⁶ που φαίνονται στις στήλες 2 και 3 του Πίνακα 2—1, στην δε Εικόνα 2—4, επί παραδείγματι, απεικονίζονται οι επιτρεπτές μεταβάσεις για το μόριο του αζώτου N_2 . Έτσι, τα είδη των σκεδάσεων είναι τρία:

- ✧ καθαρά ταλαντωτικές (pure vibrational Raman scattering) με $\Delta u = \pm 1$, $\Delta J = 0$,
- ✧ καθαρά περιστροφικές (pure rotational Raman scattering) με $\Delta u = 0$, $\Delta J = \pm 2$, και
- ✧ ταλαντωτικές – περιστροφικές (vibrational – rotational Raman scattering) με $\Delta u = \pm 1$, $\Delta J = \pm 2$.

⁴⁶ Οι κανόνες αυτοί χαρακτηρίζουν “τα διατομικά μόρια αερίου που έχουν μηδενική ηλεκτρονιακή γωνιακή στροφορμή γύρω από τον διαπυρηνικό άξονα”.

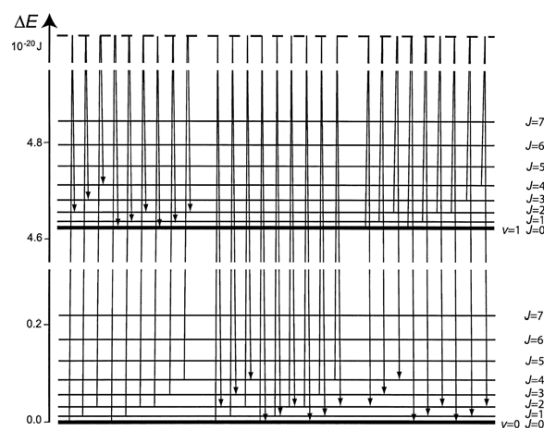
2.1 Η σκέδαση της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα

κάθε ένα από αυτά μπορεί είτε να ανήκει στην ομάδα Raman Stokes είτε στην ομάδα Raman Anti-Stokes. Επομένως, υπάρχουν έξι πιθανές ομάδες διαφορετικών επιτρεπτών μεταπτώσεων και, πιο διαδεδομένα στη βιβλιογραφία, τρεις κλάδοι **-S** ($\Delta J = +2$), **Q** ($\Delta J = 0$) και **O** ($\Delta J = -2$), οι οποίοι αφορούν μόνο την περίπτωση της ταλαντωτικής/περιστροφικής μετάπτωσης (στήλη 1).

Πίνακας 2—1. Οι κβαντικοί κανόνες επιλογής των επιτρεπτών μεταβάσεων μεταξύ ταλαντωτικών και περιστροφικών ενεργειακών επιπέδων.

S	$\Delta u = 1$	$\Delta J = + 2$	Vibrational – Rotational Stokes
Q	$\Delta u = 1$	$\Delta J = 0$	Vibrational Stokes
O	$\Delta u = 1$	$\Delta J = - 2$	Vibrational – Rotational Stokes
-	$\Delta u = 0$	$\Delta J = + 2$	Rotational Stokes
-	$\Delta u = 0$	$\Delta J = 0$	Rayleigh
-	$\Delta u = 0$	$\Delta J = - 2$	Rotational Anti-Stokes
S	$\Delta u = -1$	$\Delta J = + 2$	Vibrational – Rotational Anti-Stokes
Q	$\Delta u = -1$	$\Delta J = 0$	Vibrational Anti-Stokes
O	$\Delta u = -1$	$\Delta J = - 2$	Vibrational – Rotational Anti-Stokes

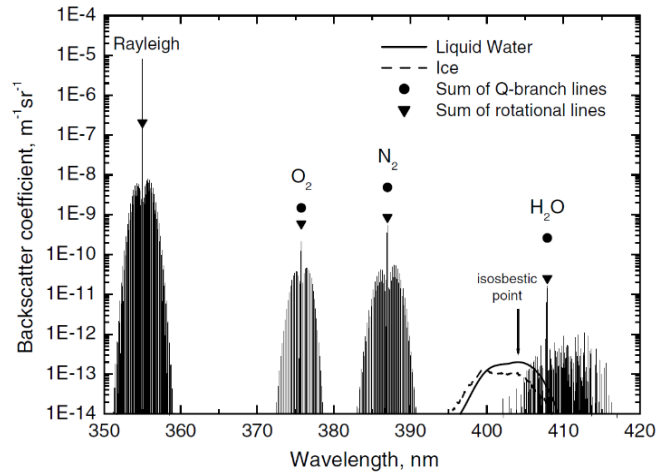
Κάθε μία από αυτές τις μεταπτώσεις οδηγεί σε διαφορετική μεταβολή συχνότητας (μετρούμενη σε μονάδες cm^{-1}), και έτσι, για δεδομένη θερμοκρασία, δημιουργείται ένα φάσμα από τις νέες συχνότητες ν_S και ν_{AS} που κατανέμεται γύρω και εκατέρωθεν της συχνότητας διέγερσης ν_0 και αποτελείται από: α) μια κατανομή συχνοτήτων συγκεντρωμένη εγγύς της συχνότητας ν_0 που οφείλεται στις καθαρά περιστροφικές μεταπτώσεις και β) αλληλουχίες των κλάδων SQO εκατέρωθεν της κεντρικής κατανομής, με τη σειρά που υποδεικνύει ο Πίνακας 2—1.



Εικόνα 2—4. Επιτρεπτές μεταπτώσεις μεταξύ ταλαντωτικών και περιστροφικών ενεργειακών επιπέδων κατά την ανελαστική σκέδαση Raman για το μόριο του αζώτου N_2 . Στην εικόνα διακρίνονται τρεις ομάδες μεταπτώσεων: καθαρά ταλαντωτικές & ταλαντωτικές/περιστροφικές μεταπτώσεις Raman Stokes, καθαρά περιστροφικές μεταπτώσεις Raman Stokes & Raman Anti-Stokes, καθώς και ελαστικές σκεδάσεις Rayleigh (κέντρο), και καθαρά ταλαντωτικές & ταλαντωτικές/περιστροφικές μεταπτώσεις Raman Anti-Stokes (δεξιά)⁴⁷.

⁴⁷ Weitkamp C., Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere, Springer, 2005, σελ. 246.

2.1 Η σκέδαση της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα



Εικόνα 2—5. Η κατανομή των ταλαντωτικών/περιστροφικών μεταπτώσεων Raman για τα μόρια του οξυγόνου, αζώτου και νερού (σε υγρή και κρυσταλλική μορφή) σε θερμοκρασία 300 K και για μήκος κύματος διέγερσης $\lambda_0 = 355$ nm. Στη εικόνα φαίνονται με τη σειρά: οι καθαρά περιστροφικές μεταπτώσεις Stokes & Anti-Stokes γύρω από το $\lambda_0 = 355$ nm, και έπειτα οι κλάδοι SQO Stokes για τα διαφορετικά μόρια.⁴⁸

Με τον υπολογισμό της διαφορικής ενεργού διατομής κάθε είδους σκέδασης μπορεί να υπολογιστεί η "ένταση" ενός είδους έναντι ενός άλλου, παίρνοντας το λόγο μεταξύ τους. Οι διαφορικές ενεργές διατομές ορίζονται ως εξής:

❖ Rayleigh:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Ray}} = k_{\tilde{\nu}} \tilde{\nu}_0^4 \left(\alpha^2 + \frac{7}{180} \gamma^2\right) \quad \{2.13\}$$

❖ καθαρά περιστροφική Raman:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{RR}} = k_{\tilde{\nu}} \tilde{\nu}_0^4 \left(\frac{7}{60} \gamma^2\right) \quad \{2.14\}$$

❖ ταλαντωτική/περιστροφική Raman Stokes:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{VRR}}^{\text{Stokes}} = k_{\tilde{\nu}} (\tilde{\nu}_0 - \tilde{\nu}_{\text{vib}})^4 \frac{b_u^2}{1 - \exp\left(\frac{hc\tilde{\nu}_{\text{vib}}}{k_{\beta}T}\right)} \left(\alpha'^2 + \frac{7}{45} \gamma'^2\right) \quad \{2.15\}$$

❖ ταλαντωτική/περιστροφική Raman Anti-stokes:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{VRR}}^{\text{Anti-Stokes}} = k_{\tilde{\nu}} (\tilde{\nu}_0 + \tilde{\nu}_{\text{vib}})^4 \frac{b_u^2}{-1 + \exp\left(\frac{hc\tilde{\nu}_{\text{vib}}}{k_{\beta}T}\right)} \left(\alpha'^2 + \frac{7}{45} \gamma'^2\right) \quad \{2.16\}$$

όπου:

$$b_u^2 = \frac{h}{8\pi^2 c \tilde{\nu}_{\text{vib}}} \quad \& \quad k_{\tilde{\nu}} = \frac{\pi^2}{\epsilon_0^2} \quad \{2.17\}$$

⁴⁸ Βλ. *Weitkamp C.*, ό.π., σελ. 252.

2.1 Η σκέδαση της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα

και $\tilde{\nu}_{\text{vib}}$ είναι η συχνότητα ταλάντωσης του μορίου, u ο κβαντικός αριθμός ταλάντωσης, α η πολωσιμότητα και γ η ανισοτροπία πολωσιμότητας του μορίου, ενώ α' και γ' είναι οι παράγωγοι ως προς την κανονική συντεταγμένη της ταλάντωσης στη θέση ισορροπίας.

Στη σχέση 2.18 δίνεται η σχετική ένταση μεταξύ των ταλαντωτικών/περιστροφικών σκεδάσεων Raman Stokes και Anti-Stokes:

$$\frac{\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{VRR}}^{\text{Stokes}}}{\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{VRR}}^{\text{Anti-Stokes}}} = \frac{(\tilde{\nu}_0 - \tilde{\nu}_{\text{vib}})^4}{(\tilde{\nu}_0 + \tilde{\nu}_{\text{vib}})^4} \exp\left(\frac{hc\tilde{\nu}_{\text{vib}}}{k_{\beta}T}\right) \quad \{2.18\}$$

Βάσει όσων έχουν ειπωθεί, η πιθανότητα να συμβεί η ανελαστική σκέδαση Raman, δηλαδή να προσπέσει φωτόνιο σε μόριο και να μην απορροφηθεί ολόκληρη η ενέργειά του αλλά μέρος αυτής είναι μικρότερη και έτσι η ενεργός διατομή του φαινομένου της σκέδασης Raman είναι 3 τάξεις μεγέθους ασθενέστερη από τη σκέδαση Rayleigh. Επιπλέον, σε σταθερές ατμοσφαιρικές συνθήκες, τα μόρια της ατμόσφαιρας και γενικά η ατμοσφαιρική ύλη βρίσκονται στη βασική και όχι σε διεγερμένη κατάσταση. Κατ' επέκτασιν, η εμφάνιση της σκέδασης Raman Anti-Stokes είναι ακόμα πιο ασθενής ενώ μέσω της εξίσωσης 2.18 προκύπτει ότι η έντασή της είναι 3-6 τάξεις μεγέθους πιο μικρή από τη Raman Stokes⁴⁹.

Στις εφαρμογές lidar, οι μετρήσεις κατά την πλειονότητά τους λαμβάνουν χώρα, ιδανικά, σε χρόνο που ο καιρός είναι σταθερός⁵⁰, ώστε να αναμένεται έτσι η καταγραφή των φαινομένων της σκέδασης Stokes. Με δεδομένη τη μετατόπιση Raman Stokes $\Delta\nu$ για ένα μόριο:

$$\Delta\nu = \nu_L - \nu_R = c\left(\frac{1}{\lambda_L} - \frac{1}{\lambda_R}\right) \quad \{2.19\}$$

και το μήκος κύματος λ_L της ακτινοβολίας laser με την οποία θα αλληλεπιδράσει το μόριο, μπορεί να υπολογιστεί το μήκος κύματος λ_R της σκέδασης Raman Stokes με την εξής σχέση:

$$\lambda_R = \frac{\lambda_L}{1 - \lambda_L \Delta\nu / c}, c = 1 \quad \{2.20\}$$

Κατόπιν αντικατάστασης του μήκους κύματος λ_L και της μετατόπισης Raman $\Delta\nu$ για το μόριο του αζώτου N_2 (αέριο με γνωστή και σταθερή συγκέντρωση στην ατμόσφαιρα) ή για το μόριο του νερού H_2O (αέριο με μεταβλητή συγκέντρωση που προσελκύει ερευνητικό ενδιαφέρον), προκύπτουν τα

⁴⁹ Βλ. *Weitkamp C.*, ό.π., σελ. 248.

⁵⁰ Σε αντίθετο παράδειγμα, κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας η ατμόσφαιρα φέρει ηλεκτρικό φορτίο, κάτι που οδηγεί στη θέαση των αστραπών. Σε τέτοιες συνθήκες είναι λογικό να αναμένει κανείς μεγαλύτερη μερίδα ατμοσφαιρικών μορίων να βρίσκεται σε κάποια διεγερμένη κατάσταση, αντί για την βασική, και την ενεργό διατομή της σκέδασης Raman Anti-Stokes λιγότερο ασθενή, σε σχέση με τις τιμές των μεγεθών σε συνθήκες σταθερού καιρού χωρίς νεφοκάλυψη. Ισχύει, όμως, ότι δεν λαμβάνονται μετρήσεις με lidar σε βροχερό καιρό λόγω της ταχείας εξασθένησης της δέσμης.

2.1 Η σκέδαση της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα

αντίστοιχα μήκη κύματος λ_R^{51} . Με αυτές τις πληροφορίες και αναλόγως την ατμοσφαιρική μελέτη –καθώς και το κόστος– μια διάταξη μπορεί να σχεδιαστεί έτσι, ώστε να ανιχνεύει μία ή περισσότερες ακτινοβολίες Raman.

2.1.3 Διάδοση της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα

Συνοψίζοντας, ο συνδυασμός των φαινομένων απορρόφησης και σκέδασης οδηγούν στην εξασθένηση της ακτινοβολίας κατά τη διάδοσή της μέσα στην ατμόσφαιρα είτε πρόκειται για την ηλιακή ακτινοβολία που «πλημμυρίζει» τον ουράνιο θόλο⁵² είτε για παλμούς laser υψηλής κατευθυντικότητας και ισχύος. Στα φαινόμενα σκέδασης, τα φωτόνια επανεκπέμπονται με την ίδια ενέργεια αλλά προς όλες τις κατευθύνσεις, εξασθενίζοντας τη δέσμη από τη σκοπιά της έντασης (ροή φωτονίων σε επιφάνεια). Στα φαινόμενα απορρόφησης, η ενέργεια των φωτονίων μετατρέπεται σε άλλης μορφής ενέργεια είτε εξολοκλήρου –χωρίς καθόλου σκέδαση– είτε εν μέρει, με παράλληλη σκέδαση φωτονίων μικρότερης ενέργειας (όπως στη σκέδαση Raman Stokes).

Η ένταση της ακτινοβολίας κατά τη διάδοσή της μειώνεται εκθετικά και εξαρτάται από το συντελεστή εξασθένησης και την απόσταση που διανύεται, όπως περιγράφεται από το νόμο των Beer – Lambert:

$$I(z, \lambda) = I(0, \lambda) \exp\left(-\int_0^z \alpha(z', \lambda) dz'\right) \quad \{2.21\}$$

όπου $I(0, \lambda)$ και $I(z, \lambda)$ η ένταση της ακτινοβολίας μήκους κύματος λ στο έδαφος και σε ύψος z και $\alpha(z, \lambda)$ ο συντελεστής εξασθένησης (extinction coefficient) της ακτινοβολίας σε ύψος z .

Στενά συνδεδεμένες με το νόμο αυτό είναι οι έννοιες της διαπερατότητας (transmissivity) μη ομοιογενούς ατμοσφαιρικού στρώματος:

$$T_\lambda(z_1, z_2) = \exp\left(-\int_{z_1}^{z_2} \alpha(\lambda, z') dz'\right) \quad \{2.22\}$$

και του οπτικού πάχους (optical thickness):

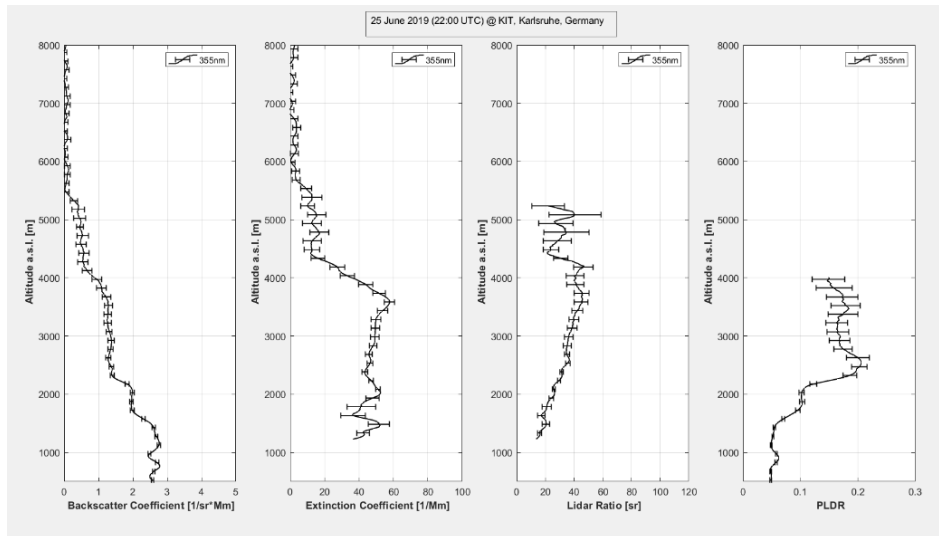
$$\tau(z_1, z_2) = \int_{z_1}^{z_2} \alpha(z', \lambda) dz' \quad \{2.23\}$$

⁵¹ Για μήκος κύματος εκπομπής $\lambda_L=355$ nm προκύπτουν $\lambda_R = 387$ nm και $\lambda_R = 408$ nm για το άζωτο ($\Delta\nu = 2330.7$ cm⁻¹) και το νερό ($\Delta\nu = 3652$ cm⁻¹), αντίστοιχα. Στη διάταξη της παρούσας εργασίας αποστέλλεται $\lambda_L=355$ nm και από τις οπισθοσκεδάσεις Raman ανιχνεύεται το $\lambda_R = 387$ nm, όπως παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 3.

⁵² Η στερεά γωνία της ηλιακής ακτινοβολίας που βάνει προς την επιφάνεια της Γης είναι τόσο μικρή –εξαιτίας της διαφοράς μεγέθους Ηλίου-Γης– ώστε, κατά τον υπολογισμό της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας που καταφτάνει στη Γη, να μην λαμβάνεται υπόψιν το σφαιρικό της σχήμα αλλά να θεωρείται αυτή προσεγγιστικά ως δίσκος.

2.2 Οπτικές Ιδιότητες Αερολυμάτων

Η στοιχειώδης μοριακή σύνθεση της ατμόσφαιρας, η συγκέντρωση των μορίων και η κατανομή τους καθ' ύψος παγιώθηκε στη βιβλιογραφία δεκαετίες πριν, και έτσι, με τον διαχωρισμό της συνεισφοράς των μορίων στις οπτικές ιδιότητες που θα παρουσιαστούν, διευκολύνεται η εστίαση στο αντικείμενο του ενδιαφέροντος, που δεν είναι άλλο από την επιρροή των αιωρούμενων σωματιδίων σ' αυτές.



Γράφημα 2-1. Παράδειγμα απεικόνισης τεσσάρων οπτικών ιδιοτήτων και τα γραφήματά τους καθ' ύψος. Παρουσιάζονται ο συντελεστής οπισθοσκέδασης, ο συντελεστής εξασθένησης, ο λόγος lidar και ο σωματιδιακός γραμμικός λόγος αποπόλωσης της ακτινοβολίας.

2.2.1 Συντελεστές Οπισθοσκέδασης και Εξασθένησης (Backscatter & Extinction coefficients)

Στην ενότητα 2.1 έγινε αναφορά στα φαινόμενα της οπισθοσκέδασης και της εξασθένησης της ακτινοβολίας. Τα μεγέθη αυτά περιγράφονται από τους συντελεστές β και α , αντίστοιχα, και εκφράζονται ποιοτικά από τις εξισώσεις που ακολουθούν:

$$\beta(z, \lambda) = \beta_{\text{mol}}(z, \lambda) + \beta_{\text{aer}}(z, \lambda) \quad \{2.24\}$$

$$\begin{aligned} \alpha(z, \lambda) &= \alpha_{\text{mol}}(z, \lambda) + \alpha_{\text{aer}}(z, \lambda) = \\ &= \alpha_{\text{mol}}^{\text{abs}}(z, \lambda) + \alpha_{\text{mol}}^{\text{sca}}(z, \lambda) + \alpha_{\text{aer}}^{\text{abs}}(z, \lambda) + \alpha_{\text{aer}}^{\text{sca}}(z, \lambda) \end{aligned} \quad \{2.25\}$$

Η εξασθένηση και η οπισθοσκέδαση της δέσμης οφείλονται σε αμφότερα τα μόρια και τα ΑΣ, όπως αντικατοπτρίζεται στις εξισώσεις 2.24 και 2.25, ωστόσο αυτές οι δύο ομάδες δεν συνεισφέρουν εξίσου και όχι απαραίτητα με την ίδια ένταση καθ' ύψος. Τα αερολύματα αλληλεπιδρούν εντονότερα με την ακτινοβολία, ενώ, όπως εξηγήθηκε στο κεφάλαιο 1, η παρουσία τους δεν ανιχνεύεται το ίδιο έντονα σε όλο το ύψος της τροπόσφαιρας λόγω μεταξύ άλλων της βαρυτικής έλξης, των φαινομένων απομάκρυνσής τους ή των μετεωρολογικών συνθηκών. Επομένως, από κάποιο ύψος και άνω αναμένεται η αποκλειστική συνεισφορά των μορίων στην οπισθοσκέδαση του σήματος lidar.

Η εύρεση αυτού του ύψους, το οποίο δεν αντιστοιχεί απαραίτητα σε ένα απόλυτο σημείο αλλά ως επί το πλείστον σε υψομετρικό «παράθυρο», συνιστά μια πρόσθετη πληροφορία η οποία είναι αναγκαία για τη βαθμονόμηση του συστήματος ως προς την οπισθοσκέδαση (backscatter calibration). Το σύστημα, έτσι, «γνωρίζει» με μεγαλύτερη ακρίβεια (άρα με μικρότερη απόκλιση) σε ποιο ύψος η αερολυματική οπισθοσκέδαση β_{aer} πρέπει να ελαχιστοποιείται. Ο λόγος οπισθοσκέδασης (backscatter ratio) ορίζεται ως εξής:

$$BR(z, \lambda_L) = \frac{\beta(z, \lambda_L)}{\beta_{mol}(z, \lambda_L)} = 1 + \frac{\beta_{aer}(z, \lambda_L)}{\beta_{mol}(z, \lambda_L)} \quad \{2.26\}$$

Για ύψος αναφοράς (reference height) z_{ref} η συνεισφορά των αερολυμάτων είναι μηδενική και άρα η οπισθοσκέδαση από το ύψος αυτό και πάνω οφείλεται αποκλειστικά και μόνο στα μόρια της ατμόσφαιρας. Στην περίπτωση αυτή ισχύει: $BR(z_{ref}, \lambda_L) = 1$.

2.2.2 Λόγος Lidar (Lidar ratio)

Ο λόγος lidar (LR) ορίζεται ως ο λόγος της εξασθένησης –η οποία οφείλεται στην απορρόφηση και στη σκέδαση της ακτινοβολίας σε όλες τις κατευθύνσεις– προς την οπισθοσκέδαση της ακτινοβολίας, διαχωρίζεται δε σε μοριακό λόγο lidar (εξ. 2.27) και σε αερολυματικό (εξ. 2.28). Ο μοριακός λόγος έχει γνωστή και σταθερή τιμή, ενώ ο αερολυματικός λόγος είναι χαρακτηριστικός του είδους των αιωρούμενων σωματιδίων, επειδή τα μεγέθη της εξασθένησης και της οπισθοσκέδασης εξαρτώνται άμεσα από την κατανομή μεγέθους τους, τη χημική σύσταση και το σχήμα τους⁵³.

$$LR_{aer} = \frac{\alpha_{aer}}{\beta_{aer}} \quad \{2.27\}$$

$$LR_{mol} = \frac{\alpha_{mol}}{\beta_{mol}} = \frac{8\pi}{3} \quad \{2.28\}$$

Το LR προσφέρει ένα ποιοτικό μέτρο σύγκρισης της εξασθένησης που υφίσταται η δέση και της “επιβίωσης” αυτής, στο μέτρο που τα οπισθοσκεδαζόμενα φωτόνια καταγράφονται με επιτυχία από τη διάταξη. Ο συνδυασμός της πληροφορίας του LR με την ιδιότητα της αποπόλωσης χρησιμοποιείται για την εξαγωγή συμπεράσματος ως προς την ταυτότητα των ΑΣ.

2.2.3 Συντελεστής Αποπόλωσης δ (Depolarization ratio)

Το φαινόμενο της αποπόλωσης λαμβάνει χώρα κατά τη σκέδαση της ακτινοβολίας αμφότερα από μόρια και από σωματίδια, είναι δε ιδιαιτέρως σημαντικό για την ταυτοποίηση του είδους των σωματιδίων που συμμετέχουν στη σκέδαση. Η βασική αρχή της ιδιότητας αυτής έχει ως εξής: κατά την πρόσπτωση πολωμένης ακτινοβολίας (όπως συμβαίνει στην περίπτωσή μας, όπου

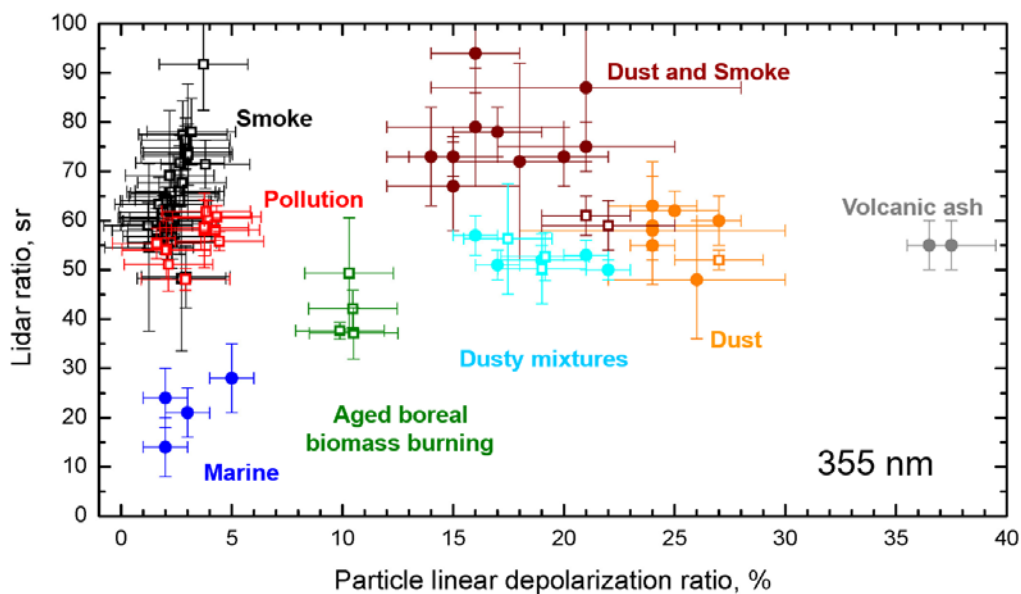
⁵³ Ansmann A. et al., Combined Raman – Elastic Backscatter LIDAR for Vertical Profiling of Moisture, Aerosol Extinction, Backscatter and LIDAR Ratio, Appl. Phys. B55, 18-28 (1992)

2.2 Οπτικές Ιδιότητες Αερολυμάτων

ακτινοβολείται η ατμόσφαιρα με πλήρως πολωμένη δέσμη laser) σε σωματίδιο ακανόνιστου σχήματος (π.χ. ερημική σκόνη), η ακτινοβολία σκεδάζεται με ποσοστιαία μεταβολή της κατεύθυνσης της πόλωσής της και το φαινόμενο καλείται –εύστοχα– αποπόλωση της δέσμης. Αντίθετα, κατά τη σκέδαση από σφαιρικό σωματίδιο (π.χ. υδροσταγονίδιο) παρατηρείται αμελητέα μεταβολή στην πόλωση.

$$\delta = \frac{P_{\perp}}{P_{\parallel}} \quad \{2.29\}$$

Περισσότερα για την τεχνική της αποπόλωσης που εφαρμόζεται στα συστήματα lidar αναφέρονται παρακάτω, στην ενότητα 2.3.5.



Γράφημα 2-2. Τα είδη των αερολυμάτων παρουσιάζονται οργανωμένα σε πυκνές ομάδες (clusters) με βάση τις οπτικές ιδιότητες Λόγος Lidar (LR) και Σωματιδιακός Γραμμικός Λόγος Αποπόλωσης (PLDR).⁵⁴

2.2.4 Εκθέτης Ångström (Ångström exponent)

Το αερολυματικό οπτικό πάχος (aerosol optical depth - AOD) ορίζεται με τη βοήθεια ζεύγους μηκών κύματος και ο εκθέτης Ångström αποτελεί ένδειξη της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων που σκεδάζουν την ακτινοβολία⁵⁵. Ισχύει επομένως:

$$\tau = b \lambda^{-AE} \quad \{2.30\}$$

όπου: τ το AOD για μήκος κύματος λ σε μm και b το AOD για μήκος κύματος $\lambda = 1 \mu\text{m}$ (Ångström turbidity coefficient). Με την επίλυση της εξ. ως προς τον εκθέτη Ångström, τα αερολυματικά οπτικά πάχη για ζεύγος μηκών κύματος λ_1 και λ_2 δίνονται από την παρακάτω σχέση:

⁵⁴ Wandinger U. et al., HETEAC: THE AEROSOL CLASSIFICATION MODEL FOR EARTHCARE, EPJ Web of Conferences 119, 01004 (2016).

⁵⁵ Wagner F., Silva M., Some considerations about exponent distributions, Atmos. Chem. Phys., 8, 481–489, 2008.

$$AE\left(z, \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right) = - \frac{\ln\left(\frac{\tau_1(z, \lambda_1)}{\tau_2(z, \lambda_2)}\right)}{\ln\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)} \quad \{2.31\}$$

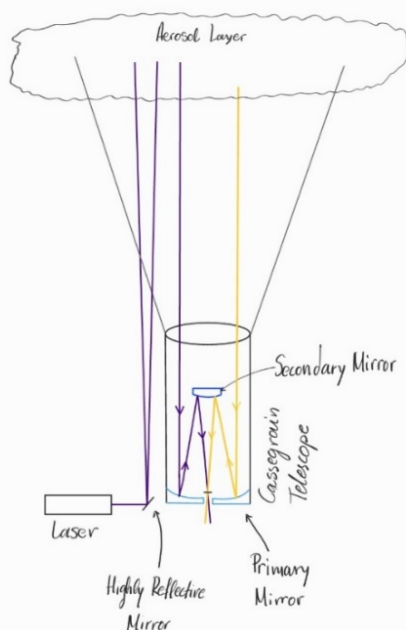
Στα μεγάλα σωματίδια θεωρείται ότι αντιστοιχεί εκθέτης ίσος με το μηδέν, οι τιμές του οποίου αυξάνονται με τη μείωση της σωματιδιακής διαμέτρου. Για τα ζεύγη μηκών κύματος 355/387 και 532/607, δηλαδή για ζεύγος που προκύπτει από την ελαστική και ανελαστική οπισθοσκέδαση του ίδιου μήκους κύματος ακτινοβολίας, ο εκθέτης μπορεί να θεωρηθεί ίσος με τη μονάδα.

2.3 Τεχνικές lidar

Πριν γίνει αναλυτική περιγραφή των επιμέρους δομικών στοιχείων ενός lidar στο κεφάλαιο 3, σκόπιμη κρίνεται η σκιαγράφιση της βασικής λειτουργίας των συστημάτων και η σύντομη αναφορά στα είδη των διατάξεων από γεωμετρική σκοπιά.

2.3.1 Αρχές λειτουργίας και είδη συστημάτων lidar

Η δέσμη laser κατευθύνεται στην αέρια μάζα, σκεδάζεται ελαστικά και ανελαστικά από τα αερολύματα και τα μόρια της ατμόσφαιρας. Έπειτα το τηλεσκόπιο, στο μέτρο που προσπίπτουν μέσα στο πεδίο όρασής του (Field of View), συλλέγει την οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία – παρεμπιπτόντως δε και την ακτινοβολία υποβάθρου⁵⁶. Στόχος της διάταξης είναι η αντιστοίχιση των φωτονίων, που καταγράφονται ανά χρονικά διαστήματα μερικών νανοδευτερολέπτων, με την υψομετρική προέλευση των σκεδαστών τους, εφόσον ληφθεί ως δεδομένο ότι ο χρόνος μεταξύ των καταγραφών αντιστοιχεί στη διαδρομή των φωτονίων από το laser μέχρι το ύψος όπου βρίσκεται ο σκεδαστής και πίσω στο τηλεσκόπιο.



Εικόνα 2—6. Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας μιας μονοστατικής - διαξονικής διάταξης Lidar.

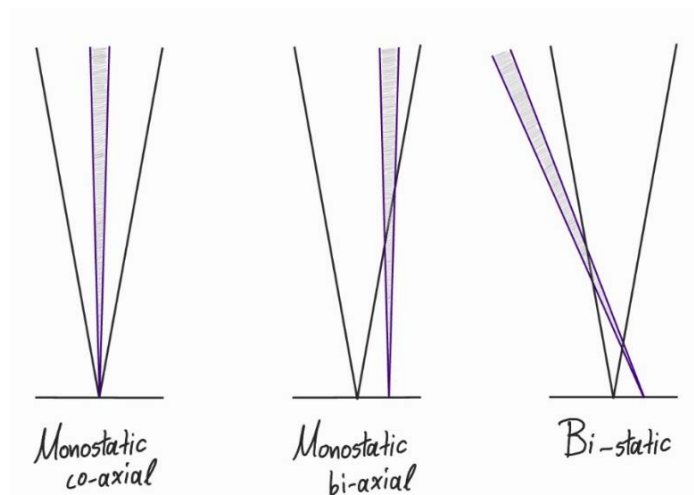
Όπως θα εξηγηθεί κατοπινά, ανεξαρτήτως των φυσικών παραμέτρων, όπως η οπισθοσκέδαση και η εξασθένηση της δέσμης που δεν ελέγχονται από τον ερευνητή, σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα της διάταξης παίζει ο γεωμετρικός της σχεδιασμός. Στην Εικόνα 2—7 αναπαρίστανται τα τρία διαφορετικά συστήματα lidar, τα οποία διαφέρουν ως προς τον τρόπο εισαγωγής της δέσμης στο πεδίο όρασης του τηλεσκοπίου. Στη μελέτη αυτή χρησιμοποιείται μονοστατικό-διαξονικό lidar, με τη δέσμη να εισέρχεται βαθμιαία στο FoV του

⁵⁶ Για τις πρωινές μετρήσεις αυτή η ακτινοβολία αφορά στα φωτόνια του ήλιου ενώ αντίστοιχα, κατά τις βραδινές μετρήσεις αφορά στα σεληνιακά φωτόνια (ενδεχομένως και από άλλες φωτεινές πηγές). Όπως θα εξηγηθεί παρακάτω, η συνεισφορά της ακτινοβολίας υποβάθρου θα εξαλειφθεί κατά την επεξεργασία των σημάτων.

2.3 Τεχνικές lidar

τηλεσκοπίου και την πλήρη επικάλυψή τους (full overlap) να επιτυγχάνεται, όχι εξαρχής, όπως στο μονοστατικό-ομοαξονικό lidar, αλλά σε απόσταση μερικών εκατοντάδων μέτρων. Στην τρίτη περίπτωση, η δέσμη εισέρχεται στο FoV και εξέρχεται από αυτό.

Είναι φανερό ότι ο σχεδιαστικός στόχος της διάταξης είναι να επιτευχθεί πλήρης επικάλυψη, όσο γίνεται πιο κοντά στο lidar, μειώνοντας κατάλληλα την απόσταση μεταξύ των αξόνων laser και του τηλεσκοπίου. Άλλος ένας ρυθμιζόμενος –και δαπανηρός– παράγοντας είναι το μέγεθος του τηλεσκοπίου, αφού κατά προσέγγιση ένα μεγαλύτερο τηλεσκόπιο θα έχει μεγαλύτερο πεδίο όρασης, επομένως η πλήρης επικάλυψη θα επιτευχθεί υψομετρικά χαμηλότερα, ενώ παράλληλα θα συλλεγεί περισσότερη οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία. Ωστόσο, εκτός από τον οικονομικό παράγοντα, πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν και ο τρόπος χρήσης της διάταξης – για παράδειγμα, για ένα κινητό lidar που μεταφέρεται με βαν μετρίου μεγέθους, το μεγάλο τηλεσκόπιο θα παρουσίαζε χωροταξικές δυσκολίες. Αντιθέτως, για ένα lidar που επιτρέπεται να πάρει τις διαστάσεις ενός δωματίου, θα ήταν απολύτως απαραίτητο.



Εικόνα 2—7. Σχηματική αναπαράσταση της γεωμετρίας τριών τύπων lidar: μονοστατικό-ομοαξονικό σύστημα, μονοστατικό - διαξονικό σύστημα και διστατικό σύστημα.

2.3.2 Η ελαστική εξίσωση Lidar

Το σήμα που λαμβάνεται κατά τη λήψη μετρήσεων δίνεται από την εξίσωση Lidar στην αναλυτική της μορφή. Όπως περιγράφεται στην εξίσωση 2.32, η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος συναρτήσει του ύψους z και του μήκους κύματος λ εξαρτάται από την απόδοση της διάταξης στην λήψη και καταγραφή των φωτονίων (δηλαδή οπτική-ηλεκτρονική απόδοση και χρονική –κατ' επέκταση δε και χωρική– διακριτική ικανότητα με την οποία καταγράφεται το σήμα lidar), από την επικάλυψη της δέσμης laser και του τηλεσκοπικού πεδίου οράσεως, από την οπισθοσκέδαση της ακτινοβολίας στο συγκεκριμένο ύψος, και, τέλος, από την διαπερατότητα της ατμόσφαιρας στο ύψος z , λαμβάνοντας υπόψιν τη διπλή «διαδρομή» της δέσμης – άρα και τη διπλή εξασθένησή της^{57,58}.

⁵⁷ Βλ. *Weitkamp C.*, ό.π., σελ. 11.

⁵⁸ *Μακροπούλου Μ., Παπαγιάννης Α.*, Εφαρμογές Laser στη Βιοϊατρική και το Περιβάλλον, 2014.

2.3 Τεχνικές lidar

$$P(z, \lambda_L) = P_0 \cdot \frac{c \Delta t}{2} \cdot \frac{A}{z^2} \cdot n(\lambda_L) \cdot O(z) \cdot \beta(z, \lambda_L) \cdot e^{-2 \int_0^z \alpha(z', \lambda_L) dz'} + P_{bg} \quad \{2.32\}$$

όπου:

- ✧ P_0 = ισχύς σήματος που αποστέλλεται
- ✧ P_{bg} = ισχύς σήματος της ακτινοβολίας υποβάθρου
- ✧ $c\Delta t/2$ = χωρική διακριτική ικανότητα
 - c = ταχύτητα του φωτός
 - Δt = χρονική διακριτική ικανότητα
 - $\frac{1}{2}$ = στον χρόνο καταγραφής, τα φωτόνια έχουν ταξιδέψει μέχρι το σκεδαστή στο ύψος z και πίσω
- ✧ A/z^2 = στερεά γωνία αποδοχής του τηλεσκοπίου σε ύψος z
 - A = επιφάνεια του τηλεσκοπικού παραθύρου
- ✧ $O(z)/z^2$ = συνάρτηση επικάλυψης τηλεσκοπικού FoV και δέσμης laser⁵⁹
 - $O(z)$ = γεωμετρικός συντελεστής επικάλυψης
- ✧ $n(\lambda_L)$ = συνάρτηση αποδοτικότητας του συστήματος για το συγκεκριμένο μήκος κύματος
- ✧ $\beta(z, \lambda_L)$ = συντελεστής ελαστικής οπισθοσκέδασης ακτινοβολίας σε ύψος z
- ✧ $\exp(-2 \int_0^z \alpha(z', \lambda_L) dz')$ = διαπερατότητα της ατμόσφαιρας έως το ύψος z και πίσω
 - $\alpha(z, \lambda_L)$ = συντελεστής εξασθένησης δέσμης σε ύψος z

2.3.2.1 Χωρική και χρονική διακριτική ικανότητα του σήματος (spatial – temporal resolution)

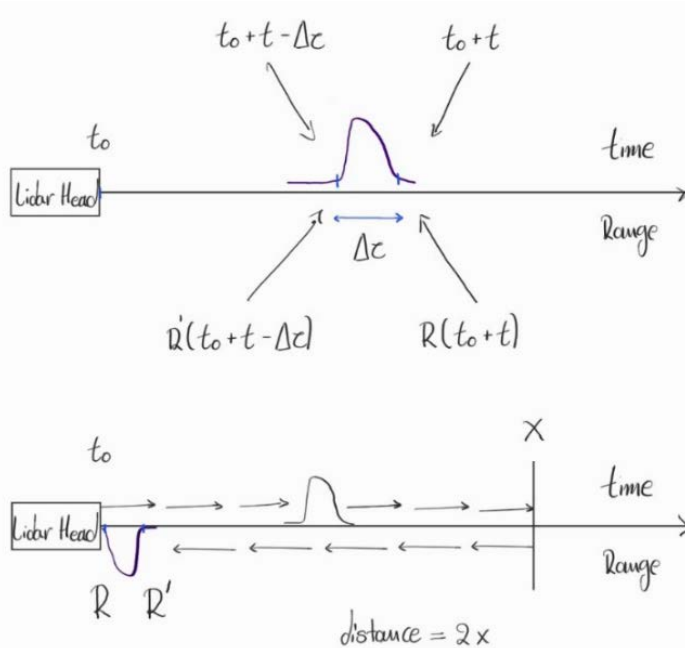
Για τον ορισμό των εννοιών της χωρικής και χρονικής διακριτικής ικανότητας είναι αναγκαία στο σημείο αυτό η αναλυτική περιγραφή της πορείας ενός παλμού μετά την έξοδό του από το lidar. Ένα φωτόνιο που διαδίδεται την ατμόσφαιρα με ταχύτητα $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, χωρίς να αλληλεπιδρά με την ύλη, μπορεί να διανύσει απόσταση 120 km (περίπου το όριο που σταματά η καταγραφή σήματος στη συγκεκριμένη διάταξη) σε 0.4 ms⁶⁰.

Η επαναληπτικότητα της πηγής laser καθορίζει τον μέγιστο χρόνο που αντιστοιχεί στην εκπομπή κάθε νέου παλμού. Για επαναληπτικότητα ίση με 20 Hz εκπέμπεται ένας παλμός κάθε 50 ms. Από την διαφορά χρόνου προκύπτει ότι, πριν την εκπομπή του επόμενου παλμού, κάθε παλμός έχει πραγματοποιήσει το ταξίδι του από και προς το lidar και έχει ήδη συμμετάσχει στα φαινόμενα απορρόφησης και σκέδασης.

⁵⁹ Ο παράγοντας $1/z^2$ εισάγεται στην εξίσωση ως μέρος της συνάρτησης επικάλυψης $O(z)/z^2$. Όμως, “συνδυάζεται” και με την επιφάνεια του τηλεσκοπικού παραθύρου A και μαζί δίνουν τη στερεά γωνία αποδοχής του τηλεσκοπίου A/z^2 . Τέλος, συμμετέχει στη παραγωγή του διορθωμένου ως προς το υψόμετρο σήματος (range corrected signal – RCS).

⁶⁰ Χρησιμοποιώντας τη σχέση $x = c t$ όπου $x = 120$ km η απόσταση και $c = 3 \cdot 10^8$ m/s η ταχύτητα του φωτός.

2.3 Τεχνικές lidar



Εικόνα 2—8. Σχηματική αναπαράσταση της διάδοσης ενός παλμού laser στην ατμόσφαιρα συναρτήσει του χρόνου και της απόστασης. Ο παλμός διαδίδεται μέχρι κάποιο υψόμετρο x , από το οποίο τα φωτόνια οπισθοσκεδάζονται και επιστρέφουν προς το τηλεσκόπιο του lidar για συλλογή. Στο χρόνο καταγραφής $t_0 + t$, ο παλμός έχει διανύσει απόσταση ίση με $2x$.

Τα επόμενα σημαντικά μεγέθη είναι η χωρική και η χρονική ακρίβεια, με τις οποίες καταγράφεται το σήμα που παράγεται από τις οπισθοσκεδάσεις κάθε παλμού ξεχωριστά. Πιο αναλυτικά, ο παλμός κατά τη διάδοσή του

αλληλεπιδρά και οπισθοσκεδάζεται συνεχώς καθ' όλο το ύψος του ταξιδιού του. Καθώς τα φωτόνια επιστρέφουν, πρώτα στη σειρά καταγράφονται αυτά που έχουν σκεδαστεί από τα πιο χαμηλά υψόμετρα, ξεκινώντας μερικές εκατοντάδες μέτρα από τη διάταξη⁶¹, και ακολουθούν όσα στο μεταξύ έχουν διαδοθεί μακρύτερα. Αν υποθεθεί η χρονική στιγμή της εκπομπής του παλμού ίση με t_0 , σε χρόνο $t_0 + t$ (όπου t είναι ο χρόνος ταξιδιού) ο παλμός έχει διαδοθεί έως κάποιο υψόμετρο x και έχει οπισθοσκεδαστεί προς το lidar, καλύπτοντας απόσταση ίση με $2x$. Λαμβανομένου υπόψιν ότι ο παλμός έχει πλάτος ίσο με Δt (χρονική διακριτική ικανότητα [ΧΡΔΙ] – temporal resolution), τότε μεταξύ της απόστασης που έχει καλυφθεί στην αρχή του παλμού και εκείνης που έχει καλυφθεί στο τέλος αυτού υπάρχει μια μικρή διαφορά ΔR (χωρική διακριτική ικανότητα [ΧΔΙ] – spatial resolution) που αντιστοιχεί στην απόσταση που καλύπτεται σε χρόνο Δt και καθορίζει ανά πόσα μέτρα καταγράφεται και καταχωρείται το λαμβανόμενο σήμα:

$$\Delta R = R(t_0 + t) - R(t_0 + t - \Delta t) = \frac{c t}{2} - \frac{c (t - \Delta t)}{2} = \frac{c \Delta t}{2} \quad \{2.33\}$$

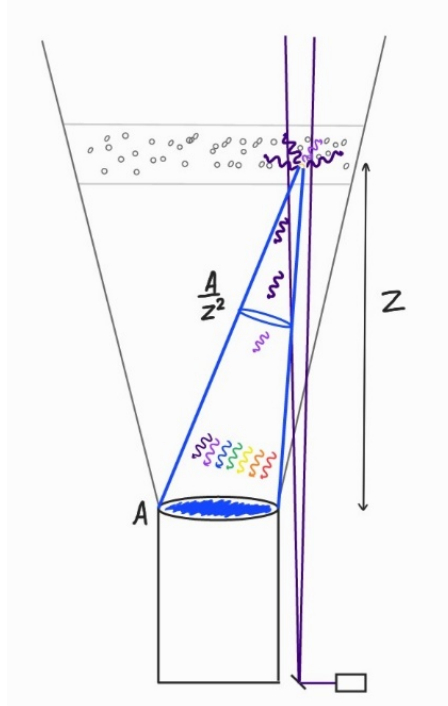
Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, αν η ΧΡΔΙ ταυτιστεί με το πλάτος του παλμού, τότε η ΧΔΙ που προκύπτει είναι η ελάχιστη ή αλλιώς η καλύτερη δυνατή. Στην πράξη όμως, η ΧΔΙ με την οποία καταγράφεται το σήμα εξαρτάται από τη συχνότητα δειγματοληψίας (Sampling Rate [MHz]) του καταγραφικού οργάνου, η οποία πλέον υποδεικνύει τη ΧΡΔΙ και σαφώς αυτή η τιμή είναι αρκετά μεγαλύτερη. Κατ' αποτέλεσμα, και η ΧΔΙ είναι μεγαλύτερη. Για παράδειγμα, με τη χρήση της εξίσωσης 2.33, προκύπτουν τα εξής:

- Πλάτος παλμού = 7 ns $\rightarrow \Delta t = 7 \text{ ns} \rightarrow \Delta R = 1.05 \text{ m}$
- Συχνότητα Δειγματοληψίας = 20 MHz $\rightarrow \Delta t = 50 \text{ ns} \rightarrow \Delta R = 7.5 \text{ m}$
- Συχνότητα Δειγματοληψίας = 40 MHz $\rightarrow \Delta t = 25 \text{ ns} \rightarrow \Delta R = 3.25 \text{ m}$

⁶¹ Όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια, τα φωτόνια που καταγράφονται πριν την επικάλυψη της δέσμης και του πεδίου οράσεως του τηλεσκοπίου, οφείλονται στην ακτινοβολία υποβάθρου που συλλέγεται μαζί με τις οπισθοσκεδάσεις.

2.3.2.2 Στερεά γωνία αποδοχής του τηλεσκοπίου

Ένα σωματίδιο που βρίσκεται σε απόσταση z από την επιφάνεια του τηλεσκοπίου, ακτινοβολούμενο με τη δέσμη laser, σκεδάζει τα φωτόνια σε όλες τις κατευθύνσεις, δηλαδή σε στερεά γωνία 4π . Θεωρούμενης της επιφάνειας A του τηλεσκοπικού παραθύρου, τότε η στερεά γωνία σκέδασης των φωτονίων που βαίνει στο τηλεσκοπικό παράθυρο είναι A/z^2 κατά προσέγγιση.



Εικόνα 2—9. Σχηματική αναπαράσταση της στερεάς γωνίας αποδοχής του τηλεσκοπίου για μονοστατικό-διαξονικό σύστημα. Η ακτινοβολία προσπίπτει σε σωματίδιο σε απόσταση z και σκεδάζεται σε στερεά γωνία 4π . Η στερεά γωνία αποδοχής του τηλεσκοπίου ταυτίζεται με τη στερεά γωνία σκέδασης που θαίνει σε επιφάνεια A και προκύπτει από την επιφάνεια του παραθύρου του και την απόσταση του σκεδαστή.

2.3.2.3 Γεωμετρικός συντελεστής επικάλυψης

Ο γεωμετρικός συντελεστής επικάλυψης lidar δίδεται από τη σχέση:

$$O(z) = A\{r(z), w(z), d(z)\} \cdot \frac{1}{\pi \cdot w^2(z)} \quad \{2.34\}$$

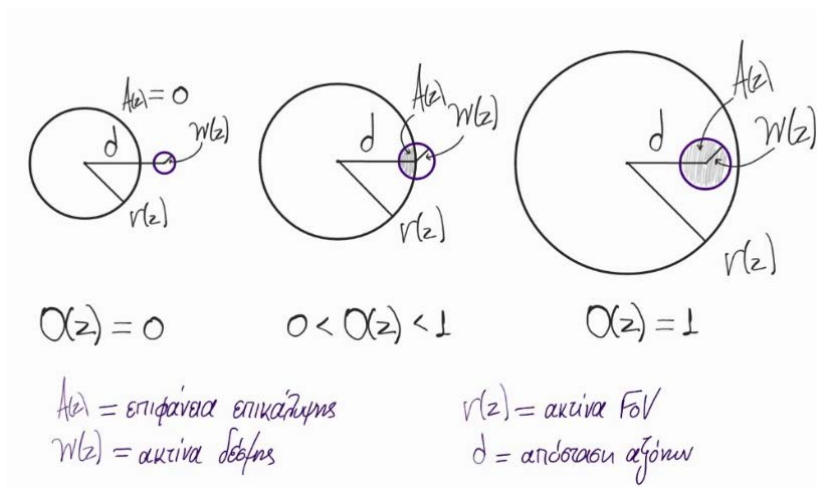
όπου $\mathbf{A}(\mathbf{z})$ είναι η επιφάνεια επικάλυψης⁶², $\mathbf{r}(\mathbf{z})$ είναι η ακτίνα του τηλεσκοπικού FoV, $\mathbf{w}(\mathbf{z})$ είναι η ακτίνα της δέσμης και $\mathbf{d}(\mathbf{z})$ η απόσταση των αξόνων δέσμης και τηλεσκοπίου.

Ιδανικά η απόσταση d παραμένει σταθερή για μονοστατικά συστήματα, αλλά με τον συνυπολογισμό της εξάρτησής από το ύψος, η εξίσωση 2.34 μπορεί να εφαρμόζεται και για διστατικά συστήματα. Ο γεωμετρικός συντελεστής λαμβάνει τιμές από 0 έως και 1, καθώς η

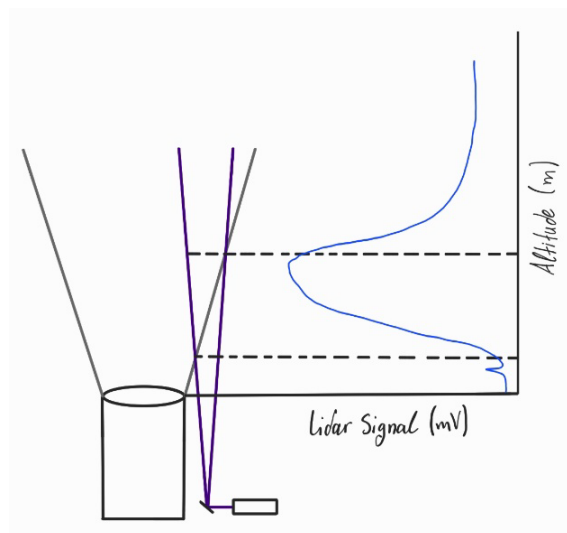
⁶² Να μην συγχέεται με την επιφάνεια A του τηλεσκοπικού παραθύρου η οποία είναι σταθερή.

2.3 Τεχνικές lidar

συνολική διάμετρος του οπτικού πεδίου του τηλεσκοπίου αυξάνεται, ώστε να καλύπτει πλήρως και τη διάμετρο της δέσμης, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 2—10. Σχηματική αναπαράσταση (κάτοψη) της επικάλυψης του τηλεσκοπικού πεδίου οράσεως και της δέσμης laser. Η απόσταση μεταξύ των δύο αξόνων παραμένει σταθερή, ωστόσο οι διάμετροι της δέσμης και του FoV του τηλεσκοπίου αυξάνονται συνεχώς καθ' ύψος. Ο γεωμετρικός συντελεστής επικάλυψης λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1 (μηδενική-πλήρης επικάλυψη).



Εικόνα 2—11. Σχηματική αναπαράσταση της μορφής αναλογικού σήματος lidar σε σύγκριση με την επικάλυψη δέσμης laser-πεδίου οράσεως τηλεσκοπίου σε διαξονικό σύστημα. Το σήμα εμφανίζει αύξηση στην έντασή του από το ύψος στο οποίο ο γεωμετρικός παράγοντας επικάλυψης παύει να είναι μηδενικός. Το μέγιστο του σήματος επιτυγχάνεται στο ύψος της πλήρους επικάλυψης και κατόπιν παρατηρείται μείωση της έντασης, αφού η δέσμη συνεχώς εξασθενεί από την αλληλεπίδρασή της με την ατμοσφαιρική ύλη.

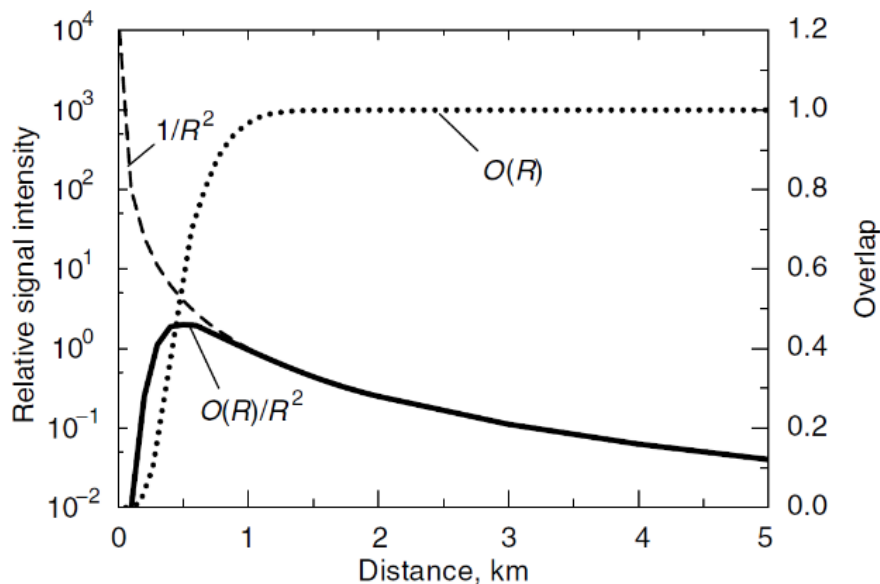
2.3.2.4 Range Corrected Signal - RCS

Η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος πρέπει να αναπαραστή την εικόνα της τροπόσφαιρας αναφορικά με την ύπαρξη αερολυμάτων. Βάσει της περιγραφής των οπτικών ιδιοτήτων και της μεθόδου Raman Lidar, τα μετρούμενα δεδομένα lidar πρέπει να αποδίδουν αντιπροσωπευτικά τις κατακόρυφες κατανομές (προφίλ – profile) των συντελεστών οπισθοσκέδασης και εξασθένησης

2.3 Τεχνικές lidar

της ακτινοβολίας, ώστε με τον υπολογισμό του λόγου lidar και της αποπόλωσης, να χαρακτηριστούν τα αερολύματα ως προς την ταυτότητά τους.

Έστω δύο όμοιες σε πάχος στρωμάτωσης στα 2 km και 8 km αντίστοιχα, στις οποίες βρίσκεται αερολυματικός σκεδαστής σε όμοια περιεκτικότητα. Όταν ακτινοβοληθεί η δεύτερη στρωμάτωση στα 8 km, η δέσμη έχει ήδη εξασθενήσει αφενός μεν από την αλληλεπίδρασή της με την πρώτη στρωμάτωση, αφετέρου δε από την μεταξύ των στρωματώσεων απόσταση, αφού αυτή δεν είναι κενή ατμοσφαιρικής ύλης. Παράλληλα, όσο πιο μακριά από το lidar συμβαίνει η σκέδαση, τόσο πιο δύσκολο είναι να συλληθθούν τα οπισθοσκεδαζόμενα φωτόνια από το τηλεσκόπιο, αφού η στερεά γωνία λήψης του έχει ως παρονομαστή το τετράγωνο της απόστασης. Οι δύο αυτοί παράγοντες εισάγουν σημαντική απώλεια πληροφορίας και κίνδυνο λανθασμένου συμπεράσματος για τις ιδιότητες των στρωματώσεων σε μεγαλύτερα ύψη.



Εικόνα 2—12. Η τελική μορφή του σήματος παράγεται συνδυάζοντας το συντελεστή επικάλυψης $O(z)$ με τον παράγοντα $1/z^2$.⁶³

Επομένως, για να αντισταθμιστεί η απώλεια πληροφορίας, η απεικόνιση των χωροχρονικών μεταβολών του ατμοσφαιρικού αέρα και διάφοροι άλλοι έλεγχοι των πειραματικών δεδομένων, οι οποίοι γίνονται πριν κάποια άλλη επεξεργασία, βασίζονται όχι στο σήμα, όπως δίνεται στην εξίσωση 2.32 αλλά στο σήμα που έχει διορθωθεί ως προς το υψόμετρο και συγκεκριμένα στο λογάριθμο αυτού, το λεγόμενο Range Corrected Signal.

$$\text{RCS}(z) = \ln[(P(z, \lambda) - P_{bg}) \cdot z^2] \quad \{2.35\}$$

$$\text{RCS}(z, \lambda) = \ln \left[\left(C(z, \lambda) \cdot \beta(z, \lambda) \cdot \exp \left(-2 \int_0^z \alpha(z', \lambda) dz' \right) - P_{bg} \right) \cdot z^2 \right] \quad \{2.36\}$$

⁶³ Βλ. Weitkamp C., ό.π., σελ. 9.

όπου:

$$C(z, \lambda) = P_0 \cdot \frac{c \Delta t}{2} \cdot A \cdot n(\lambda) \cdot O(z) \text{ η σταθερά lidar} \quad \{2.37\}$$

2.3.3 Μέθοδος αντιστροφής σήματος Lidar κατά Klett

Κατά τον James D. Klett σε σχετικές δημοσιεύσεις του το 1981⁶⁴ και το 1985⁶⁵, η επίλυση της εξίσωσης της ελαστικής οπισθοσκέδασης του σήματος lidar (εξ. 2.32) μπορεί να αποδώσει το συντελεστή οπισθοσκέδασης β_{aer} :

$$\beta_{aer}(z) = -\beta_{mol}(z) + \frac{RCS(z) \cdot \exp\left(-2(P_{aer} - P_{mol}) \int_{z_{ref}}^z \beta_{mol}(z') dz'\right)}{\beta_{aer}(z_{ref}) + \beta_{mol}(z_{ref}) - 2P_{aer} \int_{z_{ref}}^z RCS(z') \cdot \exp\left(-2(P_{aer} - P_{mol}) \int_{r_{ref}}^r \beta_{mol}(r') dr'\right) dz'} \quad \{2.38\}$$

όπου: z_{ref} είναι το ύψος αναφοράς από το οποίο και άνω η σκέδαση από αιωρούμενα σωματίδια είναι πια ελάχιστη σε σχέση με τη σκέδαση από μόρια⁶⁶.

Εξίσου σημαντικός για την εξαγωγή πορισμάτων περί των ΑΣ είναι και ο συντελεστής οπισθοσκέδασης, ο οποίος εισάγει στο πρόβλημα έναν δεύτερο άγνωστο παράγοντα που χρήζει υπολογισμού, αν και υπάρχει μόνο μία εξίσωση. Ως λύση στο αδιέξοδο, ο ερευνητής καλείται να αξιοποιήσει την σχέση μεταξύ των δύο συντελεστών, δηλαδή τον λόγο lidar, και με βάση την εκτίμησή του για τον παρατηρούμενο φόρτο αερολυμάτων να προσδώσει σε αυτόν μια σταθερή καθ' ύψος τιμή, ορίζοντας έτσι την κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή εξασθένησης ως ένα πολλαπλάσιο αντίγραφο της κατακόρυφης κατανομής του συντελεστή οπισθοσκέδασης. Με δεδομένο ότι η τιμή του λόγου lidar έχει άμεση σχέση με την ταυτότητα των αιωρούμενων σωματιδίων, η προσέγγιση αυτή δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, αφού παρακάμπει την πιθανότητα να παρατηρούνται μείγματα διαφορετικών ειδών αερολυμάτων σε διαφορετικά ύψη.

2.3.4 Μέθοδος αντιστροφής σήματος Lidar κατά Raman

Η επίλυση στο πρόβλημα μοναδικής εξίσωσης – δύο αγνώστων, που προέκυψε στην επίλυση κατά Klett, δόθηκε με την ανάπτυξη της τεχνικής Raman Lidar από τους Ansmann A. et al., 1992⁶⁷. Με τη μέθοδο αυτή, η διάταξη lidar σχεδιάζεται έτσι ώστε να ανιχνεύει ένα ή περισσότερα μήκη κύματος που προκύπτουν από την ανελαστική σκέδαση Raman Stokes των ατμοσφαιρικών μορίων. Κατ' αυτόν τον τρόπο, προκύπτει μια ακόμα εξίσωση, ώστε πλέον οι δύο άγνωστοι, δηλαδή οι αερολυματικές σταθερές οπισθοσκέδασης και εξασθένησης, να μπορούν να υπολογιστούν ανεξάρτητα.

⁶⁴ Klett J., Stable analytical inversion solution for processing lidar returns, Applied Optics Vol. 20 No. 2, 1981.

⁶⁵ Klett J., Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios, Applied Optics Vol. 24 No. 11, 1985.

⁶⁶ Με βάση αυτή τη διατύπωση υπολογίζεται ο ελαστικός συντελεστής οπισθοσκέδασης από τον αλγόριθμο SCC (ενότητα 4.2).

⁶⁷ Ansmann A. et al., Combined Raman – Elastic Backscatter LIDAR for Vertical Profiling of Moisture, Aerosol Extinction, Backscatter and LIDAR Ratio, Appl. Phys. B55, 18-28 (1992).

2.3 Τεχνικές lidar

Η εξίσωση του σήματος Raman lidar αποδίδεται ως εξής:

$$P(z, \lambda_R) = C(z, \lambda_R) N_R(z) \frac{1}{z^2} \frac{d\sigma_{\lambda_R}(\pi)}{d\Omega} \cdot \exp \left\{ - \int_0^z [\alpha_{\text{aer}}(z', \lambda_L) + \alpha_{\text{aer}}(z', \lambda_R) + \alpha_{\text{mol}}(z', \lambda_L) + \alpha_{\text{mol}}(z', \lambda_R)] dz' \right\} \quad \{2.39\}$$

όπου: $C(z, \lambda_R)$ είναι η σταθερά lidar για το μήκος κύματος Raman, $N_R(z)$ είναι η συγκέντρωση του μοριακού σκεδαστή και $\frac{d\sigma_{\lambda_R}(\pi)}{d\Omega}$ είναι η διαφορική ενεργός διατομή της ανελαστικής οπισθοσκέδασης Raman. Ακολούθως, παρατίθενται οι εξισώσεις που περιγράφουν τους αερολυματικούς συντελεστές οπισθοσκέδασης:

$$\beta_{\text{aer}}(z, \lambda_L) = -\beta_{\text{mol}}(z, \lambda_L) + \left[\beta_{\text{mol}}(z_{\text{ref}}, \lambda_L) + \beta_{\text{aer}}(z_{\text{ref}}, \lambda_L) \right] \cdot \frac{P(z_{\text{ref}}, \lambda_R) P(z, \lambda_L) N_R(z)}{P(z, \lambda_R) P(z_{\text{ref}}, \lambda_L) N_R(z_{\text{ref}})} \cdot \frac{\exp \left\{ - \int_{z_{\text{ref}}}^z [\alpha_{\text{aer}}(z', \lambda_R) + \alpha_{\text{mol}}(z', \lambda_R)] dz' \right\}}{\exp \left\{ - \int_{z_{\text{ref}}}^z [\alpha_{\text{aer}}(z', \lambda_L) + \alpha_{\text{mol}}(z', \lambda_L)] dz' \right\}} \quad \{2.40\}$$

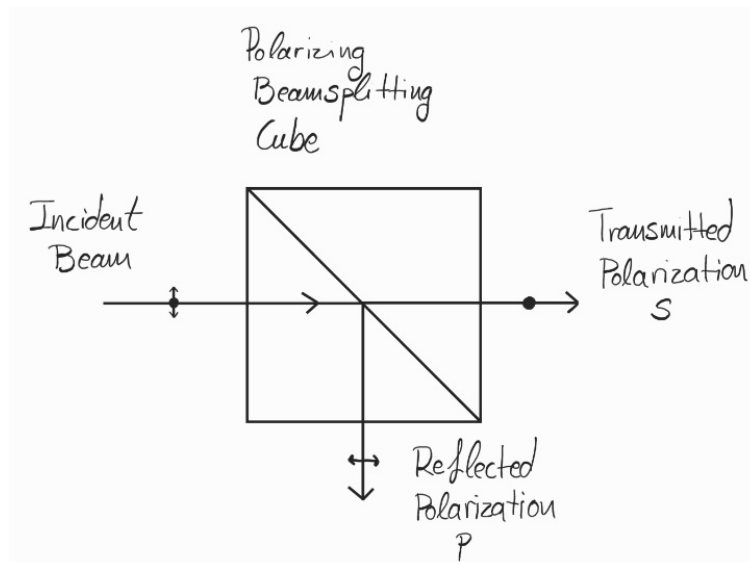
και εξασθένησης:

$$\alpha(z, \lambda_L) = \frac{\frac{d}{dz} \left[\ln \frac{N_R(z)}{P(z, \lambda_R) z^2} \right] - \alpha_{\text{mol}}(z, \lambda_L) - \alpha(z, \lambda_R)}{1 + \left(\frac{\lambda_L}{\lambda_R} \right)^k} \quad \{2.41\}$$

όπου: k ο συντελεστής Ångström, άλλοτε συμβολιζόμενος και ως \tilde{a} ή ΑΕ.

2.3.5 Τεχνική Αποπόλωσης (Depolarization Technique)

Ένας ακόμη στόχος μιας σύγχρονης διάταξης lidar είναι η απόδοση πληροφορίας για την αποπόλωση, την οποία υφίσταται η ακτινοβολία laser κατά την οπισθοσκέδασή της από μη-σφαιρικούς σκεδαστές. Η επίτευξη του στόχου αυτού καθίσταται εφικτή με τη χρήση ενός οπτικού στοιχείου που οδηγεί στο διαχωρισμό της συλλεγόμενης ακτινοβολίας βάσει της πόλωσης της. Μετά τον διαχωρισμό, η παράλληλη συνιστώσα της πόλωσης (primary / parallel polarization, p) και η κάθετη συνιστώσα (secondary / cross polarization, s) ακολουθούν ξεχωριστές διαδρομές και καταγράφονται ανεξάρτητα.



Εικόνα 2—13. Σχηματική αναπαράσταση της χρήσης ενός Polarizing Beamsplitting Cube σε lidar εφαρμογή. Η δέσμη προσπίπτει στον κύβο έχοντας πόλωση με παράλληλη και κάθετη συνιστώσα και κατόπιν διαχωρίζεται σε δύο τμήματα οριστικά.

Ένας τυπικός πολωτικός κύβος προσφέρει μεγαλύτερη απόδοση στην ανάκλαση απ' ό,τι στη διάδοση (π.χ. 99% : 95%) ενώ κατασκευάζεται έτσι, ώστε να ανακλά την κάθετη συνιστώσα και να διαδίδει την παράλληλη (αντίθετη λειτουργία από αυτήν που αναπαρίσταται στο σχήμα). Όμως, το laser εκπέμπει μια πλήρως πολωμένη δέσμη και αναμένεται να επιστραφεί μια δέσμη με ποσοστιαία μονάχα αποπόλωση. Αναλύοντας την πόλωση της συλλεγόμενης ακτινοβολίας στις συνιστώσες της, η συνιστώσα που ταυτίζεται σε κατεύθυνση με την αποστελλόμενη πόλωση θα θεωρείται παράλληλη και θα υπερισχύει σε συνεισφορά έναντι της εναπομείνουσας κάθετης συνιστώσας. Με δεδομένη τη διαφορά στην απόδοση ανάκλασης και διάδοσης, εάν η παράλληλη συνιστώσα επιλεγεί να διαδοθεί, τότε 5% της υπερισχύουσας πόλωσης θα βρεθεί στη λάθος διαδρομή, με αποτέλεσμα να μεταβάλλονται σημαντικά τα ευρήματα της αποπόλωσης. Επομένως, ο κύβος πρέπει να τοποθετηθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε με βάση την κατεύθυνση της πόλωσης της συλλεγόμενης ακτινοβολίας, τελικά να ανακλάται η συνιστώσα της πόλωσης που υπερισχύει, δηλαδή η παράλληλη.

Τελικά, εφόσον είναι γνωστή η πόλωση της αρχικώς εκπεμπόμενης δέσμης και, έπειτα, η ένταση της συλλεγόμενης ως προς αμφότερες τις συνιστώσες της, ο ερευνητής μπορεί να υπολογίσει το ποσοστό αποπόλωσης της ακτινοβολίας καθ' ύψος. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια της βιβλιογραφίας μπορεί να αντιστοιχίσει τα δεδομένα αυτά με συγκεκριμένα είδη σωματιδίων.

Όπως ισχύει και για τις άλλες οπτικές ιδιότητες που αναφέρθηκαν στην ενότητα 2.2, έτσι και η αποπόλωση της ακτινοβολίας προκαλείται από αμφότερα τα μόρια και τα ΑΣ. Συναφώς, το μέγεθος που καταγράφεται άμεσα είναι η «συνολική» αποπόλωση που προκαλείται συνδυαστικά από τα δύο είδη σκεδαστών και ονομάζεται χωρικός γραμμικός λόγος αποπόλωσης δ_v (volume linear depolarization ratio – VLDR).

$$\delta_v = \frac{\beta_{\perp}^{\text{mol}} + \beta_{\perp}^{\text{aer}}}{\beta_{\parallel}^{\text{mol}} + \beta_{\parallel}^{\text{aer}}} \quad \{2.42\}$$

Ο μοριακός λόγος αποπόλωσης δ_m (molecular depolarization ratio) αφορά στην μοριακή αποπόλωση που λαμβάνει χώρα σε ύψη όπου η ατμόσφαιρα θεωρείται μη σωματιδιακή, δηλαδή από το ύψος αναφοράς z_{ref} και άνω.

$$\delta_m = \frac{\beta_{\perp}^{\text{mol}}}{\beta_{\parallel}^{\text{mol}}} \quad \{2.43\}$$

Τέλος, το επιθυμητό προς υπολογισμό μέγεθος είναι ο σωματιδιακός γραμμικός λόγος αποπόλωσης δ_p , κοινώς αναγνωρίσιμος ως Particle Linear Depolarization Ratio – PLDR, υπολογίζεται δε με τη βοήθεια των ως άνω λόγων και του λόγου οπισθοσκέδασης (backscatter ratio – BR).

$$\delta_p = \frac{\beta_{\perp}^{\text{aer}}}{\beta_{\parallel}^{\text{aer}}} = \frac{(1 + \delta_m)\delta_v \cdot \text{BR}(z) - (1 + \delta_v)\delta_m}{(1 + \delta_m) \cdot \text{BR}(z) - (1 + \delta_v)} \quad \{2.44\}$$

Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να επισημανθεί πως μια σύνθετη οπτοηλεκτρονική διάταξη, όπως ένα σύστημα lidar, είναι αδύνατον να διαχωρίζει σε μήκη κύματος και πολώσεις την οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία και να την καταγράφει με 100% ακρίβεια, πόσω μάλλον με την ίδια απόδοση σε όλα τα κανάλια. Για το λόγο αυτό, οι σχέσεις που εν τέλει χρησιμοποιούνται από τα υπολογιστικά προγράμματα, για να εξαχθούν τα προφίλ των οπτικών ιδιοτήτων, περιλαμβάνουν και όρους που σχετίζονται με την απόδοση ανά κανάλι, με παραμέτρους cross-talk κ.ά.

3 ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΝΟΣ LIDAR

Η επιτυχής καθ' ύψος χαρτογράφηση της ατμόσφαιρας (και άλλες εφαρμογές lidar) εξαρτάται από πολλούς αλληλένδετους παράγοντες, καθώς κάθε ένα τμήμα της διάταξης δεν επιλέγεται μεμονωμένα, αλλά σχεδιάζεται και τοποθετείται, προκειμένου να συναρμόζει με όλα τα άλλα τμήματα υπό την ελάχιστη δυνατή ανακρίβεια αποτελεσμάτων. Έτσι, μια διάταξη lidar μπορεί να έχει την έκταση ενός δωματίου, όπως ισχύει για τη διάταξη “EOLE Raman Lidar” που λειτουργεί στη Μονάδα τηλεπισκόπησης Laser του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, αλλά μπορεί και να σμικρυνθεί ώστε να χωρά σε ένα ντουλάπι, όπως η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για αυτή τη μελέτη.



Εικόνα 3—1. EOLE Raman Lidar: Η διάταξη 6 μηκών κύματος του Ε.Μ.Π. ⁶⁸

Εικόνα 3—2. Το μοντέλο LR111-ESS-D300 της Raymetrics S.A. που χρησιμοποιήθηκε για την αυτήν την εργασία (εικόνα από το εγχειρίδιο λειτουργίας της συσκευής).

3.1 Θεμελιώδη Στοιχεία της Διάταξης LR111-ESS-D300

Τα βασικά δομικά μέρη του μοντέλου LR111-ESS-D300 της Raymetrics S.A. είναι τα εξής:

- ✧ μία πηγή δέσμης ακτινοβολίας
- ✧ ένα τηλεσκόπιο για τη συλλογή της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας
- ✧ μία μονάδα φασματικού αναλυτή μηκών για το διαχωρισμό μεταξύ μηκών κύματος και πολώσεων
- ✧ ένα σύστημα ενίσχυσης και καταγραφής του σήματος (data acquisition system) που παράγει η συλλεγόμενη ακτινοβολία

⁶⁸ Papayannis et al., Recent Upgrades of the EOLE and AIAS Lidar Systems of the National Technical University of Athens Operating Since 2000 in Athens, Greece, EPJ Web Conf., 237 (2020) 02030.

3.1.1 Πηγή Laser (Laser Source)

Κατά την ανάλυση των δομικών μερών προκύπτει ότι η πηγή δέσμης laser πρέπει να έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Αρχικά, πρέπει να είναι παλμική “Q-switched” (και όχι συνεχούς λειτουργίας) για δύο κύριους λόγους: πρωτίστως, η δέσμη πρέπει να έχει ισχύ να ταξιδέψει για δεκάδες χιλιόμετρα⁶⁹, συμμετέχοντας σε εκατομμύρια σκεδάσεις· τούτο επιτυγχάνεται με την παλμική λειτουργία. Έπειτα δε η λήψη μετρήσεων εκμεταλλεύεται τη διακριτότητα των παλμών, έτσι ώστε η καταγραφή του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος να πυροδοτείται για κάθε έναν παλμό ξεχωριστά⁷⁰. Η ενέργεια ανά παλμό (Energy per pulse) και η επαναληπτικότητα της πηγής (Pulse Repetition Frequency – Repetition Rate) είναι καθοριστικής σημασίας για την επιλογή της ή μη, καθόσον αυτές έχουν άμεση σχέση τόσο με την Ισχύ Κορυφής των παλμών⁷¹ όσο και με το τελικό αποτέλεσμα της καταγραφής, δηλαδή τα αρχεία που προκύπτουν από την καταγραφή των σημάτων, ζήτημα που θα αναλυθεί κατοπινά στο παρόν κεφάλαιο.

Τέλος, το μήκος κύματος στο οποίο εκπέμπει η πηγή πρέπει να εξυπηρετεί την ανά χείρας εργασία. Για την μελέτη των αερολυμάτων (που, όπως εξηγήθηκε έχουν διάμετρο από μερικά nm μέχρι μερικά μm) χρησιμοποιείται ευρέως laser κρυστάλλου Nd:YAG, το οποίο όχι μόνο εκπέμπει στο βασικό μήκος κύματος $\lambda_1=1064$ nm, αλλά με παρεμβαλλόμενο μη-γραμμικό κρύσταλλο μπορεί να εκπέμψει και στις αρμονικές συχνότητες με $\lambda_2=532$ nm, $\lambda_3=355$ nm και $\lambda_4=266$ nm, είτε σε κάποια από αυτές αποκλειστικά είτε σε επιλεγμένες ταυτοχρόνως, καλύπτοντας έτσι όλα τα μεγέθη αερολυμάτων (βλ. σκεδάσεις στην ενότητα 2.1.1).

Πίνακας 3—1. Τεχνικά χαρακτηριστικά της πηγής laser της συσκευής.

Laser Source	Nd:YAG (CFR200 series by Quantel)
Primary Emission Wavelength	355 nm & damped 532 nm and 1064 nm
Energy per Pulse	54.5 mJ
Repetition Frequency	20 Hz
Pulse Width	7.00 ns

3.1.2 Διευρυντής Δέσμης (Beam Expander)

Ένα από τα θεμελιώδη προτερήματα γενικώς της χρήσης laser είναι η υψηλή κατευθυντικότητα της δέσμης και ιδίως η μικρή της απόκλιση (της τάξης των μερικών mrad) κατά μήκος της διάδοσης⁷². Παρόλα αυτά, σημαντικά μικρότερη απόκλιση μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ενός διευρυντή

⁶⁹ Το ωφέλιμο lidar σήμα για τις ανάγκες της εργασίας, δηλαδή επίγεια τηλεπισκόπηση της τροπόσφαιρας, είναι μέχρι τα 10-15 km (χαμηλότερα, για laser μικρής Μέσης Ισχύος) και το υπόλοιπο τμήμα μέχρι τα 120 km δεν λαμβάνεται υπόψιν λόγω θορύβου του σήματος.

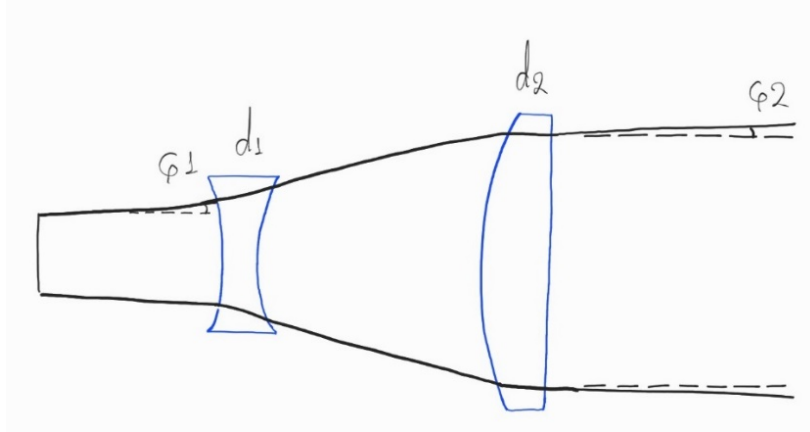
⁷⁰ Στην υποενοότητα του Transient Recorder περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία λήψης μετρήσεων, η οποία ως αποτέλεσμα έχει την άθροιση των δεδομένων που προκύπτουν από κάθε παλμό. Σε ένα μόνο αρχείο διάρκειας 30 s και με PRF = 20 Hz (δηλαδή 20 παλμούς/sec), έχουν καταγραφεί δεδομένα για 600 παλμούς!

⁷¹ Οι παλμοί διάρκειας μερικών nanosecond μπορούν να έχουν Ισχύ Κορυφής της τάξης των μερικών MW!

⁷² *Wilson J. / Hawkes J.*, Οπτοηλεκτρονική: μια εισαγωγή, μτφρ: Σεραφετινίδης Α., 3^η Έκδοση, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2004, σελ. 288.

3.1 Θεμελιώδη Στοιχεία της Διάταξης LR111-ESS-D300

δέσμης, από τον οποίο περνά η δέσμη πριν την έξοδό της από το lidar⁷³. Μια διάταξη διευρυντή δέσμης φαίνεται στην Εικόνα 3—3, όπου η δέσμη προσπίπτει σε αχρωματικό διπλό φακό, εστιάζεται και αμέσως μετά προσπίπτει σε μεγαλύτερο και αντιστρόφως τοποθετημένο αχρωματικό διπλό φακό. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδρομής είναι αφενός μεν η μεγέθυνση της διαμέτρου της δέσμης, αφετέρου δε η ευθυγράμμιση της.



Εικόνα 3—3. Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας ενός διευρυντή δέσμης laser. Η δέσμη εξέρχεται από τον διευρυντή μεγεθυμένη ως προς την αρχική της διάμετρο και με μικρότερη απόκλιση.

Η απόκλιση της δέσμης κατά μήκος της διάδοσής της δίνεται από τη σχέση 16 όπου \mathcal{K} είναι ο αριθμητικός παράγοντας που εξαρτάται από τη φύση της δέσμης, λ είναι το μήκος κύματος της δέσμης και d είναι η διάμετρος της⁷⁴.

$$\varphi = \frac{\mathcal{K}\lambda}{d} \quad \{3.1\}$$

Η απόκλιση και η διάμετρος της δέσμης είναι μεγέθη αντιστρόφως ανάλογα και, επομένως, αν μεγεθυνθεί κατά M φορές η τελική διάμετρος της δέσμης, μειώνεται αναλόγως η τελική απόκλιση της δέσμης.

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{\varphi_1}{\varphi_2} = M \Rightarrow \varphi_2 = \frac{1}{M}\varphi_1 \quad \{3.2\}$$

Πίνακας 3—2. Τεχνικά χαρακτηριστικά της δέσμης μετά τον διευρυντή.

Beam Expansion	x 7
Far field beam diameter	4.87 mm
Beam Divergence	< 0.8 mrad

⁷³ Η ανακατεύθυνση της δέσμης από την πηγή της μέχρι την έξοδό της από το lidar επιτυγχάνεται με τη χρήση κατόπτρων υψηλής ανακλαστικότητας. Ένα από αυτά χρησιμοποιείται για να την κατευθύνει προς τον διευρυντή και το άλλο τοποθετείται στην έξοδο του διευρυντή για να την κατευθύνει κατακόρυφα εκτός της διάταξης.

⁷⁴ Βλ. *Wilson J. / Hawkes J.*, ό.π., σελ. 289.



Εικόνα 3—4. Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος εκπομπής δέσμης της συσκευής (εικόνα από το εγχειρίδιο). Η δέσμη Laser παράγεται από την πηγή και ανακλάται από το πρώτο κάτοπτρο προς τον διευρυντή δέσμης. Στην έξοδο της από το διευρυντή έχει μεγεθυνθεί και ανακλάται από το δεύτερο κάτοπτρο προς την ατμόσφαιρα.

Συνοψίζοντας έως τώρα, οι φωτεινοί παλμοί κατευθύνονται προς την ατμόσφαιρα είτε κατακόρυφα είτε με ρυθμιζόμενη κλίση⁷⁵, τα φωτόνια προσπίπτουν στην ατμοσφαιρική ύλη (μόρια, στρωματώσεις αερολυμάτων, νέφη κ.τ.λ.) και σκεδάζονται, ενώ η ένταση της δέσμης εξασθενεί, καθώς ολοένα και λιγότερα φωτόνια διατηρούν την αρχική τους κατεύθυνση, η δε διάμετρος της δέσμης μεγαλώνει.

3.1.3 Τηλεσκόπιο (Telescope)

Μέρος των οπισθοσκεδαζόμενων από την ύλη φωτονίων, καθώς και φωτόνια της ακτινοβολίας υποβάθρου, προσπίπτουν εντός του FoV του παρακείμενου στο laser τηλεσκοπίου και μικρότερο μέρος αυτών οδηγείται στη μονάδα διαχωρισμού ακτινοβολίας μετά από διαδοχικές ανακλάσεις⁷⁶. Τα βασικά μέρη ενός τηλεσκοπίου, εκτός από το περίβλημα, είναι το τηλεσκοπικό παράθυρο (telescope window) το οποίο πρέπει να μην ανακλά το επιθυμητό εύρος ακτινοβολίας⁷⁷, και τα κάτοπτρα (πρωτεύον και δευτερεύον) μεταξύ των οποίων πραγματοποιείται ανάκλαση της συλλεγόμενης ακτινοβολίας. Το δευτερεύον κάτοπτρο που είναι μικρότερο σε διάμετρο από το πρωτεύον είναι τοποθετημένο στο εστιακό σημείο αυτού και ανακλά την ακτινοβολία προς το διάφραγμα του τηλεσκοπίου, το οποίο συνιστά ένα άνοιγμα στο κέντρο του πρωτεύοντος

⁷⁵ Η Raymetrics S.A. κατασκευάζει και Scanning Lidars. Η τροφοδοσία της μηχανής και τα υπολογιστικά μέρη βρίσκονται στη βάση της ενώ η ζενίθια γωνία της κεφαλής (που περιλαμβάνει το laser, το τηλεσκόπιο και τη μονάδα διαχωρισμού ακτινοβολίας) μπορεί να ρυθμιστεί εξ αποστάσεως από τον χρήστη μέσω προγράμματος υπολογιστή.

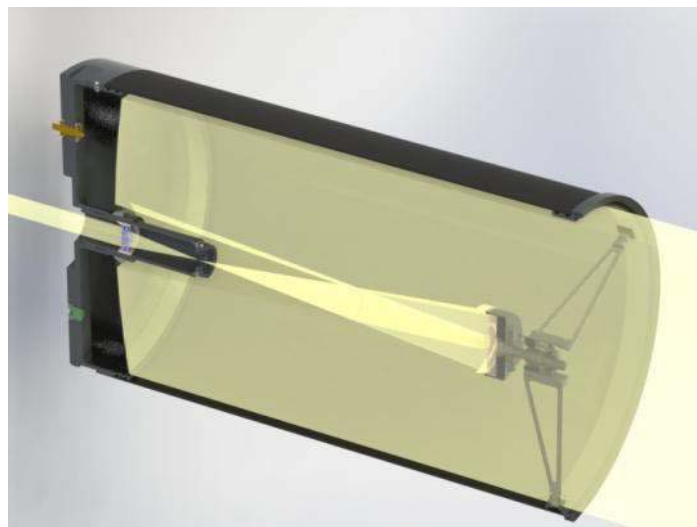
⁷⁶ Στις lidar εφαρμογές χρησιμοποιούνται ανακλαστικά τηλεσκόπια τύπου Newtonian ή Cassegrainian, με βασική διαφορά μεταξύ τους την κατεύθυνση της εστιασμένης δέσμης ως προς την υπόλοιπη διάταξη.

⁷⁷ Μεγάλο μέρος της συνολικής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο τηλεσκόπιο αποκόπτεται λόγω της ανακλαστικότητας του παραθύρου η οποία εξαρτάται από το μήκος κύματος λ. Για παράδειγμα στην παρούσα διάταξη η ανακλαστικότητα στο εύρος 350-410 nm είναι $R < 0.5\%$ και έτσι διευκολύνεται ο διαχωρισμός της ακτινοβολίας σε κατοπινό στάδιο.

κατόπτρου. Το τηλεσκοπικό διάφραγμα επιτρέπει την εισέλευση της ακτινοβολίας στα υπόλοιπα μέρη του συστήματος.

Η ποσότητα των φωτονίων που θα αξιοποιηθούν επηρεάζεται από δύο βασικούς παράγοντες:

- ❖ τα οπτικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τηλεσκοπίου δηλαδή
 - ❖ την απόσταση αξόνων τηλεσκοπίου-laser και τη διατήρηση της ευθυγράμμισης
 - ❖ τις διαστάσεις και τη μη ανακλαστικότητα (σε επιλεγμένο εύρος μηκών κύματος) του τηλεσκοπικού παραθύρου (telescope window)
 - ❖ τα χαρακτηριστικά των κατόπτρων δηλαδή
 - τη διάμετρο του πρωτεύοντος κατόπτρου (διάφραγμα του τηλεσκοπίου – telescope aperture)
 - το σχήμα τους (σφαιρικό, υπερβολικό, παραβολικό, ελλειπτικό), και
 - την απόδοση της ανακλαστικής επένδυσής τους (reflective coating)
 - ❖ τη σκίαση (obscuration) που προκαλεί ο δευτερεύων καθρέπτης στον πρωτεύοντα⁷⁸, και τέλος,
- ❖ την ακρίβεια στο σχεδιασμό του τηλεσκοπίου και την ρύθμιση όλων αυτών των παραμέτρων⁷⁹.



Εικόνα 3—5. Σχηματική αναπαράσταση των ανακλάσεων και της εστίασης του φωτός σε τηλεσκόπιο τύπου Cassegrainian (εικόνα από το εγχειρίδιο). Η ακτινοβολία ανακλάται μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος κατόπτρου, εστιάζεται μέσα στο διάφραγμα του τηλεσκοπίου και κατόπιν ευθυγραμμίζεται.

⁷⁸ Η επίτευξη ελάχιστης σκίασης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Πρώτον, το δευτερεύον κάτοπτρο δεν πρέπει να είναι πολύ κοντά στο πρωτεύον. Έτσι, η καμπυλότητα του πρωτεύοντος πρέπει να ρυθμιστεί ώστε το εστιακό σημείο να βρίσκεται σε αρκετή απόσταση, εντός όμως των ορίων του τηλεσκοπίου που επιτρέπει η διάταξη. Επίσης η διάμετρος του δευτερεύοντος κατόπτρου μπορεί να μειωθεί για να περιοριστεί η σκίαση ακόμα και στην ιδανική θέση, όχι όμως τόσο ώστε η δέσμη που εστιάζεται να είναι ισχνή. Ιδανικά, η σκίαση πρέπει να είναι μηδενική ή σχεδόν μηδενική.

⁷⁹ Τέτοια ρύθμιση πλέον γίνεται και με τη χρήση υπολογιστικών προγραμμάτων. Το τηλεσκόπιο της παρούσας διάταξης σχεδιάστηκε από την Raymetrics S.A. με χρήση του λογισμικού Zemax.

Πίνακας 3—3. Τεχνικά χαρακτηριστικά του τηλεσκοπίου της διάταξης.

Type	Cassegrainian
Primary mirror type	Elliptical concave
Telescope Aperture	300 mm
Secondary mirror type	Spherical convex
Secondary mirror diameter	64 mm
Focal length	1500 mm
Field of view	2.3 mrad
f-number	5

3.1.4 Μονάδα Διαχωρισμού Ακτινοβολίας (Wavelength Separation Unit -WSU)

Ο επόμενος στόχος μετά την συλλογή της ακτινοβολίας, πριν επιτραπεί η είσοδός της στη ΜΔΑ., είναι η ευθυγράμμιση της (αφού πρωτίτερα εστιάζεται). Συναπτά ακολουθεί η μονάδα διαχωρισμού της ακτινοβολίας. Σκοπός της είναι να καταργήσει από την προσπίπτουσα ακτινοβολία⁸⁰ όλα τα μήκη κύματος εκτός από τα επιθυμητά προς καταγραφή και να τα στείλει σε διαφορετικές διαδρομές, οι οποίες στο εξής θα αναφέρονται και ως κανάλια.

Τα επιθυμητά προς καταγραφή μήκη κύματος αποτελούνται, καταρχάς, από το εκπεμπόμενο (ή τα εκπεμπόμενα) λ και, αναλόγως την τεχνική που αξιοποιεί η διάταξη, μπορεί να είναι και περισσότερα, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση υιοθέτησης της τεχνικής “Raman Lidar” (βλ. κεφάλαιο 2.1.2). Ο διαχωρισμός μεταξύ λ επιτυγχάνεται με τη χρήση παρεμβαλλόμενων διχρωικών φίλτρων (Dichroic Filter – Interference Filter), των οποίων η κατασκευή επιτρέπει τη διάδοση εύρους ακτινοβολίας και την ανάκλαση της υπόλοιπης προς άλλη κατεύθυνση για την περαιτέρω ανάλυσή της σε επιθυμητά και ανεπιθύμητα λ .

Στην παρούσα διάταξη, η συλλεγόμενη ακτινοβολία προσπίπτει στο διχρωικό φίλτρο και διαχωρίζεται σε δύο κατευθύνσεις, μία για το 355 nm (ελαστική σκέδαση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας laser στα 355 nm) και μία για το μήκος κύματος 387 nm (ταλαντωτική/περιστροφική σκέδαση Raman Stokes από τα μόρια ατμοσφαιρικού αζώτου N_2). Σε κάθε κανάλι ανίχνευσης παρεμβάλλεται ακόμα ένα διχρωικό φίλτρο ακριβείας που στόχο έχει να επιτρέψει τη διέλευση μονάχα σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος με ελάχιστο σφάλμα.

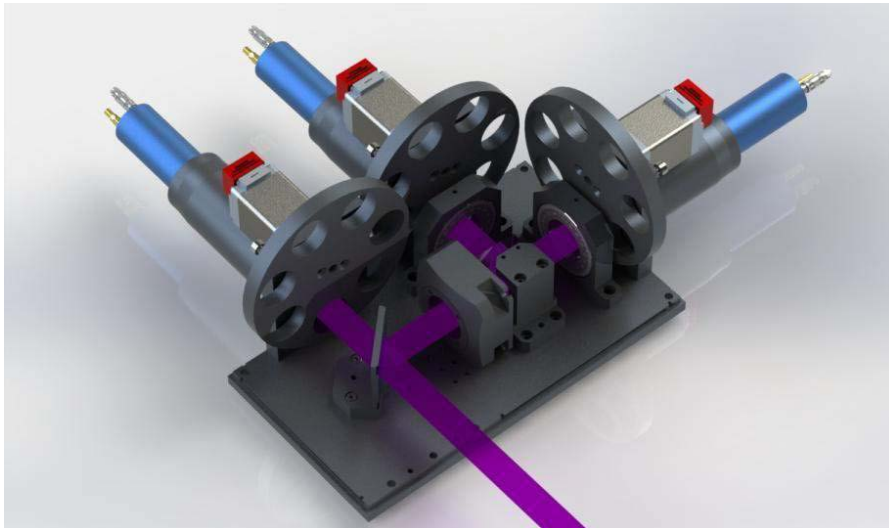
Πίνακας 3—4. Μήκη κύματος που ανιχνεύει η διάταξη LR111-ESS-D300.

	Elastic channel	Raman channel
Central Wavelength (CWL)	354.78	386.85
Bandwidth @ FWHM (BW)	0.57	0.9

⁸⁰ Αυτή περιλαμβάνει όλα τα ηλιακά μήκη κύματος που φτάνουν στην επιφάνεια της γης, δηλαδή που ανήκουν στο κοντινό Υπεριώδες, το Ορατό και το Υπέρυθρο φάσμα.

3.1 Θεμελιώδη Στοιχεία της Διάταξης LR111-ESS-D300

Εκτός από το διαχωρισμό σε λ , η μονάδα μπορεί να επιτύχει και το διαχωρισμό της πόλωσης της ακτινοβολίας σε δύο συνιστώσες⁸¹, ώστε να εξαχθεί συμπέρασμα για το σχήμα και το είδος των αερολυμάτων, εφαρμόζοντας την τεχνική “Depolarization Lidar” (βλ. κεφάλαιο 2.3.5). Με την πρόσπτωσή τους πάνω στον κύβο, τα συλλεγόμενα φωτόνια αναγκάζονται να οδηγηθούν σε δύο διαφορετικά κανάλια καταγραφής, ένα για την παράλληλη πόλωση (primary polarization, p) και ένα για την κάθετη πόλωση (secondary polarization, s), ενώ πριν την είσοδο της πολωμένης πια ακτινοβολίας στον φωτοανιχνευτή παρεμβάλλεται επιπρόσθετος γραμμικός πολωτής για λόγους ακριβείας.



Εικόνα 3—6. Σχηματική αναπαράσταση της διαδρομής της ακτινοβολίας διαμέσου του φασματικού αναλυτή της διάταξης (εικόνα από το εγχειρίδιο). Η ακτινοβολία ανακλάται σε διχρωμικό φίλτρο και διαχωρίζεται σε δύο μήκη κύματος (387 nm και 355 nm). Το $\lambda = 387$ nm διαθλάται προς το κανάλι καταγραφής ενώ το $\lambda = 355$ nm ανακλάται προς τον πολωτικό κύβο όπου διαχωρίζεται στις συνιστώσες πόλωσης p (primary, parallel) και s (secondary, cross), καθεμία από τις οποίες οδηγείται σε ξεχωριστό κανάλι.

Για την εξασφάλιση της διατήρησης καλής λειτουργίας των φωτοανιχνευτών της ΜΔΑ, είναι σημαντικό να προστατεύονται αυτοί από την πλημμυρίδα των φωτονίων που συλλέγονται. Έτσι, αμέσως πριν τον φωτοανιχνευτή παρεμβάλλεται ένα απορροφητικό Neutral Density Filter, το οποίο συντελεί στην αποκοπή ποσοστού έντασης της ακτινοβολίας. Στην παρούσα διάταξη, αυτό πραγματοποιείται με τους τροχούς που φαίνονται στην Εικόνα 3—14, οι οποίοι έχουν 7 θέσεις: 1 κενή από την οποία περνά το πλήρες σήμα, 5 θέσεις με διαφορετικά ND φίλτρα και 1 θέση με μαύρο λάστιχο που αποκόπτει πλήρως την δίοδο της ακτινοβολίας.

3.1.5 Φωτοανιχνευτές (Photodetectors)

Μετά τον επιτυχή διαχωρισμό της ακτινοβολίας και την καθοδήγηση των μηκών κύματος και των πολώσεων σε ξεχωριστά κανάλια, ο επόμενος στόχος είναι η ανίχνευση των φωτονίων και η “μετάφρασή” τους σε πληροφορία.

⁸¹ Τα συλλεγόμενα φωτόνια δεν μοιράζονται την αρχική πόλωση εκπομπής είτε λόγω του φαινομένου της αποπόλωσης κατά τη σκέδασή τους από την ατμοσφαιρική ύλη είτε επειδή ανήκουν στην ακτινοβολία υποβάθρου και, έτσι, είναι μερικώς πολωμένα με ενδεχομένως διαφορετικές πολώσεις.

Η ενέργεια ενός φωτονίου δίνεται από τη σχέση:

$$E_{\text{photon}} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240 \text{ [eV} \cdot \text{nm]}}{\lambda \text{ [nm]}} \quad \{3.3\}$$

όπου h η σταθερά του Planck, c η ταχύτητα του φωτός και λ το μήκος κύματος του φωτονίου.

Μετά από αντικατάσταση του λ στην σχέση, η ενέργεια είναι της τάξης των μερικών eV (για $\lambda = 355$ nm η ενέργεια είναι 3.5 eV). Παρότι είναι αληθές ότι συλλέγεται μεγάλος αριθμός φωτονίων (της τάξης των 10^{10} - 10^{15}), η ανάγκη για μετατροπή της ενέργειάς τους σε αξιοποιήσιμο ρεύμα από ηλεκτρονικά συστήματα επιβάλλει τη χρήση ανιχνευτών που θα “πολλαπλασιάσουν” τον αντίκτυπό τους. Τούτο επιτυγχάνεται με τη χρήση φωτοανιχνευτών, όπως είναι η φωτοδίοδος χιονοστιβάδας (Avalanche Photodiode – APD) και ο φωτοπολλαπλασιαστής (Photomultiplier Tube – PMT).

Στη συγκεκριμένη διάταξη, η χρήση της φωτοδίοδου δεν αποσκοπεί στην ανίχνευση της συλλεγόμενης ακτινοβολίας και στην παραγωγή αξιοποιήσιμου σήματος τάσης, αλλά εστιάζεται σε έναν άλλον βασικό ρόλο. Τοποθετημένη κοντά στην πηγή της δέσμης και συνδεδεμένη με το σύστημα καταγραφής του σήματος, συλλέγει ένα μικρό τμήμα της έντασης κάθε εκπεμπόμενου παλμού⁸² έτσι με την ανίχνευση αυτού του σήματος εκκινεί η διαδικασία της καταγραφής.



Εικόνα 3—7. Σχηματική αναπαράσταση της φωτοδίοδου χιονοστιβάδας στη διάταξη (εικόνα από το εγχειρίδιο).

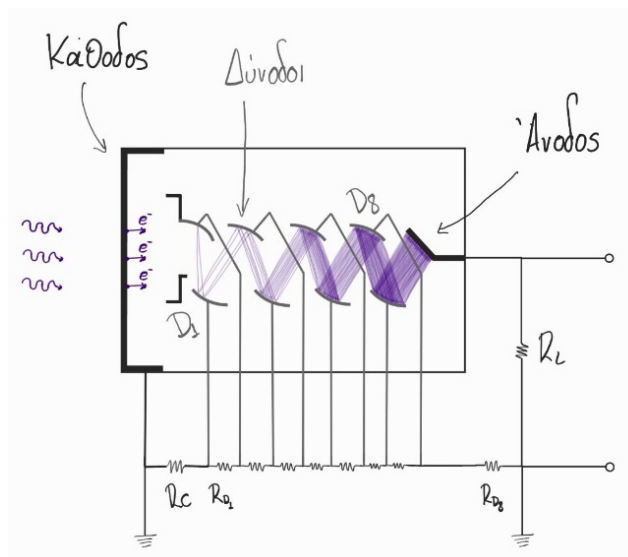
Όπως εξηγήθηκε στην ενότητα 2.3.2.1, ο χρόνος της πλήρους καταγραφής του οπισθοσκεδαζόμενου παλμού είναι πολύ μικρότερος συγκριτικά με το χρόνο ανάμεσα στις εκπομπές παλμών. Επομένως, το σύστημα καταγραφής δεν χρειάζεται να βρίσκεται σε συνεχή λειτουργία, αλλά αρκεί να λαμβάνει κάποιο σήμα από την εκπομπή κάθε παλμού, ώστε να ξεκινά

⁸² Υπάρχουν δύο τρόποι για τη συλλογή τμήματος της δέσμης. Ο πρώτος είναι να τοποθετηθεί η φωτοδίοδος σε θέση τέτοια ώστε να λαμβάνει μέρος της ανάκλασης του παλμού, στην οποία περίπτωση χρησιμοποιείται κάτοπτρο υψηλής ανακλαστικότητας. Ο δεύτερος τρόπος είναι να χρησιμοποιηθεί κάτοπτρο που δεν προσφέρει την ίδια υψηλή ανακλαστικότητα και η φωτοδίοδος να τοποθετηθεί πίσω από αυτό, ώστε να λαμβάνει το ποσοστό του παλμού που διαδίδεται, αντί να ανακλάται. Στη συγκεκριμένη διάταξη χρησιμοποιείται ο πρώτος τρόπος συλλογής.

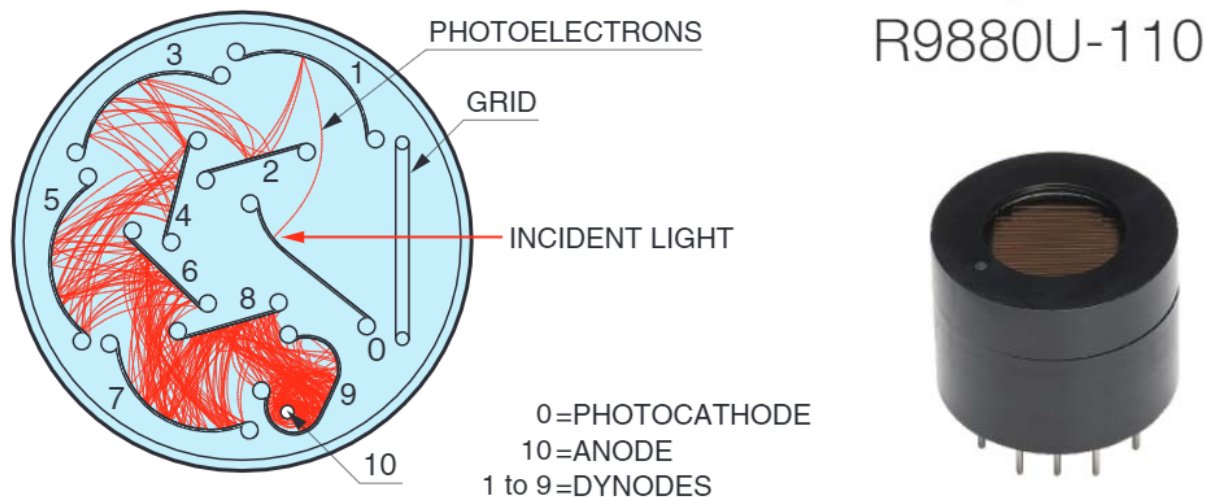
3.1 Θεμελιώδη Στοιχεία της Διάταξης LR111-ESS-D300

η καταγραφή. Παράλληλα, συλλέγονται και δεδομένα για την ενέργεια laser ανά παλμό, τα οποία χρησιμοποιούνται για τον ποιοτικό έλεγχο της αξιοπιστίας των μετρήσεων ενώ αποτελούν ακόμη έναν γνώμονα για τη συντήρηση της πηγής της δέσμης. Ας σημειωθεί ότι η φωτοδίοδος χιονοστιβάδας χρησιμοποιείται συχνά για την καταγραφή της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας με μήκος κύματος 1064 nm.

Το έργο της ανίχνευσης και ενίσχυσης της συλλεγόμενης ακτινοβολίας αναλαμβάνει ο φωτοπολλαπλασιαστής, η λειτουργία του οποίου βασίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Συγκεκριμένα, όταν ένα φωτόνιο προσπέσει στην μεταλλική φωτοκάθοδο του φωτοπολλαπλασιαστή και παράλληλα έχει ικανή ενέργεια για να καλύψει το ενεργειακό χάσμα μεταξύ της ζώνης σθένους και της ζώνης αγωγιμότητας του μετάλλου, τότε ένα ηλεκτρόνιο ελευθερώνεται. Μπροστά στην φωτοκάθοδο σε κοντινή απόσταση βρίσκεται η πρώτη μιας αλληλουχίας δυνόδων, μεταξύ των οποίων έχει εφαρμοστεί διαφορά δυναμικού –αυξανόμενη κατά βήματα–, ώστε το ηλεκτρόνιο απευθείας να επιταχυνθεί και να προσπέσει σε αυτήν. Από την πρόσκρουση του αρχικού ηλεκτρονίου θα παραχθούν δευτερογενή ηλεκτρόνια που θα επιταχυνθούν με τη σειρά τους προς τη δεύτερη στη σειρά δύνοδο. Κατ' αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ο ταχύς πολλαπλασιασμός των ηλεκτρονίων, τα οποία τελικώς συλλέγονται στην άνοδο, που βρίσκεται μετά την τελευταία δύνοδο, παράγοντας ρεύμα της τάξης μερικών mA. Η τάση που εφαρμόζεται μεταξύ των δυνόδων είναι της τάξης των 100-200 V ενώ μεταξύ καθόδου και ανόδου η συνολική διαφορά δυναμικού είναι περίπου 1000-2000 V, θεωρώντας την ύπαρξη 10 δυνόδων. Οι δύνοδοι είναι άκρως αναγκαίο να τοποθετούνται με τρόπο, ώστε να συλλέγουν όσο το δυνατόν περισσότερα ηλεκτρόνια, ελαχιστοποιώντας τις απώλειες, οι δε αποστάσεις μεταξύ τους πρέπει να είναι όμοιες, καθώς τα ηλεκτρόνια στο ταξίδι τους μέσα στον φωτοπολλαπλασιαστή διανύουν διαδρομές διαφορετικού μήκους σε ξεχωριστά ηλεκτρικά πεδία.



Εικόνα 3—8. Σχηματική αναπαράσταση ενός φωτοπολλαπλασιαστή γραμμικής εστίασης (Photomultiplier Tube). Τα φωτόνια οδηγούν στην εκπομπή ηλεκτρονίων (φωτοηλεκτρικό φαινόμενο) και τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται προς τις δυνόδους χάρη στη διαφορά δυναμικού μεταξύ των δυνόδων. Εκεί πολλαπλασιάζονται (δευτερογενής εκπομπή ηλεκτρονίων) και τελικά συλλέγονται στην άνοδο, όπου παράγεται ρεύμα μερικών mA.



Εικόνα 3—9. Σχηματική αναπαράσταση φωτοπολλαπλασιαστή κυκλικού σχήματος⁸³.

Εικόνα 3—10. Φωτοπολλαπλασιαστής κυκλικής εστίασης (Hamamatsu GmbH, R9880U series)⁸⁴.

Το υλικό της καθόδου του φωτοπολλαπλασιαστή επιλέγεται με στόχο το μικρό του έργο εξαγωγής, ώστε να μπορούν να παραχθούν e^- ακόμη και σε συνθήκες άσυχνης συλλογής φωτονίων, όταν δηλαδή συλλέγονται μονάχα μερικά διακριτά φωτόνια. Ωστόσο, η ευαισθησία της καθόδου αποτελεί παράλληλα και μειονέκτημα, αφού σε αυτήν οφείλεται το λεγόμενο ρεύμα σκότους, ένας σημαντικός παράγοντας θορύβου του σήματος lidar. Όπως δηλώνει και το όνομά του, το ρεύμα αυτό δημιουργείται σε συνθήκες απολύτου σκότους, όταν το παράθυρο του τηλεσκοπίου είναι κλειστό και έτσι δεν επιτρέπεται η διέλευση φωτονίων. Τον κυριότερο λόγο της εμφάνισης ρεύματος σκότους συνιστά η ασθενής θερμοϊονική εκπομπή ηλεκτρονίων από την φωτοκάθοδο, καθώς ηλεκτρόνια μπορούν να διαβούν το ενεργειακό χάσμα του μετάλλου της φωτοκαθόδου ακόμη και σε θερμοκρασίες δωματίου. Το ρεύμα θερμοϊονικής εκπομπής δίνεται από το νόμο Richardson – Dushman⁸⁵:

$$i_{Th} = aAT^2 \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right) \quad \{3.4\}$$

όπου A η επιφάνεια της φωτοκαθόδου, T η θερμοκρασία, ϕ το ενεργειακό χάσμα του μετάλλου και a μία χαρακτηριστική σταθερά του υλικού⁸⁶. Για να μειωθεί ο θόρυβος του σήματος στο ελάχιστο δυνατό, οι φωτοπολλαπλασιαστές ψύχονται σε θερμοκρασία που υποδηλώνεται από την κατασκευαστική εταιρεία. Ακόμη και υπό αυτές τις συνθήκες, ασθενές ρεύμα σκότους εξακολουθεί να παράγεται και βέβαια αφαιρείται από το τελικό σήμα, όπως εξηγείται παρακάτω στο κεφάλαιο.

⁸³Hamamatsu, Photomultiplier Tubes: Basics and Applications, 4^η έκδοση, 2017

⁸⁴ <https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/type/R9880U-110/index.html> (accessed on 05/07/2021)

⁸⁵ Βλ. Wilson J. / Hawkes J., ό.π., σελ. 346.

⁸⁶ Για τα μέταλλα ισχύει $\alpha = 1.2 \cdot 10^{-6} \text{ A/m}^2\text{K}^2$.

Πίνακας 3—5. Τεχνικά χαρακτηριστικά των φωτοπολλαπλασιαστών της διάταξης.

Type	Cathode Luminous Sensitivity ($\mu\text{A/lm}$)	Anode Luminous Sensitivity (A/lm)	Anode Dark Current (nA)	Cathode Blue Sensitivity Index	Recommended High Voltage (V)
R9880U-110	94	259	0.02	12.6	750 - 850
R9880U-110	112	647	0.07	13.2	750 - 850
R9880U-110	114	370	0.05	13.1	750 - 850

Σημαντικά μεγέθη για τη λειτουργία του φωτοπολλαπλασιαστή είναι⁸⁷:

- Η ευαισθησία της καθόδου (Cathode Radiant Sensitivity) S :

$$S \left[\frac{\text{A}}{\text{W}} \right] = \frac{\text{intensity of produced current}}{\text{incident radiant flux @ wavelength}} = \frac{I_c}{L_p} \quad \{3.5\}$$

- Η κβαντική του απόδοση (quantum efficiency) QE:

$$\text{QE} [\%] = \frac{\# \text{ emitted } e^- \text{ from cathode}}{\# \text{ incident photons at cathode}} = \frac{1240}{\lambda [\text{nm}]} \cdot S \left[\frac{\text{A}}{\text{W}} \right] \cdot 100\% \quad \{3.6\}$$

- Η απόδοση συλλογής (collection efficiency) CE:

$$\text{CE} [\%] = \frac{\# \text{ collected } e^- \text{ at anode}}{\# \text{ emitted } e^- \text{ from cathode}} \quad \{3.7\}$$

- Η απολαβή-ενίσχυση του ρεύματος της ανόδου (gain-current amplification) και η διατήρηση της γραμμικότητάς της στο χρόνο ζωής του φωτοπολλαπλασιαστή:

$$\mu = \text{CE} \cdot \delta_1 \cdot \dots \cdot \delta_n = \frac{a^n}{(n+1)^{kn}} V^{kn} \quad \{3.8\}$$

όπου $\delta_i = I_i/I_{i-1}$ είναι ο λόγος δευτερεύουσας εκπομπής e^- μεταξύ της δυνόδου i και της αμέσως προηγούμενης, a είναι σταθερά, k είναι σταθερά που εξαρτάται από το υλικό και παίρνει τιμές μεταξύ 0.7 - 0.8, n το πλήθος των δυνόδων και V η τάση μεταξύ καθόδου και ανόδου.

- και ο νεκρός χρόνος (dead time) που αποτελεί διόρθωση στη μέθοδο καταμέτρησης φωτονίων:

$$N_{\text{obs}}^p = N_{\text{true}} e^{-\tau_d \cdot N_{\text{true}}} \quad \{3.9\}$$

$$N_{\text{obs}}^{n-p} = \frac{N_{\text{true}}}{1 + \tau_d \cdot N_{\text{true}}} \quad \{3.10\}$$

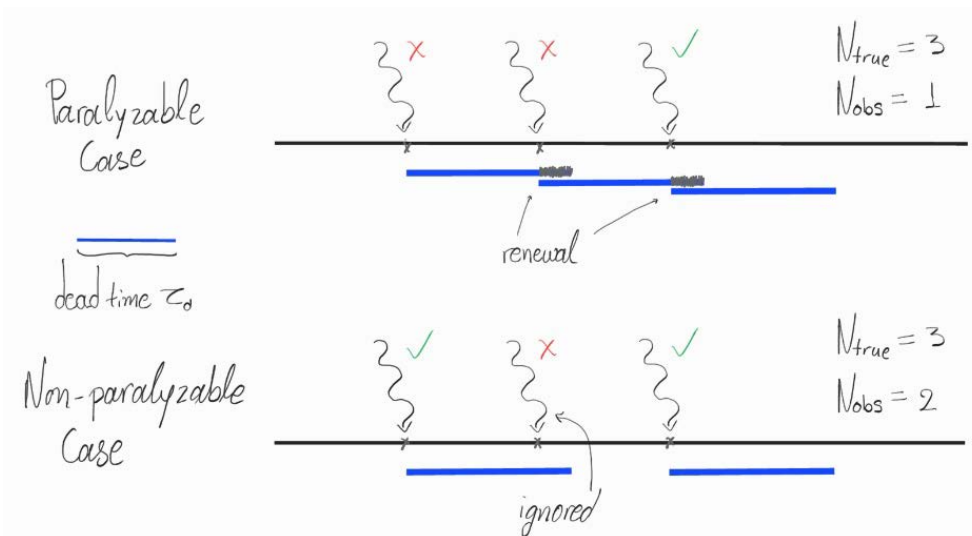
⁸⁷Hamamatsu, Photomultiplier Tubes: Basics and applications, 4th Edition, 2017.

3.1 Θεμελιώδη Στοιχεία της Διάταξης LR111-ESS-D300

όπου N_{true} και N_{obs} είναι η αληθινή και η καταγραφόμενη πρόσπτωση φωτονίων, και τ_d είναι ο νεκρός χρόνος, δηλαδή ο χρόνος για τον οποίο το σύστημα απασχολείται με την ανίχνευση και καταγραφή ενός φωτονίου.

Δύο είναι οι διαφορετικές περιπτώσεις καταγραφής, οι λεγόμενες Paralyzable και Non-paralyzable περιπτώσεις:

- ✧ Στην πρώτη περίπτωση, κατά την πρόσπτωση ενός αρχικού φωτονίου ξεκινά η ανίχνευση και η καταγραφή του με νεκρό χρόνο τ_d . Εάν προσπέσει μέσα σε αυτό το διάστημα ένα δεύτερο φωτόνιο, τότε επεκτείνεται ο χρόνος απασχόλησης κατά τ_d , ενώ ακυρώνεται η ανίχνευση του πρώτου φωτονίου. Εάν δεν προλάβει να συμπληρωθεί ο νεκρός χρόνος πριν να πέσει ένα τρίτο φωτόνιο, τότε η διαδικασία επαναλαμβάνεται και ανιχνεύεται μονάχα το τελευταίο στη σειρά φωτόνιο, η καταγραφή του οποίου δεν διακόπηκε από κάποιο επόμενο.
- ✧ Στην non-paralyzable περίπτωση, εξασφαλίζεται η επιτυχής καταγραφή ενός φωτονίου καθώς αυτή δεν διακόπτεται, ανεξαρτήτως της πρόσπτωσης ή μη επόμενων φωτονίων μέσα στο νεκρό χρόνο. Έτσι αυξάνεται η απολαβή καταγεγραμμένων φωτονίων σε σχέση με τα προσπίπτοντα.



Εικόνα 3—11. Σύγκριση των περιπτώσεων *paralyzable* και *non-paralyzable* κατά την ανίχνευση και καταγραφή φωτονίων. Στην περίπτωση *paralyzable*, η πρόσπτωση ενός νέου φωτονίου μέσα στον νεκρό χρόνο διακόπτει την καταγραφή των προηγούμενων φωτονίων και ανανεώνει το νεκρό χρόνο, επιτρέποντας την καταγραφή του τελευταίου φωτονίου. Στην περίπτωση *non-paralyzable*, η επιτυχής καταγραφή ενός φωτονίου δεν επηρεάζεται από τα ενδιάμεσα φωτόνια και η απολαβή είναι μεγαλύτερη.

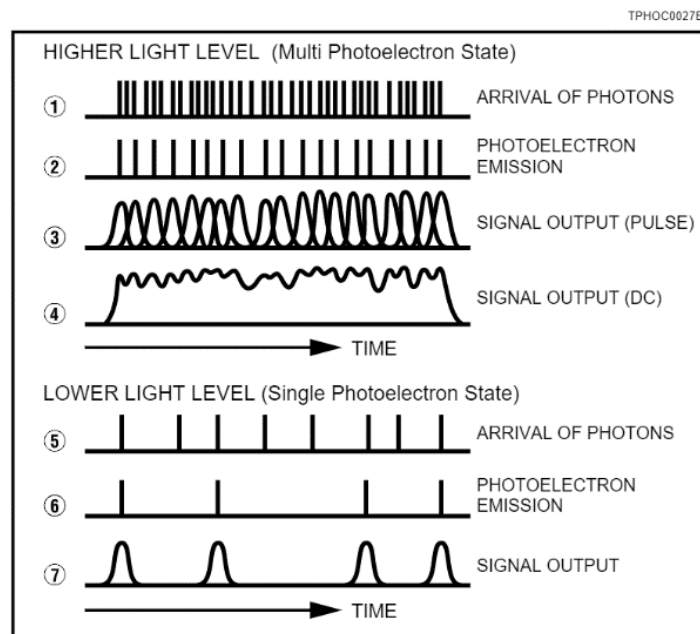
Στη συγκεκριμένη διάταξη χρησιμοποιείται η *non-paralyzable* περίπτωση. Ο νεκρός χρόνος υπολογίζεται πειραματικά (ίσος με 4 ns) με βάση τη σχέση:

$$\tau_D = \frac{N_{\text{obs}}^{n-p} - N_{\text{true}}}{N_{\text{obs}}^{n-p} \cdot N_{\text{true}}} \quad \{3.11\}$$

3.1.6 Σύστημα ψηφιοποίησης και καταγραφής σήματος (Data Acquisition System)

Στη συσκευή που χρησιμοποιήθηκε, το έργο της καταγραφής του σήματος αναλαμβάνει ο Transient Recorder (TR20-160) της εταιρείας Licel GmbH. Ο TR εφαρμόζει δύο τρόπους καταγραφής ταυτοχρόνως για κάθε φωτοπολλαπλασιαστή: την αναλογική καταγραφή (analogue mode) και την καταγραφή μέσω της καταμέτρησης φωτονίων (photon counting mode), ενώ τα σήματα που προκύπτουν από τους δύο τρόπους καταγραφής παρουσιάζονται ως ξεχωριστά κανάλια⁸⁸.

Όπως έχει αναφερθεί, στόχος της καταγραφής είναι η αντιστοίχιση των φωτονίων που συλλέγονται με το ύψος του σκεδαστή τους, η δυσκολία του οποίου στόχου εξαρτάται από το υψόμετρο και τη ροή πρόσπτωσης των φωτονίων. Η αντιστοίχιση επιτυγχάνεται με την τμηματική καταγραφή δηλαδή με το διαχωρισμό του καταγραφόμενου σήματος σε χρονικές θυρίδες, κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη υψομετρική απόσταση, όλες δε μαζί συνθέτουν το πλήρες ύψος της ατμόσφαιρας.



Εικόνα 3—12. Σύγκριση των μεθόδων της αναλογικής καταγραφής σήματος και της τεχνικής καταμέτρησης φωτονίων⁸⁹.

3.1.6.1 Αναλογική Καταγραφή - Analogue Mode

Στην πρώτη δεκάδα χιλιομέτρων, λόγω του τεράστιου φόρτου φωτονίων που προσπίπτουν στους φωτοανιχνευτές (high light intensity) και της αδύνατης διάκρισης μεταξύ τους, η πιο αξιόπιστη

⁸⁸ Συνολικά, όπως θα φανεί στη συνέχεια, τα κανάλια του σήματος είναι έξι: 355p.AN, 355p.PC, 355s.AN, 355s.PC, 387o.AN και 387o.PC εφόσον υπάρχουν τρεις φωτοπολλαπλασιαστές για τα μήκη κύματος/πολώσεις (355p, 355s και 387°) και δύο τρόποι καταγραφής για το κάθε σήμα εισόδου (analogue και photon counting).

⁸⁹ Hamamatsu, Photon Counting using Photomultiplier Tubes, 1998.

3.1 Θεμελιώδη Στοιχεία της Διάταξης LR111-ESS-D300

μέθοδος καταγραφής είναι η αναλογική, όπου το τελικό σήμα αποτελεί υπέρθεση των παραγόμενων παλμών. Την ψηφιοποίηση του αναλογικού σήματος αναλαμβάνει ο Analog to Digital Converter (ADC), βασικά χαρακτηριστικά του οποίου είναι η συχνότητα δειγματοληψίας (sampling rate), τα bits (ακρίβεια ψηφιοποίησης), η έκταση της μνήμης, δηλαδή το πλήθος των θυρίδων μνήμης / χρονικών θυρίδων (memory/time bins) και βεβαίως, το εύρος αποδεκτής τάσης εισόδου του παλμού (signal input range).

Η συχνότητα δειγματοληψίας του συγκεκριμένου TR είναι 20 MHz, που σημαίνει ότι καταγράφει 20 εκατομμύρια δείγματα ανά δευτερόλεπτο. Αν αντιστραφεί αυτή η τιμή, η καταγραφή ενός δείγματος εντός της θυρίδας πραγματοποιείται μέσα σε $\Delta t = 50 \text{ ns}$ (χρονική διακριτική ικανότητα). Σε αυτό το διάστημα ο παλμός πρέπει να έχει ταξιδέψει έως μία απόσταση και να έχει επιστρέψει. Έτσι, η χωρική διακριτική ικανότητα (ΧΔΙ) του Transient Recorder ορίζεται ως:

$$\Delta R = \frac{c \cdot \Delta t}{2} = \frac{3 \cdot 10^8 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \cdot 50 \cdot 10^{-9} [\text{s}]}{2} = \frac{15 [\text{m}]}{2} = 7.5 \text{ m} \quad \{3.12\}$$

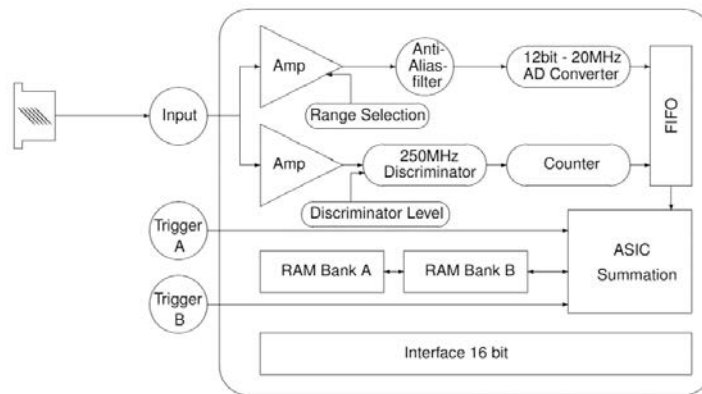
Βάσει της ΧΔΙ το σήμα εγγράφεται σε χρονική θυρίδα κάθε 7.5 m. Τούτο σημαίνει πως το lidar δεν μπορεί να διακρίνει εάν τα φωτόνια που θα εγγραφούν, για παράδειγμα, στο 4^ο bin σκεδάστηκαν ακριβώς από τα 30 m, από τα 25 m ή ήδη από τα 22.58 m. Μικρότερη ΧΔΙ μπορεί να επιτευχθεί από τους Transient Recorders με αύξηση της συχνότητας δειγματοληψίας⁹⁰.

Η ακρίβεια της ψηφιοποίησης του σήματος δίνεται από τα bits του ADC. Από αυτήν μάλιστα εξαρτάται το πλήθος των τιμών που μπορούν να αθροιστούν σε ένα bin στο χρονικό διάστημα που αντιστοιχεί σε καθένα. Ο ADC του TR12-160 στη συγκεκριμένη διάταξη έχει ακρίβεια 12 bits. Τούτο συνεπάγεται ότι στα 50 ns που αναλογούν σε κάθε bin καταγράφονται και αθροίζονται $2^{12} = 4096$ τιμές, με έναρξη από το δείκτη 0 (index).

Για να καταγραφεί ο δημιουργούμενος παλμός τάσης, πρέπει να ανήκει εντός του εύρους που επιλέγεται από τον χρήστη. Στον συγκεκριμένο TR υπάρχει δυνατότητα επιλογής μεταξύ τριών τέτοιων ευρών: [-20, 0], [-100, 0] και [-500, 0]. Το εύρος τάσης εισόδου επιλέγεται, έτσι ώστε η μέγιστη τάση που εμφανίζεται στο παραγόμενο αναλογικό σήμα lidar να βρίσκεται στο ήμισυ του εύρους. Για παράδειγμα, για τάση σήματος που ισούται με -50 mV, ο χρήστης πρέπει να επιλέξει το εύρος [-100, 0].

Το πλήθος των bins, πολλαπλασιασμένο με το πλάτος τους (binwidth), δίνει το συνολικό υψόμετρο για το οποίο καταγράφονται δεδομένα. Η έκταση της μνήμης του TR12-160 αντιστοιχεί σε $16380 \text{ bins} \times 7.5 \text{ m} = 122850 \text{ m}$.

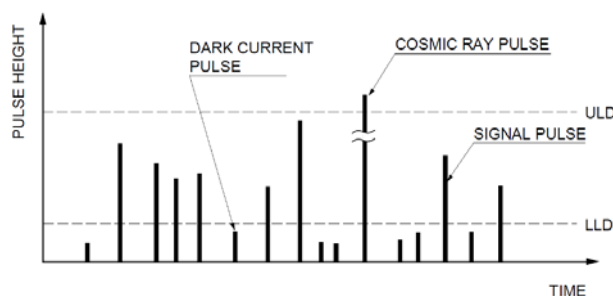
⁹⁰ Σε αυτό το σημείο υπενθυμίζεται ότι η χωρική διακριτική ικανότητα του σήματος που αναφέρθηκε στην ενότητα 2.3.2.1 ορίζει ως Δt τη διάρκεια του παλμού, με βάση τη θεωρία. Ωστόσο, έως τώρα δεν έχει επιτευχθεί τέτοια μείωση του χρόνου καταγραφής ώστε να ισούται με το πλάτος παλμού.



Εικόνα 3—13. Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας του Transient Recorder (εικόνα από το εγχειρίδιο)⁹¹. Το σήμα, ως είσοδος, καταγράφεται ταυτόχρονα από τον ADC και τον Discriminator στη μνήμη A ή στη μνήμη B, αναλόγως το trigger. Τα δεδομένα ενός νέου παλμού προστίθενται στα προηγούμενα και για τα αναλογικά σήματα και για τα σήματα της καταμέτρησης φωτονίων.

3.1.6.2 Τεχνική Καταμέτρησης Φωτονίων - Photon Counting Mode

Ταυτόχρονα με την αναλογική καταγραφή, εφαρμόζεται και η τεχνική καταμέτρησης φωτονίων. Η αξιοπιστία της αυξάνεται σε μεγαλύτερα ύψη παράλληλα με την μείωση της συχνότητας πρόσπτωσης φωτονίων (low light intensity). Με την χρήση διευκρινιστή σήματος (discriminator) με μέγιστη συχνότητα καταγραφής 250 MHz και δυνατότητα ρύθμισης του κατωφλίου σε 64 επίπεδα (discrimination levels), ο μετρητής του TR μπορεί να καταμετρήσει τα φωτόνια, συγκρίνοντας τον παραγόμενο παλμό τάσης με το άνω και κάτω κατώφλι του διευκρινιστή. Με αυτήν την σύγκριση, διασφαλίζεται ότι στην καταμέτρηση δεν συμπεριλαμβάνονται παλμοί είτε ηλεκτρονικής προέλευσης (lower level of discrimination) είτε παλμοί που παράγουν τάση μεγαλύτερη της επιθυμητής (upper level of discrimination). Βεβαίως, όπως έχει ήδη αναφερθεί, το σφάλμα δεν εκλείπει, εξαιτίας του νεκρού χρόνου του φωτοπολλαπλασιαστή. Σε συνθήκες υψηλής συχνότητας πρόσπτωσης, δηλαδή στα χαμηλά υψόμετρα όπου προτιμάται η αναλογική καταγραφή, καταμετρώνται ελάχιστα φωτόνια σε σύγκριση με όσα προσπίπτουν στο διάστημα του νεκρού χρόνου. Αντίθετα, σε συνθήκες αραιής πρόσπτωσης φωτονίων οι παρατηρούμενοι παλμοί –παρότι υποεκτιμημένοι– είναι πιο κοντά στην αληθινή τιμή.



Εικόνα 3—14. Σχηματική αναπαράσταση της σύγκρισης των παραγόμενων παλμών με το άνω και κάτω κατώφλι του διευκρινιστή σήματος.⁹²

⁹¹ Licel GmbH, TR12-160: Lidar transient recorder manual, 2012 (<http://licel.com/manuals/TRInstallation.pdf> - accessed: 05/07/2021).

⁹² Hamamatsu, Photomultiplier Tubes: Construction and Operating Characteristics, Connections to External Circuits.

3.1.6.3 Analogue Binshift

Στο στάδιο της επεξεργασίας των δεδομένων lidar, τα σήματα που προκύπτουν από την αναλογική καταγραφή και την τεχνική καταμέτρησης φωτονίων για το ίδιο μήκος κύματος και την ίδια πόλωση συγκολλούνται (gluing) στο υψόμετρο στο οποίο και τα δύο σήματα είναι αξιόπιστα, δηλαδή όταν έχουν ικανοποιητικά χαμηλό θόρυβο σήματος (signal-to-noise ratio – SNR). Για την συγκόλληση αυτή πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν μια παράμετρος που ονομάζεται binshift, η οποία και αφορά στην καθυστέρηση της καταγραφής του αναλογικού σήματος ως προς το σήμα της καταμέτρησης φωτονίων. Μία τυπική τιμή για το μέγεθος αυτής της καθυστέρησης δίνεται από την κατασκευαστική εταιρεία, αλλά μετριέται και πειραματικά για κάθε διάταξη (εν προκειμένω, το binshift ισούται με 9 bins). Πριν συγκολληθούν τα δύο σήματα πρέπει το αναλογικό σήμα να διορθωθεί (binshift correction), διαγράφοντας δηλαδή τα πρώτα bins, ώστε οι τιμές των δύο καναλιών να ξεκινούν από το ίδιο bin και έτσι οι γραφικές παραστάσεις των σημάτων να έχουν κοινό άξονα x.

3.1.6.4 Trigger Delay

Τέλος, υπάρχει ακόμα μια πηγή σφάλματος που αφορά και στις δύο μεθόδους καταγραφής: αυτή είναι το trigger delay. Όπως έχει αναφερθεί, η έναρξη της καταγραφής του σήματος από τον TR σηματοδοτείται από την ίδια την πηγή laser κατά την εκπομπή κάθε παλμού. Μέρος την ακτίνας διαδίδεται πίσω από το πρώτο κάτοπτρο και ανιχνεύεται από τη φωτοδίοδο χιονοστιβάδας που συνδέεται με τον TR. Από τη στιγμή της εκπομπής του παλμού μέχρι τη έναρξη της καταγραφής στο πρώτο bin της μνήμης απαιτείται κάποιος χρόνος, ο οποίος αντιστοιχεί σε bins. Όπως και με το binshift και τον νεκρό χρόνο του φωτοπολλαπλασιαστή, η κατασκευαστική εταιρεία δίνει μια τυπική τιμή για τον πλήθος των bins, αλλά χρειάζεται πειραματική επιβεβαίωση του αριθμού αυτού για κάθε διάταξη. Εν προκειμένω, η ονομαστική τιμή του trigger delay αντιστοιχεί σε 1 bin (50 ± 25 ns). Αυτό σημαίνει ότι τα φωτόνια που καταγράφονται στο πρώτο bin που αντιστοιχεί στα πρώτα 7.5 m δεν προέρχονται πράγματι από αυτό το ύψος αλλά από το εύρος 7.5-15.0 m.

3.2 Βελτιστοποίηση του σήματος lidar

Η πληροφορία του λαμβανόμενου σήματος έχει εν τη γενέσει της θόρυβο, οφειλόμενο σε δύο πηγές, πέραν από το dead time και το trigger delay: η μία είναι η ακτινοβολία υποβάθρου και η άλλη είναι το ρεύμα σκότους που μετρά ο φωτοπολλαπλασιαστής κατά τη λειτουργία του. Αμφότερες οι αιτίες θορύβου μπορούν να αφαιρεθούν με επιτυχία. Η δε αφαίρεσή τους συμβαίνει πριν από οποιαδήποτε άλλη επεξεργασία του σήματος.

➔ Αφαίρεση ρεύματος σκότους

Είναι κοινή πρακτική να προγραμματίζεται κύκλος μετρήσεων με ερμητικά κλειστό το παράθυρο του τηλεσκοπίου, ώστε η δέσμη laser να πυροδοτεί την καταγραφή, πλην όμως να εξέρχεται από τη διάταξη χωρίς έπειτα να συλλέγεται ακτινοβολία. Επομένως, ο φωτοπολλαπλασιαστής μετρά μονάχα το ρεύμα σκότους και το καταγράφει με την ίδια διαδικασία, όπως τις κανονικές μετρήσεις, οργανωμένο δηλαδή σε ισάριθμες χρονικές θυρίδες. Έτσι, η τιμή κάθε θυρίδας (αφού έχουν αθροιστεί δεδομένα ισάριθμες φορές με

3.3 Μορφή ενός αρχείου lidar

το πλήθος των παλμών laser) θα μπορεί να αφαιρεθεί από την αντίστοιχη θυρίδα του κανονικού σήματος lidar.

➔ Αφαίρεση ακτινοβολίας υποβάθρου

Λόγω της εξασθένησης της δέσμης laser καθ' ύψος της ατμόσφαιρας, είναι ασφαλής η θεώρηση ότι η δέσμη αποσβέννυται πλήρως σε κάποιο ύψος και η συλλεγόμενη από το lidar ακτινοβολία από εκείνο το ύψος και πάνω δεν μπορεί να οφείλεται σε οπισθοσκέδαση της δέσμης αλλά μονάχα σε ακτινοβολία υποβάθρου. Έτσι, υπολογίζεται μια μέση τιμή της έντασης τους σήματος lidar σε μεγάλο ύψος, π.χ. 20 – 25 km ή ακόμα ψηλότερα και αυτή η τιμή αφαιρείται από κάθε bin του αθροισμένου σήματος.

3.3 Μορφή ενός αρχείου lidar

Ως επίλογος του κεφαλαίου ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή ενός αρχείου ανεπεξέργαστων δεδομένων lidar, όπως καταγράφεται από τη συγκεκριμένη διάταξη:

```
DW1962600.403297
KA-std 26/06/2019 00:40:02 26/06/2019 00:40:32 0112 8.4239 49.0933 -90.0 0.0 27.0 1008.7
0000601 0020 0000601 0000 07
1 0 1 16380 1 0830 7.50 00355.p 5 0 09 000 12 000601 0.100 BT0
1 1 1 16380 1 0830 7.50 00355.p 5 0 00 000 00 000601 4.3651 BC0
1 0 1 16380 1 0800 7.50 00355.s 4 0 09 000 12 000601 0.100 BT1
1 1 1 16380 1 0800 7.50 00355.s 4 0 00 000 00 000601 4.3651 BC1
1 0 2 16380 1 0830 7.50 00387.o 1 0 09 000 12 000601 0.100 BT2
1 1 2 16380 1 0830 7.50 00387.o 1 0 00 000 00 000601 4.3651 BC2
1 0 1 00601 1 0300 1.00 00355.p 1 0 00 000 00 000001 0.000001 PD0
#
8.4744 109.4176 6.3867 40.1664 6.8837 89.6173 69.1780
8.2383 106.4892 7.1794 34.8087 7.5259 90.0499 69.1780
7.7285 102.2962 6.3147 32.5125 6.9763 86.8885 69.1780
7.8747 100.4992 6.6799 29.9168 7.0952 84.8253 69.1780
7.5550 98.6023 6.4095 28.2529 6.8827 82.6290 69.1780
7.5177 97.0715 6.3722 26.7221 6.8264 81.3644 69.1780
7.4462 95.2745 6.3479 25.1913 6.7644 79.2679 69.1780
7.4014 95.7404 6.2708 24.9917 6.6845 77.2047 69.1120
7.4640 95.6406 6.3006 22.8619 6.7547 78.4359 69.1780
7.6108 95.8735 6.3297 24.6589 6.8253 79.7338 69.1780
7.8332 98.7022 6.4497 27.8203 6.9601 84.0266 69.1780
8.1860 103.4942 6.6011 30.5158 7.2130 87.3544 69.1780
8.7008 107.7870 6.7928 32.8120 7.6005 94.6755 69.1780
9.5255 113.7105 7.1635 41.9967 8.1327 102.1631 69.1120
10.7110 118.9684 7.6992 53.7105 8.8225 106.9218 69.1780
```

Εικόνα 3—15. Δείγμα ενός αρχείου με δεδομένα lidar. Φαίνονται αναλυτικές πληροφορίες: για το lidar, για τις συνθήκες της μέτρησης και για τα εν λειτουργία κανάλια. Έπειτα, ακολουθούν οι μέσες τιμές των μετρήσεων ανά bin, οργανωμένες σε ισάριθμες με τα κανάλια στήλες. Εδώ απεικονίζονται τα πρώτα 15 bins.

Στην πρώτη γραμμή βρίσκεται το όνομα του αρχείου. Τα δύο πρώτα γράμματα, εδώ “DW”, μπορούν να αλλάζουν, ώστε να υποδηλώνουν τον ιδιοκτήτη του μηχανήματος. Το συγκεκριμένο μηχάνημα λειτουργεί για το Τεχνολογικό Ινστιτούτο της Καρλσρούης, αλλά ανήκει στη Γερμανική Μετεωρολογική Υπηρεσία (Deutscher Wetterdienst – DWD). Μετά τα δύο γράμματα, το υπόλοιπο όνομα είναι ενδεικτικό της ημέρας και ώρας (*γγMddhh.mmssSS).

Στη δεύτερη γραμμή παρατίθενται οι εξής πληροφορίες των συνθηκών της μέτρησης:

- ✘ Τοποθεσία / Είδος μέτρησης. Για παράδειγμα, οι γραφικοί χαρακτήρες “KA-std” αφορούν την κανονική μέτρηση, ενώ οι μετρήσεις dark δηλώνονται ως “DARK” κ.ο.κ.

3.3 Μορφή ενός αρχείου lidar

- ✘ Ημέρα και ώρα έναρξης (dd/MM/yy hh:mm:ss)
- ✘ Ημέρα και ώρα λήξης (dd/MM/yy hh:mm:ss)
- ✘ Υψόμετρο πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας σε m (4 ψηφία)
- ✘ Γεωγραφικό μήκος (5 συνολικά ψηφία συμπεριλαμβανομένου του “-” και 1 ψηφίο υποδιαστολής)
- ✘ Γεωγραφικό πλάτος (5 συνολικά ψηφία συμπεριλαμβανομένου του “-” και 1 ψηφίο υποδιαστολής)
- ✘ Ζενίθια γωνία σε μοίρες (2 ψηφία)⁹³
- ✘ Αζιμούθια γωνία σε μοίρες (2 ψηφία)
- ✘ Θερμοκρασία ατμόσφαιρας σε °C (3 ψηφία και 1 ψηφίο υποδιαστολής)
- ✘ Πίεση ατμόσφαιρας σε hPa (5 ψηφία και 1 ψηφίο υποδιαστολής)

Στην τρίτη γραμμή ακολουθούν πληροφορίες για το lidar:

- ✧ Πλήθος παλμών του laser 1 που εστάλησαν σε ένα προφίλ (7 ψηφία)
- ✧ Επαναληπτικότητα του laser 1 (4 ψηφία)
- ✧ Πλήθος παλμών του laser 2 που εστάλησαν σε ένα προφίλ (7 ψηφία)
- ✧ Επαναληπτικότητα του laser 2 (4 ψηφία)
- ✧ Πλήθος κύκλων μετρήσεων σε ένα ημερήσιο αρχείο (2 ψηφία)

Κατόπιν αναγράφονται τα κανάλια καταγραφής με τις ιδιαίτερες πληροφορίες τους:

- Ένα ψηφίο (1: ενεργό κανάλι, 0: μη ενεργό κανάλι)
- Ένα ψηφίο (1: Photon Counting mode, 0: Analog mode)
- Ένα ψηφίο (1: Πηγή laser 1, 2: Πηγή laser 2)
- Πλήθος κελιών μνήμης (5 ψηφία)
- N/A (1 ψηφίο)
- Τάση του PMT σε Volts (4 ψηφία)
- Χωρική Διακριτική Ικανότητα σε m (4 ψηφία και υποδιαστολή)
- Μήκος κύματος laser σε nm (5 ψηφία)
- Πόλωση (.p: parallel polarization, .s: cross polarization, .o: no (particular) polarization)
- Backward Compatibility
- Πλήθος bit του ADC για τα αναλογικά κανάλια (2 ψηφία)
- Πλήθος παλμών (6 ψηφία)
- Input range (mV) or Discriminator level (5 ψηφία και υποδιαστολή)
- Κωδική ονομασία καναλιού (BT: Analog κανάλι, BC: Photon Counting κανάλι, PD: Photodiode)
- Αριθμός του Transient Recorder (1 ψηφίο -> λειτουργούν 3 PMTs)

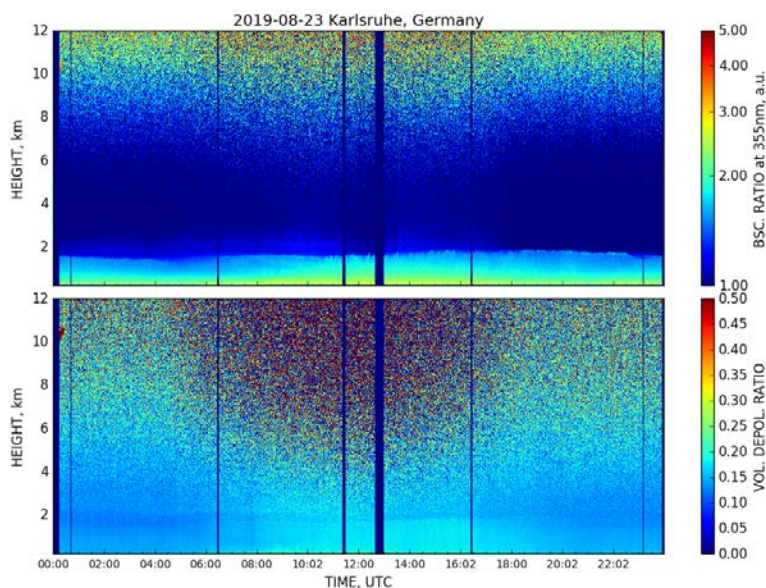
⁹³ Τα vertical lidars είναι ρυθμισμένα ακριβώς σε ζενίθια γωνία -90° (μηδενική αζιμούθια γωνία) και η κλίση του μηχανήματος (π.χ. λόγω εδάφους) διορθώνεται με τη βοήθεια ποδιών αυτόνομα ρυθμιζόμενου ύψους. Ωστόσο, αυτές οι μεταβλητές λαμβάνουν ποικίλες τιμές στην περίπτωση των scanning lidars, η κλίση της κεφαλής των οποίων, όπως προαναφέρθηκε, ρυθμίζεται κατά βούληση.

3.3 Μορφή ενός αρχείου lidar

Οι πρώτες έξι στήλες αφορούν στα 6 ενεργά κανάλια καταγραφής, με τη σειρά που εμφανίζονται οι πληροφορίες τους (η πρώτη στήλη για το 355p.AN κ.ο.κ.). Το τελευταίο κανάλι και αντίστοιχα η τελευταία στήλη αφορούν στη ενέργεια του laser, όπως ανιχνεύεται από τη φωτοδίοδο χιονοστιβάδας (PDO).

4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η μεθοδολογία της παρούσας εργασίας διαμορφώθηκε, αφότου αποδόθηκαν τα δεδομένα lidar από το Τεχνολογικό Ινστιτούτο της Καρλσρούης και είχε ως βάση τα quicklooks που παρήχθησαν από τη διάταξη LR111–ESS–D300 κατά τη λήψη των μετρήσεων για την περίοδο από 01/06/2019 έως και 31/10/2019. Αναφορικά με τον προγραμματισμό των μετρήσεων, τα συστήματα της Raymetrics S.A. παρέχουν στους ερευνητές τη δυνατότητα απομακρυσμένης και αυτόματης λειτουργίας (remote operation) ακόμη και για όλο το 24ωρο⁹⁴. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, η διάταξη λειτουργεί καθημερινά καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, ωστόσο για τη συγκεκριμένη μελέτη επιλέχθηκαν δεδομένα lidar βραδινών μετρήσεων.



Εικόνα 4—1. Αρχείο quicklook, όπως παράγεται από τη διάταξη LR111–ESS–D300. Αποτελείται από δύο ημερήσια γραφήματα οπτικών ιδιοτήτων συναρτήσει της ώρας: τον λόγο οπισθοσκέδασης (backscatter ratio) και τον χωρικό λόγο αποπόλωσης (volume particle depolarization ratio).

4.1 Διαδικασία ανίχνευσης υποθέσεων

Η ανακάλυψη της περίπτωσης υπό μελέτη δρομολογήθηκε και πάλι με βάση τα διαθέσιμα quicklooks, αυτή τη φορά ψάχνοντας για ατμόσφαιρα με στρωματώσεις (layers), εξαιρώντας από τη μελέτη όλες τις ημέρες και ώρες στις οποίες παρατηρήθηκε νεφοκάλυψη κάτω από τα 10 km.

4.1.1 BSC (Barcelona Supercomputing Center) Dust Daily Forecast

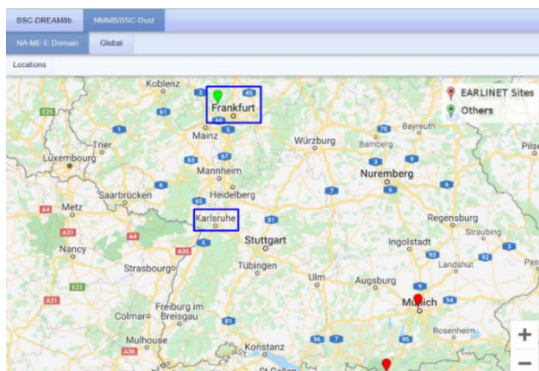
Το επόμενο βήμα της μεθοδολογίας ήταν η αξιοποίηση του νέου μοντέλου πρόγνωσης **NMMB/BSC-Dust**⁹⁵ της συγκέντρωσης ερημικής σκόνης με στόχο τη διασταύρωση μεταξύ ημερών (και ωρών) με στρωμάτωση (quicklook) και ημερών όπου προβλεπόταν συγκέντρωση ερημικής

⁹⁴ Οι σκουρόχρωμες περιοχές που φαίνεται να διακόπτουν την ροή της εικόνας αντιστοιχούν πράγματι σε ώρες/λεπτά της ημέρας όπου δεν υπάρχουν κανονικές μετρήσεις ατμόσφαιρας, είτε γιατί λαμβανόταν σκοτεινή μέτρηση (dark measurement) είτε επειδή η διάταξη ήταν εκτός λειτουργίας (π.χ. για λόγους συντήρησης).

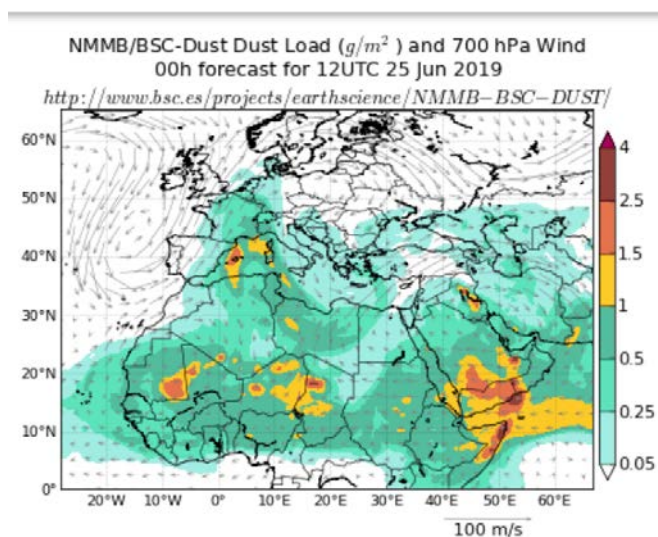
⁹⁵ <https://ess.bsc.es/bsc-dust-daily-forecast>.

4.1 Διαδικασία ανίχνευσης υποθέσεων

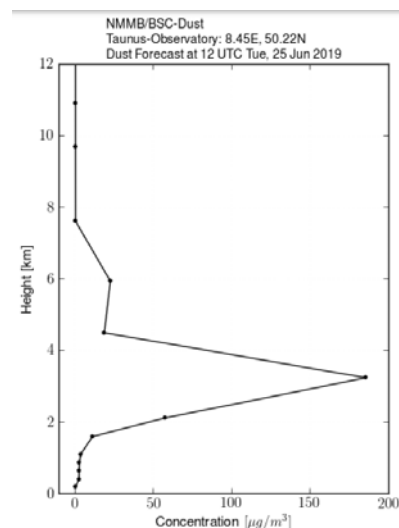
σκόνης (forecast). Ο κοντινότερος σταθμός στην Καρλσρούη με διαθέσιμα δεδομένα ήταν ο σταθμός του αστεροσκοπίου Taunus του Πανεπιστημίου Goethe της Φρανκφούρτης (Taunus Observatory – Goethe Universität)⁹⁶ γειτονικά της πόλης της Φρανκφούρτης και σε απόσταση περίπου 143 km από το ΚΙΤ.



Εικόνα 4—2. Θέση του σταθμού Taunus Observatory στο δίκτυο σταθμών του BSC Dust Daily Forecast. Στο χάρτη σημειώνεται και η θέση της Καρλσρούης.



Εικόνα 4—3. Απεικόνιση της εκτιμώμενης συγκέντρωσης ερημικής σκόνης πάνω από την Ευρώπη, τη βόρεια Αφρική και τη Μέση Ανατολή στις 15/06/2019 (12 UTC).



Γράφημα 4-1. Κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης ερημικής σκόνης στην περιοχή της Φρανκφούρτης στις 25/06/2019 (12 UTC).

Σύμφωνα με το δείγμα της Εικόνας 4—3 και του Γραφήματος 4-1, ο χρήστης του προγνωστικού μοντέλου μπορεί να δει το φορτίο ερημικής σκόνης [g/m²] σε ευρεία κλίμακα, δηλαδή πάνω στο χάρτη, και την κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης ερημική σκόνης [g/m³] πάνω από τον επιλεγμένο σταθμό σε μορφή γραφήματος. Ο προγνωστικός κύκλος ανανεώνεται κάθε 24 ώρες με έναρξη στις 12:00 UTC κάθε ημέρας και ανανεώνεται κάθε 6 ώρες, παράγοντας έτσι τα δεδομένα για τις ώρες 18:00 UTC της ίδιας ημέρας, και για τις ώρες 00:00 και 06:00 UTC της επομένης.

Η αναζήτηση μέσω του προγνωστικού μοντέλου είχε ως αποτέλεσμα την κατάληξη σε συγκεκριμένες ημερομηνίες σε όλη την έκταση των μηνών Ιουνίου-Οκτωβρίου 2019 για την οποία

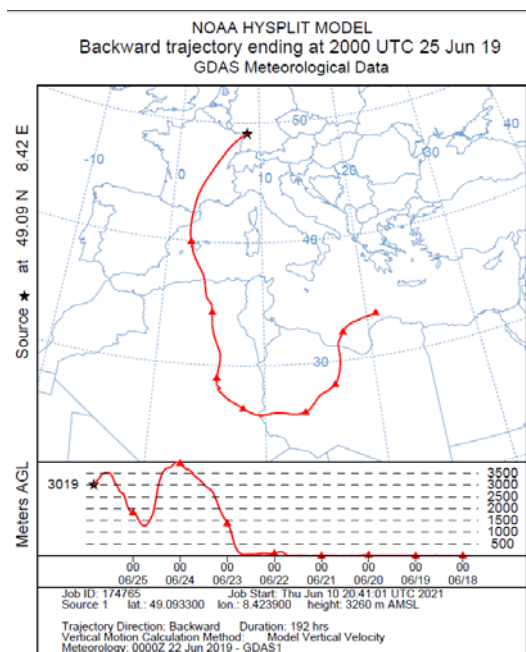
⁹⁶ https://www.goethe-university-frankfurt.de/45679989/Taunus_Observatory.

4.1 Διαδικασία ανίχνευσης υποθέσεων

υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα. Ωστόσο, η επεξεργασία επικεντρώθηκε στην περίπτωση των 24-27 Ιουνίου, καθώς τα δεδομένα lidar για τις υπόλοιπες ημερομηνίες δεν ανταποκρίνονταν στην πρόγνωση, λαμβανομένης υπόψιν της απόστασης μεταξύ Καρλσρούης – Φρανκφούρτης.

4.1.2 HYSPLIT Backwards Trajectory Model & MODIS Satellite

Το επόμενο βήμα της διαδικασίας ήταν η ενεργοποίηση του μοντέλου HYSPLIT για την εξακρίβωση της προέλευσης της ενιαίας στρωμάτωσης που εμφανίζεται στα quicklooks κατά τη διάρκεια των ημερών αυτών (βλ. Εικόνα 4—6)⁹⁷. Αφότου αναζητήθηκε αναδρομικά σε βάθος 192 ωρών (8 ημερών) η προέλευση της στρωμάτωσης για κάθε ώρα ξεχωριστά, με αφετηρία την 24^η Ιουνίου στις 20:00 UTC και πέρας την 27^η Ιουνίου στις 01:00 UTC, με επίκεντρο τις βραδινές ώρες για τις οποίες λαμβάνονται Raman μετρήσεις, επιτεύχθηκε η συνεχής παρακολούθηση των τροχιών από την έναρξη έως την λήξη του επεισοδίου⁹⁸. Εν τέλει, επιβεβαιώθηκε ότι για την πλειοψηφία των τροχιών εντός του χρονικού διαστήματος, τμήμα τους βρίσκεται πάνω από την έρημο Σαχάρα.



Εικόνα 4—4. Απεικόνιση της τροχιάς της στρωμάτωσης που παρατηρείται πάνω από το KIT στις 25 Ιουνίου 2019 στις 20:00 UTC⁹⁹. Η πηγή της σε βάθος 8 ημερών φαίνεται πως είναι η Μεσόγειος Θάλασσα και μάλιστα η αέρια αυτή μάζα περνά πολύ κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας. Στη συνέχεια, κινείται χαμηλά πάνω από το έδαφος της ερήμου μέχρι και την τέταρτη ημέρα και έπειτα ανέρχεται σε ύψος 3.5 km. Στο τέλος, καταλήγει πάνω από το KIT έχοντας αφήσει πίσω την έρημο για λιγότερες από 2 ημέρες.

⁹⁷ Stein A. et al., NOAA'S HYSPLIT ATMOSPHERIC TRANSPORT AND DISPERSION MODELING SYSTEM, American Meteorological Society, 2015 (<http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1> - accessed: 05/07/2021).

⁹⁸ Σε αυτό το στάδιο της έρευνας, χρησιμοποιήθηκε ως είσοδος η μέση τιμή του υψομέτρου της στρωμάτωσης, λαμβάνοντας υπόψιν το πάχος αυτής, όπως αναπαρίσταται στα quicklooks. Μετά την ολοκλήρωση της επεξεργασίας και έχοντας παραγάγει τις κατακόρυφες κατανομές των οπτικών ιδιοτήτων, το μοντέλο HYSPLIT ενεργοποιήθηκε εκ νέου, αυτή τη φορά έχοντας ως είσοδο τη μέση τιμή του υψομέτρου για το οποίο υπολογίστηκε η μέση τιμή του PLDR, επιτυγχάνοντας έτσι ακριβέστερη αντιστοιχία μεταξύ των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται.

⁹⁹ <https://www.ready.noaa.gov/hypub-bin/trajsrc.pl>.

4.2 Single Calculus Chain

Λαμβανομένης υπόψιν τη σύνθετη γεωγραφική θέση της Καρλσρούης και το χρονικό διάστημα της αναζήτησης (στην περίπτωση μας είναι 8 ημέρες), αναμένεται να καταγραφούν τα περισσότερα ήδη σωματιδίων. Ευρισκόμενη στη δυτική Ευρώπη, είναι αναμφίβολα εντός της εμβέλειας των καθαρών και ρυπασμένων ηπειρωτικών σωματιδίων. Επιπρόσθετα, το χρονικό διάστημα αυτό είναι αρκετό, ώστε να ανιχνευτούν θαλάσσια σωματίδια, παρότι η Καρλσρούη δεν είναι παραθαλάσσια πόλη, και τέφρα προερχόμενη από ηφαιστειακή έκρηξη¹⁰⁰, ωστόσο τέτοια ηφαιστειακή δραστηριότητα δεν παρατηρήθηκε. Τέλος, μια σημαντική πηγή αιωρούμενων σωματιδίων κατά τους καλοκαιρινούς μήνες είναι οι δασικές πυρκαγιές και έτσι η ανίχνευση σωματιδίων καύσης βιομάζας αποτελεί ένα ενδεχόμενο.

Ως μια επιπλέον δικλείδα ασφαλείας σχετικά με την ταυτότητα των σωματιδίων που καταγράφηκαν πάνω από το ΚΙΤ, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το δορυφόρο Modis, τα οποία ελήφθησαν από τον ιστότοπο FIRMS (Fire Information for Resource Management Research)¹⁰¹, ώστε να εξαιρεθεί το ενδεχόμενο προέλευσης των σωματιδίων και από καύση βιομάζας. Στον δορυφορικό αυτό χάρτη παρουσιάζονται εστίες αυξημένης θερμοκρασίας (συνοδευόμενες από ακριβείς γεωγραφικές συντεταγμένες), οι οποίες μπορεί να οφείλονται σε πυρκαγιά. Εισάγοντας ως κριτήριο την άνω του 80% πιθανότητα να πρόκειται για αληθινή φωτιά, μειώνονται δραστικά οι εστίες πάνω στο χάρτη. Με την αντιπαραβολή, ωστόσο, των τροχιών που προκύπτουν από το HYSPLIT, μπορεί να εξαχθεί ποιοτικό συμπέρασμα για την εγγύτητα της τροχιάς και της πιθανής εστίας.

Συνοπτικά, αφότου ολοκληρώθηκαν τα ανωτέρω βήματα, δημιουργήθηκε η εικόνα πως πάνω από την Καρλσρούη καταγράφηκε στρωμάτωση ερημικής σκόνης στις ημερομηνίες 24-27 Ιουνίου 2019. Η υπόθεση αυτή επιβεβαιώνεται μετά από εξέταση των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας που ακολουθεί.

4.2 Single Calculus Chain

Πρώτος, στη σειρά, στόχος για την επεξεργασία των δεδομένων ήταν η δημιουργία ενός σταθμού αφιερωμένου στο ΚΙΤ εντός του Ευρωπαϊκού δικτύου σταθμών Lidar έρευνας αερολυμάτων EARLINET (European Aerosol Research Lidar NETwork). Οι σταθμοί αυτοί αξιοποιούν μέσω διαδικτυακής πλατφόρμας τον αλγόριθμο Single Calculus Chain (SCC) για την εξαγωγή προϊόντων (products) τα οποία αντιστοιχούν σε πληροφορίες και ιδιότητες του σήματος, και σε οπτικές ιδιότητες των αερολυμάτων της ατμόσφαιρας.

Για τη διαμόρφωση αυτού του σταθμού χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από ημέρες με «καθαρή» ατμόσφαιρα, δηλαδή ημέρες που, με βάση τα quicklooks, δεν εμφανιζόταν κάποια στρωμάτωση και δεν ήταν έντονη η οπισθοσκέδαση. Ένα τέτοιο παράδειγμα φαίνεται στην Εικόνα 4—1, όπου η

¹⁰⁰ Τέτοια είναι η περίπτωση της έκρηξης του ηφαιστείου Eyjafjallajökull της Ισλανδίας το 2010, η τέφρα της οποίας καταγράφηκε και στην Ελλάδα. Οι οπτικές ιδιότητες του αερολύματος μελετήθηκαν στο ακόλουθο άρθρο: *Parayannis A. et al., Optical properties and vertical extension of aged ash layers over the Eastern Mediterranean as observed by Raman lidars during the Eyjafjallajökull eruption in May 2010, Atm. Env.* **48** (2012) 56-65.

¹⁰¹ <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>.

χρωματική κλίματα του bsc. ratio δείχνει σχεδόν μηδενική αερολυματική οπισθοσκέδαση πάνω από το PBL καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας.

Σε πρώτο στάδιο, απαιτείται από τον χρήστη της πλατφόρμας η συνολική διαμόρφωση του σταθμού, με καταχώρηση πληθώρας πληροφοριών για τον τρόπο λειτουργίας και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της διάταξης lidar¹⁰². Οι πληροφορίες αυτές σχετίζονται με τη γεωγραφική θέση του σταθμού και με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της διάταξης, δηλαδή τις πληροφορίες για το τηλεσκόπιο, την πηγή laser και τα κανάλια. Βάσει των τεχνικών που αξιοποιεί κάθε διάταξη (Klett, Raman, Depolarization), είναι απαραίτητο να δημιουργηθούν ξεχωριστές καταχωρήσεις για κάθε τεχνική (lidar configurations). Μάλιστα κάθε μία από αυτές τις καταχωρήσεις συνοδεύεται από τα δικά της κανάλια και προϊόντα¹⁰³.

Κατόπιν της υποβολής όλων αυτών των πληροφοριών και ρυθμίσεων, ο χρήστης καλείται να «ανεβάξει» τα ανεπεξέργαστα δεδομένα lidar (raw lidar data) από την πρωτεύουσα μέτρηση και από σκοτεινή μέτρηση, συνοδεία πληροφοριών σχετικών με τις συνθήκες υπό τις οποίες έγιναν οι μετρήσεις (βλ. Εικόνα 3–15) και άλλων αναγκαίων οδηγιών, με τη μορφή αρχείου netCDF και να αναθέτει αυτό το αρχείο σε μια από τις καταχωρήσεις τεχνικής. Ο αλγόριθμος SCC εκκινεί την επεξεργασία των δεδομένων αυτομάτως. Σε κάθε διακριτό στάδιο επεξεργασίας, η πλατφόρμα ενημερώνει τον χρήστη είτε για την επιτυχή εξέλιξη της είτε για σφάλματα σ' αυτήν, εμφανίζοντας στην περίπτωση σφάλματος σύντομη επεξήγηση και πρόταση επίλυσης. Έχοντας διορθώσει ό,τι επιβάλλεται για την ομαλή λειτουργία του αλγορίθμου, ο χρήστης μπορεί πλέον να λαμβάνει τα αποτελέσματα της επεξεργασίας δεδομένων lidar εντός ολίγων λεπτών και έτσι να επιταχύνει είτε την παρακολούθηση παρόντων ατμοσφαιρικών γεγονότων, καθώς αυτά λαμβάνουν χώρα, είτε την έρευνά του σε πληθώρα παρελθοντικών φαινομένων. Επιπλέον, τα αρχεία μετρήσεων και τα αντίστοιχα αποτελέσματα αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων της πλατφόρμας και έτσι είναι διαθέσιμα και για μελλοντική χρήση.

Για την επεξεργασία απαιτείται η συνδυαστική δράση δύο αλγοριθμικών μονάδων, οι οποίες καλούνται EARLINET Lidar Pre-Processor (ELPP)¹⁰⁴ και EARLINET Lidar Data Analyzer (ELDA)¹⁰⁵ αντίστοιχα. Όπως εξηγήθηκε στις ενότητες 3.1.6.3, 3.1.6.4 και 3.2, τα δεδομένα lidar δεν είναι ευθύς κατάλληλα για επεξεργασία που αποβλέπει σε εξαγωγή οπτικών ιδιοτήτων, αλλά χρήζουν προ-επεξεργασίας για την αφαίρεση θορύβων. Αξιοποιώντας πληροφορίες που έχει δώσει ο

¹⁰² Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά το σχεδιασμό μιας διάταξης lidar ακολουθούνται κάποιες βασικές αρχές ωστόσο ο τρόπος λειτουργίας ενός Raman Depolarization Lidar δεν είναι μοναδικός. Το γεγονός αυτό δεν αποτελεί εμπόδιο στην διαδικασία επεξεργασίας του SCC αφού για κάθε προϊόν έχει προβλεφθεί ποικιλία πιθανών διατάξεων (usecases), με προοπτική να εμπλουτίζονται αυτές οι καταχωρήσεις.

¹⁰³ Κατ' αυτόν τον τρόπο, για επεξεργασία μιας πρωινής μέτρησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποκλειστικά η καταχώρηση της τεχνικής Klett, για μια βραδινή μέτρηση η καταχώρηση της τεχνικής Raman, ενώ για τον αναγκαίο υπολογισμό της σταθεράς βαθμονόμησης αποπόλωσης (depolarization calibration constant) χρησιμοποιείται πάλι αντίστοιχη καταχώρηση.

¹⁰⁴ *D' Amico G. et al.*, EARLINET Single Calculus Chain – technical – Part 1: Pre-processing of raw lidar data, Atmos. Meas. Tech., **9**, 491-507, 2016.

¹⁰⁵ *Mattis I. et al.*, EARLINET Single Calculus Chain – technical – Part 2: Calculation of optical products, Atmos. Meas. Tech., **9**, 491-507, 2016.

4.2 Single Calculus Chain

χρήστης στη ρύθμιση των καναλιών και εντός του αρχείου μετρήσεων, η μονάδα ELPP αναλαμβάνει να:

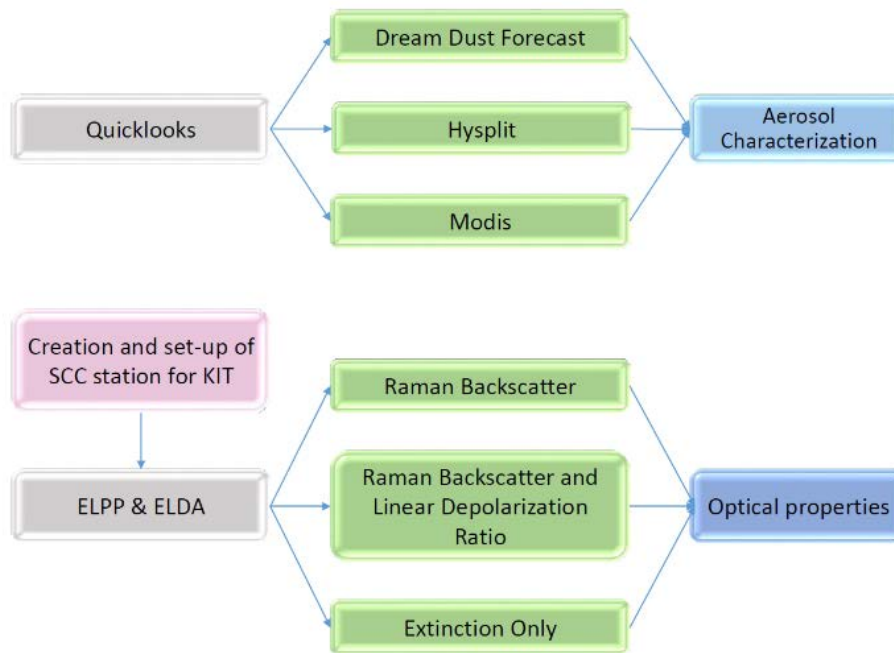
- ✓ Αφαιρεί την ακτινοβολία υποβάθρου (background radiation correction)
- ✓ Αφαιρεί το ρεύμα σκότους (dark current correction)
- ✓ Να διορθώνει τα σήματα των καναλιών καταμέτρησης φωτονίων ως προς τον νεκρό χρόνο (dead time correction).
- ✓ Να διορθώνει τα σήματα των αναλογικών καναλιών ως προς τη μετατόπισή τους (analogue binshift correction).
- ✓ Να διορθώνει τα σήματα ως προς την καθυστέρηση καταγραφής τους (trigger delay correction).
- ✓ Να συγκολλά τα αναλογικά σήματα και τα σήματα καταμέτρησης φωτονίων στο κατάλληλο υψόμετρο (gluing of analog and photon-counting signals).

Το έργο της επεξεργασίας συνεχίζεται από τη μονάδα ELDA η οποία παράγει τα αποτελέσματα βάσει των προδιαγραφών που τίθενται κατά τη ρύθμιση των επιθυμητών προϊόντων¹⁰⁶. Στην μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκαν τα εξής:

- ❖ **Raman Backscatter:** υπολογίζει τον συντελεστή οπισθοσκέδασης, χρησιμοποιώντας το σήμα οπισθοσκέδασης Raman. Στο προϊόν αυτό επιλέγεται το υψομετρικό εύρος στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η βαθμονόμηση της οπισθοσκέδασης (backscatter calibration range).
- ❖ **Raman Backscatter & Linear Depolarization Ratio:** συνδέεται με το βασικό προϊόν της οπισθοσκέδασης και το αξιοποιεί για τον υπολογισμό του χωρικού και του σωματιδιακού γραμμικού λόγου αποπόλωσης. Η σταθερά βαθμονόμησης της αποπόλωσης είναι απαραίτητη σε αυτό το βήμα και υπολογίζεται άπαξ μέσω του προϊόντος Linear Depolarization Calibration.
- ❖ **Extinction only:** υπολογίζει τον συντελεστή εξασθένησης, χρησιμοποιώντας το σήμα οπισθοσκέδασης Raman.

¹⁰⁶ Βασική προϋπόθεση για την εξαγωγή των οπτικών ιδιοτήτων, εφόσον η διάταξη lidar εφαρμόζει την τεχνική της αποπόλωσης, είναι ο υπολογισμός της σταθεράς βαθμονόμησης της αποπόλωσης (linear depolarization calibration constant). Η βαθμονόμηση ακολουθεί τη μέθοδο $\pm 45^\circ$, κατά την οποία η WSU της διάταξης στρέφεται κατά 45° εκατέρωθεν της βασικής θέσης της, ώστε λόγω της γωνίας πρόσπτωσης της ακτινοβολίας πάνω στον πολωτικό κύβο να απομειώνεται η ένταση της μίας συνιστώσας της πόλωσης κάθε φορά και να καταγράφεται εντονότερα η άλλη. Τα αρχεία που περιέχουν δεδομένα από μετρήσεις $\pm 45^\circ$ ανατίθενται στην καταχώρηση της τεχνικής depolarization calibration. Στη συνέχεια, η μονάδα ELDA παράγει το αποτέλεσμα του προϊόντος Linear Depolarization Calibration ώστε να αποκτηθεί ξεκάθαρη εικόνα για τη σχετική ένταση των δύο σημάτων πριν προχωρήσει στα άλλα προϊόντα.

4.3 Απεικόνιση κατακόρυφων κατανομών των οπτικών ιδιοτήτων

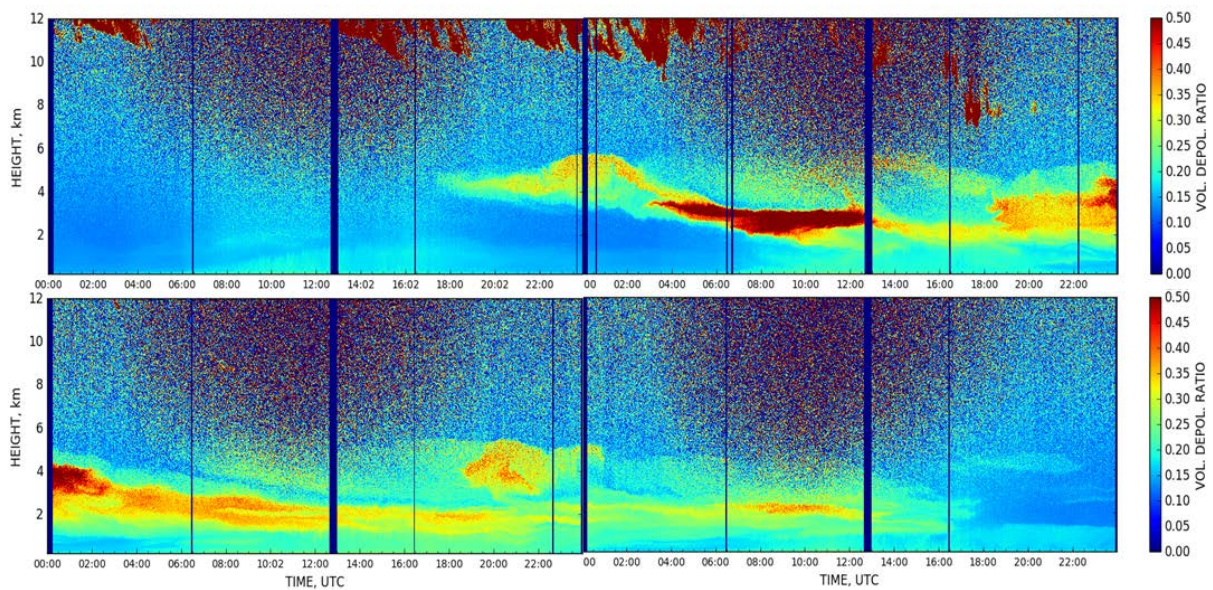


Εικόνα 4—5. Σχηματική αναπαράσταση της μεθοδολογίας για τον χαρακτηρισμό των αερολυματικών στρωματώσεων και για την ανάκτηση των οπτικών τους ιδιοτήτων.

4.3 Απεικόνιση κατακόρυφων κατανομών των οπτικών ιδιοτήτων

Αφότου είχαν παραχθεί τα τρία προφίλ, δηλαδή εκείνα του συντελεστή οπισθοσκέδασης, του συντελεστή εξασθένησης και των γραμμικών λόγων αποπόλωσης μέσω του αλγορίθμου SCC, το επόμενο βήμα της επεξεργασίας ήταν ο υπολογισμός της κατακόρυφης κατανομής του λόγου lidar (εξ. 2.28) και η συνδυαστική απεικόνιση αυτών των τεσσάρων κατανομών (βλ. Γράφημα 2-1). Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB, ο οποίος αφενός μεν παράγει την επιθυμητή απεικόνιση των οπτικών ιδιοτήτων, αφετέρου δε υπολογίζει τη μέση τιμή (και την τυπική απόκλιση της μέσης τιμής) για κάθε προφίλ μεταξύ των υψομετρικών ορίων που τίθενται από τον χρήστη. Η συνδυαστική παρατήρηση των quicklooks και των κατανομών των ιδιοτήτων συνθέτει μία ικανοποιητική εικόνα για το ύψος που παρατηρείται μια στρωμάτωση, κατ' επέκτασιν δε και των ορίων που κρίνεται ορθό να τεθούν για τον υπολογισμό των μέσων τιμών. Σημειώνεται πως τα προφίλ της αποπόλωσης ήταν αυτά που χρησιμοποιήθηκαν ως οδηγοί για την θέση αυτών των ορίων που θα εφαρμόζονταν και στις τέσσερις κατανομές.

4.4 CASE STUDY: 24-27 Ιουνίου 2019



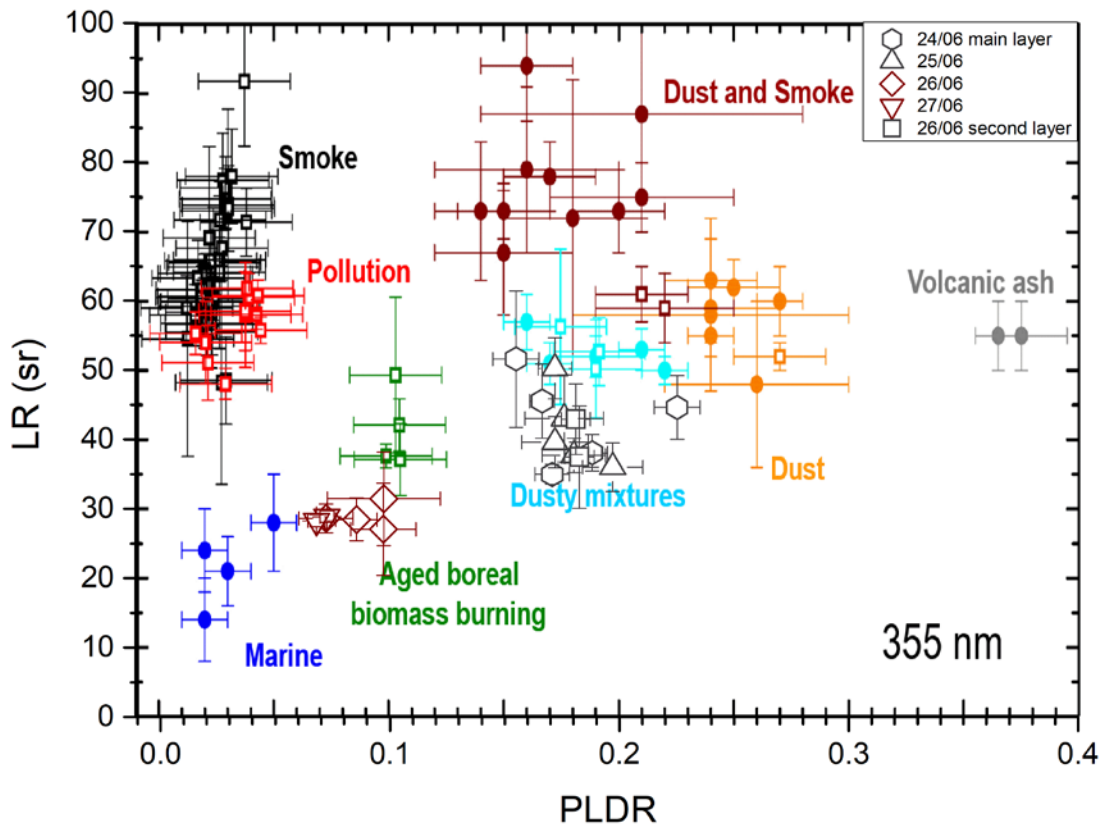
Εικόνα 4—6. Συνδυαστική παρουσίαση του επεισοδίου ερημική σκόνης μέσω του χωρικού γραμμικού λόγου αποπόλωσης (VLDR) στα quicklooks κατά τις ημερομηνίες 24-27 Ιουνίου 2019.

Παρακολουθώντας την εξέλιξη της στρωμάτωσης μέσω των quicklooks, καθίσταται εμφανές ότι το επεισόδιο της ερημικής σκόνης ξεκινά την 24^η Ιουνίου (18:00 UTC) και λήγει την 27^η Ιουνίου (~17:00 UTC). Στη διάρκεια αυτών των ημερών παρατηρείται μία πρωτεύουσα στρωμάτωση σε ύψος 4-6 km κατά την έναρξη του επεισοδίου, η οποία σταδιακά χαμηλώνει σε ύψος καθώς τα σωματίδια εναποτίθενται. Το βράδυ της 25^{ης} Ιουνίου εμφανίζεται σε ύψος 2-4.5 km και το βράδυ της 26^{ης} Ιουνίου η στρωμάτωση έχει φτάσει σε ύψος 1-2.5 km όπου παραμένει ως το τέλος του επεισοδίου. Παράλληλα, το βράδυ της 26^{ης} στις 19:00 UTC παρουσιάζεται μια δεύτερη στρωμάτωση σε ύψος 3-5 km η οποία παραμένει εμφανής έως τη 01:00 UTC της επομένης.

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των οπτικών ιδιοτήτων, αναφέρθηκε δε ανωτέρω πως η επεξεργασία των δεδομένων επικεντρώθηκε σε βραδινές μετρήσεις. Στον Πίνακα 4—1 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των οπτικών ιδιοτήτων για κάθε ώρα μέτρησης, ενώ στον Πίνακα 4—2 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των μεγεθών ανά νύκτα. Κατ' αυτόν τον τρόπο, είναι διακριτή η εξέλιξη του επεισοδίου ώρα με την ώρα αλλά και ανά 24ωρο. Πρέπει να σημειωθεί ότι η δεύτερη στρωμάτωση, για την οποία γίνεται λόγος ανωτέρω, είναι ορατή στα προφίλ του PLDR μονάχα στις ώρες 20:00 και 21:00 UTC (σημειωμένα στους πίνακες με πορτοκαλί χρώμα) και έτσι τα αποτελέσματα που αντιστοιχούν σε αυτήν την στρωμάτωση είναι περιορισμένα.

Πίνακας 4—1. Συγκεντρωτικός πίνακας με τις μέσες τιμές των οπτικών ιδιοτήτων και τις τυπικές αποκλίσεις τους, για κάθε ώρα. Από αριστερά προς δεξιά παρουσιάζονται αναλυτικά: Η ημερομηνία και η ώρα της μέτρησης, τα υψομετρικά όρια που τέθηκαν για τον υπολογισμό των μέσων τιμών, και τα αποτελέσματα για τον συντελεστή οπισθοσκέδασης (β_{aer}), τον συντελεστή εξασθένισης (α_{aer}), τον λόγο Lidar (LR) και τον σωματιδιακό γραμμικό λόγο αποπόλωσης (PLDR).

να παρατηρούνται μείγματα ερημικής σκόνης και όχι καθαρή σκόνη, εφόσον η τροχιά μιας αέριας μάζας, προερχόμενης από την έρημο, θα πρέπει να περάσει πάνω από την ηπειρωτική Ευρώπη και ενδεχομένως τη Μεσόγειο Θάλασσα. Έτσι, κατά πάσα πιθανότητα θα συλληθούσαν –εκτός από την ερημική σκόνη– καθαρά και ρυπασμένα ηπειρωτικά σωματίδια, θαλάσσια σωματίδια κ.ά.



Γράφημα 4-2. Τοποθέτηση των αποτελεσμάτων της μελέτης για το LR και το PLDR πάνω στον “χάρτη” του πειράματος HETEAC για τα είδη των αιωρούμενων σωματιδίων.

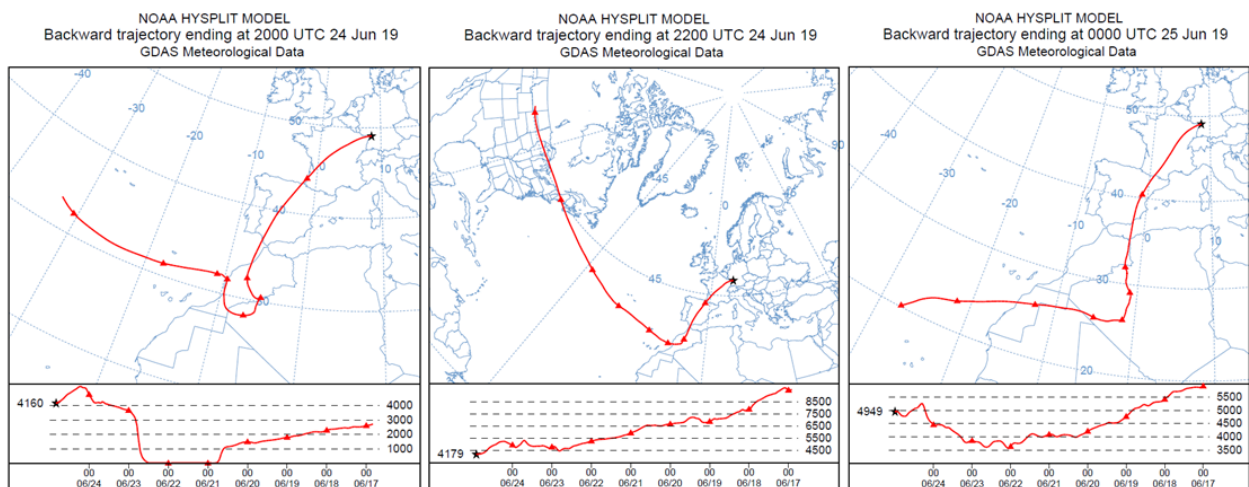
➤ Τον σωματιδιακό γραμμικό λόγο αποπόλωσης PLDR

a) 24 Ιουνίου 20:00 UTC – 26 Ιουνίου 01:00 UTC

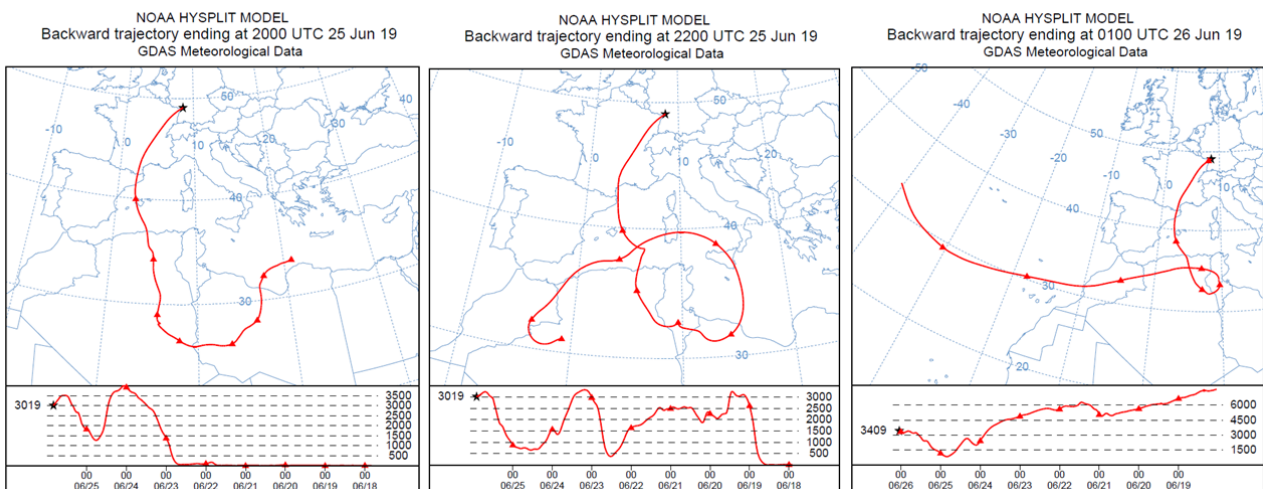
Πρώτον, από τον χάρτη των ΑΣ είναι εμφανές ότι οι τιμές του PLDR για αυτές τις ημέρες τοποθετούν τα σωματίδια αυτών των ημερών στα μείγματα σκόνης και όχι στην καθαρή σκόνη, εφόσον η μέγιστη τιμή της αποπόλωσης είναι $\delta_{\max} = 0.23$ και η μέση τιμή της αποπόλωσης είναι $\delta_{\text{ave}} = 0.18$. Δεύτερον, στον Πίνακα 4—1 σημειώνεται ότι οι τιμές της αποπόλωσης παρουσιάζουν τοπικά μέγιστα στην αρχή κάθε βραδινού κύκλου μετρήσεων και έπειτα μειώνονται. Τέλος, σύμφωνα και με τον Πίνακα 4—2, η μέση τιμή του PLDR για κάθε βράδυ έχει καθοδική πορεία. Ο λόγος της έναρξης του PLDR από τιμή χαμηλότερη της περιοχής 0.25-0.3 και της μείωσής του είναι η γήρανση των σωματιδίων (aging of particles), η οποία με τη σειρά της οφείλεται σε δύο παράγοντες: την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων (particle size distribution) συναρτήσει της απόστασης από την πηγή, και την ανάμειξη των σωματιδίων με άλλα σωματίδια, ατμοσφαιρικούς ρύπους και

4.4 CASE STUDY: 24-27 Ιουνίου 2019

υδρατμούς. Όπως έχει ήδη εξηγηθεί στην ενότητα 1.2, η ταχύτητα εναπόθεσης των σωματιδίων εξαρτάται από το μέγεθός τους και έτσι, για το ίδιο είδος σωματιδίων, αυτά που καταφέρνουν να φτάσουν σε απόσταση χιλιάδων χιλιομέτρων είναι τα μικρά σωματίδια, ενώ η εμβέλεια τη εναπόθεσης των μεγάλων σωματιδίων είναι πιο περιορισμένη. Η αποπόλωση που προκαλεί ένα σωματίδιο εξαρτάται και από την επιφάνειά του και έτσι αναμένεται μικρότερη αποπόλωση από μικρά σωματίδια ερημικής σκόνης παρατηρούμενα στην κεντρική Ευρώπη από όση προκαλούν τα μεγάλα σωματίδια σκόνης κοντά στην πηγή τους. Όσον αφορά την μείωση του συντελεστή της αποπόλωσης στη διάρκεια του επεισοδίου, αυτή οφείλεται στις προσμειξεις ρύπων και κυρίως νερού που επικαλύπτουν τα σωματίδια δίνοντάς τους σφαιρικότερο σχήμα.



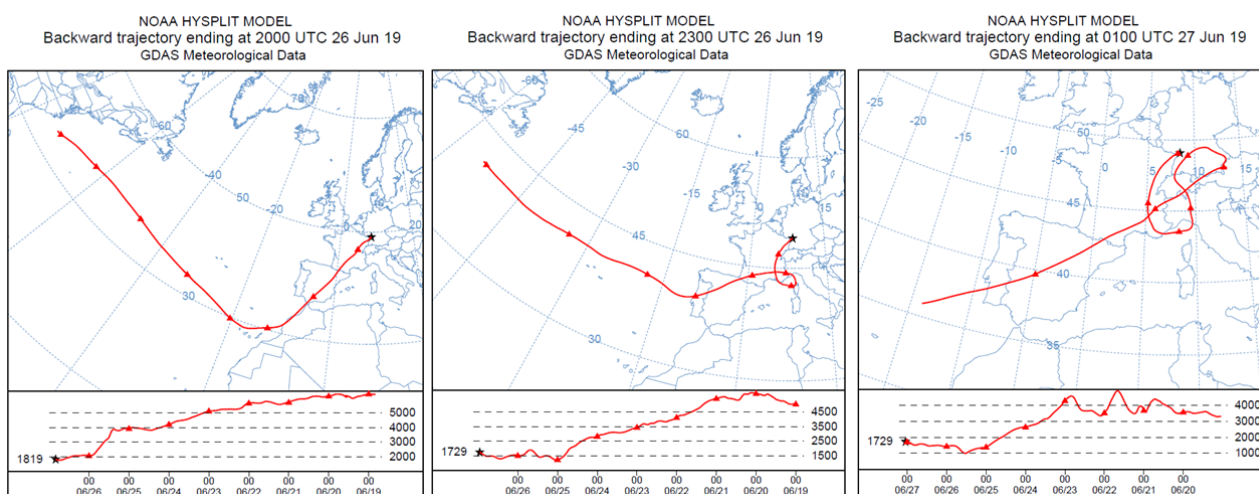
Γράφημα 4-3. Οι τροχιές των αέριων μαζών σε βάθος 8 ημερών για τις 24 Ιουνίου 20:00 UTC, 22:00 UTC και για τις 25 Ιουνίου 00:00 UTC. Η προέλευση των μαζών φαίνεται να είναι ο Ατλαντικός Ωκεανός και ο Καναδάς, ενώ ένας σταθμός των τροχιών είναι η έρημος Σαχάρα.



Γράφημα 4-4. Οι τροχιές των αέριων μαζών σε βάθος 8 ημερών για τις 25 Ιουνίου 20:00 UTC, 22:00 UTC και για τις 26 Ιουνίου 01:00 UTC. Η προέλευση των μαζών φαίνεται να είναι η Μεσόγειος Θάλασσα, η ίδια η έρημος Σαχάρα και ο Ατλαντικός Ωκεανός.

b) 26 Ιουνίου 20:00 UTC – 27 Ιουνίου 01:00 UTC

Οδεύοντας προς τη λήξη του επεισοδίου, η γενική προέλευση και η κατεύθυνση των ανέμων άλλαξαν έτσι ώστε να μην περνούν πλέον από περιοχές κοντά στην έρημο Σαχάρα. Αντ' αυτού, πέρασαν πάνω από τη Μεσόγειο και πάνω από περιοχές της ηπειρωτικής Ευρώπης από τις οποίες είχαν προηγουμένως περάσει αέριες μάζες προερχόμενες από τη Σαχάρα. Σαν αποτέλεσμα, η συλλογή των σωματιδίων πάνω από την Καρλσρούη το βράδυ της 26^{ης} -27^{ης} Ιουνίου αποτελούταν από τα ερημικά σωματίδια των προηγούμενων ημερών, τα ηπειρωτικά σωματίδια και πλέον, τα θαλάσσια σωματίδια. Η αποπόλωση που προκαλεί κάθε είδος σωματιδίων είναι διαφορετική και έτσι η συνολική εικόνα της αποπόλωσης τοποθέτησε το μείγμα σωματιδίων στη θέση που φαίνεται στο χάρτη, δηλαδή στο εύρος 0.07-0.1.



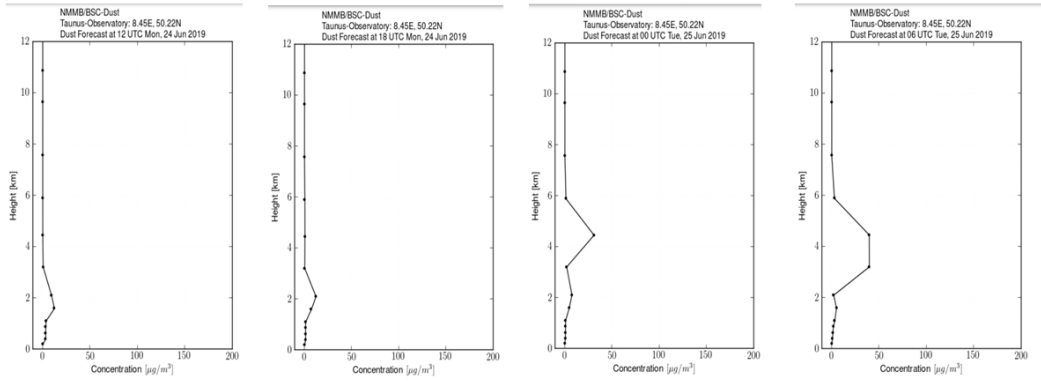
Γράφημα 4-5. Οι τροχιές των αέριων μαζών σε βάθος 8 ημερών για τις 26 Ιουνίου 20:00 UTC, 23:00 UTC και για τις 27 Ιουνίου 01:00 UTC. Η προέλευση των μαζών φαίνεται να είναι και πάλι ο Ατλαντικός Ωκεανός ενώ η κατεύθυνση των ανέμων φαίνεται να αλλάζει ώστε να μην περνούν πια πάνω από την έρημο.

➤ **Τον συντελεστή οπισθοσκέδασης και τον συντελεστή εξασθένησης**

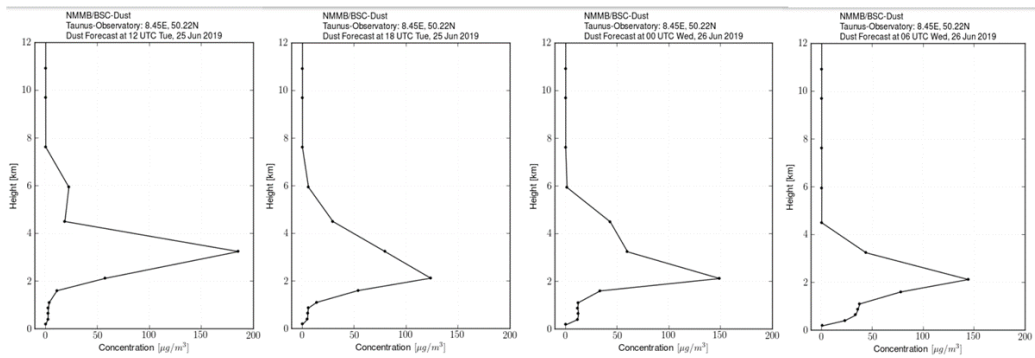
Τα σωματίδια ερημικής σκόνης δρουν κυρίως ως απορροφητές της ακτινοβολίας και αντίθετα, τα θαλάσσια σωματίδια δρουν ως οπισθοσκεδαστές. Ωστόσο, τα φαινόμενα της απορρόφησης και οπισθοσκέδασης συμβαίνουν ταυτόχρονα και για τα δύο είδη σωματιδίων. Από τους πίνακες μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι συντελεστές οπισθοσκέδασης και εξασθένησης παρουσιάζουν αύξηση: η μεν οπισθοσκέδαση αυξάνεται συνεχώς ανά ώρα, η δε εξασθένηση παρουσιάζει τοπικά μέγιστα και ελάχιστα¹⁰⁷. Ένας λόγος που τα φαινόμενα αυτά γίνονται εντονότερα είναι το αυξητικά μεταβαλλόμενο φορτίο ερημικής σκόνης, το οποίο προβλέπεται από το προγνωστικό μοντέλο στα κάτωθι γραφήματα, καθώς όσο περισσότερα σωματίδια συγκεντρώνονται, τόσες περισσότερες επιφάνειες προσφέρονται για εξασθένηση της δέσμης και οπισθοσκέδαση.

¹⁰⁷ Στο σημείο αυτό υπενθυμίζεται ότι η εξασθένηση της ακτινοβολίας οφείλεται όχι μόνο στην απορρόφηση αυτής από τα μόρια και σωματίδια της ατμόσφαιρας, αλλά και στη σκέδασή της προς όλες τις κατευθύνσεις, συμπεριλαμβανομένης και της σκέδασης σε γωνία $\theta = \pi$.

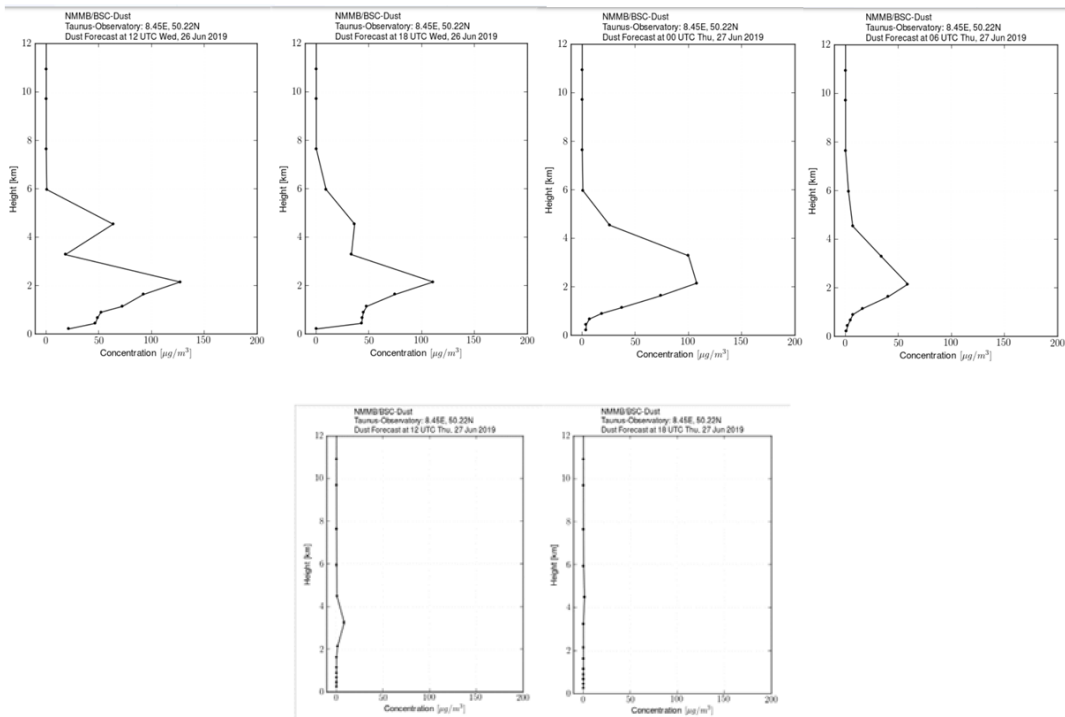
4.4 CASE STUDY: 24-27 Ιουνίου 2019



Γράφημα 4-6. Αναμενόμενη συγκέντρωση σκόνης πάνω από τη Φρανκφούρτη σύμφωνα με το προγνωστικό μοντέλο NMMB/BSC-Dust, για το διάστημα 24 Ιουνίου 12:00 UTC – 25 Ιουνίου 06:00 UTC, ανά δωρο.



Γράφημα 4-7. Αναμενόμενη συγκέντρωση σκόνης πάνω από τη Φρανκφούρτη σύμφωνα με το προγνωστικό μοντέλο NMMB/BSC-Dust, για το διάστημα 25 Ιουνίου 12:00 UTC – 26 Ιουνίου 06:00 UTC, ανά δωρο.



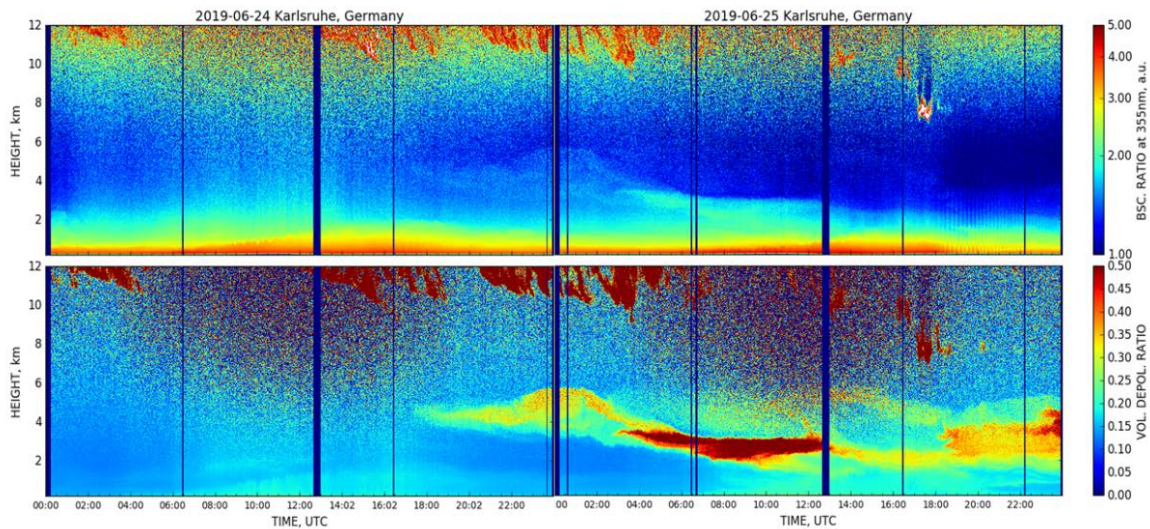
Γράφημα 4-8. Αναμενόμενη συγκέντρωση σκόνης πάνω από τη Φρανκφούρτη σύμφωνα με το προγνωστικό μοντέλο NMMB/BSC-Dust, για το διάστημα 26 Ιουνίου 12:00 UTC – 27 Ιουνίου 18:00 UTC, ανά δωρο.

Όπως φαίνεται στα γραφήματα, η πρόγνωση για τη μέγιστη συγκέντρωση σκόνης ήταν περίπου $190 \mu\text{g}/\text{m}^3$ την 25^η Ιουνίου 12:00 UTC και έπειτα άρχισε να μειώνεται, έως το μηδενισμό της το απόγευμα της 27^{ης}. Οι μέσες τιμές των συντελεστών οπισθοσκέδασης και εξασθένησης της δέσμης, ωστόσο, δεν μειώθηκαν σε παραλληλία με τη μείωση της συγκέντρωσης σκόνης και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι αέριες μάζες που καταγράφονταν πάνω από την Καρλσρούη δεν περιείχαν μονάχα ερημική σκόνη, όπως εξηγήθηκε ήδη. Το προγνωστικό μοντέλο μπορεί να υπολογίζει πόση αναμένεται να είναι η συγκέντρωση σκόνης με βάση τις τροχιές και τις ταχύτητες των ανέμων, εντούτοις η πρόγνωση δεν επεκτείνεται σε όλο το σωματιδιακό φορτίο που συναντά στο ενδιάμεσο ο άνεμος και το μεταφέρει στην τοποθεσία της μέτρησης.

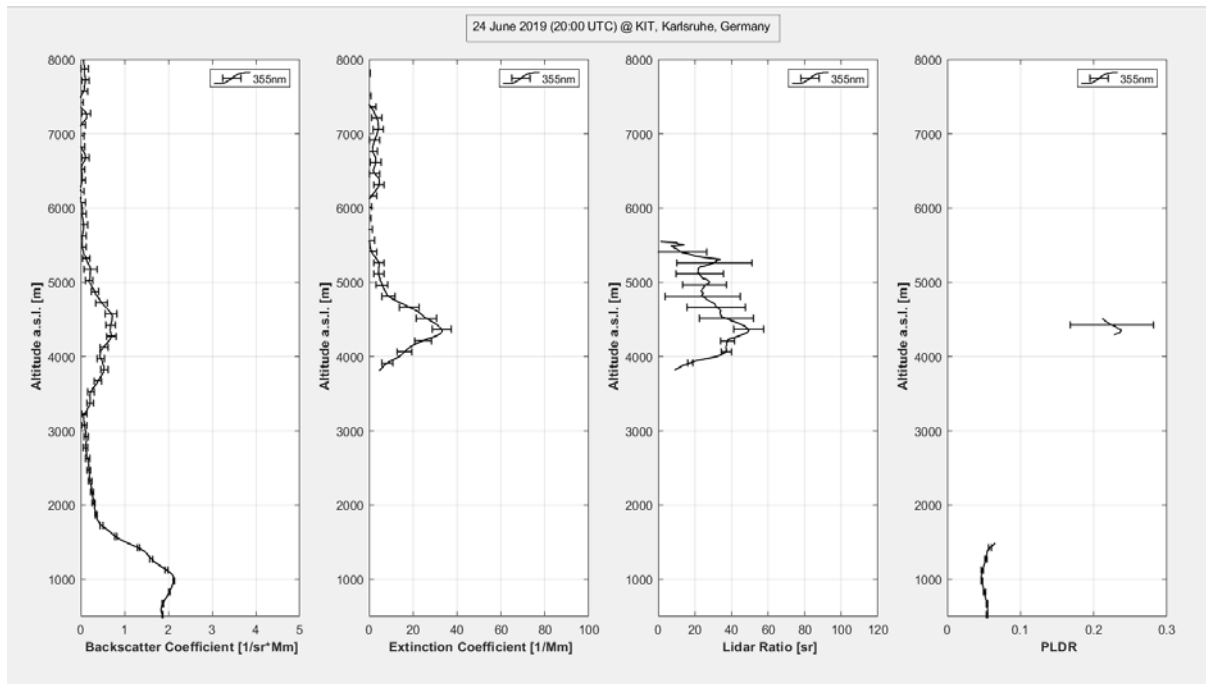
4.4.1 Παρακολούθηση του επεισοδίου μέσα από γραφήματα

Σε αυτό το τμήμα παρατίθενται οι πιο χαρακτηριστικές απεικονίσεις των κατακόρυφων προφίλ των οπτικών ιδιοτήτων, οργανωμένες ανά βράδυ, συνοδεία των αντιστοίχων quicklooks.

4.4.2 24 June 20:00 UTC – 25 June 00:16 UTC

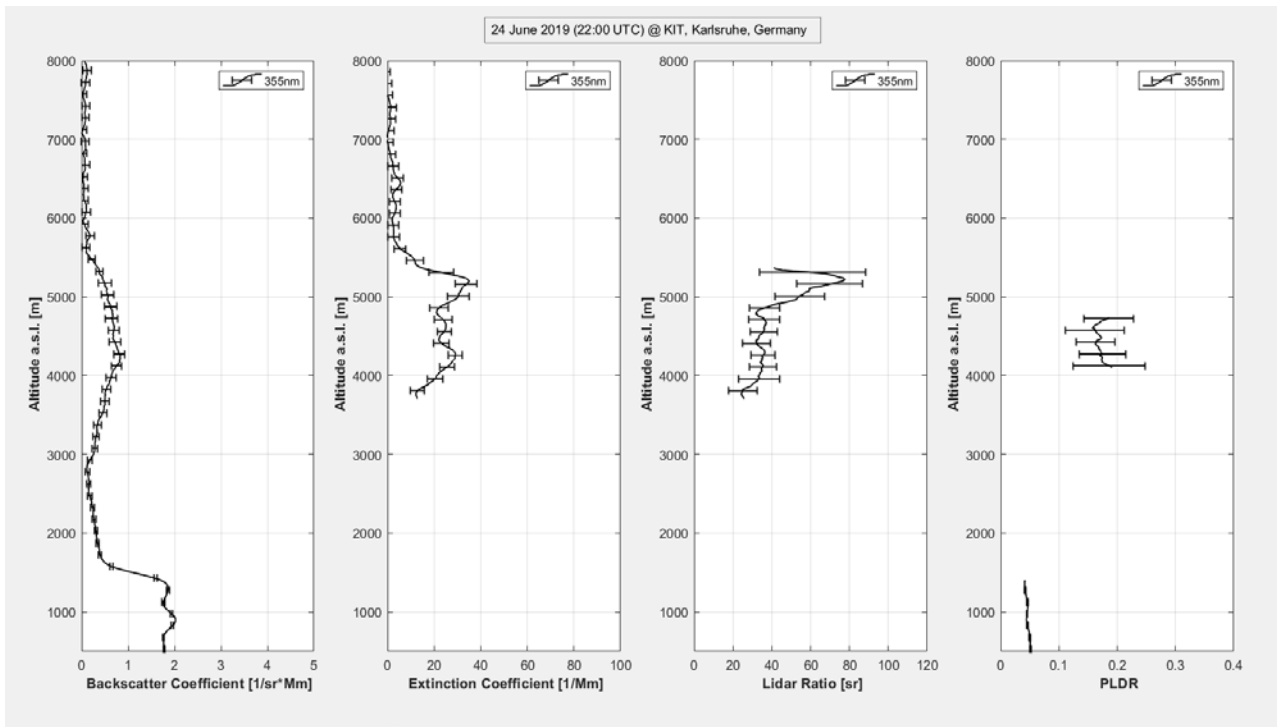


#	Dates	bottom range [m]	top range [m]	average range [m]	b_aer [1/Mm-sr]	b_aer error	a_aer [1/Mm]	a_aer error	LR_aer [sr]	LR_aer error	PLDR	PLDR error
1	24 June 2019 (20:00 UTC)	4274.5	4529.5	4402	0.6930	0.0195	30.5318	2.5835	44.6100	4.5919	0.2252	0.0100
2	24 June 2019 (21:00 UTC)	4109.5	4664.5	4387	0.7128	0.0373	27.0091	2.6518	38.0750	2.6503	0.1881	0.0066
3	24 June 2019 (22:00 UTC)	4109.5	4739.5	4425	0.7324	0.0581	25.4326	2.3031	34.9808	1.4528	0.1707	0.0076
4	24 June 2019 (23:00 UTC)	4184.5	5579.5	4882	0.7953	0.0527	35.8531	4.8198	45.5284	5.3611	0.1663	0.0054
5	25 June 2019 (00:16 UTC)	4784.5	5594.5	5190	0.7127	0.0793	36.1370	6.9770	51.5842	9.8250	0.1549	0.0101

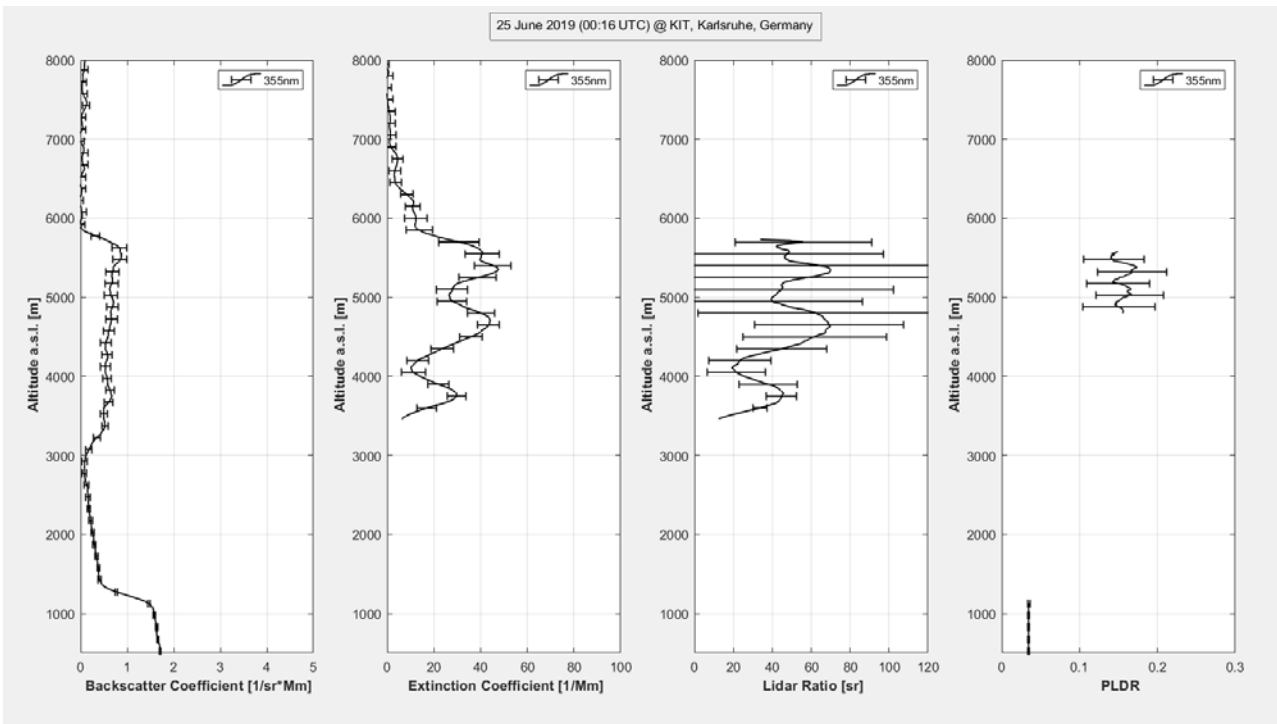


Γράφημα 4-9. Συνδυαστικό γράφημα των κατακόρυφων προφίλ των οπτικών ιδιοτήτων στις 24 Ιουνίου 2019, 20:00 UTC. Είναι η 1^η μέτρηση στο σύνολο των 16 που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία και εμφανίζει τη μεγαλύτερη μέση τιμή του PLDR $\delta_{max} = 0.23$ για ολόκληρο το επεισόδιο και τη μικρότερη μέση τιμή του συντελεστή οπισθοσκέδασης $\beta_{min} = 0.69 \text{ Mm}^{-1}\text{sr}^{-1}$. Η κατανομή του PLDR εμφανίζει περιορισμένα σημεία ωστόσο είναι εμφανής η παρουσία της στρωμάτωσης μεταξύ 4 -5 km μέσω των υπόλοιπων κατανομών.

4.4 CASE STUDY: 24-27 Ιουνίου 2019

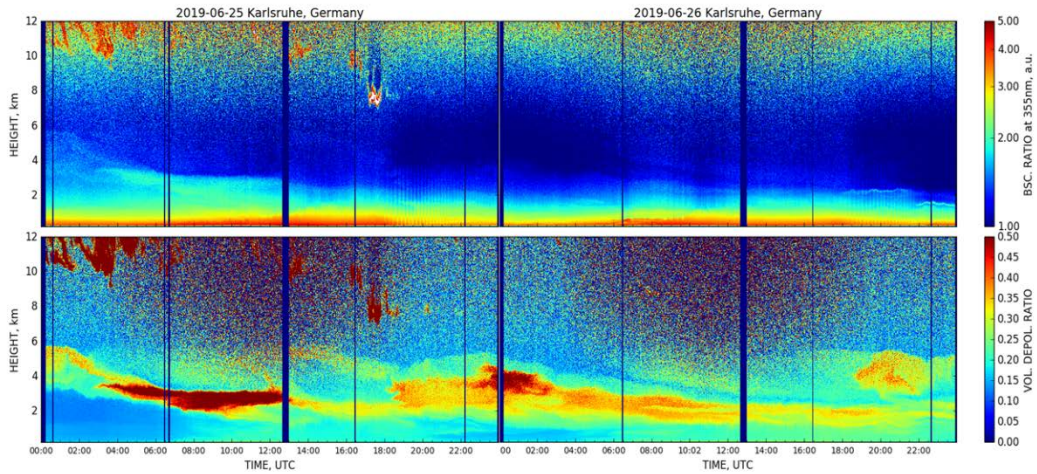


Γράφημα 4-10. Συνδυαστικό γράφημα των κατακόρυφων προφίλ των οπτικών ιδιοτήτων στις 24 Ιουνίου 2019, 22:00 UTC. Εμφανίζει τη μικρότερη μέση τιμή του συντελεστή εξασθένησης $\alpha_{min} = 25.43 \text{ Mm}^{-1}$.

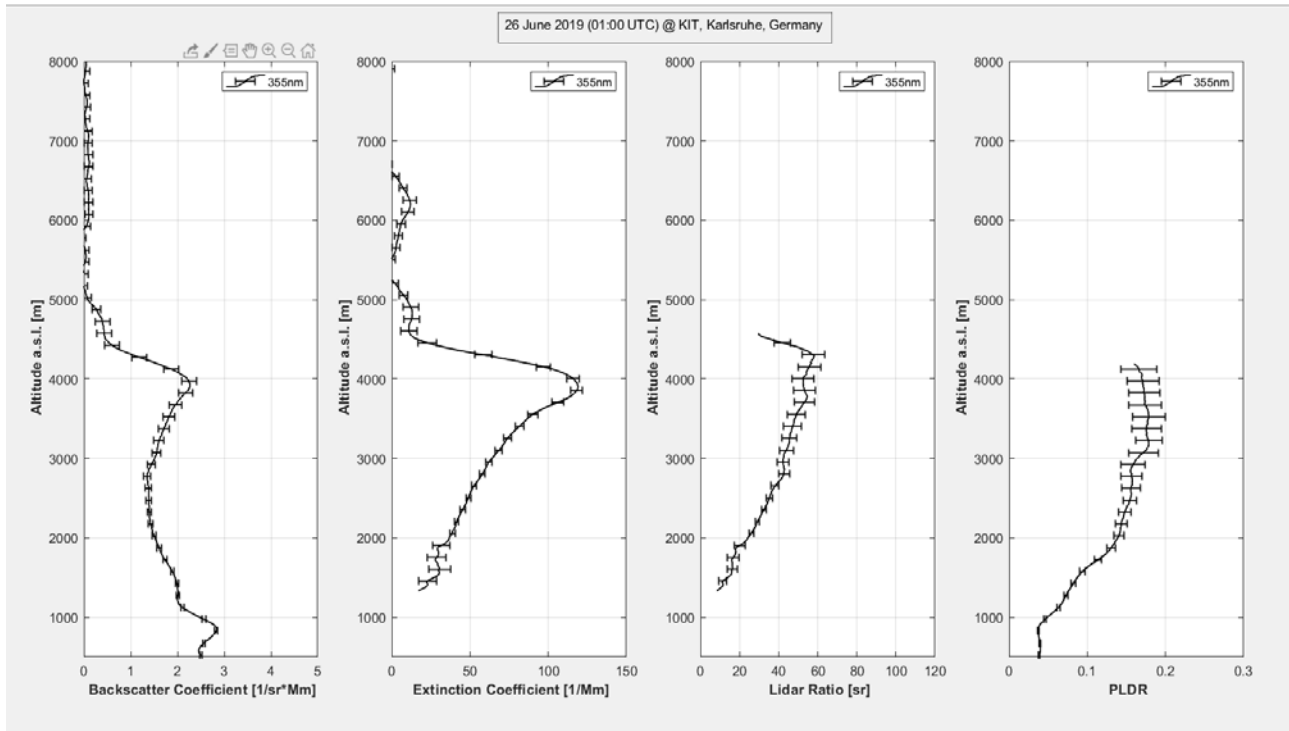


Γράφημα 4-11. Συνδυαστικό γράφημα των κατακόρυφων προφίλ των οπτικών ιδιοτήτων στις 25 Ιουνίου 2019, 00:16 UTC. Εμφανίζει τη μέγιστη μέση τιμή του λόγου lidar $LR_{max} = 51.58 \text{ sr}$, ωστόσο τα σφάλματα της κατανομής είναι πολύ μεγάλα, στα υψομετρικά όρια που τέθηκαν από τις τιμές του PLDR.

4.4.3 25 June 20:00 UTC – 26 June 01:00 UTC

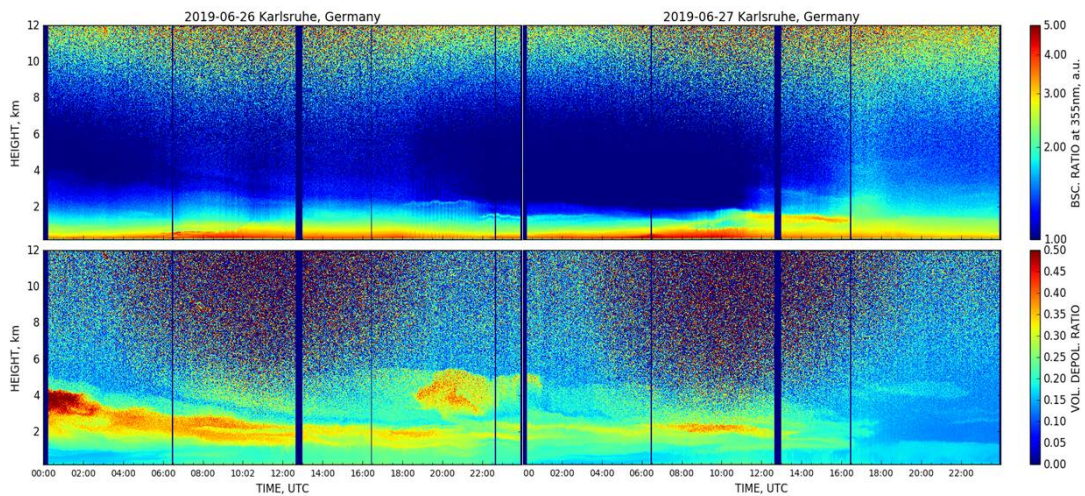


#	Dates	bottom range [m]	top range [m]	average range [m]	b_aer [1/Mm-sr]	b_aer error	a_aer [1/Mm]	a_aer error	LR_aer [sr]	LR_aer error	PLDR	PLDR error
1	25 June 2019 (20:00 UTC)	2504.5	4019.5	3262	1.1885	0.1621	42.6809	7.3165	35.9978	3.4881	0.1971	0.0131
2	25 June 2019 (21:00 UTC)	2504.5	3944.5	3225	1.1860	0.1091	44.4132	2.8697	37.6976	2.4917	0.1801	0.0138
3	25 June 2019 (22:00 UTC)	2504.5	4019.5	3262	1.2474	0.1191	49.0484	4.7554	39.6083	3.7085	0.1720	0.0145
4	25 June 2019 (23:00 UTC)	2219.5	4679.5	3450	1.3578	0.1580	58.3107	11.4872	43.0283	6.2638	0.1759	0.0171
5	26 June 2019 (01:00 UTC)	2999.5	4289.5	3645	1.8198	0.2757	91.6763	18.5450	50.2210	4.3967	0.1719	0.0074

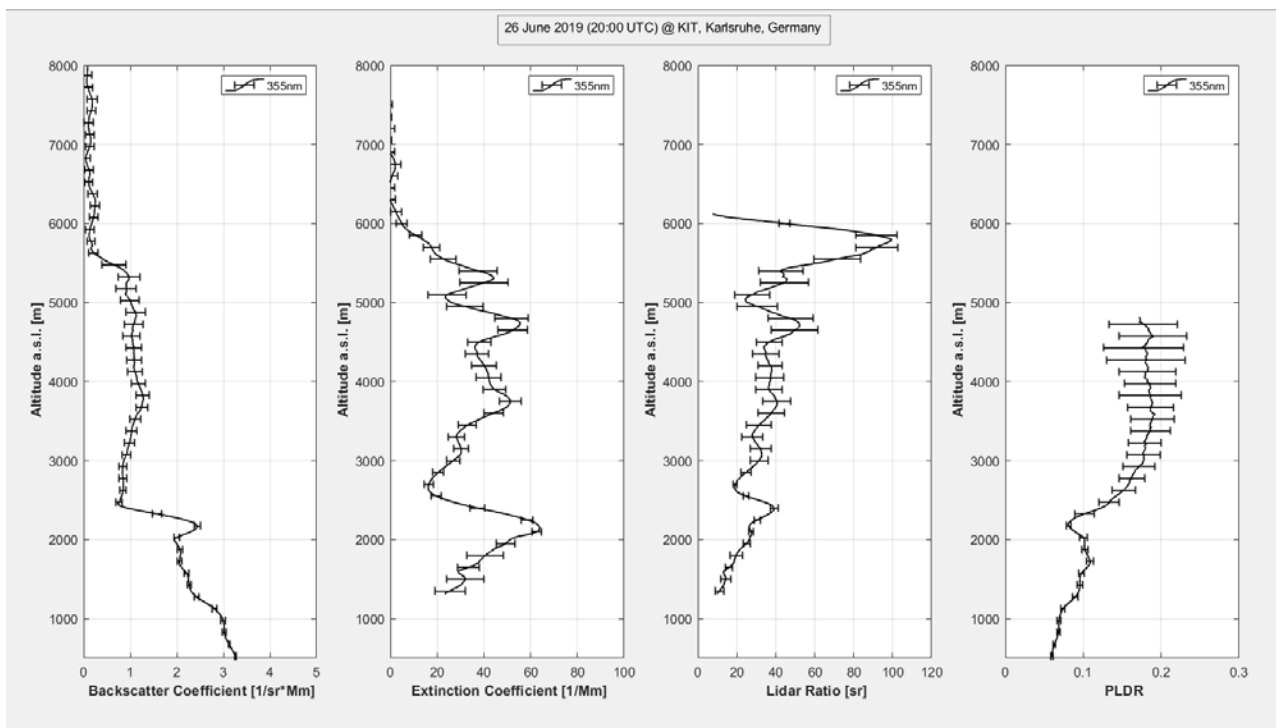


Γράφημα 4-12. Συνδυαστικό γράφημα των κατακόρυφων προφίλ των οπτικών ιδιοτήτων στις 26 Ιουνίου 2019, 01:00 UTC. Εμφανίζει τη μέγιστη μέση τιμή του συντελεστή εξασθένησης $\alpha_{max} = 91.68 \text{ Mm}^{-1}$. Η μέτρηση αυτή είναι η τελευταία για το δεύτερο βράδυ του επεισοδίου και είναι εμφανές ότι η στρωμάτωση έχει κατέβει στα 3 – 4.5 km.

4.4.4 26 June 20:00 UTC – 27 June 01:00 UTC

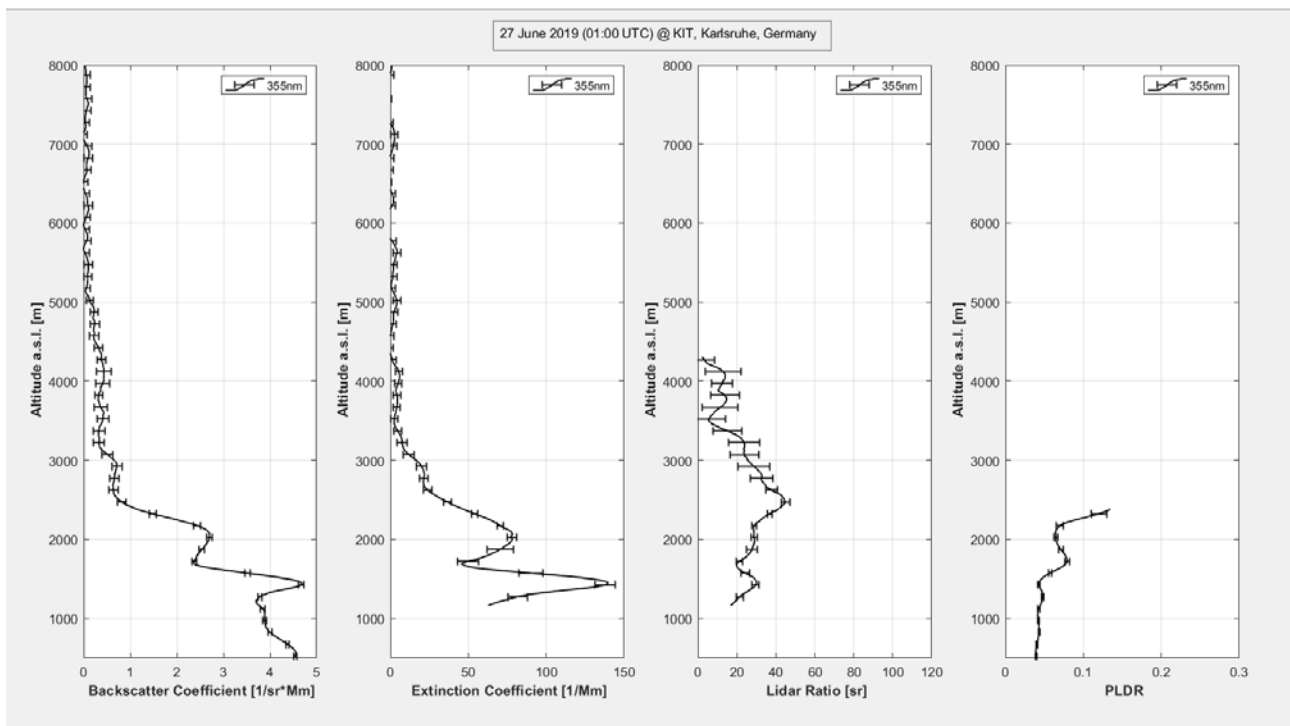


#	Dates	bottom range [m]	top range [m]	average range [m]	b_aer [1/Mm·sr]	b_aer error	a_aer [1/Mm]	a_aer error	LR_aer [sr]	LR_aer error	PLDR	PLDR error
1	26 June 2019 (20:00 UTC)	1754.5	2369.5	2062	2.0470	0.4202	52.4499	8.3156	27.0717	6.6637	0.0970	0.0142
2	26 June 2019 (21:00 UTC)	1784.5	2459.5	2122	2.1145	0.4329	64.1761	11.7951	31.4367	6.7201	0.0972	0.0246
3	26 June 2019 (22:00 UTC)	1859.5	2204.5	2032	2.2609	0.1890	64.7700	7.7303	28.6111	2.0693	0.0720	0.0119
4	26 June 2019 (23:00 UTC)	1799.5	2144.5	1972	2.2534	0.1693	64.4555	10.5173	28.4653	3.0890	0.0853	0.0090
5	27 June 2019 (00:16 UTC)	1814.5	2144.5	1980	2.5159	0.0747	72.7129	3.8168	28.8868	0.8629	0.0725	0.0031
6	27 June 2019 (01:00 UTC)	1799.5	2144.5	1972	2.6117	0.0825	73.9697	4.4956	28.2793	0.8886	0.0679	0.0039
7	26 June 2019 (20:00 UTC)	3254.5	5354.5	4305	1.0801	0.1000	40.2192	8.8367	37.4438	7.3809	0.1825	0.0065
8	26 June 2019 (21:00 UTC)	3104.5	5129.5	4117	0.8718	0.0741	36.8689	3.1507	42.9167	5.0846	0.1810	0.0064



Γράφημα 4-13. Συνδυαστικό γράφημα των κατακόρυφων προφίλ των οπτικών ιδιοτήτων στις 26 Ιουνίου 2019, 20:00 UTC και η μέτρηση αυτή είναι η πρώτη για το τρίτο και τελευταίο βράδυ του επεισοδίου. Εμφανίζει την ελάχιστη μέση τιμή του λόγου lidar $LR_{min} = 27.07$ sr, η οποία αντιστοιχεί στην κύρια στρωμάτωση, σε ύψος 1.5 – 2.5 km. Η δεύτερη στρωμάτωση για την οποία έγινε λόγος στην αρχή της ενότητας 4.4 είναι εμφανής μεταξύ 3 – 5 km, ωστόσο μετά τις 21:00 UTC, η κατανομή του PLDR δεν ανταποκρίνεται με αξιοποιήσιμα σημεία σε εκείνα τα ύψη.

4.4 CASE STUDY: 24-27 Ιουνίου 2019



Γράφημα 4-14. Συνδυαστικό γράφημα των κατακόρυφων προφίλ των οπτικών ιδιοτήτων στις 27 Ιουνίου 2019, 01:00 UTC. Το γράφημα αντιστοιχεί στη 16^η, δηλαδή την τελευταία μέτρηση του επεισοδίου και εμφανίζει τη μικρότερη μέση τιμή του PLDR $\delta_{min} = 0.07$ για ολόκληρο το επεισόδιο και τη μεγαλύτερη μέση τιμή του συντελεστή οπισθοσκέδασης $\theta_{max} = 2.61 \text{ Mm}^{-1}\text{sr}^{-1}$.

5 ΣΥΝΟΨΗ

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η παρατήρηση και η μελέτη των τροποσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων που ανιχνεύθηκαν στην περιοχή της Καρλσρούης της Γερμανίας, κατά το επεισόδιο ερημικής σκόνης που εξελίχθηκε στις ημερομηνίες 24-27 Ιουνίου 2019. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το μοντέλο vertical Raman Depolarization lidar “LR111–ESS–D300” της εταιρείας Raymetrics S.A., το οποίο λειτουργεί στο Τεχνολογικό Ινστιτούτο της Καρλσρούης.

Η ανίχνευση της συγκεκριμένης περίπτωσης επιτεύχθηκε με την παράλληλη παρατήρηση α) των διαθέσιμων quicklooks από τη διάταξη lidar για εμφανείς στρωματώσεις, β) της πρόγνωσης για την κατακόρυφη συγκέντρωση ερημικής σκόνης στις ίδιες ημερομηνίες (BSC Dream Dust Model) και γ) της προέλευσης των αέριων μαζών σε βάθος 8 ημερών από την παρουσία τους πάνω από την Καρλσρούη (HYSPLIT). Η επεξεργασία των δεδομένων lidar εστιάζει σε βραδινές μετρήσεις μεταξύ των ωρών 20:00 UTC και 01:00 UTC της επομένης και υλοποιήθηκε σε δύο μέρη. Πρώτα υπολογίστηκαν τα κατακόρυφα προφίλ των οπτικών ιδιοτήτων των αερολυμάτων (συντελεστής οπισθοσκέδασης β_{aer} , συντελεστής εξασθένησης α_{aer} και σωματιδιακός γραμμικός λόγος αποπόλωσης PLDR) μέσω του αλγορίθμου SCC του δικτύου EARLINET –στην πλατφόρμα του οποίου δημιουργήθηκε ο σταθμός KIT για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης, αλλά και για μελλοντική χρήση. Έπειτα, μέσω κώδικα ανεπτυγμένου σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός του κατακόρυφου προφίλ του λόγου lidar LR, η απεικόνιση των προφίλ σε συνδυαστικά τετραπλά γραφήματα (ένα για κάθε ώρα μετρήσεων) και τέλος, ο υπολογισμός της μέσης τιμής κάθε οπτικής ιδιότητας σε κοινά υψομετρικά όρια, που υπαγορεύθηκαν από τα προφίλ του PLDR.

Τα πορίσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία για την ταυτότητα των αιωρούμενων σωματιδίων έχουν ως εξής:

- ✧ Λόγω της γεωγραφικής θέσης της Καρλσρούης, η οποία βρίσκεται σε απόσταση μερικών χιλιάδων χιλιομέτρων από την έρημο Σαχάρα, δεν αναμένεται η ανίχνευση καθαρής ερημικής σκόνης αλλά μειγμάτων αυτής, τόσο λόγω της γήρανσης των σωματιδίων της σκόνης όσο και της παρουσίας άλλων ειδών ΑΣ, όπως ηπειρωτικά (καθαρά / ρυπασμένα) και θαλάσσια σωματίδια.
- ✧ Τα ΑΣ που ανιχνεύθηκαν στις βραδινές μετρήσεις της 24^{ης} και της 25^{ης} Ιουνίου κατατάχθηκαν στην ομάδα των μειγμάτων σκόνης (dust mixtures) βάσει των τιμών της αποπόλωσης και του λόγου lidar. Η αναζήτηση της προέλευσης των αέριων μαζών σε βάθος 8 ημερών έδειξε πως οι τροχιές βρίσκονταν είτε πάνω από την Σαχάρα είτε σε κοντινές περιοχές.
- ✧ Τα ΑΣ που ανιχνεύθηκαν το βράδυ της 26^{ης} Ιουνίου τοποθετούνται μεταξύ θαλάσσιων σωματιδίων (marine) και μειγμάτων σκόνης. Η προέλευση και η κατεύθυνση του ανέμου άλλαξαν σε σχέση με τις προηγούμενες μέρες και έτσι η ροή των σωματιδίων σκόνης προς την Καρλσρούη μειώθηκε.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μέγιστες και ελάχιστες μέσες τιμές (και οι τυπικές τους αποκλίσεις) των οπτικών ιδιοτήτων και η ημερομηνία/ώρα που παρατηρήθηκαν.

Πίνακας 5—1. Μέγιστες και ελάχιστες μέσες τιμές ανά οπτική ιδιότητα.

Property	Max Value	Date	Min Value	Date
b_aer [1/Mm·sr]	2.61	27 June 2019 (01:00 UTC)	0.69	24 June 2019 (20:00 UTC)
b_aer error	0.08		0.02	
a_aer [1/Mm]	91.68	26 June 2019 (01:00 UTC)	25.43	24 June 2019 (22:00 UTC)
a_aer error	18.55		2.30	
LR_aer [sr]	51.58	25 June 2019 (00:16 UTC)	27.07	26 June 2019 (20:00 UTC)
LR_aer error	9.82		6.66	
PLDR	0.23	24 June 2019 (20:00 UTC)	0.07	27 June 2019 (01:00 UTC)
PLDR error	0.01		0.00	

Οι μεταβολές των οπτικών ιδιοτήτων των αερολυμάτων της στρωμάτωσης κατά τη διάρκεια του επεισοδίου, σε συνδυασμό με την παρακολούθηση των τροχιών, σκιαγραφούν μία εικόνα για την εξέλιξη του αερολυματικού περιεχομένου, ωστόσο δεν αποδεικνύουν με ακρίβεια ποιο είναι αυτό. Ακόμη, η γήρανση των σωματιδίων, οφειλόμενη αφενός μεν στις διαφορετικές ταχύτητες εναπόθεσης για διάφορα μεγέθη σωματιδίων εντός του ίδιου είδους, αφετέρου δε στην επικάλυψή τους με προσμίξεις ρύπων και υδρατμών μεταβάλλει τις ιδιότητές τους και την εικόνα που διαμορφώνουν οι ερευνητές για αυτά σε διαφορετικές γεωγραφικές θέσεις. Τέλος, η ροή των ανέμων (ταχύτητα, προέλευση κ.λπ.) και η κατακόρυφη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα αποτελούν μεγέθη μεγάλης μεταβλητότητας και απροσδιοριστίας, λαμβανομένης υπόψιν της εναλλαγής των εποχών και της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στη ατμοσφαιρική συμπεριφορά. Για τον λόγο αυτό, η συστηματική μελέτη κάθε είδους ΑΣ μπορεί να αποφέρει τη συλλογή δεδομένων και απαντήσεων σε ερωτήματα ως προς την αλληλεπίδραση μεταξύ τους και με την ατμόσφαιρα κατά τη μεταφορά τους από τόπο σε τόπο και για κάθε εποχή του έτους.

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ & ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. *Ansmann A. et al.*, Combined Raman – Elastic Backscatter LIDAR for Vertical Profiling of Moisture, Aerosol Extinction, Backscatter and LIDAR Ratio, *Appl. Phys. B55*, 18-28 (1992)
2. *Brasseur G. et al.*, *Atmospheric Chemistry and Global Change*, Oxford University Press, 1999
3. *B&W Tek*, *Raman Knowledge - An Introduction to Raman Spectroscopy*, 2016, (<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=13372> accessed: 05/07/2021)
4. *D' Amico G. et al.*, EARLINET Single Calculus Chain – technical – Part 1: Pre-processing of raw lidar data, *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 491-507, 2016
5. *Hamamatsu*, *Photomultiplier Tubes: Basics and Applications*, 4th Edition, 2017
6. *Hamamatsu*, *Photomultiplier Tubes: Construction and Operating Characteristics, Connections to External Circuits*
7. *Hamamatsu*, *Photon Counting using Photomultiplier Tubes*, 1998
8. *Hinds W.*, *Aerosol Technology: properties Behavior and Measurement of Airborne Particles*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 1999
9. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html>
10. <https://ess.bsc.es/bsc-dust-daily-forecast>
11. <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>
12. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=6960 – accessed: 05/07/2021)
13. <https://scied.ucar.edu/learning-zone/atmosphere/exosphere>
14. <https://scied.ucar.edu/learning-zone/atmosphere/thermosphere>
15. <https://visibleearth.nasa.gov/images/53872/dust-storm-sweeps-from-africa-into-atlantic>
16. <https://visibleearth.nasa.gov/images/67401/saharan-dust-over-the-mediterranean-sea>
17. <https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/world/#geography>
18. <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/weather/photosynthetically-active-radiation> (accessed: 05/07/2021)
19. https://www.goethe-university-frankfurt.de/45679989/Taunus_Observatory
20. <https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/type/R9880U-110/index.html> (accessed on 05/07/2021)
21. <https://www.ready.noaa.gov/hypub-bin/trajsrc.pl>
22. *Klett J.*, Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios, *Applied Optics Vol. 24 No. 11*, 1985
23. *Klett J.*, Stable analytical inversion solution for processing lidar returns, *Applied Optics Vol. 20 No. 2*, 1981
24. *Licel GmbH*, TR12-160: Lidar transient recorder manual, 2012 (<http://licel.com/manuals/TRInstallation.pdf> - accessed 05/07/2021)
25. *Loughlin S. et al.*, *Global Volcanic Hazards and Risk*, Cambridge University Press, 2015, σελ. 12 (DOI: 10.1017/CBO9781316276273.)
26. *Mattis I. et al.*, EARLINET Single Calculus Chain – technical – Part 2: Calculation of optical products, *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 491-507, 2016
27. *Measures R.*, *Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications*, Krieger, 1992

28. *Michelle van der Does et al.*, Particle size traces modern Saharan dust transport and deposition across the equatorial North Atlantic, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 13697–13710, 2016
29. *Monod A., Liu Y.*, Aerosol formation and heterogeneous chemistry in the atmosphere, *EPJ Web of Conferences* 18, 04002 (2011), EDP Sciences, 2011
30. *Mylonaki M. et al.*, AEROSOL OPTICAL PROPERTIES VARIABILITY DURING BIOMASS BURNING EVENTS OBSERVED BY THE EOLE-AIAS DEPOLARIZATION LIDARS OVER ATHENS, GREECE (2007-2016), *EPJ Web of Conferences* 176, 05022 (2018)
31. *NOAA, NASA, U.S. Air Force*, U.S. Standard Atmosphere 1976, U.S. Government Printing Office, Washington D.C., October 1976
32. *Papayannis A. et al.*, Optical properties and vertical extension of aged ash layers over the Eastern Mediterranean as observed by Raman lidars during the Eyjafjallajökull eruption in May 2010, *Atm. Env.* 48 (2012) 56 - 65
33. *Papayannis et al.*, Measurements of Saharan dust aerosols over the Eastern Mediterranean using elastic backscatter-Raman lidar, spectrophotometric and satellite observations in the frame of the EARLINET project, 2005
34. *Papayannis A. et al.*, Recent Upgrades of the EOLE and AIAS Lidar Systems of the National Technical University of Athens Operating Since 2000 in Athens, Greece., The 29th International Laser Radar Conference (ILRC 29), July, Τόμος 237, 2020
35. *Seinfeld J. H., Pandis S.*, Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2006
36. *Stein A. et al.*, NOAA'S HYSPLIT ATMOSPHERIC TRANSPORT AND DISPERSION MODELING SYSTEM, American Meteorological Society, 2015 (<http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1> - accessed: 05/07/2021)
37. *Stull R.*, An introduction to Boundary Layer Meteorology, Kluwer Academic Publishers, 1988
38. *Wallace J., Hobbs P.*, Atmospheric Science: An Introductory Survey, 2nd Edition, Elsevier Inc., 2006, σελ. 11
39. *Wandinger U. et al.*, HETEAC: THE AEROSOL CLASSIFICATION MODEL FOR EARTHCARE, *EPJ Web of Conferences* 119, 01004 (2016)
40. *Wagner F., Silva M.*, Some considerations about exponent distributions, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 481–489, 2008
41. *Weitkamp C.*, Lidar, Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere, Springer, 2005
42. *Wilson J., Hawkes. J.*, Οπτηλεκτρονική: μια εισαγωγή (επιμ. Σεραφετινίδης Α.), 3η Έκδοση, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2004
43. *World Meteorological Organization*, WMO Bulletin, Vol. 6 No. 4, Oct. 1957, σελ. 137
44. *Λαζαρίδης Μ.*, Ατμοσφαιρική ρύπανση με στοιχεία μετεωρολογίας, 2η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2010
45. *Μακροπούλου Μ., Παπαγιάννης Α.*, Εφαρμογές Laser στη Βιοϊατρική και το Περιβάλλον, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, 2014
46. *Παπαγιάννης Α.*, Φυσική Περιβάλλοντος, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, 2014

7 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

7.1 ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1—1. Σύγκριση της κατανομής της έντασης ακτινοβολίας που εκπέμπει ο Ήλιος σε σχέση με την ένταση της ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης. Τα “κενά” που παρουσιάζονται στο φάσμα που φτάνει στη επιφάνεια της Γης οφείλονται στην έντονη απορρόφηση συγκεκριμένων μηκών κύματος από μόρια της ατμόσφαιρας (O ₃ , CO ₂ , H ₂ O κ.ά.).	1
Εικόνα 1—2. Αναπαράσταση της κατακόρυφης κατανομής (profile) της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας. Η παρουσίαση αυτή βασίζεται στο U.S. Standard Atmosphere Model το οποίο οριστικοποιήθηκε το 1976.....	3
Εικόνα 1—3. “Dust Storm Sweeps from Africa into Atlantic” (Photo Credit: Norman Kuring)	9
Εικόνα 1—4. Η διαδικασία της δημιουργίας πυρήνων συμπύκνωσης. Μόρια του αέρα συνθέτουν τους πυρήνες Aitken με τη διαδικασία της πυρηνοποίησης. Μέσω της συμπύκνωσης και της πρόσκρουσης των σωματιδίων προκύπτουν συσσωματώματα. Τέλος, η επικάλυψη των σωματιδίων/συσσωματωμάτων με νερό οδηγεί στους πυρήνες συμπύκνωσης.....	11
Εικόνα 2—1. Διάγραμμα Jablonski για τις μεταβάσεις μεταξύ ενεργειακών επιπέδων κατά την ελαστική σκέδαση ακτινοβολίας Rayleigh και την ανελαστικής σκέδαση Raman Stokes & Raman Anti-Stokes.	13
Εικόνα 2—2. Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία προσπίπτει σε δεσμευμένο ηλεκτρόνιο και σκεδάζεται υπό γωνίες (θ,φ) σε στερεά γωνία dΩ (Measures R., 1992, σελ.39).	14
Εικόνα 2—3. Αναπαράσταση της κατανομής της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας στο χώρο κατά τη σκέδαση Rayleigh (ρ<1), την απλή σκέδαση Mie (ρ ≈ 1) και την πολλαπλή σκέδαση Mie (ρ >>1)..	16
Εικόνα 2—4. Επιτρεπτές μεταπτώσεις μεταξύ ταλαντωτικών και περιστροφικών ενεργειακών επιπέδων κατά την ανελαστική σκέδαση Raman για το μόριο του αζώτου N ₂ . Στην εικόνα διακρίνονται τρεις ομάδες μεταπτώσεων: καθαρά ταλαντωτικές & ταλαντωτικές/περιστροφικές μεταπτώσεις Raman Stokes, καθαρά περιστροφικές μεταπτώσεις Raman Stokes & Raman Anti-Stokes, καθώς και ελαστικές σκεδάσεις Rayleigh (κέντρο), και καθαρά ταλαντωτικές & ταλαντωτικές/περιστροφικές μεταπτώσεις Raman Anti-Stokes (δεξιά).	19
Εικόνα 2—5. Η κατανομή των ταλαντωτικών/περιστροφικών μεταπτώσεων Raman για τα μόρια του οξυγόνου, αζώτου και νερού (σε υγρή και κρυσταλλική μορφή) σε θερμοκρασία 300K και για μήκος κύματος διέγερσης λ ₀ = 355nm. Στη εικόνα φαίνονται με τη σειρά: οι καθαρά περιστροφικές μεταπτώσεις Stokes & Anti-Stokes γύρω από το λ ₀ = 355nm, και έπειτα οι κλάδοι S _{QO} Stokes για τα διαφορετικά μόρια.	20
Εικόνα 2—6. Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας μιας μονοστατικής - διαξονικής διάταξης Lidar.....	26
Εικόνα 2—7. Σχηματική αναπαράσταση της γεωμετρίας τριών τύπων lidar: μονοστατικό - ομοαξονικό σύστημα, μονοστατικό - διαξονικό σύστημα και διστατικό σύστημα.....	27
Εικόνα 2—8. Σχηματική αναπαράσταση της διάδοσης ενός παλμού laser στην ατμόσφαιρα συναρτήσει του χρόνου και της απόστασης. Ο παλμός διαδίδεται μέχρι κάποιο υψόμετρο x, από το οποίο τα φωτόνια οπισθοσκεδάζονται και επιστρέφουν προς το τηλεσκόπιο του lidar για συλλογή. Στο χρόνο καταγραφής t ₀ + t, ο παλμός έχει διανύσει απόσταση ίση με 2x.	29
Εικόνα 2—9. Σχηματική αναπαράσταση της στερεάς γωνίας αποδοχής του τηλεσκοπίου για μονοστατικό - διαξονικό σύστημα. Η ακτινοβολία προσπίπτει σε σωματίδιο σε απόσταση z και σκεδάζεται σε στερεά γωνία 4π. Η στερεά γωνία αποδοχής του τηλεσκοπίου ταυτίζεται με τη στερεά γωνία σκέδασης που βαίνει σε επιφάνεια A και προκύπτει από την επιφάνεια του παραθύρου του και την απόσταση του σκεδαστή.....	30
Εικόνα 2—10. Σχηματική αναπαράσταση (κάτοψη) της επικάλυψης του τηλεσκοπικού πεδίου οράσεως και της δέσμης laser. Η απόσταση μεταξύ των δύο αξόνων παραμένει σταθερή, ωστόσο	

οι διάμετροι της δέσμης και του FoV του τηλεσκοπίου αυξάνονται συνεχώς καθ' ύψος. Ο γεωμετρικός συντελεστής επικάλυψης λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1 (μηδενική - πλήρης επικάλυψη).	31
Εικόνα 2—11. Σχηματική αναπαράσταση της μορφής αναλογικού σήματος lidar σε σύγκριση με την επικάλυψη δέσμης laser - πεδίου οράσεως τηλεσκοπίου σε διαξονικό σύστημα. Το σήμα εμφανίζει αύξηση στην έντασή του από το ύψος στο οποίο ο γεωμετρικός παράγοντας επικάλυψης παύει να είναι μηδενικός. Το μέγιστο του σήματος επιτυγχάνεται στο ύψος της πλήρους επικάλυψης και κατόπιν παρατηρείται μείωση της έντασης αφού η δέσμη συνεχώς εξασθενεί από την αλληλεπίδρασή της με την ατμοσφαιρική ύλη.....	31
Εικόνα 2—12. Η τελική μορφή του σήματος παράγεται συνδυάζοντας το συντελεστή επικάλυψης $O(z)$ με τον παράγοντα $1/z^2$	32
Εικόνα 2—13. Σχηματική αναπαράσταση της χρήσης ενός Polarizing Beamsplitting Cube σε lidar εφαρμογή. Η δέσμη προσπίπτει στον κύβο έχοντας πόλωση με παράλληλη και κάθετη συνιστώσα και κατόπιν διαχωρίζεται σε δύο τμήματα οριστικά.	35
Εικόνα 3—1. EOLE Raman Lidar: Η διάταξη 6 μικών κύματος του Ε.Μ.Π.	37
Εικόνα 3—2. Το μοντέλο LR111—ESS—D300 της Raymetrics S.A. που χρησιμοποιήθηκε για την αυτήν την εργασία (εικόνα από το εγχειρίδιο λειτουργίας της συσκευής).....	37
Εικόνα 3—3. Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας ενός διευρυντή δέσμης laser. Η δέσμη εξέρχεται από τον διευρυντή μεγεθυμένη ως προς την αρχική της διάμετρο και με μικρότερη απόκλιση.	39
Εικόνα 3—4. Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος εκπομπής δέσμης της συσκευής (εικόνα από το εγχειρίδιο). Η δέσμη laser παράγεται από την πηγή και ανακλάται από το πρώτο κάτοπτρο προς το διευρυντή δέσμης. Στην έξοδό της από το διευρυντή έχει μεγεθυνθεί και ανακλάται από το δεύτερο κάτοπτρο προς την ατμόσφαιρα.	40
Εικόνα 3—5. Σχηματική αναπαράσταση των ανακλάσεων και της εστίασης του φωτός σε τηλεσκόπιο τύπου Cassegrainian (εικόνα από το εγχειρίδιο). Η ακτινοβολία ανακλάται μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος κατόπτρου, εστιάζεται μέσα στο διάφραγμα του τηλεσκοπίου και κατόπιν ευθυγραμμίζεται.	41
Εικόνα 3—6. Σχηματική αναπαράσταση της διαδρομής της ακτινοβολίας διαμέσου του φασματικού αναλυτή της διάταξης (εικόνα από το εγχειρίδιο). Η ακτινοβολία ανακλάται σε διχρωμικό φίλτρο και διαχωρίζεται σε δύο μήκη κύματος (387 nm και 355 nm). Το $\lambda = 387$ nm διαθλάται προς το κανάλι καταγραφής ενώ το $\lambda = 355$ nm ανακλάται προς τον πολωτικό κύβο όπου διαχωρίζεται στις συνιστώσες πόλωσης p (primary, parallel) και s (secondary, cross), καθεμία από τις οποίες οδηγείται σε ξεχωριστό κανάλι.	43
Εικόνα 3—7. Σχηματική αναπαράσταση της φωτοδιόδου χιονοστιβάδας στη διάταξη (εικόνα από το εγχειρίδιο).	44
Εικόνα 3—8. Σχηματική αναπαράσταση ενός φωτοπολλαπλασιαστή γραμμικής εστίασης (Photomultiplier Tube). Τα φωτόνια οδηγούν στην εκπομπή ηλεκτρονίων (φωτοηλεκτρικό φαινόμενο) και τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται προς τις δυνόδους χάρη στη διαφορά δυναμικού μεταξύ των δυνόδων. Εκεί πολλαπλασιάζονται (δευτερογενής εκπομπή ηλεκτρονίων) και τελικά συλλέγονται στην άνοδο όπου παράγεται ρεύμα μερικών mA.	45
Εικόνα 3—9. Σχηματική αναπαράσταση φωτοπολλαπλασιαστή κυκλικού σχήματος.	46
Εικόνα 3—10. Φωτοπολλαπλασιαστής κυκλικής εστίασης (Hamamatsu GmbH, R9880U series). .	46
Εικόνα 3—11. Σύγκριση των περιπτώσεων paralyzable και non-paralyzable κατά την ανίχνευση και καταγραφή φωτονίων. Στην περίπτωση paralyzable, η πρόσπτωση ενός νέου φωτονίου μέσα στον νεκρό χρόνο διακόπτει την καταγραφή των προηγούμενων φωτονίων και ανανεώνει το νεκρό χρόνο, επιτρέποντας την καταγραφή του τελευταίου φωτονίου. Στην περίπτωση non-paralyzable, η επιτυχής καταγραφή ενός φωτονίου δεν επηρεάζεται από τα ενδιάμεσα φωτόνια και η απολαβή είναι μεγαλύτερη.	48

Εικόνα 3—12. Σύγκριση των μεθόδων της αναλογικής καταγραφής σήματος και της τεχνικής καταμέτρησης φωτονίων.....	49
Εικόνα 3—13. Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας του Transient Recorder (εικόνα από το εγχειρίδιο). Το σήμα, ως είσοδος, καταγράφεται ταυτόχρονα από τον ADC και τον Discriminator στη μνήμη Α ή στη μνήμη Β, αναλόγως το trigger. Τα δεδομένα ενός νέου παλμού προστίθενται στα προηγούμενα και για τα αναλογικά σήματα και για τα σήματα της καταμέτρησης φωτονίων.	51
Εικόνα 3—14. Σχηματική αναπαράσταση της σύγκρισης των παραγόμενων παλμών με το άνω και κάτω κατώφλι του διευκρινιστή σήματος.	51
Εικόνα 3—15. Δείγμα ενός αρχείου με δεδομένα lidar. Φαίνονται αναλυτικές πληροφορίες: για το lidar, για τις συνθήκες της μέτρησης και για τα εν λειτουργία κανάλια. Έπειτα, ακολουθούν οι μέσες τιμές των μετρήσεων ανά bin, οργανωμένες σε ισάριθμες με τα κανάλια στήλες. Εδώ απεικονίζονται τα πρώτα 15 bins.	53
Εικόνα 4—1. Αρχείο quicklook, όπως παράγεται από τη διάταξη LR111–ESS–D300. Αποτελείται από δύο ημερήσια γραφήματα οπτικών ιδιοτήτων συναρτήσεως της ώρας: τον λόγο οπισθοσκέδασης (backscatter ratio) και τον χωρικό λόγο αποπόλωσης (volume particle depolarization ratio).	56
Εικόνα 4—2. Θέση του σταθμού Taunus Observatory στο δίκτυο σταθμών του BSC Dust Daily Forecast. Στο χάρτη σημειώνεται και η θέση της Καρλσρούης.	57
Εικόνα 4—3. Απεικόνιση της εκτιμώμενης συγκέντρωσης ερημικής σκόνης πάνω από την Ευρώπη, τη βόρεια Αφρική και τη Μέση Ανατολή στις 15/06/2019 (12 UTC).	57
Εικόνα 4—4. Απεικόνιση της τροχιάς της στρωμάτωσης που παρατηρείται πάνω από το ΚΙΤ στις 25 Ιουνίου 2019 στις 20:00 UTC. Η πηγή της σε βάθος 8 ημερών φαίνεται πως είναι η Μεσόγειος Θάλασσα και μάλιστα η αέρια αυτή μάζα περνά πολύ κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας. Στη συνέχεια, κινείται χαμηλά πάνω από το έδαφος της ερήμου μέχρι και την τέταρτη ημέρα και έπειτα ανέρχεται σε ύψος 3.5 km. Στο τέλος, καταλήγει πάνω από το ΚΙΤ έχοντας αφήσει πίσω την έρημο για λιγότερες από 2 ημέρες.....	58
Εικόνα 4—5. Σχηματική αναπαράσταση της μεθοδολογίας για τον χαρακτηρισμό των αερολυματικών στρωματώσεων και για την ανάκτηση των οπτικών τους ιδιοτήτων.....	62
Εικόνα 4—6. Συνδυαστική παρουσίαση του επεισοδίου ερημική σκόνης μέσω του χωρικού γραμμικού λόγου αποπόλωσης (VLDR) στα quicklooks κατά τις ημερομηνίες 24 - 27 Ιουνίου 2019.	63

7.2 ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Γράφημα 2-1. Παράδειγμα απεικόνισης τεσσάρων οπτικών ιδιοτήτων και τα γραφήματά τους καθ' ύψος. Παρουσιάζονται ο συντελεστής οπισθοσκέδασης, ο συντελεστής εξασθένησης, ο λόγος lidar και ο σωματιδιακός γραμμικός λόγος αποπόλωσης της ακτινοβολίας.	23
Γράφημα 2-2. Τα είδη των αερολυμάτων παρουσιάζονται οργανωμένα σε πυκνές ομάδες (clusters) με βάση τις οπτικές ιδιότητες Λόγος Lidar (LR) και Σωματιδιακός Γραμμικός Λόγος Αποπόλωσης (PLDR).	25
Γράφημα 4-1. Κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης ερημικής σκόνης στην περιοχή της Φρανκφούρτης στις 25/06/2019 (12 UTC).	57
Γράφημα 4-2. Τοποθέτηση των αποτελεσμάτων της μελέτης για το LR και το PLDR πάνω στον “χάρτη” του πειράματος ΗΕΤΕΑC για τα είδη των αιωρούμενων σωματιδίων.....	65
Γράφημα 4-3. Οι τροχιές των αέριων μαζών σε βάθος 8 ημερών για τις 24 Ιουνίου 20:00 UTC , 22:00 UTC και για τις 25 Ιουνίου 00:00 UTC. Η προέλευση των μαζών φαίνεται να είναι ο Ατλαντικός Ωκεανός και ο Καναδάς, ενώ ένας σταθμός των τροχιών είναι η έρημος Σαχάρα.	66

Γράφημα 4-4. Οι τροχιές των αέριων μαζών σε βάθος 8 ημερών για τις 25 Ιουνίου 20:00 UTC , 22:00 UTC και για τις 26 Ιουνίου 01:00 UTC. Η προέλευση των μαζών φαίνεται να είναι η Μεσόγειος Θάλασσα, η ίδια η έρημος Σαχάρα και ο Ατλαντικός Ωκεανός.	66
Γράφημα 4-5. Οι τροχιές των αέριων μαζών σε βάθος 8 ημερών για τις 26 Ιουνίου 20:00 UTC , 23:00 UTC και για τις 27 Ιουνίου 01:00 UTC. Η προέλευση των μαζών φαίνεται να είναι και πάλι ο Ατλαντικός Ωκεανός ενώ η κατεύθυνση των ανέμων φαίνεται να αλλάζει ώστε να μην περνούν πλέον κοντά από την έρημο.	67
Γράφημα 4-6. Αναμενόμενη συγκέντρωση σκόνης πάνω από τη Φρανκφούρτη σύμφωνα με το προγνωστικό μοντέλο NMMB/BSC-Dust, για το διάστημα 24 Ιουνίου 12:00 UTC – 25 Ιουνίου 06:00 UTC, ανά 6ωρο.	68
Γράφημα 4-7. Αναμενόμενη συγκέντρωση σκόνης πάνω από τη Φρανκφούρτη σύμφωνα με το προγνωστικό μοντέλο NMMB/BSC-Dust, για το διάστημα 25 Ιουνίου 12:00 UTC – 26 Ιουνίου 06:00 UTC, ανά 6ωρο.	68
Γράφημα 4-8. Αναμενόμενη συγκέντρωση σκόνης πάνω από τη Φρανκφούρτη σύμφωνα με το προγνωστικό μοντέλο NMMB/BSC-Dust, για το διάστημα 26 Ιουνίου 12:00 UTC – 27 Ιουνίου 18:00 UTC, ανά 6ωρο.	68
Γράφημα 4-9. Συνδυαστικό γράφημα των κατακόρυφων προφίλ των οπτικών ιδιοτήτων στις 24 Ιουνίου 2019, 20:00 UTC. Είναι η 1 ^η μέτρηση στο σύνολο των 16 που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία και εμφανίζει τη μεγαλύτερη μέση τιμή του PLDR $\delta_{max} = 0.23$ για ολόκληρο το επεισόδιο και τη μικρότερη μέση τιμή του συντελεστή οπισθοσκέδασης $\beta_{min} = 0.69 \text{ Mm}^{-1}\text{sr}^{-1}$. Η κατανομή του PLDR εμφανίζει περιορισμένα σημεία ωστόσο είναι εμφανής η παρουσία της στρωμάτωσης μεταξύ 4 -5 km μέσω των υπόλοιπων κατανομών.	70
Γράφημα 4-10. Συνδυαστικό γράφημα των κατακόρυφων προφίλ των οπτικών ιδιοτήτων στις 24 Ιουνίου 2019, 22:00 UTC. Εμφανίζει τη μικρότερη μέση τιμή του συντελεστή εξασθένησης $\alpha_{min} = 25.43 \text{ Mm}^{-1}$	71
Γράφημα 4-11. Συνδυαστικό γράφημα των κατακόρυφων προφίλ των οπτικών ιδιοτήτων στις 25 Ιουνίου 2019, 00:16 UTC. Εμφανίζει τη μέγιστη μέση τιμή του λόγου lidar $LR_{max} = 51.58 \text{ sr}$, ωστόσο τα σφάλματα της κατανομής είναι πολύ μεγάλα, στα υψομετρικά όρια που τέθηκαν από τις τιμές του PLDR.	71
Γράφημα 4-12. Συνδυαστικό γράφημα των κατακόρυφων προφίλ των οπτικών ιδιοτήτων στις 26 Ιουνίου 2019, 01:00 UTC. Εμφανίζει τη μέγιστη μέση τιμή του συντελεστή εξασθένησης $\alpha_{max} = 91.68 \text{ Mm}^{-1}$. Η μέτρηση αυτή είναι η τελευταία για το δεύτερο βράδυ του επεισοδίου και είναι εμφανές ότι η στρωμάτωση έχει κατέβει στα 3 – 4.5 km.	72
Γράφημα 4-13. Συνδυαστικό γράφημα των κατακόρυφων προφίλ των οπτικών ιδιοτήτων στις 26 Ιουνίου 2019, 20:00 UTC και η μέτρηση αυτή είναι η πρώτη για το τρίτο και τελευταίο βράδυ του επεισοδίου. Εμφανίζει την ελάχιστη μέση τιμή του λόγου lidar $LR_{min} = 27.07 \text{ sr}$, η οποία αντιστοιχεί στην κύρια στρωμάτωση, σε ύψος 1.5 – 2.5 km. Η δεύτερη στρωμάτωση για την οποία έγινε λόγος στην αρχή της ενότητας 4.4 είναι εμφανής μεταξύ 3 – 5.5 km, ωστόσο μετά τις 21:00 UTC, η κατανομή του PLDR δεν ανταποκρίνεται με αξιοποιήσιμα σημεία σε εκείνα τα ύψη.	73
Γράφημα 4-14. Συνδυαστικό γράφημα των κατακόρυφων προφίλ των οπτικών ιδιοτήτων στις 27 Ιουνίου 2019, 01:00 UTC. Το γράφημα αντιστοιχεί στη 16 ^η , δηλαδή την τελευταία μέτρηση του επεισοδίου και εμφανίζει τη μικρότερη μέση τιμή του PLDR $\delta_{min} = 0.07$ για ολόκληρο το επεισόδιο και τη μεγαλύτερη μέση τιμή του συντελεστή οπισθοσκέδασης $\beta_{max} = 2.61 \text{ Mm}^{-1}\text{sr}^{-1}$	74

7.3 ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1—1. Ογκομετρική σύνθεση του ατμοσφαιρικού αέρα. Με σκίαση εμφανίζονται τα αέρια με μεταβαλλόμενη συγκέντρωση. *Δεδομένα από την ιστοσελίδα:

https://www.co2.earth/daily-co2 , **το νερό παρατηρείται και στις τρεις φάσεις του: υγρό, αέριο, και στερεό με τη μορφή παγοκρυστάλλων.	2
Πίνακας 1—2. Είδη αιωρούμενων σωματιδίων βάσει της προέλευσής τους.	7
Πίνακας 2—1. Οι κβαντικοί κανόνες επιλογής των επιτρεπτών μεταβάσεων μεταξύ ταλαντωτικών και περιστροφικών ενεργειακών επιπέδων.	19
Πίνακας 3—1. Τεχνικά χαρακτηριστικά της πηγής laser της συσκευής.	38
Πίνακας 3—2. Τεχνικά χαρακτηριστικά της δέσμης μετά τον διευρυντή.	39
Πίνακας 3—3. Τεχνικά χαρακτηριστικά του τηλεσκοπίου της διάταξης.	42
Πίνακας 3—4. Μήκη κύματος που ανιχνεύει η διάταξη LR111–ESS–D300.	42
Πίνακας 3—5. Τεχνικά χαρακτηριστικά των φωτοπολλαπλασιαστών της διάταξης.	47
Πίνακας 4—1. Συγκεντρωτικός πίνακας με τις μέσες τιμές των οπτικών ιδιοτήτων και τις τυπικές αποκλίσεις τους, για κάθε ώρα. Από αριστερά προς δεξιά παρουσιάζονται αναλυτικά: Η ημερομηνία και η ώρα της μέτρησης, τα υψομετρικά όρια που τέθηκαν για τον υπολογισμό των μέσων τιμών, και τα αποτελέσματα για τον συντελεστή οπισθοσκέδασης (β_{aer}), τον συντελεστή εξασθένησης (α_{aer}), τον λόγο Lidar (LR) και τον σωματιδιακό γραμμικό λόγο αποπόλωσης (PLDR).	63
Πίνακας 4—2. Συγκεντρωτικός πίνακας με τις μέσες τιμές των οπτικών ιδιοτήτων και τις τυπικές αποκλίσεις τους ανά βράδυ. Από αριστερά προς δεξιά παρουσιάζονται: οι ημερομηνίες και ώρες που χρησιμοποιήθηκαν για τις μέσες τιμές, το μέσο ύψος της στρωμάτωσης στη διάρκεια των ωρών και τα αποτελέσματα για τον συντελεστή οπισθοσκέδασης (β_{aer}), τον συντελεστή εξασθένησης (α_{aer}), τον λόγο Lidar (LR) και τον σωματιδιακό γραμμικό λόγο αποπόλωσης (PLDR).	64
Πίνακας 5—1. Μέγιστες και ελάχιστες μέσες τιμές ανά οπτική ιδιότητα.	76