ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ



Διπλωματική Εργασία

«ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΠΙΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗΣ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ»

Μαυροπούλου-Τολιοπούλου Ιωάννα

Επιβλέπων : Καθ. Αλέξανδρος Παπαγιάννης

Ιούνιος 2020

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Κατά την εκπόνησή της, με στήριξαν και με βοήθησαν πολλοί άνθρωποι στους οποίους οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ.

Κατά αρχήν θα ήθελα να αναφερθώ στον επιβλέποντα μου κ. Παπαγιάννη Αλέξανδρο. Τον ευχαριστώ θερμά για την ανάθεση του θέματος της διπλωματικής μου εργασίας, καθώς και για την υπομονή του και την επιείκεια με την οποία με αντιμετώπισε.

Αυτή η διπλωματική δεν θα προχωρούσε χωρίς την αμέριστη βοήθεια και την επιστημονική αρωγή του κ. Βασίλη Αμοιρίδη τον οποίο ευχαριστώ θερμά για την εμπιστοσύνη που μου δείχνει.

Ακόμη οφείλω να ευχαριστήσω την δρ. Μαρίνου Ελένη για τις πολύτιμες επιστημονικές συμβουλές που μου παρείχε στο κομμάτι του CALIPSO και την παροχή των δεδομένων που χρειάστηκα από τα επίγεια συστήματα lidar καθώς και τον δρ. Εμμανουήλ Προεστάκη για τη καθοδήγηση που μου παρείχε για την επεξεργασία των δεδομένων του CALIPSO και την δρ. Καλλιόπη- Άρτεμις Βουδούρη για τα σχόλια που μου επισήμανε στην τελική εργασία.

Ευχαριστώ θερμά και όλους τους καθηγητές που είχα κατά τη διάρκεια της φοίτησης μου στην Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών για τις γνώσεις που μου μετέδωσαν κατά τη διάρκεια παρακολούθησης των μαθημάτων.

Μέσα από την καρδιά μου θέλω να ευχαριστήσω τους αγαπημένους μου φίλους που κάνουν την ζωή μου καλύτερη.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω την μητέρα μου και τον σύντροφό μου που με στηρίζουν όλα αυτά τα χρόνια. Θα είμαι πάντα στο πλευρό τους και τους αφιερώνω αυτήν την εργασία.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Πρόλογος	2
Περίληψη	5
Abstract	6
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	7
Αιωρούμενα Σωματίδια και επίδραση τους στην ακτινοβολία	7
1.1 Εισαγωγή	7
1.2 Πηγές αιωρούμενων σωματιδίων	9
1.3 Μεγέθη αιωρούμενων σωματιδίων	10
1.4 Διαχωρισμός των αιωρούμενων σωματιδίων με βάση την προέλευσή του	; 12
1.5 Μηχανισμοί αφαίρεσης αιωρούμενων σωματιδίων από την ατμόσφαιρα	. 17
1.6 Επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων στο κλίμα	18
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	21
Επίγειες και δορυφορικές τεχνικές ενεργής τηλεπισκόπησης της ατμόσφαιρας	21
2.1 Αρχή λειτουργίας της τεχνικής Lidar για ατμοσφαιρική τηλεπισκόπηση	21
2.2 LIDAR Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (EOLE Raman Lidar)	26
2.3 LIDAR Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (PollyXT)	28
2.4 Μετρήσεις από τον δορυφόρο CALIPSO	31
2.4.1 ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΤΟΥ ΔΟΡΥΦΟΡΟΥ CALIPSO	34
2.4.2 CALIPSO V4 Lidar Level 2: Οι αλλαγές σε σχέση με την V3	35
Αλλαγή στην διάκριση Φάσης Νερού-Πάγου στα νέφη (Cloud Ice-Water P Discrimination Changes)	'hase 43
Λόγος LIDAR και παράγοντες πολλαπλής σκέδασης για σύννεφα πάγου (L and Multiple Scattering Factors for Ice Clouds)	idar Ratios. 44
Παράγοντες πολλαπλής σκέδασης για σύννεφα νερού (Multiple Scatterin Water Clouds)	g Factors for 45
Εξασθένηση και οπτικά βάθη (Extinction and Optical Depths)	45
Περίληψη των αλλαγών εξασθένησης από V3 σε V4	47
Αναθεωρημένος Αλγόριθμος για την περιεκτικότητα Πάγου-Νερού (Revis Content Algorithm)	ed Ice-Water 47
Νέο προϊόν δεδομένων: Προϊόν συγχωνευμένου Επιπέδου 5χλμ	48
Έκδοση V4.20 CALIPSO level 2 προϊόντων	49

3	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	50
Σύγκ	ριση Μετρήσεων	50
3.1 Г	Ιαρουσίαση μεθοδολογίας για την αξιολόγηση των δορυφορικών μετρήσεων	50
3.2 A CALI	λθήνα – Σύγκριση προϊόντων Lidar EOLE Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και PSO	. του 54
	Σκηνή 1 – 10/07/2009 ώρα 00:39 UTC	54
Σκ	ηνή 3 – 02/08/2009 ώρα 11:31 UTC	62
Σκ	ηνή 4 – 14/10/2009 ώρα 00:38 UTC	68
3.3 0 και τ	Οινοκαλιά Κρήτης – Σύγκριση προϊόντων Lidar PollyXT του Αστεροσκοπείου Αθ ου CALIPSO)ηνών 72
Σκ	ηνή 1 – 29/04/2017 ώρα 00:23	72
Σκ	ηνή 2 – 15/05/2017 ώρα 00:24	77
Σκ	ηνή 3 – 30/06/2017 ώρα 11:38	82
Σκ	ηνή 4 – 19/08/2017 ώρα 00:23	86
Σκ	ηνή 5 – 04/09/2017 ώρα 00:23	91
Σκ	ηνή 6 – 06/10/2017 ώρα 00:23	95
3.4 Σ	υγκεντρωτικά Αποτελέσματα - Συγκριτική Στατιστική	98
4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	100
BIBΛ	ΙΟΓΡΑΦΙΑ	102
ПАР	ΑΡΤΗΜΑ 1: ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΥΛΗ	106

Περίληψη

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση των κατακόρυφων κατανομών του συντελεστή οπισθοσκέδασης του συστήματος lidar CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) του δορυφόρου της NASA CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations), χρησιμοποιώντας ως αναφορά τις μετρήσεις Lidar του EOLE συστήματος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ) και του PollyXT συστήματος του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ). Η εργασία δομείται ως εξής: Αρχικά, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων, και ακολούθως παρουσιάζονται οι αρχές λειτουργίας των συστημάτων τηλεπισκόπησης. Ακολουθεί η σύγκριση των κατακόρυφων κατανομών της οπισθοσκέδασης για τις δύο εκδόσεις του αλγορίθμου (version 3 και version 4) του CALIPSO και των αντίστοιχων κατακόρυφων κατανομών των επίγειων συστημάτων, για τα μήκη κύματος των 1064 nm και 532 nm για επιλεγμένες μέρες μετρήσεων. Έπειτα, παρουσιάζονται τα συνολικά αποτελέσματα της σύγκρισης, και μελετώνται οι αιτίες των διαφορών τους. Η μελέτη επικεντρώνεται στην επεξεργασία των Level 2 προϊόντων της version 4.20 του CALIPSO, που ανακοινώθηκε τον Οκτώβριο του 2018.

Αναλυτικότερα:

Στο πρώτο κεφάλαιο εξετάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων, ο ρόλος τους στην ατμόσφαιρα, και η επίδρασή τους στην ηλιακή ακτινοβολία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας των lidar και οι τεχνικές επεξεργασίας των σημάτων των διατάξεων lidar EOLE του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και PollyXT του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών. Επίσης γίνεται η παρουσίαση του δορυφόρου CALIPSO και των προϊόντων των δυο εκδόσεων του αλγορίθμου επεξεργασίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο αρχικά παρουσιάζεται η μεθοδολογία επεξεργασίας των μετρήσεων, στη συνέχεια γίνεται σύγκριση των παρατηρήσεων και αξιολογούνται οι ομοιότητες και οι διαφορές των προϊόντων του CALIPSO σε σχέση με τις μετρήσεις των επίγειων συστημάτων για επιλεγμένες μέρες. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα όπου γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων της 4.20 έκδοσης του CALIPSO με την προηγούμενη έκδοση 3 έτσι ώστε να προσδιοριστούν και ποσοτικοποιηθούν οι βελτιώσεις των προϊόντων του δορυφόρου στην τελευταία έκδοση του αλγορίθμου.

 Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα της μελέτης.

Abstract

The aim of this Diploma Thesis is the validation of the aerosol backscatter coefficient profiles of the NASA CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) satellite, using as reference ground based lidar dataset of the EOLE lidar system of the National Technical University of Athens (NTUA) and the PollyXT lidar system of the National Observatory of Athens (NOA). Initially, the basic characteristics and properties of atmospheric particles are presented. Thereafter, the operating principles of the instruments which have been used in this study are presented. Finally, the comparison of the aerosol backscatter profiles at 1064 nm and 532 nm, are calculated and evaluated for the two versions of the CALIPSO algorithm (version 3 and version 4). Aim of this work is to verify the Level 2 products of version 4.20 of CALIPSO, announced in October 2018.

More specifically:

• The first chapter examines the main characteristics of aerosol particles, their role in the atmosphere, and their effect on the solar radiation.

• The second chapter presents the principles of the lidar systems and the different lidar techniques of the EOLE lidar system of the National Technical University of Athens and the PollyXT lidar system of the National Observatory of Athens. Additionally, the CALIPSO satellite and its products and the upgrades of the latest algorithm version are presented.

• The third chapter firstly presents the processing of the measurements and then, the comparison between the observations of the CALIPSO products and the correlative measurements from the ground-based systems (the EOLE lidar system of the National Technical University of Athens and the PollyXT lidar system of the National Observatory of Athens) for different case studies. The work focuses on verifying the backscatter coefficient profiles for the wavelengths of 1064 nm and 532 nm and evaluating the similarities and differences. The latest CALIPSO version is compared to the previous one, in order to identify any improvements on the satellite products derived from the latest version.

• The fourth chapter presents the main conclusions of the study.

Ι ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Αιωρούμενα Σωματίδια και επίδραση τους στην ακτινοβολία

1.1 Εισαγωγή

Η επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων στο κλίμα της Γης με την πάροδο των χρόνων και την βελτίωση των τρόπων μέτρησης και μελέτης τους έχει δείξει την σημαντική συνεισφορά τους στην κλιματική αλλαγή μέσω της ψύξης αλλά και της θέρμανσης της επιφάνειάς της.

Τα αιωρούμενα σωματίδια ή αερολύματα (aerosols) προκύπτουν από άμεσες εκπομπές και από μια διαδικασία μετατροπής από αέριο σε σωματίδιο από πρόδρομους υδρατμών. Μπορούν να επηρεάσουν την κλιματική και στρατοσφαιρική συγκέντρωση του όζοντος και εμπλέκονται και στην ανθρώπινη νοσηρότητα και θνησιμότητα στις αστικές περιοχές. Στην Εικόνα 1-1 μπορούμε να δούμε την χωρική κατανομή των αερολυμάτων παγκοσμίως, που παρήχθη από μία προσομοίωση του Goddard Movτέλου Συστήματος Παρατήρησης Γης (GEOS-5, με χωρική ανάλυση 10 km). Η σκόνη ανυψώνεται από την επιφάνεια της Γης, το θαλάσσιο άλας στροβιλίζεται μέσα στους κυκλώνες, ο καπνός ανυψώνεται από τις φωτιές και τα σωματίδια θειικού άλατος από τα ηφαίστεια και τις εκπομπές ορυκτών καυσίμων.



Εικόνα 1-1 Η σκόνη (κόκκινη), το θαλάσσιο άλας (μπλε), ο καπνός (πράσινο) και τα σωματίδια θειικού άλατος (λευκά) συντελούν το πορτρέτο των παγκόσμιων αερολυμάτων. (Πηγή: William Putman, NASA/Goddard, https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_2393.html)

Στην Εικόνα 1-2 φαίνεται ο χάρτης της παγκόσμιας κατανομής αιωρούμενων σωματιδίων και η αναλογία των σωματιδίων μεγάλων και μικρών διαστάσεων οι περιοχές με έντονο χρώμα υποδεικνύουν στρώματα αιωρούμενων σωματιδίων

μεγάλου οπτικού πάχους. Οι κίτρινες περιοχές είναι κυρίως γιγαντιαία/coarse σωματίδια (όπως σκόνη) και οι κόκκινες περιοχές είναι κυρίως λεπτά/fine σωματίδια (όπως ο καπνός και ατμοσφαιρική ρύπανση). Οι γκρι περιοχές αποτελούν περιοχές χωρίς δεδομένα.



Εικόνα 1-2 Χάρτης της παγκόσμιας κατανομής αιωρούμενων σωματιδίων και της αναλογίας των σωματιδίων μεγάλων και μικρών διαστάσεων. (Πηγή: NASA map by Robert Simmon, βασισμένος στα δεδομένα του δορυφόρου MODIS από NASA Earth Observations <u>https://earthobservatory.nasa.gov/features/Aerosols.</u>)

Το στρώμα της ατμόσφαιρας στο οποίο συναντώνται τα αερολύματα κατά κύριο λόγο είναι η τροπόσφαιρα, που αποτελεί το χαμηλότερο στρώμα της ατμόσφαιρας και εκτείνεται από την επιφάνεια της Γης μέχρι την τροπόπαυση, στα 10 – 15 km υψόμετρο (ανάλογα το γεωγραφικό πλάτος και την περίοδο του χρόνου). Χαρακτηρίζεται από μειωμένη θερμοκρασία καθ' ύψος και έντονη κάθετη ανάμιξη. Αερολύματα υπάρχουν και στην στρατόσφαιρα (45 - 50 km υψόμετρο) αλλά σε πολύ μικρότερες συγκεντρώσεις. Στην Στρατόσφαιρα η θερμοκρασία αυξάνεται με την αύξηση του υψομέτρου και αποτελεί ένα στρώμα που η κάθετη ανάμιξη είναι αργή, με αποτέλεσμα τα αερολύματα που δημιουργούνται ή μπαίνουν στην στρατόσφαιρα να παραμένουν για πολύ περισσότερο χρόνο εκεί, από ότι τα σωματίδια που μεταφέρονται στην τροπόσφαιρα (Seinfeld and Pandis, 1998).

1.2 Πηγές αιωρούμενων σωματιδίων

Σημαντικές φυσικές πηγές σωματιδίων περιλαμβάνουν:

- Γήινη σκόνη από πέτρινα εδάφη (Si, Al, Ti, Fe)
- Ηφαιστειακή δράση (Sulfate, Carbonate),
- Υδρόσφαιρα (Na, Cl, Br, Sulfate) ,

 Καύση βιομάζας και αντιδράσεις μεταξύ φυσικών αέριων εκπομπών (Carbon).

Εκπομπές σωματιδίων που αποδίδονται στον ανθρώπινο παράγοντα προκύπτουν κυρίως από τέσσερις πηγές :

- Ανάφλεξη καυσίμων (Organic Carbon, Elemental "black" Carbon),
- Βιομηχανικές πηγές (Ιχνοστοιχεία, Black Carbon),

 Μη βιομηχανικές ανεξέλεγκτες διαδικασίες (όπως σκόνη του οδικού δικτύου, κατασκευές κλπ.) (Ιχνοστοιχεία, Black Carbon),

• Πηγές λόγω των μεταφορών (Pb, Black Carbon).

Στην Εικόνα 1-3 φαίνονται οι φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές των αιωρούμενων σωματιδίων, μαζί με ενδεικτικά σχήματα αυτών από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.



Scanning electron microscope images

Εικόνα 1-3 Πάνω: φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές αιωρούμενων σωματιδίων, Κάτω: εικόνες των σωματιδίων από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (Πηγή: NASA; <u>https://earthobservatory.nasa.gov/features/Aerosols</u>)

Εκπεμπόμενα απευθείας ως σωματίδια (**πρωτογενή αερολύματα**) ή δημιουργούμενα στην ατμόσφαιρα με μια διαδικασία μετατροπής από αέριο σε σωματίδιο (δευτερογενή αερολύματα), τα ατμοσφαιρικά αερολύματα είναι σωματίδια που

διαφέρουν σε διαστάσεις από μερικά νανόμετρα (nm) έως και δεκάδες μικρόμετρα (μm) σε διάμετρο. Με την αερομεταφορά τους, τα σωματίδια μπορούν να αλλάξουν το μέγεθός τους και τη σύστασή τους με διάφορους τρόπους. Με διαδικασία συμπύκνωσης με είδη ατμών ή με εξάτμιση, με διαδικασία πήξης με άλλα σωματίδια, με χημικές αντιδράσεις ή με ενεργοποίηση λόγω παρουσίας νερού υπερκορεσμού σε σταγονίδια ομίχλης και σταγονίδια νεφών. Σωματίδια μικρότερα του 1 μm σε διάμετρο έχουν γενικά ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις της τάξης των 10 έως και μερικών χιλιάδων ανά cm³. Τα σωματίδια μεγαλύτερα του 1μm σε διάμετρο συνήθως συναντώνται σε συγκεντρώσεις μικρότερς του 1 ανά cm³ (Seinfeld and Pandis,1998).

1.3 Μεγέθη αιωρούμενων σωματιδίων

Τα ατμοσφαιρικά αερολύματα αποτελούνται από σωματίδια που διαφέρουν σε μέγεθος από μερικά Ångström σε αρκετές εκατοντάδες μm (Εικόνα 1-4). Σωματίδια μικρότερα των 2.0 μm σε διάμετρο αναφέρονται ως 'λεπτά/fine' ενώ εκείνα μεγαλύτερα των 2.0 μm σε διάμετρο αναφέρονται ως 'γιγαντιαία/coarse'. Τα λεπτά γενικά, γιγαντιαία είδη σωματιδίων, δημιουργούνται ξεχωριστά, και μετασχηματίζονται ξεχωριστά, έχουν διαφορετική χημική σύσταση και χημικές ιδιότητες, χρειάζονται διαφορετικές τεχνικές για την απομάκρυνσή τους από τις πηγές τους, απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα με διαφορετικούς μηχανισμούς και διαφέρουν σημαντικά στον τρόπο εναπόθεσής τους στην αναπνευστική οδό. Για το λόγο αυτό η διάκριση μεταξύ λεπτών και γιγαντιαίων σωματιδίων είναι ουσιώδης σε κάθε συζήτηση της φυσικής, της χημείας, της μέτρησης ή των επιπτώσεων στην υγεία των αερολυμάτων.



Εικόνα 1-4 Σχηματική κατανομή μεγέθους αιωρούμενων σωματιδίων με τυπικούς μετασχηματισμούς και παραδείγματα τύπων σωματιδίων (Πηγή: http://www.dwd.de/EN/research/observing_atmosphere/composition_atmosphere/aeros

Τα σωματίδια στην διαδικασία πυρηνοποίησης σχηματίζονται από συμπύκνωση ατμών κατά τη διάρκεια διαδικασιών καύσης και από την πυρηνοποίηση των ατμοσφαιρικών στοιχείων για να σχηματίσουν καινούργια σωματίδια. Η διαδικασία συσσώρευσης, που εκτείνεται από 0,1 έως 2,5 μm σε διάμετρο, περιλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας των αιωρούμενων σωματιδίων και ένα σημαντικό κομμάτι από τη συνολική τους μάζα. Η πηγή των σωματιδίων στην διαδικασία συσσώρευσης είναι η σύμπτυξη των σωματιδίων στη διαδικασία πυρηνοποίησης καθώς και η συμπύκνωση υδρατμών σε υπάρχοντα σωματίδια, προκαλώντας τα να φτάσουν σε αυτή την τάξη μεγέθους. Η διαδικασία συσσώρευσης ονομάζεται έτσι διότι οι μηχανισμοί αφαίρεσης σωματιδίων είναι λιγότερο αποτελεσματικοί σε αυτό το σύστημα, κάνοντας τα σωματίδια να μεγαλώνουν σε αυτή την τάξη μεγέθους.

Τα λεπτά αιωρούμενα σωματίδια χωρίζονται σε τρεις υποκατηγορίες:

- Υπέρλεπτα σωματίδια (ultra fine particles) με $0.001 \le d \le 0.01 \mu m$
- Πυρήνες συμπύκνωσης (πυρήνες Aitken) με $0.01 \le d \le 0.1 \, \mu m$
- Συσσωματώματα με $0.1 \le d \le 2.0 \, \mu m$

Τα **γιγαντιαία** σωματίδια, με διάμετρο μεγαλύτερη από 2 μm, σχηματίζονται με μηχανικές διαδικασίες όπως σύνθλιψη, διάβρωση ή αιολική διάβρωση και συνήθως αποτελούνται από ανθρωπογενή και φυσικά σωματίδια σκόνης. Τα γιγαντιαία σωματίδια έχουν επαρκώς μεγάλες ταχύτητες καθίζησης έτσι ώστε να καταλήγουν έξω από την ατμόσφαιρα σε ένα μικρό χρονικό διάστημα. Ωστόσο, υπάρχουν μηχανισμοί (αμμοθύελλες) που μεταφέρουν τα γιγαντιαία σωματίδια σε μεγάλες αποστάσεις. Ο μέσος χρόνος παραμονής των σωματιδίων σκόνης στην ατμόσφαιρα είναι περίπου δύο εβδομάδες (Finlayson-Pitts,2000; Seinfeld and Pandis, 2006; Papayannis et al. 2008).



Εικόνα 1-5 Κατανομή μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων με βάση τη χημική τους σύσταση (Πηγή: Wall et al. 1988)

Τα θειικά άλατα, το αμμώνιο, ο οργανικός και ο ανόργανος άνθρακας και συγκεκριμένα μεταβατικά μέταλλα βρίσκονται κυρίως στα λεπτά σωματίδια. Στοιχεία του φλοιού, που συμπεριλαμβάνουν πυρίτιο, ασβέστιο, μαγνήσιο, αλουμίνιο, σίδηρο, και βιογενή οργανικά σωματίδια (γύρη, σπόρους, κομμάτια φυτών) συναντώνται στα γιγαντιαία αιωρούμενα σωματίδια. Νιτρικά άλατα μπορούν να βρεθούν και στις δύο κατηγορίες, και στα λεπτά και στα γιγαντιαία σωματίδια. Στην Εικόνα 1-5 φαίνονται τυπικές κατανομές μεγέθους σωματιδίων με βάση την χημική τους σύσταση (Wall et al. 1998).

1.4 Διαχωρισμός των αιωρούμενων σωματιδίων με βάση την προέλευσή τους

Τα αιωρούμενα σωματίδια διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την προέλευσή τους: με θαλάσσια προέλευση (marine), με ηπειρωτική προέλευση (continental) και με πολική προέλευση (polar). Για την κάθε περίπτωση οι μικροφυσικές και οπτικές τους ιδιότητες καθώς και η σύστασή τους διαφέρει. Στα σωματίδια με ηπειρωτική προέλευση διακρίνονται σε 3 υποκατηγορίες: την αστική προέλευση από απομακρυσμένες αγροτικές περιοχές (rural aerosols) και την προέλευση από τις ερήμους (desert dust aerosols). Όσον αφορά την επίγεια προέλευση κύριες πηγές είναι οι έρημοι (άλατα πυριτίου και σιδήρου), οι βιομηχανικές δραστηριότητες (αιθάλη, οργανικά σωματίδια, νιτρικά άλατα), η καύση βιομάζας (αιθάλη-soot), η καύση ορυκτών καυσίμων (τέφρα-ash) και η ηφαιστειακή δραστηριότητα (θειικά άλατα – sulphate).

Πιο συγκεκριμένα, τα αστικά αερολύματα αποτελούν μείγματα εκπομπών πρωτογενών και δευτερογενών σωματιδίων. Προκύπτουν τα μεν πρωτογενή από την βιομηχανική δραστηριότητα, τις μεταφορές, την παραγωγή ενέργειας και τις φυσικές πηγές τους και τα δε δευτερογενή από μηχανισμούς μετατροπής αερίου-σωματιδίου. Η αριθμητική κατανομή κυριαρχείται από σωματίδια μικρότερα του 1 μm, ενώ το μεγαλύτερο μέρος έχει διάμετρο (Dp) μεταξύ 0.1 μm και 0.5 μm. Η κατανομή της μάζας εμφανίζει δύο μέγιστα, ένα στην περιοχή όπου η διάμετρος είναι < 1 μm (περιοχή συσσωμάτωσης) και ένα στην περιοχή coarse σωματιδίων (5 μm – 10 μm) (Εικόνα 1-6). Τα θαλάσσια αερολύματα περιέχουν αιωρούμενα σωματίδια όλων των μεγεθών, της περιοχής των πυρήνων Aitken (διάμετρος < 0.1 μm), της περιοχής συσσωμάτωσης (0.1 μm < διάμετρος < 0.6 μm) και την περιοχής coarse σωματιδίων (διάμετρος > 0.6 μm) (Εικόνα 7). Οι συγκεντρώσεις τους είναι συνήθως της τάξης των 100 – 300 cm⁻³.



Εικόνα 1-6 Κατανομή όγκου αστικών αερολυμάτων δίπλα σε μία πηγή (αυτοκινητόδρομος) και για μέσες αστικές συνθήκες (Πηγή: Seinfeld and Pandis, 1998)



Εικόνα 1-7 Κατανομή όγκου (αριστερά) και αριθμού(δεξιά) θαλάσσιων αερολυμάτων καθώς και μία κατανομή μοντελοποίησης που αντιπροσωπεύει τις μέσες συνθήκες (Πηγή: Seinfeld and Pandis, 1998)

Τα αγροτικά ηπειρωτικά αερολύματα προέρχονται κυρίως από φυσικές πηγές με μικρή συνεισφορά ανθρωπογενών σωματιδίων. Η αριθμητική κατανομή κυριαρχείται από σωματίδια με διαμέτρους 0.02 μm και 0.08 μm. Η κατανομή της μάζας κυριαρχείται από τα μεγάλα σωματίδια με το κέντρο να βρίσκεται στα 7 μm (Εικόνα 1-8, αριστερά).

Όσον αφορά τα αερολύματα από απομακρυσμένες αγροτικές περιοχές (Εικόνα 1-8, δεξιά), τα κυριότερα συστατικά τους είναι τα πρωτογενή σωματίδια και τα δευτερογενή παράγωγα οξείδωσης. Οι αριθμητικές συγκεντρώσεις των αερολυμάτων είναι περίπου 2000 – 10000 cm⁻³.



Εικόνα 1-8 Τυπικές κατανομές αγροτικών ηπειρωτικών αερολυμάτων (αριστερά) και απομακρυσμένων ηπειρωτικών αερολυμάτων (δεξιά) ως προς τον αριθμό τους, την επιφάνειά τους και τον όγκο τους (Πηγή: Seinfeld and Pandis, 1998)

Τα σωματίδια ελεύθερης τροπόσφαιρας (Εικόνα 1-9, αριστερά), συναντώνται στη μεσαία και ανώτερη τροπόσφαιρα πάνω από τα νέφη. Η διάμετρος τους κυμαίνεται από 0.01 μm έως 0.25 μm. Τα πολικά αερολύματα (Εικόνα 1-9, δεξιά), βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια της Ανταρκτικής και Αρκτικής με χαμηλές συγκεντρώσεις. Το μέγιστο της αριθμητικής κατανομής είναι στα 0.15 μm, ενώ στην κατανομή μάζας εμφανίζονται δύο μέγιστα 0.75 μm και 8 μm. Κατά την διάρκεια του χειμώνα και στις αρχές της άνοιξης η συγκέντρωσή τους αυξάνεται σε περισσότερο από 200 cm⁻³ όποτε και επηρεάζονται περισσότερο από ανθρωπογενείς πηγές. Τα πολικά αερολύματα είναι πλούσια σε άνθρακα, ενώσεις θείου, θαλασσινό αλάτι και αρκτική σκόνη από τις άνυδρες περιοχές.



Εικόνα 1-9 Τυπικές κατανομές ελεύθερων τροποσφαιρικών αερολυμάτων (αριστερά) και πολικών αερολυμάτων (δεξιά) ως προς τον αριθμό τους, την επιφάνειά τους και τον όγκο τους (Πηγή: Seinfeld and Pandis, 1998)

Τα σωματίδια από τις ερήμους, βρίσκονται φυσικά πάνω από τις ερήμους και εκτείνονται στις παρακείμενες περιοχές. Η κατανομή του μεγέθους είναι παρόμοια με εκείνη των αερολυμάτων απομακρυσμένων περιοχών αλλά εξαρτάται σε μεγάλο ποσοστό από την ταχύτητα του ανέμου. Η αριθμητική κατανομή παρουσιάζει τρία μέγιστα, σε διαμέτρους των 0.01 μm ή μικρότερες, 0.05 μm και 10 μm αντίστοιχα (Εικόνα 1-10). Οι κυριότερες πηγές των ερημικών αερολυμάτων εμφανίζονται στις ερημικές περιοχές του Βόρειου Ημισφαιρίου. Καταιγίδες άμμου από τη Σαχάρα μεταφέρουν υλικά από την βορειοδυτική Αφρική, διασχίζοντας τον Ατλαντικό, στις ανατολικές ακτές των ΗΠΑ. Ενώ στις περιοχές των ερήμων βρίσκονται σωματίδια μεγάλου μεγέθους (100 μm διάμετρο), μόνο σωματίδια μικρότερα από 10 μm διάμετρο μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις. Η ατμόσφαιρα της Ελλάδας, και γενικότερα της Μεσογείου, επηρεάζεται συχνά από επεισόδια μεταφοράς σκόνης από την Αφρικανική Ήπειρο.



Εικόνα 1-10 Τυπικές κατανομές αερολυμάτων ερήμου ως προς τον αριθμό τους, την επιφάνειά τους και τον όγκο τους (Πηγή: Seinfeld and Pandis, 1998)

Τα ηφαίστεια αποτελούν την πιο σημαντική φυσική πηγή εκπομπής ρύπων και αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα τόσο κατά την έκρηξή τους όσο και μεταξύ των εκρήξεων. Η καλή κατανόηση των ηφαιστειακών εκπομπών θεωρείται ουσιώδης σε πολλούς κλάδους της επιστήμης της ατμόσφαιρας. Τα τροποσφαιρικά ηφαιστειακά αερολύματα έχουν σημαντικό ρόλο στο ισοζύγιο της ακτινοβολίας τόσο άμεσα με την σκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας και την απορρόφηση της γήινης θερμικής ακτινοβολίας όσο και έμμεσα προκαλώντας αλλαγές στη νεφοκάλυψη και στις ιδιότητες των νεφών. Τα ηφαιστειακά αερολύματα έχουν την ίδια επίδραση στο ισοζύγιο της ακτινοβολίας με τα ανθρωπογενή αερολύματα παρόλο τους χαμηλούς ρυθμούς εκπομπής τους. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι πως απελευθερώνονται στην ελεύθερη τροπόσφαιρα σε αντίθεση με τα ανθρωπογενή που ανιχνεύονται στις κατώτερες ζώνες της τροπόσφαιρας με αποτέλεσμα να μειώνεται ο χρόνος ζωής τους. Επιπλέον, τα ηφαιστειακά τροποσφαιρικά αερολύματα έχουν επιπτώσεις στα οικοσυστήματα, όπου τα θειικά κυρίως αερολύματα αποβαίνουν τοξικά για τα φυτά και τα δέντρα αλλά και για την ανθρώπινη υγεία. Μπορούμε να διακρίνουμε 3 τύπους ηφαιστειακών εκπομπών: τις κύριες εκρήξεις κατά τις οποίες εκλύονται τεράστιες ποσότητες αερίων και σωματιδιακής ύλης και διαρκούν σχετικά μικρό διάστημα. Εκτοξεύουν ένα μέρος του υλικού τους στην στρατόσφαιρα, ενώ ένα ποσοστό παραμένει στην τροπόσφαιρα. Ο δεύτερος τύπος των εκπομπών είναι από τα ηφαίστεια που παραμένουν διαρκώς ενεργά. Τα αέρια εκπέμπονται σε μεγάλες ποσότητες κατευθείαν από τη λάβα στην τροπόσφαιρα για μεγάλες περιόδους, που μπορούν να διαρκέσουν από χρόνια έως και δεκαετίες. Ο τρίτος τύπος αναφέρεται στα μη ενεργά ηφαίστεια, στα οποία έχει σχηματιστεί μια λίμνη από την οποία απελευθερώνονται ατμοί και εξέρχονται στην ατμόσφαιρα μεγάλες ποσότητες θειούχων ενώσεων. Τα θειούχα αυτά αέρια αντιδρούν με τα στοιχεία της ατμόσφαιρας και σχηματίζουν θειικά αερολύματα. Επίσης μια τέταρτη πηγή πρωτογενών ηφαιστειακών σωματιδίων μπορούν να θεωρηθούν και τα σωματίδια που επιστρέφουν από την στρατόσφαιρα στην τροπόσφαιρα. Ενδεικτικά, στην Εικόνα 1-11 φαίνεται η κατανομή μεγέθους ηφαιστειακής σκόνης πριν και μετά την έκρηξη του ηφαιστείου Jungfraujoch στην Ισλανδία.





1.5 Μηχανισμοί αφαίρεσης αιωρούμενων σωματιδίων από την ατμόσφαιρα

Οι μηχανισμοί αφαίρεσης των αερολυμάτων από την ατμόσφαιρα ενώ είναι αποδοτικοί στα μικρά και μεγάλα άκρα των τάξεων μεγέθους των σωματιδίων δεν επηρεάζουν σημαντικά την αφαίρεση των υπέρλεπτων σωματιδίων. Υπέρλεπτα σωματίδια έχουν σημαντικά μεγαλύτερους χρόνους παραμονής στην ατμόσφαιρα από εκείνα στη διαδικασία πυρηνοποίησης ή στην γιγαντιαία κατάσταση.

Τα σωματίδια αφαιρούνται τελικά από την ατμόσφαιρα με δύο μηχανισμούς: Την ξηρή εναπόθεση που αναφέρεται στην εναπόθεση στην επιφάνεια της Γης και την υγρή εναπόθεση που είναι η ενσωμάτωση στα σταγονίδια των σύννεφων κατά τη διαδικασία της καθίζησης. Επειδή και η υγρή αλλά και η ξηρή εναπόθεση οδηγούν σε μικρούς χρόνους παραμονής στην τροπόσφαιρα, και επειδή η γεωγραφική κατανομή των πηγών των σωματιδίων είναι ανομοιόμορφη, τα τροποσφαιρικά αερολύματα διαφέρουν αρκετά σε συγκέντρωση και σύσταση σε όλη τη Γη. Ενώ τα ατμοσφαιρικά ιχνοστοιχεία έχουν χρόνους ζωής που διαφέρουν από λιγότερο από δευτερόλεπτο σε αιώνα ή και περισσότερο, οι χρόνοι παραμονής των σωματιδίων στην τροπόσφαιρα διαφέρουν μόνο από μερικές ημέρες έως και μερικές εβδομάδες (Seinfeld and Pandis, 1998).

1.6 Επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων στο κλίμα

Τα αερολύματα επηρεάζουν το κλίμα άμεσα με την σκέδαση και την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας και έμμεσα μέσα από το ρόλο τους ως πυρήνες συμπύκνωσης νεφών. Και οι δύο τρόποι επηρεάζουν το ενεργειακό ισοζύγιο της Γης, δηλαδή την ισορροπία μεταξύ της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με την εκπεμπόμενη γήινη ακτινοβολία. Όταν διαταράσσεται το ενεργειακό ισοζύγιο προκαλείται αλλαγή στις κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στην γη μέχρι να επιτευχθεί ξανά ισορροπία.

Το μέγεθος του **άμεσου** φαινομένου των αερολυμάτων (που μετράται ως Wm⁻²) σε συγκεκριμένο χρόνο και τοποθεσία εξαρτάται από το ποσό της ακτινοβολίας που σκεδάζεται πίσω στο διάστημα, που με τη σειρά της εξαρτάται από το μέγεθος, την αφθονία και τις οπτικές ιδιότητες των σωματιδίων και την ηλιακή ζενίθια γωνία. Τα σωματίδια μπορούν και να σκεδάζουν και να απορροφούν ακτινοβολία ταυτόχρονα. Όταν σκεδάζουν μέρος την εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας και την επανεκπέμπουν στο διάστημα, έχουμε τοπική ψύξη της ατμόσφαιρας. Όταν απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία, λειτουργούν όπως τα αέρια του θερμοκηπίου και συμβάλλουν στην αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της γης (φαινόμενο του θερμοκηπίου).

Το λεγόμενο έμμεσο φαινόμενο προκύπτει με την αύξηση των συγκεντρώσεων του αριθμού των αιωρούμενων σωματιδίων από ανθρωπογενείς πηγές που οδηγούν σε αύξηση των συγκεντρώσεων των πυρήνων συμπύκνωσης νέφους, που με τη σειρά τους οδηγούν σε δημιουργία νεφών με μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σταγονιδίων με μικρότερες ακτίνες που οδηγούν σε νέφη με μεγαλύτερη λευκαύγεια (albedo). Η έμμεση επίδραση στο κλίμα των αιωρούμενων σωματιδίων είναι πιο περίπλοκη και πιο δύσκολη να εκτιμηθεί από την άμεση επίδρασή τους διότι εξαρτάται από μια αλυσίδα γεγονότων που συνδέουν τα επίπεδα των αιωρούμενων σωματιδίων με τις συγκεντρώσεις των πυρήνων συμπύκνωσης νεφών, τις συγκεντρώσεις των πυρήνων συμπύκνωσης νεφών με τις συγκεντρώσεις (και τα μεγέθη) των σταγονιδίων των νεφών και αυτές, στη συνέχεια, με τη λευκαύγεια των νεφών και το χρόνο ζωής τους. Αλλαγές στον αριθμό της συγκέντρωσης των αερολυμάτων παρατηρείται να προκαλεί μεταβολές στον πληθυσμό και στο μέγεθος των σταγονιδίων των νεφών, που με τη σειρά τους προκαλούν αλλαγές στη λευκαύγεια των νεφών και στη χωρική τους έκταση. Άλλες μετεωρολογικές επιρροές μπορούν επίσης να συμβούν ως αποτέλεσμα των διαταραχών των συγκεντρώσεων των αερολυμάτων, όπως μεταβολές στην κατακρήμνισή τους.

Η άμεση απορρόφηση της ακτινοβολίας από αερολύματα οδηγεί σε θέρμανση της τροπόσφαιρας και ψύξη της επιφάνειας της Γης, γεγονός που μπορεί να αλλάξει τη

σχετική υγρασία και την ατμοσφαιρική σταθερότητα με αποτέλεσμα να επηρεάζονται τα σύννεφα και οι βροχοπτώσεις (**ημι-άμεσο** φαινόμενο των αερολυμάτων – "semidirect aerosol effect").

Καθώς τα σωματίδια γίνονται όλο και περισσότερο απορροφητικά απ' όσο σκεδαζόμενα, φτάνουν σε ένα σημείο, που εξαρτάται από το μέγεθος και την λευκαύγεια (albedo) της υποκείμενης επιφάνειας, όπου η συνολική επίδραση του στρώματος των σωματιδίων αλλάζει από ψύξη σε θέρμανση. Επιπρόσθετα, εάν τα σωματίδια αποτελούνται από ένα μείγμα αποκλειστικά σκεδαζόμενων υλικών, όπως άλατα αμμωνίου, και μερικά απορροφούμενα υλικά, όπως η αιθάλη, το φαινόμενο ψύξης-θέρμανσης εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο οι δύο ουσίες αναμιγνύονται σε όλο τον πληθυσμό των σωματιδίων. Η διατάραξη της ροής της ακτινοβολίας από το aerosol radiative effect, που δηλώνει την αλλαγή της ροής ακτινοβολίας λόγω της παρουσίας των ολικών αερολυμάτων (φυσικών και ανθρωπογενών) (πηγή: IPCC-2007). Η Εικόνα 1-12 παρουσιάζει ενδεικτικά τους διάφορους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με τα αερολύματα και να νέφη.



Εικόνα 1-12 Σχηματικό διάγραμμα με τους διάφορους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με τα αερολύματα και τα νέφη. Οι μικρές μαύρες κουκίδες αντιπροσωπεύουν τα αιωρούμενα σωματίδια, οι μεγαλύτεροι διακεκομμένοι λευκοί κύκλοι τα σταγονίδια νεφών, οι ευθείες γραμμές την προσπίπτουσα και ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία, οι κυματιστές γραμμές την επίγεια ακτινοβολία και οι γεμάτοι λευκοί κύκλοι τη συγκέντρωση αριθμού σταγονιδίων (CDNC). Το αδιατάρακτο σύννεφο περιέχει μεγαλύτερες σταγόνες νέφους καθώς μόνο φυσικά αερολύματα είναι διαθέσιμα ως πυρήνες συμπύκνωσης νέφους, ενώ το διαταραγμένο σύννεφο περιέχει μεγαλύτερο αριθμό μικρότερων σταγόνων νέφους, καθώς είναι διαθέσιμα τόσο φυσικά όσο και ανθρωπογενή αερολύματα ως πυρήνες συμπύκνωσης (CCN). Οι κατακόρυφες γκρίζες παύλες αντιπροσωπεύουν βροχόπτωση και το LWC αναφέρεται στην περιεκτικότητα σε νερό. (Πηγή: IPCC 2007: https://archive.ipcc.ch/publications and data/ar4/wg1/en/ch2s2-4.html)

Στην Εικόνα 1-13 παρουσιάζεται η μέση κατακράτηση της ακτινοβολίας που προκαλείται από τα βασικότερα θερμοκηπικά αέρια και τα αερολύματα κατηγοριοποιημένα με βάση την χημική τους σύσταση. Η επίδραση στην ακτινοβολία των συνολικών αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας είναι -0.9 W m^(-2) (με

μέτρια εμπιστοσύνη) και είναι το συνολικό αποτέλεσμα από την αρνητική επίδραση των περισσοτέρων αιωρούμενων σωματιδίων και της θετικής επίδρασης από την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από τον μαύρο άνθρακα. Αξίζει να αναφερθεί ότι η επίδραση των στρατοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων στο κλίμα είναι έντονη για αρκετά χρόνια μετά από μία ηφαιστειακή έκρηξη. Αρκετές μικρές εκρήξεις έχουν προκαλέσει -0.11 W m⁽⁻²⁾ για τα χρόνια 2008 έως 2011 που είναι περίπου δύο φορές μεγαλύτερη από την επίδρασή τους κατά την περίοδο 1999-2002 (Πηγή: IPCC, 2013).



Εικόνα 1-13 Εκτιμήσεις εκπεμπόμενης ακτινοβολίας το 2011 σε σχέση με το 1750 (σε Wm ^ (-2)) και αθροιστικές αβεβαιότητες για τους κύριους παράγοντες της κλιματικής αλλαγής. Οι τιμές είναι η μέση παγκόσμια εκπεμπόμενη ακτινοβολία (RF). (Πηγή: IPCC, 2013)

2 КЕФАЛАЮ 2

Επίγειες και δορυφορικές τεχνικές ενεργής τηλεπισκόπησης της ατμόσφαιρας

2.1 Αρχή λειτουργίας της τεχνικής Lidar για ατμοσφαιρική τηλεπισκόπηση

Όσο η ακτινοβολία ταξιδεύει στην ατμόσφαιρα, τα σωματίδια και τα αέρια στην ατμόσφαιρα μπορούν να επηρεάσουν το εισερχόμενο φως και την ακτινοβολία με μηχανισμούς σκέδασης και απορρόφησης. Μέσω της σκέδασης, σωματίδια ή μεγάλα μόρια αερίου στην ατμόσφαιρα αλληλεπιδρούν με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και την επανεκπέμπουν σε μια τυχαία διεύθυνση. Το πως λαμβάνει χώρα η σκέδαση εξαρτάται από διάφορους παράγοντες συμπεριλαμβανομένου του μήκους κύματος της ακτινοβολίας, την αφθονία των σωματιδίων ή των αερίων και η απόσταση που διανύει η ακτινοβολία μέσω της ατμόσφαιρας. Μεσω της απορρόφησης, τα μόρια στην ατμόσφαιρα απορροφούν ενέργεια και σε διάφορα μήκη κύματος και την μετατρέπουν σε θερμική ενέργεια (μια πιο εκτενής περιγραφή των μηχανισμών αυτών παρατίθενται στο παράρτημα αυτής της εργασίας).

Η τεχνικές LIDAR (Light Detection And Ranging) έχουν δώσει μια άνευ προηγουμένου εικόνα της κατακόρυφης δομής της κατανομής αιωρούμενων σωματιδίων και νεφών. Χρησιμοποιώντας εξελιγμένα συστήματα πολλαπλών καναλιών μήκους κύματος που έχουν ξεχωριστά κανάλια για ελαστική οπισθοσκέδαση, Raman οπισθοσκέδαση και αποπόλωση, τα LIDARs παρέχουν έναν πολύπλευρο οπτικό και μικροφυσικό χαρακτηρισμό των αερολυμάτων. Επιπλέων, τα συστήματα lidar μπορούν να πραγματοποιούν μετρήσεις συνεχώς κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας σε ένα ευρύ φάσμα καιρικών συνθηκών.

Η λειτουργία μιας διάταξης LIDAR συνιστάται στην εκπομπή και διάδοση ενός παλμού laser στην ατμόσφαιρα, την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με τα συστατικά της ατμόσφαιρας και την ανίχνευση του μέρους της ακτινοβολίας που επιστρέφει με το κατάλληλο ανιχνευτικό σύστημα (Εικόνα 2-2). Με την επεξεργασία του ανιχνεύσιμου σήματος LIDAR συγκεντρώνονται πληροφορίες για το είδος του στόχου, την απόστασή του από το σημείο εκπομπής των παλμών laser, τη σύστασή του καθώς και την κατανομή του στο χώρο.



Εικόνα 2-2 Διάταξη του συστήματος Lidar του Ε.Μ.Π. με χρήση οπτικής ίνας

Η εξίσωση οπισθοσκέδασης lidar για μονοχρωματική δέσμη laser μήκους κύματος λ, που εκπέμπεται κατακόρυφα και σε ατμοσφαιρική περιοχή στην οποία λαμβάνει χώρα αποκλειστικά μεμονωμένη ελαστική σκέδαση, δίνεται από τη σχέση (Weitkamp, 2005):

$$P(z,\lambda) = P_0 \frac{C O(z,\lambda)}{r^2} \times [\beta_p(z,\lambda) + \beta_m(z,\lambda)] \times exp\left\{-2 \times \int_0^{z'} [\alpha_p(z,\lambda) + \alpha_m(z,\lambda)]dz'\right\}$$

όπου P(z,λ) η στιγμιαία ισχύς της δέσμης laser που ανιχνεύεται σε χρόνο t από απόσταση r, βp(z,λ) ο χωρικός συντελεστής οπισθοσκέδασης σωματιδιακών συνεισφορών, βm(z,λ) ο χωρικός συντελεστής οπισθοσκέδασης μοριακών συνεισφορών, αp(z,λ) ο χωρικός συντελεστής εξασθένησης σωματιδιακών συνεισφορών, αm(z,λ) ο χωρικός συντελεστής εξασθένησης μοριακών συνεισφορών. Ο όρος P0 αντιστοιχεί στην εκπεμπόμενη ισχύ του παλμού του laser και ο όρος C σε παραμέτρους που αφορούν την διάταξη lidar και περιγράφουν την απόδοση των οπτικών και ανιχνευτικών διατάξεων στο μήκος κύματος ανίχνευσης λ. Ο όρος O(z,λ), εκφράζει την συνάρτηση πλήρους επικάλυψης της διάταξης στον οπτικό δρόμο καταγραφής του μήκους κύματος λ.

Μετά από εκτεταμένες μελέτες για την εξαγωγή πληροφορίας σχετική με τις οπτικές ιδιότητες των ατμοσφαιρικών σωματιδίων, ο καταλληλότερος αλγόριθμος επεξεργασίας είναι η αναλυτική αντιστροφή του σήματος κατά Klett (προς τα πίσω ολοκλήρωση). Η εξίσωση lidar, εφόσον μπορούν να προσδιοριστούν με μεγάλη ακρίβεια οι συντελεστές εξασθένησης και οπισθοσκέδασης, που αφορούν την μοριακή ατμόσφαιρα (αm(z,λ) και βm(z,λ)), περιέχει δύο αγνώστους: τους συντελεστές εξασθένησης και οπισθοσκέδασης των σωματιδίων (αp(z,λ) και βp(z,λ), αντίστοιχα]. Έτσι, η επίλυσή της είναι αδύνατη. Για την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης αυτής, πρέπει να θεωρηθεί μια επιπλέον σχέση μεταξύ των δύο παραμέτρων, που παραμένει σταθερή με την κατεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας laser (συνήθως καθ' ύψος). Ορίζεται ο λόγος lidar (lidar ratio) για τα αιωρούμενα σωματίδια (Sp, εκφρασμένος σε sr), ως ο λόγος του συντελεστή εξασθένησης προς τον συντελεστή οπισθοσκέδασης των αερολυμάτων:

$$S_p(\lambda) = \frac{a_p(z,\lambda)}{\beta_p(z,\lambda)} = const.$$

Ο λόγος lidar είναι μια παράμετρος που εξαρτάται από το μήκος κύματος και τις ιδιότητες των αερολυμάτων και γενικά δεν είναι σταθερή με το ύψος. Ειδικότερα, η τιμή του λόγου lidar των αερολυμάτων εξαρτάται από τον δείκτη διάθλασης (άρα και από την χημική τους σύσταση) και την κατανομή μεγεθών των σωματιδίων. Στη χρήση της τεχνικής της ελαστικής οπισθοσκέδασης lidar, η εκ των προτέρων υπόθεση γνώσης της τιμή του λόγου lidar, καθώς και η υπόθεση ότι ο λόγος αυτός παραμένει σταθερός με το ύψος, αποτελούν την μεγαλύτερη πηγή αβεβαιότητας στην επίλυση της διαφορικής εξίσωσης.

Μετά την παραδοχή του σταθερού με το ύψος λόγου lidar, και για την περιοχή πλήρους επικάλυψης της δέσμης laser με το οπτικό πεδίο του τηλεσκοπίου, η εξίσωση lidar μπορεί να επιλυθεί ως προς τον συντελεστή οπισθοσκέδασης των αιωρούμενων σωματιδίων με μία επιπλέον παραδοχή που αφορά την σταθερά βαθμονόμησης του συστήματος. Συνήθως θεωρούμε μία περιοχή βαθμονόμησης του συντελεστή οπισθοσκέδασης των αιωρούμενων σωματιδίων στο λεγόμενο ύψος αναφοράς (zo, reference height όπου θεωρούμε πως η ατμόσφαιρα είναι ελεύθερη από σωματίδια και η οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία προέρχεται μόνο από την συνεισφορά των ατμοσφαιρικών μορίων), που εξαρτάται από το λόγο του σήματος προς το θόρυβο του κάθε συστήματος lidar.

$$\begin{split} \beta_{p}(\lambda,z) &= -\beta_{m}(\lambda,z) \\ + \frac{P(\lambda,z) \times z^{2} \times exp\left[-2 \times (S_{p} - S_{m}) \times \int_{z_{0}}^{z} \beta_{m}(\lambda,\zeta)d\zeta\right]}{\frac{P(\lambda,z_{0}) \times z_{0}^{2}}{\beta_{p}(z_{0}) + \beta_{m}(z_{0})} - 2 \times S_{p} \times \int_{z_{0}}^{z} P(\lambda,\zeta) \times \zeta^{2} \times exp\left[-2 \times (S_{p} - S_{m}) \times \int_{z_{0}}^{z} \beta_{m}(z')dz'\right]d\zeta} \end{split}$$

Έπειτα ο συντελεστής εξασθένησης προκύπτει ως:

$$\alpha_p = \beta_p(\lambda, z) \times S_p(\lambda)$$

Όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος τόσο μεγαλύτερη είναι και η επίδραση επιλογής της σταθερής τιμής του λόγου Lidar.

Η μέθοδος αντιστροφής σήματος κατά Klett έχει αρκετούς περιορισμούς και όλοι οι περιορισμοί προκύπτουν από το γεγονός ότι δύο φυσικές παράμετροι, ο συντελεστής εξασθένησης και ο συντελεστής οπισθοσκέδασης των αιωρούμενων σωματιδίων, προκύπτουν από μία ποσότητα που είναι το ελαστικά οπισθοσκεδαζόμενο σήμα lidar. Με την τεχνική Raman, εκτός από την καταγραφή του επιστρεφόμενου σήματος λόγω ελαστικής οπισθοσκέδασης από τα μόρια και τα σωματίδια της ατμόσφαιρας, γίνεται χρήση και του ανελαστικά οπισθοσκεδαζόμενου σήματος από τα μόρια.

Η εξίσωση που περιγράφει την τεχνική Raman lidar είναι η ακόλουθη (Weitkamp, 2005):

$$P(z,\lambda) = P_0 \frac{C O(z,\lambda)}{r^2} \\ \times [\beta_p(z,\lambda) \\ + \beta_m(z,\lambda)] \times exp\left\{-2 \times \int_0^{z'} [\alpha_p(z,\lambda) + \alpha_m(z,\lambda)]dz'\right\}$$

'Οπου:

$$N_{N_2}(z) \times \frac{d\sigma_{180^\circ}}{d\Omega}(\pi, \lambda) = \beta_{Raman}(z, \lambda_{Raman})$$

και

$$a_m(z,\lambda) + \alpha_p(z,\lambda) = \alpha(z,\lambda)$$

Οι περισσότεροι όροι των παραπάνω εξισώσεων είναι αντίστοιχοι με τους όρους της εξίσωσης οπισθοσκέδασης lidar που παραμένουν οι ίδιοι και για το μήκος κύματος λraman (το μήκος κύματος δηλαδή στο οποίο παρουσιάζει φασματική μετατόπιση από λ σε λraman λόγω της σκέδασης Raman). Ο όρος NN2 εκφράζει την κατακόρυφη κατανομή της αριθμητικής συγκέντρωσης του αζώτου και ο όρος dσ180°/dΩ, την ενεργό διατομή της οπισθοσκέδασης Raman της ανιχνευόμενης ακτινοβολίας στα 387 nm και στα 607 nm, όταν εκπέμπονται ακτινοβολίες στα 355nm και στα 532nm.

Υποθέτοντας μια εκθετική σχέση μεταξύ των συντελεστών εξασθένησης των σωματιδίων για τα μήκη κύματος των 355 και 387 nm και μια για τα μήκη κύματος 532 και 607nm, μέσω του εκθέτη Ångström στη θέση z, τότε η διαφορική εξίσωση μπορεί να λυθεί ως προς το συντελεστή εξασθένησης των σωματιδίων στο εκπεμπόμενο μήκος κύματος σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{a_p(r)}{a_p(r_{Raman})} = \left(\frac{\lambda_{Raman}}{\lambda}\right)^{Angström}$$
$$a_p(r) = \frac{\frac{d}{dr} \left[ln \left(\frac{N_{N_2}}{P(r_{Raman}) \times r^2}\right) \right] - a_m(r) - a_m(r_{Raman})}{1 + \left(\frac{r}{r_{raman}}\right)^{Angström}}$$

Για τον υπολογισμό του συντελεστή εξασθένησης των σωματιδίων, πρέπει να θεωρήσουμε γνωστή την τιμή του εκθέτη Ångström, ο οποίος για τα τόσο κοντινά μήκη κύματος (όπως τα 355 και τα 387 nm καθώς και για σωματίδια διαμέτρου συγκρίσιμης των μηκών κύματος) μπορεί να θεωρηθεί ίσος με την μονάδα (σε περίπτωση εσφαλμένης εκτίμησης του εκθέτη Ångström η αβεβαιότητα στον υπολογισμό του συντελεστή εξασθένησης προκύπτει μικρότερη του 10%).

Ο συντελεστής οπισθοσκέδασης για τα αιωρούμενα σωματίδια, μπορεί να υπολογιστεί με την χρήση των ελαστικά και ανελαστικά οπισθοσκεδαζόμενων σημάτων lidar στα 355-532 nm και 387-607 nm, αντίστοιχα. Ο λόγος του ελαστικά οπισθοσκεδαζόμενου σήματος από τα σωματίδια (355-532 nm) προς το ανελαστικά οπισθοσκεδαζόμενου σήματος από τα σωματίδια (355-532 nm) προς το ανελαστικά οπισθοσκεδαζόμενο σήμα από το άζωτο (387-607 nm) σύμφωνα με τις διαφορικές εξισώσεις lidar σε σύστημα ελαστικής οπισθοσκέδασης και Raman lidar για το ύψος z αλλά και για ένα ύψος αναφοράς zo στην ατμόσφαιρα μέσω της ακόλουθης εξίσωσης υπολογίζει τον συντελεστή οπισθοσκέδασης στο μήκος κύματος εκπομπής.

$$\begin{split} \beta_{p}(r) &= -\beta_{m}(\lambda, z) \\ &+ \left[\beta_{p}(\lambda, z_{0}) + \beta_{m}(\lambda, z_{0})\right] \times \frac{P(\lambda_{Raman}, z_{0})P(\lambda, z)N_{N_{2}}(z)}{P(\lambda, z_{0})P(\lambda_{Raman}, z)N_{N_{2}}(z_{0})} \\ &\times \frac{exp\left\{-\int_{z_{0}}^{z} \left[a_{p}(\lambda_{Raman}, z) + a_{m}(\lambda_{Raman}, z)\right]dz\right\}}{exp\left\{-\int_{z_{0}}^{z} \left[a_{p}(\lambda, z) + a_{m}(\lambda, z)\right]dz\right\}} \end{split}$$

Με κριτήριο τον φυσικό μηχανισμό αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας – ατμοσφαιρικών συστατικών (όπως η σκέδαση Rayleigh, σκέδαση Mie, σκέδαση Raman από τα ατμοσφαιρικά μόρια, η σκέδαση συντονισμού, ο φθορισμός, η διαφορική απορρόφηση από τα μόρια της ατμόσφαιρας, καθώς και η σκέδαση της πολωμένης ακτινοβολίας laser με αλλαγή της διεύθυνσης πόλωσης) αναπτύχθηκαν διαφορετικές τεχνικές LIDAR για την πραγματοποίηση μετρήσεων. Τα συστήματα lidar είναι δυνατόν να καταταχθούν στις επιμέρους κατηγορίες που περιγράφονται παρακάτω Εικόνα 2-3:



Εικόνα 2-3 Διάφοροι τύποι συστημάτων lidar, αναφορικά με το αντικείμενο μελέτης και την αντίστοιχη φυσική διαδικασία (Weitkamp, 2005).

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήσαμε προϊόντα από μετρήσεις από τρία συστήματα lidar. To lidar EOLE (aErozol and Ozon Lidar systEm) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ), το PollyXT (Portable Raman lidar - next generation) lidar του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και το CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) lidar της NASA. Στις επόμενες ενότητες περιγράφονται τα συστήματα που χρησιμοποιούμε.

2.2 LIDAR Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (EOLE Raman Lidar)

Η διάταξη lidar EOLE του Εργαστηρίου Laser και Εφαρμογών τους, του Τομέα Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών (ΣΕΜΦΕ) του ΕΜΠ αρχικά σχεδιάστηκε, αναπτύχθηκε και εγκαταστάθηκε το 1999 από τον Καθηγητή ΕΜΠ Αλέξανδρο Παπαγιάννη (Papayannis et al., 1999; Εικόνα 2-4). Το EOLE Raman Lidar είναι ένα σύστημα lidar 8-μηκών κύματος που χρησιμοποιείται για συνεχείς μετρήσεις αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας, υδρατμών στο κατώτερο στρώμα της τροπόσφαιρας ή αλλιώς Planetary Boundary Layer (PBL) και στην ελεύθερη τροπόσφαιρα (0,3-15 km). Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του περιγράφονται στον πίνακα 2-1 παρακάτω.

Χαρακτηριστικά του EOLE lidar	
Laser:	pulsed Nd: YAG
Αριθμός καναλιών:	8
Μήκη κύματος:	355 nm, 532 nm, 1064 nm
Ενέργεια Παλμού:	75 mJ (355 nm), 130 mJ (532 nm), 140 mJ (1064 nm)
Συχνότητα επανάληψης:	10 Hz
Κανάλια ανίχνευσης:	355 nm, 355 (cross) nm, 387 nm, 407 nm, 532 nm,
	532 (cross) nm, 607 nm, 1064 nm
Τηλεσκόπιο Δέκτης 1:	300 mm diameter
Τηλεσκόπιο Δέκτης 2:	200 mm diameter

Πίνακας 2-1



Εικόνα 2-4 Φωτογραφία του συστήματος Lidar EOLE στο κτίριο Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του ΕΜΠ (Πηγή: <u>http://lrsu.physics.ntua.gr/en/content/eole-</u> <u>raman-lidar</u>)

Το σύστημα εκπέμπει ταυτόχρονα στα 355 nm, 532 nm και 1064 nm, με ενέργεια παλμού στα 75, 130 και 140 mJ αντίστοιχα με συχνότητα επανάληψης 10Hz. H ανίχνευση των σημάτων του lidar γίνεται από ένα τηλεσκόπιο 300 mm οπτικού βάθους f = 600mm στα 355, 387, 532, 607 και 1064 nm και τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του συντελεστή οπισθοσκέδασης (backscatter) των αιωρούμενων σωματιδίων (στα 355, 532 και 1064 nm), του συντελεστή εξασθένησης (extinction) (στα 355 και 532 nm) και των κατακόρυφων κατανομών του εκθέτη Ångström. Παράλληλα το κανάλι των 407 nm χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της κατακόρυφης κατανομής της αναλογίας ανάμιξης υδρατμών (water

vapor) (Mamouri et al., 2007; Papayannis et al., 2012). Ένα τηλεσκόπιο 200mm χρησιμοποιείται για την ανίχνευση των δια- και συν-πολωμένων σημάτων lidar στα 355 nm και 532 nm για τον υπολογισμό του γραμμικού λόγου αποπόλωσης των σωματιδίων. Η τεχνική βαθμονόμησης που εφαρμόζεται για τις αποπολωμένες μετρήσεις των αιωρούμενων σωματιδίων είναι η τεχνική βαθμονόμησης ±45°, που παρουσιάστηκε από Freundenthaler et al. (2009). Η πλήρης αλληλοεπικάλυψη (overlap) του συστήματος είναι της τάξης των 500 m.

To σύστημα EOLE είναι μέρος του δικτύου EARLINET (European Aerosol Research Lidar Network; <u>www.earlinet.org</u>) και του δικτύου ACTRIS (European Research Infrastructure for the observation of Aerosol, Clouds and Trace Gases; <u>www.actris.eu</u>). Οι μετρήσεις που συλλέγονται από το EOLE από το 2000 μέχρι και σήμερα είναι διαθέσιμες στην επιστημονική κοινότητα μέσω του ACTRIS data portal (<u>https://actris.nilu.no/</u>). (Papayannis et. al., Annales Geophysicae (2009), Amodeo et. Al., EPJ Web of Conferences, (2018), Soupiona et. al., EPJ Web of Conferences, (2018))

2.3 LIDAR Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (PollyXT)

Το Lidar του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (35.3377 N, 25.6698 E, 238 m), είναι ένα Raman Lidar με 10 κανάλια. Περιλαμβάνει κανάλια που μετρούν: 3 συντελεστές οπισθοσκέδασης (backscatter) 355nm, 532nm, 1064nm , 2 συντελεστές εξασθένησης (extinction) 355 nm, 532 nm , 2 συντελεστές αποπόλωσης (depolarization) 355 nm, 532 nm, 2 κανάλια για κοντινής εμβέλειας (near range) μετρήσεις 355 nm, 532 nm και 1 κανάλι υδρατμών (water vapor) 407 nm (Πίνακας 2-2). Το PollyXT NOA Lidar στεγάζεται μέσα σε ένα κοντέινερ ώστε να είναι προφυλαγμένο από τις διάφορες καιρικές συνθήκες. Η οπτική διάταξη του lidar περιγράφεται στην Εικόνα 2-5. Η αλληλοεπικάλυψη του συστήματος (overlap) είναι της τάξης των 500m (far range) και 100m (near range) όπως περιγράφεται και στην Εικόνα 2-6.

Χαρακτηριστικά του PollyXT lidar		
Laser:	Nd: YAG, Q-Switched, DPSS	
Αριθμός καναλιών:	10	
Μήκος κύματος:	355, 532, 1064 nm	
Ενέργεια Παλμού:	180 mJ (1064 nm), 110 mJ (532 nm), 60 mJ (355 nm)	
Συχνότητα επανάληψης:	20 <u>Hz</u>	
Τηλεσκόπιο Δέκτης Far Range :	300 mm diameter	
Τηλεσκόπιο Δέκτης Near Range :	50 mm diameter	
Κανάλια ανίχνευσης:	1064 nm, 607 nm, 607 (N/R) nm, 532 nm, 532 (cross)	
	nm , 532 (N/R) nm, 407 nm, 387 nm, 355 nm, 355	
	(cross) nm	
Ανάκτηση σήματος:	600 MHz photon counters	

Πίνακας	2-2
intranuç	~ ~



Εικόνα 2-5 Η οπτική διάταξη του lidar PollyXT. Το πάνω κομμάτι της εικόνας αφορά την κάτοψη της διάταξης ενώ το κάτω κομμάτι την εμπρόσθια όψη της (Πηγή: Engelmannn R. et al.: Raman lidar PollyXT: the neXT generation)



Εικόνα 2-6 Η αλληλοεπικάλυψη (overlap) των far range και near range τηλεσκοπίων του PollyXT NOA lidar είναι της τάξης των 500m και 100m αντίστοιχα (Πηγή : Engelmannn et al., 2017)

Το σύστημα λειτουργεί αυτόνομα και ελέγχεται πλήρως από τον υπολογιστή του με απομακρυσμένη πρόσβαση μέσω Διαδικτύου. Ανήκει στα δίκτυα PollyNET (picasso.tropos.de), EARLINET και ACTRIS. Οι μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την εργασία για την εξακρίβωση του CALIOP lidar συλλέχθηκαν κατά την διάρκεια της επιστημονικής καμπάνιας Pre-TECT (http://pre-tect.space.noa.gr/). Κατά τη διάρκεια της καμπάνιας αυτής η διάταξη lidar βρισκόταν στην Φινοκαλιά της Κρήτης με στόχο την μελέτη του χαρακτηρισμού της ερημικής σκόνης (Εικόνα 2-5). Η ομάδα του ΕΑΑ μας παρείχε τις μετρήσεις του PollyXT lidar που αναφέρονται στο κεφάλαιο 3.



Εικόνα 2-7 Φωτογραφία του σταθμού της Φινοκαλιάς κατά τη διάρκεια της πειραματικής καμπάνιας Pre-TECT (Πηγή: <u>http://pre-tect.space.noa.gr/</u>)

Κατα την διάρκεια εκπόνηση αυτής της εργασίας, το PollyXT lidar μεταφέρθηκε και βρίσκεται πλέον στο Παρατηρητήριο Γεωεπιστημών και Κλιματικής Αλλαγής Αντικυθήρων (PANGEA/Εικόνα 2-6) όπου πραγματοποιούνται μετρήσεις υποβάθρου για την ανατολική Μεσόγειο για μεταφορά ρύπων από φυσικές πηγές όπως η θάλασσα, η έρημος της Σαχάρας, οι δασικές πυρκαγιές και η μεταφορά ηφαιστειακής τέφρας (πχ από την Αίτνα), και διασυνοριακής ρύπανσης από μεγάλα αστικά κέντρα της ευρύτερης περιοχής.



Εικόνα 2-8 Το LIDAR PollyXT του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών στο Παρατηρητήριο Γεωεπιστημών και Κλιματικής Αλλαγής των Αντικυθήρων (PANGEA) κατά τη διάρκεια βραδινών μετρήσεων (Πηγή: <u>https://react.space.noa.gr/</u>)

2.4 Μετρήσεις από τον δορυφόρο CALIPSO

Από την εκτόξευση του δορυφόρου Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO; Winker et al., 2009) τον Ιούνιο του 2006, παρέχονται στην επιστημονική κοινότητα κατακόρυφες κατανομές των παγκοσμίων αερολυμάτων και νεφών μέσω της ανάλυσης των παρατηρήσεων οπισθοσκέδασης του CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) οργάνου στα μήκη κύματος 532 και 1064nm. Ο δορυφόρος εκτοξεύτηκε σε τροχιά γύρω από τη Γη, ως μέρος του "A-train", ενός συμπλέγματος δορυφόρων που παρατηρούν τη Γη (Εικόνα 2-9).

Το CALIOP παρατηρεί την ατμόσφαιρα από πάνω προς τα κάτω και ανιχνεύει την κάθετη ατμοσφαιρική δομή και τα στρώματα των νέφος και των αερολυμάτων. Για τις παρατηρήσεις των αερολυμάτων, μια επιπλέον διάκριση σε έξι υποκατηγορίες (σκόνη, θαλάσσια αερολύματα, καπνός, ρυπασμένη σκόνη, ρυπασμένη ηπειρωτική και βασισμένη καθαρή ηπειρωτική) γίνεται στο layer-integrated-attenuated οπισθοσκέδαση και κατά προσέγγιση αναλογία αποπόλωσης σωματιδίων, καθώς και στην τοποθεσία της μέτρησης. Οι αλγόριθμοι του CALIPSO υπολογίζουν την αερολυμάτων και τους συντελεστές εξασθένηση των οπισθοσκέδασης χρησιμοποιώντας ένα πίνακα αναζήτησης για τους έξι τύπους των αερολυμάτων έτσι ώστε να καθορίζεται το Lidar Ratio που εξαρτάται από τον τύπο των αερολυμάτων. Τα Lidar Ratio υπολογίζονται από εκτιμήσεις σκέδασης βασισμένες στον ορισμό των τυπικών κατανομών μεγέθους και των δεικτών διάθλασης για κάθε τύπο αερολύματος, που αντλούνται κυρίως από την ανάλυση των παρατηρήσεων του Aerosol Robotic Network (AERONET) (Omar et al., 2009).



Εικόνα 2-9 Ο δορυφόρος CALIPSO μέρος του " Α-train " συμπλέγματος δορυφόρων που παρατηρούν τη Γη. (Πηγή: NASA <u>https://atrain.nasa.gov/</u>)

Ο δορυφόρος CALIPSO διαθέτει τρία όργανα, το CALIOP Lidar, μία κάμερα ευρέως πεδίου (Wide Field Camera) και ένα ραδιόμετρο που μετρά την περιοχή του θερμικού υπέρυθρου (Imaging Infrared Radiometer – IRR).

Το CALIOP (Εικόνα 2-10) είναι ένα Lidar διπλού μήκους κύματος πολωμένης ακτινοβολίας που παρέχει υψηλής ανάλυσης κατακόρυφες κατανομές των αιωρούμενων σωματιδίων και των νεφών. Χρησιμοποιεί τρία κανάλια ανίχνευσης: δύο μέτρησης έντασης της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας στα 532 και 1064nm και ένα μέτρησης της ορθογώνιας πολωμένης οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας στα 532 και 2532nm. Ο δέκτης είναι ένα τηλεσκόπιο 1 μέτρου σε διάμετρο. Αναλυτικότερα τα χαρακτηριστικά του συστήματος δίνονται στον Πίνακα 2-3.



Εικόνα 2-10 Φωτογραφία του οργάνου CALIOP (Πηγή: <u>https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/calipso</u>)

Πίνακας 2-3

Χαρακτηριστικά του CALIOP lidar	
Laser:	Nd: YAG, diode-pumped, Q-switched, frequency
	doubled
Μήκη κύματος:	532 nm, 1064 nm
Ενέργεια Παλμού:	110 mJ/channel
Συχνότητα επανάληψης:	20.25 Hz
Τηλεσκόπιο Δέκτης :	1.0 m diameter
Πόλωση:	532 nm
Αποτύπωμα/FOV:	100 m/ 130 μrad

Κάθετη Ανάλυση:	30-60 m	
Οριζόντια Ανάλυση:	333 m	
Γραμμική δυναμική εμβέλεια:	22 bits	
Ρυθμός δεδομένων:	316 kbps	

Η Wide Field Camera (WFC; Εικόνα 2-11) είναι μια τροποποιημένη έκδοση της εμπορικής κάμερας παρακολούθησης αστεριών Ball Aerosopace CT-633. Πρόκειται για ένα σταθερό, με προσανατολισμό στο ναδίρ απεικονιστή με ένα φασματικό κανάλι που καλύπτει την περιοχή 620-670nm και έχει επιλεγεί για να ταιριάζει με τη ζώνη 1 του οργάνου MODIS (Moderate resolution Imaging Spectroradiometer) στον δορυφόρο Aqua. Αναλυτικότερα τα χαρακτηριστικά της κάμερας δίνονται στον Πινακα 2-4.



Εικόνα 2-11 Φωτογραφία της Wide Field Camera του δορυφόρου CALIOP (Πηγή: <u>https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/calipso</u>)

Πίνακας	2-4
---------	-----

Χαρακτηριστικά της WFC	
Μήκος κύματος:	645 nm
Φασματικό εύρος ζώνης:	50 m
IFOV/swath:	125 m/61 km
Ρυθμός δεδομένων:	26 kbps

To Imaging Infrared Radiometer (IIR, Εικόνα 2-12) είναι ένα ραδιόμετρο με τρία κανάλια στο υπέρυθρο, προσανατολισμένο στο ναδίρ, με 64 km x 64 km ζώνη απεικόνισης με μέγεθος pixel 1 km. Η δέσμη CALIOP ευθυγραμμίζεται με το κέντρο της εικόνας του IIR. Το όργανο χρησιμοποιεί μια μόνο διάταξη ανιχνευτή μικροβολόμετρου, με περιστρεφόμενο τροχό φίλτρου που παρέχει μετρήσεις σε τρία κανάλια στην περιοχή του θερμικού υπέρυθρου παραθύρου στα 8,7 mm, 10,5 mm και 12,0 mm. Αυτά τα μήκη κύματος επιλέχθηκαν για να βελτιστοποιήσουν τις κοινές

ανακτήσεις των CALIOP / IIR της εκπομπής των νεφών cirrus και του μεγέθους των σωματιδίων. Αναλυτικότερα τα χαρακτηριστικά του ραδιόμετρου δίνονται στον Πίνακα 2-5.



Εικόνα 2-12 Φωτογραφία του οργάνου IRR (Πηγή: <u>https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/calipso</u>)

Πίνακας 2-5

Χαρακτηριστικά του IIR		
Μήκη κύματος:	8.65 μm, 10.6 μm, 12.0 μm	
Φασματική ανάλυση:	0.6 μm - 1.0 μm	
IFOV/swath:	1 km/64 km	
NETD at 210K:	0.3	
Βαθμονόμηση:	+/- 1 K	
Ρυθμός Δεδομένων:	44 kbps	

2.4.1 ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΤΟΥ ΔΟΡΥΦΟΡΟΥ CALIPSO

Τα προϊόντα του δορυφόρου CALIPSO περιλαμβάνουν τα παρακάτω:

- Συντελεστής Εκπομπής (Emissivity)
- Ιδιότητες νεφών (Cloud properties)
- Υπέρυθρη Ακτινοβολία (Infrared Radiance)
- Ολοκλήρωμα του Συντελεστή Οπισθοσκέδασης (Integrated Attenuated Backscatter)
- Κατακόρυφη κατανομή του λόγου αποπόλωσης (Lidar Depolarization Ratio)
- Θερμοκρασία Μέσου στρώματος Νεφών (Cloud Midlayer Temperature)

- Μέγιστο Ύψος Νεφών (Cloud Top Height)
- Ανακλαστικότητα Στήλης (Column Reflectance)
- Ύψος βάσης νεφών (Cloud Base Height)
- Κάθετος τύπος μάσκας (Vertical Feature Mask)
- Ιδιότητες αερολυμάτων (Aerosol Particle Properties)
- Τύπος νεφών (Cloud Type)
- Φάση σωματιδίων νεφών (Cloud Particle Phase)



Εικόνα 2-13 Παράδειγμα δεδομένων CALIPSO τον Ιούνιο του 2006, κατά την πρώτη ημέρα λειτουργίας του, σε μια τροχιά πάνω από ανατολική Ασία, Ινδονησία και Αυστραλία (Πηγή: <u>https://www-</u> <u>calipso.larc.nasa.gov/products/</u>)

Έκτοτε τα δεδομένα του CALIPSO χρησιμοποιήθηκαν για την συλλογή πάνω από 5.7 δισεκατομμυρίων μετρήσεων. Κάποιοι από τους τρόπους με τους οποίους οι μετρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν για την βελτιστοποίηση της κατανόησή μας για την ατμοσφαιρικά είναι οι εξής:

 Κατά τη διάρκεια της αποστολής Tropical Composition, Cloud and Climate Coupling της NASA το 2007, ο CALIPSO βοήθησε στην οπτικοποίηση του κύκλου ζωής των νεφών cirrus που ρέουν από τις κορυφές των συστημάτων καταιγίδων που σχηματίζονται πάνω από ζεστούς τροπικούς ωκεανούς.

 Ο CALIPSO μας έχει δώσει εικόνες της κάθετης κατανομής νεφών σε τροπικούς κυκλώνες, όπως τον τυφώνα Choi-Wan, που δημιουργήθηκε στον Ειρηνικό Ωκεανό το 2009.

Την άνοιξη του 2010, CALIPSO έδωσε μία πρωτοφανή εικόνα σε ένα γιγαντιαίο πλούμιο σκόνης, καπνού και ατμού που εκτοξεύθηκε από την έκρηξη του ηφαιστείου της Ισλανδίας Eyjafjallajokull και σταμάτησε την εναέρια κυκλοφορία πάνω από τον Ατλαντικό και σε αρκετά μέρη της Ευρώπης.

 Ο CALIPSO βοήθησε τους ερευνητές να ποσοτικοποιήσουν σε τρείς διαστάσεις τον τρόπο με τον οποίο ισχυροί άνεμοι που σαρώνουν την έρημο Σαχάρα μεταφέρουν σκόνη πάνω από τον Ατλαντικό Ωκεανό έως τα τροπικά δάση της Νότιας Αμερικής.

2.4.2 CALIPSO V4 Lidar Level 2: Οι αλλαγές σε σχέση με την V3

Η έκδοση (version) 4.10 (V4) είναι η πρώτη εξ ολοκλήρου καινούργια έκδοση του CALIPSO lidar level 2 data products από την αρχική έκδοσή της, την Version 3 (V3) σειρά

το Μάιο 2010. Όπως είναι αναμενόμενο, η Version 4 παρέχει σημαντικό πλεονέκτημα ως προς την V3. Στην version αυτή έχουν γίνει πολλές βελτιώσεις, έτσι ώστε να εξαλειφθούν παλαιότερα προβλήματα των προϊόντων του CALIPSO, για να αυξηθεί η ακρίβεια των επιστημονικών δεδομένων και παράλληλα να μειωθούν οι αβεβαιότητες των προϊόντων. Οι σημαντικότερες αλλαγές που έχουν γίνει στον κώδικα, στον αλγόριθμο και στα προϊόντα δεδομένων περιλαμβάνουν:

Δημιουργία αυτόνομου αλγόριθμου ανίχνευσης επιφάνειας

 Αναθεωρημένες συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας (PDFs) για τον αλγόριθμο διαχωρισμού των αερολυμάτων νεφών (cloud aerosol discrimination - CAD)

Εφαρμογή του CAD αλγόριθμου σε στρώματα ανιχνεύσιμα με ανάλυση ενός
στιγμιότυπου και σε στρώματα που ανιχνεύονται στην στρατόσφαιρα

 Σημαντική αναθεώρηση των αλγορίθμων κατηγοριοποίησης των αερολυμάτων με την οποία διαφορετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για να ταξινομήσουν τα τροποσφαιρικά και τα στρατοσφαιρικά αερολύματα

• Βελτιωμένη κατηγοριοποίηση νεφών και του υπολογισμού της παραμέτρου της κατάστασης πάγου-νερού (ice-water phase)

 Θερμικά εξαρτώμενος προσδιορισμός των πολλαπλών παραγόντων σκέδασης των σύννεφων πάγου

 Πολλαπλοί παράγοντες σκέδασης για αδιαφανή σύννεφα νερού που προέρχονται από τον μετρήσιμο λόγο αποπόλωσης

Αναθεωρημένο προϊόν εξασθένησης στα αδιαφανή στρώματα: βελτιωμένες
εκτιμήσεις αβεβαιότητας και αναλυτικότερες αναφορές διασφάλισης ποιότητας για
όλα τα προϊόντα εξασθένησης

 Νέο αλγόριθμο για την περιεκτικότητα πάγου-νερού με χρήση του προϊόντος εξασθένησης του CALIPSO

 Δημιουργία ενός νέου προϊόντος στο οποίο καταγράφεται συγχωνευμένη η πληροφορία για τα στρώματα των αερολυμάτων και των νεφών (σε 5 km ανάλυση)

Προσθήκη νέων παραμέτρων στα αρχεία δεδομένων

Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά οι αλλαγές αυτές.

Επαναπροσδιορισμός της επιφάνειας της Γης

Στις προηγούμενες Version του CALIPSO level 2 (L2) προϊόντων δεδομένων, το υψόμετρο από την επιφάνεια της Γης προσδιοριζόταν αναζητώντας ένα σήμα σημαντικά πιο μεγάλο από το σήμα οπισθοσκέδασης που αναμένεται από την μοριακή ατμόσφαιρα. Σε γενικές γραμμές αυτή η προσέγγιση λειτουργεί σωστά. Ωστόσο, σε πολυστρωματικές καταστάσεις και/ή σε ατμόσφαιρα υψηλής θολότητας η αποτελεσματικότητα της τεχνικής μπορεί να υποβιβαστεί και να περιοριστεί η ικανότητα να ανιχνευτούν επιστροφές σήματος από την επιφάνεια. Στα προϊόντα δεδομένων της V4, η ανίχνευση της επιφάνεια της Γης επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας καινούργιας ρουτίνας βασιζόμενη στον αλγόριθμο εύρεσης μεγίστου στην παράγωγο του σήματος. Η καινούργια τεχνική παρουσιάζει σημαντική βελτίωση σε καταστάσεις
υψηλής θολότητας ενώ διατηρεί την ίδια ακρίβεια με μερική βελτίωση των αποτελεσμάτων σε ανέφελες συνθήκες. Σαν αποτέλεσμα, υπάρχουν λιγότερα αδιαφανή στρώματα που αναγνωρίζονται στην V4 απ' ότι στην V3, ειδικά τη νύχτα, και περισσότερα στρώματα αερολυμάτων και νεφών, και η V4 έχει περισσότερες ανιχνεύσεις επιφάνειας από την V3. Η δύναμη του σήματος σε αυτές τις περιοχές που δεν είχαν αναγνωριστεί παλαιότερα είναι σχετικά χαμηλή και για το λόγο αυτό πολλά από αυτά τα νεο-ανιχνεύσιμα στρώματα θα έχουν χαμηλό CAD score. Όσον αφορά τις παραμέτρους στα L2 αρχεία, οι παράμετροι "Lidar Surface Elevation" και "Surface Elevation Detection Frequency" που υπήρχαν στα προϊόντα δεδομένων V3 έχουν διακοπεί στο V4. Αντ' αυτού, οι πληροφορίες ανίχνευσης επιφάνειας καταγράφονται με μια πολυπαραμετρική ανίχνευση VGroup Lidar. Επιπρόσθετα με την κατάσταση ανίχνευσης επιφάνειας (δηλ. ανιχνευθείσα ή μη ανιχνευθείσα) και την πληροφορία και στα 1064 nm:

μέγιστο και ελάχιστο ύψος της επιφάνειας

ολοκλήρωμα του εξασθενημένου συντελεστή οπισθοσκέδασης (attenuated backscatter)

ολοκλήρωμα του λόγου του όγκου αποπόλωσης (volume depolarization ratio)

ολοκλήρωμα του λόγου εξασθένησης χρώματος (attenuated color ratio) Αυτές οι πρόσθετες παράμετροι αναμένεται να δώσουν νέες γνώσεις σχετικά με τον τύπο επιφάνειας (π.χ. διαχωρισμός μεταξύ πάγου, υγρού ύδατος και γης) και, για μετρήσεις σε ωκεανούς, το συνολικό οπτικό βάθος στήλης στα 532 nm και στα 1064 nm.

Ανίχνευση Στρωμάτων Νεφών και Αιωρούμενων Σωματιδίων (Cloud and Aerosol Layer Detection)

Τα δεδομένα CALIOP V4 level 1 (L1), τα οποία κυκλοφόρησαν για πρώτη φορά τον Απρίλιο του 2014, βελτίωσαν σημαντικά τη βαθμονόμηση του συντελεστή οπισθοσκέδασης του CALIOP στα 532 nm και ειδικά στα 1064 nm. Συγκεκριμένα, οι συντελεστές βαθμονόμησης στα 532 nm μειώθηκαν κατά ~ 3% έως ~ 8%, ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και την εποχή, με αποτέλεσμα την ταυτόχρονη αύξηση των συντελεστών εξασθένησης της οπισθοσκέδασης των 532 nm. Αυτή η αύξηση στο μέγεθος της οπισθοσκέδασης μεταφράζεται απευθείας σε μια ελαφρώς μεγαλύτερη συχνότητα ανίχνευσης στρώματος. Όταν συνδυάζεται με τις αυξήσεις ανίχνευσης στρώματος που λαμβάνονται από το νέο αλγόριθμο ανίχνευσης επιφάνειας, τα προϊόντα δεδομένων V4 δείχνουν αύξηση ~ 5% σε σχέση με το V3.

Διαχωρισμός Νεφών και Αιωρούμενων Σωματιδίων (Cloud Aerosol Discrimination - CAD)

Το μέγεθος των αλλαγών βαθμονόμησης που εισήχθησαν στα δεδομένα CALIPSO V4 L1 επέβαλε σημαντικές αναθεωρήσεις στον αλγόριθμο CAD V3 level 2 (L2). Κατά συνέπεια, ένα νέο σύνολο CAD συναρτήσεων κατανομής πιθανότητας (PDF) αναπτύχθηκαν και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία των δεδομένων V4 L2. Τα V4 CAD PDF's είναι 5-διαστάσεων, με αυξημένο γεωγραφικό πλάτος (διαστήματα 5° έναντι 10° σε σχέση με τη V3) η οποία οδήγησε σε συνολική βελτίωση της αξιοπιστίας του CAD. Τα αναθεωρημένα PDFs σχεδιάστηκαν ειδικά για να είναι πιο ευαίσθητα στην παρουσία υπερυψωμένων αερολυμάτων. Κατά συνέπεια, τα προϊόντα δεδομένων V4 παρουσιάζουν σημαντικές βελτιώσεις στην ταξινόμηση των πλούμιων καπνού μεγάλου υψομέτρου και των Ασιατικών στρωμάτων σκόνης, τα οποία σε παλαιότερες εκδόσεις ήταν συχνά ταξινομημένα ως σύννεφα cirrus. Η εφαρμογή του αλγορίθμου CAD V4 διαφέρει από τις προηγούμενες εκδόσεις σε αυτά τα σημαντικά σημεία:

Στο V3 και σε παλαιότερες εκδόσεις, ο αλγόριθμος CAD εφαρμόστηκε μόνο σε τροποσφαιρικά στρώματα, και τα στρώματα που ανιχνεύθηκαν πάνω από την τροπόπαυση ταξινομήθηκαν ως "στρατοσφαιρικό". Στο V4 ο τύπος χαρακτηριστικών "στρατοσφαιρικό" έχει εξαλειφθεί. Στη θέση του, ο αλγόριθμος CAD εφαρμόζεται παντού, σε όλα τα επίπεδα που ανιχνεύονται. Οι τιμές CAD για στρατοσφαιρικά σύννεφα και αερολύματα είναι γενικά ισχυρές μέσα σε λίγα χιλιόμετρα από την τροπόπαυση. Ωστόσο, σε πολύ μεγάλα υψόμετρα, η γενική έλλειψη διαθέσιμων δειγμάτων που διατίθενται για το σετ εκπαίδευσης καθώς και η πτώση του signal to noise ratio (SNR) μπορεί να επηρεάσει την αξιοπιστία του CAD. Για εις βάθος επιστημονικές αναλύσεις πολικών στρατοσφαιρικών νεφών (PSCs), συνιστάται στους χρήστες να χρησιμοποιούν τα ειδικά προϊόντα PSC του CALIPSO. Για τις λιγότερο απαιτητικές εφαρμογές, τα PSC αναφέρονται επίσης στα προϊόντα δεδομένων L2. Ενώ ο αλγόριθμος V4 CAD ταξινομεί την πλειοψηφία των πολικών στρατοσφαιρικών στρωμάτων ως σύννεφα, εντοπίζονται επίσης και ορισμένα στρώματα αερολυμάτων.

Σε αντίθεση με την V3, ο αλγόριθμος V4 CAD εφαρμόζεται επίσης σε εκείνα τα στρώματα έντονης σκέδασης που μπορούν να ανιχνευθούν με ανάλυση ενός στιγμιότυπου (333 m). Στο παρελθόν αυτά τα στρώματα ταξινομήθηκαν ως σύννεφα από προεπιλογή και απομακρύνθηκαν συστηματικά πριν από τη μέση τιμή των αδύναμων σημάτων. Στην V4, τα στρώματα που ανιχνεύονται σε ανάλυση μιας λήψης που ταξινομούνται ως αιωρούμενα σωματίδια δεν αφαιρούνται πλέον από τους μέσους όρους μεγαλύτερης ανάλυσης και επομένως αναμένεται να αυξήσει τα μέγιστα οπτικά βάθη των αιωρούμενων σωματιδίων στις περιοχές όπου εμφανίζονται. Ο κύριος όγκος των ανιχνεύσεων στα 333 m που ταξινομούνται ως αερολύματα στο V4, βρίσκονται στην περιοχή της ζώνης σκόνης του πλανήτη. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι οι οπτικές ιδιότητες αυτών των στρωμάτων δεν χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του V4 CAD PDFs, τα οποία ενδέχεται να επηρεάσουν τη συνολική απόδοση CAD κατά την ταξινόμηση των στρώσεων μιας λήψης.

Ενώ ο αλγόριθμος CAD εφαρμόζεται σε όλα τα στρώματα που ανιχνεύονται, υπάρχουν δύο ανώμαλες καταστάσεις όπου τα στρώματα μεταγενέστερα ταξινομούνται

χρησιμοποιώντας πρόσθετη ανάλυση. Το πρώτο συμβαίνει όταν είναι πυκνά πλούμια καπνού εκτείνονται πάνω από stratus και άλλα σύννεφα νερού. Η διαφορική εξασθένηση των σημάτων στα 1064 nm και 532 nm από τον καπνό μπορεί να οδηγήσει σε πολύ υψηλές color ratio (ο λόγος της μέτρησης της οπισθοσκέδασης στα 532 nm και 1064 nm) στα σύννεφα παρακάτω, γεγονός που με τη σειρά του μπορεί να οδηγήσει σε τεχνητά χαμηλές βαθμολογίες CAD. Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι τιμές CAD επανυπολογίζονται. Τόσο οι αρχικές τιμές CAD όσο και οι αναθεωρημένες τιμές CAD καταγράφονται στα προϊόντα στρώματος. Στη δεύτερη περίπτωση, η ομοιότητα των υπογραφών σκέδασης ελαφρών, απομονωμένων στρωμάτων υπερυψωμένης σκόνης και τα ασθενώς αποπολωτικά κομμάτια σύννεφων είναι σε μεγάλο βαθμό δυσδιάκριτα στον τομέα CAD. Για να επιτευχθεί αξιόπιστος διαχωρισμός, εφαρμόζεται μια ακολουθία τεστ χωρικής εγγύτητας για να προσδιοριστούν αυτά τα στρώματα τα οποία μπορεί στην πραγματικότητα να είναι "άκρα/όρια" παλαιότερων σύννεφων πάγου μεγάλης κλίμακας. Στρώματα που έχουν αναγνωριστεί ως "άκρα/όρια cirrus" αποδίδεται ειδική τιμή CAD (= 106).

Τα περισσότερα από τα δείγματα υψηλής εμπιστοσύνης στην V3 ταξινομούνται επίσης ως ο ίδιος τύπος (σύννεφο ή αιωρούμενα σωματίδια) στη V4 με παρόμοια υψηλή εμπιστοσύνη. Εντούτοις, ένα μικρό κλάσμα των στρωμάτων που ταξινομούνται ως σύννεφα στη V3 ταξινομούνται ως αιωρούμενα σωματίδια στη V4. Ορισμένα από αυτά έχουν οπτικές ιδιότητες που ανήκουν στη γκρίζα ζώνη μεταξύ αερολυμάτων και νεφών και μπορεί να είναι πραγματικά λανθασμένα ταξινομημένα σύννεφα. Αυτές οι περιπτώσεις εμφανίζονται συχνότερα στις πολικές περιοχές. Επειδή συνήθως έχουν χαμηλές τιμές CAD μπορούν να εντοπιστούν και να καταργηθούν κατά την κρίση των χρηστών.

Τα V4 PDFS είναι πιο αντιπροσωπευτικά και πιο ρεαλιστικά από τις παλαιότερες εκδόσεις, στις οποίες η συχνότητα εμφάνισης των αερολυμάτων σε υψηλότερα υψόμετρα υποτιμήθηκε αισθητά. Ένα αποτέλεσμα της τροποποίησης των PDFs για να επιτευχθεί ακριβέστερη αναγνώριση αερολυμάτων είναι η μείωση του μεγέθους των τιμών CAD που αναφέρονται στη V4, δηλαδή, το μέσο μέγεθος των τιμών CAD για όλα τα αερολύματα που ανιχνεύονται στο V4 είναι μικρότερο από το μέσο μέγεθος στη V3. Ομοίως, το μέσο μέγεθος των βαθμολογιών του τιμών Cloud CAD είναι χαμηλότερο στη V4 από ό,τι στη V3. Εκ των υστέρων, οι υψηλότερες τιμές CAD στη V3 θα πρέπει να θεωρηθούν υπερβολικά αισιόδοξες. Οι ελαφρώς χαμηλότερες βαθμολογίες V4 παρέχουν τώρα μια πιο ρεαλιστική αξιολόγηση της εμπιστοσύνης κατάταξης CAD.

Αλλαγές στον χαρακτηρισμό των αιωρούμενων σωματιδίων (Aerosol Subtyping Changes)

Πολλές βελτιώσεις στην ταυτοποίηση των αερολυμάτων έχουν υλοποιηθεί στη V4. Η πιο θεμελιώδης αλλαγή είναι ότι τα στρώματα αερολυμάτων ταξινομούνται τώρα είτε ως τροποσφαιρικά αερολύματα είτε ως στρατοσφαιρικά αερολύματα, ανάλογα με τη θέση του κεντροειδούς της εξασθένησης στην οπισθοσκέδασης σε σχέση το αποτέλεσμα της τιμής ύψους της τροπόπαυσης (που δίνεται από το μοντέλο MERRA-2). Σε προηγούμενες εκδόσεις, το αιωρούμενα σωματίδια αναγνωρίζονταν μόνο κάτω από την τροπόπαυση. Δεδομένου ότι ο αλγόριθμος CAD εφαρμόζεται σε όλα τα ύψη στην V4, τα στρώματα αερολύματος που ανιχνεύονται πάνω από την τροπόπαυση ταξινομούνται ως στρατοσφαιρικά αιωρούμενα σωματίδια και ταξινομούνται ως οι τύποι των αερολυμάτων που βρίσκονται συνήθως στη στρατόσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων μεταξύ της V3 και V4 για το διάστημα 2007-2008, κατά την ημέρα και την νύχτα. Φαίνεται ότι πάνω από ηπειρωτικές περιοχές, οι κατηγοριοποιήσεις αερολυμάτων ως elevated smoke έχει ελαττωθεί χάρη στην αύξηση των κατηγοριοποιήσεων polluted continental/smoke σαν συνέπεια του αναθεωρημένου τύπου "elevated". Πάνω από θαλάσσιες περιοχές, ο τύπος αιωρούμενων σωματιδίων dusty marine αντικαθιστά σημαντικό κομμάτι του τύπου polluted dust.



Tropospheric Aerosol Subtype Distribution, 2007-2008

Εικόνα 2-14 Σύγκριση παγκόσμιων κατανομών τροποσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων μεταξύ της V3 και V4 για το διάστημα 2007-2008 (Πηγή: Data Quality Summary for the CALIPSO Version 4.20 Lidar Level 2 Data Products, Release Date: October 10, 2018)

Βελτιώσεις τροποσφαιρικών τύπων αιωρούμενων σωματιδίων:

 Έχει προστεθεί ένας νέος τύπος αερολύματος "dusty marine" όπου αντιστοιχούν σε μείγματα σκόνης και θαλάσσιων αερολυμάτων που αναγνωρίζονται ως μέτρια αποπολωτικά στρώματα αιωρούμενων σωματιδίων που έχουν ως βάση υψόμετρα εντός του θαλάσσιου οριακού στρώματος (που θεωρείται ότι βρίσκεται μέχρι τα 2,5 km). Σε προηγούμενες εκδόσεις αυτά τα στρώματα θα είχαν ταξινομηθεί ως polluted dust. Ο λόγος lidar (lidar ratio) του dusty marine αερολύματος είναι περισσότερο αντιπροσωπευτικό ενός μίγματος σκόνης / θαλάσσιου αερολύματος και είναι κατά 33% μικρότερο από εκείνο της polluted dust. Η γεωγραφική κατανομή των στρωμάτων των dusty marine αερολυμάτων συμφωνεί με τις γνωστές τοποθεσίες της κατακρήμνισης σκόνης στο θαλάσσιο οριακό στρώμα, αν και υπάρχει κάποια ασάφεια στις περιοχές όπου συνυπάρχουν: ανθρωπογενής ρύπανση, σκόνη και θαλάσσιο αερόλυμα. Αυτά τα στρώματα ταξινομούνται συνήθως ως θαλάσσια σκόνη, όμως δεν είναι πάντοτε σαφές εάν πρέπει να οριστούν ως polluted dust.

 Η αναγνώριση και η ονοματολογία του στρώματος καπνού έχει αναθεωρηθεί. Όπως και στις προηγούμενες εκδόσεις, τα υπερυψωμένα μη αποπολωτικά αερολύματα θεωρούνται καπνός που εισάγεται πάνω από το πλανητικό οριακό στρώμα (PBL) εξαιτίας της άνωσης που προκαλείται από την καύση. Ο ορισμός για "ανυψωμένο" αναθεωρείται στην V4 για να σημαίνει στρώματα με κορυφές υψηλότερες από 2,5 χιλιόμετρα πάνω από το επίπεδο του εδάφους. Για λόγους σαφήνειας, η ονοματολογία του τύπου αερολύματος καπνού της V3 αλλάζει σε "elevated smoke" (υπερυψωμένο καπνό). Υπερυψωμένα επίπεδα καπνού που ταξινομήθηκαν λανθασμένα ως θαλάσσια αερολύματα στην V3 τώρα ταξινομούνται σωστά ως υπερυψωμένος καπνός.

 Εντός του Οριακού Ατμοσφαιρικού Στρώματος (PBL), είναι δύσκολο να γίνει διάκριση του καπνού, λόγω καύσης βιομάζας, από τον τύπο polluted continental των αερολυμάτων που προέρχεται από ανθρωπογενή ρύπανση χρησιμοποιώντας μετρήσεις CALIOP. Ως εκ τούτου, η περιγραφή του "polluted continental" τύπου αερολύματος αναθεωρείται σε "polluted continental/smoke" για να διευκρινιστεί ότι μπορεί να υπάρχουν και οι δύο τύποι αερολύματος.

Σε προηγούμενες εκδόσεις, τα αερολύματα που ανιχνεύθηκαν πάνω από χιόνι, πάγο ή την τούντρα κατηγοριοποιήθηκαν ως clean continental ή polluted continental. Δεδομένου ότι υπάρχουν οδοί μεταφοράς για καπνό, σκόνη και άλλων τύπων αερολυμάτων για να φτάσουν στην Αρκτική, η κατάσταση αυτή έχει αφαιρεθεί στην V4 και όλα τα είδη επιτρέπονται. Οι χρήστες προειδοποιούνται να προσεγγίζουν προσεκτικά τους τύπους του αερολύματος που εντοπίζεται στην Ανταρκτική και να ασκούν με σύνεση την ερμηνεία των τύπων αερολύματος στην περιοχή αυτή. Συχνά τα στρώματα αερολύματος στην Ανταρκτική ταξινομούνται ως σκόνη ή ρυπασμένη σκόνη λόγω της ανυψωμένης αποπόλωσης. Παρόλο που οι οδοί μεταφοράς υπάρχουν για να φτάσει η σκόνη στην Ανταρκτική (για παράδειγμα από την Παταγονία), οι χρήστες δεδομένων προειδοποιούν ότι τα στρώματα που ταξινομούνται ως αερολύματος στην πραγματικότητα να είναι λανθασμένα ταξινομημένα σύννεφα ή να φυσάει χιόνι παρά πραγματική σκόνη.

Ο υπολογισμός των εκτιμήσεων του λόγου αποπόλωσης των σωματιδίων
τώρα σωστά αντιστοιχεί στην εξασθένηση του σήματος λόγω των υπερκειμένων

στρωμάτων. Η αλλαγή αυτή μειώνει σημαντικά την υπερβολική αφθονία της ρυπασμένη σκόνης που αναγνωρίζεται στην V3.

Τα lidar ratio των τροποσφαιρικών αερολυμάτων και οι αβεβαιότητες του lidar ratio έχουν βελτιωθεί για τους τύπους των θαλάσσιων σωματιδίων (clean marine), της σκόνης (dust), των ηπειρωτικών σωματιδίων (clean continental) και υπερυψωμένα στρώματα καπνού (elevated smoke), έτσι ώστε να είναι σε συμφωνία με τις τελευταίες παρατηρήσεις της NASA (Langley Airborne High Spectral Resolution Lidar), του EARLINET, του AERONET, του CALIPSO και των συνεργιστικών ανακτήσεων με πολλούς αισθητήρες.

Εισαγωγή νέου τύπου Στρατοσφαιρικών Αιωρούμενων Σωματιδίων (Stratospheric aerosol subtypes introduced)

Τύποι στρατοσφαιρικών αερολυμάτων έχουν εισαχθεί στην V4 για σκόνη (ash), θειικά/άλλα (sulphate/other), καπνό (smoke) και πολικά (polar) στρατοσφαιρικά αερολύματα. Ο αλγόριθμος των τύπων των στρατοσφαιρικών αερολυμάτων ανταποκρίνεται ικανοποιητικά προσδιορίζοντας την ηφαιστειακή σκόνη και το θειικό άλας πάνω από την τροπόπαυση βασισμένο σε μη αυτοματοποιημένη επαλήθευση. Κάτω από την τροπόπαυση, σκόνη και θειικά πλούμια δίνουν τροποσφαιρικούς τύπους αερολυμάτων: η ηφαιστειακή σκόνη συχνά ταξινομείται ως σκόνη ή ρυπασμένη σκόνη (polluted dust) και το ηφαιστειακό θειικό στρώμα συχνά ταξινομείται ως υπερυψωμένος καπνός. Ως αποτέλεσμα, τα συνεχόμενα χαρακτηριστικά των αερολυμάτων που διασχίζουν την τροπόπαυση να έχουν τύπους αερολυμάτων που μετατρέπονται από τροποσφαιρικά σε στρατοσφαιρικά, ανάλογα με τη σχέση του ύψους του κεντροειδούς της του στρώματος που προσδιορίζεται από τον εντοπισμό των χαρακτηριστικών και το υψόμετρο της τροπόπαυσης. Τα ασθενή διασκορπισμένα στρώματα στρατοσφαιρικών αερολυμάτων που δεν ταξινομούνται ως πολικά στρατοσφαιρικά αερολύματα ταξινομούνται ως "θειικά/άλλα". Επομένως, τα στρώματα που είναι, στην πραγματικότητα σκόνη και/ή καπνός θα μπορούσαν να ταξινομηθούν λανθασμένα ως "θειικά/άλλα" αν είναι ασθενώς διασκορπισμένα (στρώμα με ολοκληρωμένη εξασθενημένη οπισθοσκέδαση λιγότερο από 0.001 sr^(-1))

Αλλαγές στον χαρακτηρισμό των Νεφών (Cloud Subtyping Changes)

Ο αλγόριθμος CALIPSO για τύπους νεφών χρησιμοποιεί την πίεση στην κορυφή του νέφους, την αδιαφάνεια του νέφους και το κλάσμα νέφους για τον χαρακτηρισμό οκτώ τύπων νεφών. Ένα σφάλμα στον κώδικα ανάλυσης της V3 προκάλεσε μια συστηματική υποτίμηση όλων των κατηγοριών των αδιαφανών νεφών. Αυτό το ελάττωμα έχει διορθωθεί στην V4, και επομένως, σε σχέση με την V3, τα προϊόντα δεδομένων της V4 δείχνουν μεγάλη αύξηση στην συχνότητα εμφάνισης χαμηλών αδιάφανων τύπων νεφών και αντίστοιχη μείωση των χαμηλών διαφανών νεφών.

Αλλαγή στην διάκριση Φάσης Νερού-Πάγου στα νέφη (Cloud Ice-Water Phase Discrimination Changes)

Τα στρώματα που ταυτοποιούνται ως νέφη από τον αλγόριθμο CAD ταξινομούνται περαιτέρω σύμφωνα με τη θερμοδυναμική κατάσταση ως νερό, τυχαία προσανατολισμένος πάγος (randomly oriented ice ROI), οριζόντια προσανατολισμένος πάγος (horizontally oriented ice - HOI) ή άγνωστη φάση. Ο αλγόριθμος φάσης χρησιμοποιεί κατά κύριο λόγο έναν αντικειμενικό αλγόριθμο ταξινόμησης βασισμένο στη ομαδοποίηση των σχέσεων μεταξύ του ολοκληρωμένου συντελεστή εξασθενημένης οπισθοσκέδασης (integrated attenuated backscatter - IAB) και του μέσου στρώματος αποπόλωσης. Αυτή η τεχνική βασίζεται σε θεμελιώδεις μετρήσεις CALIOP L1, και στην V4 προσδιορίζει με βεβαιότητα τη θερμοδυναμική φάση των νεφών (πάγος έναντι νερού) τουλάχιστον σε 75% των περιπτώσεων σε παγκόσμιο επίπεδο (σε >75% των περιπτώσεων όταν ο δορυφόρος ήταν σε 0,3° κλίση (πριν τις 28 Νοεμβρίου 2007) και σε > 85 % των περιπτώσεων όταν ο δορυφόρος ήταν σε 3° κλίση (μετά τις 28 Νοέμβρη 2007)) .

Στις 28 Νοεμβρίου 2007, η αρχική γωνία θέασης του CALIOP μεταβλήθηκε μόνιμα σε 3°, για την καταστολή των κατοπτρικών ανακλάσεων από τις εξαγωνικές πλάκες. Αυτές οι πλάκες, όταν είναι κάθετα προσανατολισμένες ως προς τη δέσμη λέιζερ, προκαλούν κατοπτρικές αντανακλάσεις με ουσιαστικά μηδενική αποπόλωση. Ο V3 αλγόριθμος φάσης περιλάμβανε ένα σχήμα για την αναγνώριση του HOI που επισήμανε πολλές περιπτώσεις αυτών των νεφών πάγου. Συγκρίσεις του ναδίρ της V3 και δεδομένων από 3° κλίση κατέληξαν ότι πολύ λίγες πραγματικές κατοπτρικές αντανακλάσεις εμφανίστηκαν στα δεδομένα κλίσης, και έτσι ο έλεγχος HOI των νεφών πάγου που αρχικά αναγνωρίστηκαν ως ROI εξαλείφθηκαν, έτσι ώστε στον αλγόριθμο φάσης της V4 μόνο σύννεφα νερού που παρατηρούνται στο ναδίρ εξετάζονται. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι νέφη που αποτελούνται κυρίως από ROI μπορεί επίσης να έχουν νερό ή HOI που εμφανίζονται σε θερμότερες θερμοκρασίες στο κάτω μέρος του στρώματος και αυτά ταυτοποιούνται πλέον από την κυρίαρχη φάση των σωματιδίων του νέφους, η οποία είναι ROI. Στην Εικόνα 2-15 φαίνεται η κατανομή των τύπων νεφών στην V3 (πορτοκαλί χρώμα) και V4 (πράσινο χρώμα) για όλα τα στρώματα που ανιχνεύονται με χωρική ανάλυση 5 km κατά τη διάρκεια του Μαΐου 2008.



Εικόνα 2-15 Κατανομή τύπων νεφών στην V3 (πορτοκαλί χρώμα) και V4 (πράσινο χρώμα) για όλα τα στρώματα που ανιχνεύονται με χωρική ανάλυση 5 km κατά τη διάρκεια του Μαΐου 2008 (Πηγή: Data Quality Summary for the CALIPSO Version 4.20 Lidar Level 2 Data Products, Data Release Date: October 10, 2018)

Στην V4, μεταξύ 65-70% των ατμοσφαιρικών στρωματώσεων ταξινομούνται ως σύννεφα. Ο πληθυσμός των σύννεφων νερού προσδιορίστηκε ότι παραμένουν πολύ σταθερά μεταξύ της V3 και V4, περίπου στο 18%. Ο πληθυσμός ROI είναι μεγαλύτερος σε δεδομένα με κλίση σε σχέση με τα δεδομένα του ναδίρ, και είναι 10-15% μεγαλύτερος στην V4 από ό,τι στην V3. Τα νέφη άγνωστης φάσης αυξάνονται στην V4 λόγω των γενικά χαμηλότερων τιμών CAD και της ανίχνευσης περισσότερων λεπτών στρωμάτων νεφών με αδύναμα σήματα οπισθοσκέδασης και αποπόλωσης.

Λόγος LIDAR και παράγοντες πολλαπλής σκέδασης για σύννεφα πάγου (Lidar Ratios and Multiple Scattering Factors for Ice Clouds)

Στην V3 και σε προηγούμενες εκδόσεις, δόθηκε σταθερός πολλαπλός συντελεστής σκέδασης η532 = 0,6 στα σύννεφα πάγου. Στην V4, ο πολλαπλός συντελεστής σκέδασης εφαρμόζεται ως σιγμοειδής συνάρτηση προσέγγισης της κεντροειδούς θερμοκρασίας του στρώματος της εξασθενημένης οπισθοσκέδασης, με το η532 να αυξάνεται από 0,46 στα 270 K σε 0,76 στα 190 K. Αυτή η συνάρτηση προσέγγισης προέκυψε από την εκτεταμένη ανάλυση των συντοπισμένων (collocated) μετρήσεων που αποκτήθηκαν από το CALIPSO lidar και το CALIPSO IIR, τα οποία συνενώνουν τις παρατηρούμενες και θεωρητικές αναλογίες οπτικών βαθών στα 532 nm που προέρχονται από την V3 μετρούμενη αμφίδρομη διαπερατότητα του CALIOP στο οπτικό βάθος απορρόφησης που ανακτήθηκε από τις μετρήσεις IIR στα 12,05 μm.

Στο V3 και σε προηγούμενες εκδόσεις, στις ανακτήσεις εξασθένησης των νεφών πάγου που δεν μπορούσαν να περιοριστούν με την άμεση μέτρηση της αμφίδρομης εκπομπής είχε εκχωρηθεί μία αρχικά προεπιλεγμένη σταθερή τιμή ίση με 25 sr. Για ημιδιαφανή σύννεφα, συγκρίσεις με οπτικό βάθος απορρόφησης IIR στα 12,05 μm και μετρήσεις ακτινοβολίας MODIS στα 11 μm έδειξε, κατά μέσο όρο, μια αρκετά καλή συμφωνία με τις περιορισμένες ανακτήσεις V3 του CALIPSO, αλλά ουσιαστικά χειρότερη συμφωνία με τις χωρίς περιορισμούς ανακτήσεις, αποδεικνύοντας έτσι ότι στην αρχική προεπιλογή, ο λόγος lidar ήταν γενικά πολύ μικρός. Οι προεπιλεγμένες τιμές lidar ratio μειώνονται από ~ 35 sr σε ~ 20 sr καθώς η θερμοκρασία του κεντροειδούς του νέφους μειώνεται. Αυτός ο αρχικός λόγος lidar χρησιμοποιείται μόνο για τα ημιδιαφανή σύννεφα πάγου όταν δεν είναι δυνατές ανακτήσεις περιορισμού. Για τα αδιαφανή νέφη και τις ανακτήσεις περιορισμού στα ημι-διαφανή νέφη, οι ανακτήσεις εξασθένησης αρχικοποιούνται χρησιμοποιώντας μια αναλογία lidar που προέρχεται απευθείας από τις μετρήσεις CALIOP L1 και τον παράγοντα

Παράγοντες πολλαπλής σκέδασης για σύννεφα νερού (Multiple Scattering Factors for Water Clouds)

Στην V3 και σε προηγούμενες εκδόσεις, σε όλα τα νέφη νερού δόθηκε σταθερός πολλαπλός συντελεστής σκέδασης η532 = 0,6. Στο V4, το η532 για διαφανή νέφη νερού παραμένει σταθερό στα 0,6. Για τα αδιαφανή στρώματα νεφών νερού οι παράγοντες πολλαπλής σκέδασης υπολογίζονται από το μετρούμενο στρώμα με την ολοκλήρωση του όγκου στην αναλογία αποπόλωσης. Ως συνέπεια, υπό τις κατάλληλες συνθήκες (π.χ., σύννεφα μονού στρώματος σε καθαρό ουρανό), οι εκτιμήσεις των αναλογιών του Lidar των νεφών νερού μπορούν τώρα να ληφθούν από τους παράγοντες πολλαπλής σκέδασης και τις εκτιμήσεις της ολοκληρωμένης εξασθενημένης οπισθοσκέδασης στο στρώμα των 532 nm.

Εξασθένηση και οπτικά βάθη (Extinction and Optical Depths)

Οι κατακόρυφες κατανομές σωματιδιακής οπισθοσκέδασης και εξασθένησης καθώς και τα οπτικά βάθη των στρωμάτων που αναφέρονται στα προϊόντα δεδομένων V4 παράγονται από μια τροποποιημένη και ουσιαστικά ενισχυμένη έκδοση του υβριδικού αλγορίθμου εκτιμήσεων εξασθένησης που χρησιμοποιήθηκε σε προηγούμενες version. Πολλές αναβαθμίσεις του αλγόριθμου είναι ιδιαίτερα αξιοσημείωτες και αναλύονται παρακάτω.

Ανάλυση αδιαφανών στρωματώσεων

Η ανάκτηση των προϊόντων εξασθένησης που χρησιμοποιείται για αδιαφανή στρώματα είναι τελείως διαφορετική. Στην V3 και σε προηγούμενες εκδόσεις, τα lidar ratio που χρησιμοποιήθηκαν για τα αδιαφανή στρώματα ορίστηκαν από τους αλγόριθμους ταξινόμησης κατάστασης με βάση τον τύπο του στρώματος (π.χ., νέφος έναντι αερολύματος) και τύπου αερολυμάτων (π.χ., πάγος έναντι νερού, σκόνης έναντι καπνού κλπ.). Στην V4, οι αρχικές εκτιμήσεις των τιμών του lidar ratio για τα αδιαφανή στρώματα υπολογίζονται απευθείας από τις ολοκληρώσεις του μετρούμενου συντελεστή οπισθοσκέδασης, και με επανυπολογισμό όπου είναι απαραίτητο για να εξασφαλιστεί ότι οι συντελεστές υπολογίζονται μέσω της πλήρους κατακόρυφης έκτασης του στρώματος. Αυτή η διαδικασία δίνει εξαιρετικά ακριβείς και σωστές τιμές lidar ratio και πιο ρεαλιστικές εκτιμήσεις συντελεστών εξασθένησης και εξαλείφουν κάποιες υποεκτιμήσεις του οπτικού βάθους που παρατηρήθηκαν σε προηγούμενες εργασίες (Young et al., 2018).

Αυξημένος αριθμός περιορισμένων ανακτήσεων

Οι περιορισμένες ανακτήσεις χρησιμοποιούν μετρήσεις καθαρού αέρα πάνω και κάτω από ένα υπερυψωμένο στρώμα για να εκτιμήσουν άμεσα το οπτικό βάθος του στρώματος. Αυτά τα οπτικά βάθη παρέχουν έναν περιορισμό στη λύση της εξίσωσης lidar, επιτρέποντας το lidar ratio να ανακτηθεί από τα δεδομένα αντί να υπολογίζεται a priori. Εκ των υστέρων, η προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε στην V3 και σε προηγούμενες εκδόσεις ήταν ίσως υπερβολικά προσεκτική, λόγω του ότι επιχειρήθηκαν μόνο για υπερυψωμένα στρώματα με οπτικά βάθη μεγαλύτερα από ~ 0,3. Σε περιορισμένες περιπτώσεις η V4 (και επομένως οι τιμές lidar ratio) προκύπτουν για όλες τα στρώματα που έχουν έγκυρες αμφίδρομες μετρήσεις διαπερατότητας. Οι αβεβαιότητες οτις εκτιμήσεις της αναλογίας lidar αναφέρονται τώρα για όλες τις ανακτήσεις.

Ακριβέστερη αναφορά της επιτυχίας ανάκτησης

Για κάθε κατακόρυφη κατανομή εξασθένησης που ανακτάται, παρέχονται πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση τερματισμού του αλγόριθμου εξασθένησης στις σημαίες quality check (QC). Αυτές οι σημαίες εφαρμόζονται ως 16-bit μη υπογεγραμμένοι ακέραιοι αριθμοί. Πολλαπλά bits μπορούν να αποθηκευτούν μέσα σε κάθε σημαία QC, με κάθε bit να παρέχει μια συγκεκριμένη πληροφορία. Ο αλγόριθμος της V4 χρησιμοποιεί 14 bits (έναντι 10 που είχε η V3), και είναι πιο λεπτομερής και αυστηρότερος στην εκτίμηση της ποιότητας ανάκτησης. Ενδεικτικά, για όλα τα δεδομένα που συλλέχθηκαν το 2008 της V3 ανέφεραν μόνο 19 διαφορετικές σημαίες QC στα 532 nm. Αντίθετα, στην V4 αναμένεται να αναφερθούν περίπου 75 διαφορετικές τιμές για την ίδια χρονική περίοδο. Οι πιο αξιόπιστες ανακτήσεις έχουν σημαίες QC 0, 1, 2, 16 ή 18. Σε έκτακτες περιπτώσεις, η ανάκτηση μπορεί να αποτύχει. Οι συντελεστές οπισθοσκέδασης και εξασθένησης που αναφέρονται για αυτές τις αποτυχημένες ανακλήσεις ρυθμίζονται σε τιμή QC -333.

Βελτιωμένες εκτιμήσεις αβεβαιότητας εξασθένησης

Κατά την ανάπτυξη του V4 δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην παροχή ακριβέστερων εκτιμήσεων των αβεβαιοτήτων που αναφέρθηκαν για τους συντελεστές εξασθένησης και τα οπτικά βάθη. Ειδικότερα, οι εκτιμήσεις της αβεβαιότητας του lidar ratio της V4

έχουν πλέον επαληθευτεί και προσαρμοστεί, ανάλογα με την περίπτωση, με βάση το κάθε στρώμα. Στην επεξεργασία της V3, αυτές οι εκτιμήσεις αβεβαιότητας προσδιορίζονται πάντα εκ των προτέρων και δεν αλλάζουν ποτέ στη συνέχεια.

Ενώ οι πολλαπλοί συντελεστές σκέδασης στρώματος για τα αδιαφανή νέφη νερού μπορούν να εκτιμηθούν αξιόπιστα, η γνωστή κλίμακα της εξάρτησης των νεφών νερού της πολλαπλής σκέδασης δεν υπολογίζεται στον αλγόριθμο ανάκτησης της V4. Επιπλέον, η ανάκτηση εξασθένησης της V4 δεν επιχειρεί να αντισταθμίσει την απώλεια πληροφοριών του εύρους τιμών που εισάγονται με pulse stretching. Ως αποτέλεσμα, πέρα από το πρώτης εμβέλειας bin (και συχνά μέσα στο bin πρώτης εμβέλειας) οι ανακτήσεις εξασθένησης της V4 σε αδιαφανή νέφη νερού θα πρέπει να θεωρούνται εντελώς αναξιόπιστες. Για να ενισχυθεί αυτή η έννοια, οι αβεβαιότητες για τα αδιαφανή νέφη νερού δεν υπολογίζονται, αλλά τους αποδίδεται ομοιόμορφη τιμή -29.

Περίληψη των αλλαγών εξασθένησης από V3 σε V4

Οι αλλαγές που περιγράφηκαν παραπάνω αναμένεται να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στο μέγεθος των συντελεστών οπισθοσκέδασης και εξασθένησης της V4, στις συνακόλουθες αβεβαιότητες τους και σε αυτές τις παραμέτρους που προκύπτουν στη συνέχεια από αυτές τις τιμές. Ωστόσο, η εξασθένηση και το οπτικό βάθος που αλλάζουν από τη V3 στη V4 δεν μπορούν να αποδοθούν εξ ολοκλήρου σε αλλαγές στον αλγόριθμο εξασθένησης. Οι αλλαγές στις a priori προδιαγραφές στα στρώματα των πολλαπλών συντελεστών σκέδασης και/ή του lidar ratio του στρώματος μπορούν από μόνες τους να εισάγουν σημαντικές αλλαγές στις ανακτημένες τιμές των συντελεστών εξασθένησης και του οπτικού βάθους. Παρομοίως, οι μεταβολές των συντελεστών βαθμονόμησης από την V3 στην V4 έχουν ως αποτέλεσμα μικρές αυξήσεις στους συντελεστές εξασθενημένης οπισθοσκέδασης L1, οι οποίοι με τη σειρά τους μεταβάλλουν παράλληλα την απόδοση αλλά με μη γραμμικές αυξήσεις των σωματιδιακών συντελεστών και των συντελεστών εξασθένησης.

Αναθεωρημένος Αλγόριθμος για την περιεκτικότητα Πάγου-Νερού (Revised Ice-Water Content Algorithm)

Η περιεκτικότητα πάγου/νερού σε νέφη (ice water content - IWC) υπολογίζεται σε όλα τα σύννεφα πάγου που ανιχνεύονται από το CALIOP. Όπως και στην V3, το IWC είναι ένα προσωρινό προϊόν δεδομένων που υπολογίζεται ως παραμετροποιημένη συνάρτηση του συντελεστή εξασθένησης στα 532 nm που ανακτάται στα σύννεφα πάγου. Στην V4, η παραμετροποίηση έχει τροποποιηθεί ώστε να περιλαμβάνει μια σχέση μεγέθους σωματιδίων εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία που προσεγγίζει τις παρατηρήσεις που συλλέχθηκαν από αεροσκάφη σε ένα εκτεταμένο σύνολο μικροφυσικών δεδομένων. Λόγω των συσσωρευτικών επιπτώσεων των πολλαπλών

παραγόντων, συμπεριλαμβανομένης της νέας παραμετροποίησης μάζας πάγου και της βελτιωμένης βαθμονόμησης και εξασθένησης της V4, αναμένετε ότι το IWC της V4 θα είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το IWC της V3. π.χ. έως 6-8 φορές μεγαλύτερη για παχιά σύννεφα πάγου σε θερμές θερμοκρασίες. Σε κρύες θερμοκρασίες, το IWC της V4 που υπολογίζεται για έναν δεδομένο συντελεστή απόσβεσης είναι μικρότερος από αυτόν στην V3. Ωστόσο, δεδομένου ότι οι συντελεστές απόσβεσης είναι μεγαλύτεροι στην V4, η προκύπτουσα αλλαγή στο IWC από V3 σε V4 είναι σχετικά μικρή.

Το IWC του CALIPSO είναι ένα εξαιρετικά συμπληρωματικό προϊόν δεδομένων. Εκτός από την παραμετροποίηση περιοχής-μάζας των σωματιδίων νέφους, στηρίζεται στον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του νέφους (CAD), στον προσδιορισμό φάσης του νέφους, και στον προσδιορισμό του lidar ratio και των παραγόντων πολλαπλής σκέδασης και της επακόλουθης ανάκτησης εξασθένησης. Η αβεβαιότητα όσον αφορά την περιεκτικότητα σε παγωμένο νερό από νέφη επηρεάζεται από την ακρίβεια της μικροφυσικής παραμετροποίησης. Ωστόσο, η αβεβαιότητα του IWC που αναφέρεται στα CALIPSO προϊόντα αντικατοπτρίζει μόνο την αβεβαιότητα στην ανάκτηση των συντελεστών εξασθένησης. Επειδή το IWC παραμετροποιείται από την εξασθένηση των σωματιδίων πάγου, προκύπτει ότι τα κριτήρια ελέγχου των δεδομένων για έγκυρη IWC θα πρέπει να είναι παρόμοια με εκείνα που χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση έγκυρων συντελεστών εξασθένησης. Καλύτερα αποτελέσματα πιθανόν να προκύψουν χρησιμοποιώντας μόνο αυτά τα δεδομένα με υψηλές τιμές CAD που έχουν επίσης ταξινομηθεί ως πάγος με υψηλή εμπιστοσύνη.

Νέο προϊόν δεδομένων: Προϊόν συγχωνευμένου Επιπέδου 5χλμ

Η έκδοση δεδομένων V4 περιλαμβάνει ένα νέο προϊόν συγχωνευμένου στρώματος 5 χλμ. που συγκεντρώνει όλες τις πληροφορίες που βρέθηκαν στο υπάρχον προϊόν στρώματος νέφους των 5 χλμ. και το προϊόν στρώματος αερολυμάτων των 5 χλμ. και τα συσκευάζει σε ένα μόνο αρχείο. Το προϊόν συγχώνευσης στρωμάτων 5 χιλιομέτρων περιέχει επίσης ένα περιεκτικό υποσύνολο των δεδομένων από τα προϊόντα μεμονωμένου στρώματος. Αυτό το νέο προϊόν προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα στους χρήστες των προϊόντων CALIPSO. Συγκεκριμένα, (α) προσδιορίζονται πλήρως οι χωρικές σχέσεις μεταξύ νεφών και αερολυμάτων που ανιχνεύονται με διαφορετική μέση ανάλυση σε οποιαδήποτε στήλη και (β) οι οπτικές επιδράσεις μεταξύ στρωμάτων διαφορετικών τύπων (π.χ., οι αβεβαιότητες στις ανακτήσεις οπτικού βάθους cirrus νεφών που βρίσκονται πάνω από στρώματα αερολυμάτων) μπορούν να εκτιμηθούν εύκολα και να χαρακτηριστούν πλήρως. Μια πλήρης ανάλυση όλων των παραμέτρων που περιλαμβάνονται στο προϊόν στρώματος 5 χλμ. δόθηκε στην τελευταία έκδοση CALIPSO Products του Data Catalog (https://eosweb.larc.nasa.gov/project/calipso/dpc).

Έκδοση V4.20 CALIPSO level 2 προϊόντων

Η έκδοση CALIPSO V4.20 level 2 προϊόντων, που είναι και η έκδοση που χρησιμοποιήθηκε για όλη την επεξεργασία των μετρήσεων της εργασίας αυτής, περιέχει νέα πακέτα δεδομένων της ενέργειας του laser. Συγκεκριμένα, παρέχει περισσότερες πληροφορίες για το φιλτράρισμα της δέσμης laser χαμηλής ενέργειας, που ήταν ένα φαινόμενο που επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα των δεδομένων του CALIPSO. Στην νέα έκδοση έχει εισαχθεί μια μέθοδος για τον αποκλεισμό των επηρεαζόμενων κατακόρυφων κατανομών (που περιλαμβάνει ένα πακέτο δεδομένων που διευκολύνουν τον εντοπισμό των κατακόρυφων κατανομών αυτών - την ενέργεια στα 532nm αλλά και την ελάχιστη ενέργεια laser για κάθε κομμάτι 80 km).

Στο κεφάλαιο 3 αυτής της εργασίας παρουσιάζεται η σύγκριση των προϊόντων L2 οπισθοσκέδασης του CALIPSO από την V3 και την V4 σε σχέση με της μετρήσεις από τα επίγεια συστήματα lidar του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών.

3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Σύγκριση Μετρήσεων

3.1 Παρουσίαση μεθοδολογίας για την αξιολόγηση των δορυφορικών μετρήσεων

Αρκετές παράμετροι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επεξεργασία και σύγκριση των κατακόρυφων κατανομών του συντελεστή οπισθοσκέδασης από ένα επίγειο και ένα δορυφορικό σύστημα. Ο πρώτος παράγοντας αναφέρεται στην οριζόντια ανάλυση των δορυφορικών δεδομένων που επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε, ο δεύτερος παράγοντας αναφέρεται στην χρονική διάρκεια που επιλέγουμε όσον αφορά την ανάλυση των επίγειων δεδομένων, ενώ σημαντική είναι και η επίδραση του λόγου lidar που επιλέγουμε για την εκτίμηση του συντελεστή εξασθένησης, καθώς και η επιλογή του σμουθαρίσματος στην επεξεργασία των σημάτων. Γενικά, ο μικρός λόγος σήματος προς θόρυβο απαιτεί καλύτερο φιλτράρισμα με αποτέλεσμα να υπάρχουν παραμορφώσεις στο τελικό αποτέλεσμα ειδικά για λεπτά στρώματα τα οποία είναι συγκρίσιμα με το παράθυρο των φίλτρων.

Επιπλέον, η επιλογή του ύψους αναφοράς επηρεάζει την κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης οδηγώντας σε υποεκτίμηση ή υπερεκτίμηση. Το πρόβλημα είναι εντονότερο όταν η επιλογή του ύψους αναφοράς γίνεται σε περιοχή με πολύ θόρυβο καθώς η τιμή αναφοράς επηρεάζεται έντονα από το θόρυβο. Τα δύο συστήματα (επίγεια και δορυφορικό) χρησιμοποιούν διαφορετική περιοχή για την βαθμονόμηση του σήματος. Στον αλγόριθμο του δορυφορικού συστήματος CALIPSO θεωρείται ότι στην περιοχή των 30 – 34 km η συνεισφορά των σωματιδίων είναι αμελητέα σε σχέση με αυτή των μορίων. Αντίθετα, για τα επίγεια συστήματα, η περιοχή στην οποία η σκέδαση από αιωρούμενα σωματίδια είναι σχεδόν αμελητέα σε σχέση με την μοριακή

Τέλος, οι μετρούμενες κατακόρυφες κατανομές των επίγειων και δορυφορικών συστημάτων, συμφωνούν όταν η τροχιά του CALIPSO ακολουθεί την τροχιά της αέριας μάζας που φτάνει στον επίγειο σταθμό την στιγμή της μέτρησης. Αντιθέτως, δεδομένα για μεγάλες οριζόντιες αναλύσεις, όπου η τροχιά του δορυφόρου διαφέρει από την τροχιά της αέριας μάζας, αποκλίνουν περισσότερο από την επί τόπου καταγραφή της κατακόρυφης κατανομής της ατμόσφαιρας.

Στη συγκεκριμένη εργασία, για την σύγκριση των CALIPSO προϊόντων της έκδοσης V4.20 με τον αλγόριθμο CALIPSO V3 έγινε επεξεργασία σκηνών από τους σταθμούς του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στην Αθήνα και του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών στην Φινοκαλιά της Κρήτης. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής: Από το site του ICARE (<u>http://www.icare.univ-lille1.fr/</u>) κατεβάσαμε, σε μορφή HDF, όλα τα αρχεία της version 4.20 και version 3 με τα δεδομένα level 2 του δορυφόρου για τις χρονικές περιόδους που μελετάμε.

Από το site του ACTRIS (<u>https://actris.nilu.no/</u>) λάβαμε τα δεδομένα από το EOLE lidar του σταθμού της Αθήνας και είχαν την κατηγοριοποίηση "collocated/συντοπισμένα" με το πέρασμα του δορυφόρου CALIPSO (overpasses), συνολικά 4 σκηνές οι οποίες αναφέρονται στην περίοδο 2008-2009. Από το PollyXT lidar στο σταθμό της Φινοκαλιάς χρησιμοποιήσαμε 6 σκηνές collocated με το πέρασμα του δορυφόρου που αναφέρονται στην περίοδο 2017. Ο συγκεκριμένος αριθμός σκηνών για κάθε σταθμό κρίθηκε κατάλληλος για περαιτέρω επεξεργασία.

Οι επιλογές των μετρήσεων έγιναν με κριτήριο την απουσία νεφών πάνω από τους σταθμούς κατά την χρονική περίοδο που πέρασε ο δορυφόρος και την απόσταση του δορυφόρου περίπου +/- 1° από τον σταθμό μέτρησης.

Δημιουργήσαμε με τη χρήση αλγορίθμου που επεξεργάζεται τα αρχεία μορφής HDF, και έχοντας ως αναφορά τις συντεταγμένες του εκάστοτε σταθμού, τους χάρτες για κάθε σταθμό με αποτυπωμένα τα περάσματα του δορυφόρου τις ημέρες των μετρήσεων. Στην Εικόνα 3-1, και 3-2 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι τροχιές του CALIPSO πάνω από την ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Φινοκαλιάς, όπου με κόκκινο απεικονίζονται τα ημερήσια περάσματα από τις περιοχές και με μπλε τα νυχτερινά περάσματα του δορυφόρου. Οι λευκοί ομόκεντροι κύκλοι απεικονίζουν τις αποστάσεις 10 km από το EOLE lidar (Εικόνα 3-1) και το PollyXT lidar (Εικόνα 3-2).



Εικόνα 3-1 Τροχιές του CALIPSO πάνω από την Αθήνα. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα day-time overpasses και με μπλε χρώμα τα night-time overpasses. Οι λευκοί ομόκεντροι κύκλοι απεικονίζουν αποστάσεις 10km από το EOLE lidar του ΕΜΠ (γεωγραφικό πλάτος = 37,96°, γεωγραφικό μήκος = 23,78°, υψόμετρο σταθμού = 212m).



Εικόνα 3-2 Τροχιές του CALIPSO πάνω α πό τη Φινοκαλιά. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα ημερήσια περάσματα και με μπλε χρώμα τα νυχτερινά περάσματα. Οι λευκοί κύκλοι απεικονίζουν απόσταση 10km από το PollyXT lidar του ΕΑΑ (γεωγραφικό πλάτος=35,33°, γεωγραφικό μήκος=25,66°, υψόμετρο σταθμού=238m).

Τα δυο επίγεια συστήματα, όπως αναφέρθηκε ήδη στο κεφάλαιο 2, είναι μέρος του δικτύου EARLINET για το οποίο ενδεικτικά παρουσιάζονται στην Εικόνα 3-3 οι υπόλοιποι σταθμοί του και τα περάσματα του δορυφόρου πάνω από αυτούς. Οι μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία από τους διαφορετικούς σταθμούς παρατίθενται στον Πίνακα 3-1.



Εικόνα 3-3 Οι σταθμοί του δικτύου EARLINET (European Aerosol Research Lidar NETwork).

Πίνακας 3-1				
		Ημερομηνία	Ώρα	Απόσταση τροχιάς
		μέτρησης	μέτρησης	από το σταθμό
Αθήνα	1	10-07-2009	00:39	161km
	2	26-07-2009	00:39	14km
	3	02-08-2009	11:48	40km
	4	14-10-2009	00:38	5km
Φινοκαλιά	1	29-04-2017	00:23	27km
	2	15-05-2017	00:24	24km
	3	30-06-2017	11:38	5km
	4	19-08-2017	00:23	25km
	5	04-09-2017	00:23	23km
	6	06-10-2017	00:23	29km

Για τη σύγκριση των ταυτόχρονων μετρήσεων του δορυφόρου CALIPSO και των επίγειων συστημάτων (EOLE, PollyXT) και την ποσοτικοποίηση των διαφορών των κατακόρυφων κατανομών του συντελεστή οπισθοσκέδασης, υπολογίστηκε η επί τοις εκατό διαφορά τους:

Απόλυτη διαφορά του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 1064 nm =

Τιμή του συντελεστή οπισθοσκέδασης CALIPSO στα 1064 nm - Τιμή του Συντελεστή οπισθοσκέδασης των επίγειων συστημάτων στα 1064nm

Απόλυτη διαφορά του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 532 nm =

Τιμή του συντελεστή οπισθοσκέδασης CALIPSO στα 532 nm - Τιμή του συντελεστή οπισθοσκέδασης των επίγειων συστημάτων στα 532 nm

Σχετική διαφορά στα 1064 nm =

100 * (**Απόλυτη διαφορά** του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 1064 nm) / Τιμή του συντελεστή οπισθοσκέδασης των επίγειων συστημάτων στα 1064 nm)

Σχετική διαφορά στα 532 nm =

100 * (**Απόλυτη διαφορά** του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 532 nm) / Τιμή του συντελεστή οπισθοσκέδασης των επίγειων συστημάτων στα 532 nm)

3.2 Αθήνα – Σύγκριση προϊόντων Lidar EOLE Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και του CALIPSO

Σκηνή 1 – 10/07/2009 ώρα 00:39 UTC

Η πρώτη περίπτωση που μελετάμε ήταν στις 10-07-2009 και ώρα 00:39 UTC. Για την περίπτωση αυτή παρατίθενται τα προϊόντα CALIPSO που αναφέρονται στον χαρακτηρισμό των αιωρούμενων σωματιδίων (Feature Type; Εικόνα 3-5), στον χαρακτηρισμό των αερολυμάτων (Aerosol Subtype; Εικόνα 3-6) και τον χαρακτηρισμό της εμπιστοσύνης για τον διαχωρισμό σε νέφη ή αιωρούμενα σωματίδια (CAD score; Εικόνα 3-7).



Εικόνα 3-5 Σύγκριση CALIPSO Feature Type V3 (πάνω) και V4 (κάτω) στις 2009-07-10 00:39 UTC.



Εικόνα 3-6 Σύγκριση CALIPSO Aerosol Subtype V3 (πάνω) και V4 (κάτω) στις 2009-07-10 00:39 UTC.

Στην σκηνή αυτή παρατηρούμε στην Εικόνα 3-5 την βελτίωση του χαρακτηρισμού της επιφάνειας του εδάφους στην Version 4 (V4) σε σχέση με την Version 3 (V3). Ακόμα φαίνεται να γίνεται καλύτερος εντοπισμός του συνολικού στρώματος των αιωρούμενων σωματιδίων καθώς και τον νεφών.

Στον χαρακτηρισμό του τύπου των αιωρούμενων σωματιδίων (Aerosol Type; Εικόνα 3-6), τα στρώματα που στην V3 χαρακτηρίστηκαν ως Σκόνη (Dust) και Ρυπασμένη Σκόνη (Polluted Dust) στην V4 πλέον, με την εισαγωγή των νέων τύπων στον καινούργιο αλγόριθμο, χαρακτηρίζονται ως Ρυπασμένη Σκόνη (Polluted Dust) και Αναμίξεις σωματιδίων Θαλάσσιας προέλευσης με σκόνη (Dusty Marine) αντίστοιχα.

To CAD Score της νέας έκδοσης (Εικόνα 3-7) έδωσε συνολικά υψηλότερες τιμές CAD, οι οποίες αντιστοιχούν σε υψηλότερη βεβαιότητα ότι ένα σωματίδιο είναι αιωρούμενο σωματίδιο ή νέφος. Ακόμα, βλέπουμε ότι δεν υπάρχουν στην νέα έκδοση τα χαμηλής ποιότητας αποτελέσματα της V3 κοντά στο έδαφος (> -20).



Εικόνα 3-7 Σύγκριση CALIPSO CAD Score V3 (πάνω) και V4 (κάτω) στις 2009-07-10 00:39 UTC.

Στην Εικόνα 3-8 φαίνεται η σύγκριση των συντελεστή οπισθοσκέδασης από το CALIPSO στα 1064nm και 532nm για την V3 και V4 με το lidar NTUA EOLE. Τα προϊόντα της V4 έχουν λιγότερες αποκλίσεις από τις κατακόρυφες κατανομές οπισθοσκέδασης που μετρήθηκαν με το EOLE Lidar. Διαφορές μεταξύ των δύο version παρατηρούμε σε ύψη μικρότερα από τα 3 km με καλύτερες εκτιμήσεις (πιο κοντά στις τιμές του επίγειου lidar) της V4.



Εικόνα 3-8 Σύγκριση CALIPSO V3 και V4 με το lidar NTUA EOLE για τις τιμές του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 1064nm και 532nm στις 2009-07-10 00:39 UTC.

Στην Εικόνα 3-9 φαίνεται η μέση τιμή της επί τοις εκατό διαφοράς των κατακόρυφων κατανομών οπισθοσκέδασης του CALIPSO από το σύστημα EOLE για διαφορετικής χωρικής ανάλυσης μεσοποιήσεις στις κατακόρυφες κατανομές του δορυφόρου. Ειδικότερα, οι μεσοποιήσεις γίνονται σε χωρική ανάλυση από 17 έως 100 km από το σταθμό της Αθήνας. Παρατηρούμε πως η μικρότερη σχετική διαφορά εντοπίζεται σε απόσταση μεταξύ 80 και 90 km.



Εικόνα 3-9 Μέση τιμή της επί τοις εκατό διαφοράς της κατακόρυφης κατανομής του CALIPSO από το σύστημα EOLE για κατακόρυφη κατανομή από 17 έως 100 km από το σταθμό της Αθήνας στις 2009-07-10 00:39 UTC.

Biases V3 vs V4 CALIPSO overpass : 10/07/2009 00:34UTC



Εικόνα 3-10 Κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 1064nm και 532nm μεταξύ CALIPSO και NTUA EOLE, οι απόλυτες διαφορές τους και οι σχετικές διαφορές τους στις 2009-07-10 00:39 UTC.

Στην Εικόνα 3-10 φαίνεται η κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 1064nm και 532nm μεταξύ του CALIPSO και του EOLE, οι απόλυτες διαφορές τους και οι σχετικές διαφορές τους. Οι διαφορές που παρατηρούμε στις κατακόρυφες κατανομές οπισθοσκέδασης μεταξύ του CALIPSO V3 και V4 και του EOLE είναι μικρές. Πιο συγκεκριμένα, οι απόλυτες διαφορές των κατακόρυφων κατανομών είναι μικρότερες από 1 Mm^(-1)sr^(-1) για ύψη μικρότερα των 3 km και για τις 2 versions, με εξαίρεση ένα σημείο στα 1.500μ όπου στην V3 η απόλυτη διαφορά ξεπερνά τα 4 Mm^(-1)sr^(-1). Οι σχετικές διαφορές τους κυμαίνονται μεταξύ -100 με 200% με περισσότερες αρνητικές διαφορές στην V3 και πιο μεγάλες θετικές διαφορές στην V4. Ειδικά για το κανάλι των 1064 nm, οι σχετικές διαφορές κυμαίνονται από 0 έως 200% στην V4, για μεταποίηση σε απόσταση 50 km. Για το κανάλι των 532 nm, οι σχετικές διαφορές κυμαίνονται από -50 έως 10 στην V4 και για μεταποίηση σε απόσταση 50 km.

Σκηνή 2 – 26/07/2009 ώρα 01:02 UTC

Η δεύτερη περίπτωση που μελετάμε ήταν στις 26-07-2009 και ώρα 00:39 UTC. Για την περίπτωση αυτή παρατίθενται τα προϊόντα CALIPSO που αναφέρονται στον χαρακτηρισμό των αιωρούμενων σωματιδίων (Feature Type; Εικόνα 3-11), στον χαρακτηρισμό των αερολυμάτων (Aerosol Subtype; Εικόνα 3-12) και τον χαρακτηρισμό της εμπιστοσύνης για τον διαχωρισμό σε νέφη ή αιωρούμενα σωματίδια (CAD score; Εικόνα 3-13).



Εικόνα 3-11 Σύγκριση CALIPSO Feature Type V3(πάνω) και V4 (κάτω) στις 2009-07-26 00:39 UTC.



Εικόνα 3-12 Σύγκριση CALIPSO Aerosol Subtype V3 (πάνω) και V4 (κάτω) στις 2009-07-26 00:39 UTC.



Εικόνα 3-13 Σύγκριση CALIPSO CAD ScoreV3 (πάνω) και V4 (κάτω) στις 2009-07-26 00:39 UTC.

Στην σκηνή αυτή, με κοντινότερη απόσταση του δορυφόρου από το σταθμό στα 14 km, παρατηρούμε μεγάλες διαφορές μεταξύ των δύο version του CALIPSO για τον

χαρακτηρισμό των στρωματώσεων. Στην έκδοση V3 υπάρχει σε πολλά σημεία χαρακτηρισμός (Feature Type) για στρώματα νεφών (χαμηλής εμπιστοσύνης) συγκριτικά με την V4 που ο χαρακτηρισμός για τα ίδια στρώματα δίνεται με σιγουριά ως Aerosol. Η ανίχνευση της επιφάνειας είναι σαφέστατα καλύτερη σε όλη τη σκηνή στην V4. Για τον τύπο των σωματιδίων της σκηνής στην V4 ανιχνεύονται στρώματα του νέου τύπου αιωρούμενων σωματιδίων, Υπερυψωμένου Καπνού (Elevated Smoke) καθώς και Σκόνη Θαλάσσιας προέλευσης (Dusty Marine). Επίσης ο εντοπισμός στρωμάτων Ρυπασμένης Σκόνης (Polluted Dust) γίνεται με διαφορετικό τρόπο καθώς στρώματα της V3 που χαρακτηρίστηκαν με τον τρόπο αυτό στην V4 θεωρούνται Σκόνη (Dust) και αντίστροφα.

Μεγάλη βελτίωση στη συγκεκριμένη σκηνή παρατηρείται και στο βαθμό εμπιστοσύνης του CAD Score κυρίως σε χαμηλά, κοντά στην επιφάνεια, ύψη.



CALIPSO V3 and V4 comparison with NTUA EOLE for CALIPSO overpass : 26/07/2009 00:33UTC

Εικόνα 3-14 Σύγκριση CALIPSO V3 και V4 με το lidar NTUA EOLE για τις τιμές της οπισθοσκέδασης στα 1064nm και 532nm στις 2009-07-26 00:39 UTC.

Στην Εικόνα 3-14 απεικονίζονται οι κατακόρυφες κατανομές από τον CALIPSO V3 και V4 και το lidar NTUA EOLE για τις τιμές της οπισθοσκέδασης στα 1064nm και 532nm. Από τις παραπάνω κατακόρυφες κατανομές παρατηρείται λίγο καλύτερη συσχέτιση της έκδοσης V4 του CALIPSO με την κατακόρυφη κατανομή οπισθοσκέδασης από το επίγειο Lidar κυρίως στις τιμές οπισθοσκέδασης στα 532 nm, ενώ οι κατακόρυφες κατανομές του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 1064 nm παρουσιάζουν μεγαλύτερες

αποκλίσεις. Επίσης η V4 εντοπίζει στρώμα αιωρούμενων σωματιδίων σε ύψος περίπου 10 km που η V3 δεν εντοπίζει.

Στην Εικόνα 3-15 φαίνεται η μέση τιμή της επί τοις εκατό διαφοράς της κατακόρυφης κατανομής του CALIPSO από το σύστημα EOLE για διαφορετικής χωρικής ανάλυσης μεσοποιήσεις στις κατακόρυφες κατανομές του δορυφόρου. Ειδικότερα, οι μεσοποιήσεις γίνονται σε χωρική ανάλυση από 14 έως 100 km από το σταθμό της Αθήνας. Παρατηρούμε πως η μικρότερη σχετική διαφορά εντοπίζεται σε απόσταση 90 km.



Εικόνα 3-15 Μέση τιμή της επί τοις εκατό διαφοράς της κατακόρυφης κατανομής του CALIPSO από το σύστημα EOLE για τις κατακόρυφες κατανομές από 14 έως 100 km από τον σταθμό της Αθήνας. Παρατηρούμε πως η μικρότερη σχετική διαφορά εντοπίζεται σε απόσταση 90 km στις 2009-07-26 00:39 UTC.

Η κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 1064nm και 532nm μεταξύ CALIPSO και NTUA EOLE, οι απόλυτες διαφορές τους και οι σχετικές διαφορές τους παρουσιάζονται στην Εικόνα 3-16.

Biases V3 vs V4 CALIPSO overpass : 26/07/2009 00:33UTC



Εικόνα 3-16 Κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 1064nm και 532nm μεταξύ CALIPSO και NTUA EOLE, οι απόλυτες διαφορές τους και οι σχετικές διαφορές τους στις 2009-07-26 00:39 UTC.

Σε αυτή τη σκηνή παρατηρούνται γενικά μεγαλύτερες αποκλίσεις (σχετικές και απόλυτες) του συντελεστή οπισθοσκέδασης και στα δύο μήκη κύματος. Πιο συγκεκριμένα, οι απόλυτες διαφορές των κατακόρυφων κατανομών κυμαίνονται από -1 έως 3 Mm⁽⁻¹⁾sr⁽⁻¹⁾, με μεγαλύτερες αποκλίσεις για την version 3. Οι σχετικές διαφορές τους κυμαίνονται μεταξύ -50 με 200%.

Επιπλέον, η V4 αναγνωρίζει το ψηλότερο στρώμα σωματιδίων (8-10 km) που εντοπίστηκε από τον CALIPSO ενώ η V3 όχι.

Σκηνή 3 – 02/08/2009 ώρα 11:31 UTC

Η τρίτη περίπτωση που μελετάμε είναι η μέτρηση που πραγματοποιήθηκε στις 02-08-2009 και ώρα 11:31 UTC. Για την περίπτωση αυτή παρατίθενται παρακάτω τα προϊόντα CALIPSO που αναφέρονται στον χαρακτηρισμό των αιωρούμενων σωματιδίων (Feature Type; Εικόνα 3-17), στον χαρακτηρισμό των αερολυμάτων (Aerosol Subtype; Εικόνα 3-18) και τον χαρακτηρισμό της εμπιστοσύνης για τον διαχωρισμό σε νέφη ή αιωρούμενα σωματίδια (CAD score; Εικόνα 3-19).





Εικόνα 3-17 Σύγκριση CALIPSO Feature Type V3 (πάνω) και V4 (κάτω) στις 2009-08-02 11:48 UTC.

Η σκηνή αυτή που μελετήθηκε από τις μετρήσεις του σταθμού της Αθήνας είναι στις 02-08-2009 και ώρα 11:48 UTC με την κοντινότερη απόσταση της τροχιάς του δορυφόρου από το σταθμό περίπου στα 40 km. Στην σύγκριση των αποτελεσμάτων του χαρακτηρισμού της σκηνής από το δορυφόρο (Feature Type) παρατηρούμε ότι και οι δύο version των προϊόντων του CALIPSO μας δίνουν παρεμφερή αποτελέσματα με μια μικρή βελτίωση στην V4 που ανιχνεύει και κάποια aerosol σε χαμηλά υψόμετρα που δεν μπορούσαν να εντοπιστούν αρχικά με την προηγούμενη έκδοση.



Εικόνα 3-18 Σύγκριση CALIPSO Aerosol Subtype V3 (πάνω) και V4 (κάτω) στις 2009-08-02 11:48 UTC.

Σημαντικές διαφορές παρατηρούνται στον χαρακτηρισμό του τύπου των αιωρούμενων σωματιδίων (Aerosol Type) με την εισαγωγή των νέων τύπων στην νέα έκδοση. Το στρώμα που είχε χαρακτηριστεί ως στρώμα μολυσμένων ηπειρωτικών αιωρούμενων σωματιδίων στην V3, χαρακτηρίζεται στην V4 ως ανυψωμένος καπνός (Elevated Smoke). Επίσης το στρώμα που χαρακτηρίζεται ως ρυπασμένη σκόνη (Polluted Dust) στην V4 ανιχνεύεται ως σκόνη θαλάσσιας προέλευσης (Dusty Marine). Καθώς και το στρώμα που στην V3 ανιχνεύεται ως ρυπασμένη σκόνη (Polluted Dust) πλέον χαρακτηρίζεται ως θαλάσσια σκόνη (Dusty Marine).





To CAD score έχει συνολικά στην συγκεκριμένη σκηνή υψηλές τιμές και παρατηρείται αύξηση της εμπιστοσύνης στις περιοχές του χαρακτηρισμού στις περιοχές κοντά στην επιφάνειας της γης.

Στην Εικόνα 3-20 απεικονίζεται η σύγκριση του CALIPSO V3 και V4 με το lidar NTUA EOLE για τις τιμές της οπισθοσκέδασης στα 1064 nm και 532 nm.



Εικόνα 3-20 Σύγκριση CALIPSO V3 και V4 με το lidar NTUA EOLE για τις τιμές της οπισθοσκέδασης στα 1064 nm και 532 nm στις 2009-08-02 11:48 UTC.

Και σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται με μικρή διαφορά καλύτερη συσχέτιση της έκδοσης V4 του CALIPSO με την κατακόρυφη κατανομή οπισθοσκέδασης από το επίγειο Lidar. Παράλληλα, παρατηρείται πως η κατακόρυφη κατανομή οπισθοσκέδασης της V4 είναι περισσότερο φιλτραρισμένη σε σχέση με αυτήν της V3, το οποίο έχει περισσότερα spikes.

Στην Εικόνα 3-21 φαίνεται η μέση τιμή της επί τοις εκατό διαφοράς της κατακόρυφης κατανομής του CALIPSO από το σύστημα EOLE για διαφορετικής χωρικής ανάλυσης μεσοποιήσεις στις κατακόρυφες κατανομές του δορυφόρου. Ειδικότερα, οι μεσοποιήσεις γίνονται σε χωρική ανάλυση από 40 έως 100 km από το σταθμό της Αθήνας. Παρατηρούμε πως η μικρότερη σχετική διαφορά εντοπίζεται σε απόσταση 60 km.



Εικόνα 3-21 Μέση τιμή της επί τοις εκατό διαφοράς της κατακόρυφης κατανομής του CALIPSO από το σύστημα EOLE για κατακόρυφη κατανομή από 40 έως 100 km από το σταθμό της Αθήνας. Παρατηρούμε πως η μικρότερη σχετική διαφορά εντοπίζεται σε απόσταση 60 km στις 2009-08-02 11:48 UTC.

Η κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 1064nm και 532nm μεταξύ CALIPSO και EOLE, οι απόλυτες διαφορές τους και οι σχετικές διαφορές τους παρουσιάζονται στην Εικόνα 3-22 που ακολουθεί.



Εικόνα 3-22 Κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 1064nm και 532nm μεταξύ CALIPSO και NTUA EOLE, οι απόλυτες διαφορές τους και οι σχετικές διαφορές τους στις 2009-08-02 11:48 UTC.

Η Έκδοση 4 προσεγγίζει καλύτερα τη μέτρηση του επίγειου Lidar, αν και σε αυτή τη σκηνή οι διαφορές των δύο εκδόσεων είναι μικρές. Και στις δύο Εκδόσεις όμως ο CALIPSO δεν προσεγγίζει καλά η κατακόρυφη κατανομή του EOLE στα 532nm κυρίως στα ψηλά και στα χαμηλά στρώματα σωματιδίων ενώ δίνει καλύτερες τιμές στα μεσαία στρώματα από τις αντίστοιχες κατακόρυφες κατανομές της Έκδοσης 3.

Σκηνή 4 – 14/10/2009 ώρα 00:38 UTC

Η τέταρτη σκηνή που μελετήθηκε, αντιστοιχεί στις 14-10-2009 και ώρα 00:38 UTC. Για την περίπτωση αυτή παρατίθενται παρακάτω τα προϊόντα CALIPSO που αναφέρονται στον χαρακτηρισμό των αιωρούμενων σωματιδίων (Feature Type; Εικόνα 3-23), στον χαρακτηρισμό των αερολυμάτων (Aerosol Subtype; Εικόνα 3-24) και τον χαρακτηρισμό της εμπιστοσύνης για τον διαχωρισμό σε νέφη ή αιωρούμενα σωματίδια (CAD score; Εικόνα 3-25). Η κοντινότερη απόσταση της τροχιάς του δορυφόρου από το σταθμό είναι στα 5 km.



Εικόνα 3-23 Σύγκριση CALIPSO Feature Type V3 (πάνω) και V4 (κάτω) στις 2009-10-14 00:38 UTC.



Εικόνα 3-24 Σύγκριση CALIPSO Aerosol Subtype V3 (πάνω) και V4 (κάτω)στις 2009-10-14 00:38 UTC.



Εικόνα 3-25 Σύγκριση CALIPSO CAD Score V3 (πάνω) και V4 (κάτω) στις 2009-10-14 00:38 UTC.

Στην σύγκριση των αποτελεσμάτων του χαρακτηρισμού της σκηνής από το δορυφόρο (Feature Type) παρατηρούμε ότι η V4 μας δίνει καλύτερα αποτελέσματα στον εντοπισμό των στρωμάτων aerosol. Και σε αυτή τη σκηνή ο εντοπισμός του εδάφους είναι σαφέστερος. Μικρά στρώματα που χαρακτηρίστηκαν ως νέφη στην V3, στην V4 ανιχνεύονται με μεγαλύτερη βεβαιότητα ως αιωρούμενα σωματίδια.

Διαφορές παρατηρούμε και στο χαρακτηρισμό του τύπου των αιωρούμενων σωματιδίων (Aerosol Type). Τα στρώματα των σωματιδίων που χαρακτηριζόταν ως σκόνη (Dust) και ρυπασμένη σκόνη (Polluted Dust) στην V3, στην V4 πλέον χαρακτηρίζονται με τον νέο τύπο σωματιδίων σκόνης θαλάσσιας προέλευσης (Marine Dust). Επίσης το στρώμα σωματιδίων που χαρακτηρίζεται ως στρώμα σωματιδίων καθαρής ηπειρωτικής προέλευσης (Clean Continental) στην V4 ανιχνεύεται ως ρυπασμένη σκόνη (Polluted Dust).

To CAD score έχει πολύ καλύτερα αποτελέσματα συνολικά για όλη την σκηνή στην V4 απ' ότι στην V3 με συνολικά υψηλές τιμές εμπιστοσύνης.

Η Εικόνα 3-26 απεικονίζει την σύγκριση του CALIPSO V3 και V4 με το lidar NTUA EOLE για τις τιμές της οπισθοσκέδασης στα 1064 nm και 532 nm.



Εικόνα 3-26 Σύγκριση CALIPSO V3 και V4 με το lidar NTUA EOLE για τις τιμές της οπισθοσκέδασης στα 1064 nm και 532 nm στις 2009-10-14 00:38 UTC.

Η συσχέτιση της V4 με την κατακόρυφη κατανομή οπισθοσκέδασης από το επίγειο lidar είναι καλύτερη και σε αυτή την περίπτωση. Επίσης η V4 σε χαμηλά ύψη δεν παρουσιάζει τα ακρότατα που παρουσιάζει η V3.

Η Εικόνα 3-27 απεικονίζει την μέση τιμή της επί τοις εκατό διαφοράς της κατακόρυφης κατανομής του CALIPSO από το σύστημα EOLE για διαφορετικής χωρικής ανάλυσης μεσοποιήσεις στις κατακόρυφες κατανομές του δορυφόρου. Ειδικότερα, οι μεσοποιήσεις γίνονται σε χωρική ανάλυση από 15 έως 100 km από το σταθμό της Αθήνας. Παρατηρούμε πως η μικρότερη σχετική διαφορά εντοπίζεται σε απόσταση 20 km.



Εικόνα 3-27 Μέση τιμή της επί τοις εκατό διαφοράς της κατακόρυφης κατανομής του CALIPSO από το σύστημα EOLE για κατακόρυφη κατανομή από 15 έως 100 km από το σταθμό της Αθήνας. Παρατηρούμε πως η μικρότερη σχετική διαφορά εντοπίζεται σε απόσταση 20 km για τις 2009-10-14 00:38 UTC.

Στην Εικόνα 3-28 παριστάνεται η κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 1064nm και 532nm μεταξύ CALIPSO και NTUA EOLE, οι απόλυτες διαφορές τους και οι σχετικές διαφορές τους.



Εικόνα 3-28 Κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 1064nm και 532nm μεταξύ CALIPSO και NTUA EOLE, οι απόλυτες διαφορές τους και οι σχετικές διαφορές τους στις 2009-10-14 00:38 UTC.

Και εδώ φαίνεται πως η Έκδοση 4 προσεγγίζει καλύτερα τη μέτρηση του Lidar κυρίως στα μεσαία στρώματα. Και στις δύο εκδόσεις όμως ο CALIPSO δεν προσεγγίζει καλά την κατακόρυφη κατανομή του EOLE lidar και στα δύο μήκη κύματος κυρίως στα χαμηλά στρώματα, ειδικά στην έκδοση 3 που παρουσιάζει και ακραίες τιμές. Οι σχετικές διαφορές είναι μεγαλύτερες του 200 εντός του στρώματος για τον κανάλι των 1064 nm και την V3 του CALIPSO.

3.3 Φινοκαλιά Κρήτης – Σύγκριση προϊόντων Lidar PollyXT του Αστεροσκοπείου Αθηνών και του CALIPSO

Σκηνή 1 – 29/04/2017 ώρα 00:23

34.0

34.5

Η πρώτη σκηνή που μελετήθηκε από τις μετρήσεις του σταθμού της Φινοκαλιάς είναι στις 29-04-2017 και ώρα 00:23 UTC με την κοντινότερη απόσταση της τροχιάς του δορυφόρου από το σταθμό περίπου στα 5 km. Για την περίπτωση αυτή παρατίθενται παρακάτω τα προϊόντα CALIPSO που αναφέρονται στον χαρακτηρισμό των αιωρούμενων σωματιδίων (Feature Type; Εικόνα 3-27), στον χαρακτηρισμό των αερολυμάτων (Aerosol Subtype; Εικόνα 3-28) και τον χαρακτηρισμό της εμπιστοσύνης για τον διαχωρισμό σε νέφη ή αιωρούμενα σωματίδια (CAD score; Εικόνα 3-29).





36.0

5: Surface 6: Subsurface 7: Tottaly Attenuated L:low/no confidence

Εικόνα 3-29 Σύγκριση CALIPSO Feature Type V3 (πάνω) και V4 (κάτω) στις 2017-04-29 00:23 UTC.
Στην σύγκριση των αποτελεσμάτων του χαρακτηρισμού της σκηνής από το δορυφόρο (Feature Type) παρατηρούμε ότι και οι δύο version των προϊόντων του CALIPSO παρέχουν παρόμοια αποτελέσματα με μια μικρή βελτίωση στην version 4, η οποία ανιχνεύει και κάποια νέφη σε χαμηλά υψόμετρα που δεν μπορούσαν να εντοπιστούν αρχικά με την προηγούμενη έκδοση.

Μεγάλη διαφορά παρατηρούμε στο χαρακτηρισμό του τύπου των αιωρούμενων σωματιδίων με την εισαγωγή των νέων τύπων στην νέα έκδοση. Το στρώμα που χαρακτηριζόταν ως σκόνη στην version 3 βλέπουμε στη version 4 ότι διαχωρίζεται και περιέχει κάποια σημεία που πλέον χαρακτηρίζονται ως μολυσμένα ηπειρωτικά/καπνός (polluted continental/smoke) και κάποια σημεία ως σκόνη θαλάσσης (dusty marine). Καθώς και το στρώμα που στην version 3 ανιχνευόταν ως ρυπασμένη σκόνη (polluted dust) πλέον χαρακτηρίζεται ως θαλάσσια σκόνη (dusty marine).

To CAD score παρόλο που συνολικά στην συγκεκριμένη σκηνή έχει υψηλές τιμές, παρατηρείται μια μικρή μείωση στις περιοχές των νέων τύπων αιωρούμενων σωματιδίων.



Εικόνα 3-30 Σύγκριση CALIPSO Aerosol Subtype V3 (πάνω) και V4 (κάτω) στις 2017-04-29 00:23 UTC.



Εικόνα 3-31 Σύγκριση CALIPSO CAD Score V3 (πάνω) και V4 (κάτω) στις 2017-04-29 00:23 UTC.

Η Εικόνα 3-32 απεικονίζει την σύγκριση του CALIPSO V3 και V4 με το lidar NOA PollyXT για τις τιμές της οπισθοσκέδασης στα 1064 nm και 532 nm.



Εικόνα 3-32 Σύγκριση CALIPSO V3 και V4 με το lidar NOA PollyXT για τις τιμές της οπισθοσκέδασης στα 1064nm και 532nm στις 2017-04-29 00:23 UTC.

Οι κατακόρυφες κατανομές οπισθοσκέδασης από το επίγειο Lidar έχουν μικρότερες αποκλίσεις από αυτά του CALIPSO της version 4. Γενικά, στη συγκεκριμένη σκηνή παρατηρείται μια υποεκτίμηση του συντελεστή οπισθοσκέδασης και για τα δύο μήκη κύματος από τον CALIPSO, κάτι το οποίο μπορεί να συνδέεται με την επιλογή του ύψους βαθμονόμησης των σημάτων. Επιπλέον, η κατακόρυφη κατανομή του PollyXT παρουσιάζει λιγότερα spikes σε σχέση με τα αντίστοιχα του CALIPSO και για τις δύο εκδόσεις του αλγορίθμου. Το φίλτρο σμουθαρίσματος που επιλέχθηκε στην επεξεργασία των σημάτων του PollyXT είναι 307 m και είναι το ίδιο για όλες τις σκηνές που ακολουθούν.

Τέλος, στην version 3 εντοπίζεται ένα μέγιστο το οποίο δεν ανταποκρίνεται στην πραγματική μέτρηση η οποία θεωρείται πως είναι αυτή από το επίγειο Lidar (αλήθεια εδάφους - ground truth). Το μέγιστο αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στην επιλογή του φίλτρου (στον αλγόριθμο του V3), είτε στο ότι ο αλγόριθμος V3 του CALIPSO παρουσιάζει αδυναμίες στον χαρακτηρισμό κάποιου στρώματος σωματιδίων ως νέφος. Η έκδοση V4 δείχνει βελτιωμένη.

Η Εικόνα 3-33 απεικονίζει την μέση τιμή της επί τοις εκατό διαφοράς της κατακόρυφης κατανομής του CALIPSO από το σύστημα PollyXT για διαφορετικής χωρικής ανάλυσης μεσοποιήσεις στις κατακόρυφες κατανομές του δορυφόρου. Ειδικότερα, οι μεσοποιήσεις γίνονται σε χωρική ανάλυση από 30 έως 100 km από το σταθμό της Αθήνας. Παρατηρούμε πως η μικρότερη σχετική διαφορά εντοπίζεται σε απόσταση 70-80 km.



Εικόνα 3-33 Μέση τιμή της επί τοις εκατό διαφοράς των κατακόρυφων κατανομών του CALIPSO από το σύστημα PollyXT για κατακόρυφες κατανομές από 30 έως 100 km από το σταθμό της Φινοκαλιάς. Παρατηρούμε πως η μικρότερη σχετική διαφορά εντοπίζεται σε απόσταση 70-80 km για τις 2017-04-29 00:23 UTC.

Στην Εικόνα 3-34 παριστάνεται η κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 1064nm και 532nm μεταξύ CALIPSO και PollyXT, οι απόλυτες διαφορές τους και οι σχετικές διαφορές τους.



Εικόνα 3-34 Κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 1064nm και 532nm μεταξύ CALIPSO και PollyXT, οι απόλυτες διαφορές τους και οι σχετικές διαφορές τους στις 2017-04-29 00:23 UTC.

Η κατακόρυφη κατανομή του PollyXT παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές και για το λόγο αυτό οι σχετικές διαφορές των κατακόρυφων κατανομών είναι αρνητικές. Το ίδιο συμβαίνει και για το στρώμα σωματιδίων λίγο πάνω από τα 4 km το οποίο ο CALIPSO

δεν ανιχνεύει καθόλου. Αναφέρουμε εδώ ότι χαμηλότερα από τα 600 m, το PollyXT έχει μικρότερη αντιπροσωπευτικότητα λόγω της μη πλήρους αλληλεπικάλυψης μεταξύ της εκπεμπόμενης δέσμης και του οπτικού πεδίου του τηλεσκοπίου, το οποίο έχει επηρεάσει, και τις τιμές του PollyXT μέχρι τα 800 m. Γενικά λοιπόν το προϊόν του δορυφόρου παρατηρείται πως υποεκτιμά την παρούσα σκηνή. Επίσης παρατηρούνται μικρές απόλυτες διαφορές μέσα στο στρώμα (~ -1 για την V4), ενώ οι σχετικές διαφορές αυξάνονται στα άκρα του στρώματος, περισσότερο στα χαμηλά ύψη.

Σκηνή 2 – 15/05/2017 ώρα 00:24

Η επόμενη σκηνή των μετρήσεων της Φινοκαλιάς είναι στις 15/05/2017 και ώρα 00:24 UTC και στην περίπτωση αυτή η απόσταση της τροχιάς του δορυφόρου από το σταθμό είναι 24km. Για την περίπτωση αυτή παρατίθενται παρακάτω τα προϊόντα CALIPSO που αναφέρονται στον χαρακτηρισμό των αιωρούμενων σωματιδίων (Feature Type; Εικόνα 3-35), στον χαρακτηρισμό των αερολυμάτων (Aerosol Subtype; Εικόνα 3-36) και τον χαρακτηρισμό της εμπιστοσύνης για τον διαχωρισμό σε νέφη ή αιωρούμενα σωματίδια (CAD score; Εικόνα 3-37).

Συγκριτικά με την προηγούμενη σκηνή εδώ παρατηρούνται αιωρούμενα σωματίδια και σε μεγαλύτερα ύψη (μέχρι σχεδόν τα 3.5km). Στην νέα έκδοση V4 στη σκηνή αυτή, υπάρχει καλύτερος υπολογισμός της επιφάνειας του εδάφους (στη Feature Type κατακόρυφη κατανομή), που είναι και μία από τις διορθώσεις της νέας έκδοσης και ανιχνεύονται αιωρούμενα σωματίδια θαλάσσιας σκόνης (dusty marine) ενώ στη V3 χαρακτηρίζονταν ως σκόνη (dust) ή ρυπασμένη σκόνη (polluted dust). Επίσης ακριβώς πάνω από το σταθμό βλέπουμε στη V4 ένα στρώμα ηπειρωτικής ρυπασμένης ς σκόνης με τιμή CAD Score υψηλής εμπιστοσύνης ενώ στην V3 δεν ανιχνεύεται και κατηγοριοποιείται ως σκόνη. Το CAD Score της σκηνής αυτής μας δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα συνολικά συγκριτικά με τη V3.



5: Surface 6: Subsurface 7: Tottaly Attenuated L:low/no confidence



Εικόνα 3-35 Σύγκριση CALIPSO Feature Type V3 (πάνω) και V4 (κάτω) στις 2017-05-15 00:23 UTC.



Εικόνα 3-36 Σύγκριση CALIPSO Aerosol Subtype V3 (πάνω) και V4 (κάτω) στις 2017-05-15 00:23 UTC.



Εικόνα 3-37 Σύγκριση CALIPSO CAD Score V3 (πάνω) και V4 (κάτω) στις 2017-05-15 00:23 UTC.

Η Εικόνα 3-38 απεικονίζει την σύγκριση του CALIPSO V3 και V4 με το lidar NOA PollyXT για τις τιμές της οπισθοσκέδασης στα 1064 nm και 532 nm.



Εικόνα 3-38 Σύγκριση CALIPSO V3 και V4 με το lidar NOA PollyXT για τις τιμές της οπισθοσκέδασης στα 1064nm και 532nm στις 2017-05-15 00:23 UTC.

Από τα παραπάνω παρατηρείται λίγο καλύτερη συσχέτιση της έκδοσης version 4 του CALIPSO με την κατακόρυφη κατανομή οπισθοσκέδασης από το επίγειο Lidar. Ο συντελεστής οπισθοσκέδασης στα 1064 nm, φαίνεται να υπερεκτιμάται από τα προϊόντα του CALIPSO, ειδικά στο στρώμα σωματιδίων, χαμηλότερο του 1.5 km. Επιπλέον, φαίνεται και ότι το φιλτράρισμα που γίνεται στον αλγόριθμο του PollyXT, οδηγεί σε πιο σμουθαρισμένη κατακόρυφη κατανομή από αυτές του δορυφόρου.

Η Εικόνα 3-39 απεικονίζει την μέση τιμή της επί τοις εκατό διαφοράς της κατακόρυφης κατανομής του CALIPSO από το σύστημα PollyXT για διαφορετικής χωρικής ανάλυσης μεσοποιήσεις στις κατακόρυφες κατανομές του δορυφόρου. Ειδικότερα, οι μεσοποιήσεις γίνονται σε χωρική ανάλυση από 30 έως 90 km από το σταθμό της Αθήνας. Παρατηρούμε πως η μικρότερη σχετική διαφορά εντοπίζεται σε απόσταση 24 km.



Εικόνα 3-39 Μέση τιμή της επί τοις εκατό διαφοράς της κατακόρυφης κατανομής του CALIPSO από το σύστημα PollyXT για κατακόρυφη κατανομή από 30 έως 90 km από το σταθμό της Φινοκαλιάς. Παρατηρούμε πως η μικρότερη σχετική διαφορά εντοπίζεται σε απόσταση 24 km στις 2017-05-15 00:23 UTC.

Στην Εικόνα 3-40 παριστάνεται η κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 1064nm και 532nm μεταξύ CALIPSO και PollyXT, οι απόλυτες διαφορές τους και οι σχετικές διαφορές τους.



Εικόνα 3-40 Κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 1064nm και 532nm μεταξύ CALIPSO και PollyXT, οι απόλυτες διαφορές τους και οι σχετικές διαφορές τους στις 2017-05-15 00:23 UTC.

Οι απόλυτες διαφορές που παρατηρούνται στις κατακόρυφες κατανομές οπισθοσκέδασης είναι και σε αυτήν την περίπτωση μικρές (περίπου μεταξύ -1 και 1), αλλά οι σχετικές διαφορές τους κυμαίνονται σε αρκετά μεγάλες τιμές (από -200 έως 200) ειδικά για το κανάλι των 1064 nm.

Σκηνή 3 – 30/06/2017 ώρα 11:38

Η ακριβώς επόμενη σκηνή που μελετήθηκε ήταν στις 30-06-2017 και ώρα 11:37 UTC. Η απόσταση της τροχιάς του δορυφόρου από το σταθμό ήταν 5 km. Για την περίπτωση αυτή παρατίθενται παρακάτω τα προϊόντα CALIPSO που αναφέρονται στον χαρακτηρισμό των αιωρούμενων σωματιδίων (Feature Type; Εικόνα 3-41), στον χαρακτηρισμό των αερολυμάτων (Aerosol Subtype; Εικόνα 3-42) και τον χαρακτηρισμό της εμπιστοσύνης για τον διαχωρισμό σε νέφη ή αιωρούμενα σωματίδια (CAD score; Εικόνα 3-43).

Με τη σύγκριση των σκηνών της version 3 και version 4 παρατηρούμε μόνο μια μικρή διόρθωση στον υπολογισμό της επιφάνειας του εδάφους και αύξηση του CAD Score σε τιμές μεγαλύτερες του -91 σε όλη την σκηνή που μελετάμε, δίνοντας υψηλή εμπιστοσύνη στις μετρήσεις της version 4.



Εικόνα 3-41 Σύγκριση CALIPSO Feature Type V3 (πάνω) και V4 (κάτω) στις 2017-06-30 11:37 UTC.



Εικόνα 3-42 Σύγκριση CALIPSO Aerosol Subtype V3 (πάνω) και V4 (κάτω) στις 2017-06-30 11:37 UTC.



Εικόνα 3-43 Σύγκριση CALIPSO CAD Score V3 (πάνω) και V4 (κάτω) στις 2017-06-30 11:37 UTC.

Όπως φαίνεται στα σχήματα που ακολουθούν και σε αυτή την σκηνή φαίνεται οι αλγόριθμοι της version 4 προσεγγίζουν καλύτερα τη μέτρηση από το επίγειο Lidar, δίνοντας κοντινότερες τιμές στην κατακόρυφη κατανομή του PollyXT. Η κύρια διαφορά είναι χαμηλά, κάτω από το 1 km όπου στην version 3 η κατακόρυφη κατανομή είναι πολύ θορυβώδης. Γενικά σε αυτή τη σκηνή και οι δύο εκδόσεις φαίνεται να αποδίδουν καλά. Λίγο καλύτερα αποτελέσματα για τα στρώματα των αιωρούμενων σωματιδίων έχει η τελευταία έκδοση καθώς οι τιμές των διαφορών είναι περισσότερο κατανεμημένες γύρω από το 0 και για τα δύο είδη διαφορών (απόλυτων και σχετικών).

Η Εικόνα 3-44 απεικονίζει την σύγκριση του CALIPSO V3 και V4 με το lidar NOA PollyXT για τις τιμές της οπισθοσκέδασης στα 1064 nm και 532 nm.



Εικόνα 3-44 Σύγκριση CALIPSO V3 και V4 με το lidar NOA PollyXT για τις τιμές της οπισθοσκέδασης στα 1064nm και 532nm στις 2017-06-30 11:37 UTC.

Η Εικόνα 3-45 απεικονίζει την μέση τιμή της επί τοις εκατό διαφοράς της κατακόρυφης κατανομής του CALIPSO από το σύστημα PollyXT για διαφορετικής χωρικής ανάλυσης μεσοποιήσεις στις κατακόρυφες κατανομές του δορυφόρου. Ειδικότερα, οι μεσοποιήσεις γίνονται σε χωρική ανάλυση από 5 έως 100 km από το σταθμό της Αθήνας.



Εικόνα 3-45 Μέση τιμή της επί τοις εκατό διαφοράς της κατακόρυφης κατανομής του CALIPSO από το σύστημα PollyXT για κατακόρυφη κατανομή από 5 έως 100 km από το σταθμό της Φινοκαλιάς στις 2017-06-30 11:37 UTC.

Στην Εικόνα 3-46 παριστάνεται η κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 1064nm και 532nm μεταξύ CALIPSO και PollyXT, οι απόλυτες διαφορές τους και οι σχετικές διαφορές τους.



Εικόνα 3-46 Κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 1064nm και 532nm μεταξύ CALIPSO και PollyXT, οι απόλυτες διαφορές τους και οι σχετικές διαφορές τους στις 2017-06-30 11:37 UTC.

Οι τιμές των απόλυτων διαφορών που παρατηρούνται στις κατακόρυφες κατανομές οπισθοσκέδασης είναι και σε αυτήν την περίπτωση μικρές (κυμαίνονται μεταξύ του -0.5 και του 0.5 για τα 532 nm), ενώ μεγαλύτερες τιμές εμφανίζονται στις σχετικές διαφορές τους (κυμαίνονται στο 100). Στα χαμηλά ύψη καλύτερη συσχέτιση έχει η V4 με τις τιμές του επίγειου lidar ενώ η V3 μας δίνει τιμές πολύ μεγαλύτερες και στα δύο μήκη κύματος από την αλήθεια εδάφους (ground truth).

Σκηνή 4 – 19/08/2017 ώρα 00:23

Επόμενη σκηνή που μελετάμε με τις παρακάτω κατακόρυφες κατανομές Feature Type, Aerosol Subtype και CAD Score είναι στις 19-08-2017 στις 00:23 UTC. Η απόσταση της τροχιάς του δορυφόρου από το σταθμό ήταν 25 km κατά τη μέτρηση. Για την περίπτωση αυτή παρατίθενται παρακάτω τα προϊόντα CALIPSO που αναφέρονται στον χαρακτηρισμό των αιωρούμενων σωματιδίων (Feature Type; Εικόνα 3-47), στον χαρακτηρισμό των αερολυμάτων (Aerosol Subtype; Εικόνα 3-48) και τον χαρακτηρισμό της εμπιστοσύνης για τον διαχωρισμό σε νέφη ή αιωρούμενα σωματίδια (CAD score; Εικόνα 3-49).



Εικόνα 3-47 Σύγκριση CALIPSO Feature Type V3 (πάνω) και V4 (κάτω) στις 2017-08-19 00:23 UTC.



Εικόνα 3-48 Σύγκριση CALIPSO Aerosol Subtype V3 (πάνω) και V4 (κάτω) στις 2017-08-19 00:23 UTC.



Εικόνα 3-49 Σύγκριση CALIPSO CAD Score V3 (πάνω) και V4 (κάτω) στις 2017-08-19 00:23 UTC.

Στον χαρακτηρισμό της σκηνής της κατακόρυφης κατανομής (Feature Type) στην Έκδοση 4 αυξάνεται η εμπιστοσύνη των μετρήσεων και παρατηρούμε πιο σωστή μέτρηση της επιφάνειας του εδάφους.

Στον χαρακτηρισμό των τύπων αιωρούμενων σωματιδίων παρατηρούνται μεγάλες διαφορές. Στην κατακόρυφη κατανομή της Έκδοσης 3 σχεδόν το σύνολο των αιωρούμενων σωματιδίων είχαν χαρακτηριστεί ως ρυπασμένη σκόνη με κάποια μικρά στρώματα μολυσμένης ηπειρωτικής (polluted continental) και αερολυμάτων θαλάσσιας προέλευσης (clean marine). Στην Έκδοση 4, ως στρώμα ρυπασμένη σκόνης (polluted dust) χαρακτηρίζεται μόνο ένα μικρό στρώμα πάνω από το σταθμό μέτρησης και το μεγαλύτερο στρώμα των αιωρούμενων σωματιδίων της σκηνής χαρακτηρίζεται ως νέου τύπου αιωρούμενο σωματίδιο, θαλάσσια σκόνη (dusty marine). Επίσης τα στρώματα που στην Έκδοση 3 επισημάνθηκαν ως ρυπασμένη ηπειρωτική σκόνη (polluted continental) και θαλάσσιας προέλευσης αερολύματα (clean marine) στην καινούργια έκδοση χαρακτηρίζονται ως στρώματα υπερυψωμένου καπνού (elevated smoke). Στην κατακόρυφη κατανομή του CAD Score η αύξηση της εμπιστοσύνης είναι μεγαλύτερη από την προηγούμενη έκδοση κυρίως στις περιοχές κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.

Στην Εικόνα 3-50 απεικονίζεται η σύγκριση του CALIPSO V3 και V4 με το lidar NOA PollyXT για τις τιμές της οπισθοσκέδασης στα 1064 nm και 532 nm.



Εικόνα 3-50 Σύγκριση CALIPSO V3 και V4 αναφορικά με το Lidar NOA PollyXT για τις τιμές της οπισθοσκέδασης στα 1064 nm και 532 nm) στις 2017-08-19 00:23 UTC.

Η Εικόνα 3-51 απεικονίζει την μέση τιμή της επί τοις εκατό διαφοράς της κατακόρυφης κατανομής του CALIPSO από το σύστημα PollyXT για διαφορετικής χωρικής ανάλυσης μεσοποιήσεις στις κατακόρυφες κατανομές του δορυφόρου. Ειδικότερα, οι μεσοποιήσεις γίνονται σε χωρική ανάλυση από 20 έως 90 km από το σταθμό της Αθήνας. Παρατηρούμε πως η μικρότερη σχετική διαφορά εντοπίζεται σε απόσταση 40 km.



Εικόνα 3-51 Μέση τιμή της επί τοις εκατό διαφοράς της κατακόρυφης κατανομής του CALIPSO από το σύστημα PollyXT για κατακόρυφη κατανομή από 20 έως 90 km από το σταθμό της Φινοκαλιάς) στις 2017-08-19 00:23 UTC.

Στην Εικόνα 3-52 παριστάνεται η κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 1064nm και 532nm μεταξύ CALIPSO και PollyXT, οι απόλυτες διαφορές τους και οι σχετικές διαφορές τους.



Εικόνα 3-52 Κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 1064nm και 532nm μεταξύ CALIPSO και PollyXT, οι απόλυτες διαφορές τους και οι σχετικές διαφορές τους) στις 2017-08-19 00:23 UTC.

Και εδώ φαίνεται πως η Έκδοση 4 προσεγγίζει καλύτερα τη μέτρηση του Lidar, αν και σε αυτή τη σκηνή οι διαφορές των δύο εκδόσεων είναι μικρές. Και στις δύο Εκδόσεις

όμως ο CALIPSO δεν προσεγγίζει καλά την κατακόρυφη κατανομή του PollyXT lidar στα 532nm κυρίως στα ψηλά και στα χαμηλά στρώματα σωματιδίων ενώ δίνει καλύτερες τιμές στα μεσαία στρώματα. Αυτό ενδεχομένως οφείλεται στην εξασθένηση της δέσμης από το πρώτο στρώμα σωματιδίων που συναντά ο CALIPSO. Μικρές διαφορές (< 2) εντοπίζονται στα 1064 nm στο γράφημα της απόλυτης διαφοράς, με την Έκδοση 4 πάλι να παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές και άρα μικρότερες διαφορές σε σχέση με το PollyXT.

Σκηνή 5 – 04/09/2017 ώρα 00:23

Η επόμενη σκηνή που αναλύεται, αντιστοιχεί στις 04-09-2017 και ώρα 00:23 UTC. Για την περίπτωση αυτή παρατίθενται παρακάτω τα προϊόντα CALIPSO που αναφέρονται στον χαρακτηρισμό των αιωρούμενων σωματιδίων (Feature Type; Εικόνα 3-47), στον χαρακτηρισμό των αερολυμάτων (Aerosol Subtype; Εικόνα 3-48) και τον χαρακτηρισμό της εμπιστοσύνης για τον διαχωρισμό σε νέφη ή αιωρούμενα σωματίδια (CAD score; Εικόνα 3-49).



5: Surface 6: Subsurface 7: Tottaly Attenuated L:low/no confidence



Εικόνα 3-53 Σύγκριση CALIPSO Feature Type V3 (πάνω) και V4 (κάτω) στις 2017-09-04 00:23 UTC.



Εικόνα 3-54 Σύγκριση CALIPSO Aerosol Subtype V3 (πάνω) και V4 (κάτω) στις 2017-09-04 00:23 UTC.



Εικόνα 3-55 Σύγκριση CALIPSO CAD Score V3 (πάνω) και V4 (κάτω) στις 2017-09-04 00:23 UTC.

Στην σκηνή αυτή, ανιχνεύτηκαν σωματίδια από τις μετρήσεις του δορυφόρου μέχρι περίπου τα 4,5 km. Η διόρθωση στην περιοχή κοντά στο έδαφος είναι και εδώ εμφανής από την Feature type κατακόρυφη κατανομή καθώς και η αύξηση της εμπιστοσύνης στην ανίχνευση των στρωμάτων των αιωρούμενων σωματιδίων. Πολλά στρώματα αιωρούμενων σωματιδίων χαρακτηρίζονταν ως σκόνη (Dust) και ρυπασμένη σκόνη (Polluted dust) στην Έκδοση 3, ενώ στην Έκδοση 4 χαρακτηρίζονται πλέον ως θαλάσσια σκόνη (Dusty marine) και ως σωματίδια θαλάσσιας προέλευσης (Marine). Το CAD Score παρόλο που έχει μια μικρή μείωση σε αρκετά στρώματα στην Έκδοση 4 παραμένει συνολικά σε τιμές υψηλές.

Στην Εικόνα 3-56 απεικονίζεται η σύγκριση του CALIPSO V3 και V4 με το lidar NOA PollyXT για τις τιμές της οπισθοσκέδασης στα 1064 nm και 532 nm.



Εικόνα 3-56 Σύγκριση CALIPSO V3 και V4 αναφορικά με το Lidar NOA PollyXT για τις τιμές της οπισθοσκέδασης στα 1064 nm και 532 nm στις 2017-09-04 00:23 UTC.

Η Εικόνα 3-57 απεικονίζει την μέση τιμή της επί τοις εκατό διαφοράς της κατακόρυφης κατανομής του CALIPSO από το σύστημα PollyXT για διαφορετικής χωρικής ανάλυσης μεσοποιήσεις στις κατακόρυφες κατανομές του δορυφόρου. Ειδικότερα, οι μεσοποιήσεις γίνονται σε χωρική ανάλυση από 20 έως 90 km από το σταθμό της Αθήνας. Παρατηρούμε πως η μικρότερη σχετική διαφορά εντοπίζεται σε απόσταση 25 km.



Εικόνα 3-57 Μέση τιμή της επί τοις εκατό διαφοράς της κατακόρυφης κατανομής του CALIPSO από το σύστημα PollyXT για κατακόρυφη κατανομή από 20 έως 90 km από το σταθμό της Φινοκαλιάς. Οι κατακόρυφες κατανομές που επεξεργάζονται στη συνέχεια, είναι για τα 25 km στις 2017-09-04 00:23 UTC.

Στην Εικόνα 3-58 παριστάνεται η κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 1064nm και 532nm μεταξύ CALIPSO και PollyXT, οι απόλυτες διαφορές τους και οι σχετικές διαφορές τους.



Εικόνα 3-58 Κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 1064 nm και 532 nm μεταξύ CALIPSO και PollyXT, οι απόλυτες διαφορές τους και οι σχετικές διαφορές τους στις 2017-09-04 00:23 UTC.

Στην σύγκριση των δύο μετρήσεων με τη μέτρηση του LIDAR PollyXT παρατηρούμε ότι στη σκηνή αυτή η Έκδοση 4 παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές συνολικά (υπερεκτιμά) εκτός από τις μετρήσεις πολύ κοντά στο έδαφος που παρατηρούνται αρκετά spikes στην κατακόρυφη κατανομή στην Έκδοση 3. Οι απόλυτες διαφορές είναι πιο μεγάλες για το κανάλι των 1064 nm (κυμαίνονται από -2 έως 4) και γενικά η κατακόρυφη κατανομή του καναλιού αυτού είναι αρκετά θορυβώδες.



Σκηνή 6 – 06/10/2017 ώρα 00:23



Εικόνα 3-59 Σύγκριση CALIPSO Aerosol Subtype V3 (πάνω) και V4 (κάτω) στις 2017-10-06 00:23 UTC.



Εικόνα 3-60 Σύγκριση CALIPSO CAD Score V3 (πάνω) και V4 (κάτω) στις 2017-10-06 00:23 UTC.

Η τελευταία μέτρηση προς μελέτη από το σταθμό της Φινοκαλιάς είναι στις 06-10-2017 και ώρα 00:23 UTC με την απόσταση της τροχιάς του δορυφόρου από το σταθμό στα 29 km. Για την περίπτωση αυτή παρατίθενται παρακάτω τα προϊόντα CALIPSO που αναφέρονται στον χαρακτηρισμό των αιωρούμενων σωματιδίων (Feature Type; Εικόνα 3-59), και τον χαρακτηρισμό της εμπιστοσύνης για τον διαχωρισμό σε νέφη ή αιωρούμενα σωματίδια (CAD score; Εικόνα 3-60).

Στην Έκδοση 4 στην σκηνή αυτή στα 5km ανιχνεύεται ένα στρώμα σκόνης που στην προηγούμενη έκδοση δεν ήταν ορατό. Στον χαρακτηρισμό των αιωρούμενων σωματιδίων βλέπουμε την αλλαγή από ρυπασμένη σκόνη (polluted dust) σε θαλάσσια σκόνη (dusty marine).

Στην Εικόνα 3-61 απεικονίζεται η σύγκριση του CALIPSO V3 και V4 με το lidar NOA PollyXT για τις τιμές της οπισθοσκέδασης στα 1064 nm και 532 nm.



Εικόνα 3-61 Σύγκριση CALIPSO V3 και V4 αναφορικά με το Lidar NOA PollyXT για τις τιμές της οπισθοσκέδασης στα 1064nm και 532nm στις 2017-10-06 00:23 UTC.

Η Εικόνα 3-39 απεικονίζει την μέση τιμή της επί τοις εκατό διαφοράς της κατακόρυφης κατανομής του CALIPSO από το σύστημα PollyXT για διαφορετικής χωρικής ανάλυσης μεσοποιήσεις στις κατακόρυφες κατανομές του δορυφόρου. Ειδικότερα, οι μεσοποιήσεις γίνονται σε χωρική ανάλυση από 20 έως 90 km από το σταθμό της Αθήνας. Παρατηρούμε πως η μικρότερη σχετική διαφορά εντοπίζεται σε απόσταση 25 km.



Εικόνα 3-62 Μέση τιμή της επί τοις εκατό διαφοράς της κατακόρυφης κατανομής του CALIPSO από το σύστημα PollyXT για κατακόρυφη κατανομή από 20 έως 90 km από το σταθμό της Φινοκαλιάς. Οι κατακόρυφες κατανομές που επεξεργάζονται στη συνέχεια, είναι για τα 25 km στις 2017-10-06 00:23 UTC.

Στην Εικόνα 3-63 παριστάνεται η κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 1064nm και 532nm μεταξύ CALIPSO και PollyXT, οι απόλυτες διαφορές τους και οι σχετικές διαφορές τους.



Εικόνα 3-63 Κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης στα 1064 nm και 532 nm μεταξύ CALIPSO και PollyXT, οι απόλυτες διαφορές τους και οι σχετικές διαφορές τους στις 2017-10-06 00:23 UTC.

Όπως και στις προηγούμενες σκηνές, έτσι και σε αυτή παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές συντελεστή οπισθοσκέδασης από την V4 (σε σχέση με την V3) και στα δύο μήκη κύματος. Επιπρόσθετα, η Έκδοση 4 περιλαμβάνει το ψηλότερο στρώμα σωματιδίων που εντοπίστηκε από τον CALIPSO ενώ η Έκδοση 3 όχι. Οι κατακόρυφες κατανομές του CALIPSO και σε αυτήν την σκηνή είναι λιγότερο φιλτραρισμένα από τα αντίστοιχα του επίγειου συστήματος. Οι απόλυτες διαφορές κυμαίνονται από -1.8 έως 1 εντός των στρωμάτων.

Η ανάκτηση των κατακόρυφων κατανομών συντελεστών οπισθοσκέδασης πραγματοποιείται με μεγαλύτερη ακρίβεια στη νεότερη έκδοση των αλγορίθμων της συγκεκριμένης δορυφορικής αποστολής και γίνεται εμφανής στις συγκρίσεις με τις αντίστοιχες κατακόρυφες κατανομές από τα επίγεια συστήματα.

3.4 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα - Συγκριτική Στατιστική

Σε επόμενο βήμα πραγματοποιήθηκε η στατιστική ανάλυση όλων των μετρήσεων για την ποσοτικοποίηση των διαφορών μεταξύ των επίγειων και του δορυφορικού lidar συστήματος για τις δύο εκδόσεις του αλγορίθμου του CALIPSO. Στην Εικόνα 3-64, παρουσιάζεται η διασπορά των μέσων απόλυτων διαφορών μεταξύ των μετρήσεων των lidar του EOLE και PollyXT με τον CALIPSO για τις κατακόρυφες κατανομές του συντελεστή οπισθοσκέδασης (χωρικής ανάλυσης 5 km). Η επεξεργασία πραγματοποιήθηκε και για τους δύο αλγορίθμους του CALIPSO (με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης με το V3 του CALIPSO και με μπλε χρώμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης με το V4 του CALIPSO), και για τα δύο μήκη κύματος.



Εικόνα 3-64 Διασπορά των μέσων απόλυτων διαφορών μεταξύ των κατακόρυφων κατανομών των συντελεστών οπισθοσκέδασης και εξασθένησης (κατακόρυφη κατανομή χωρικής ανάλυσης 5 km) των επίγειων σταθμών lidar (σταθμός Αθήνας και Φινοκαλιάς) και του CALIPSO (αλγόριθμος V3 και V4), για τα μήκη κύματος 1064 nm και 532 nm.

Οι απόλυτες διαφορές και για τις δύο εκδόσεις του αλγορίθμου με τις αντίστοιχες επίγειες μετρήσεις, ακολουθούν γκαουσιανή κατανομή, με την V4 να παρουσιάζει πιο ομοιόμορφη κατανομή γύρω από το 0. Συγκεντρωτικά, παρατηρείται καλύτερη συμφωνία για το μήκος κύματος των 532 nm στην έκδοση 4 συγκριτικά με την έκδοση 3 του CALIPSO, με μικρότερη τιμή της μέσης τυπικής απόκλισης των διαφορών (μέση τυπική απόκλιση ίση με 0.6 για την v4, και μέση τυπική απόκλιση ίση με 5.7 για την V3). Όσον αφορά το κανάλι των 1064 nm, σε αυτό η μέση τιμή των διαφορών είναι πιο κοντά στο 0, για τον αλγόριθμο V3, και η μέση τιμή της τυπικής απόκλισης απόκλισης είναι παρόμοια για τις δύο εκδόσεις του αλγορίθμου.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική πραγματοποιείται η σύγκριση των προϊόντων των δύο εκδόσεων του αλγορίθμου (V3 και V4) του CALIPSO, με τα αντίστοιχα προϊόντα επίγειων συστημάτων τηλεπισκόπησης. Η σύγκριση των κατακόρυφων κατανομών της οπισθοσκέδασης στα 355 nm και 1064 nm επικεντρώνεται σε επιλεγμένες ημέρες μετρήσεων (case studies) για τους σταθμούς της Φινοκαλιάς και της Αθήνας. Στο δεύτερο μέρος της σύγκρισης, πραγματοποιείται και παρουσίαση των συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων των απόλυτων διαφορών των κατακόρυφων κατακόρυφων κατανομών του δορυφορικού συστήματος με τα αντίστοιχα επίγεια συστήματα. Η σύγκριση αποσκοπεί στη μελέτη της βελτιωμένης έκδοσης του αλγορίθμου επεξεργασίας του CALIPSO (V4) και στην ποσοτικοποίηση των διαφορών των δύο εκδόσεων του αλγορίθμου, θεωρώντας ως κατακόρυφη κατανομή αναφοράς αυτή των επίγειων συστημάτων.

Συνολικά, από την σύγκριση των κατακόρυφων κατανομών των συντελεστών οπισθοσκέδασης των δύο εκδόσεων των αλγορίθμων με τις αντίστοιχες των επίγειων συστημάτων, για τις επιλεγμένες μέρες των μετρήσεων, προκύπτει ότι οι μεγαλύτερες διαφορές παρατηρούνται σε χαμηλά ύψη (χαμηλότερα του 1.5km περίπου). Η ασυμφωνία είναι αποτέλεσμα της μείωσης του λόγου σήματος προς θόρυβο για το δορυφορικό σύστημα (το σήμα έχει εξασθενίσει αρκετά στα ύψη κοντά στην επιφάνεια του εδάφους) και της αδυναμίας καταγραφής του επίγειου συστήματος λόγω μη πλήρους αλληλοεπικάλυψης της δέσμης του laser και του οπτικού πεδίου του τηλεσκοπίου, κυρίως για τα πρώτα χιλιόμετρα.

Επιπλέον, οι κατακόρυφες κατανομές του CALIPSO είναι λιγότερα φιλτραρισμένες από τις αντίστοιχες κατακόρυφες κατανομές των επίγειων συστημάτων. Γενικά, ο μικρός λόγος σήματος προς θόρυβο απαιτεί καλύτερο φιλτράρισμα με αποτέλεσμα να υπάρχουν παραμορφώσεις στο τελικό αποτέλεσμα ειδικά για λεπτά στρώματα τα οποία είναι συγκρίσιμα με το παράθυρο των φίλτρων. Μια ακόμα πιθανή ερμηνεία για τα spikes που παρατηρούνται στις κατακόρυφες κατανομές είναι πως ο αλγόριθμος V3 του CALIPSO παρουσιάζει αδυναμίες στον χαρακτηρισμό κάποιου στρώματος σωματιδίων ως νέφος λόγω του υψηλού συντελεστή αποπόλωσης και των τιμών Angstrom Exponent όταν κυμαίνονται κοντά στο Ο. Τα μέγιστα αυτά εξαλείφονται στην 4^η έκδοση καθώς ο CALIPSO χρησιμοποιεί διαφορετική προσέγγιση στον διαχωρισμό νεφών και αιωρούμενων σωματιδίων. Γενικότερα, η 4^η έκδοση αποδίδει καλύτερα σε λεπτά στρώματα αιωρούμενων σωματιδίων, κάτι που δεν είναι ορατό στην έκδοση 3. Οι πυκνότητες πιθανότητας (PDFs) για τον αλγόριθμο CAD score έχουν βελτιωθεί στην νεότερη έκδοση και ο αλγόριθμος εφαρμόζεται και σε στρώματα που ανιχνεύονται σε ανάλυση μιας λήψης και σε στρώματα που ανιχνεύονται στη στρατόσφαιρα. Επιπλέον στην τελευταία έκδοση γίνεται εισαγωγή ενός νέου προϊόντος στρώματος 5km (5km aerosol/cloud profile), το οποίο αναφέρει τις χωρικές και οπτικές ιδιότητες όλων των στρωμάτων από νέφη και αιωρούμενα σωματίδια που

ανιχνεύθηκαν, σε ένα μόνο αρχείο και είναι και το κύριο προϊόν που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία.

Διαφορές των κατακόρυφων κατανομών των συντελεστών οπισθοσκέδασης και εξασθένησης, μεταξύ των επίγειων συστημάτων και του δορυφορικού, οφείλονται και στον καθορισμό του ύψους αναφοράς, το οποίο επηρεάζει έντονα το συντελεστή οπισθοσκέδασης οδηγώντας σε υποεκτίμηση ή υπερεκτίμηση. Το πρόβλημα είναι εντονότερο όταν η επιλογή του ύψους αναφοράς γίνεται σε περιοχή με πολύ θόρυβο καθώς η τιμή αναφοράς επηρεάζεται έντονα από το θόρυβο. Η επιλογή του ύψους αναφοράς με διαφορετικό τρόπο στις δύο εκδόσεις των αλγορίθμων, και η καλύτερη συμφωνία των κατανομών οπισθοσκέδασης της V4 με τα αντίστοιχα του επίγειου συστήματος, αποδεικνύουν την βελτίωση του αλγορίθμου.

Από τη στατιστική επεξεργασία των κατακόρυφων κατανομών των συντελεστών οπισθοσκέδασης, παρατηρούνται ότι οι μέσες απόλυτες διαφορές των προϊόντων του δορυφορικού και του επίγειου συστήματος, κυμαίνονται μεταξύ -2 και 2, με μικρότερες απόλυτες τιμές να παρατηρούνται για την 4^η έκδοση. Οι μέσες ποσοστιαίες διαφορές επίγειων και δορυφορικών συντελεστών οπισθοσκέδασης και εξασθένησης, κυμαίνονται περίπου από -150% έως 150%, με τις μέσες ποσοστιαίες διαφοράς μεταξύ V4 και επίγειων συστημάτων να μειώνονται. Η μείωση της διαφοράς μεταξύ προϊόντων δορυφορικού και επίγειου συστήματος, οδηγεί στο συμπέρασμα της βελτιωμένης έκδοσης των αλγορίθμων του CALIPSO. Πιο συγκεκριμένα, για τις κατακόρυφες κατανομές χωρικής ανάλυσης 5km παρατηρήθηκε αύξηση (κατά απόλυτες τιμές) σε σύγκριση με την προηγούμενη έκδοση, περίπου 81% και για τα δύο μήκη κύματος.

Τέλος, θα πρέπει να τονιστεί πως σε ένα μεγάλο ποσοστό των σκηνών που επεξεργάστηκαν, κυριαρχούν σωματίδια σκόνης από την έρημο Σαχάρα. Στην τελευταία έκδοση 4.20 η τιμή του λόγου Lidar (Lidar Ratio) άλλαξε για τα σωματίδια της σκόνης από τα 40sr στα 44sr για το μήκος κύματος των 532nm καθώς μελέτες που αφορούν στο οπτικό πάχος των αερολυμάτων απέδειξαν υποεκτίμηση του δορυφόρου πάνω από περιοχές της Αφρικής - αλλά και άλλων περιοχών στις οποίες κυριαρχούν έρημοι (π.χ. Μέση Ανατολή) - συγκριτικά με μετρήσεις από το παγκόσμιο δίκτυο φωτομέτρων AERONET (Schuster et al., 2012). Έτσι η νέα τιμή για τον λόγο Lidar φαίνεται να αποδίδει καλύτερα για τα σωματίδια ερημικής σκόνης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Amiridis, V., Wandinger, U., Marinou, E., Giannakaki, E., Tsekeri, A., Basart, S., Kazadzis, S., Gkikas, A., Taylor, M., Baldasano, J. and Ansmann, A., 2013. Optimizing CALIPSO Saharan dust retrievals, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(23), pp.12089-12106.
- Amodeo, Aldo & D'Amico, Giuseppe & Giunta, Aldo & Papagiannopoulos, Nikolaos & Papayannis, Alex & Argyrouli, Athina & Mylonaki, Maria & Tsaknakis, Georgios & Kokkalis, Panos & Soupiona, Ourania & Tzanis, Chris. (2018). ATHL116: the ATHens Lidar Intercomparison campaign. EPJ Web of Conferences. 176. 09008. 10.1051/epjconf/201817609008.
- Baumgarten G., Fiedler J., Lübken F.-J., von Cossart G., Particle properties and water content of noctilucent clouds and their interannual variation, AGU Atmospheres, Volume 113, Issue D6, 2008.
- Burton, S., Ferrare, R., Vaughan, M., Omar, A., Rogers, R., Hostetler, C. and Hair, J., 2013. Aerosol
- classification from airborne HSRL and comparisons with the CALIPSO vertical feature mask. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(5), pp.1397-1412.
- Dave, W., & Jason, T. (2016). CALIPSO Data Products: progress and status. *ICAP*. College Park, MD, USA.
- Engelmann, R., Kanitz, T., Baars, H., Heese, B., Althausen, D., Skupin, A., Wandinger, U., Komppula,
- M., Stachlewska, I., Amiridis, V., Marinou, E., Mattis, I., Linné, H. and Ansmann, A., 2016. The automated multiwavelength Raman polarization and water-vapor lidar PollyXT: the neXT generation. Atmospheric Measurement Techniques, 9(4), pp.1767-1784.
- Finlayson-Pitts, B. J., Pitts, J. N. Jr., Chemistry of The Upper And Lower Atmosphere, Academic Press, 2000.
- Freudenthaler, V., M. Esselborn, M. Wiegner, B. Heese, M. Tesche, A. Ansmann, D. Müller, D. Althausen, M. Wirth, A. Fix, G. Ehret, P. Knippertz, C. Toledano, J. Gasteiger, M.Garhammer and M. Seefeldner, Depolarization ratio profiling at several wavelengths in pure Saharan dust during SAMUM 2006, 2009, Tellus, 61B, 165-179, 2009.
- Getzewich, B., Vaughan, M., Hunt, W., Avery, M., Powell, K., Tackett, J., Winker, D., Kar, J., Lee, K. and Toth, T., 2018. CALIPSO lidar calibration at 532&: version 4 daytime algorithm. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(11), pp.6309-6326.
- Heymsfield, A., 2005. Extinction-ice water content-effective radius algorithms for CALIPSO. Geophysical Research Letters, 32(10).
- Heymsfield, A., Winker, D., Avery, M., Vaughan, M., Diskin, G., Deng, M., Mitev, V. and Matthey, R., 2014. Relationships between Ice Water Content and Volume Extinction Coefficient from In Situ Observations for Temperatures from 0° to -86°C: Implications for Spaceborne Lidar Retrievals. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 53(2), pp.479-505.
- Kar, J., Liu, Z., Vaughan, M., Tackett, J. L., Zeng, S., Getzewich, B., et al. (2016). Cloud Aerosol Discrimination (CAD) in CALIOP version 4 level 2 data CAD everywhere! CALIPSO CloudSat Science Team Meeting. Newport News, VA, USA.
- Kar, J., Vaughan, M., Lee, K., Tackett, J., Avery, M., Garnier, A., Getzewich, B., Hunt, W., Josset, D., Liu, Z., Lucker, P., Magill, B., Omar, A., Pelon, J., Rogers, R., Toth, T., Trepte, C., Vernier, J., Winker, D. and Young, S., 2018. CALIPSO lidar calibration at 532;nm: version 4 nighttime algorithm. Atmospheric Measurement Techniques, 11(3), pp.1459-1479.
- Kar,J.,Liu,Z., Vaughan,M.,Tackett,J.L.,Zeng,S.,Getzewich,B.,et al. (2016). Cloud Aerosol Discrimination (CAD) in CALIOP version 4 level 2 data CAD everywhere! Calipso CloudSat Science Team Meeting. Newport News,VA,USA.

- Kar,J.,Liu,Z., Vaughan,M.,Tackett,J.L.,Zeng,S.,Getzewich,B.,et al. (2016). Cloud Aerosol Discrimination (CAD) in CALIOP version 4 level 2 data CAD everywhere! Calipso CloudSat Science Team Meeting. Newport News,VA,USA.
- Lopes, F., Landulfo, E. and Vaughan, M., 2013. Evaluating CALIPSO's 532 nm lidar ratio selection algorithm using AERONET sun photometers in Brazil. Atmospheric Measurement Techniques, 6(11), pp.3281-3299.
- Mamouri, R., Amiridis, V., Papayannis, A., Giannakaki, E., Tsaknakis, G. and Balis, D., 2009. Validation of CALIPSO space-borne-derived attenuated backscatter coefficient profiles using a ground-based lidar in Athens, Greece. Atmospheric Measurement Techniques, 2(2), pp.513-522.
- Measures, R. A., Laser remote sensing, Fundamentals and Applications, Krieger Publishing Company, N. York, 1992.
- NASA. 2020. Cloud-Aerosol Lidar And Infrared Pathfinder Satellite Observations. [online] Available at: <<u>https://www.nasa.gov/mission_pages/calipso/main/index.html</u>> [Accessed 27 May 2020].
- Omar A. H. D.M. Winker, C. Kittaka, M.A. Vaughan, Z. Liu, Y. Hu, C.R. Trepte, R.R. Rogers, R.A. Ferrare, K. Lee, R.E. Kuehn, and C.A. Hostetler, The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm, J. of Atmos. and Ocean. Techn., 26, 1994 2014, 2009.
- Omar, A., Winker, D., Vaughan, M., Hu, Y., Trepte, C., Ferrare, R., Lee, K., Hostetler, C., Kittaka, C., Rogers, R., Kuehn, R. and Liu, Z., 2009. The CALIPSO Automated Aerosol Classification and Lidar Ratio Selection Algorithm. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 26(10), pp.1994-2014.
- Papayannis A., D. Balis, V. Amiridis, G. Chourdakis, G. Tsaknakis, C. Zerefos, A. Castanho, S.Nickovic, S. Kazadzis, J. Grabowski, 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, Atmos. Chem. Phys., 5, 2075-2110,2005b.
- Papayannis, A., G. Ancellet, J. Pelon, G. Mégie, Multiwavelength LIDAR for Ozone Measurements in the Troposphere and the Lower Stratosphere, Appl. Opt., 29, 467-476, 1990.
- Papayannis, A., J. Porteneuve, D. Balis, C. Zerefos, E. Galani, Design of a new DIAL system for tropospheric and lower stratospheric ozone monitoring in Northern Greece, Phys. Chem. Earth, 24, 439-442, 1999
- Papayannis, A., Mamouri, R. E., Amiridis, V., Giannakaki, E., Veselovskii, I., Kokkalis, Tsaknakis, G., Balis, D., Kristiansen, N. I., Stohl, A., Korenskiy, M., Allakhverdiev, K., Huseyinoglu, M. F., and Baykara, T.: Optical properties and vertical extension of ash layers over the Eastern Mediterranean as observed by Raman lidars during the Eyjafjallajökull eruption (May 2010), Atmos. Environ., 48, 56–65, 2012.
- Papayannis, A., Amiridis V., Mona L., Tsaknakis G., Balis D., Bösenberg J., Chaikovski A., De Tomasi F., Grigorov I., Mattis I., Mitev V., Müller D., Nickovic S., Pérez C., Pietruczuk A., Pisani G., Ravetta F., Rizi V., Sicard M., Trickl T., Wiegner M., Gerding M., Mamouri R.E., D'Amico G., and Pappalardo G., 2008: Systematic lidar observations of Saharan dust over Europe in the frame of EARLINET (2000-2002). J. Geophys. Res., 113, D10204, 2008.
- Papayannis, Alex & Mamouri, Rodanthi-Elisavet & Amiridis, Vassilis & Kazadzis, Stelios & Pérez García-Pando, Carlos & Tsaknakis, G. & Kokkalis, Panos & Baldasano, José. (2009). Systematic lidar observations of Saharan dust layers over Athens, Greece in the frame of EARLINET project (2004-2006). Annales Geophysicae. 27. 3611-3620. 10.5194/angeo-27-3611-2009.
- Proestakis, E., Amiridis, V., Marinou, E., Binietoglou, I., Ansmann, A., Wandinger, U., Hofer, J., Yorks, J., Nowottnick, E., Makhmudov, A., Papayannis, A., Pietruczuk, A., Gialitaki, A., Apituley, A., Szkop, A., Muñoz Porcar, C., Bortoli, D., Dionisi, D., Althausen, D., Mamali, D., Balis, D., Nicolae, D., Tetoni, E., Liberti, G., Baars, H., Mattis, I., Stachlewska, I., Voudouri, K., Mona, L., Mylonaki, M., Perrone, M., Costa, M., Sicard, M., Papagiannopoulos, N., Siomos, N., Burlizzi, P., Pauly, R., Engelmann, R., Abdullaev, S. and Pappalardo, G., 2019. EARLINET evaluation of the

CATS Level 2 aerosol backscatter coefficient product. Atmospheric Chemistry and Physics, 19(18), pp.11743-11764.

- Schuster G. L., Vaughan M., MacDonnell D., Su W., Winker D., Dubovik O., Lapyonok T., and. Trepte C., Comparison of CALIPSO aerosol optical depth retrievals to AERONET measurements, and a climatology for the lidar ratio of dust, Atmos. Chem. Phys., 12, 7431–7452, 2012
- Seinfeld, John H., and Spyros N. Pandis. Atmospheric Chemistry and Physics: from Air Pollution to Climate Change. Wiley, 2012.
- Seventeen-year systematic measurements of dust aerosol optical properties using the eole ntua lidar system (2000-2016)
- Soupiona O., Mylonaki M., Papayannis A., Argyrouli A., Kokkalis P., Tsaknakis G., EPJ Web Conf. 176 05029 (2018), DOI: 10.1051/epjconf/201817605029
- Stevens, Bjorn, and Sandrine Bony. Water in the Atmosphere. Rosen Pub Group, 2004. Toth, T., Zhang, J., Campbell, J., Reid, J., Shi, Y., Johnson, R., Smirnov, A., Vaughan, M. and Winker, D., 2013. Investigating enhanced Aqua MODIS aerosol optical depth retrievals over the mid-to-high latitude Southern Oceans through intercomparison with co-located CALIOP, MAN, and AERONET data sets. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118(10), pp.4700-4714.
- Van de Hulst, Hendrik Christoffel Hulst, H. C., Light Scattering by Small Particles, Dover Publications, Courier Corporation, 1981
- Weitkamp C., Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere, Springer, Singapore, 2005.
- William J. Lentz, Alfred W. Cooper, M. M. Regush, Improved Klett lidar inversion techniques, Proc. SPIE 2222, Atmospheric Propagation and Remote Sensing III, (29 June 1994);.
- Winker D.M. and M.T.Osborn, Preliminary analysis of observations of the Pinatubo volcanic plume with a polarization-sensitive lidar. Geophys. Res. Lett., 19, 171-174, 1992.
- Winker, D. M., and Coauthors, The CALIPSO Mission: A Global 3D View of Aerosols and Clouds, Bull. Amer. Meteor. Soc., 91, 1211–1229, 2010.
- Winker, D. M., and Coauthors, The CALIPSO Mission: A Global 3D View of Aerosols and Clouds, Bull. Amer. Meteor. Soc., 91, 1211–1229, 2010.
- Winker, D. M., Tackett, J. L., Getzewich, B. J., Liu, Z., Vaughan, M. A., Rogers, R. R., The global 3-D distribution of tropospheric aerosols as characterized by CALIOP, Atmos.Chem. Phys., 13, 3345-3361, 2013.
- Winker, D.M., J.Pelon and M.P.McCormick: The CALIPSO mission: Spaceborne lidar for observation of aerosols and clouds. Proc.SPIE, 4893, 1-11, 2003.
- ww-calipso.larc.nasa.gov.2020. CALIPSO Lidar Level 2 All Products V4.10 Quality Summary. [online] Available at: <<u>https://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/calipso_users_guide/qs/cal_lid_l2_all_v4-10.php</u> >[Accessed 27 May 2020].
- www-calipso.larc.nasa.gov. 2020. CALIPSO's New 5km Merged Layer Product for Version 4 Level
 2 Data Products. [online] Available at: < <u>https://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/calipso_users_guide/qs/qs_lid_l2_all_v4-10_files/CALIPSOV4MergedLayerProduct.pdf</u>> [Accessed 27 May 2020].
- www-calipso.larc.nasa.gov. 2020. Ice clouds lidar ratio and multiple scattering factor in Version
 4 CALIOP Level 2 algorithm. [online] Available at: https://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/calipso_users_guide/qs/qs_lid_l2_all_v4-10_files/Poster_lidar_ratio_multiple_scattering_CCSTM_2016_Garnier_final_print.pdf>
 [Accessed 27 May 2020].
- www-calipso.larc.nasa.gov. 2020. Improvements to the CALIOP Surface Detection Algorithm. [online] Available at: < https://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/calipso_users_guide/qs/qs_lid_l2_all_v4-20_files/mvCALIOPSurfaceDetectionPoster-CCSTM2016a.pdf> [Accessed 27 May 2020].

- www-<u>eosweb.larc.nasa.gov/project/calipso/dpc</u>. CALIPSO Data Products Catalog. [online] Available: <<u>https://eosweb.larc.nasa.gov/project/calipso/dpc</u>>[Accessed 27 May 2020].
- Young, S. A., Vaughan, M. A., Garnier, A., Tackett, J. L., Lambeth, J. D., and Powell, K. A.: Extinction and optical depth retrievals for CALIPSO's Version 4 data release, Atmos. Meas. Tech., 11, 5701-5727,2018.
- Young, S. A., Vaughan, M. A., Garnier, A., Tackett, J. L., Lambeth, J. D., and Powell, K. A.: Extinction and optical depth retrievals for CALIPSO's Version 4 data release, Atmos. Meas. Tech., 11, 5701–5727, 2018.
- Young, H. (1994). Φυσική Τόμος Α'. Αθήνα: Εκδόσεις Παπαζήση
- Ποϊραζίδης, Κ., Βούλγαρης, Μ.Δ., Κεφαλάς, Γ., Λορίλια, Ρ.Σ., (2013), Βασικές Αρχές της Τηλεπισκόπησης, Εργαστήριο Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Οικολογίας, ΑΤΕΙ Ιόνιων Νήσων-Τμήμα Τεχνολογία Περιβάλλοντος & Οικολογίας
- Φλόκας, Α., & Χρονοπούλου, Α. (2010). Μαθήματα Γεωργικής Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΥΛΗ

Τα αιωρούμενα σωματίδια αλληλεπιδρούν με την ακτινοβολία μέσω σκέδασης και απορρόφησης μέρος του φωτός που προσπίπτει σε αυτά. Μέσω της σκέδασης, η ακτινοβολία επανεκπέμπεται σε διάφορες διευθύνσεις και μέσω της απορρόφησης η ακτινοβολία μετατρέπεται σε θερμική ή χημική ενέργεια. Και οι δύο διαδικασίες είναι περίπλοκες και επηρεάζονται άμεσα από ένα πλήθος ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων (μέγεθος, σχήμα, σύσταση, μορφολογία, συγκέντρωση κ.α.). Η μείωση της ορατότητας λόγω των αιωρούμενων σωματιδίων οφείλεται στη σκέδαση του φωτός από τα σωματίδια με μέγεθος στην περιοχή του ορατού φωτός 400 - 800 nm. Η σκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας οφείλεται τόσο στην ύπαρξη των αιωρούμενων σωματιδίων (φαινόμενο σκέδασης Mie), όσο και των μορίων της ατμόσφαιρας (φαινόμενο σκέδασης Rayleigh). Και στις δύο περιπτώσεις το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που επανεκπέμπεται παραμένει σταθερό (ελαστική σκέδαση). Αναφέρουμε εδώ και την ύπαρξη της μη-ελαστικής σκέδασης Raman που οφείλεται στα μόρια της ατμόσφαιρας (πχ. N2, O2, O3, H2O κλπ.) (Measures, 1992).

Σκέδαση Rayleigh

Στη σκέδαση Rayleigh τα σκεδαζόμενα σωμάτια (μόρια) της ατμόσφαιρας έχουν διάμετρο μικρότερη από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (α << 1) (πχ. για το ορατό φως έχουμε σωμάτια διαμέτρου \leq 0.1 μm). Οι βασικές αρχές της μοριακής σκέδασης περιγράφηκαν από τον λόρδο Rayleigh το 1871. Στη μοριακή σκέδαση παρεμβαίνει η διαφορική ενεργός διατομή σκέδασης doR/dΩ (differential scattering cross section) Rayleigh για μονοχρωματικό πολωμένο φως και για οπτικά ισοτροπικά μόρια (Measures, 1992):

$$d\sigma R / d\Omega = \left[\pi^2 (n^2 - 1)^2 / N^2 \lambda^4\right] \left[\cos 2\varphi \cos 2\theta + \sin 2\varphi\right]$$

όπου, n είναι το πραγματικό μέρος του δείκτη διάθλασης της ατμόσφαιρας , N η συγκέντρωση (mol cm^(-3)) των αερίων της ατμόσφαιρας και θ, φ οι γωνίες (σε σφαιρικές συντεταγμένες) που σχηματίζουν η προσπίπτουσα και η σκεδαζόμενη πολωμένη ακτινοβολία. Με βάση την εξίσωση αυτή η σκέδαση από τη μοριακή ατμόσφαιρα (σκέδαση Rayleigh) είναι αντιστρόφως ανάλογη της τέταρτης δύναμής του λ (~λ^(-4)), έτσι η ηλιακή ακτινοβολία με μικρότερο μήκος κύματος (πχ. μπλε

περιοχή του φάσματος λ ≈ 450 nm) σκεδάζεται εντονότερα από ότι η ακτινοβολία στην ερυθρά περιοχή του φάσματος (λ ≈ 650 nm), κάτι που εξηγεί και το μπλε χρώμα του καθαρού ουρανού.

Σκέδαση Mie

Στη σκέδαση Mie σημαντικό ρόλο παίζει το μέγεθος του σκεδαζόμενου σωματιδίου σε σχέση με το μήκος κύματος λ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, καθώς επίσης και οι οπτικές ιδιότητες των σωματιδίων που σχετίζονται με τον δείκτη διάθλασής τους: m=n+ik (n και k είναι το πραγματικό και το φανταστικό μέρος, αντίστοιχα, του δείκτη διάθλασης ο οποίος είναι συνάρτηση του μήκους κύματος). Ο δείκτης n καταδεικνύει την ταχύτητα του φωτός στο υλικό μέσο, ενώ ο δείκτης k είναι ένδειξη της απορροφητικότητας του υλικού του σωματιδίου αυτού. Ορίζεται η παράμετρο μεγέθους α (size parameter) του σκεδάζοντος αερολύματος:

$$\alpha \ \equiv \ 2\pi r \ / \ \lambda \ = \ \pi Dp \ / \ \lambda \, ,$$

που σχετίζεται με την ακτίνα του r (και τη διάμετρο Dp) και το μήκος κύματος λ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Στη σκέδαση Mie τα σκεδάζοντα σωματίδια της ατμόσφαιρας (πχ. αιωρούμενα σωματίδια (ή αερολύματα), ομίχλη, κλπ.) έχουν διάμετρο συγκρίσιμη με το μήκος κύματος λ της ηλιακής ακτινοβολίας, οπότε, α \approx 1. Στην περίπτωση σκέδασης από σωματίδια με διάμετρο πολύ μεγαλύτερη (Dp > 100 μm) από το μήκος κύματος λ της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (πχ. σκέδαση από σταγονίδια βροχής) έχουμε φαινόμενα πολλαπλής σκέδασης (multiple scattering) που αναφέρονται στη γεωμετρική οπτική (οπότε α >> 1).

Στην Εικόνα Π.1. που ακολουθεί παρατηρούμε την κατανομή της σκεδαζόμενης έντασης από σωματίδια διαφορετικών διαστάσεων σε σχέση με το μήκος κύματος του φωτός που προσπίπτει σε αυτό. Παρατηρούμε ότι υπάρχει μεγάλη ασυμμετρία μεταξύ της εμπρόσθιας σκέδασης (forward scattering) και της οπισθοσκέδασης (backscattering).



Εικόνα Π.1. Τρισδιάστατη κατανομή της έντασης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας η οποία εξαρτάται από το σχήμα και την παράμετρο μεγέθους των αερολυμάτων (Seinfeld and Pandis, 1998)

Αποπόλωση

Στην περίπτωση μη πολωμένου φωτός εισάγουμε τον συντελεστή αποπόλωσης δ (depolarization) (δ = P[⊥] / P ||), όπου P[⊥] και P || είναι η ένταση του οπισθοσκεδαζόμενου φωτός στις πολώσεις [⊥] και || που είναι μεταξύ τους κάθετες (van de Hust, 1981). Τυπικές τιμές του δ για αερολύματα κυμαίνονται από 0.02 (σφαιρικά σωματίδια) έως 0.3 (σωματίδια σκόνης, ηφαιστειακά). Αντίστοιχα, πολωμένη δέσμη laser αποπολώνεται όταν σκεδασθεί από παγοκρυστάλλους, υδροσταγονίδια νεφών ή συμπυκνωμένα νανοσωματίδια υδρατμών (π.χ. Baumgarten et al., 2002).

Σκέδαση Raman

Η σκέδαση Raman περιλαμβάνει την αλλαγή στην ενέργεια ταλάντωσης – δόνησης του μορίου (Εικόνα Π2). Η συχνότητα αλλαγής της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας, ν, αντιστοιχεί στην διαφορά ενέργειας μεταξύ της αρχικής και της τελικής κατάστασης του μορίου και άρα είναι συγκεκριμένη για κάθε μόριο. Η αλλαγή του ενεργειακού επιπέδου ταλάντωσης των μορίων αντιστοιχεί σε αλλαγή της συχνότητας από μερικές εκατοντάδες μέχρι μερικές χιλιάδες k (όπου k κυματάριθμος με $k = 2\pi/\lambda$) ανάλογα με το μόριο που υφίσταται τη σκέδαση Raman (Εικονα Π3). Η φασματική ανάλυση της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας οδηγεί στην ανίχνευση πλήθους ατμοσφαιρικών συστατικών. Γενικά κατά τη σκέδαση Raman ισχύει ότι:

$$E = hv_0 \pm hv_m$$
Οι παραπάνω μηχανισμοί προκαλούν την εξασθένηση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Ο συντελεστής εξασθένησης α μπορεί να γραφεί ως άθροισμα των επιμέρους συντελεστών που προξενούν την εξασθένηση.

$$a = a_{Ray} + a_{M\iota\varepsilon} + \alpha_{abs}$$

Όπου, α_Ray: η εξασθένηση που προκαλείται λόγω σκέδασης Rayleigh, α_Mie: η εξασθένηση που προκαλείται λόγω σκέδασης Mie και α_abs: η εξασθένηση που προκαλείται λόγω απορρόφησης



Εικόνα Π2 Σκέδαση Raman (Πηγή: http://bwtek.com/raman-theory-of-raman-scattering/)



Εικόνα Π3 Το ατμοσφαιρικό φάσμα του συντελεστή οπισθοσκέδασης Raman μετά από διέγερση μήκους κύματος στα 355 nm 2005 <u>(Weitkamp</u>, 2005)