

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΑΣΤΑΚΟΥΛΗ ΕΛΛΗ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΩΝ ΣΕ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΚΛΙΜΑΚΑ (DEVELOPMENT OF A SATELLITE ALGORITHM FOR DETECTION OF MARITIME AEROSOLS ON A GLOBAL SCALE)

ΠΜΣ-Ατμοσφαιρικές Επιστήμες και Περιβάλλον

Τμήμα Φυσικής

Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ  
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
<<ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ>>**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ  
ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΩΝ ΣΕ  
ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΚΛΙΜΑΚΑ**

**ΜΑΣΤΑΚΟΥΛΗ ΕΛΛΗ**

**772**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΧΑΤΖΗΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΣ (ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ)**

**ΙΩΑΝΝΙΝΑ 2023**



<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....	3
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	5
<b>ABSTRACT</b> .....	8
<b>ΛΙΣΤΑ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ</b> .....	11
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	12
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΩΝ</b> .....	211
1.1. ΟΡΙΣΜΟΣ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΩΝ .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b> 21
1.2. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΩΝ .....	22
1.3. ΠΗΓΕΣ ΚΑΙ ΕΙΔΗ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΩΝ .....	24
1.3.1. ΕΡΗΜΙΚΗ ΣΚΟΝΗ (MINERAL DUST) .....	25
1.3.2. ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΑ Ή ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΑ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥ ΑΛΑΤΟΣ (SEA SALT AEROSOLS) .....	26
1.3.3. ΗΦΑΙΣΤΕΙΑΚΑ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΑ (VOLCANIC AEROSOLS).....	28
1.3.4. ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΑ ΚΑΥΣΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ (BIOMASS BURNING AEROSOLS).....	29
1.3.5. ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΗ/ΑΣΤΙΚΑ/ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ (URBAN/INDUSTRIAL) ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΑ.....	30
1.3.6. ΒΙΟΓΕΝΗ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΑ (BIOGENIC AEROSOLS).....	30
1.4. ΧΡΟΝΟΣ ΠΑΡΑΜΟΝΗΣ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ .....	31
1.5. ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΩΝ.....	32
1.5.1. ΟΠΤΙΚΟ ΒΑΘΟΣ ΚΑΙ ΠΑΧΟΣ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΩΝ .....	33
1.5.2. ΕΚΘΕΤΙΚΟΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ÅNGSTRÖM (ΑΕ) .....	34
1.5.3. ΛΕΥΚΑΥΤΕΙΑ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΗΣ ΣΚΕΔΑΣΗΣ (SINGLE SCATTERING ALBEDO, SSA) .....	35
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ – ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ</b> .....	37
2.1. ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	37
2.1.1. MODIS .....	37
2.1.2. ΟΜΙ .....	39
2.1.3. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΥΠΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	41
2.2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ – ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ.....	42
2.3. ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	47
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ</b> .....	49

3.1. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥ ΑΛΑΤΟΣ ΣΕ ΠΛΑΝΗΤΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ .....	49
3.1.1. ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ.....	49
3.1.2. ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ .....	56
3.2. ΧΡΟΝΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΩΝ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥ ΑΛΑΤΟΣ ΣΕ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΚΛΙΜΑΚΑ .....	65
3.2.1. ΕΝΔΟΕΤΗΣΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ (ΟΠΤΙΚΟΥ ΒΑΘΟΥΣ) ΤΩΝ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥ ΑΛΑΤΟΣ.....	65
3.2.2. ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ (ΟΠΤΙΚΟΥ ΒΑΘΟΥΣ) ΤΩΝ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥ ΑΛΑΤΟΣ.....	68
3.3 ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΑ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥ ΑΛΑΤΟΣ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ.....	72
3.3.1. ΙΝΔΙΚΟΣ ΩΚΕΑΝΟΣ .....	72
3.3.2. ΒΟΡΕΙΟΣ ΑΤΛΑΝΤΙΚΟΣ ΩΚΕΑΝΟΣ.....	78
3.3.3. ΕΙΡΗΝΙΚΟΣ ΩΚΕΑΝΟΣ .....	83
3.3.4. ΝΟΤΙΟΣ ΩΚΕΑΝΟΣ.....	89
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΝΟΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....</b>	<b>95</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....</b>	<b>100</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΛΙΣΤΑ ΑΝΑΦΟΡΩΝ.....</b>	<b>103</b>





## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών (ΠΜΣ) «Ατμοσφαιρικές Επιστήμες και Περιβάλλον» του τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Χατζηαναστασίου Νικόλαου, του οποίου η βοήθεια ήταν πολύτιμη καθ' όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου και οι γνώσεις και η καθοδήγησή του με βοήθησαν σημαντικά ώστε να επιτευχθεί η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του ΠΜΣ «Ατμοσφαιρικές Επιστήμες και Περιβάλλον» και πιο συγκεκριμένα τον κ. Μπαρτζώκα Αριστείδη, τον κ. Λώλη Χρήστο, τον κ. Μπάκα Νικόλαο και τον κ. Κασσωμένο Παύλο, οι οποίοι με την εμπειρία τους μου προσέφεραν πολύτιμες γνώσεις και συμβουλές κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Ευχαριστώ όλους τους φίλους και συναδέλφους μου με τους οποίους μοιραστήκαμε αυτά τα χρόνια των μεταπτυχιακών μας σπουδών και περάσαμε όμορφες στιγμές, καθώς και τους γονείς μου, και ιδιαίτερα τον αδερφό μου, οι οποίοι με στήριξαν ψυχολογικά, γεγονός που συνέβαλε στην επιμονή μου για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας και επίτευξης του στόχου μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους Διδακτορικούς φοιτητές Μαρία Γαβρούζου, Mario-Bruno Korras-Karasa και Μιχάλη Σταμάτη, οι οποίοι με τις γνώσεις και την εμπειρία τους με βοήθησαν και με καθοδήγησαν καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μου.

Μαστακούλη Έλλη





## Περίληψη

Στην παρούσα εργασία γίνεται μία προσπάθεια ανίχνευσης των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος στην ατμόσφαιρα σε παγκόσμια κλίμακα για την περίοδο 2005-2021, χρησιμοποιώντας έναν δορυφορικό αλγόριθμο ο οποίος βασίζεται στις οπτικές ιδιότητες των αερολυμάτων και λειτουργεί σε ημερήσια βάση και σε χωρική ανάλυση  $1^\circ \times 1^\circ$ . Πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί ως δεδομένα εισαγωγής το οπτικό βάθος των αερολυμάτων (Aerosol Optical Depth, AOD) στα 550nm και τη λευκαύγεια μεμονωμένης σκέδασης (Single Scattering Albedo, SSA) στα 388nm, τα οποία προέρχονται από τις βάσεις δεδομένων MODIS-Aqua Collection 6.1 και OMI-Aura Satellite, αντίστοιχα. Από τα δορυφορικά δεδομένα OMI χρησιμοποιήθηκαν τα OMI-OMAEROe πάνω από ωκεανούς και τα OMI-OMAERUV πάνω από ξηρά. Ο διαχωρισμός μεταξύ ξηράς και ωκεανού πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας δεδομένα τύπου επιφάνειας (της Γης) από το πρόγραμμα International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) – Η Basic Series, ώστε να επιτευχθεί ο διαχωρισμός παγκοσμίως. Ο αλγόριθμος αρχικά υπολογίζει τον εκθετικό παράγοντα Ångström Exponent (AE) χρησιμοποιώντας τα φασματικά δεδομένα του AOD από το δορυφόρο MODIS και στη συνέχεια εφαρμόζει κατάλληλα όρια στις παραμέτρους AE ( $\geq 0.4$ ) και SSA ( $\geq 0.99$  και  $\leq 1.0$ ) ώστε να επιτευχθεί η ανίχνευση της παρουσίας ή όχι των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος. Ο αλγόριθμος λειτουργεί για κάθε ημέρα του κάθε έτους και εξάγει ως αποτελέσματα την απόλυτη και σχετική συχνότητα εμφάνισης των αερολυμάτων και το οπτικό βάθος αυτών σε μηνιαία και ετήσια βάση. Επίσης, με μεσοποίηση των ετήσιων και μηνιαίων αποτελεσμάτων προκύπτουν οι μέσες κλιματολογικές τιμές της συχνότητας εμφάνισης και του φορτίου των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος, τόσο για ολόκληρο τον πλανήτη όσο και για περιοχές που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, φαίνεται ότι οι μέγιστες τιμές απόλυτης (πάνω από 70 ημέρες/έτος) και σχετικής (της τάξης 60-65%) συχνότητας εμφάνισης παρουσιάζονται στον Νότιο Τροπικό Ειρηνικό Ωκεανό και στον Ινδικό Ωκεανό, με τη διαφορά ότι οι μέγιστες τιμές της σχετικής συχνότητας παρατηρούνται και πάνω από τον Νότιο Ωκεανό. Και στις δύο μεταβλητές παρατηρείται μία διαχρονική μείωση της συχνότητας εμφάνισης (απόλυτης και σχετικής) στις περισσότερες περιοχές του πλανήτη, εκτός από μία μικρή αύξηση τη σχετικής συχνότητας στις ωκεάνιες τροπικές περιοχές. Όσον αφορά στο φορτίο, δηλαδή το οπτικό βάθος των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος, φαίνεται ότι οι μεγαλύτερες τιμές αυτού (πάνω από 0.1-0.15) παρατηρούνται στις περιοχές όπου επικρατούν οι μεγαλύτερες τιμές

συχνότητας εμφάνισης (με ορισμένες εξαιρέσεις, όπως στον κόλπο του Μεξικού ή στον Τροπικό Ατλαντικό Ωκεανό) και κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης φαίνεται και αυτό, όπως και η συχνότητα εμφάνισης, να μειώνεται στις περισσότερες περιοχές. Με βάση την ενδοετήσια μεταβολή των μεταβλητών, οι μέγιστες τιμές της συχνότητας εμφάνισης παρατηρούνται τους μήνες Μάιο, Ιούνιο και Ιούλιο και του οπτικού βάθους κατά την άνοιξη του Βορείου Ημισφαιρίου και τον Ιούλιο. Όσον αφορά στη διαχρονική μεταβολή της συχνότητας εμφάνισης και του φορτίου των αερολυμάτων παρατηρήθηκε μία σημαντική γραμμική τάση μείωσης κατά τη διάρκεια της περιόδου 2005-2021, η οποία αντιστοιχεί σε ποσοστό μείωσης -84.7% και -20.9% (οι οποίες είναι στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο σημαντικότητας 95%), αντίστοιχα. Τάση μείωσης τόσο της συχνότητας εμφάνισης όσο και του οπτικού βάθους των θαλάσσιων αερολυμάτων, φαίνεται επίσης να επικρατεί και στις περιοχές ενδιαφέροντος που μελετήθηκαν (Ειρηνικό Ωκεανό, Ινδικό Ωκεανό, Νότιο Ωκεανό και Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό).



# Abstract

In the present study, an attempt is made to detect sea salt aerosols in the Earth's atmosphere on a global scale for the study period 2005-2021, using a satellite algorithm based on aerosol optical properties, operating on a daily basis and at spatial coverage of  $1^\circ \times 1^\circ$ . More specifically, the algorithm uses as input data the Aerosol Optical Depth (AOD) at 550nm, and the Single Scattering Albedo (SSA) at 388nm, which are derived from the MODIS-Aqua Collection 6.1 and OMI-Aura Satellite databases, respectively. As it concerns the OMI satellite data, OMI-OMAEROe data were used over oceans and OMI-OMAERUV over land. The separation between land and ocean was performed using terrestrial surface type data from the International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) – H Basic Series. The algorithm first calculates the exponential Ångström Exponent (AE) using the AOD spectral data from the MODIS satellite and then applies appropriate thresholds to AE ( $\geq 0.4$ ) and SSA ( $\geq 0.99$  and  $\leq 1.0$ ) to achieve the detection of sea salt aerosols. The algorithm runs for every day of each year and outputs the absolute and relative frequency of occurrence and the atmospheric load, i.e. the optical depth, of aerosols on a monthly and annual basis. Also, by averaging the annual and monthly results, the climatological mean values of the frequency of occurrence and the load of sea salt aerosols were estimated, both over the whole planet and specific/selected regions of particular interest.

According to the results, the maximum values of absolute (up to 70 days/year) and relative frequency (up to 60-65% of days for which the algorithm operated) of occurrence are observed over the Southern Tropical Pacific and Indian Oceans, whereas maximum values of relative frequency are also observed over the Southern Ocean. Both parameters show a decrease from 2005 to 2021 in most areas of the world, except for a slight increase of relative frequency over the tropical oceanic regions. Regarding the load of sea salt aerosols, it has highest values (above 0.1-0.15) over areas where the most frequently occur, with some exceptions, such as the Gulf of Mexico or the Tropical Atlantic Ocean. Also, the optical depth, as well as the frequency of occurrence of sea salt aerosols have decreased during the 17-year study period over most world areas. Concerning the seasonal variation of sea salt aerosols, their maximum frequency is observed in May, June and July, whereas their maximum optical depth in boreal Spring and July. Besides, the inter-annual variation of global average frequency of occurrence and load, reveals statistically significant linear decreasing trends, equal to -84.7% and -20.9%, respectively, during the period 2005-2021. Decreasing trends for the frequency of occurrence and the optical depth of marine aerosols,

are also found over the selected regions of interest, namely the Indian, Pacific, Southern and North Atlantic Oceans.



## Λίστα Ακρωνυμίων

AE: Ångström Exponent

AOD: Aerosol Optical Depth

AOT: Aerosol Optical Thickness

AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer

BC: Black Carbon

CCN: Cloud Condensation Nuclei

DB: Deep Blue

DT: Dark Target

EOS: Earth Observing System

GOME: Global Ozone Monitoring Experiment

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

ISCCP: International Satellite Cloud Climatology Project

IN: Ice nuclei

MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

NASA: National Aeronautics and Space Administration

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

NIR: near-infrared

NIVR: Nederlands Instituut voor Vliegtuigontwikkeling en Ruimtevaart ή Netherlands Agency for Aerospace Programmes

OC: Organic Carbon

OMI: Ozone Monitoring Instrument

SCIAMACHY: SCanning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmospheric CHartographyY

SSA: Single Scattering Albedo

SS: Sea Salt

SBUV: Solar Backscatter Ultraviolet

SWIR: Shortwave Infrared

TOMS: Total Ozone Mapping Spectrometer

UV: Ultraviolet

UTC: Universal Time Coordinated

VIS: Visible

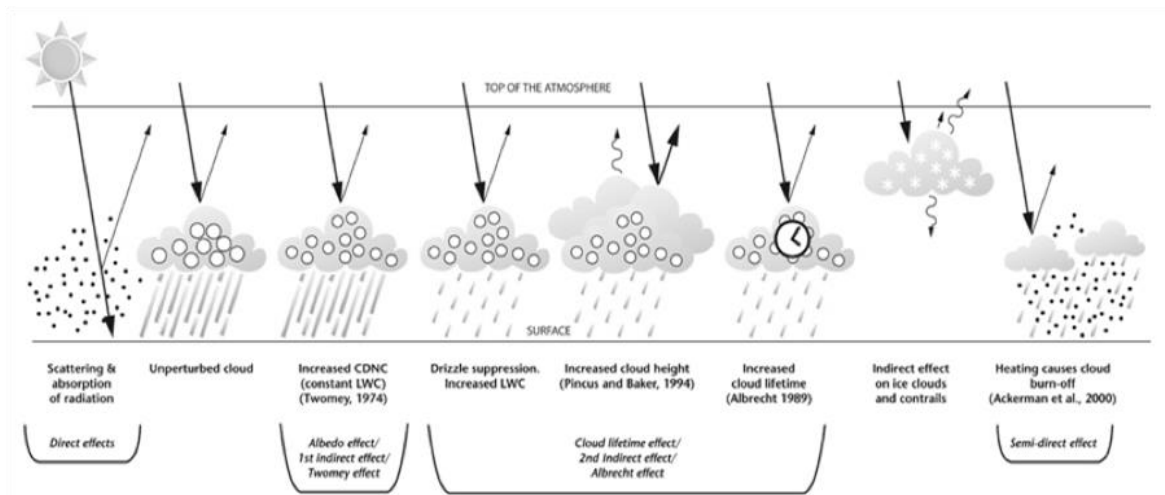
VOCs: Volatile Organic Compounds

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ατμοσφαιρικά αερολύματα είναι μικροσκοπικά σωματίδια στερεής ή υγρής φάσης τα οποία αιωρούνται στην ατμόσφαιρα και εκπέμπονται σε αυτή είτε πρωτογενώς (*πρωτογενή αερολύματα*) είτε μέσω πολύπλοκων χημικών αντιδράσεων κατά τις οποίες γίνεται μετατροπή αερίων σε σωματίδια (*gas-to-particle conversion, δευτερογενή αερολύματα*). Διαθέτουν μεγάλο εύρος πηγών εκπομπής οι οποίες κατηγοριοποιούνται σε φυσικές (π.χ. ερήμους, ωκεανούς, ηφαίστεια) και ανθρωπογενείς (π.χ. αγροτικές εργασίες, βιομηχανικές και αστικές δραστηριότητες). Το μεγαλύτερο μέρος των αερολυμάτων είναι συγκεντρωμένο κοντά στην επιφάνεια της Γης, με εξαίρεση ένα πολύ μικρό ποσοστό του συνολικού τους φορτίου τα οποία εισέρχονται στην γήινη ατμόσφαιρα από το διάστημα (*κοσμικά αερολύματα*). Έχουν την ικανότητα να μεταφέρονται και σε μεγαλύτερα ύψη στην ατμόσφαιρα (4-6 km) καθώς και να διανύουν μεγάλες αποστάσεις μέσω της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας. Το μέγεθός τους διαφέρει από μερικά nm έως μm, με αποτέλεσμα να συμπεριφέρονται με διαφορετικό τρόπο και να επηρεάζεται ο χρόνος παραμονής τους στην ατμόσφαιρα.

Άλλη μία κατηγοριοποίηση των αερολυμάτων γίνεται με βάση το μέγεθός τους, και βάσει αυτού διακρίνονται σε *λεπτόκοκκα* ή *λεπτά αερολύματα*, με διάμετρο  $d < 2.5 \mu\text{m}$  (τα οποία διακρίνονται στα αερολύματα περιοχής συμπύκνωσης με διάμετρο  $0.01 \mu\text{m} < d < 0.1 \mu\text{m}$  και στα αερολύματα περιοχής συσσώρευσης με διάμετρο  $0.1 \mu\text{m} < d < 2.5 \mu\text{m}$ ) και σε *χονδρόκοκκα* ή *χονδρά αερολύματα*, με διάμετρο  $d > 2.5 \mu\text{m}$ . Επίσης, ανάλογα με την πηγή προέλευσης τους διακρίνονται σε αερολύματα ερημικής σκόνης, θαλάσσιου άλατος, ηφαιστειογενή, καύσης βιομάζας και ανθρωπογενών δραστηριοτήτων. Τα αερολύματα υπάρχουν στην ατμόσφαιρα με διαφορετικές συγκεντρώσεις λόγω της ετερογένειας των πηγών παραγωγής τους και του σχετικά μικρού χρόνου ζωής τους στην ατμόσφαιρα (Boucher, 2015). Τα περισσότερα αερολύματα δεν είναι ορατά με γυμνό μάτι, λόγω των μικροσκοπικών διαστάσεων τους, αλλά είναι εύκολο να παρατηρηθούν τα φαινόμενα που δημιουργούνται εξαιτίας τους στην ατμόσφαιρα, ιδιαίτερα όταν οι συγκεντρώσεις τους γίνουν αρκετά μεγάλες, μέσω της ελάττωσης της ορατότητας που προκαλούν (π.χ. αιθαλομίχλη, επεισόδια σκόνης) και της δημιουργίας πιο κόκκινων αποχρώσεων στον ουρανό, ιδιαίτερα κατά την ανατολή και δύση του Ηλίου (Boucher, 2015).



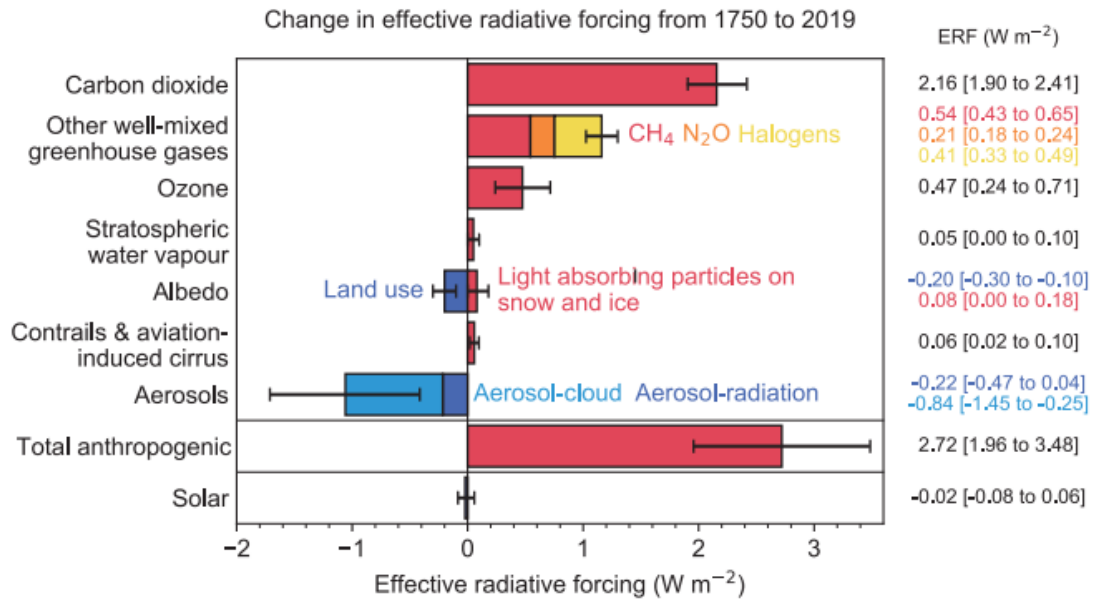


**Σχήμα Ε1.** Άμεση και έμμεση επίδραση των αερολυμάτων στα νέφη (Πηγή: IPCC, 2007).

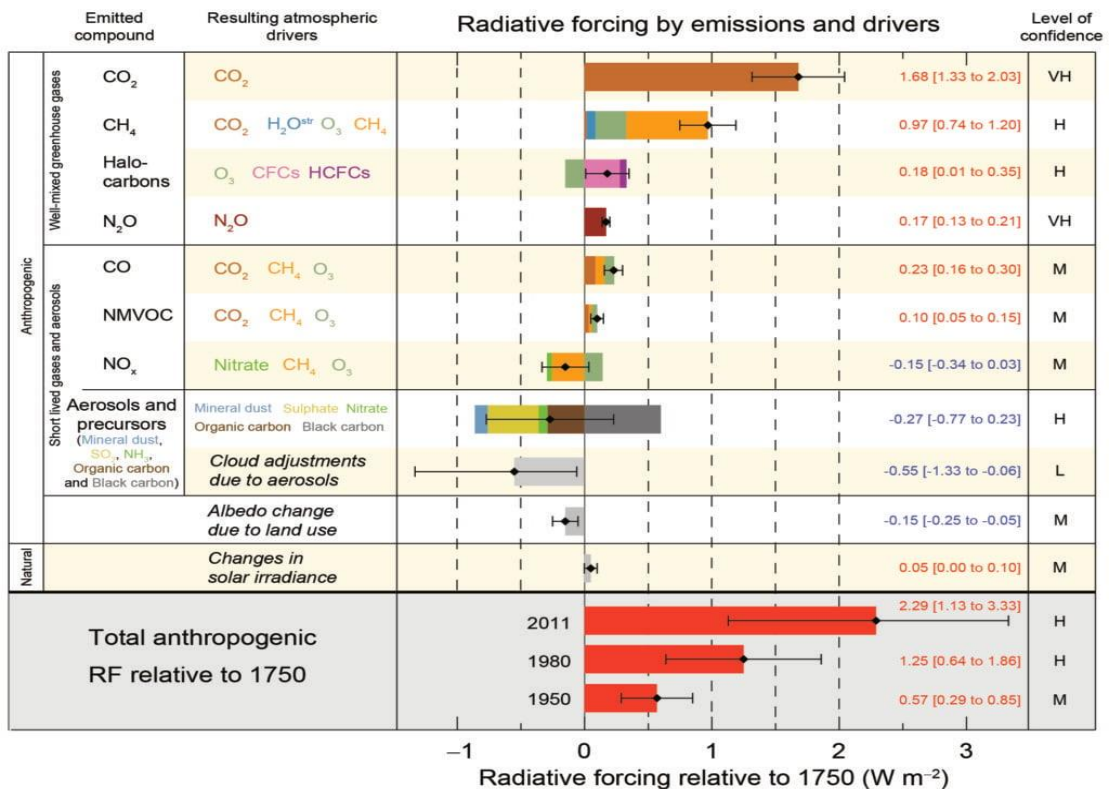
Τα αερολύματα διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στο κλίμα της Γης, καθώς ανάλογα με τη σύνθεσή τους απορροφούν ή ανακλούν κυρίως την ηλιακή, αλλά και τη γήινη ακτινοβολία μεγάλων μηκών κύματος. Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι επίδρασης των αερολυμάτων στο κλίμα της Γης (Σχήμα Ε1) και πιο συγκεκριμένα ο άμεσος (direct effect), ο έμμεσος (indirect effect) και ο ημι – άμεσος (semi-direct effect). Η πρώτη περίπτωση αναφέρεται στην άμεση αλληλεπίδραση των αερολυμάτων με την ηλιακή (αλλά και με την γήινη) ακτινοβολία, μέσω της οποίας όταν ο ουρανός είναι ανέφελος, τα αερολύματα μπορούν να ανακλούν μέρος της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας πίσω στο διάστημα, με αποτέλεσμα να την εμποδίζουν να φτάσει στην επιφάνεια της Γης, προκαλώντας ψύξη στην επιφάνεια του εδάφους. Σε αυτήν την περίπτωση, όμως, λαμβάνει χώρα και απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας και αυτό οδηγεί στην θέρμανση της ατμόσφαιρας (<https://www.gfdl.noaa.gov/aerosols-and-climate/>).

Επίσης, τα αερολύματα μπορούν να επηρεάσουν το κλίμα της Γης και με έμμεσο τρόπο, και πιο συγκεκριμένα μέσω των νεφών, καθώς διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη δημιουργία τους λειτουργώντας ως νεφικοί πυρήνες συμπύκνωσης (Cloud Condensation Nuclei, CCN). Αυτός ο τρόπος επίδρασης λειτουργεί συνήθως αντίθετα από ότι τα αέρια του θερμοκηπίου και προκαλεί ψύξη, καθώς το νερό μπορεί να συμπυκνώνεται πιο εύκολα πάνω στα σωματίδια δημιουργώντας μεγαλύτερο αριθμό μικρών σταγονιδίων, κι έτσι το νέφος αποκτά μεγαλύτερη ανακλαστικότητα και σκεδάζει πιο έντονα την ηλιακή ακτινοβολία (<https://earthobservatory.nasa.gov/features/Aerosols/page4.php>).

Μία ακόμα έμμεση αλληλεπίδραση των αερολυμάτων με το κλίμα της Γης είναι η πολύπλοκη επιρροή που έχουν και στις βροχοπτώσεις, καθώς, για παράδειγμα, τα αερολύματα μπορούν να μειώνουν το μέγεθος των σταγονιδίων νερού στα νέφη, με αποτέλεσμα να τις καταστέλλουν. Ωστόσο, υπό ορισμένες περιβαλλοντικές συνθήκες, τα αερολύματα μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία ψηλών νεφών, τα οποία είναι πολύ πιθανό να παράγουν κεραυνούς και ισχυρές βροχοπτώσεις (<https://earthobservatory.nasa.gov/features/Aerosols/page4.php>). Ο τύπος των αερολυμάτων είναι σημαντικός παράγοντας προσδιορισμού του τρόπου με τον οποίο αυτά επηρεάζουν τα νέφη και τις βροχοπτώσεις. Για παράδειγμα, τα ανακλαστικά αερολύματα έχουν την τάση να «φωτίζουν» (να κάνουν πιο ανακλαστικά) τα νέφη και να τα κάνουν να έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, ενώ αντίθετα ο μαύρος άνθρακας της αιθάλης θερμαίνει τοπικά την ατμόσφαιρα και έτσι μπορεί να προκαλέσει την εξάτμιση των σταγονιδίων των νεφών και παράλληλα μείωση της σχετικής υγρασίας στο νέφος (Hansen et al., 1997), καταστέλλοντας την βροχόπτωση και μετατρέποντας το νέφος σε ομίχλη (ημι – άμεση επίδραση). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται η νεφοκάλυψη και άρα να αυξάνεται η άμεση ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει στην επιφάνεια της Γης και να οδηγεί στη θέρμανση της (Lohmann and Feichter, 2005), σε αντίθεση με την άμεση και έμμεση επίδρασή τους. Ελαττώνοντας ή αποτρέποντας τη βροχόπτωση, τα αερολύματα τροποποιούν τη διάρκεια ζωής των νεφών και τη νεφοκάλυψη (Lohmann and Feichter, 2005). Η ελάττωση της βροχόπτωσης εξαιτίας των αερολυμάτων μπορεί να είναι μεγάλης σημασίας για το υδρολογικό ισοζύγιο (Ramanathan et al., 2001) ιδιαίτερα στις ευαίσθητες ημίξηρες περιοχές (Teller and Levin, 2006).



(α)



(β)

Σχήμα Ε2. Οι μέσες πλανητικές τιμές της διαταραχής της ακτινοβολίας (radiative forcing, RF) που προκαλείται από τους κύριους παράγοντες διαμόρφωσης του κλίματος της Γης, καθώς και οι τυπικές αποκλίσεις των τιμών τους (α) το 2019 (Masson-Delmote et al., IPCC, 2021) και (β) το 2011 (Stocker et al., IPCC, 2013), σε σχέση με την προ-βιομηχανικής επανάστασης εποχή, το 1750.

Στο Σχήμα E2 απεικονίζεται η συνεισφορά των διαφόρων συστατικών της ατμόσφαιρας (αέρια, αερολύματα, νέφη) στο ισοζύγιο ακτινοβολίας του πλανήτη, τα οποία έχουν οδηγήσει στη διαταραχή του κατά την περίοδο μετά τη βιομηχανική επανάσταση (1750). Η διαταραχή αυτή, που έχει προκληθεί από το 1750 έως το 2019 (Σχήμα E2α) και από το 1750 έως το 2011 (Σχήμα E2β), οφείλεται κυρίως, σύμφωνα με το σχήμα, στο διοξείδιο του άνθρακα και το μεθάνιο, τα οποία και είναι υπεύθυνα για την θέρμανση του πλανήτη. Επίσης, φαίνεται ότι τα αερολύματα έχουν αντίθετη επίδραση σε σύγκριση με τα αέρια του θερμοκηπίου, δηλαδή ψύχουν γενικά τον πλανήτη με αποτέλεσμα να λειτουργούν ως ένας παράγοντας αντιστάθμισης της πλανητικής θέρμανσης. Πιο συγκεκριμένα, οδηγούν σε σημαντική ψύξη, τόσο στην επιφάνεια της Γης όσο και στην κορυφή της ατμόσφαιρας, που κυμαίνεται κυρίως μεταξύ  $-1$  και  $-5 \text{ W/m}^2$  (Korras-Carraca et al., 2021).

Με την πάροδο των ετών έχει σημειωθεί σημαντική εξέλιξη ως προς την κατανόηση του ρόλου των αερολυμάτων στο κλίμα, όμως το επίπεδο επιστημονικής κατανόησης παραμένει σε όχι και τόσο επιθυμητά υψηλό επίπεδο, και ειδικά για την έμμεση επίδραση των αερολυμάτων και σε σύγκριση με τα αέρια του θερμοκηπίου, για τα οποία το επίπεδο αυτό είναι υψηλό. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι τα αερολύματα παρουσιάζουν έντονη χωρική και χρονική μεταβλητότητα και πολύπλοκους μηχανισμούς δράσης, σε αντίθεση με τα αέρια του θερμοκηπίου, τα οποία εμφανίζουν σταθερότητα, με αποτέλεσμα να καθίσταται αβέβαιη, ιδιαίτερα η έμμεση επίδραση των αερολυμάτων.

Με σκοπό τη βελτίωση της επιστημονικής γνώσης, κατά τις τελευταίες δεκαετίες πραγματοποιούνται σε παγκόσμιο επίπεδο μετρήσεις, τόσο με επίγειους σταθμούς και όργανα μέτρησης (π.χ. δίκτυο AERONET, Aerosol Robotic Network, Holben et al., 1998; Dubovik et al., 2000; Koch et al., 2009; Lee et al., 2010) όσο και εναέριες μετρήσεις, αλλά, κυρίως, με δορυφόρους και όργανα που παρέχουν, μέσω της χρήσης αλγορίθμων ανεύρεσης ή ανάκτησης (retrieval algorithms), δεδομένα με μεγαλύτερη, έως πλήρη, γεωγραφική κάλυψη (π.χ. πάνω από ωκεανούς, ερήμους ή μεγάλους ορεινούς όγκους), αλλά και κατακόρυφη ανάλυση, στα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας (Dunkan et al., 2003; Roberts, Tesfaye et al., 2011), που βοηθούν στη καλύτερη κατανόηση της δράσης των αερολυμάτων.

Σύμφωνα με το Σχήμα E2α (AR6, Sixth Assessment Report, Masson-Delmote et al., 2021), η συνολική ανθρωπογενής διαταραχή του ενεργειακού ισοζυγίου του πλανήτη κατά τη διάρκεια της βιομηχανικής εποχής (1750-2019) εκτιμάται σε  $2,72$  [ $1,96$  έως  $3,48$ ]  $\text{W/m}^2$  (υψηλό επίπεδο εμπιστοσύνης). Αυτή είναι αυξημένη κατά  $0,43 \text{ W/m}^2$  σε σχέση με την αντίστοιχη εκτίμηση που είχε γίνει στο AR5 (Fifth Assessment Report, Stocker et al., 2013)

για την περίοδο 1750-2011. Αυτό οφείλεται στην αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου από το 2011, που εξαιτίας τους αυξήθηκε η διαταραχή της ακτινοβολίας κατά  $0,59 \text{ W/m}^2$ . Ωστόσο, η συνολική επίδραση των αερολυμάτων εκτιμάται ότι είναι κατά 85% περισσότερο αρνητική ( $-0.84 [-1.45 \text{ to } 0.25] \text{ W/m}^2$ ) σε σύγκριση με αυτή του AR5 ( $-0.55 [-1.3 \text{ to } 0.06] \text{ W/m}^2$ ).

Στην παρούσα μελέτη θα ασχοληθούμε με τα αερολύματα θαλασσίου άλατος, τα οποία αποτελούν σημαντικό μέρος του συνόλου των αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα (Liao et al., 2006), καθώς λειτουργούν ως πυρήνες συμπύκνωσης νεφών (CCN), ανταλλάσσουν αέρια και υγρασία με την ατμόσφαιρα, συμμετέχουν σε χημικές αντιδράσεις και σκευάζουν ισχυρά την ηλιακή ακτινοβολία (Lewis and Schwartz, 2004). Είναι χονδρόκοκκα αερολύματα και απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα με φυσικό τρόπο από τις υδάτινες επιφάνειες του πλανήτη μέσω των κυμάτων που δημιουργούνται από τον άνεμο. Τα αερολύματα θαλασσίου άλατος συμβάλλουν σημαντικά στη μάζα των σωματιδίων που διοχετεύονται στην ατμόσφαιρα παγκοσμίως, με εκτιμήσεις της ετήσιας συνεισφοράς τους να κυμαίνονται μεταξύ  $0,3 - 30 \cdot 10^{12} \text{ kg}$  (Peterson and Junge, 1971; Hidy and Brock, 1971; SMIC, 1971; Andreae, 1995; Tegen et al., 1997; Raes et al., 2000; Penner et al., 2001). Είναι σωματίδια τα οποία χαρακτηρίζονται ως υγροσκοπικά και έχουν την ικανότητα να ανταλλάσσουν υγρασία με το περιβάλλον τους, μεταβάλλοντας το περιεχόμενό τους, την συγκέντρωσή τους σε νερό και τη διάμετρό τους κάτω από διαφορετικές ατμοσφαιρικές συνθήκες (Lewis and Schwartz, 2004). Όπως υπάρχουν μηχανισμοί που οδηγούν στην απελευθέρωσή τους στην ατμόσφαιρα, έτσι, αντίστοιχα, υπάρχουν και μηχανισμοί απομάκρυνσής τους από αυτή, που είναι είναι η *ξηρή* και η *υγρή εναπόθεση*. Όσον αφορά στην υγρή εναπόθεση, τα αερολύματα αυτά απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα μέσω της βροχόπτωσης, ενώ αντίστοιχα η ξηρή εναπόθεση αφορά στην απομάκρυνση τους με την μεταφορά τους στην επιφάνεια της Γης (ωκεανού ή ξηράς) η οποία επηρεάζεται από το σχήμα, το μέγεθος, την πυκνότητα και την περιεκτικότητά τους σε νερό (Lewis and Schwartz, 2004).

Λόγω της ιδιαίτερα μεγάλης σημασίας τους, είναι σημαντική η ποσοτικοποίηση των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος, ιδιαίτερα σε παγκόσμια κλίμακα και για το λόγο αυτόν έχουν πραγματοποιηθεί διάφορες εργασίες και μελέτες. Για παράδειγμα, το 2015 οι Gkikas et al. χρησιμοποίησαν έναν αλγόριθμο για την ανίχνευση και το χαρακτηρισμό των επεισοδίων διαφόρων τύπων αερολυμάτων πάνω από θαλάσσιες περιοχές της ευρύτερης λεκάνης της Μεσογείου, συμπεριλαμβανομένων της Μαύρης Θάλασσας και του Ατλαντικού Ωκεανού (ανοικτά των ακτών της Ιβηρικής Χερσονήσου και της Βορειοδυτικής Αφρικής) κατά την περίοδο 2000-2007. Μεταξύ των διαφόρων επεισοδίων που

ανιχνεύθηκαν ήταν και αυτά των αερολυμάτων σκόνης/θαλάσσιων αερολυμάτων (dust/sea salt aerosols, DSS), χρησιμοποιώντας ημερήσια δεδομένα των οπτικών ιδιοτήτων των αερολυμάτων από δορυφορικές μετρήσεις των οργάνων MODIS-Terra (Collection 005, Level-3), Earth Probe (EP)-TOMS και OMI-Aura. Στις οπτικές ιδιότητες που αξιοποιήθηκαν εφαρμόστηκαν κατάλληλα όρια ώστε να επιτευχθεί η ανίχνευση των επεισοδίων DSS, και προέκυψε ότι τα ισχυρά επεισόδια αυτών παρατηρούνται κυρίως στη κεντρική και δυτική Μεσόγειο Θάλασσα και ότι είναι τα τρίτα πιο συχνά ακραία επεισόδια στις θαλάσσιες περιοχές της ευρύτερης Μεσογείου (11.5%, ποσοστιαία συνεισφορά στο συνολικό αριθμό των επεισοδίων αερολυμάτων). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ίδιας μελέτης, τα ισχυρά επεισόδια DSS λαμβάνουν χώρα συχνότερα (1-2,4 επεισόδια/έτος) πάνω από την Ιβηρική Θάλασσα, καθώς και πάνω από τη νότια Αδριατική Θάλασσα, το Ιόνιο και το Αιγαίο Πέλαγος. Ωστόσο, η συχνότητα των ακραίων επεισοδίων DSS είναι σχετικά σποραδική και δύσκολα υπερβαίνει τα 0,5 επεισόδια/έτος. Τα επεισόδια αυτά παρουσιάζουν μία εποχικότητα με κύριο μέγιστο την άνοιξη και ένα δευτερεύον το καλοκαίρι.

Επίσης, το 2021 οι Korras-Carraca et al. χρησιμοποίησαν δεδομένα συνολικού οπτικού βάθους των αερολυμάτων στα 550 nm του reanalysis MERRA-2 και μελέτησαν τις μέσες ετήσιες κλιματολογικές κατανομές του AOD των διαφόρων τύπων αερολυμάτων σε παγκόσμιο επίπεδο για την περίοδο 1980-2019. Από τη μέση ετήσια χωρική κατανομή του AOD στα 550 nm, προέκυψε ότι πάνω από ωκεάνιες περιοχές το AOD είναι χαμηλό και αποτελείται κυρίως από αερολύματα θαλασσίου άλατος. Η μέση παγκόσμια ετήσια τιμή των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος υπολογίσθηκε ίση με 0.04, αποτελώντας την υψηλότερη τιμή μεταξύ των αντίστοιχων τιμών των υπόλοιπων αερολυμάτων φυσικής προέλευσης που μελετήθηκαν στη συγκεκριμένη εργασία (σκόνη, οργανικός άνθρακας, μαύρος άνθρακας), και τη δεύτερη μετά τα αερολύματα θεικού άλατος (0.05).

Τέλος, οι Penning de Vries et al. το 2015 παρουσίασαν μία άλλη προσέγγιση για τον προσδιορισμό του τύπου των αερολυμάτων, μελετώντας τη σχέση των οπτικών ιδιοτήτων των αερολυμάτων (AOD από το όργανο MODIS και δείκτη απορρόφησης (UV Aerosol Index) από το GOME-2) με την πυκνότητα στήλης των αέριων ιχνοστοιχείων σε μέση μηνιαία βάση, την απορρόφηση των αερολυμάτων και το μέσο μέγεθός τους. Διαχώρισαν τους διαφόρους τύπους αερολυμάτων με βάση το μέγεθος (εκθετικός παράγοντας Ångström) και το δείκτη απορρόφησης (UV Aerosol Index) τους, και με αυτόν τον τρόπο κατασκεύασαν παγκόσμιους εποχικούς χάρτες (με χωρική ανάλυση  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ ) του κυρίαρχου τύπου αερολυμάτων για την περίοδο 2007-2011, αξιοποιώντας και τα δεδομένα των αέριων ιχνοστοιχείων ώστε να προσδιοριστεί η κυρίαρχη πηγή παραγωγής τους. Από την ανάλυση

αυτή προέκυψε ότι τα αερολύματα θαλασσίου άλατος παρατηρούνται στις ωκεάνιες περιοχές του πλανήτη σε όλη τη διάρκεια του έτους, με τη μεγαλύτερη κάλυψη το φθινόπωρο του Βορείου Ημισφαιρίου.

Βάσει της υπάρχουσας βιβλιογραφίας, είναι εμφανές ότι είναι αναγκαία η πραγματοποίηση περισσότερων μελετών, ιδιαίτερα με μεγάλη χωρική και χρονική κάλυψη, με σκοπό την καλύτερη κατανόηση και ασφαλέστερη εκτίμηση της παρουσίας και του φορτίου των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος σε παγκόσμια κλίμακα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με χρήση των διαθέσιμων σύγχρονων δορυφορικών δεδομένων, στα οποία στηρίζεται και η παρούσα μελέτη.

Η παρούσα εργασία έχει σκοπό να μελετήσει την παρουσία των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος σε παγκόσμια κλίμακα, αλλά και την εποχική διακύμανση και τη διαχρονική τάση μεταβολής τους, τόσο σε παγκόσμια κλίμακα όσο και σε συγκεκριμένες περιοχές του πλανήτη που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού αναπτύχθηκε ένας δορυφορικός αλγόριθμος, ο οποίος χρησιμοποιεί σύγχρονα δορυφορικά δεδομένα (MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, Collection C-6.1 και OMI: Ozone Monitoring Instrument, OMAERUV – OMAEROe) τα οποία έχουν παγκόσμια κάλυψη και ικανοποιητική χωρική ανάλυση ( $1^\circ \times 1^\circ$ ). Από τα δεδομένα MODIS χρησιμοποιήθηκε φασματική πληροφορία σχετικά με το οπτικό βάθος των αερολυμάτων (AOD) σε διάφορα μήκη κύματος, ενώ από τα OMI πληροφορία σχετικά με τη λευκαύγεια μεμονωμένης σκέδασης (SSA) στα 388 nm. Ο αλγόριθμος υπολογίζει τον εκθετικό παράγοντα Ångström (AE), χρησιμοποιώντας τη φασματική πληροφορία του οπτικού βάθους και στη συνέχεια θέτει κάποια συγκεκριμένα όρια στο δείκτη αυτόν, καθώς και στην παράμετρο SSA, με σκοπό τον προσδιορισμό της παρουσίας (ή απουσίας) των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος στην ατμόσφαιρα. Επίσης, γίνεται και ο υπολογισμός των μέσων μηνιαίων και ετήσιων τιμών της απόλυτης και σχετικής συχνότητας εμφάνισης, καθώς και το φορτίο σε όρους τιμών του οπτικού βάθους των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος. Τέλος, ο αλγόριθμος υπολογίζει και τις μέσες ετήσιες και μηνιαίες τιμές πάνω από συγκεκριμένες περιοχές που έχουμε επιλέξει (με γνώμονα τα αποτελέσματα γεωγραφικών κατανομών του αλγορίθμου) εφαρμόζοντας χωρική και χρονική μεσοποίηση.

Επισημαίνεται ότι η μεθοδολογία η οποία χρησιμοποιείται για την εξαγωγή των επιθυμητών αποτελεσμάτων στην παρούσα εργασία είναι ξεχωριστή και διαφέρει από προϋπάρχουσες μεθόδους, καθώς βασίζεται στα πλέον σύγχρονα δορυφορικά δεδομένα εισαγωγής, τα οποία διαθέτουν ικανοποιητική χωρική ανάλυση ( $1^\circ \times 1^\circ$ ). Συγκεκριμένα, τα δορυφορικά προϊόντα (οπτικές ιδιότητες αερολυμάτων) που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος έχουν εξαχθεί με τους

πλέον σύγχρονους δορυφορικούς αλγορίθμους ανάκτησης, εξασφαλίζοντας έτσι τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια των υπολογιζόμενων αποτελεσμάτων. Ο συγκεκριμένος δορυφορικός αλγόριθμος που αναπτύχθηκε και χρησιμοποιείται στην εργασία αυτή είναι πρωτότυπος, καθώς δεν έχει ξαναγίνει αντίστοιχη προσπάθεια που να συνδυάζει δορυφορικά δεδομένα από δύο διαφορετικά προϊόντα του οργάνου OMI (OMAERUV, OMAEROe). Με το συνδυασμό των δύο προϊόντων επιτυγχάνεται ο εντοπισμός των θαλάσσιων αερολυμάτων με καλύτερη κάλυψη πάνω από ωκεανούς (καθώς το προϊόν OMAERUV είναι πιο αξιόπιστο για εκτάσεις ξηράς). Τέλος, η συγκεκριμένη μελέτη πραγματοποιείται για μία αρκετά μεγάλη χρονοσειρά (17 ετών), ώστε τα αποτελέσματα να έχουν το χαρακτήρα κλιματολογικής ανάλυσης.

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μία σύντομη αναφορά σε χρήσιμες θεωρητικές πληροφορίες που αφορούν στις βασικές ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά των αερολυμάτων. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται αναλυτικά τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και η μεθοδολογία και ο τρόπος λειτουργίας του δορυφορικού αλγορίθμου. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται και συζητούνται τα αποτελέσματα του αλγορίθμου σε παγκόσμια κλίμακα αλλά και για τις περιοχές με ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Τέλος, στο Κεφάλαιο 4 της παρούσας μελέτης παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα και γίνεται η εξαγωγή των συμπερασμάτων και της προοπτικής που υπάρχει για την επέκταση της παρούσας εργασίας.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΩΝ

## 1.1 Ορισμός αερολυμάτων

Τα αερολύματα είναι μικροσκοπικά σωματίδια υγρής ή στερεής φάσης τα οποία αιωρούνται στην ατμόσφαιρα και έχουν διάμετρο από 1 nm (μοριακής τάξης) έως 10 μm (τρίχα ανθρώπινου μαλλιού). Η μάζα τους αντιπροσωπεύει μόνο το  $10^{-9}$  της συνολικής μάζας της ατμόσφαιρας, αλλά διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο, καθώς αλληλεπιδρούν με τα διάφορα συστατικά της ατμόσφαιρας και τα νέφη και διαμορφώνουν το ενεργειακό ισοζύγιο Γης – Ατμόσφαιρας, αφού αλληλεπιδρούν με την ηλιακή ακτινοβολία (και με την γήινη σε μικρότερο βαθμό). Πιο συγκεκριμένα, αλληλεπιδρούν με την ηλιακή ακτινοβολία άμεσα, σκεδάζοντάς την πίσω στο διάστημα, ή έμμεσα τροποποιώντας τις ιδιότητες των νεφών και τον τρόπο με τον οποίο αυτά ανακλούν ή απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία (<https://www.nasa.gov/centers/langley/news/factsheets/Aerosols.html>). Τα αερολύματα υπάρχουν πάντα μέσα στην ατμόσφαιρα, αλλά σε διαφορετικές συγκεντρώσεις, γεγονός που οφείλεται στη μεγάλη ετερογένεια των πηγών παραγωγής τους και στο σχετικά μικρό χρόνο ζωής τους στην ατμόσφαιρα (από ώρες μέχρι εβδομάδες).

Η ποσότητα και οι ιδιότητες των αερολυμάτων παρουσιάζουν μεγάλη μεταβλητότητα στον χώρο και τον χρόνο, και αυτός είναι ο βασικός λόγος για τον οποίο γίνονται μελέτες για πληθυσμό αερολυμάτων και όχι για μεμονωμένα σωματίδια (Boucher, 2015).

Λόγω των ανοδικών κινήσεων που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα, τα αερολύματα μπορούν να μεταφερθούν και σε μεγαλύτερα ύψη (4 – 6 km) και με την ατμοσφαιρική κυκλοφορία έχουν τη δυνατότητα να μεταφερθούν σε μεγάλες αποστάσεις. Τελικά, απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα μέσω της υγρής (wet deposition) ή ξηρής εναπόθεσης (dry deposition).

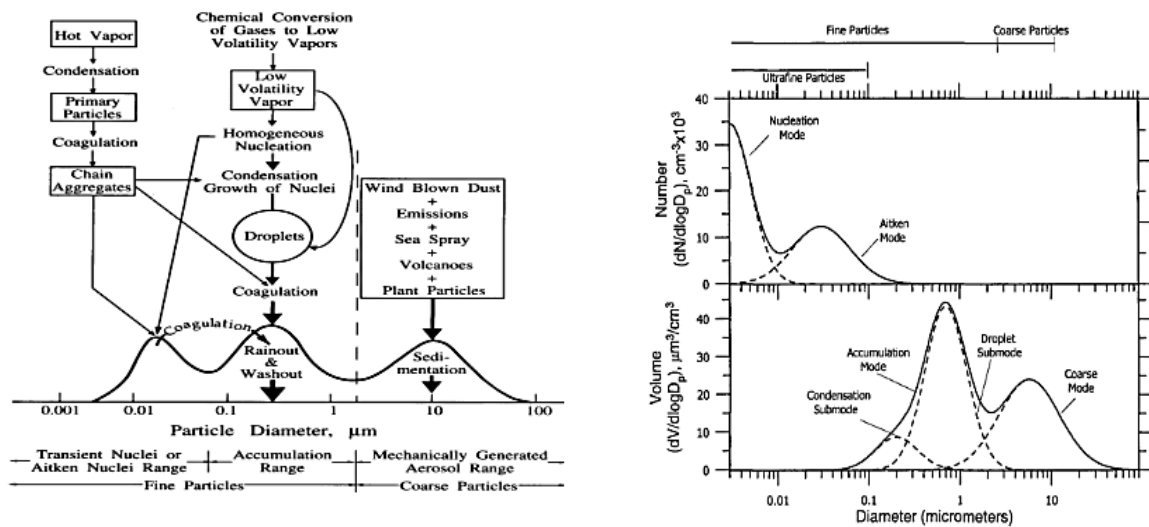
Αντίθετα, στη στρατόσφαιρα ο αριθμός των αερολυμάτων, τα οποία προέρχονται σχεδόν αποκλειστικά από ηφαιστειακές εκρήξεις, είναι πολύ χαμηλότερος σε σύγκριση με την τροπόσφαιρα. Ωστόσο, τα ηφαιστειακά αερολύματα διαδραματίζουν και αυτά σημαντικό ρόλο λόγω του μεγάλου χρόνου παραμονής τους εκεί.

## 1.2 Κατηγορίες αερολυμάτων

Τα ατμοσφαιρικά αερολύματα εκπέμπονται είτε άμεσα στην ατμόσφαιρα (*πρωτογενή*) είτε έμμεσα (*δευτερογενή*) όταν εκπεμπόμενα αέρια, που ονομάζονται οργανικές πρόδρομες αέριες ενώσεις (Volatile Organic Compounds, VOCs), συμμετέχουν σε περίπλοκες χημικές αντιδράσεις και συμπυκνώνονται ως σωματίδια (<https://www.pnnl.gov/atmospheric-aerosols>). Οι ιδιότητες των αερολυμάτων ποικίλλουν χωρικά και ορισμένες από αυτές διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο του περιβάλλοντος, έτσι μπορούμε να μιλάμε για αερολύματα αστικά (*urban aerosols*), ημιαστικά (*semiurban aerosols*), ηπειρωτικά (*continental aerosols*), ερημικά (*desertic aerosols*), θαλάσσια (*marine aerosols*), ηφαιστειογενή (*volcanic aerosols*) ή στρατοσφαιρικά (*stratospheric aerosols*) (Boucher, 2015). Επίσης, έχουν ένα ευρύ φάσμα πηγών και μπορούν να ταξινομηθούν περαιτέρω σε φυσικά (σκόνη, αερολύματα θαλάσσιου άλατος, καπνός) και ανθρωπογενή αερολύματα, που προέρχονται από ανθρώπινες δραστηριότητες (καύση ορυκτών καυσίμων και βιοκαυσίμων, πυρκαγιές στην βλάστηση, βιομηχανικές δραστηριότητες).

Το διαμετρικό μέγεθος των αερολυμάτων ( $d$ ) αποτελεί επίσης ένα άλλο κριτήριο κατηγοριοποίησης, σύμφωνα με το οποίο διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες (Σχήμα 1.1):

- *Λεπτόκοκκα* ή *λεπτής υφής* ή *λεπτά αερολύματα* (*fine aerosols*) με διάμετρο  $d < 2.5$   $\mu\text{m}$ , που διαχωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες:
  - 1) *Αερολύματα περιοχής πυρήνωσης* (*nucleation mode*) στην οποία περιλαμβάνονται σωματίδια με διάμετρο  $d < 0.01$   $\mu\text{m}$  και τα αερολύματα τύπου Aitken με διάμετρο  $0.01 - 0.1$   $\mu\text{m}$ .
  - 2) *Αερολύματα περιοχής συσσώρευσης* (*accumulation mode*) στην οποία ανήκουν σωματίδια με διάμετρο  $0.1 < d < 2.5$   $\mu\text{m}$ .
- *Χονδρόκοκκα* ή *χονδρής υφής* ή *χονδρά αερολύματα* (*coarse aerosols*) με διάμετρο  $d > 2.5$   $\mu\text{m}$



**Σχήμα 1.1.** Κατανομή μεγέθους ατμοσφαιρικών αερολυμάτων (δεξιά) και πηγές και μηχανισμοί απομάκρυνσής τους (αριστερά). (Πηγή: Seinfeld and Pandis, 2006)

Τα αιωρούμενα σωματίδια που βρίσκονται στην περιοχή πυρηνοποίησης σχηματίζονται κυρίως μέσω διαδικασιών μετατροπής αερίων σε σωματίδια (gas-to-particle conversion). Οι πυρήνες Aitken έχουν μικρό χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα, λόγω της έντονης χημικής τους δραστηριότητας και της φυσικής κινητικότητάς τους και μετατρέπονται μέσω διαδικασιών σε μεγαλύτερα σωματίδια με διαμέτρους που κυμαίνονται από 0.1  $\mu\text{m}$  έως 2.5  $\mu\text{m}$  (accumulation mode). Αντίθετα, σωματίδια με διαμέτρους μεγαλύτερες των 2.5  $\mu\text{m}$ , έχουν άμεσο σχηματισμό από μηχανικές διαδικασίες, όπως η μεταφορά σκόνης από τον αέρα, η δημιουργία υδροσταγονιδίων από σπάσιμο φυσαλίδων στην επιφάνεια της θάλασσας, η μεταφορά της γύρης τους μήνες της άνοιξης (Seinfeld and Pandis, 2006).

### 1.3 Πηγές και είδη αερολυμάτων

Υπάρχουν τρεις κύριες πηγές μέσω των οποίων τα αερολύματα εισέρχονται στην ατμόσφαιρα: α) μέσω διαδικασιών που συμβαίνουν στην επιφάνεια της Γης (π.χ. σκόνη και αερολύματα θαλασσίου άλατος), β) μέσω χημικών αντιδράσεων που πραγματοποιούνται και έχουν ως αποτέλεσμα την μετατροπή αερίων σε σωματίδια, και γ) από το διάστημα (κοσμικά αερολύματα). Τα αερολύματα που προέρχονται από την επιφάνεια της Γης έχουν συνεισφορά 50% στη συνολική μάζα των αιωρούμενων σωματιδίων σε παγκόσμια κλίμακα, ενώ τα κοσμικά αερολύματα έχουν αμελητέα επίδραση στη χαμηλότερη ατμόσφαιρα (Kokhanovsky, 2008).

Οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες που οδηγούν στην εκπομπή αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο και αποτελούν επίσης σημαντική πηγή παραγωγής αυτών. Η συγκέντρωση των αερολυμάτων αυτού του είδους αυξήθηκε αρκετά, ιδιαίτερα τις τελευταίες δεκαετίες, λόγω των αυξημένων βιομηχανικών δραστηριοτήτων και μεταφορών, γεγονός που οδηγεί σε σοβαρά προβλήματα υγείας στους κατοίκους κοντά σε βιομηχανικές περιοχές και στην επιδείνωση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής (Kokhanovsky, 2008).

Στον παρακάτω Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι παγκόσμιες εκπομπές των διαφόρων αερολυμάτων, όπου φαίνεται ότι τα αερολύματα θαλασσίου άλατος και αυτά που παράγονται δευτερογενώς στην ατμόσφαιρα κατέχουν τα μεγαλύτερα ποσά εκπομπής, γεγονός που εξηγείται από τη μεγάλη κάλυψη της επιφάνειας της Γης από ωκεανούς.

**Πίνακας 1.1.** Παγκόσμιες εκπομπές βασικών τύπων αερολυμάτων (Πηγή: Kokhanovsky, 2008).

Τύπος αερολυμάτων	Εκπομπή (10 <sup>6</sup> τόνοι/χρόνο)
Αερολύματα θαλασσίου άλατος (sea salt)	500-2000
Αερολύματα που σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα από αέρια (secondary)	345-2080
Αερολύματα σκόνης (dust)	7-1800
Βιολογικά αερολύματα (biological)	80
Καπνός από δασικές πυρκαγιές (smoke from forest fires)	5-150
Ηφαιστειακά αερολύματα (volcanic)	4-90
Ανθρωπογενή αερολύματα (anthropogenic)	181-396
Συνολική εκπομπή	1122-6596

### 1.3.1 Ερημική σκόνη (Mineral Dust)

Τα αερολύματα σκόνης προέρχονται κυρίως από ανέμους που επιδρούν στην επιφάνεια του εδάφους και αποτελούνται από στερεά σωματίδια, τα περισσότερα από τα οποία δεν είναι διαλυτά στο νερό και αυτό έχει ως αποτέλεσμα το σχήμα και η δομή τους να μην επηρεάζεται από την υγρασία (Kokhanovsky, 2008). Οι κύριες πηγές σκόνης εντοπίζονται σε άνυδρες και ημιάνυδρες περιοχές της γης, οι οποίες καλύπτουν το ένα τρίτο της παγκόσμιας χερσαίας έκτασης, με τη μεγαλύτερη πηγή να είναι η περιοχή της Σαχάρα στη Βόρεια Αφρική (Seinfeld and Pandis, 2006). Η διάμετρος αυτών των αερολυμάτων φθάνει μέχρι και τα 10μm κι επομένως κατατάσσονται στα χονδρά αερολύματα (coarse aerosols), με τα μεγαλύτερα σωματίδια να μεταφέρονται και σε μεγαλύτερα ύψη, αλλά γρήγορα επιστρέφουν στην επιφάνεια του εδάφους (Boucher, 2015).

Παρά το γεγονός ότι γενικά είναι αδιάλυτα στο νερό, ο πυρήνας τους μπορεί να καλυφθεί από νερό ή από πάγο σε συνθήκες υψηλής υγρασίας και έτσι να μεταβληθούν οι οπτικές ιδιότητες των σωματιδίων. Αυτός είναι και ένας λόγος που καθιστά τη μελέτη αυτών των αερολυμάτων απαιτητική και δύσκολη πολλές φορές. Επίσης, τα στερεά σωματίδια σε συνθήκες υγρασίας έχουν χαμηλότερους δείκτες διάθλασης σε σχέση με αυτά σε ξηρές συνθήκες, οπότε δεν μπορούμε να παραβλέψουμε εντελώς τις συνέπειες που επιφέρει η υγρασία (Kokhanovsky, 2008).

Τα αερολύματα σκόνης, όταν είναι ξηρά και δεν έχουν προσροφήσει νερό, είναι μη σφαιρικά. Το σχήμα τους δεν είναι σταθερό, αλλά εν γένει χαρακτηρίζεται ως ωοειδές, κάτι το οποίο καθιστά τη μελέτη τους δυσκολότερη σε σχέση με τα υπόλοιπα (σφαιρικά) αερολύματα.

Οι κύριες πηγές απομάκρυνσης αυτών των αερολυμάτων από την ατμόσφαιρα είναι η καθίζηση λόγω του βάρους τους και η υγρή εναπόθεση, και η μέση διάρκεια ζωής τους στην ατμόσφαιρα είναι δύο εβδομάδες, κατά την διάρκεια των οποίων μπορούν να μεταφερθούν σε απόσταση εκατοντάδων χιλιομέτρων από την πηγή τους. Για παράδειγμα, νέφη σκόνης από τη Σαχάρα μπορούν να φτάσουν μέχρι και την Καραϊβική (Prospero and Mayol-Bracero, 2013), ενώ από την Ασία μπορούν να εντοπιστούν μέχρι και στις δυτικές ακτές της Βόρειας Αμερικής (Seinfeld and Pandis, 2006).

Τα αερολύματα σκόνης μπορούν να παραχθούν επίσης και από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως: 1) αλλαγές στην χρήση της γης που τροποποιούν την επιφάνεια του εδάφους, και 2) κλιματικές τροποποιήσεις (αλλαγές στην ταχύτητα του ανέμου, στα

σύννεφα και τις βροχοπτώσεις) οι οποίες τροποποιούν την εκπομπή των αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα αλλά και την απομάκρυνσή τους από αυτήν (Seinfeld and Pandis, 2006).

Οι πηγές των αερολυμάτων σκόνης είναι κυρίως φυσικές, αλλά έχει βρεθεί ότι ένα μικρό ποσοστό της τάξης του 10% προέρχεται από αστικές περιοχές (Tegen et al., 2004). Ένα παράδειγμα επεισοδίου σκόνης είναι όταν με την επικράτηση κατάλληλων μετεωρολογικών συνθηκών, και πιο συγκεκριμένα τη δημιουργία κυκλωνικών συστημάτων ισχυρής έντασης στην οροσειρά του Άτλαντα στη Βόρεια Αφρική, τους γνωστούς κυκλώνες Sharav οι οποίοι την άνοιξη μετακινούνται προς τα ανατολικά κατά μήκος των ακτών της Β. Αφρικής (Alpert and Ziv, 1989), μεγάλα ποσά σκόνης μεταφέρονται στην Μεσόγειο κυρίως τους ανοιξιάτικους μήνες δημιουργώντας έντονα επεισόδια σκόνης (Kubilay et al., 2013; Israelevich et al., 2002; Gkikas et al., 2013; Flaounas et al., 2015; Gavrouzou et al., 2020).

### 1.3.2 Θαλάσσια αερολύματα ή αερολύματα θαλασσίου άλατος (Sea Salt Aerosols)

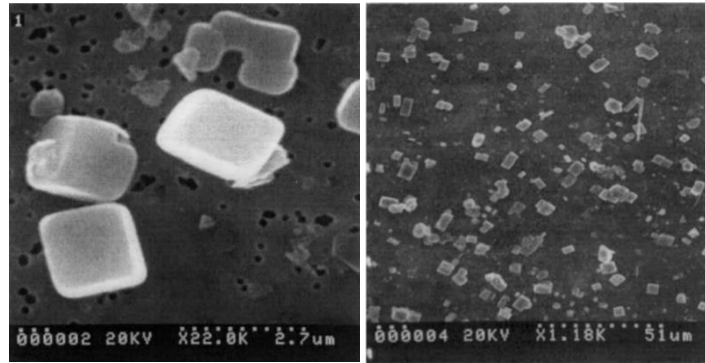
Τα θαλάσσια αερολύματα είναι χονδρόκοκκα (coarse) αερολύματα που παράγονται με φυσικό τρόπο και είναι ένα από τα κυρίαρχα αερολύματα πάνω από ωκεάνιες περιοχές. Τα αερολύματα αυτά σκεδάζουν έντονα την ηλιακή ακτινοβολία, οδηγώντας σε φαινόμενα ψύξης τόσο στην επιφάνεια της Γης όσο και στην κορυφή της ατμόσφαιρας, που κυμαίνεται μεταξύ  $-1$  και  $-5$  W/m<sup>2</sup> (Korras-Carraca et al., 2021). Αποτελούν το μεγαλύτερο συστατικό στην ατμόσφαιρα από άποψη μάζας (Liao et al., 2006), συμβάλλοντας σε μεγάλο βαθμό (έως και 30%, Bellouin et al., 2013) στο παγκόσμιο οπτικό βάθος των αερολυμάτων. Το μέγεθός τους κυμαίνεται από τα 100 nm έως και αρκετές δεκάδες μm, με τα μεγαλύτερα σωματίδια να επιστρέφουν γρήγορα στην επιφάνεια των ωκεανών (Boucher, 2015). Διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο, καθώς επηρεάζουν την ορατότητα, την τηλεπισκόπηση, την ατμοσφαιρική χημεία και την ποιότητα του αέρα.

Η κύρια πηγή παραγωγής των αερολυμάτων αυτών είναι οι επιφάνειες των υδάτινων περιοχών του πλανήτη, όπου ο άνεμος οδηγεί στην δημιουργία κυμάτων με αποτέλεσμα την έγχυση αερολυμάτων θαλασσίου άλατος στα υπερκείμενα ατμοσφαιρικά στρώματα. Η παραγωγή, η μεταφορά και η απομάκρυνσή τους από την ατμόσφαιρα επηρεάζονται σημαντικά από διάφορους μετεωρολογικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η ταχύτητα του ανέμου, η κατάσταση της επιφάνειας των ωκεανών, η θερμοκρασία του αέρα,

η σχετική υγρασία, η βροχόπτωση, το βάθος του βυθού και η τοπογραφία. Τα περισσότερα από αυτά τα αερολύματα μπορούν να μεταφέρονται μέσω της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας σε κοντινές αποστάσεις από τις πηγές τους, με εξαίρεση τα μικρότερα σωματίδια (0.1 με 1 μm) τα οποία έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και μπορούν να εντοπιστούν όχι μόνο πάνω από ωκεάνιες, αλλά και πάνω από γειτονικές ηπειρωτικές περιοχές (Kokhanovsky, 2008). Ο άνεμος, και ειδικά η ταχύτητα του, που είναι παράγοντες υπεύθυνοι για την κατακόρυφη και οριζόντια κατανομή, καθώς και την συγκέντρωση των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος, μειώνονται δραστικά με το ύψος, οδηγώντας σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις τους στα ανώτερα στρώματα της τροπόσφαιρας (Murphy et al., 2019).

Τα θαλάσσια αερολύματα συμπεριφέρονται και ως καλοί πυρήνες συμπύκνωσης νεφών (Cloud Condensation Nuclei, CCN), καθώς είναι υγροσκοπικά και έχουν τη δυνατότητα να απορροφούν νερό, επηρεάζοντας έτσι τις φυσικές και οπτικές ιδιότητες των νεφών, όπως την ανακλαστικότητα, το χρόνο ζωής και την έκτασή τους (Quinn et al., 2017). Τα σωματίδια θαλάσσιων αερολυμάτων έχουν σχήμα το οποίο επηρεάζεται από την υγρασία. Πιο συγκεκριμένα, σε χαμηλά επίπεδα υγρασίας έχουν κυβικό σχήμα λόγω της κυβικής δομής που έχει το χλωριούχο νάτριο, το οποίο αποτελεί και βασικό συστατικό τους, ενώ σε υψηλά επίπεδα υγρασίας το σχήμα τους μετατρέπεται σε σφαιρικό, καθώς το χλωριούχο νάτριο διαλύεται εύκολα στο νερό. Επίσης, σε υψηλές τιμές υγρασίας η συγκέντρωση των μορίων χλωριούχου νατρίου είναι μεγαλύτερη κοντά στο κέντρο των σωματιδίων παρά στην περιφέρεια τους. Επομένως, εξαιτίας της δυναμικότητας που παρουσιάζει το σχήμα τους με την υγρασία και της ανομοιόμορφης κατανομής του χλωριούχου νατρίου είναι δύσκολο να κατασκευαστεί ένα οπτικό μοντέλο για τα αερολύματα θαλασσίου άλατος (Kokhanovsky, 2008).

Τέλος, τα θαλάσσια αερολύματα χαρακτηρίζονται από σχετικά μικρές τιμές οπτικού βάθους και υψηλές τιμές λευκαύγειας μεμονωμένης σκέδασης (Hatzianastassiou et al., 2004). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα σωματίδια αυτά να απορροφούν ελάχιστα ποσά ακτινοβολίας και να είναι εξαιρετικά σκεδάζοντα.



**Σχήμα 1.2.** Ξηρά σωματίδια θαλασσίου άλατος (αριστερά: 2.7μm, δεξιά: 51μm) που συλλέχθηκαν στο Mace Head στη δυτική ακτή της Ιρλανδίας (Chamaillard et al., 2003). (Πηγή: Kokhanovsky, 2008).

### 1.3.3 Ηφαιστειακά αερολύματα (volcanic aerosols)

Τα σωματίδια αυτά προέρχονται από εκρήξεις ηφαιστείων, από όπου εκπέμπονται θραύσματα πετρωμάτων και ορυκτών, η γνωστή ηφαιστειακή τέφρα, με μέγεθος που κυμαίνεται από 1μm έως μερικά χιλιοστά. Τα περισσότερα από αυτά τα σωματίδια είναι αδιάλυτα στο νερό. Η ηφαιστειακή τέφρα μπορεί να μεταφερθεί από μερικές εκατοντάδες έως μερικές χιλιάδες χιλιόμετρα μακριά από την πηγή, αλλά τα σωματίδια αυτά επιστρέφουν γρήγορα στο έδαφος με αποτέλεσμα η κλιματική τους επίδραση να είναι περιορισμένη (Boucher, 2015). Επίσης, από εκρήξεις ηφαιστείων εκπέμπονται και αέρια πλούσια σε θείο με τη μορφή διοξειδίου του θείου (SO<sub>2</sub>) και υδρόθειου (H<sub>2</sub>S), τα οποία οξειδώνονται στην ατμόσφαιρα και συνθέτουν θειικά αερολύματα. Αν αυτά τα αέρια εκπέμπονται στην τροπόσφαιρα τότε ο χρόνος ζωής των θεικών αερολυμάτων που θα δημιουργηθούν θα είναι αρκετά μικρός (μερικές εβδομάδες). Αν η έκρηξη όμως είναι αρκετά ισχυρή ώστε τα αέρια αυτά να φτάσουν μέχρι την στρατόσφαιρα, τότε τα θειικά αερολύματα έχουν μεγαλύτερο χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα (μήνες, και μπορεί και παραπάνω από ένα έτος) (Boucher, 2015). Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί το ηφαίστειο Pinatubo στις Φιλιπίνες, όταν τα εκλυθέντα αερολύματα έφτασαν σε ύψος έως και 40km, παρέμειναν στη στρατόσφαιρα για διάστημα έως και 2 ετών και μείωσαν τη θερμοκρασία στην επιφάνεια του Βορείου Ημισφαιρίου κατά περίπου 0.5°C (Self et al., 1993; Parker et al., 1996).

Η παρατηρούμενη ποσότητα διοξειδίου του θείου στην στρατόσφαιρα σε ηφαιστειακά ήρεμες περιόδους είναι 0.14 Tg ετησίως, ενώ είναι δυνατό να παραχθούν και 100 Tg από μία μόνο έκρηξη, όπως συνέβη και με το ηφαίστειο Tambora το 1815 (Kokhanovsky, 2008).



Τα ηφαιστειακά αερολύματα δρουν γενικά ψύχοντας τον πλανήτη, μέσω της έντονης σκέδασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Σύμφωνα με τα κλιματικά μοντέλα η επίδραση στην ακτινοβολία των οξειδίων του θείου που προέρχονται από ηφαιστειακές εκρήξεις είναι μόνο ελαφρώς μικρότερη από αυτή των οξειδίων του θείου που προέρχονται από ανθρωπογενείς πηγές, παρά το γεγονός ότι η εκπομπή των τελευταίων είναι 5 φορές μεγαλύτερη. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι το SO<sub>2</sub> από ηφαίστεια εκπέμπεται σε μεγαλύτερο ύψος και έχει μεγαλύτερο χρόνο ζωής (Kokhanovsky, 2008).

#### 1.3.4 Αερολύματα καύσης βιομάζας (biomass burning aerosols)

Τα αερολύματα καύσης βιομάζας είναι απορροφητικά λεπτόκοκκα σωματίδια με διάμετρο μεταξύ 0.1-0.2 μm και οι πηγές προέλευσής τους είναι είτε φυσικές (δασικές πυρκαγιές, γεωργικές δραστηριότητες) είτε ανθρωπογενείς (οικιακή θέρμανση – καύση βιομάζας). Τα αερολύματα αυτά αποτελούνται κυρίως από δύο χημικά συστατικά: τον μαύρο άνθρακα (Black Carbon, BC) ο οποίος απορροφά κυρίως την ηλιακή ακτινοβολία (Bond et al., 2013), και τον οργανικό άνθρακα (Organic Carbon, OC) ο οποίος δεν είναι τόσο ισχυρός απορροφητής όσο ο μαύρος άνθρακας (Jacobson, 1998; 1999; Andreae and Gelencsér, 2006). Κύρια πηγή προέλευσης των αερολυμάτων αυτών είναι οι διαδικασίες καύσης (Houghton et al., IPCC, 2001) και πιο συγκεκριμένα οι διαδικασίες ατελούς καύσης ορυκτών καυσίμων και βιοκαυσίμων, όπως το κάρβουνο ή το ξύλο, καθώς και οι διαδικασίες καύσης των μηχανών diesel.

Έχουν την ικανότητα να δρουν άμεσα κατά την παραγωγή τους ως πυρήνες συμπύκνωσης (Bougiatioti et al., 2016) η οποία αυξάνεται σε συνάρτηση με τον χρόνο παραμονής τους στην ατμόσφαιρα (Lohmann and Feichter, 2005). Τα αερολύματα αυτά επηρεάζουν τη βροχόπτωση (Lin et al., 2012) και επιδρούν ευνοϊκά στη διάλυση των νεφών όταν μέσα σε αυτά υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση τέτοιων απορροφητικών σωματιδίων, με αποτέλεσμα τη θέρμανση και τη διάλυση των νεφών (semi-direct effect). Αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου είναι να μειώνεται η νεφοκάλυψη και άρα να αυξάνεται το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στο έδαφος (Johnson et al., 2004), επηρεάζοντας ταυτόχρονα και την ευστάθεια/αστάθεια της ατμόσφαιρας (Hansen et al., 1997; Ackerman et al., 2000; Koch and Del Genio 2010). Επίσης, η καύση βιομάζας προκαλεί μείωση της επιφανειακής ανάκλασης και της ανακλαστικότητας μεμονωμένης σκέδασης, με αποτέλεσμα να

αυξάνονται τοπικά τα φαινόμενα θέρμανσης της ατμόσφαιρας (Claudio Tomasi, Angelo Lupi, 2016). Τέλος, εκτιμήσεις δείχνουν ότι η ποσότητα παραγωγής αυτών των αερολυμάτων είναι 45 έως 80 Tg / έτος (Lioussse, et al., 1996;Cooke, et al., 1999; Scholes and Andreae, 2000).

### 1.3.5 Ανθρωπογενή/αστικά/βιομηχανικά (urban/industrial) αερολύματα

Τα ανθρωπογενή αερολύματα αποτελούνται από πρωτογενή (π.χ. αερολύματα καύσης, σκόνη) και δευτερογενή σωματίδια που έχουν μικρό μέγεθος, σφαιρικό σχήμα και εισέρχονται στην ατμόσφαιρα από αέριες ανθρωπογενείς εκπομπές. Το μεγαλύτερο μέρος όμως των αερολυμάτων αυτής της κατηγορίας αποτελείται από μεγάλα σωματίδια ακανόνιστου σχήματος (Kokhanovsky, 2008). Παρατηρούνται πιο έντονα στο Βόρειο Ημισφαίριο, καθώς εκεί λαμβάνουν χώρα οι περισσότερες ανθρωπογενείς δραστηριότητες που οδηγούν στην απελευθέρωση αυτών των αερολυμάτων. Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις τους βρίσκονται κοντά στις πηγές προέλευσής τους, ενώ τα φορτία τους μειώνονται γρήγορα σε μεγάλη απόσταση από αυτές (Kokhanovsky, 2008).

Τα ανθρωπογενή αερολύματα αποτελούν περίπου το 10% του συνολικού παγκόσμιου φορτίου αερολυμάτων, παρόλα αυτά μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση στο κλίμα, καθώς η συγκέντρωσή τους τις τελευταίες δεκαετίες σημειώνει αυξητική τάση (Kokhanovsky, 2008). Αποτελούνται κυρίως από μαύρο άνθρακα και από οργανικές και θεικές/νιτρικές ενώσεις, με διάμετρο μικρότερη από 0.1μm, η οποία μπορεί να φτάσει στα 0.5μm κοντά στην επιφάνεια της Γης, και έτσι χαρακτηρίζονται ως λεπτόκοκκα σωματίδια. Σε ό,τι αφορά στη χημική τους σύσταση, αποτελούνται από οργανική ύλη, θειικά ή νιτρικά άλατα, αμμωνία και μαύρο άνθρακα (Xu et al. 2014; Zhu et al., 2016).

### 1.3.6 Βιογενή αερολύματα (biogenic aerosols)

Τα βιογενή αερολύματα χαρακτηρίζονται από μεγάλο εύρος μεγέθους και ετερογένεια και περιλαμβάνουν υπολείμματα φυτών, γύρη, σπόρια, βακτήρια και ιούς που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα. Η ογκομετρική τους αναλογία στην ατμόσφαιρα εξαρτάται από την εποχή, την τοποθεσία και το υψόμετρο (Kokhanovsky, 2008; Boucher, 2015).

Τα αερομεταφερόμενα αυτά σωματίδια μπορούν να μεταφερθούν με τον άνεμο σε διάφορες αποστάσεις ανάλογα με το μέγεθος τους. Τα υπολείμματα φυτών και εντόμων έχουν συνήθως μέγεθος μεγαλύτερο από 100μm, η γύρη, τα σπόρια και τα μεγάλα βακτήρια έχουν μέγεθος μεταξύ 1-100μm, ενώ τα μικρά βακτήρια και οι ιοί έχουν μέγεθος μικρότερο από 1 μm με αποτέλεσμα να διεισδύουν εύκολα στο αναπνευστικό σύστημα των ανθρώπων και των ζώων (Kokhanovsky, 2008; Boucher, 2015).

Τα αερολύματα αυτής της κατηγορίας μπορούν να προσκολλώνται και συσσωματώνονται με άλλα σωματίδια (π.χ. σκόνη) και να μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις, προκαλώντας σημαντικές επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου. Γενικά, η παρουσία τους είναι πιο έντονη πάνω από τις ηπειρωτικές περιοχές και κοντά στην επιφάνεια (απ' όπου και εισέρχονται στην ατμόσφαιρα) και αρκετά μειωμένη πάνω από τις ωκεάνιες (Kokhanovsky, 2008; Boucher, 2015).

## **1.4 Χρόνος παραμονής αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα**

Ο ρυθμός απομάκρυνσης των αερολυμάτων από την ατμόσφαιρα εξαρτάται από το μέγεθος τους, το ύψος στο οποίο βρίσκονται και τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν στην ατμόσφαιρα. Πιο συγκεκριμένα, τα λεπτόκοκκα αερολύματα παρουσιάζουν μεγαλύτερο χρόνο παραμονής σε σχέση με τα χονδρόκοκκα. Τα αερολύματα μικρών διαστάσεων που εντοπίζονται στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, μέσω της συσσωμάτωσής τους με άλλα σωματίδια αυξάνουν το μέγεθος τους και δρουν ως πυρήνες συμπύκνωσης νεφών (CCN και IN). Το γεγονός αυτό οδηγεί στην αύξηση της βαρυτικής έλξης που δέχονται από την Γη και έτσι στην ταχύτερη απομάκρυνσή τους από την ατμόσφαιρα. Στην αντίθετη περίπτωση των αερολυμάτων που βρίσκονται σε υψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας, ο χρόνος παραμονής τους σε αυτήν αυξάνεται, καθώς σε αυτά τα υψόμετρα απουσιάζουν ή είναι λιγότερο αποτελεσματικές οι διαδικασίες απομάκρυνσής τους. Έτσι, στα υψηλότερα στρώματα της τροπόπαυσης ο χρόνος παραμονής των αερολυμάτων κυμαίνεται από μερικές εβδομάδες έως και μήνες, ενώ σε ακόμα μεγαλύτερα υψόμετρα (π.χ. στρατόσφαιρα) μπορεί να φτάσει μέχρι και τα λίγα έτη, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.3.

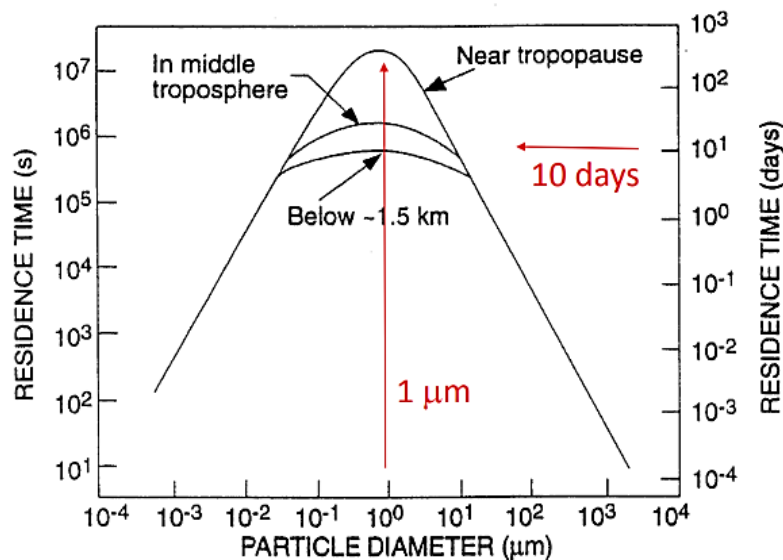
Η απομάκρυνση των αερολυμάτων από την ατμόσφαιρα πραγματοποιείται μέσω της υγρής εναπόθεσης (wet deposition) ή της ξηρής εναπόθεσης (dry deposition). Η διαδικασία της υγρής εναπόθεσης περιλαμβάνει την μεταφορά των αερολυμάτων στην επιφάνεια της Γης

μέσω του υετού (βροχή ή χιονόπτωση), ενώ κατά την διαδικασία της ξηρής εναπόθεσης μεταφέρονται στην επιφάνεια της Γης μέσω κατακόρυφων καθοδικών κινήσεων του ανέμου. Η ξηρή εναπόθεση πραγματοποιείται σε τρία στάδια (Seinfeld and Pandis, 2006):

**1<sup>ο</sup> στάδιο:** Τα αερολύματα διαμέσου ενός ατμοσφαιρικού στρώματος μεταφέρονται προς τα κάτω μέσω αεροδυναμικής μεταφοράς προς ένα λεπτό και ευσταθές ατμοσφαιρικό στρώμα αέρα που εφάπτεται στην επιφάνεια της Γης.

**2<sup>ο</sup> στάδιο:** Τα αερολύματα που βρίσκονται μέσα στο λεπτό ευσταθές επιφανειακό στρώμα αέρα μεταφέρονται προς της επιφάνεια της Γης μέσω της κίνησης Brown.

**3<sup>ο</sup> στάδιο:** Τα αερολύματα εναποτίθενται στην επιφάνεια της Γης.



**Σχήμα 1.3.** Χρόνος παραμονής των αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα ανάλογα με το μέγεθός τους και το υψόμετρο στο οποίο βρίσκονται (Πηγή: Krogh E.).

## 1.5 Οπτικές Ιδιότητες αερολυμάτων

Τα αερολύματα αλληλεπιδρούν με την ηλιακή ακτινοβολία είτε άμεσα (direct effect) είτε έμμεσα (indirect effect) με αποτέλεσμα να παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του ισοζυγίου ακτινοβολίας και του ενεργειακού ισοζυγίου του συστήματος Γης – ατμόσφαιρας. Οι οπτικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν αυτά τα σωματίδια προσδιορίζουν την αλληλεπίδρασή τους με την ακτινοβολία. Οι τρεις κυριότερες οπτικές ιδιότητες, που

χρησιμοποιήθηκαν και στην παρούσα εργασία είναι το οπτικό βάθος των αερολυμάτων (Aerosol Optical Depth, AOD), ο εκθετικός παράγοντας Ångström (AE) και ο συντελεστής λευκαύγειας μεμονωμένης σκέδασης (Single Scattering Albedo, SSA).

### 1.5.1 Οπτικό βάθος και πάχος αερολυμάτων

Το οπτικό βάθος (AOD) και πάχος (Aerosol Optical Thickness,  $\tau$ ) των αερολυμάτων είναι μία παράμετρος που περιγράφει και ποσοτικοποιεί την εξασθένηση που υφίσταται η ακτινοβολία, είτε μέσω σκέδασης είτε απορρόφησης, όταν αυτή διέρχεται από ένα ατμοσφαιρικό στρώμα με αερολύματα. Είναι ένα αδιάστατο μέγεθος και μεταβάλλεται φασματικά, καθώς ο συντελεστής εξασθένησης εξαρτάται από το μήκος κύματος ( $\lambda$ ). Πιο συγκεκριμένα, μπορούμε να υποθέσουμε για παράδειγμα (Σχήμα 1.4) ως μέσο διάδοσης ένα ατμοσφαιρικό στρώμα πάχους  $dx$  στο οποίο η διάδοση της ακτινοβολίας γίνεται κάθετα ως προς αυτό με αρχική ένταση  $I$ . Η ακτινοβολία εισέρχεται και διαδίδεται μέσα στο ατμοσφαιρικό στρώμα και στη συνέχεια εξέρχεται από αυτό εξασθενημένη, καθώς μέσα σε αυτό υπάρχουν αερολύματα που είτε απορροφούν είτε σκεδάζουν μέρος αυτής. Η εξασθένηση  $dI$  της ηλιακής ακτινοβολίας περιγράφεται από την σχέση:

$$dI = -k_{ext} I dx \quad (1.1)$$

όπου  $k_{ext}$  είναι ο συντελεστής εξασθένησης των αερολυμάτων.

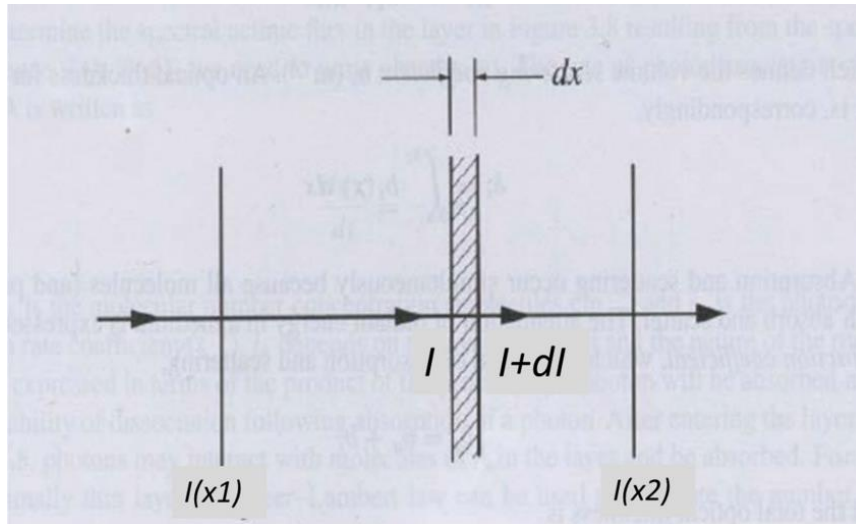
Εάν θεωρήσουμε ότι η διαδρομή είναι πεπερασμένη μεταξύ δύο σημείων  $x_1$  και  $x_2$  και ολοκληρώσουμε την παραπάνω σχέση ως προς το μήκος  $x$ , τότε:

$$I(x_2) = I(x_1) \exp(-AOD) \quad (1.2)$$

όπου,

$$AOD = \int_{x_1}^{x_2} k_{ext}(x) dx \quad (1.3)$$

είναι το οπτικό βάθος των αερολυμάτων.



**Σχήμα 1.4.** Διάδοση της ακτινοβολίας καθώς αυτή εισέρχεται μέσα σε ένα ατμοσφαιρικό στρώμα (Seinfeld και Pandis, 2006).

Καθώς το μήκος κύματος της ακτινοβολίας αυξάνεται, το οπτικό βάθος λαμβάνει μικρότερες τιμές, και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο συντελεστής εξασθένησης μειώνεται (Fotiadi et al., 2006). Επίσης, για αερολύματα μικρών διαστάσεων η φασματική μείωση των τιμών του οπτικού βάθους τους είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τη μείωση που παρατηρείται για τα αερολύματα μεγαλύτερων διαστάσεων (Καπλάνη, Α.Μ.: Χωρική Κατανομή, εποχικότητα και τύποι αερολυμάτων από Linas στη λεκάνη της Μεσογείου).

Τέλος, το οπτικό πάχος των αερολυμάτων ορίζεται αντίστοιχα με το οπτικό βάθος τους, αλλά διαφέρει στο ότι η διάδοση της ακτινοβολίας δε γίνεται κάθετα στο στρώμα, αλλά υπό γωνία, οπότε πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν το συνημίτονο της γωνίας που σχηματίζεται μεταξύ της κάθετης και της υπό γωνία διάδοσης.

### 1.5.2 Εκθετικός παράγοντας Ångström (AE)

Ο εκθετικός παράγοντας Ångström (AE) εκφράζει τη φασματική εξάρτηση του οπτικού βάθους των αερολυμάτων από το μήκος κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας και προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$AE = -\frac{d \log k_{ext}}{d \log \lambda} \cong -\frac{\log \frac{k_{ext1}}{k_{ext2}}}{\log \frac{\lambda_1}{\lambda_2}} \quad (1.4)$$

όπου  $k_{ext}$  είναι ο συντελεστής εξασθένησης των αερολυμάτων ο οποίος εξαρτάται από το μήκος κύματος ( $\lambda$ ).

Με τη βοήθεια του παράγοντα Ångström μπορεί να γίνει διαχωρισμός μεταξύ των αερολυμάτων που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα με βάση το μέγεθός τους. Σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, όταν ο εκθετικός παράγοντας Ångström λαμβάνει τιμές  $AE < 1$  (Eck et al., 1999; Holben et al., 2001) τα αερολύματα είναι μεγάλου μεγέθους και κατατάσσονται στα χονδρόκοκα σωματίδια (coarse aerosols) π.χ. ερημικής προέλευσης. Για τιμές  $AE > 1$  (Dubovik et al., 2002; Fotiadis et al., 2006; Gkikas et al., 2015; Hatzianastassiou et al., 2019) έχουμε την παρουσία λεπτόκοκκων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, όπως για παράδειγμα ανθρακούχα αερολύματα που προέρχονται από καύση βιομάζας ή αστικές/βιομηχανικές δραστηριότητες.

### 1.5.3 Λευκαύγεια μεμονωμένης σκέδασης (Single Scattering Albedo, SSA)

Η παράμετρος SSA είναι ένα αδιάστατο μέγεθος το οποίο εκφράζει τον λόγο του οπτικού βάθους σκέδασης προς το συνολικό οπτικό βάθος (σκέδασης και απορρόφησης) της ατμόσφαιρας, λαμβάνει τιμές από μηδέν έως τη μονάδα και προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$SSA = \frac{AOD_{sca}}{AOD_{sca} + AOD_{abs}} \quad (1.5)$$

όπου  $AOD_{sca}$  είναι το οπτικό βάθος σκέδασης και  $AOD_{abs}$  το οπτικό βάθος απορρόφησης.

Όταν το οπτικό βάθος απορρόφησης τείνει στο μηδέν, δηλαδή όταν δεν υπάρχουν πολλά απορροφητικά αερολύματα στην ατμόσφαιρα, τότε ο λόγος της παραμέτρου SSA τείνει στη μονάδα και αυτό σημαίνει ότι η εξασθένιση της ηλιακής ακτινοβολίας οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στη σκέδαση. Αντίθετα, όταν στην ατμόσφαιρα δεν υπάρχουν σκεδαστικά αερολύματα, αλλά μόνο απορροφητικά, το οπτικό βάθος σκέδασης τείνει στο μηδέν, με αποτέλεσμα ο συντελεστής SSA να τείνει στο μηδέν. Σε αυτήν την περίπτωση, η εξασθένιση της ακτινοβολίας οφείλεται αποκλειστικά σε απορροφητικά αερολύματα. Επομένως, η παράμετρος SSA μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το διαχωρισμό μεταξύ των απορροφητικών και σκεδαστικών αερολυμάτων.

Πάνω από τις ερήμους και τα στρώματα πάγου υπάρχει υψηλή ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας με αποτέλεσμα να επηρεάζονται οι δορυφορικές μετρήσεις στο ορατό μέρος του φάσματος. Για να αντιμετωπιστεί αυτή η δυσκολία, ο συντελεστής SSA ανακτάται στο

υπεριώδες τμήμα του φάσματος (330-400 nm) (Torres et al., 1998, 2007), όπου οι ανακλώμενες ροές ακτινοβολίας είναι ευαίσθητες στην απορρόφηση των αερολυμάτων, ενώ δεν είναι ευαίσθητες στην επιφανειακή λευκαύγεια, η οποία έχει μικρές τιμές στα υπεριώδη μήκη κύματος της ακτινοβολίας (Kruthika et al., 2019).



## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> ΔΕΔΟΜΕΝΑ – ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

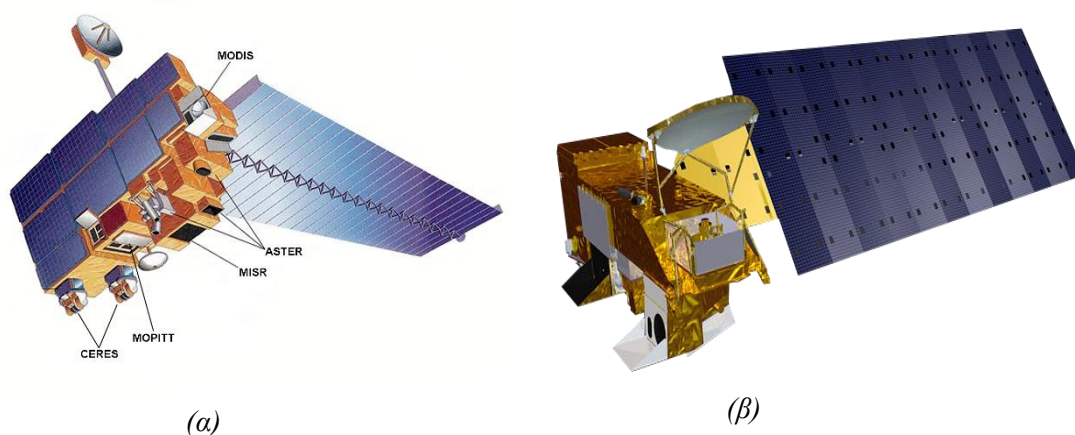
### 2.1 Δορυφορικά δεδομένα

#### 2.1.1 MODIS

Το φασματικό ραδιόμετρο MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) είναι ένα δορυφορικό όργανο καταγραφής δεδομένων και πραγματοποιεί μετρήσεις σε όλη την ατμοσφαιρική στήλη πάνω από ξηρά και ωκεανό. Οι ανιχνευτές του οργάνου λαμβάνουν μετρήσεις υψηλής φασματικής διακριτικής ικανότητας σε 36 φασματικές ζώνες μεταξύ των μηκών κύματος 0.4 μm και 14.4μm σε τρεις χωρικές αναλύσεις - 250m (2 φασματικές ζώνες), 500m (5 φασματικές ζώνες) και 1000m (29 φασματικές ζώνες) (<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/>, <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/design.php>). Οι φασματικές ζώνες μεταξύ 0.47 μm και 2.12 μm χρησιμοποιούνται για την ανάκτηση πληροφοριών σχετικών με τις οπτικές ιδιότητες των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων. Τα ημερήσια δεδομένα σε παγκόσμιο επίπεδο για το οπτικό πάχος των αερολυμάτων παρέχονται σε χωρική ανάλυση 10 km x 10 km (<https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/modis>). Το όργανο MODIS έχει εύρος σάρωσης 2330 km και καλύπτει όλη την επιφάνεια της Γης κάθε μία με δύο ημέρες. Είναι τοποθετημένο πάνω στους δορυφόρους πολικής τροχιάς Terra (EOS AM-1) και Aqua (EOS PM-1), οι οποίοι κατασκευάστηκαν στα πλαίσια του Earth Observing System (EOS) της NASA και περιστρέφονται με αντίθετες τροχιές. Η τροχιά του Terra (descending mode) είναι από Βορρά προς Νότο κατά μήκος του Ισημερινού το πρωί (10:30 UTC), ενώ του Aqua (ascending mode) είναι από Νότο προς Βορρά πάνω από τον Ισημερινό το μεσημέρι (13:30 UTC) (<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>). Ο δορυφόρος Terra εκτοξεύτηκε από τη NASA στις 18 Δεκεμβρίου 1999 και παρέχει δεδομένα από το Μάρτιο του 2000, ενώ ο δορυφόρος Aqua εκτοξεύτηκε το 2002 παρέχοντας δεδομένα από το Μάρτιο του 2003. Οι οπτικές ιδιότητες των αερολυμάτων υπολογίζονται πάνω από ξηρά και θάλασσα με τη χρήση διαφορετικών αλγορίθμων ανεύρεσης, οι οποίοι υφίστανται αναβαθμίσεις με την πάροδο των χρόνων, οπότε τα δεδομένα MODIS είναι διαθέσιμα σε διάφορες συλλογές (collections). Η πιο πρόσφατη συλλογή, η οποία χρησιμοποιείται και στην παρούσα εργασία, είναι η Collection C-6.1 που αποτελεί αναβάθμιση της κύριας συλλογής C6 (Levy et al., 2013). Τα δεδομένα MODIS παρέχονται σε τρία επίπεδα: δεδομένα επιπέδου 1 (level 1) που δεν έχουν υποστεί επεξεργασία, δεδομένα επιπέδου 2

(level 2) χωρικής ανάλυσης 10 km x 10 km και δεδομένα επιπέδου 3 (level 3) χωρικής ανάλυσης 100 km x 100 km (1° x 1°). Στην παρούσα εργασία προτιμήθηκαν τα προϊόντα του δορυφόρου MODIS-Aqua (level 3) για να υπάρχει χρονική σύμπτωση με τα δεδομένα OMI (Single Scattering Albedo), λαμβάνοντας υπόψιν ότι και το OMI βρίσκεται πάνω στον δορυφόρο Aura, ο οποίος ανήκει στον αστερισμό δορυφόρων Afternoon Constellation (A-Train) όπως και ο δορυφόρος Aqua. Το φασματόμετρο MODIS συλλέγει την ανακλώμενη ακτινοβολία από την επιφάνεια της Γης και από ολόκληρη την ατμοσφαιρική στήλη και με την εφαρμογή συγκεκριμένων αλγορίθμων ανεύρεσης (retrieval algorithms) που χρησιμοποιούν διάφορες φασματικές ζώνες στο ορατό (visible, VIS), κοντινό υπέρυθρο (near infrared, NIR) και ηλιακό υπέρυθρο (shortwave-IR, SWIR), εκτιμώνται οι διάφορες φυσικές και οπτικές ιδιότητες των αερολυμάτων.

Τα δεδομένα για τα αερολύματα από τη συλλογή C-6.1 εξάγονται από τρεις διαφορετικούς αλγόριθμους ανάκτησης που λειτουργούν σε διαφορετικούς τύπους επιφανειών. Πιο συγκεκριμένα, οι αλγόριθμοι είναι: δύο αλγόριθμοι Dark Target (DT)- ένας για ανάκτηση δεδομένων πάνω από ωκεανούς κι ένας πάνω από ξηρά- (Kaufman et al., 1997 and Remer et al., 2008) και ένας αλγόριθμος Deep Blue (DB), ο οποίος χρησιμοποιείται για ανάκτηση δεδομένων πάνω από ξηρές επιφάνειες (μικρές τιμές Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) (Hsu et al., 2013). Επισημαίνεται, ότι κάποιες φορές γίνεται επίσης συνδυαστική χρήση των δύο αλγορίθμων πάνω από ξηρά (Bilal et al. 2018b). Το MODIS παρέχει φασματική πληροφορία οπτικού πάχους αερολυμάτων (AOD) σε 7 μήκη κύματος (0.47, 0.55, 0.65, 0.86, 1.24, 1.63, 2.13 μm) πάνω από τους ωκεανούς και σε 3 μήκη κύματος πάνω από την ξηρά (0.47, 0.55, 0.66 μm). Ο δορυφορικός αλγόριθμος της παρούσας μελέτης χρησιμοποιεί το οπτικό βάθος στα 0.47μm και τα 2.13 μm για τον υπολογισμό του Ångström Exponent (AE) πάνω από τους ωκεανούς και αυτό στα 0.47μm και 0.66μm για τον αντίστοιχο υπολογισμό πάνω από ξηρά. Το οπτικό βάθος των αερολυμάτων θαλάσσιου άλατος έχει υπολογισθεί στα 0.55μm.



**Σχήμα 2.1.** Οι δορυφόροι EOS (α) Terra ([https://www.nasa.gov/mission\\_pages/terra/spacecraft/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/terra/spacecraft/index.html)) και (β) Aqua της NASA ([https://el.wikipedia.org/wiki/Aqua\\_%28%CE%B4%CE%BF%CF%81%CF%85%CF%86%CF%8C%CF%81%CE%BF%CF%82%29](https://el.wikipedia.org/wiki/Aqua_%28%CE%B4%CE%BF%CF%81%CF%85%CF%86%CF%8C%CF%81%CE%BF%CF%82%29)).

### 2.1.2 OMI

Το ραδιόμετρο OMI (Ozone Monitoring Instrument) είναι ένα όργανο καταγραφής δεδομένων που βρίσκεται πάνω στον δορυφόρο πολικής τροχιάς Aura, ο οποίος εκτοξεύτηκε στις 15 Ιουλίου 2004 και αποτελεί μέρος της σειράς δορυφόρων A – Train της NASA. Κατασκευάστηκε από τη διαστημική Υπηρεσία της Ολλανδίας (NIVR, Netherlands Instituut voor Vliegtuigontwikkeling en Ruimtevaart ή Netherlands Agency for Aerospace Programmes) σε συνεργασία με το Ινστιτούτο Μετεωρολογίας της Φινλανδίας στα πλαίσια του προγράμματος Earth Observing System (EOS) της NASA. Η αρχική του λειτουργία ήταν να μετρά το όζον από την επιφάνεια της Γης μέχρι την κορυφή της ατμόσφαιρας, καθώς και τις χημικές ενώσεις ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}$ ,  $\text{OCIO}$ ,  $\text{BrO}$ ,  $\text{HCHO}$ ) οι οποίες σχετίζονται με την καταστροφή του, πλέον όμως το όργανο έχει τη δυνατότητα να κάνει και διάκριση μεταξύ των διάφορων τύπων αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα (<https://www.earthdata.nasa.gov/learn/find-data/near-real-time/omi>).

Ο δορυφόρος Aura βρίσκεται σε υψόμετρο 705 km από την επιφάνεια της Γης σε μια ηλιοσύγχρονη πολική τροχιά, με κύκλο επανάληψης 16 ημερών και διέρχεται από τον Ισημερινό στις 13:45 τοπική ώρα (ascending mode) ([https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone\\_monitoring\\_instrument](https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone_monitoring_instrument)). Το όργανο OMI εκμεταλλεύεται την ανακλώμενη από τη Γη (επιφάνεια και ατμόσφαιρα) ηλιακή ακτινοβολία.

Έχει φασματική ανάλυση 0.5 nm, εύρος σάρωσης 2600 km (114° γωνία κάλυψης του τηλεσκοπίου) στην επιφάνεια της Γης και λειτουργεί σε δύο φασματικά κανάλια: το ορατό (VIS-channel) με εύρος μηκών κύματος 350-500 nm και το υπέρυθρο (UV-channel) μεταξύ των μηκών κύματος 270–380 nm (<https://aura.gsfc.nasa.gov/omi.html>).

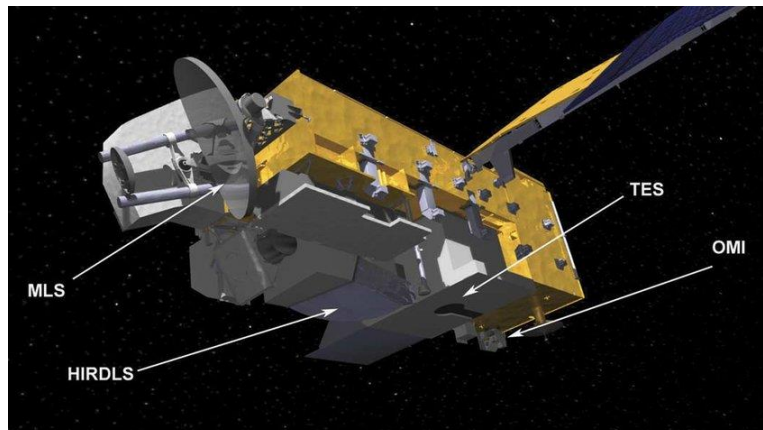
Το όργανο OMI έχει καθημερινή παγκόσμια κάλυψη με υψηλή χωρική ανάλυση 13 km x 24 km στην κανονική λειτουργία του και 13 km x 12 km σε λειτουργία μεγέθυνσης (zoom mode) (<https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/omi>).

Το OMI συνδυάζει τις φασματικές δυνατότητες (μετρήσεις σε όλο το φάσμα των μηκών κύματος, δηλαδή το υπεριώδες/ορατό/κοντινό υπέρυθρο) των ευρωπαϊκών φασματόμετρων GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) και SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography) που είχαν εκτοξευθεί προηγουμένως με την καθημερινή ικανότητα παγκόσμιας χαρτογράφησης των SBUV (Solar Backscatter Ultraviolet) και TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) της NASA (Pieternel et al., 2018). Το TOMS χρησιμοποιεί 8 ζώνες μηκών κύματος και επιτρέπει τη μέτρηση της στήλης όζοντος της ατμόσφαιρας παρέχοντας υψηλή χωρική ανάλυση (50 km × 50 km).

Λόγω της προηγμένης τεχνολογίας του, το OMI επιτρέπει μετρήσεις στην υπεριώδη περιοχή του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας, όπου παρουσιάζουν μεγάλες τιμές απορροφητικότητας συγκεκριμένες κατηγορίες απορροφητικών αερολυμάτων, όπως τα αερολύματα καύσης βιομάζας, τα ανθρακούχα αερολύματα ανθρωπογενούς προέλευσης και τα αερολύματα ερημικής προέλευσης. Επιπλέον, στην υπεριώδη φασματική περιοχή, η λευκαύγεια (albedo) του εδάφους έχει αρκετά χαμηλές τιμές, έτσι ώστε να καθίσταται δυνατή η εξαγωγή/ανεύρεση και καταγραφή του δείκτη της λευκαύγειας μεμονωμένης σκέδασης (Single Scattering Albedo, SSA), η οποία γίνεται από το όργανο OMI με τη χρήση κατάλληλων αλγορίθμων ανάκτησης.

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί αλγόριθμοι του οργάνου OMI: ο OMAERUV (πάνω από ξηρά) και ο OMAEROe (πάνω από ωκεάνιες περιοχές). Και στους δύο αλγόριθμους τα δεδομένα του δείκτη σκέδασης (SSA) υπολογίστηκαν στην υπεριώδη περιοχή, στα 388 nm. Ο λόγος που επιλέχθηκε αυτό το μήκος κύματος είναι η υψηλή ευαισθησία των ανακλώμενων ροών ακτινοβολίας στην απορρόφηση των αερολυμάτων και η μικρή ευαισθησία στην ανακλαστικότητα του εδάφους στην περιοχή UV. Επίσης, στα 388 nm υπάρχει αμελητέα παρεμβολή από ίχνη αερίων και έτσι αυτό αποτελεί πλεονέκτημα για την ανάκτηση των ιδιοτήτων των αερολυμάτων πάνω από τον ωκεανό και τη γη, συμπεριλαμβανομένων των ξηρών και ημι-άνυδρων περιοχών (Torres et al., 1998; 2007).

Οι τιμές SSA του OMI είναι διαθέσιμες για το μήκος κύματος  $\lambda=388$  nm σε επίπεδο κυψελίδας (πλεγματοειδή μορφή) με χωρική ανάλυση  $1^\circ \times 1^\circ$ , δηλαδή περίπου 100 km x 100 km.



**Σχήμα 2.2.** Ο Δορυφόρος Aura της NASA και το ραδιόμετρο OMI (Πηγή: [https://www.researchgate.net/figure/Model-of-the-Aura-spacecraft-showing-the-location-of-the-four-instruments-HIRDLS-MLS\\_fig3\\_3204054](https://www.researchgate.net/figure/Model-of-the-Aura-spacecraft-showing-the-location-of-the-four-instruments-HIRDLS-MLS_fig3_3204054)).

### 2.1.3 Δεδομένα τύπου εδάφους

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν και δεδομένα για τον τύπο εδάφους σε κάθε γεωγραφική κυψελίδα, τα οποία προήλθαν από το πρόγραμμα International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) – Η Basic Series που καθιερώθηκε το 1982. Τα δεδομένα αυτά αξιοποιήθηκαν για να γίνει διαχωρισμός, σε παγκόσμιο επίπεδο, μεταξύ ξηράς και ωκεανών ώστε να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί το κατάλληλο προϊόν του OMI ανάλογα με τον τύπο εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, μετά από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για διάφορες τιμές του SSA μεμονωμένα για το κάθε προϊόν, διαπιστώθηκε ότι το OMI-OMAERUV παρέχει πιο ικανοποιητική πληροφορία του συντελεστή πάνω από ξηρά, ενώ το OMI-OMAEROe είναι πιο κατάλληλο για χρήση πάνω από ωκεανούς. Επομένως, είναι πιο αντιπροσωπευτικό να γίνει χρήση και των δύο προϊόντων συνδυαστικά ώστε να επιτευχθεί καλύτερη κάλυψη του πλανήτη.

Το ISCCP-H είναι το μακροβιότερο διεθνές πρόγραμμα δορυφορικών παγκόσμιων περιβαλλοντικών δεδομένων. Παρέχει ένα αρχείο, που καλύπτει πάνω από 25 χρόνια, παγκόσμιων ιδιοτήτων ακτινοβολίας των νεφών και της επιφάνειας του εδάφους, οι οποίες λαμβάνονται από ραδιόμετρα απεικόνισης που βρίσκονται πάνω σε δορυφόρους καιρού. Αυτά περιλαμβάνουν το προηγμένο ραδιόμετρο πολύ υψηλής ανάλυσης AVHRR

(Advanced Very High Resolution Radiometer) των δορυφόρων πολικής τροχιάς και μία ποικιλία απεικονιστών (Rossow, 2017) που βρίσκονται στους γεωστατικούς μετεωρολογικούς δορυφόρους (Young et al., 2018). Τα δεδομένα έχουν παγκόσμια κάλυψη με χωρική ανάλυση  $1^\circ \times 1^\circ$  και χρονική ανάλυση τριών ωρών (Young et al., 2018). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η μεταβλητή “scene” η οποία περιλαμβάνει τις εξής πληροφορίες: day land, day water, day coast, night land, night water και night coast. Στα day water και night water αντιστοιχήθηκε η τιμή 10.00 (ωκεανός) και στα υπόλοιπα η τιμή 20.00 (ξηρά ή ακτή), οπότε ανάλογα με τον τύπο του εδάφους χρησιμοποιήθηκε και το κατάλληλο προϊόν του OMI: το OMAERUV πάνω από ξηρά και το OMAEROe πάνω από ωκεανούς.

## 2.2 Μεθοδολογία – Δορυφορικός Αλγόριθμος

Η παρούσα εργασία ασχολείται με την ανεύρεση/ανίχνευση και ταυτοποίηση αερολυμάτων θαλασσίου άλατος σε παγκόσμια γεωγραφική κλίμακα κατά την περίοδο 17 ετών (2005 – 2021). Τα αερολύματα αυτού του τύπου, όπως έχει ήδη αναφερθεί, ανήκουν στην κατηγορία των χονδρόκοκκων και σκεδαστικών αερολυμάτων. Αυτά τα δύο χαρακτηριστικά αποτελούν σημαντικό παράγοντα για την ανίχνευσή τους, καθώς τα διαφοροποιούν από άλλα αερολύματα που διαθέτουν τη μία (ή καμία) από αυτές τις δύο ιδιότητες. Ο δορυφορικός αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε βασίστηκε σε αυτές τις δύο φυσικές ιδιότητες (μέγεθος/διάσταση και ικανότητα σκέδασης) και αντλώντας δεδομένα από δορυφορικά προϊόντα κατέστη δυνατό να μπορεί να ανιχνεύει και να ταυτοποιεί τα αερολύματα θαλασσίου άλατος. Πιο συγκεκριμένα, τα ημερήσια δορυφορικά δεδομένα εισάγονται στον αλγόριθμο και εφαρμόζοντας κατάλληλα φίλτρα/όρια στις ιδιότητες των αερολυμάτων προσδιορίζεται η παρουσία τους (ή όχι) σε όλο τον πλανήτη.

Ο συγκεκριμένος δορυφορικός αλγόριθμος παρέχει πλήρη γεωγραφική κάλυψη, γεγονός που είναι σημαντικό γιατί δεν έχει πραγματοποιηθεί αντίστοιχη προσπάθεια έως τώρα για τα αερολύματα θαλασσίου άλατος, ενώ παρέχει και τη δυνατότητα αυτοματοποιημένης εξαγωγής αποτελεσμάτων για επιλεγμένες περιοχές ενδιαφέροντος τόσο σε μηνιαία και ετήσια βάση όσο και σε κλιματολογική (για τα δεκαεπτά έτη μελέτης, 2005-2021).

Για την ανίχνευση των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στον αλγόριθμο βασίζονται σε συγκεκριμένες οπτικές ιδιότητες, μέσω των οποίων γίνεται πιο εύκολος ο προσδιορισμός του μεγέθους και της σκεδαστικής συμπεριφοράς τους. Αυτές οι οπτικές ιδιότητες είναι οι εξής:

- i) Το (φασματικό) οπτικό βάθος αερολυμάτων (AOD)
- ii) Ο συντελεστής λευκαύγειας μεμονωμένης σκέδασης (SSA) αερολυμάτων
- iii) Ο εκθετικός παράγοντας Ångström (AE) αερολυμάτων

Οι παράμετροι του οπτικού βάθους και του συντελεστή λευκαύγειας μεμονωμένης σκέδασης προκύπτουν άμεσα από τα δορυφορικά δεδομένα MODIS Dark Target και OMI αντίστοιχα, ενώ ο εκθετικός παράγοντας Ångström (AE) υπολογίζεται έμμεσα από την εξίσωση (1.4) ως ο λόγος των τιμών του οπτικού βάθους στα 470 nm και στα 660 nm πάνω από εκτάσεις ξηράς και στα 470 nm και 2130 nm πάνω από τους ωκεανούς. Ο παράγοντας αυτός υπολογίζεται με ζεύγη τιμών μήκους κύματος, και συνήθως το μεγαλύτερο και το μικρότερο, ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη εικόνα της φασματικής μεταβολής.

Επίσης, εκτός των παραπάνω, χρησιμοποιήθηκαν και τα δεδομένα AOD MODIS Deep Blue Land (DB) τα οποία υπολογίζονται με ένα διαφορετικό αλγόριθμο ανεύρεσης του MODIS, τον Deep Blue. Ο αλγόριθμος αυτός παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού/ανάκτησης δεδομένων οπτικού βάθους αερολυμάτων (AOD) πάνω από ερημικές εκτάσεις, σε αντίθεση με τον αλγόριθμο Dark Target που δε διαθέτει δεδομένα πάνω από ερήμους. Στην παρούσα εργασία έγινε λοιπόν συνδυαστική χρήση δεδομένων MODIS από τους αλγορίθμους Dark Target (DT) και Deep Blue (DB), έτσι ώστε να εξασφαλιστεί πλήρης κάλυψη εκτάσεων τόσο πάνω από ξηρά, όσο και πάνω από θάλασσα (ωκεανούς).

Για να γίνει ταυτοποίηση και προσδιορισμός των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος σε μία γεωγραφική περιοχή (κυψελίδα) με τη χρήση του αλγορίθμου, απαιτείται να εφαρμοστούν ορισμένα όρια στις τρεις παραπάνω παραμέτρους εισαγωγής του (AOD, SSA, AE). Τα όρια αυτά τέθηκαν λαμβάνοντας υπόψιν τα δύο βασικά χαρακτηριστικά των αερολυμάτων αυτών, δηλαδή το γεγονός ότι είναι χονδρόκοκκα και σκεδαστικά, και πρέπει να ικανοποιούνται ταυτόχρονα ώστε να εξασφαλιστεί η παρουσία τους στην ατμόσφαιρα. Ο ορισμός των ορίων αυτών (threshold values), έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας διεθνώς και τα όρια αυτά έχουν προσδιοριστεί στην παγκόσμια βιβλιογραφία, εκτός από τον δείκτη SSA που δεν υπάρχει κάποια σχετική αναφορά μέχρι στιγμής. Το 2015, οι Gkikas et al. μελετώντας τα επεισόδια αερολυμάτων στην περιοχή της Μεσογείου, έθεσαν ως άνω όριο το 0.7 για τον εκθετικό παράγοντα Ångström (AE), όμως αυτό δεν αναφερόταν αποκλειστικά σε αερολύματα θαλασσίου άλατος αλλά σε αερολύματα σκόνης/θαλασσίου άλατος.

Για την παρούσα εργασία, οι τιμές των ορίων προσδιορίστηκαν μετά από μία σειρά δοκιμαστικών τρεξιμάτων του αλγορίθμου (runs) και βάσει των βασικών χαρακτηριστικών (χονδρόκοκκα και σκεδαστικά) των αερολυμάτων αυτού του τύπου ορίστηκαν ως εξής:

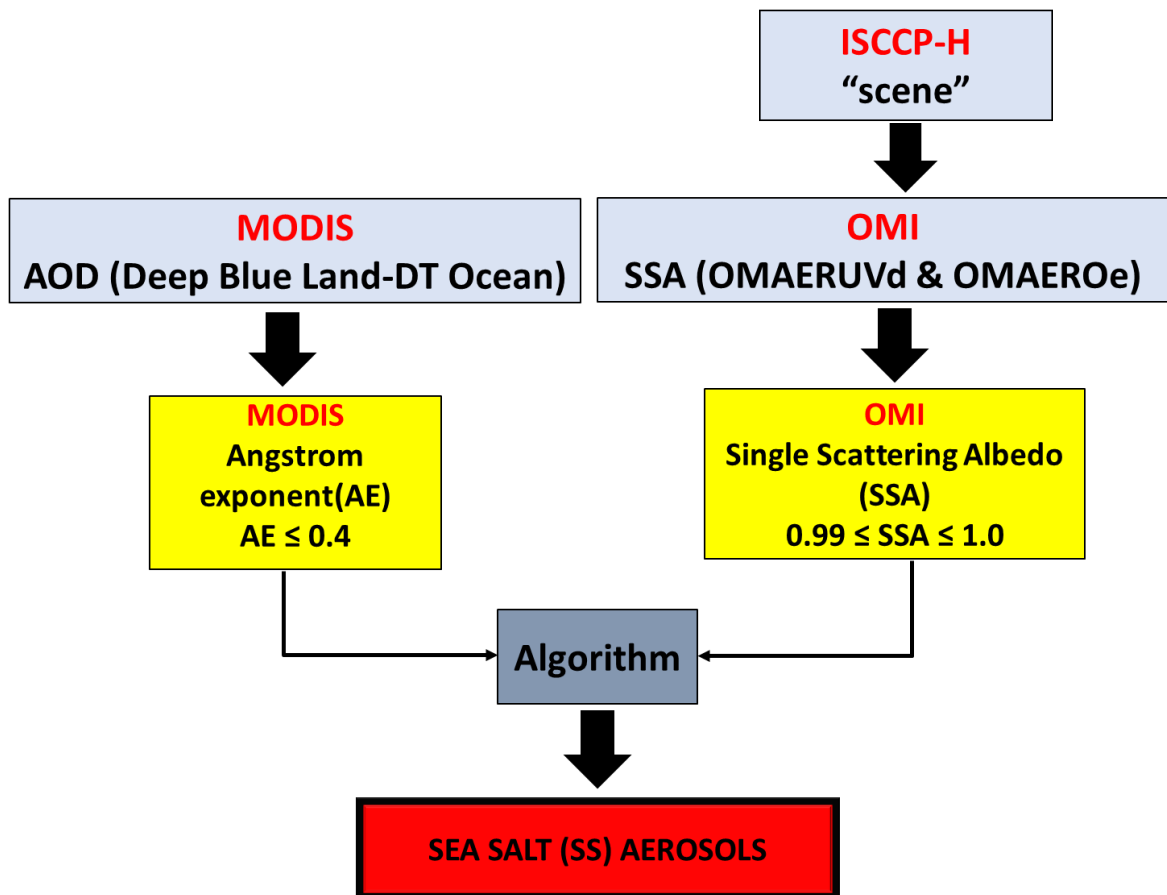
$$AE \leq 0.4$$

$$0.99 \leq SSA \leq 1.0$$

Για να προκύψει το παραπάνω όριο στον δείκτη SSA, έγιναν πρώτα αρκετές δοκιμές και με μικρότερες τιμές του δείκτη (π.χ. 0.98, 0.97, κ.ο.κ), αλλά τελικά το πιο αντιπροσωπευτικό κάτω όριο ήταν το 0.99, καθώς τα αερολύματα θαλασσίου άλατος είναι έντονα σκεδαστικά με αποτέλεσμα ο δείκτης να τείνει στην μονάδα (ο λόγος της εξασθένισης λόγω σκέδασης προς την συνολική εξασθένιση γίνεται 1). Με αυτό τον «αυστηρό» περιορισμό αποκλείουμε την πιθανότητα ύπαρξης και άλλων τύπων αερολυμάτων στην ατμοσφαιρική στήλη κάθε γεωγραφικής κυψελίδας. Η ανάγκη διαφορετικών τρεξιμάτων του αλγορίθμου προέκυψε, δεδομένης της έλλειψης υπάρχουσας σχετικής βιβλιογραφίας και γνώσης της κατάλληλης οριακής τιμής SSA, από το γεγονός ότι ο αλγόριθμος λειτουργεί για περιοχές  $1^\circ \times 1^\circ$  (περίπου  $100\text{km} \times 100\text{km}$ ) μέσα στα όρια των οποίων είναι λογικό τα θαλάσσια αερολύματα να συνυπάρχουν με άλλου τύπου, ωστόσο με στόχο και απαραίτητη προϋπόθεση την επικράτηση/κυριαρχία της παρουσίας των θαλάσσιων αερολυμάτων.

Έτσι, σύμφωνα με τον αλγόριθμο, για να εντοπίζονται τα αερολύματα θαλασσίου άλατος σε μία γεωγραφική κυψελίδα, μία συγκεκριμένη ημέρα του έτους, θα πρέπει αυτές οι δύο παράμετροι (AE και SSA) να ικανοποιούν ταυτόχρονα τους περιορισμούς που τέθηκαν παραπάνω. Η μεθοδολογία του αλγορίθμου συνοψίζεται και στο διάγραμμα ροής (flowchart) του αλγορίθμου, που δίνεται στο Σχήμα 2.3.





**Σχήμα 2.3.** Διάγραμμα ροής (flowchart) της δομής και της λειτουργίας του δορυφορικού αλγόριθμου που αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε για την ανίχνευση και ταυτοποίηση των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος σε πλανητική κλίμακα.

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, στον αλγόριθμο εισάγονται ημερήσια δεδομένα MODIS και OMI χωρικής ανάλυσης 100 km x 100 km (1° x 1°) με σκοπό την ανίχνευση των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος στην ατμόσφαιρα κάθε γεωγραφικής κυψελίδας κατά την περίοδο 2005 – 2021. Επίσης, στον αλγόριθμο εισάγονται και δεδομένα ISCCP-H για τον τύπο επιφάνειας σε κάθε γεωγραφική κυψελίδα, τα οποία έχουν κωδικοποιηθεί ως εξής: σε κυψελίδες όπου υπάρχει ξηρά ή ακτή αντιστοιχείται ο αριθμός 20.00, ενώ σε κυψελίδες με ωκεανό ο αριθμός 10.00. Οπότε, ο αλγόριθμος ανάλογα με τον αριθμό που συναντά σε κάθε κυψελίδα χρησιμοποιεί και το κατάλληλο προϊόν του OMI. Πιο συγκεκριμένα, σε κυψελίδες όπου υπάρχει ξηρά ή ακτή ως δεδομένα εισαγωγής ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τα δεδομένα του OMAERUV και σε κυψελίδες με ωκεανό χρησιμοποιεί τα δεδομένα του OMAEROe.

Επισημαίνεται ότι ο αλγόριθμος λειτουργεί μόνο όταν υπάρχουν δεδομένα και για τις δύο παραμέτρους (AE και SSA) και σε περίπτωση που μία από τις δύο, ή και οι δύο, δεν είναι διαθέσιμες, γεγονός που μπορεί να οφείλεται σε αδυναμία ανάκτησης των σχετικών οπτικών ιδιοτήτων των αερολυμάτων από τους αλγορίθμους ανεύρεσης MODIS και OMI, τότε ο αλγόριθμος δε λειτουργεί και δεν πραγματοποιεί υπολογισμό.

Έτσι, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου, υπολογίστηκε σε ημερήσια βάση η *απόλυτη συχνότητα (absolute frequency)* και η επί τοις εκατό *σχετική συχνότητα (relative frequency)* εμφάνισης των αερολυμάτων sea salt σε κάθε γεωγραφική κυψελίδα, τόσο σε μηνιαίο όσο και σε ετήσιο επίπεδο. Η απόλυτη συχνότητα εμφάνισης αφορά στις ημέρες του μήνα/έτος στις οποίες ανιχνεύθηκαν αερολύματα αυτού του τύπου, ενώ η αντίστοιχη σχετική συχνότητα εμφάνισης αφορά στις ημέρες του μήνα/έτος όπου ανιχνεύθηκαν τα αερολύματα σε σχέση με τον συνολικό αριθμό ημερών του μήνα/έτος για τις οποίες λειτούργησε ο αλγόριθμος (με ταυτόχρονη διαθεσιμότητα των δύο παραμέτρων εισόδου). Η σχετική συχνότητα εμφάνισης είναι χρήσιμη και απαραίτητη, καθώς είναι εκπεφρασμένη σε σχέση με τον αριθμό των ημερών του έτους για τις οποίες λειτούργησε ο αλγόριθμος, με αποτέλεσμα η πληροφορία που παρέχει να καθίσταται πιο αντιπροσωπευτική. Για παράδειγμα, η απόλυτη συχνότητα εμφάνισης μπορεί να εμφανίζεται μικρή σε κάποια περιοχή, αλλά αυτό δεν είναι απόλυτα αντιπροσωπευτικό, καθώς υπάρχει η πιθανότητα στην εν λόγω περιοχή να μη λειτούργησε ο αλγόριθμος για πολλές ημέρες, ενώ αντίθετα μία μεγαλύτερη απόλυτη συχνότητα σε μια άλλη περιοχή μπορεί να προέκυψε από πολλές ημέρες για τις οποίες λειτούργησε ο αλγόριθμος, ώστε η σχετική συχνότητα της πρώτης περιοχής να είναι μεγαλύτερη από εκείνη της δεύτερης (αντίθετα με ό,τι συμβαίνει με τις απόλυτες συχνότητες).

$$\text{relative frequency of occurrence (\%)} = \frac{\text{days that sea salt aerosols occurred}}{\text{days that algorithm operated}} \cdot 100\% \quad (1.6)$$

Έτσι, προσδιορίζεται με τον αλγόριθμο η χωρική (γεωγραφική) κατανομή των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος σε πλανητική κλίμακα, αλλά και ο εποχικός κύκλος εμφάνισής τους.

Εκτός από τη συχνότητα εμφάνισης (απόλυτη και σχετική) των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος, τα αποτελέσματα του αλγορίθμου παρέχουν, επίσης, πληροφορία για το φορτίο τους, δηλαδή το οπτικό βάθος των αερολυμάτων (το οποίο αποτελεί μέτρο του φορτίου), χρησιμοποιώντας τις τιμές του AOD για τις κυψελίδες και τις ημέρες που αυτά

ανιχνεύθηκαν. Στη συνέχεια, με μεσοποίηση των ημερήσιων τιμών υπολογίστηκαν οι μέσες μηνιαίες και ετήσιες τιμές του οπτικού βάθους των θαλάσσιων αερολυμάτων.

Όπως προαναφέρθηκε, ο δείκτης της σκέδασης μεμονωμένης λευκαύγειας (SSA) αποτελεί την πιο βασική ιδιότητα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιτευχθεί η ανίχνευση των ισχυρά σκεδαστικών αερολυμάτων, και να γίνει διαχωρισμός τους μεταξύ των άλλων αερολυμάτων. Σύμφωνα με τον ορισμό του δείκτη (εξασθένιση λόγω σκέδασης προς συνολική εξασθένιση), τιμές πολύ κοντά στο 1 υποδηλώνουν την ύπαρξη σκεδαστικών αερολυμάτων, καθώς αυτό δείχνει ότι το οπτικό βάθος των απορροφητικών αερολυμάτων είναι πολύ μικρό και αμελητέο σε σχέση με αυτό των σκεδαστικών, ενώ αντίθετα χαμηλές τιμές του δείκτη υποδηλώνουν την ύπαρξη απορροφητικών αερολυμάτων.

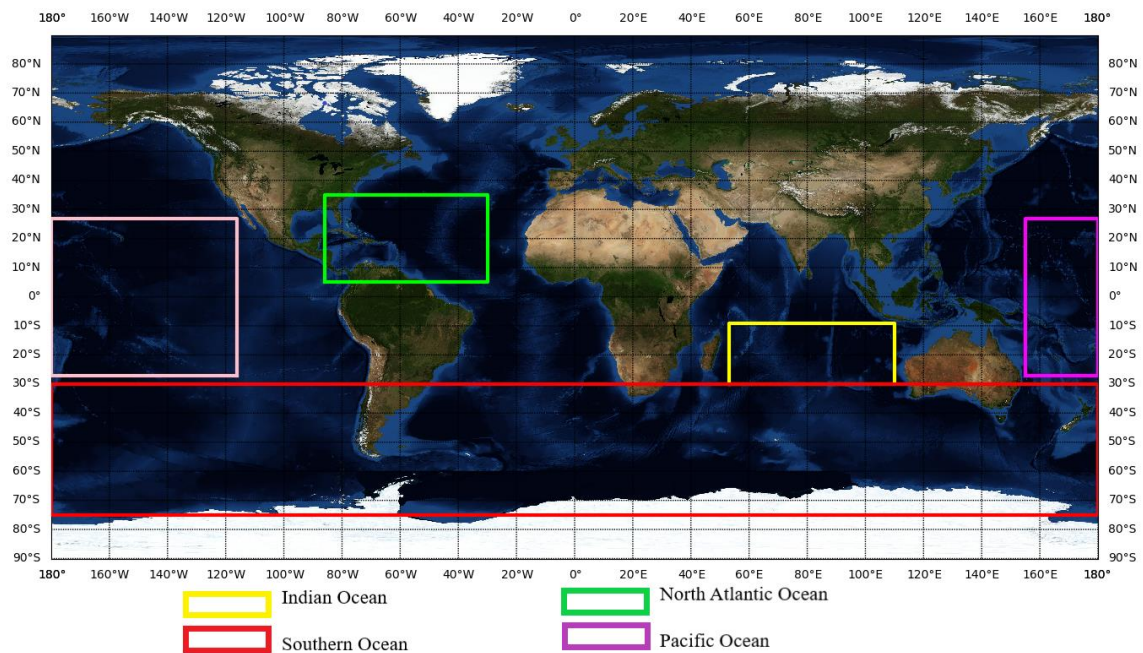
### **2.3 Περιοχές ενδιαφέροντος μελέτης**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο αλγόριθμος παρέχει αποτελέσματα με παγκόσμια γεωγραφική κάλυψη για την χρονική περίοδο 17 ετών 2005–2021 . Ωστόσο, στα πλαίσια της παρούσας μελέτης επιλέχθηκαν για περαιτέρω διερεύνηση και για μία πιο ξεκάθαρη απεικόνιση της εποχικότητας των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος, κάποιες περιοχές με ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Πρόκειται για ωκεάνιες περιοχές οι οποίες αποτελούν πηγές των αερολυμάτων αυτού του τύπου και σε παγκόσμια κάλυψη (σε επίπεδο κυψελίδας) παρουσίαζαν συστηματικά αυξημένες τιμές συχνότητας εμφάνισης των συγκεκριμένων αερολυμάτων.

Όπως δείχνεται στο επόμενο Κεφάλαιο, αερολύματα θαλασσίου άλατος παρατηρήθηκαν κυρίως στον Ινδικό Ωκεανό, το Νότιο Ωκεανό, το Νότιο Ειρηνικό Ωκεανό και στο Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό (βορειοανατολικά της Βενεζουέλας και κοντά στην Καραϊβική θάλασσα). Έτσι, σύμφωνα με αυτήν την πληροφορία ορίστηκαν τέσσερις περιοχές μελέτης, οι οποίες απεικονίζονται στο Σχήμα 2.4, ενώ στον Πίνακα 2.1 παρέχονται και τα όρια των γεωγραφικών συντεταγμένων της περιοχής κάλυψής τους.

**Πίνακας 2.1** Οι περιοχές αερολυμάτων θαλασσίου άλατος που μελετώνται στην παρούσα εργασία και τα όρια των γεωγραφικών συντεταγμένων της περιοχής κάλυψής τους.

Γεωγραφική Περιοχή	Longitude (°)	Latitude (°)
Ινδικός Ωκεανός	53E - 110E	9S - 30S
Ειρηνικός Ωκεανός (ανατολικά της Αυστραλίας)	155E - 180E	27N - 27S
Ειρηνικός Ωκεανός (δυτικά της Αμερικής)	180W - 116W	27N - 27S
Νότιος Ωκεανός	180W - 180E	28S - 75S
Βόρειος Ατλαντικός Ωκεανός	86W - 30W	5N - 35N



**Σχήμα 2.4.** Γεωγραφικές περιοχές θαλασσίου άλατος του πλανήτη οι οποίες μελετώνται στην παρούσα εργασία.

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

### 3.1 Γεωγραφική κατανομή των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος σε πλανητική κλίμακα

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται οι παγκόσμιες γεωγραφικές κατανομές των μέσων ετήσιων κλιματολογικών τιμών (μεσοποιημένες τιμές για την περίοδο μελέτης 2005-2021) της απόλυτης και της σχετικής συχνότητας εμφάνισης, καθώς και του φορτίου, δηλαδή του οπτικού βάθους (AOD) των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος (SS). Παρουσιάζονται, επίσης, τα αποτελέσματα που δείχνουν τη μεταβολή των παραμέτρων των SS, σε επίπεδο σημαντικότητας 95% (εφαρμόζοντας το μη παραμετρικό t-test), κατά τη διάρκεια των δεκαεπτά ετών μελέτης.

Επίσης, παρουσιάζονται και οι αντίστοιχες παγκόσμιες κατανομές και για τις τρεις αυτές παραμέτρους σε μηνιαία βάση. Με βάση αυτές τις κατανομές μπορούμε ουσιαστικά να παρατηρήσουμε την ενδοετήσια κύμανση της συχνότητας εμφάνισης των αερολυμάτων αυτών και του φορτίου τους στην ατμόσφαιρα για όλο τον πλανήτη, συμπεριλαμβανομένων και των επιμέρους περιοχών ενδιαφέροντος.

#### 3.1.1 Μέση ετήσια κλιματολογική κατανομή

Με τη χρήση του αλγορίθμου υπολογίστηκε για κάθε κυψελίδα χωριστά, αρχικά σε ημερήσια βάση, η απόλυτη συχνότητα εμφάνισης αερολυμάτων θαλασσίου άλατος (σε ημέρες/έτος) και για τα δεκαεπτά έτη της περιόδου μελέτης. Στη συνέχεια, με μεσοποίηση δημιουργήθηκε μία μέση ετήσια κλιματολογική κατανομή της συχνότητας αυτής για όλες τις περιοχές του πλανήτη, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1α, μαζί με την μεταβολή της κατά τη διάρκεια των ετών 2005-2021. Οι περιοχές του χάρτη (κυψελίδες) που εμφανίζονται με λευκό χρώμα υποδηλώνουν: (i) περιοχές όπου ο αλγόριθμος δε λειτούργησε για καμία ημέρα του έτους (για όλα τα έτη) λόγω έλλειψης δορυφορικών δεδομένων, (ii) περιοχές στις οποίες ο αλγόριθμος λειτούργησε, αλλά δεν εντόπισε σε καμία ημέρα την παρουσία αερολυμάτων θαλασσίου άλατος (μηδενική συχνότητα εμφάνισης/έτος). Στο Σχήμα 3.1β παρουσιάζεται η παγκόσμια κατανομή της τάσης μεταβολής της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος και επισημαίνονται με μαύρες κουκκίδες αυτές οι οποίες είναι στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο σημαντικότητας 95%. Με λευκό χρώμα απεικονίζονται οι περιοχές του πλανήτη με μηδενική τάση μεταβολής και με γκρι

αυτές για τις οποίες ο αλγόριθμος δε λειτούργησε για καμία ημέρα λόγω έλλειψης δορυφορικών δεδομένων. Στο Σχήμα Π1 του Παραρτήματος παρουσιάζεται και ο αντίστοιχος χάρτης με επισημασμένες τις στατιστικά σημαντικές τάσεις μεταβολής σε επίπεδο σημαντικότητας 99%. Επισημαίνεται ότι η πληροφορία του Σχήματος 3.1 είναι ως ένα βαθμό ασαφής, δεδομένου ότι ο αλγόριθμος δε λειτούργησε τον ίδιο αριθμό ημερών σε όλες τις περιοχές του πλανήτη, έτσι ώστε τα αποτελέσματα του Σχήματος 3.1 για τις διάφορες περιοχές να μην είναι απόλυτα συγκρίσιμα μεταξύ τους. Για το σκοπό αυτό, στο Σχήμα Π2 του Παραρτήματος της παρούσας εργασίας παρουσιάζεται ως επιπρόσθετη πληροφορία και ο χάρτης με τις μέσες ετήσιες κλιματολογικές τιμές του αριθμού των ημερών/έτος για τις οποίες λειτούργησε ο δορυφορικός αλγόριθμος κατά την περίοδο μελέτης. Σύμφωνα με το Σχήμα αυτό φαίνεται ότι ο αριθμός των ημερών για τις οποίες λειτούργησε ο αλγόριθμος κυμαίνεται από 30-170 ημέρες/έτος στις ωκεάνιες περιοχές, με μέγιστες τιμές (140-160 ημέρες/έτος) στις περιοχές του Ινδικού, τροπικού και υποτροπικού Νότιου Ειρηνικού και υποτροπικού Νότιου Ατλαντικού Ωκεανού και ελάχιστες τιμές (30-50 ημέρες /έτος) στον Νότιο Ωκεανό.

Σύμφωνα με το Σχήμα 3.1α φαίνεται ότι σε ηπειρωτικές περιοχές δεν παρατηρείται καμία ημέρα ανά έτος κατά την οποία να επικράτησαν τα αερολύματα θαλασσίου άλατος στην ατμόσφαιρα. Αντίθετα, σε ωκεάνιες περιοχές η συχνότητα εμφάνισής τους είναι μη μηδενική και στις περισσότερες από αυτές παρατηρούνται σε πάνω από 30 ημέρες/έτος. Πιο συγκεκριμένα, τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης (κοκκινωπά χρώματα) παρουσιάζουν ο Ινδικός Ωκεανός και ο Νότιος τροπικός Ειρηνικός Ωκεανός (δυτικά της Νότιας Αμερικής) με 60-70 ημέρες εμφάνισης/έτος. Στον υποτροπικό Νότιο Ειρηνικό Ωκεανό, ανάμεσα στα ανοιχτά των δυτικών ακτών της Νότιας Αμερικής (10°-30° S) και στα ανατολικά της Αυστραλίας, η συχνότητα εμφάνισης παραμένει υψηλή, όμως μειώνεται στις 50-60 ημέρες/έτος (κιτρινωπά χρώματα). Χαμηλότερες συχνότητες εμφάνισης παρατηρούνται στο Βόρειο τροπικό Ειρηνικό Ωκεανό και πιο συγκεκριμένα σε γεωγραφικά πλάτη μέχρι 10° N με 30-40 ημέρες εμφάνισης/έτος (πρασινοκίτρινα χρώματα). Επίσης, παρατηρούνται αρκετές ημέρες θαλασσίων αερολυμάτων και στο Νότιο Ατλαντικό Ωκεανό, σε σύγκριση όμως με τις υπόλοιπες ωκεάνιες περιοχές είναι σημαντικά λιγότερες (20-35 ημέρες/έτος). Ακόμα λιγότερες ημέρες παρουσιάζονται στο Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό (γαλάζιες αποχρώσεις), όπου σε γενικές γραμμές φαίνεται να είναι 10-20 ημέρες/έτος, ενώ στο σημείο κοντά στην Καραϊβική θάλασσα και βόρεια της Βραζιλίας παρατηρούνται μεγαλύτερες συχνότητες (30 ημέρες εμφάνισης/έτος). Τέλος, στο Νότιο Ωκεανό φαίνεται η συχνότητα εμφάνισης να είναι σχετικά μικρή και πιο συγκεκριμένα ίση με περίπου 20-30 ημέρες/έτος.

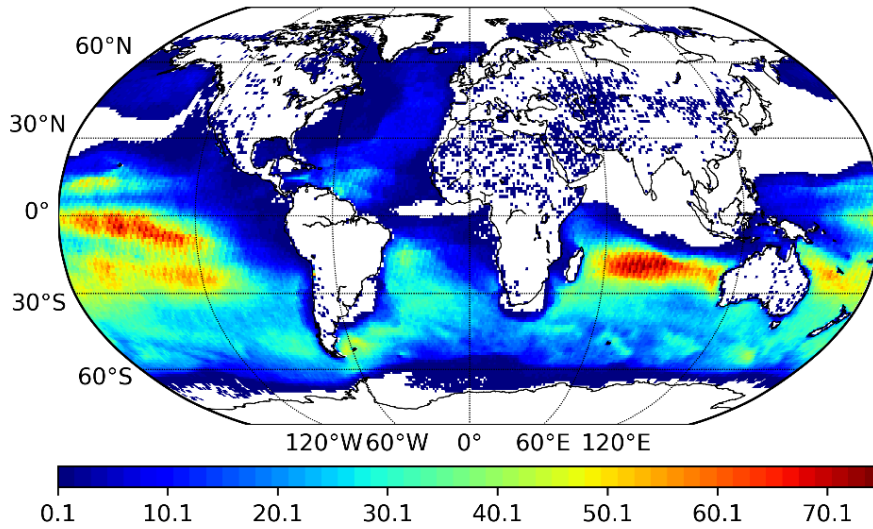
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Σχήματος 3.1β, φαίνεται ότι σχεδόν σε όλες τις περιοχές η απόλυτη συχνότητα εμφάνισης των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος μειώθηκε από το 2005 ως το 2021, έως και κατά 80 ημέρες συνολικά για τα 17 έτη (δηλαδή κατά περίπου 4.7 ημέρες/έτος).

Στο Σχήμα 3.2α παρουσιάζονται οι τιμές της σχετικής συχνότητας εμφάνισης αερολυμάτων θαλασσίου άλατος, οι οποίες υπολογίστηκαν σε σχέση με τις ημέρες του έτους κατά τις οποίες λειτούργησε ο αλγόριθμος. Τα αποτελέσματα αυτά, σε ό,τι αφορά στα γεωγραφικά τους χαρακτηριστικά, είναι πιο ακριβή από τα αποτελέσματα του Σχήματος 3.1α. Ο χάρτης του Σχήματος αυτού παρουσιάζει τη μέση ετήσια τιμή της σχετικής συχνότητας εμφάνισης για όλο τον πλανήτη κατά την διάρκεια της περιόδου μελέτης (2005-2021) η οποία προέκυψε με μεσοποίηση των τιμών της σχετικής συχνότητας που παρατηρήθηκε για κάθε έτος. Στο Σχήμα 3.2β παρουσιάζεται η υπολογισθείσα γραμμική τάση μεταβολής της σχετικής συχνότητας εμφάνισης κατά τη διάρκεια των ετών 2005-2021, με επισημασμένες με μαύρες κουκκίδες τις τάσεις που είναι στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο σημαντικότητας 95%. Στο Σχήμα Π1 του Παραρτήματος παρουσιάζεται επίσης και ο αντίστοιχος χάρτης με επισημασμένες τις στατιστικά σημαντικές τάσεις μεταβολής σε επίπεδο σημαντικότητας 99%. Η εικόνα της παγκόσμιας κατανομής της σχετικής συχνότητας παρουσιάζει γενικά ομοιότητες με την αντίστοιχη της απόλυτης συχνότητας, καθώς και σε αυτή την περίπτωση οι μεγαλύτερες τιμές σχετικής συχνότητας παρατηρούνται σε ωκεάνιες περιοχές, ενώ πάνω από ηπειρωτικές περιοχές η συχνότητα εμφάνισης είναι μηδενική. Υπάρχουν όμως και κάποιες διαφορές, όπως το γεγονός ότι παρατηρούνται μέγιστες σχετικές συχνότητες στο Νότιο Ωκεανό, οι οποίες στην κατανομή της απόλυτης συχνότητας δεν υπήρχαν. Σίγουρα, η πιο ρεαλιστική πληροφορία προέρχεται από την κατανομή της σχετικής συχνότητας εμφάνισης, βάσει της οποίας τα θαλάσσια αερολύματα εμφανίζονται πολύ συχνά πάνω από το Νότιο Ωκεανό, γεγονός που συμφωνεί με το ότι η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται από ισχυρές εντάσεις ανέμου (Jung and Schindler, 2016), οι οποίες δικαιολογούν τον έντονο ψεκασμό θαλασσίου άλατος. Το γεγονός ότι η εν λόγω περιοχή δεν εμφανίζει πολύ μεγάλη απόλυτη συχνότητα εμφάνισης, οφείλεται στο ότι αυτή χαρακτηρίζεται από μέγιστη νεφοκάλυψη (Karlsson et al. 2023), αποτρέποντας τη λειτουργία του αλγορίθμου και μειώνοντας τη διαθεσιμότητα των απαραίτητων δεδομένων (οπτικών ιδιοτήτων αερολυμάτων) εισαγωγής του. Εκτός από το Νότιο Ωκεανό, οι μεγαλύτερες σχετικές συχνότητες εμφάνισης (40-65% περίπου) παρατηρούνται στις ίδιες περιοχές με εκείνες της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης, δηλαδή στον Ινδικό Ωκεανό και στους Νότιο υποτροπικό και τροπικό Ειρηνικό Ωκεανό, ενώ οι χαμηλότερες συχνότητες εμφανίζονται στον

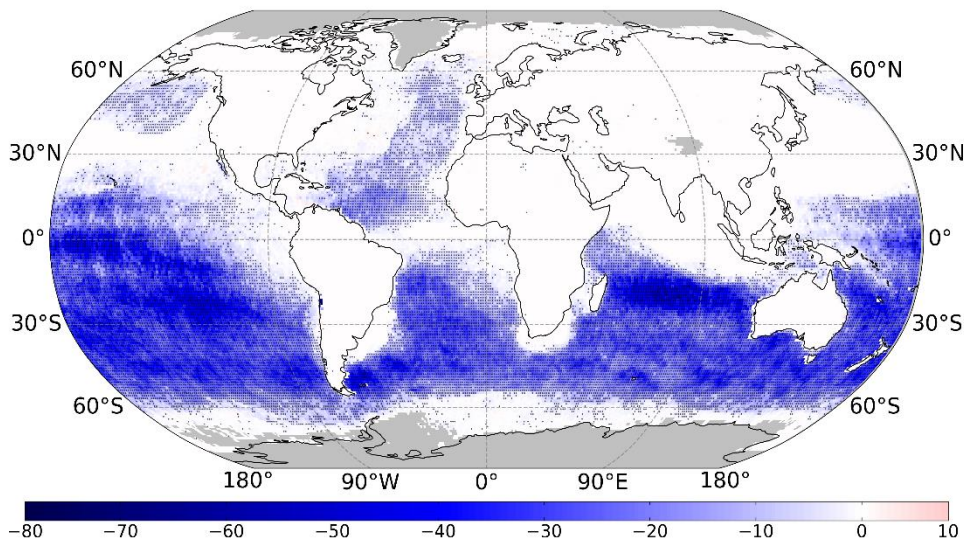
Ατλαντικό Ωκεανό (10-20%). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μεταβολής της σχετικής συχνότητας εμφάνισης κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης (Σχήμα 3.2β) φαίνεται ότι υπάρχει μία μικρή μείωση στις ωκεάνιες περιοχές του Νότιου Ημισφαιρίου (η οποία κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 10-50% συνολικά για τα 17 έτη). Αντίθετα, παρατηρείται μία δύσκολα διακρινόμενη ασθενής αύξηση (έως και κατά 50%/17 έτη) πάνω από κάποιες τροπικές ωκεάνιες περιοχές (Κόλπο του Μεξικό, Βόρειο Ειρηνικό Ωκεανό κοντά στον Ισημερινό).

Στο Σχήμα 3.3α παρουσιάζεται η μέση ετήσια κατανομή του οπτικού βάθους (ή φορτίου) των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος, η οποία προέκυψε και αυτή με τον ίδιο τρόπο όπως και οι δύο προηγούμενες παράμετροι (μεσοποίηση στις τιμές του οπτικού βάθους του κάθε έτους κατά την περίοδο μελέτης), καθώς και η παγκόσμια κατανομή της μεταβολής του φορτίου κατά τη διάρκεια των ετών 2005-2021. Στο Σχήμα 3.3β παρουσιάζεται η παγκόσμια κατανομή της τάσης μεταβολής του οπτικού βάθους (φορτίου) των αερολυμάτων και επισημαίνονται με μαύρες κουκκίδες αυτές οι οποίες είναι στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο σημαντικότητας 95%. Στο Σχήμα Π1 του Παραρτήματος παρουσιάζεται και ο αντίστοιχος χάρτης με επισημασμένες τις στατιστικά σημαντικές τάσεις μεταβολής σε επίπεδο σημαντικότητας 99%. Γενικά η παγκόσμια κατανομή της παραμέτρου αυτής φαίνεται να ακολουθεί τις κατανομές της απόλυτης και σχετικής συχνότητας (Σχήματα 3.1α και 3.2α) με τις μεγαλύτερες τιμές του οπτικού βάθους να παρουσιάζονται σε περιοχές όπου υπάρχει μεγάλη συχνότητα εμφάνισης θαλάσσιων αερολυμάτων (Ινδικός Ωκεανός, τροπικός Ειρηνικός Ωκεανός, Νότιος Ωκεανός και τροπικός Ατλαντικός Ωκεανός). Πιο συγκεκριμένα, οι μεγαλύτερες τιμές (0.1-0.15) του οπτικού βάθους παρατηρούνται στον Ινδικό και τον Τροπικό Ειρηνικό Ωκεανό, ενώ οι μικρότερες στον Ατλαντικό Ωκεανό, όπου είναι μικρότερες από 0.05. Εξάιρεση στον Ατλαντικό Ωκεανό αποτελεί ο Κόλπος του Μεξικού, όπου εκεί παρατηρείται μία μέγιστη τιμή της τάξης του 0.1-0.15 και έρχεται σε αντίθεση με τις αντίστοιχες κατανομές της σχετικής και απόλυτης συχνότητας όπου εκεί η συχνότητα εμφάνισης ήταν αρκετά μικρή. Στο Νότιο Ωκεανό παρατηρούνται αρκετά μεγάλες τιμές οπτικού βάθους (της τάξης 0.05-0.1) γενικά σε όλη την έκταση του, ενώ σε κάποια διάσπαρτα σημεία του αγγίζει και τιμές 0.1-0.15. Η παγκόσμια κατανομή της μεταβολής του οπτικού βάθους των θαλάσσιων αερολυμάτων αποκαλύπτει μία μείωση στις περισσότερες περιοχές, ιδιαίτερα κατά μήκος του Νότιου Ωκεανού (μείωση έως και 0.1 ανά 17 έτη) εκτός από τον Κόλπο του Μεξικό και το Βόρειο Ειρηνικό Ωκεανό κοντά στον Ισημερινό, όπου παρατηρείται μία μικρή αύξηση (η οποία κυμαίνεται από 0.05 έως και 0.1 συνολικά για τα 17 έτη).



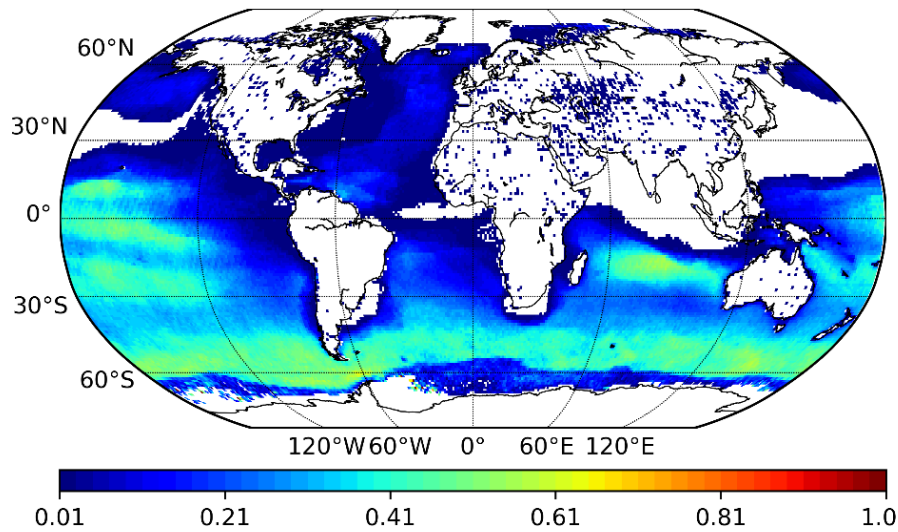


(α)

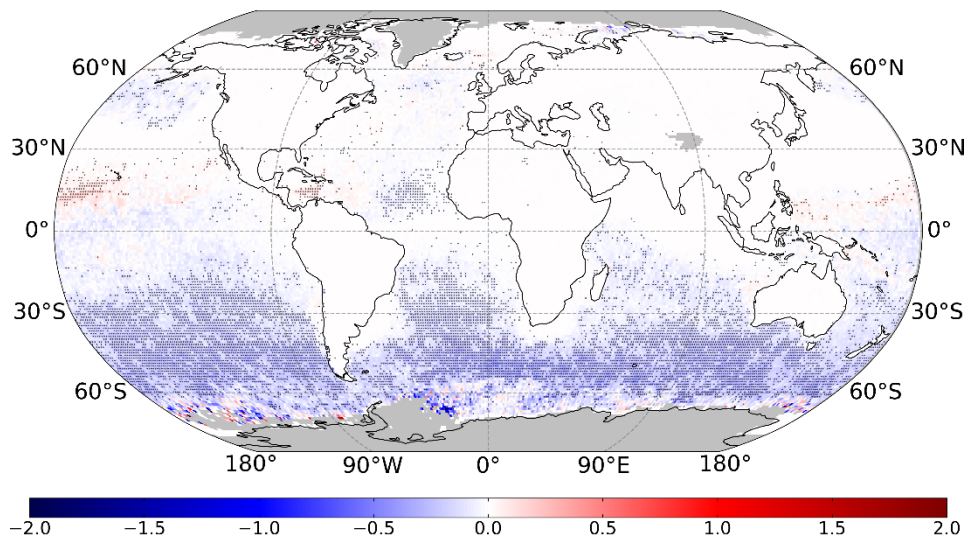


(β)

**Σχήμα 3.1.** Παγκόσμια κατανομή: (α) της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος (σε ημέρες/έτος) και (β) της γραμμικής τάσης μεταβολής της (σε ημέρες/17 έτη) με επισημασμένες με κουκίδες τις στατιστικά σημαντικές μεταβολές σε επίπεδο σημαντικότητας 95%. Σχήμα 3.1α: λευκές είναι οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δε λειτούργησε, λόγω έλλειψης δεδομένων, ή λειτούργησε και δεν εντόπισε καμία ημέρα με παρουσία θαλασσίων αερολυμάτων. Σχήμα 3.1β: λευκές είναι οι περιοχές με μηδενική τάση μεταβολής και γκρι αυτές για τις οποίες δε λειτούργησε ο αλγόριθμος για καμία ημέρα.

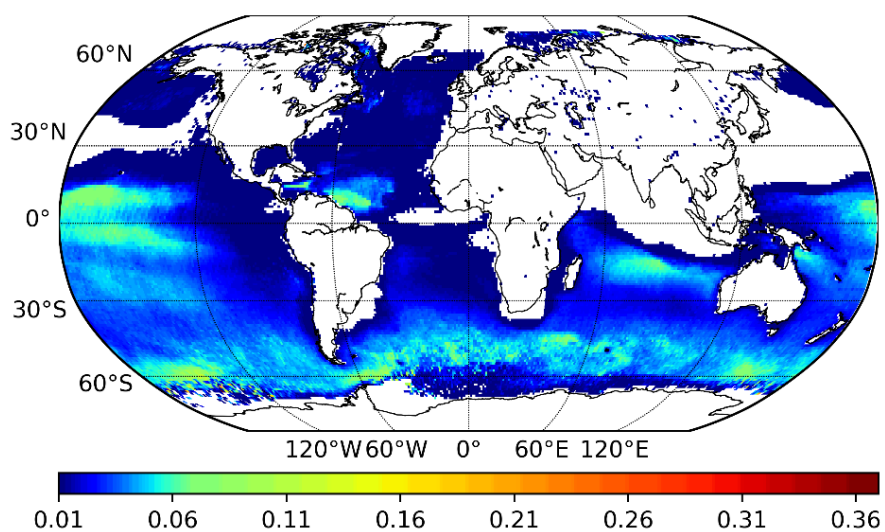


(α)

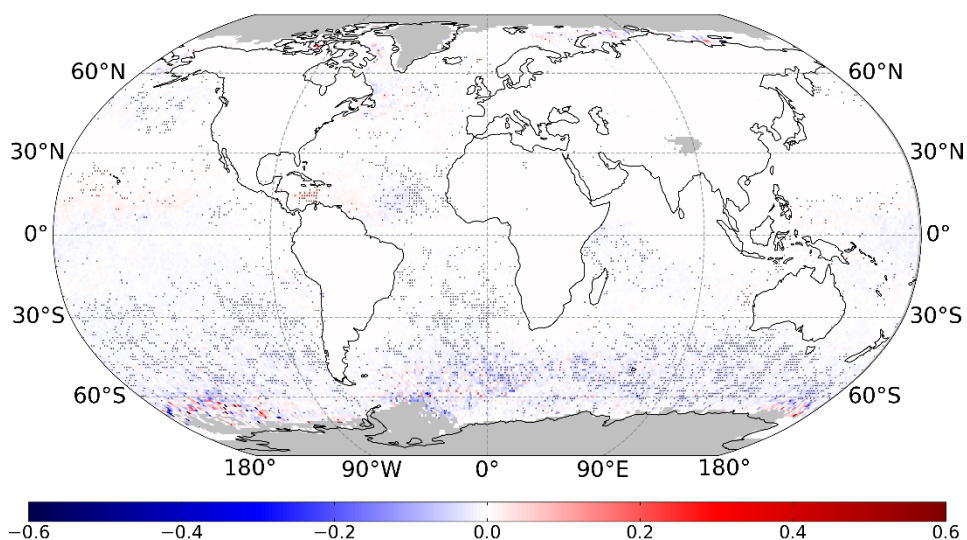


(β)

**Σχήμα 3.2.** Παγκόσμια κατανομή: (α) της σχετικής συχνότητας εμφάνισης των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος (σε ημέρες/ημέρες του έτους που λειτούργησε ο αλγόριθμος) και (β) της γραμμικής τάσης μεταβολής της (σε μεταβολή επί τοις εκατό/17 έτη) με επισημασμένες τις στατιστικά σημαντικές μεταβολές σε επίπεδο σημαντικότητας 95%. Σχήμα 3.2α: λευκές είναι οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δε λειτούργησε, λόγω έλλειψης δεδομένων, ή λειτούργησε και δεν εντόπισε καμία ημέρα με παρουσία θαλασσίων αερολυμάτων. Σχήμα 3.2β: λευκές είναι οι περιοχές με μηδενική τάση μεταβολής και γκρι αυτές για τις οποίες δε λειτούργησε ο αλγόριθμος για καμία ημέρα.



(α)



(β)

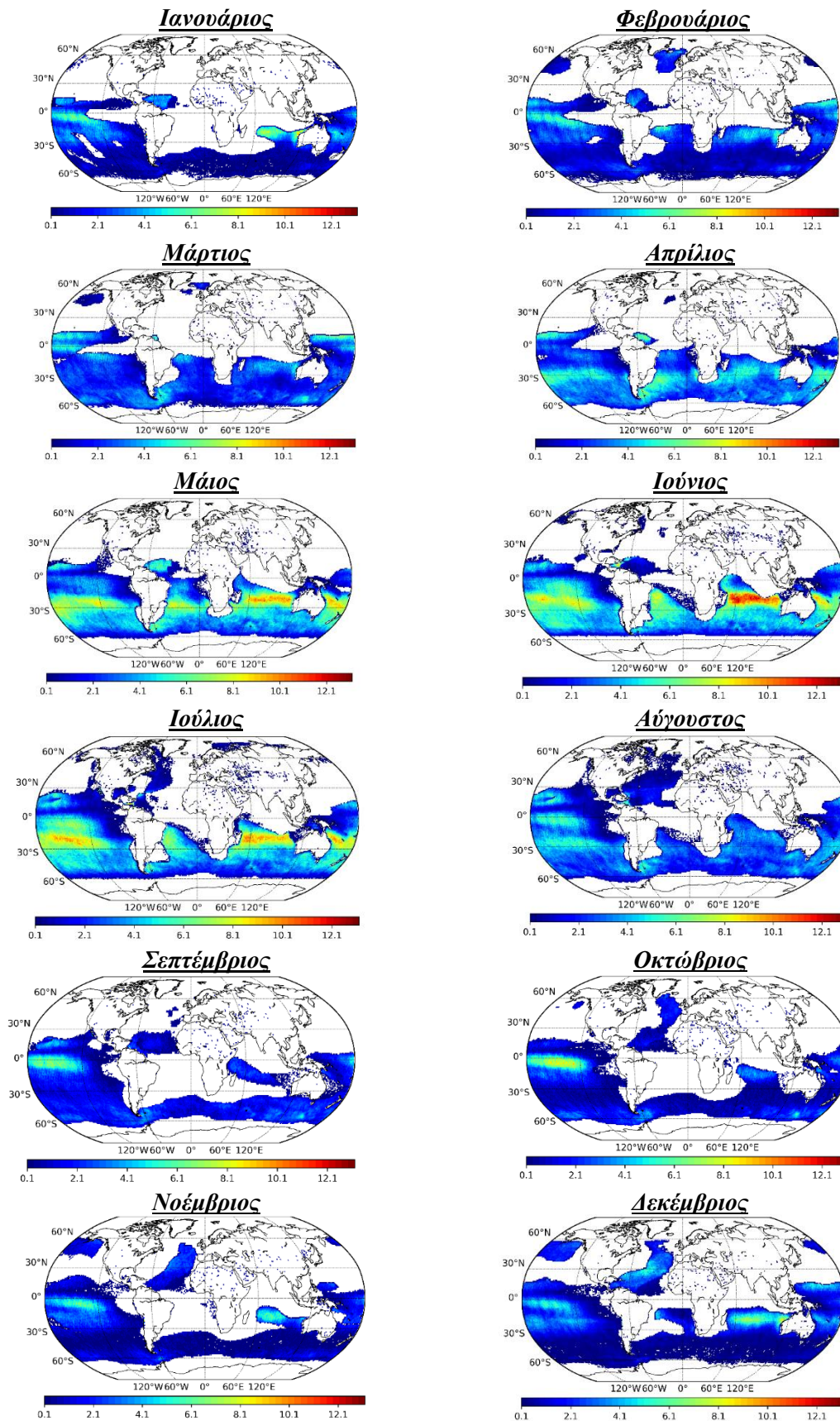
**Σχήμα 3.3.** Παγκόσμια κατανομή: (α) του φορτίου (οπτικού βάθους) των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος και (β) της γραμμικής τάσης μεταβολής της (η μεταβολή αφορά συνολικά τα 17 έτη) με επισημασμένες τις στατιστικά σημαντικές μεταβολές σε επίπεδο σημαντικότητας 95%. Σχήμα 3.3α: λευκές είναι οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δε λειτούργησε, λόγω έλλειψης δεδομένων, ή λειτούργησε και δεν εντόπισε καμία ημέρα με παρουσία θαλασσίων αερολυμάτων. Σχήμα 3.3β: λευκές είναι οι περιοχές με μηδενική τάση μεταβολής και γκρι αυτές για τις οποίες δε λειτούργησε ο αλγόριθμος για καμία ημέρα.

### 3.1.2 Μέση μηνιαία κλιματολογική κατανομή

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η μέση (για την περίοδο 2005-2021) παγκόσμια κατανομή της απόλυτης και σχετικής συχνότητας εμφάνισης θαλασσιών αερολυμάτων, καθώς και του φορτίου τους (οπτικού βάθους) για κάθε μήνα του έτους. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 3.4 απεικονίζεται η απόλυτη συχνότητα εμφάνισης η οποία εκφράζεται ως ο αριθμός των ημερών/μήνα στις οποίες εντοπίστηκαν αερολύματα αυτού του είδους πάνω από μία γεωγραφική κυψελίδα για τους δώδεκα μήνες του έτους. Επισημαίνεται ότι η χρωματική/αριθμητική κλίμακα που έχει χρησιμοποιηθεί στους χάρτες είναι κοινή για όλους τους μήνες του έτους, ώστε να γίνεται πιο εύκολη η συγκριτική μελέτη των αποτελεσμάτων μεταξύ των μηνών και να διακρίνεται η εποχικότητα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μέσων μηνιαίων κατανομών που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.4 παρατηρείται ένας ενδοετήσιος κύκλος της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των αερολυμάτων, ο οποίος διαφοροποιείται ανά περιοχή. Σε γενικές γραμμές ωστόσο, φαίνεται ότι στις περισσότερες περιοχές του πλανήτη η μέγιστη συχνότητα εμφάνισης παρατηρείται τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο, και η ελάχιστη τους μήνες του χειμώνα και του φθινοπώρου του Βορείου Ημισφαιρίου.

Πιο συγκεκριμένα, τον Ιούνιο στον Ινδικό Ωκεανό παρατηρείται η μέγιστη μηνιαία συχνότητα εμφάνισης αερολυμάτων θαλασσίου άλατος σε όλο τον πλανήτη καθ' όλο το έτος, η οποία είναι 10-12 ημέρες/μήνα. Μεγάλες τιμές επικρατούν γενικά εκεί από το Μάιο και τον Ιούλιο, ενώ η ελάχιστη συχνότητα σε αυτήν την περιοχή (0-2 ημέρες/μήνα) παρατηρείται το Σεπτέμβριο. Στο Νότιο υποτροπικό Ατλαντικό Ωκεανό το Σεπτέμβριο φαίνεται, επίσης, ότι δεν υπάρχει καμία ημέρα που να εντοπίστηκε αυτό το είδος των αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα, ενώ τους μήνες Μάιο και Ιούνιο η συχνότητα εμφάνισης είναι μέγιστη και ίση με 6-10 ημέρες/μήνα (μεγάλες τιμές παρατηρούνται επίσης εκεί και τον Ιούλιο, 5-6 ημέρες/μήνα). Αντίστοιχα, στον υποτροπικό Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό η ελάχιστη συχνότητα εμφάνισης παρατηρείται το Μάρτιο, με καμία ημέρα εμφάνισης των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος (εκτός από μία μικρή περιοχή στα παράλια της Βενεζουέλας, όπου παρατηρείται μία συχνότητα της τάξης των 4-6 ημερών). Το μήνα Δεκέμβριο φαίνεται μία συχνότητα εμφάνισης γύρω στις 4-6 ημέρες σχεδόν σε όλη την έκταση του Βορείου Ατλαντικού Ωκεανού, η οποία είναι και η μέγιστη συχνότητα εμφάνισης θαλάσσιων αερολυμάτων σε αυτήν την περιοχή μέσα στο έτος. Επιπρόσθετα, στον υποτροπικό Ειρηνικό Ωκεανό τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο η συχνότητα εμφάνισης των θαλάσσιων αερολυμάτων είναι 6-10 ημέρες για τον κάθε μήνα, και είναι η μέγιστη τιμή

που παρατηρείται μέσα στο έτος. Αντίθετα, η ελάχιστη συχνότητα σε αυτή την περιοχή παρατηρείται τον Νοέμβριο και τον Δεκέμβριο με 2-6 ημέρες εμφάνισης ανά μήνα. Τον Οκτώβριο επίσης, φαίνεται να εμφανίζεται ένα δεύτερο μέγιστο στον Ειρηνικό Ωκεανό (δυτικά της Νότιας Αμερικής) με 6-10 ημέρες εμφάνισης ανά μήνα, αλλά όχι σε όλη την έκτασή του, αλλά μόνο κοντά στις τροπικές περιοχές. Τέλος, τους μήνες Απρίλιο-Οκτώβριο το μεγαλύτερο τμήμα του Νότιου Ωκεανού δεν καλύπτεται από αποτελέσματα, και έτσι, δεν αποτυπώνονται αντιπροσωπευτικά οι ελάχιστες και μέγιστες συχνότητες εμφάνισης στην περιοχή αυτή.



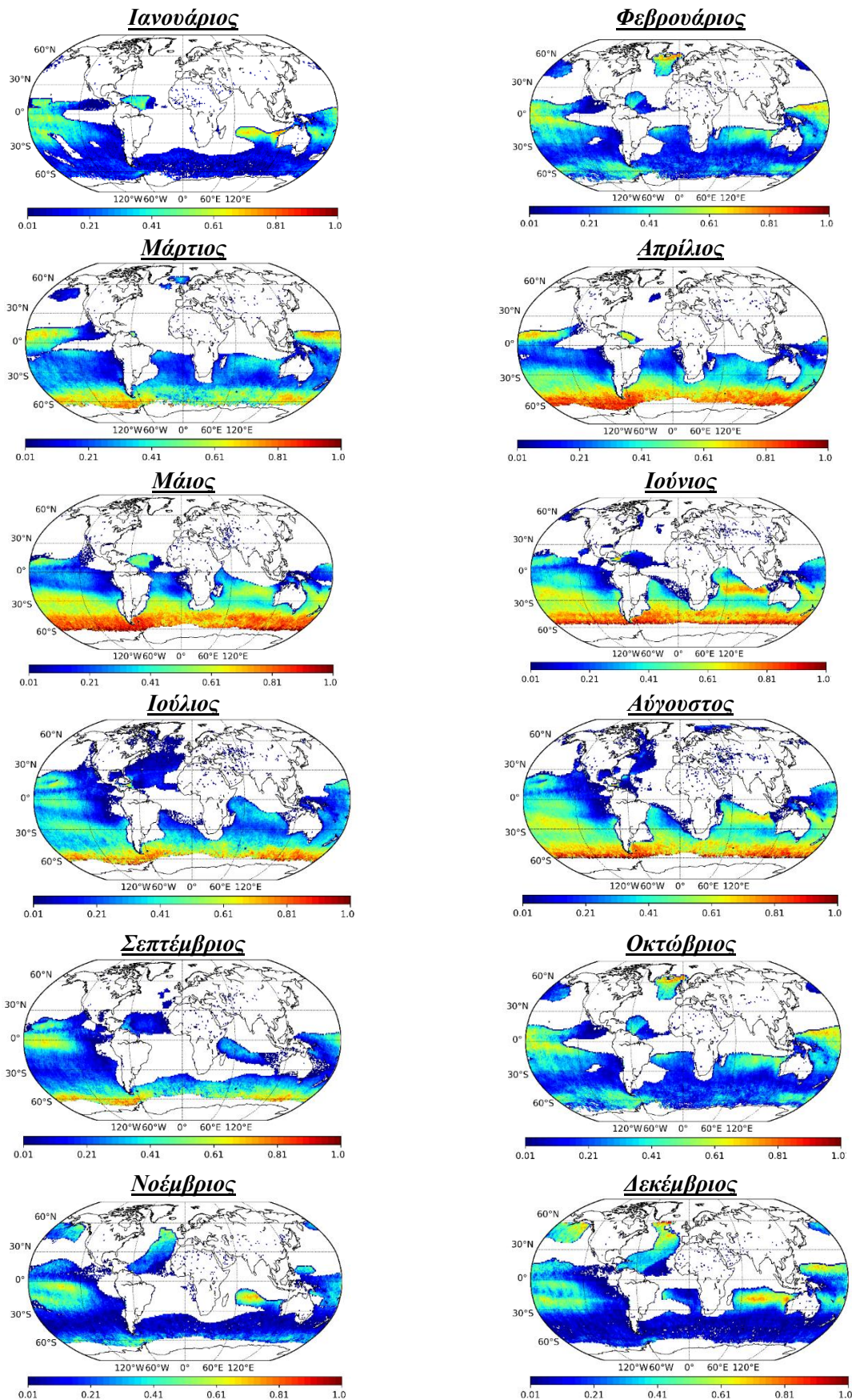
Σχήμα 3.4. Παγκόσμια κατανομή της μέσης κλιματολογικής μηνιαίας απόλυτης συχνότητας εμφάνισης αερολυμάτων θαλασσίου άλατος (σε αριθμό ημερών/μήνα). Οι τιμές είναι μεσοποιημένες για την περίοδο 2005-2021.

Παρόμοια χαρακτηριστικά ως ένα βαθμό με αυτά που περιγράφηκαν παραπάνω παρουσιάζει και η κατανομή της σχετικής μηνιαίας συχνότητας εμφάνισης των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος για την οποία οι χάρτες με τις μέσες κλιματολογικές τιμές για όλους τους μήνες του έτους παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.5. Στο Σχήμα Π3 του Παραρτήματος της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται επίσης και οι χάρτες με την παγκόσμια κατανομή των μέσων (μεσοποιημένων για την περίοδο 2005-2021) μηνιαίων κλιματολογικών τιμών του αριθμού των ημερών που λειτούργησε ο αλγόριθμος (αριθμός ημερών/μήνα). Σύμφωνα με το Σχήμα αυτό φαίνεται ότι ο αριθμός των ημερών για τις οποίες λειτούργησε ο αλγόριθμος κυμαίνεται από 0 έως 20 ημέρες/μήνα στις ωκεάνιες περιοχές του Νότιου Ημισφαιρίου και από 0 έως 15 ημέρες/μήνα, αντίστοιχα, στο Βόρειο Ημισφαίριο. Οι μέγιστες τιμές στο Νότιο Ημισφαίριο παρατηρούνται τους μήνες Μάιο-Ιούλιο (15-20 ημέρες/μήνα) στις περιοχές του Ινδικού, Νότιου υποτροπικού Ειρηνικού και Νότιου υποτροπικού Ατλαντικού Ωκεανού, ενώ οι αντίστοιχες ελάχιστες τιμές το Νοέμβριο (5-10 ημέρες/μήνα). Οι μέγιστες τιμές στο Βόρειο Ημισφαίριο παρατηρούνται τον Ιανουάριο (10-15 ημέρες/μήνα) στο Βόρειο υποτροπικό Ειρηνικό και Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό και οι αντίστοιχες ελάχιστες τιμές τον Οκτώβριο (5-10 ημέρες/μήνα) στο Βόρειο Ειρηνικό και Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό. Επίσης, φαίνεται ότι κατά την διάρκεια όλων των μηνών του έτους ο αριθμός των ημερών για τις οποίες λειτούργησε ο αλγόριθμος στην περιοχή του Νότιου Ωκεανού κυμαίνεται από 0 έως 5 ημέρες/μήνα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μέσων μηνιαίων κατανομών που αποτυπώνονται στο Σχήμα 3.5 φαίνεται ότι, γενικά, η μέγιστη σχετική συχνότητα εμφάνισης θαλασσίων αερολυμάτων (τιμές 50-100%) παρατηρείται κατά την περίοδο Μαΐου-Ιουλίου και ιδιαίτερα τους μήνες Μάιο και Ιούνιο.

Πιο λεπτομερώς, σύμφωνα με το Σχήμα 3.5 φαίνεται ότι τον Ιανουάριο οι μέγιστες τιμές της σχετικής συχνότητας εμφάνισης παρατηρούνται στην περιοχή του Ινδικού Ωκεανού (60-70%), ενώ επίσης μεγάλες τιμές παρατηρούνται και στις τροπικές περιοχές του Βόρειου και Νότιου Ειρηνικού Ωκεανού (50-60%) και τις ακτές της Βραζιλίας (40-50%). Το Φεβρουάριο οι μέγιστες τιμές της συχνότητας παρατηρούνται στις τροπικές περιοχές του Βόρειου και Νότιου Ειρηνικού Ωκεανού (60-70%), καθώς επίσης και στο Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό (60-70%) και πιο συγκεκριμένα, γύρω από την Ισλανδία και τις ανατολικές ακτές της Γροιλανδίας. Επίσης, στο μήνα αυτόν παρατηρούνται μεγάλες τιμές της συχνότητας και στον Ινδικό Ωκεανό (50-60%). Το Μάρτιο οι μέγιστες τιμές της συχνότητας παρατηρούνται στις τροπικές περιοχές του Βόρειου Ειρηνικού Ωκεανού και το Νότιο Ωκεανό και είναι ίσες με 70-80%. Τον Απρίλιο οι μέγιστες τιμές παρατηρούνται στην περιοχή του Νότιου

Ωκεανού με τιμές ίσες με 70-80%, ενώ επίσης μεγάλες τιμές διακρίνονται και στις ακτές της Βραζιλίας και τις τροπικές περιοχές του Βόρειου Ειρηνικού Ωκεανού (δυτικά της Αμερικής) και είναι ίσες με 60-70%. Το Μάιο οι μέγιστες σχετικές συχνότητες εμφάνισης διακρίνονται στο Νότιο Ωκεανό (80-90%), ενώ μεγάλες τιμές παρατηρούνται και στις υποτροπικές περιοχές του Νότιου Ειρηνικού Ωκεανού (δυτικά της Αμερικής), οι οποίες είναι ίσες με 60-70%, και στον Ινδικό Ωκεανό (50-60%). Τον Ιούνιο οι μέγιστες τιμές παρατηρούνται στον Νότιο Ωκεανό (80-90%), καθώς και στον Ινδικό Ωκεανό (70-80%), ενώ μεγάλες τιμές παρατηρούνται επίσης στις υποτροπικές περιοχές του Νότιου Ειρηνικού Ωκεανού και στον Κόλπο του Μεξικού και είναι ίσες με 60-70%. Τον Ιούλιο, αντίστοιχα, οι μέγιστες τιμές της συχνότητας φαίνεται να επικρατούν στο Νότιο Ωκεανό (70-80%), ενώ μεγάλες τιμές παρατηρούνται και στις υποτροπικές περιοχές του Νότιου Ειρηνικού Ωκεανού και τον Ινδικό Ωκεανό (60-70%). Τον Αύγουστο οι μεγαλύτερες συχνότητες εμφάνισης παρατηρούνται και πάλι στον Νότιο Ωκεανό (70-80%), όμως σε μία πιο περιορισμένη έκτασή του σε σχέση με τον Ιούλιο, ενώ μεγάλες τιμές διακρίνονται και στις τροπικές και υποτροπικές περιοχές του Ειρηνικού Ωκεανού (40-50%). Το Σεπτέμβριο οι μέγιστες τιμές συνεχίζουν να παρατηρούνται στο Νότιο Ωκεανό (60-70%), αλλά σε πιο μικρή έκταση σε σχέση με τους δύο προηγούμενους μήνες, ενώ επίσης μεγάλες τιμές παρατηρούνται και στις τροπικές περιοχές του Ειρηνικού Ωκεανού (δυτικά της Αμερικής) και είναι ίσες με 50-60%. Τον Οκτώβριο οι μεγαλύτερες σχετικές συχνότητες εμφάνισης διακρίνονται στις τροπικές περιοχές του Νότιου Ειρηνικού Ωκεανού (δυτικά της Αμερικής), οι οποίες είναι ίσες με 60-80%, ενώ μεγάλες τιμές παρατηρούνται και στο Νότιο Ωκεανό (50-70%) και τον Ινδικό Ωκεανό (40-50%). Το Νοέμβριο, μεγάλες τιμές διακρίνονται και πάλι στις τροπικές περιοχές του Νότιου Ειρηνικού Ωκεανού (δυτικά της Αμερικής), αλλά και στο Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό και είναι ίσες με 50-60%, ενώ οι μεγαλύτερες συχνότητες εμφάνισης παρατηρούνται στον Ινδικό Ωκεανό (60-70%). Τέλος, παρόμοια γενικά χαρακτηριστικά παρατηρούνται το Δεκέμβριο, όταν οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται στον Ινδικό Ωκεανό (60-70%), στις τροπικές περιοχές του Νότιου Ειρηνικού Ωκεανού (60-70%) και το Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό (60-80%), ενώ επίσης μεγάλες τιμές (ίσες με 50-60%) διακρίνονται και στις υποτροπικές περιοχές του Νότιου Ειρηνικού Ωκεανού (δυτικά της Αμερικής).

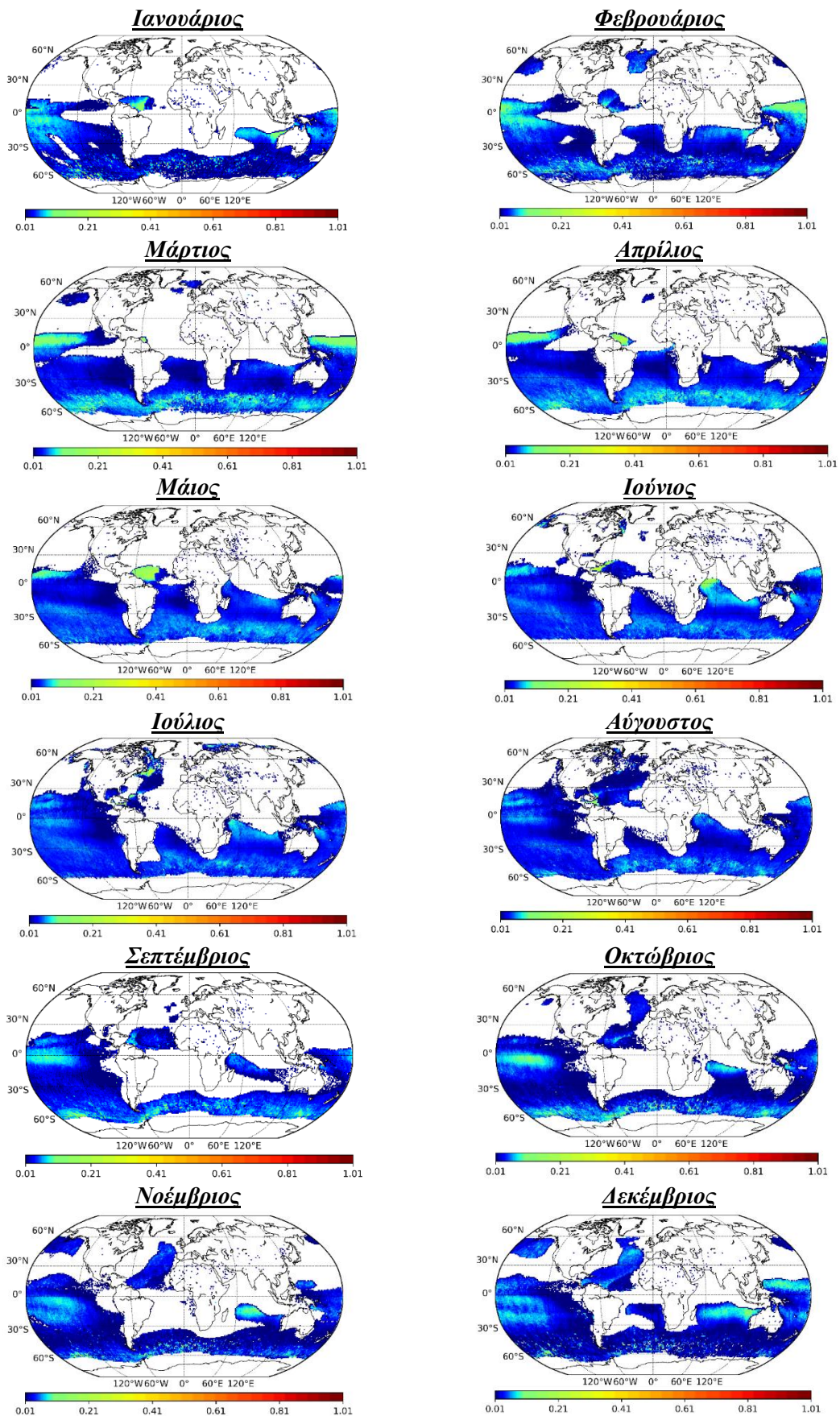




Σχήμα 3.5. Παγκόσμια κατανομή της μέσης κλιματολογικής μηνιαίας σχετικής συχνότητας εμφάνισης αερολυμάτων θαλασσίου άλατος (σε αριθμό ημερών/ημέρες που έτρεξε ο αλγόριθμος). Οι τιμές είναι μεσοποιημένες για την περίοδο 2005-2021.

Στο Σχήμα 3.6 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι παγκόσμιες γεωγραφικές κατανομές (χάρτες) των μέσων μηνιαίων κλιματολογικών τιμών για το φορτίο (οπτικό βάθος) των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος για την περίοδο μελέτης (2005-2021) ανά μήνα. Σύμφωνα με τους χάρτες αυτούς φαίνεται ότι, γενικά, οι μέγιστες τιμές του οπτικού βάθους εμφανίζονται στις τροπικές και υποτροπικές θαλάσσιες (ωκεάνιες) περιοχές του πλανήτη. Πιο λεπτομερώς, φαίνεται ότι τον Ιανουάριο οι μέγιστες τιμές του φορτίου (οπτικό βάθος) των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος παρατηρούνται κοντά στις ακτές της Βραζιλίας και τις δυτικές ακτές της Αυστραλίας με τιμές 0.2-0.4, ενώ χαμηλότερες τιμές παρατηρούνται στις τροπικές περιοχές του Ειρηνικού Ωκεανού και του Ινδικού Ωκεανού (0.1-0.2). Το Φεβρουάριο οι μέγιστες τιμές του φορτίου παρατηρούνται στις τροπικές περιοχές του Βόρειου Ειρηνικού Ωκεανού (0.2-0.4), σε αντίθεση με τις τροπικές περιοχές του Νότιου Ειρηνικού Ωκεανού και τις δυτικές ακτές της Αυστραλίας όπου οι τιμές είναι ίσες με 0.1-0.2. Το Μάρτιο οι μέγιστες τιμές παρατηρούνται στις τροπικές περιοχές του Βόρειου Ειρηνικού Ωκεανού και είναι ίσες με 0.2-0.4. Επίσης, τον ίδιο μήνα διακρίνονται χαμηλότερες τιμές στην περιοχή του Νότιου Ωκεανού, οι οποίες κυμαίνονται από 0.1 έως 0.2. Τον Απρίλιο οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται στις τροπικές περιοχές (δυτικά τις Αμερικής) του Βόρειου Ειρηνικού Ωκεανού και τις ακτές της Βραζιλίας με τιμές ίσες με 0.2-0.4, ενώ χαμηλότερες τιμές διακρίνονται στο Νότιο Ωκεανό που είναι ίσες με 0.1-0.2. Το Μάιο οι μέγιστες τιμές του φορτίου των θαλάσσιων αερολυμάτων διακρίνονται στο Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό κοντά στις ακτές της Βραζιλίας (0.3-0.4), ενώ επίσης μεγάλες τιμές, ίσες με 0.2-0.3, παρατηρούνται και στις τροπικές περιοχές του Βόρειου Ειρηνικού Ωκεανού (δυτικά της Αμερικής). Τον Ιούνιο οι μέγιστες τιμές (ίσες με 0.3-0.4) παρατηρούνται στην Καραϊβική Θάλασσα και κοντά στις ακτές της Σομαλίας και της Κένυας, ενώ χαμηλότερες και ίσες με 0.1 παρατηρούνται στον Ινδικό Ωκεανό και στις τροπικές περιοχές του Βόρειου Ειρηνικού Ωκεανού (δυτικά της Αμερικής). Τον Ιούλιο, αντίστοιχα, οι μέγιστες τιμές φαίνεται να επικρατούν σε μια περιορισμένη περιοχή της Καραϊβικής Θάλασσας και κοντά στις δυτικές ακτές της Βόρειας Αμερικής, και είναι ίσες με 0.3-0.4. Αντίθετα, στον Ινδικό Ωκεανό και τις τροπικές περιοχές του Ειρηνικού Ωκεανού παρατηρούνται χαμηλότερες τιμές και ίσες με 0.1. Τον Αύγουστο οι μεγαλύτερες τιμές φορτίου θαλάσσιων αερολυμάτων (ίσες και πάλι με 0.3-0.4) παρατηρούνται στην Καραϊβική Θάλασσα, ενώ στις τροπικές περιοχές του Ειρηνικού και του Ινδικού Ωκεανού οι τιμές χαμηλότερες και ίσες με 0.1. Το Σεπτέμβριο οι μέγιστες τιμές (ίσες με 0.1-0.2) παρατηρούνται στο Νότιο Ωκεανό, στις τροπικές περιοχές του Ειρηνικού Ωκεανού και στις ακτές τις Βενεζουέλας (κοντά στην Καραϊβική Θάλασσα). Τον Οκτώβριο οι μεγαλύτερες

τιμές φορτίου (ίσες με 0.2-0.3) διακρίνονται στις τροπικές περιοχές του Νότιου Ειρηνικού Ωκεανού (δυτικά της Αμερικής), ενώ στις περιοχές του Νότιου και Ινδικού Ωκεανού είναι μικρότερες (0.1-0.2). Το Νοέμβριο, αντίστοιχα, οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται στον Ινδικό Ωκεανό (0.2-0.3), ενώ χαμηλότερες τιμές διακρίνονται στις τροπικές περιοχές του Νότιου Ειρηνικού Ωκεανού (δυτικά της Αμερικής) οι οποίες είναι ίσες με 0.1-0.2. Τέλος, το Δεκέμβριο οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται κοντά στις δυτικές ακτές της Αυστραλίας (0.3-0.4), ενώ επίσης μεγάλες τιμές του φορτίου (0.2-0.3) διακρίνονται και στον Ινδικό Ωκεανό. Τον ίδιο μήνα, στις τροπικές περιοχές του Ειρηνικού Ωκεανού οι τιμές είναι ίσες με 0.1-0.2, ενώ στην Καραϊβική Θάλασσα και τις ακτές της Βενεζουέλας είναι της τάξης του 0.1.



**Σχήμα 3.6.** Παγκόσμια κατανομή της μέσης κλιματολογικής μηνιαίας τιμής του φορτίου (οπτικού βάθους) των αερολυμάτων θαλασσιού άλατος. Οι τιμές είναι μεσοποιημένες για την περίοδο 2005-2021.

## 3.2 Χρονική μεταβολή των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος σε παγκόσμια κλίμακα

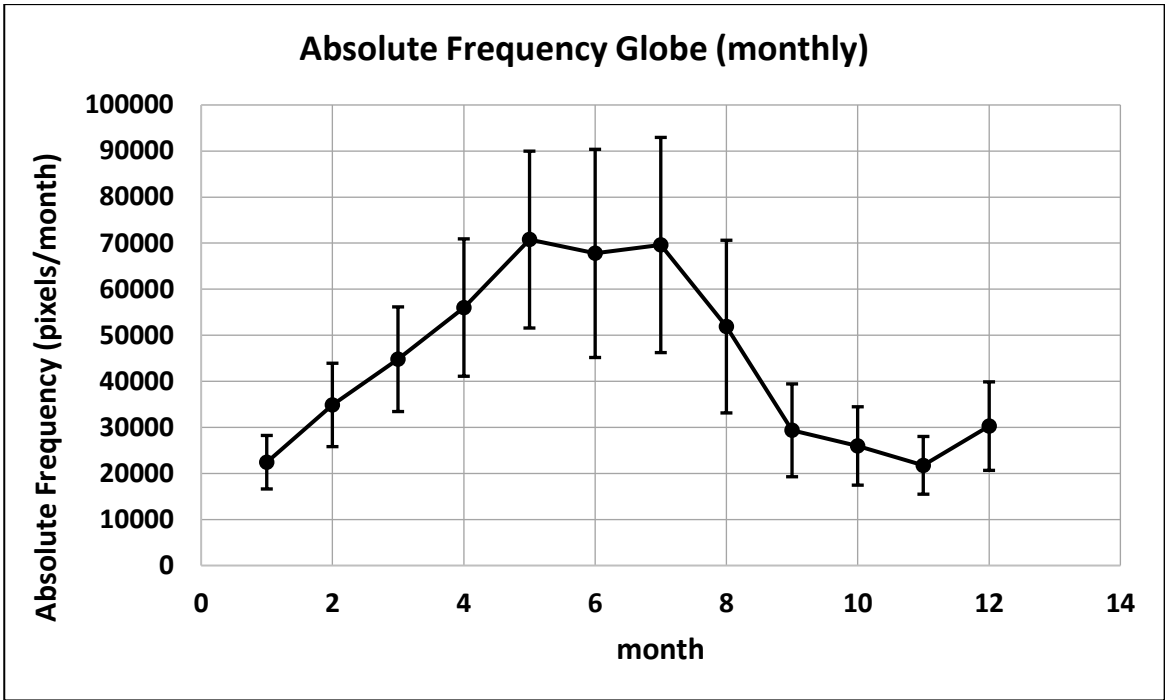
### 3.2.1 Ενδοετήσια μεταβολή της συχνότητας εμφάνισης και του φορτίου (οπτικού βάθους) των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος

Στο Σχήμα 3.7α απεικονίζεται η ενδοετήσια μεταβολή της συχνότητας εμφάνισης των θαλασσίων αερολυμάτων στον πλανήτη και πιο συγκεκριμένα ο ανά μήνα συνολικός αριθμός των  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$  κυψελίδων του πλανήτη πάνω από τις οποίες ανιχνεύθηκαν αερολύματα θαλασσίου άλατος. Οι τιμές αυτές είναι αθροιστικές μέσα στο μήνα και κλιματολογικές, δηλαδή έχουν προκύψει μετά από μεσοποίηση που πραγματοποιήθηκε για τα 17 έτη της περιόδου μελέτης (2005-2021). Στο ίδιο σχήμα απεικονίζεται επίσης και η αντίστοιχη τυπική απόκλιση των μέσων μηνιαίων αυτών τιμών, η οποία εκφράζει (ποσοτικοποιεί) την από έτος σε έτος μεταβολή. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για να προκύψουν αυτές οι τιμές ήταν η εξής: αρχικά, για κάθε μήνα του κάθε έτους αθροίστηκε ο αριθμός των κυψελίδων στις οποίες παρουσιάστηκαν, σύμφωνα με τον αλγόριθμο, αερολύματα θαλασσίου άλατος σε όλες τις ημέρες του μήνα. Στη συνέχεια, μεσοποιήθηκαν οι τιμές των ίδιων μηνών κάθε έτους και υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι και οι τυπικές αποκλίσεις, κι έτσι με αυτόν τον τρόπο προέκυψε μία μέση τιμή για τον κάθε μήνα. Σύμφωνα με το Σχήμα 3.7α, φαίνεται πως η μέγιστη συχνότητα εμφάνισης των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος παρατηρείται τους μήνες Μάιο, Ιούνιο και Ιούλιο, κατά τους οποίους φαίνεται να εντοπίζεται και η μεγαλύτερη τιμή της τυπικής απόκλισης, ενώ οι αντίστοιχες ελάχιστες τιμές της συχνότητας αλλά και της τυπικής απόκλισης εμφανίζονται το φθινόπωρο και το χειμώνα του Βορείου Ημισφαιρίου. Επισημαίνεται ότι η υποδεικνυόμενη από το Σχήμα 3.7α εποχική μεταβολή της συχνότητας εμφάνισης των θαλασσίων αερολυμάτων, με θερινά/χειμερινά μέγιστα/ελάχιστα, δεν αναιρείται ούτε τίθεται εν αμφιβόλω από το μέγεθος της διαχρονικής μεταβλητότητας των αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε γενική συμφωνία με εκείνα των μέσων μηνιαίων κλιματολογικών κατανομών της απόλυτης (και σχετικής) συχνότητας εμφάνισης των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 3.1.2.

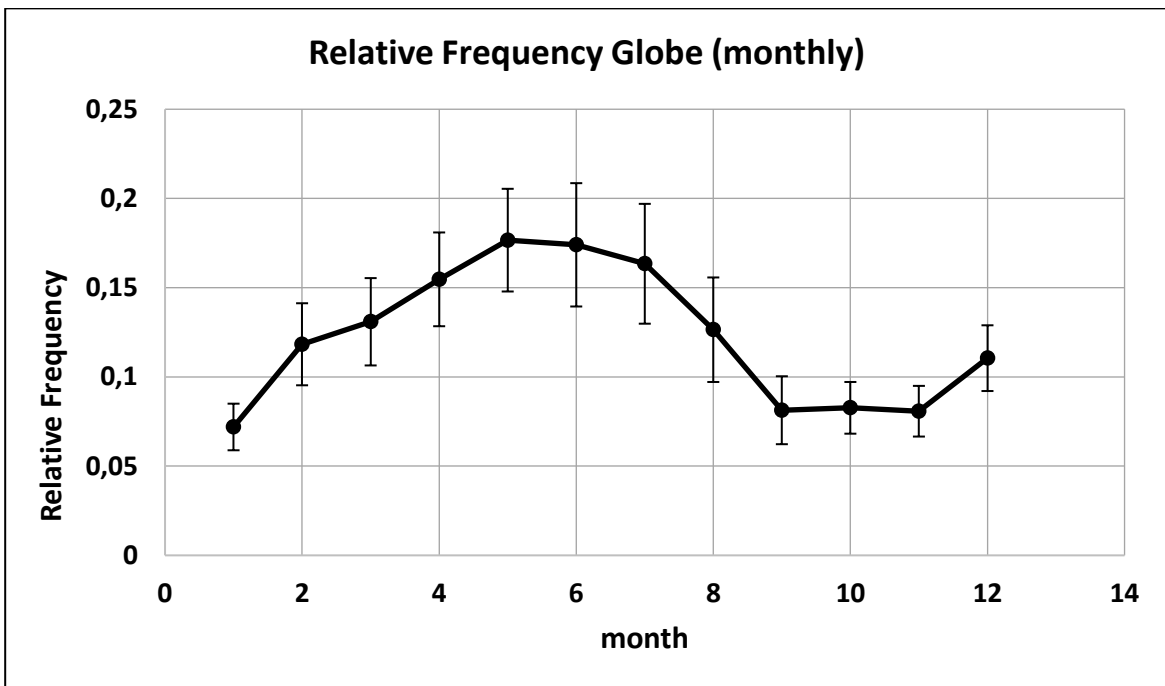
Επειδή ο μέσος μηνιαίος αριθμός των κυψελίδων (μεσοποιημένες για τα 17 έτη της περιόδου 2005-2021) για τις οποίες λειτούργησε ο αλγόριθμος δεν είναι σταθερός, τα αποτελέσματα του Σχήματος 3.7α ανήχθησαν με βάση το μέσο των μηνιαίων αυτών αριθμών. Έτσι προέκυψαν οι μηνιαίες τιμές της σχετικής συχνότητας εμφάνισης των αερολυμάτων

θαλασσίου άλατος που παρέχονται στο Σχήμα 3.7β και είναι απολύτως συγκρίσιμες μεταξύ τους. Σύμφωνα με το Σχήμα αυτό, φαίνεται πως η εποχικότητα δεν αλλάζει σε σχέση με την απόλυτη συχνότητα εμφάνισης των θαλάσσιων αερολυμάτων (Σχήμα 3.7α) όσον αφορά στο πότε εμφανίζονται οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές. Όντως, οι μέγιστες σχετικές συχνότητες εμφάνισης παρατηρούνται, όπως και οι αντίστοιχες απόλυτες συχνότητες, το Μάιο και τον Ιούνιο, ενώ οι ελάχιστες τιμές εμφανίζονται το φθινόπωρο και το χειμώνα του Βορείου Ημισφαιρίου.

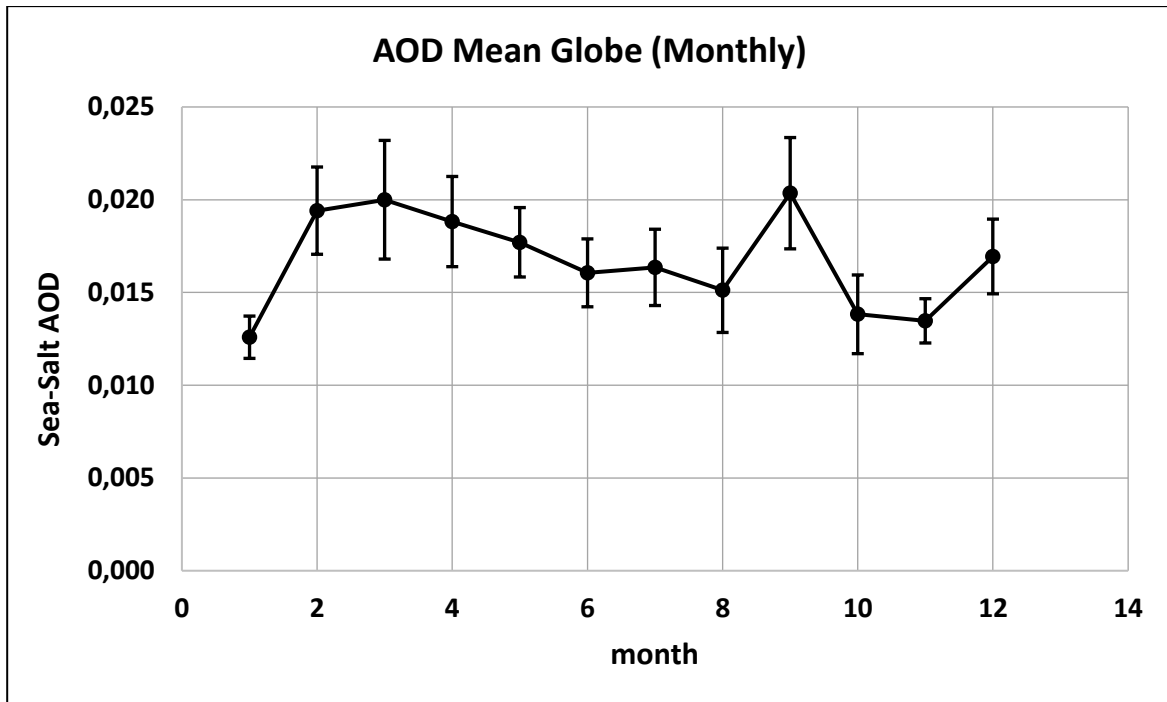
Επιπλέον, στο Σχήμα 3.7γ παρουσιάζεται η ενδοετήσια κύμανση των ανά μήνα μέσων παγκόσμιων τιμών του φορτίου (οπτικού βάθους) των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος. Οι μέσες μηνιαίες τιμές AOD και οι αντίστοιχες τυπικές αποκλίσεις έχουν προκύψει από μεσοποίηση των τιμών του οπτικού βάθους κάθε κυψελίδας πάνω από την οποία παρατηρήθηκε θαλάσσιο αερόλυμα σε όλες τις ημέρες του εν λόγω μήνα (κάθε μήνα) κάθε έτους και στη συνέχεια έγινε μεσοποίηση αυτών των μέσων πλανητικών τιμών όλων των ετών. Σύμφωνα με το σχήμα αυτό, φαίνεται πως οι τιμές του φορτίου των θαλάσσιων αερολυμάτων δεν εμφανίζουν ουσιαστική εποχική μεταβολή, έχοντας ασθενή μέγιστα (τιμές 0,02) το Μάρτιο και το Σεπτέμβριο και ελάχιστα τον Ιανουάριο και το Νοέμβριο (0,013 και για τους δύο μήνες). Το εύρος διακύμανσης των μηνιαίων τιμών του Σχήματος 3.7γ είναι 0.013-0.02, δηλαδή ίσο με 0.007, που αντιστοιχεί στο 41.2% της μέσης τιμής (0.017). Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν γενικά με εκείνα που προέκυψαν από τη μέση κλιματολογική κατανομή του οπτικού βάθους που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη Ενότητα (3.1.2) αυτού του κεφαλαίου. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι οι τιμές του φορτίου (AOD) που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.7γ είναι γενικά μικρότερες κατά μία τάξη μεγέθους από τις μέγιστες τιμές (πράσινα-κίτρινα-κόκκινα χρώματα) που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 3.1.2. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη χωρική μεσοποίηση για τον υπολογισμό των πλανητικών τιμών, η οποία έγινε λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις 1°x1° κυψελίδες στις οποίες έστω και για μία ημέρα μέσα στον (εκάστοτε) μήνα παρατηρήθηκαν αερολύματα θαλασσίου άλατος (με μη μηδενική τιμή AOD). Συνεπώς, στον υπολογισμό αυτό ελήφθησαν υπόψιν πολλές κυψελίδες με τιμές μικρότερες από 0.05 (οι οποίες είναι και οι επικρατούσες σε χωρικό επίπεδο, σκούρες μπλε αποχρώσεις στο Σχήμα 3.6) με αποτέλεσμα τις μειωμένες μέσες πλανητικές τιμές του φορτίου (AOD).



( $\alpha$ )



( $\beta$ )



(γ)

**Σχήμα 3.7.** Ενδοετήσια διακύμανση της μέσης μηνιαίας τιμής και της αντίστοιχης τυπικής απόκλισης: (α) της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης αερολυμάτων θαλασσίου άλατος (του συνολικού αριθμού των  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$  κυψελίδων του πλανήτη στις οποίες εντοπίστηκαν), (β) της σχετικής συχνότητας εμφάνισης αερολυμάτων θαλασσίου άλατος (περιοχικής κάλυψής τους, εκπεφρασμένης σε επί τοις εκατό ποσοστό του συνολικού αριθμού κυψελίδων του πλανήτη) και (γ) του φορτίου (οπτικού βάθους) τους. Οι τιμές είναι μεσοποιημένες για τα 17 έτη της περιόδου μελέτης (2005-2021) και τον πλανήτη και οι τυπικές αποκλίσεις αναφέρονται στη μεσοποίηση αυτή και εκφράζουν την από έτος σε έτος μεταβολή.

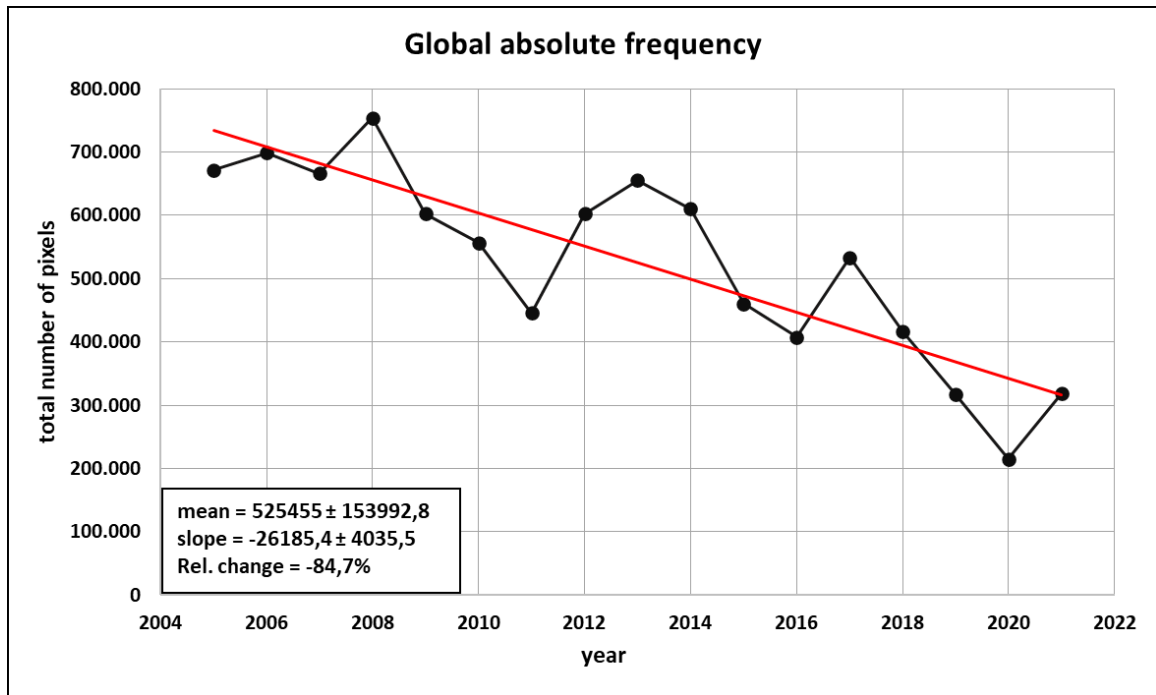
### 3.2.2 Διαχρονική μεταβολή της συχνότητας εμφάνισης και του φορτίου (οπτικού βάθους) των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος

Σε αυτή την Ενότητα παρουσιάζεται η διαχρονική μεταβολή που παρατηρήθηκε για τα αερολύματα θαλασσίου άλατος κατά την περίοδο μελέτης 2005-2021. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζεται η μεταβολή από έτος σε έτος των μέσων ετήσιων πλανητικών τιμών της συχνότητας εμφάνισης και του φορτίου των θαλάσσιων αερολυμάτων. Η συχνότητα εμφάνισης (Σχήμα 3.8α) είναι στην ουσία, για το κάθε έτος, το άθροισμα των δώδεκα μηνιαίων συχνοτήτων, ενώ αριθμητικά είναι ίση με το γινόμενο του συνολικού αριθμού των κυψελίδων ( $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ ) στις οποίες ανιχνεύθηκαν αερολύματα αυτού του είδους και της συχνότητας εμφάνισή τους σε κάθε κυψελίδα. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 3.8β παρουσιάζεται η διαχρονική μεταβολή της σχετικής συχνότητας εμφάνισης των θαλάσσιων

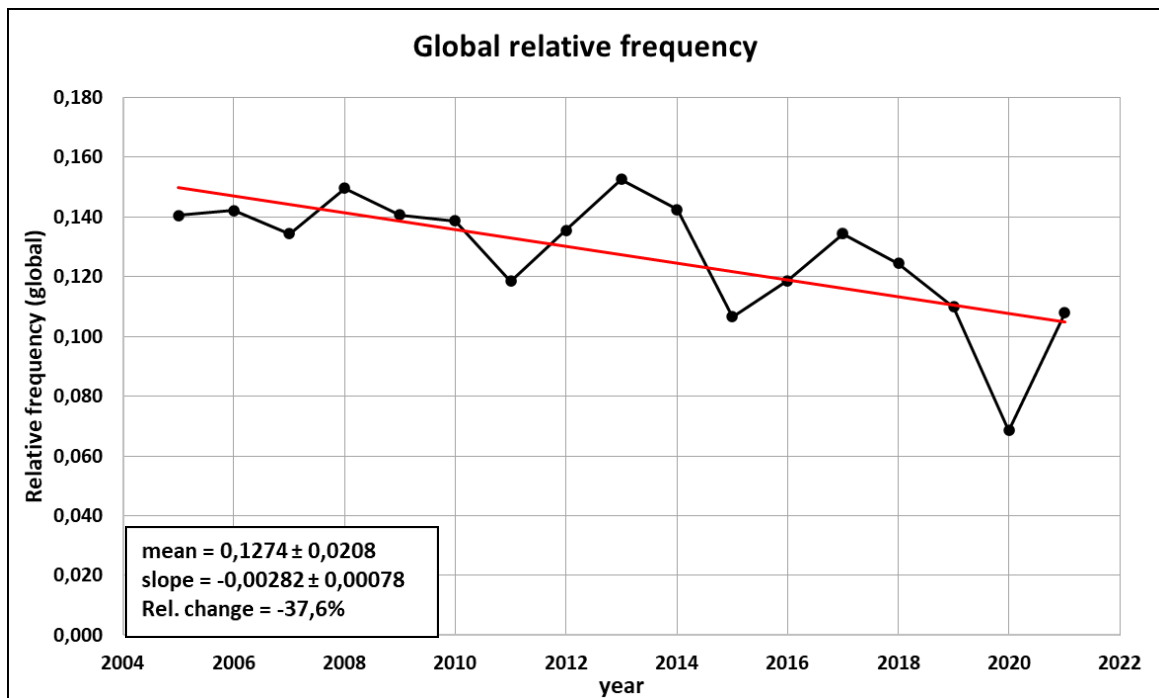


αερολυμάτων σε παγκόσμιο επίπεδο, η οποία αντιπροσωπεύει τη συχνότητα εμφάνισης των αερολυμάτων αυτών εκπεφρασμένη επί του αριθμού των ημερών για τις οποίες λειτούργησε ο αλγόριθμος. Η ετήσια τιμή του οπτικού βάθους των θαλάσσιων αερολυμάτων (Σχήμα 3.8β) για το κάθε έτος, είναι ίση με τη μέση τιμή των δώδεκα μηνιαίων τιμών του οπτικού βάθους, που αντιστοιχεί στη μέση τιμή του οπτικού βάθους όλων των κυψελίδων (στις οποίες παρατηρήθηκαν θαλάσσια αερολύματα) όλου του πλανήτη για κάθε έτος.

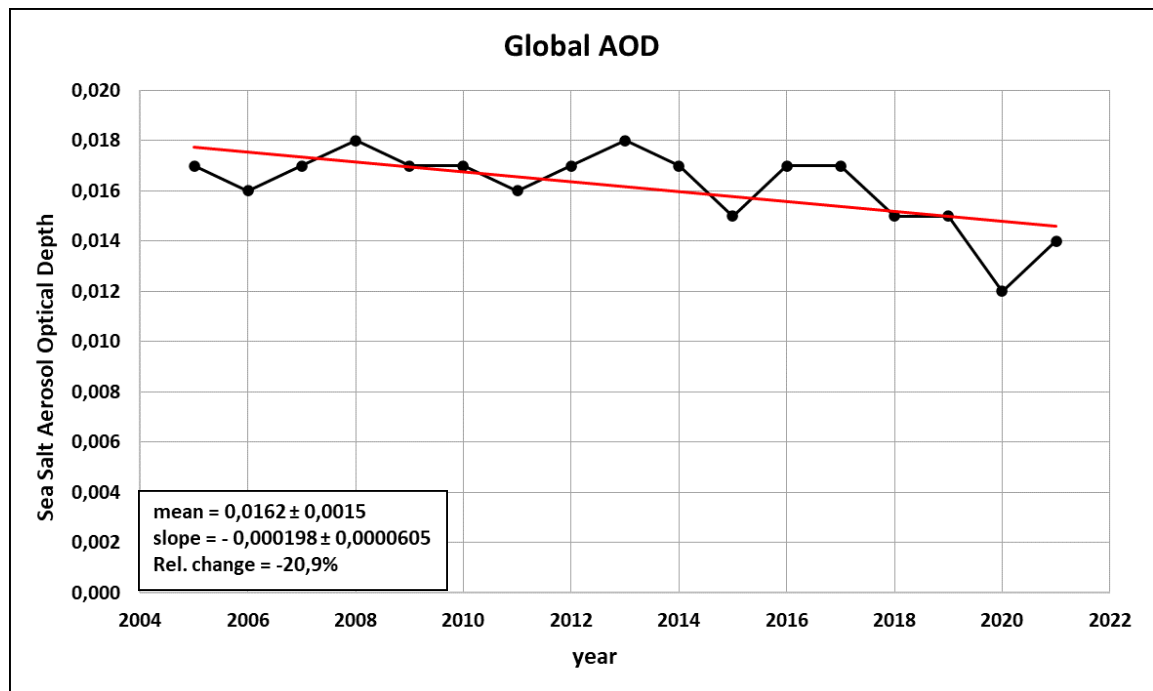
Σύμφωνα με τα τρία αυτά σχήματα, φαίνεται ότι τόσο η συχνότητα εμφάνισης όσο και το φορτίο των θαλάσσιων αερολυμάτων εμφανίζουν μία τάση μείωσης κατά τη διάρκεια των 17 ετών της περιόδου μελέτης, αν και διακρίνονται και κάποιες διαφορές όσον αφορά στις μεταβολές για κάποιες χρονικές υποπεριόδους. Η μείωση της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των θαλάσσιων αερολυμάτων κατά την περίοδο 2005-2021 είναι πολύ μεγάλη, όντας ίση με 445.152 κυψελίδες ή 84,7%, ενώ η μείωση για τη σχετική συχνότητα εμφάνισης και το φορτίο των θαλάσσιων αερολυμάτων είναι μικρότερη και ίση με 37,6% και 20,9%, αντίστοιχα. Και οι τρεις τάσεις μεταβολής είναι στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο σημαντικότητας 95%, δεδομένου ότι και στις τρεις περιπτώσεις η κλίση είναι μεγαλύτερη από το αντίστοιχο «σφάλμα» της. Το γεγονός ότι η γραμμική μείωση της απόλυτης συχνότητας είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μείωση της σχετικής συχνότητας, αποκαλύπτει ότι κατά τη διάρκεια της περιόδου 2005-2021 υπήρξε μία μείωση του αριθμού των ημερών κατά τις οποίες δούλεψε ο δορυφορικός αλγόριθμος. Επίσης, αυτό επιβεβαιώνεται από τα χαρακτηριστικά της χρονοσειράς των Σχημάτων 3.8α και 3.8β, που υποδεικνύουν μια μείωση της απόλυτης συχνότητας κατά την περίοδο 2004-2010 (Σχήμα 3.8α), η οποία δεν παρατηρείται για τη σχετική συχνότητα (Σχήμα 3.8β).



( $\alpha$ )



( $\beta$ )



(γ)

**Σχήμα 3.8.** Διαχρονική μεταβολή (2005-2021) και γραμμική τάση μεταβολής σε παγκόσμια κλίμακα (α) της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης, (β) της σχετικής συχνότητας εμφάνισης (σε σχέση με τον αριθμό των ημερών για τις οποίες λειτούργησε ο αλγόριθμος) και (γ) του φορτίου (οπτικού βάθους) των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος.

Για την περαιτέρω εξήγηση των αποτελεσμάτων του Σχήματος 3.8, μελετήθηκε/εξετάσθηκε και ο αριθμός των κυψελίδων όλου του πλανήτη στις οποίες παρατηρήθηκε αύξηση ή μείωση της συχνότητας εμφάνισης και του φορτίου των θαλάσσιων αερολυμάτων κατά την περίοδο μελέτης (2005-2021) (Σχήματα 3.1β, 3.2β και 3.3β). Προέκυψε ότι κατά την περίοδο μελέτης ο αριθμός των κυψελίδων στις οποίες παρατηρήθηκε αύξηση της απόλυτης (και σχετικής) συχνότητας εμφάνισης των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος είναι 3057, ενώ σε 49385 κυψελίδες παγκοσμίως παρατηρήθηκε μείωση. Αντίστοιχα, για το οπτικό βάθος των αερολυμάτων ο αριθμός των κυψελίδων όπου σημειώθηκε αύξηση ήταν 9437, ενώ σε 43005 παρατηρήθηκε μείωση. Αυτοί οι αριθμοί φαίνεται να επιβεβαιώνουν τη μείωση της συχνότητας εμφάνισης και του φορτίου των θαλάσσιων αερολυμάτων που αποκαλύφθηκε στο Σχήμα 3.8.

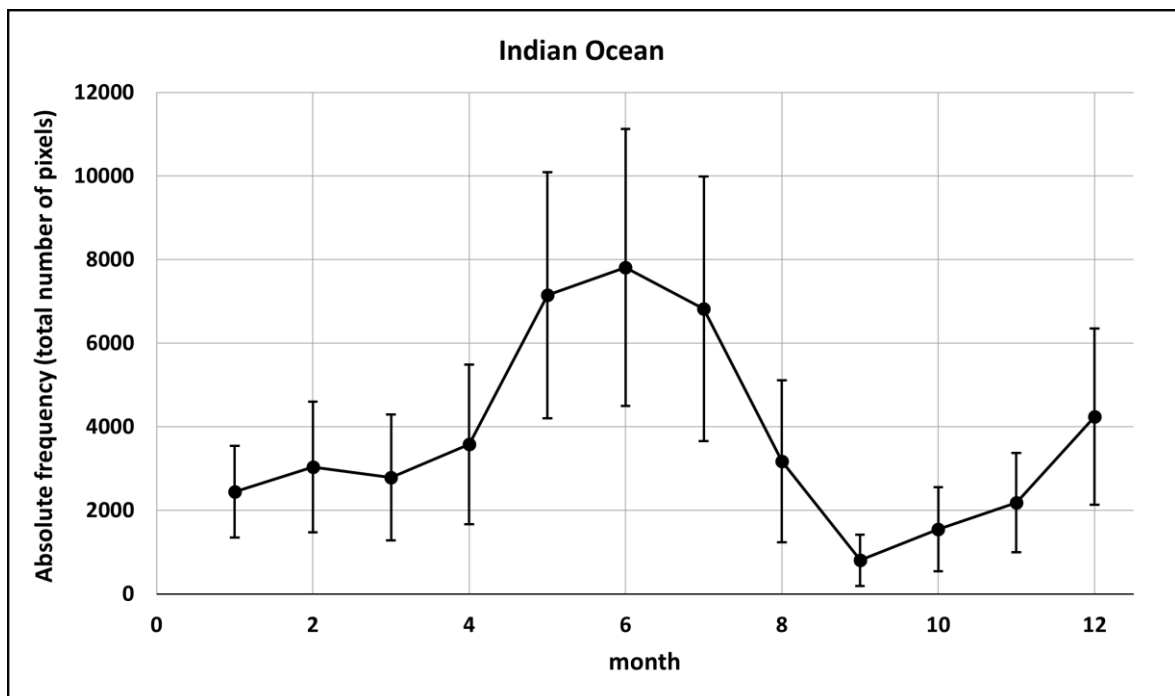
### **3.3 Αερολύματα θαλασσίου άλατος σε περιοχική κλίμακα**

Στις ενότητες 3.2.1 και 3.2.2 αυτού του κεφαλαίου παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα που αφορούν στην ενδοετήσια μεταβολή της συχνότητας εμφάνισης και του φορτίου (οπτικού βάθους) των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος και στη διαχρονική μεταβολή τους σε παγκόσμιο επίπεδο, αντίστοιχα. Σε συνέχεια αυτών των αποτελεσμάτων έγινε επίσης αντίστοιχη μελέτη της μεταβολής των δύο αυτών μεταβλητών και σε συγκεκριμένες περιοχές του πλανήτη όπου φάνηκε (Ενότητα 3.1) ότι κυριαρχεί η εμφάνιση των αερολυμάτων αυτού του είδους μέσα στο έτος και έχει ενδιαφέρον να παρουσιαστούν ξεχωριστά. Οι περιοχές που χρησιμοποιήθηκαν προς μελέτη είναι οι τέσσερις αυτές που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 2.1 και στο Σχήμα 2.5 και είναι όλες ωκεάνιες: Ειρηνικός, Ινδικός, Ατλαντικός και Νότιος Ωκεανός. Με τον τρόπο μελέτης που παρουσιάζεται στην παρούσα ενότητα γίνεται πιο εμφανής η μεταβλητότητα της συχνότητας εμφάνισης και του οπτικού βάθους των θαλάσσιων αερολυμάτων στις εν λόγω περιοχές. Και για τις τέσσερις περιοχές παρουσιάζονται στις επόμενες υποενότητες η ενδοετήσια και η διαχρονική μεταβολή της σχετικής και απόλυτης συχνότητας εμφάνισης αλλά και του οπτικού βάθους των θαλάσσιων αερολυμάτων. Ο υπολογισμός των τιμών της απόλυτης και σχετικής συχνότητας, καθώς και του οπτικού βάθους για την κάθε περιοχή έγινε ακριβώς με τον ίδιο τρόπο που εφαρμόστηκε στους αντίστοιχους υπολογισμούς σε παγκόσμιο επίπεδο, με την σχετική συχνότητα εμφάνισης να είναι εκπεφρασμένη σε ποσοστό επί τοις εκατό του συνολικού αριθμού των κυψελίδων για τις οποίες λειτούργησε ο αλγόριθμος σε κάθε περιοχή.

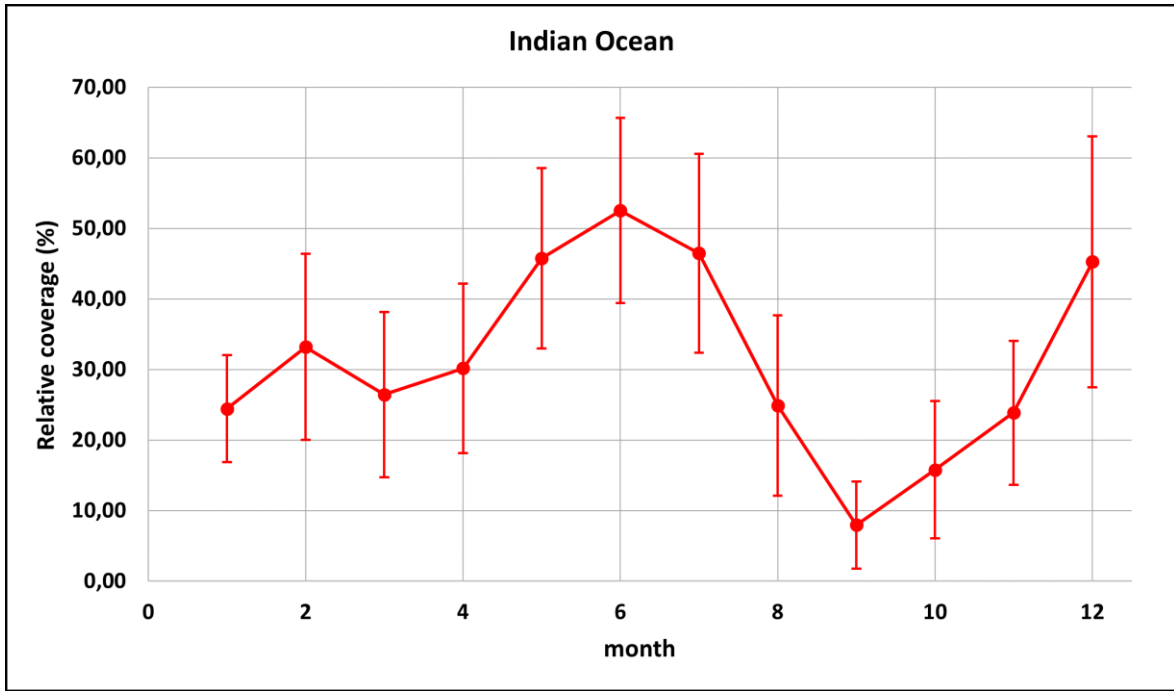
#### **3.3.1 Ινδικός Ωκεανός**

Στα Σχήματα 3.9α και 3.9β παρουσιάζεται η ενδοετήσια μεταβολή των μέσων μηνιαίων περιοχικών τιμών της απόλυτης και σχετικής (ποσοστιαίας επί τοις εκατό και επί του συνόλου των κυψελίδων της περιοχής για τις οποίες λειτούργησε ο αλγόριθμος) συχνότητας εμφάνισης των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος στην περιοχή του Ινδικού Ωκεανού. Επίσης, στο Σχήμα 3.9γ παρουσιάζεται η αντίστοιχη ενδοετήσια μεταβολή του φορτίου (οπτικού βάθους) τους. Από τα σχήματα αυτά φαίνεται ότι η απόλυτη και σχετική συχνότητα εμφάνισης παρουσιάζουν σχεδόν κοινό ενδοετήσιο κύκλο. Στην περιοχή του Ινδικού Ωκεανού τα θαλάσσια αερολύματα εμφανίζονται πιο συχνά τον Ιούνιο (πάνω από 7810

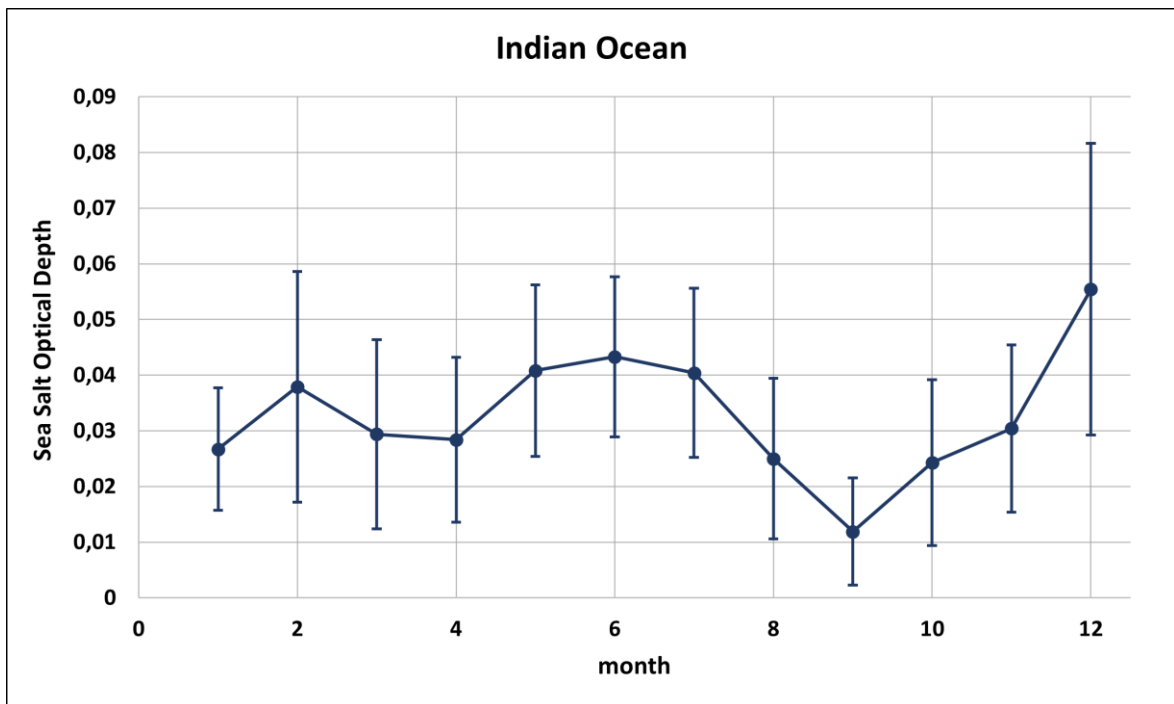
κυψελίδες ή το 52,5% του συνόλου της περιοχής), ενώ δευτερευόντως συχνά εμφανίζονται το Δεκέμβριο (σε 4242 κυψελίδες ή το 45,3% του συνόλου της περιοχής). Ένα τρίτο μέγιστο εμφανίζεται για τη σχετική συχνότητα το Φεβρουάριο αντιστοιχώντας σε 3039 κυψελίδες ή το 33,2% της περιοχής. Αυτό είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της σημασίας που έχει το να λαμβάνεται υπόψη η περιοχή για την οποία λειτουργεί ο αλγόριθμος, για την εξαγωγή περισσότερο ορθών συμπερασμάτων. Σε ό,τι αφορά στο φορτίο (οπτικό βάθος) των θαλασσιών αερολυμάτων στην περιοχή του Ινδικού Ωκεανού, αυτό εμφανίζει τα τρία προαναφερθέντα μηνιαία μέγιστα για τη συχνότητα εμφάνισης, όμως με διαφορετική σειρά, καθώς το μέγιστο οπτικό βάθος παρατηρείται το Δεκέμβριο (ίσο με 0,055), ενώ σχεδόν εξίσου μεγάλα φορτία παρατηρούνται τον Ιούνιο (0,043) και το Φεβρουάριο (0,038). Γενικά λοιπόν, όταν εμφανίζονται πιο συχνά τα θαλάσσια αερολύματα στην περιοχή του Ινδικού Ωκεανού, τότε παρατηρούνται και τα μεγαλύτερα φορτία τους. Επισημαίνεται ότι αυτό δεν είναι αυτονόητο, ούτε συμβαίνει πάντα, όπως δείχθηκε ότι συμβαίνει στην περίπτωση των μέσων τιμών σε πλανητική βάση (Σχήμα 3.7), καθώς και για τα αερολύματα σκόνης στην περιοχή της Μεσογείου, όπου την άνοιξη παρατηρούνται τα μεγαλύτερα φορτία τους, ενώ εμφανίζονται πιο συχνά το καλοκαίρι (Gavrrouzou et al., 2020).



(α)



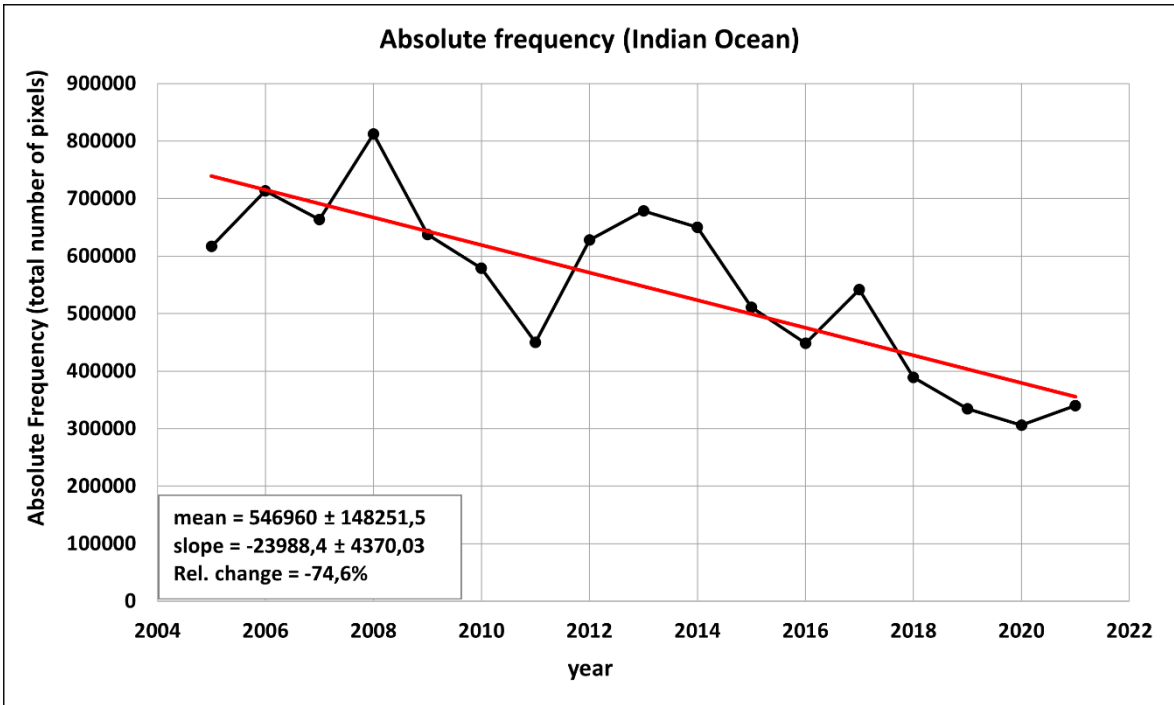
(β)



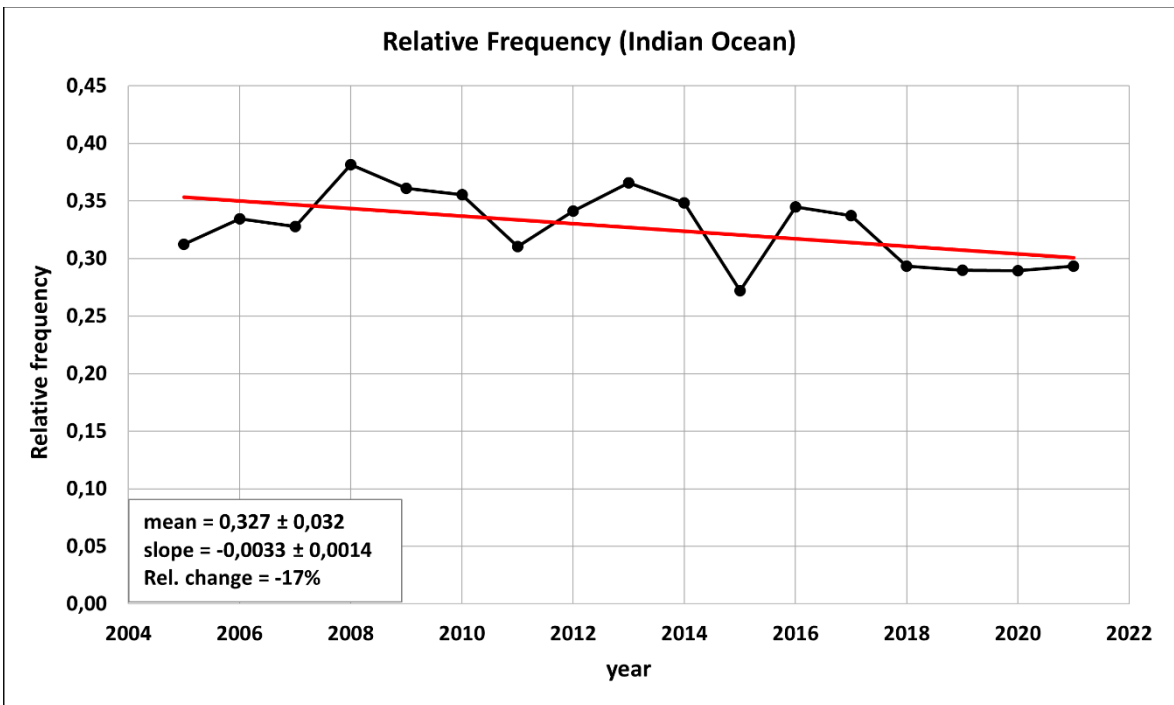
(γ)

**Σχήμα 3.9.** Ενδοετήσια διακύμανση της μέσης μηνιαίας τιμής και της αντίστοιχης τυπικής απόκλισης: (α) της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης αερολυμάτων θαλασσίου άλατος (του συνολικού αριθμού των  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  κυψελίδων στις οποίες εμφανίστηκαν, μαύρο χρώμα), (β) της αντίστοιχης σχετικής συχνότητας εμφάνισής τους (εκπεφρασμένης σε επί τοις εκατό ποσοστό του συνολικού αριθμού κυψελίδων της περιοχής για τις οποίες λειτούργησε ο αλγόριθμος, κόκκινο χρώμα) και (γ) του φορτίου (οπτικού βάθους) τους. Η μεσοποίηση αναφέρεται στην περιοχή του Ινδικού Ωκεανού και την περίοδο 2005-2021.

Στη συνέχεια, στο Σχήμα 3.10 παρουσιάζονται οι διαχρονικές μεταβολές των ετησίων τιμών της συχνότητας εμφάνισης (απόλυτης και σχετικής) και του φορτίου (σε τιμές οπτικού βάθους) των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος στην περιοχή του Ινδικού Ωκεανού. Τα αποτελέσματα είναι μεσοποιημένα για την περίοδο 2005-2021 και την περιοχή του Ινδικού Ωκεανού. Φαίνεται (Σχήμα 3.10α) ότι ετησίως παρατηρούνται αερολύματα αυτού του είδους σε 305.000-810.000 κυψελίδες (ή κατά μέσον όρο σε ~ 545.000 κυψελίδες), με ένα σχετικά μεγάλο εύρος διακύμανσης της απόλυτης συχνότητας εμφάνισής τους (505.000 κυψελίδες ή 92,6% της μέσης τιμής). Δεν παρατηρείται κάποια περιοδικότητα στην απόλυτη συχνότητα εμφάνισης, ενώ υπάρχουν έτη με ευδιάκριτα μεγάλες (2008, 2013, 2017) και μικρές (2011, 2016, 2020) συχνότητες εμφάνισης. Χρειάζεται διερεύνηση για να προσδιοριστούν τα κυρίαρχα αίτια όμως όμως μεταβλητότητας, με το πιθανότερο ίσως αίτιο να είναι η ένταση του ανέμου (Lewis and Schwartz, 2004; O'Dowd and de Leeuw, 2007). Διακρίνεται μία γραμμική τάση μείωσης της απόλυτης συχνότητας κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης, ίση με 74,6%, η οποία είναι στατιστικά σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 95% με βάση το μη παραμετρικό τεστ που χρησιμοποιήθηκε (t-test), αλλά και τη σύγκριση μεταξύ της κλίσης (slope) και του αντίστοιχου σφάλματός της (slope error), οι τιμές των οποίων απεικονίζονται και στο Σχήμα 3.8. Η από έτος σε έτος μεταβολή της σχετικής συχνότητας εμφάνισης των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος στον Ινδικό Ωκεανό (Σχήμα 3.10β) εμφανίζει αρκετά όμοια χαρακτηριστικά με εκείνη της απόλυτης συχνότητας. Για παράδειγμα, μέγιστες σχετικές συχνότητες εμφάνισης παρατηρούνται στα ίδια έτη (με μέγιστες καλύψεις της περιοχής του Ινδικού Ωκεανού ίσες με 36,9% το 2008 και 35,2% το 2013 και ελάχιστες ίσες με 29,9% το 2011), ενώ παρατηρείται γραμμική τάση μείωσης, όμως μικρότερη και ίση με 17% (ωστόσο στατιστικά σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 95%). Τέλος, η διαχρονική μεταβολή του οπτικού βάθους των θαλασσίων αερολυμάτων στον Ινδικό Ωκεανό (Σχήμα 3.10γ) εμφανίζεται ασθενής, με τα ετήσια μέγιστα και ελάχιστα να διακρίνονται με δυσκολία στη χρονοσειρά, έχοντας ένα σχετικά μικρό εύρος διακύμανσης των τιμών (από 0,029 έως 0,037, δηλαδή ίσο με 0,008 ή 24,2% της μέσης τιμής). Παράλληλα, διακρίνεται μία μικρή και μη στατιστικά σημαντική (σε επίπεδο σημαντικότητας 95%) τάση μείωσης του φορτίου των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος στον Ινδικό Ωκεανό, ίση με 5,02%.

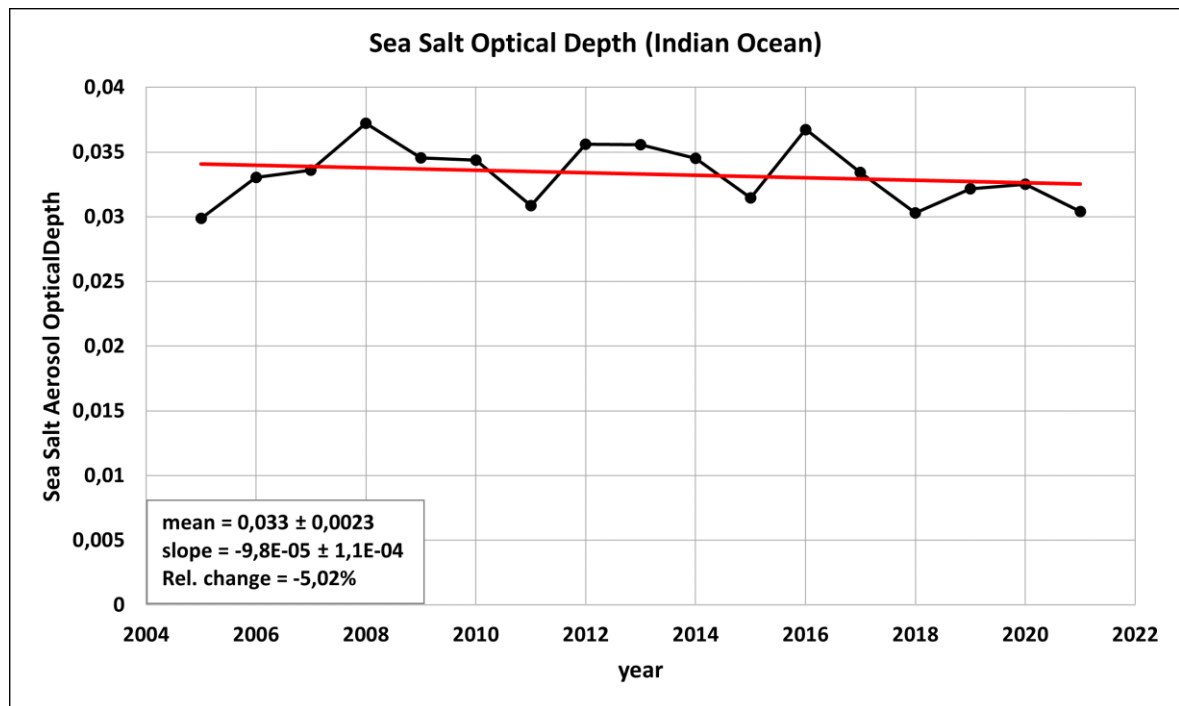


(a)



(b)





(γ)

**Σχήμα 3.10.** Διαχρονική μεταβολή (2005-2021) και γραμμική τάση μεταβολής των μέσων ετησίων περιοχικών τιμών: (α) της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης (σε αριθμό κυψελίδων ανά έτος), (β) της σχετικής περιοχικής κάλυψης (σε % του συνολικού αριθμού κυψελίδων για τις οποίες λειτούργησε ο αλγόριθμος στην περιοχή) και (γ) του φορτίου (οπτικού βάθους) των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος, στην περιοχή του Ινδικού Ωκεανού.

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τη συχνότητα εμφάνισης και το φορτίο των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος στην περιοχή του Ινδικού Ωκεανού. Φαίνεται ότι η παρουσία των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος στον Ινδικό Ωκεανό μειώθηκε κατά την περίοδο των 17 ετών 2005-2021, τόσο ως προς τη συχνότητα εμφάνισής τους όσο και ως προς το φορτίο τους. Το εύρημα αυτό βρίσκεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της γεωγραφικής κατανομής του Σχήματος 3.2β, όπου φαίνεται ότι σε όλες σχεδόν τις κυψελίδες της περιοχής του Ινδικού Ωκεανού βρέθηκε τάση μείωσης της συχνότητας εμφάνισης των θαλάσσιων αερολυμάτων αντίθετα με το φορτίο τους, για το οποίο βρέθηκαν λίγες κυψελίδες με μείωση (Σχήμα 3.3β). Αυτό μπορεί να έχει επιπτώσεις όπως στο σχηματισμό και τις ιδιότητες των νεφών (δεδομένου του σημαντικού ρόλου των αερολυμάτων αυτού του τύπου ως CCN), ή στο ισοζύγιο ακτινοβολίας της περιοχής (δεδομένης της ικανότητας τους να σκεδιάζουν την ηλιακή ακτινοβολία).

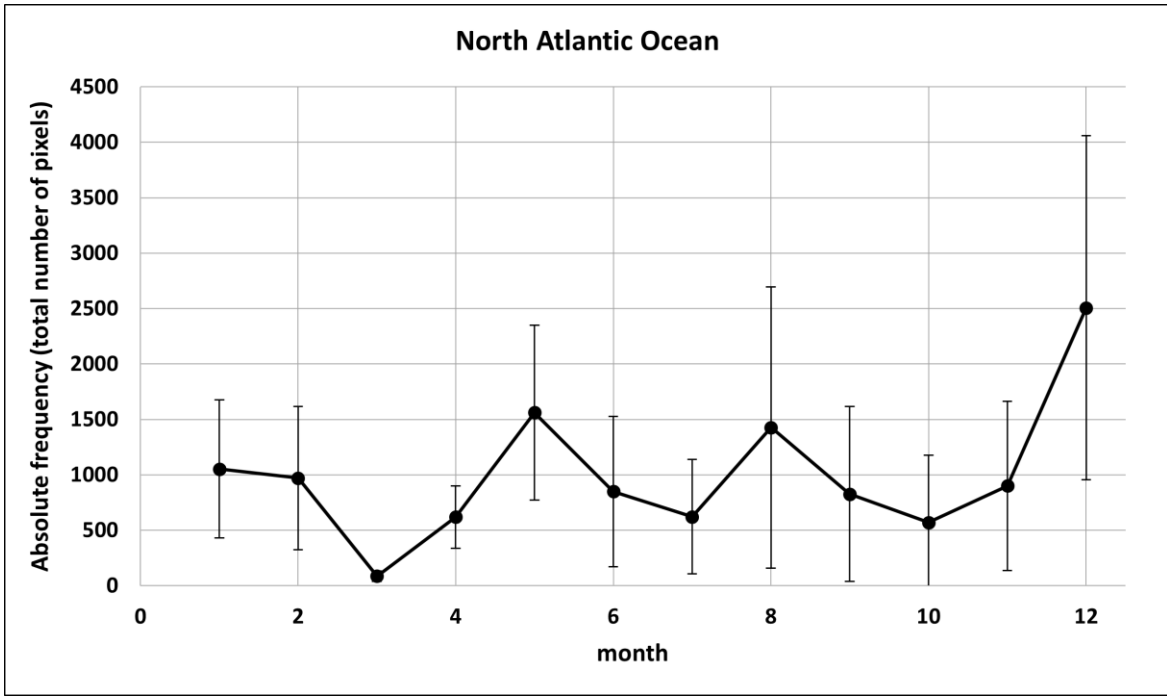
**Πίνακας 3.1.** Μεσοποιημένες κλιματολογικές (για την περίοδο 2005-2021) ετήσιες τιμές της απόλυτης και σχετικής περιοχικής συχνότητας εμφάνισης και του φορτίου (οπτικού βάθους) των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος στην περιοχή του Ινδικού Ωκεανού και γραμμική τάση μεταβολής τους, εκπεφρασμένη σε απόλυτες κι σε επί τοις εκατό (%) σχετικές τιμές, κατά την περίοδο 2005-2021. Τα κελιά με γκρι χρώμα αντιστοιχούν στις περιπτώσεις στις οποίες εκτιμώμενες τάσεις μεταβολής είναι στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (βάσει του t-test).

<b><u>ΙΝΔΙΚΟΣ ΩΚΕΑΝΟΣ</u></b>	<b>Απόλυτη συχνότητα εμφάνισης (αριθμός κυψελίδων)</b>	<b>Σχετική συχνότητα εμφάνισης (%)</b>	<b>Οπτικό βάθος αερολυμάτων θαλασσίου άλατος</b>
<b>Μέση τιμή</b>	546960 ± 148251,5	0,327 ± 0,032	0,033 ± 0,0023
<b>Μεταβολή</b>	-407803,5 ± 74290,5	-0,0556 ± 0,0236	-0,0017 ± 0,0019
<b>Σχετική μεταβολή (%)</b>	<b>-74,6</b>	<b>-17</b>	-5,02

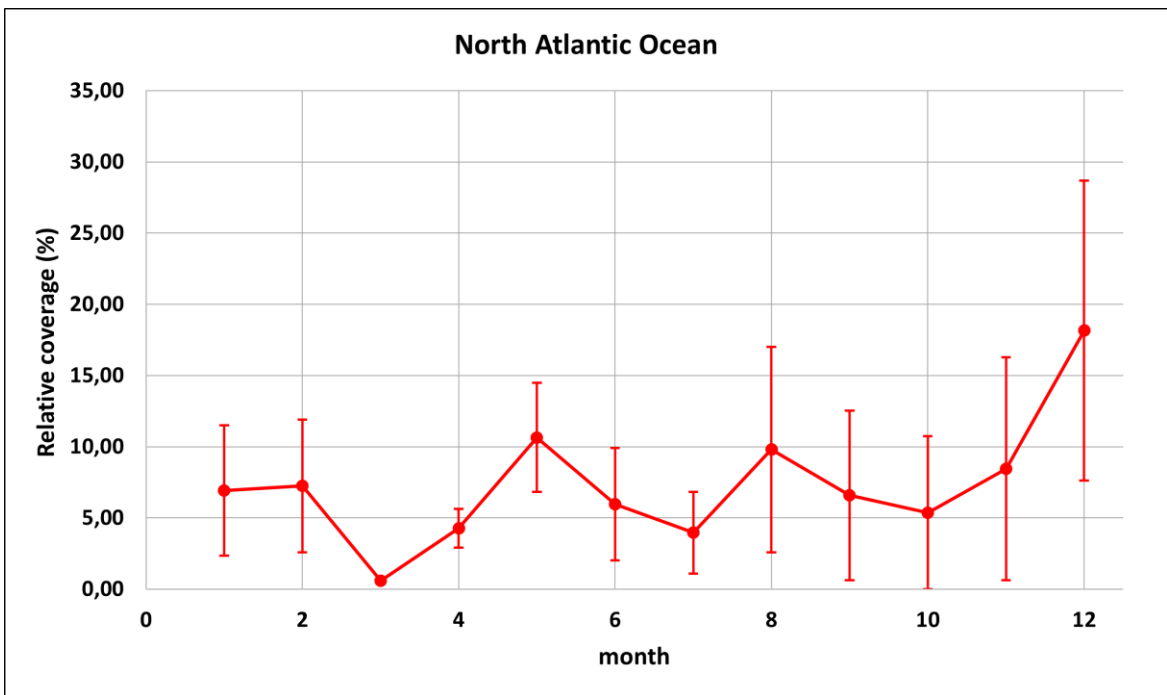
### 3.3.2 Βόρειος Ατλαντικός Ωκεανός

Στο Σχήμα 3.11 παρουσιάζεται η ενδοετήσια μεταβολή των μέσων μηνιαίων περιοχικών τιμών της απόλυτης και σχετικής (ποσοστιαίας επί τοις εκατό και επί του συνόλου της περιοχής) συχνότητας εμφάνισης των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος και του φορτίου (οπτικού βάθους) τους στην περιοχή του Βόρειου Ατλαντικού Ωκεανού. Σύμφωνα με τα Σχήματα 3.11α και 3.11β φαίνεται ότι η απόλυτη συχνότητα και σχετική συχνότητα εμφάνισης εμφανίζουν σχεδόν κοινό ενδοετήσιο κύκλο. Στην περιοχή του Βορείου Ατλαντικού Ωκεανού τα θαλάσσια αερολύματα εμφανίζονται πιο συχνά το Δεκέμβριο (πάνω από 2506 κυψελίδες ή το 18,2% του συνόλου της περιοχής), ενώ δευτερευόντως συχνά εμφανίζονται το Μάιο (σε 1561 κυψελίδες ή το 10,6% του συνόλου της περιοχής). Ένα τρίτο μέγιστο εμφανίζεται για τη σχετική συχνότητα τον Αύγουστο αντιστοιχώντας σε 1426 κυψελίδες ή το 9,8% της περιοχής.

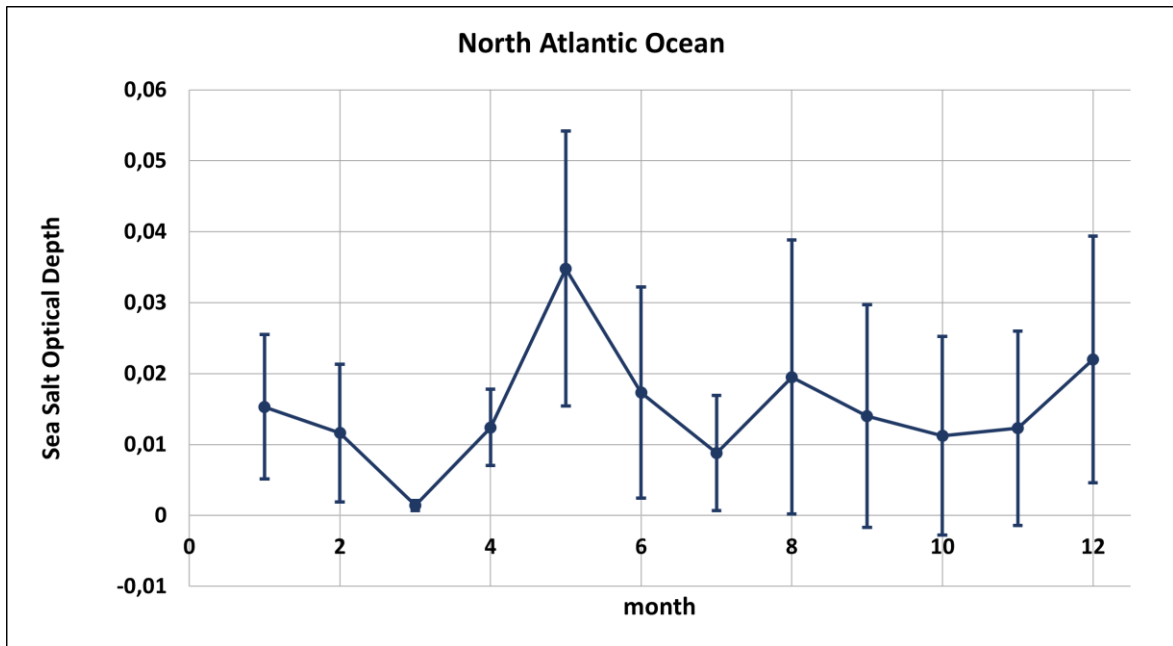
Σχετικά με το φορτίο (οπτικό βάθος) των θαλασσίων αερολυμάτων σε αυτήν την περιοχή, αυτό εμφανίζει τα τρία προαναφερθέντα μηνιαία μέγιστα της συχνότητα εμφάνισης, όμως με διαφορετική σειρά, καθώς το μέγιστο οπτικό βάθος παρατηρείται το Μάιο (ίσο με 0,034), ενώ σχεδόν εξίσου μεγάλα φορτία παρατηρούνται το Δεκέμβριο (ίσο με 0,022) και τον Αύγουστο (ίσο με 0,019). Και σε αυτήν την περιοχή, όπως και στον Ινδικό Ωκεανό, παρατηρούμε ότι όταν εμφανίζονται πιο συχνά τα αερολύματα στην περιοχή, τότε παρατηρούνται και τα μεγαλύτερα φορτία τους.



( $\alpha$ )



( $\beta$ )

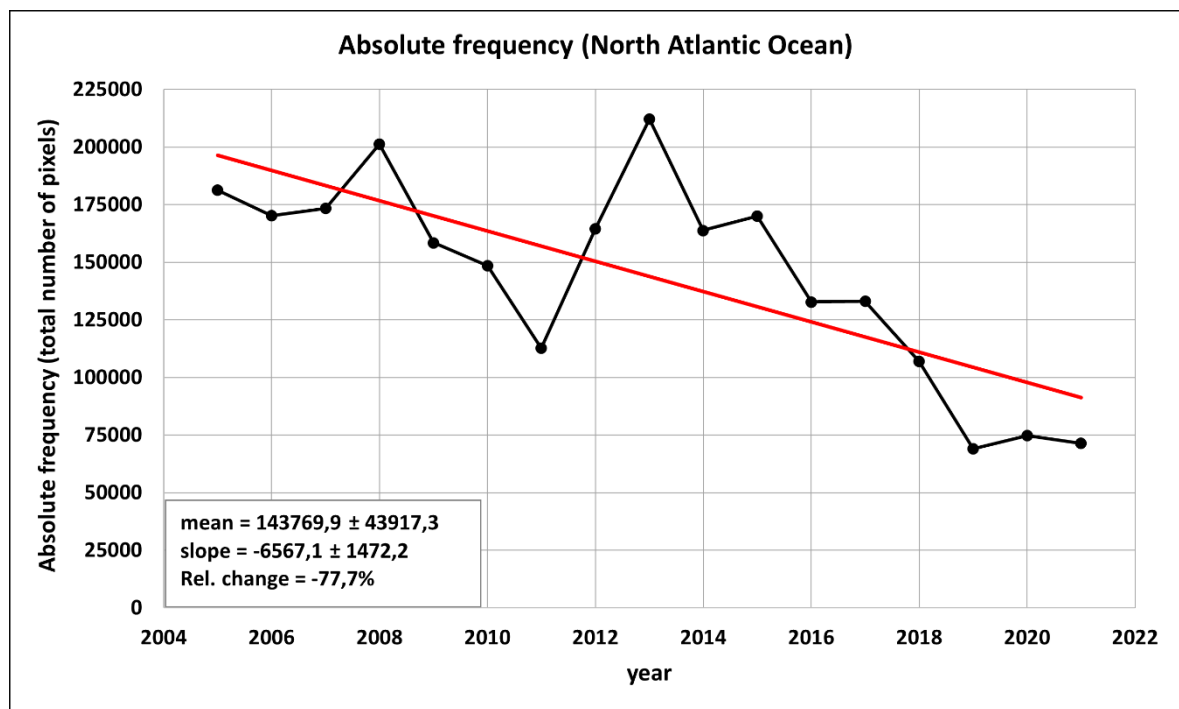


(γ)

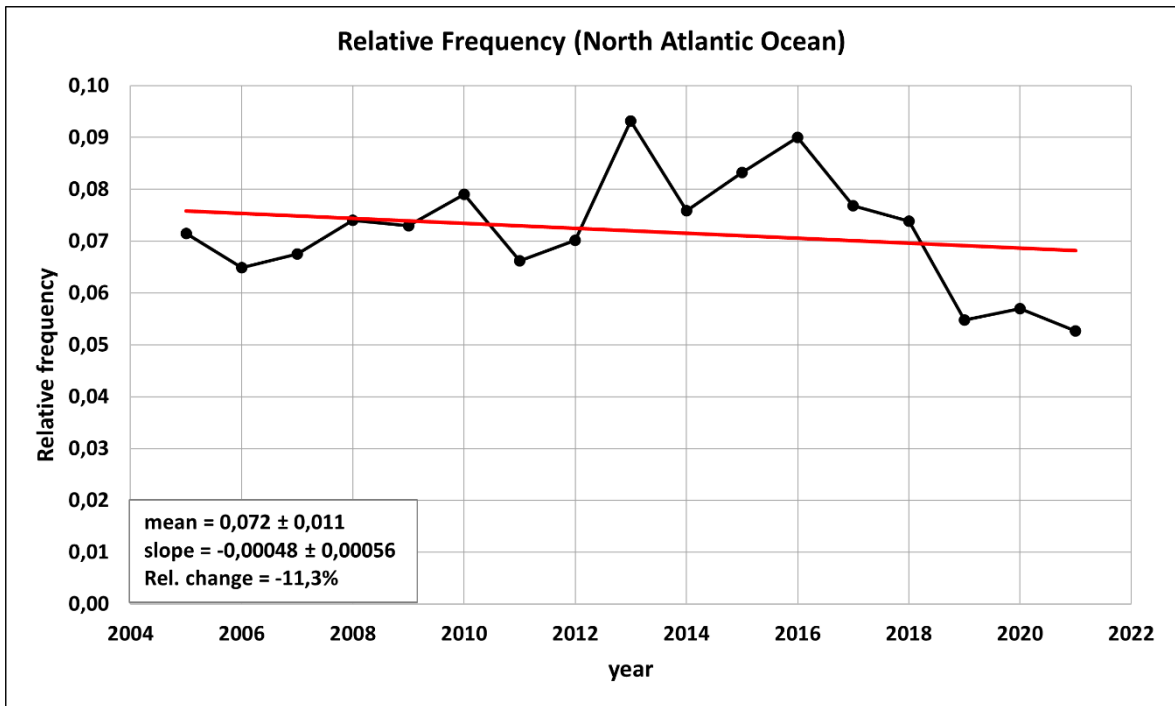
**Σχήμα 3.11.** Ενδοετήσια διακύμανση της μέσης μηνιαίας τιμής και της αντίστοιχης τυπικής απόκλισης: (α) της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης αερολυμάτων θαλασσίου άλατος (του συνολικού αριθμού των  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  κυψελίδων στις οποίες εμφανίστηκαν, μαύρο χρώμα), (β) της αντίστοιχης σχετικής συχνότητας εμφάνισής τους (εκπεφρασμένης σε επί τοις εκατό ποσοστό του συνολικού αριθμού κυψελίδων της περιοχής για τις οποίες λειτούργησε ο αλγόριθμος, κόκκινο χρώμα) και (γ) του φορτίου (οπτικού βάθους). Η μεσοποίηση αναφέρεται στην περιοχή του Βορείου Ατλαντικού Ωκεανού και την περίοδο 2005-2021.

Στο Σχήμα 3.12 παρουσιάζονται οι διαχρονικές μεταβολές των ετησίων τιμών της συχνότητας εμφάνισης (απόλυτης και σχετικής) και του φορτίου (οπτικού βάθους) των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος στην περιοχή του Βορείου Ατλαντικού Ωκεανού, μεσοποιημένα για την περίοδο 2005-2021 και την περιοχή του Βορείου Ατλαντικού Ωκεανού. Σύμφωνα με το Σχήμα 3.12α φαίνεται ότι ετησίως παρατηρούνται αυτά τα αερολύματα σε 70.000-200.000 κυψελίδες (ή κατά μέσον όρο σε 144.000 κυψελίδες), με ένα σχετικά μεγάλο εύρος διακύμανσης της απόλυτης συχνότητας εμφάνισής τους (130.000 κυψελίδες ή 90,3% της μέσης τιμής). Δεν παρατηρείται κάποια περιοδικότητα στην απόλυτη συχνότητα εμφάνισης, ενώ υπάρχουν έτη με ευδιάκριτα μεγάλες (2008, 2013) και μικρές (2011, 2019) συχνότητες εμφάνισης. Διακρίνεται μία γραμμική τάση μείωσης της απόλυτης συχνότητας κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης, ίση με 77,7%, η οποία είναι στατιστικά σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 95%, οι τιμές των οποίων απεικονίζονται και στο Σχήμα 3.12α. Η από έτος σε έτος μεταβολή της σχετικής συχνότητας εμφάνισης των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος στον Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό (Σχήμα 3.12β) εμφανίζει αρκετά όμοια χαρακτηριστικά με εκείνη της απόλυτης συχνότητας. Για παράδειγμα,

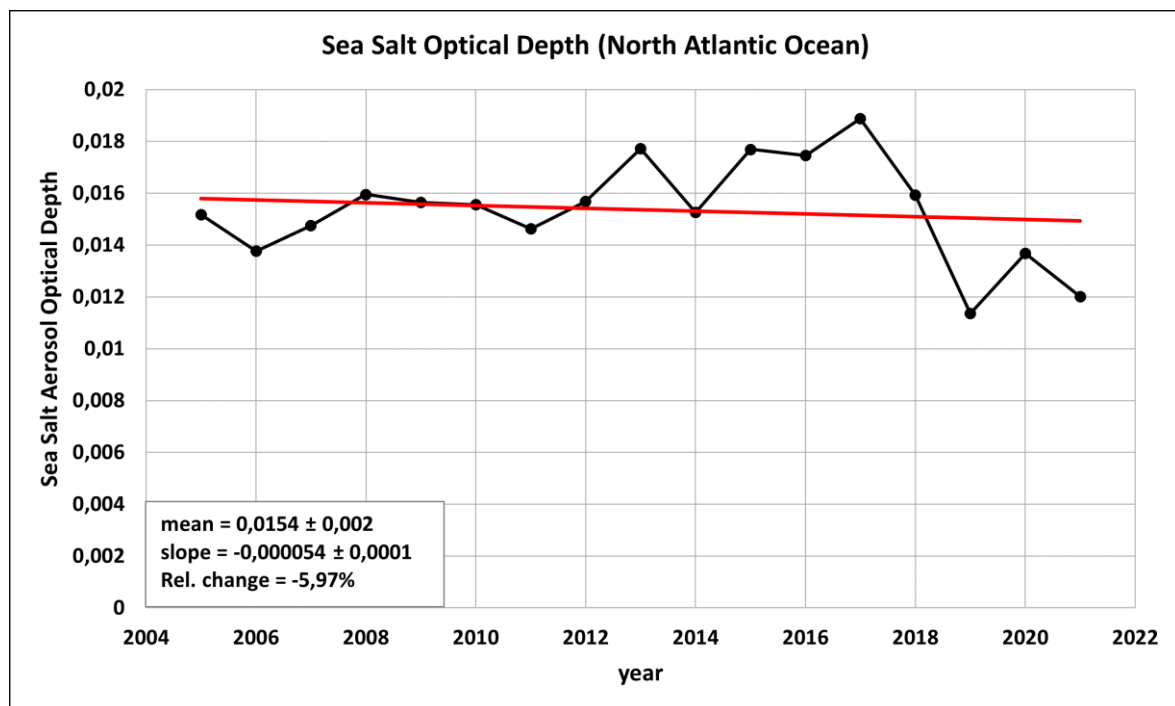
μέγιστες σχετικές συχνότητες εμφάνισης παρατηρούνται στα ίδια έτη (με μέγιστες καλύψεις της περιοχής του Βορείου Ατλαντικού Ωκεανού ίσες με 9,5% το 2013 και ελάχιστες ίσες με 5,5% το 2019), ενώ παρατηρείται επίσης γραμμική τάση μείωσης, όμως μικρότερη και ίση με 11,3% (μη στατιστικά σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 95%). Τέλος, η διαχρονική μεταβολή του οπτικού βάθους των θαλασσίων αερολυμάτων στον Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό (Σχήμα 3.12γ) εμφανίζει ασθενή διαχρονική μεταβλητότητα, με τα ετήσια μέγιστα και ελάχιστα να διακρίνονται με δυσκολία στη χρονοσειρά, με ένα σχετικά μικρό εύρος διακύμανσης των τιμών (από 0,0014 έως 0,034). Παράλληλα, διακρίνεται μία μικρή και μη στατιστικά σημαντική (σε επίπεδο σημαντικότητας 95%) τάση μείωσης του φορτίου των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος στον Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό, ίση με 5,97%.



(α)



(β)



(γ)

**Σχήμα 3.12.** Διαχρονική μεταβολή (2005-2021) και γραμμική τάση μεταβολής των μέσων ετησίων περιοχικών τιμών: (α) της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης (σε αριθμό κυψελίδων ανά έτος), (β) της σχετικής περιοχικής κάλυψης (σε % του συνολικού αριθμού κυψελίδων για τις οποίες λειτούργησε ο αλγόριθμος στην περιοχή), και (γ) του φορτίου (οπτικού βάθους) των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος, στην περιοχή του Βόρειου Ατλαντικού Ωκεανού.

Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τη συχνότητα εμφάνισης και το φορτίο των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος στην περιοχή του Βορείου Ατλαντικού Ωκεανού. Φαίνεται ότι η παρουσία των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος στον Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό μειώθηκε κατά την περίοδο των 17 ετών 2005-2021, τόσο ως προς τη συχνότητα εμφάνισής τους όσο και ως προς το φορτίο τους. Το εύρημα αυτό βρίσκεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της γεωγραφικής κατανομής του Σχήματος 3.2β, όπου φαίνεται ότι σε όλες σχεδόν τις κυψελίδες της περιοχής του Βορείου Ατλαντικού Ωκεανού βρέθηκε τάση μείωσης της συχνότητας εμφάνισης των θαλάσσιων αερολυμάτων αντίθετα με το φορτίο τους, για το οποίο βρέθηκαν λίγες κυψελίδες με μείωση (Σχήμα 3.3β).

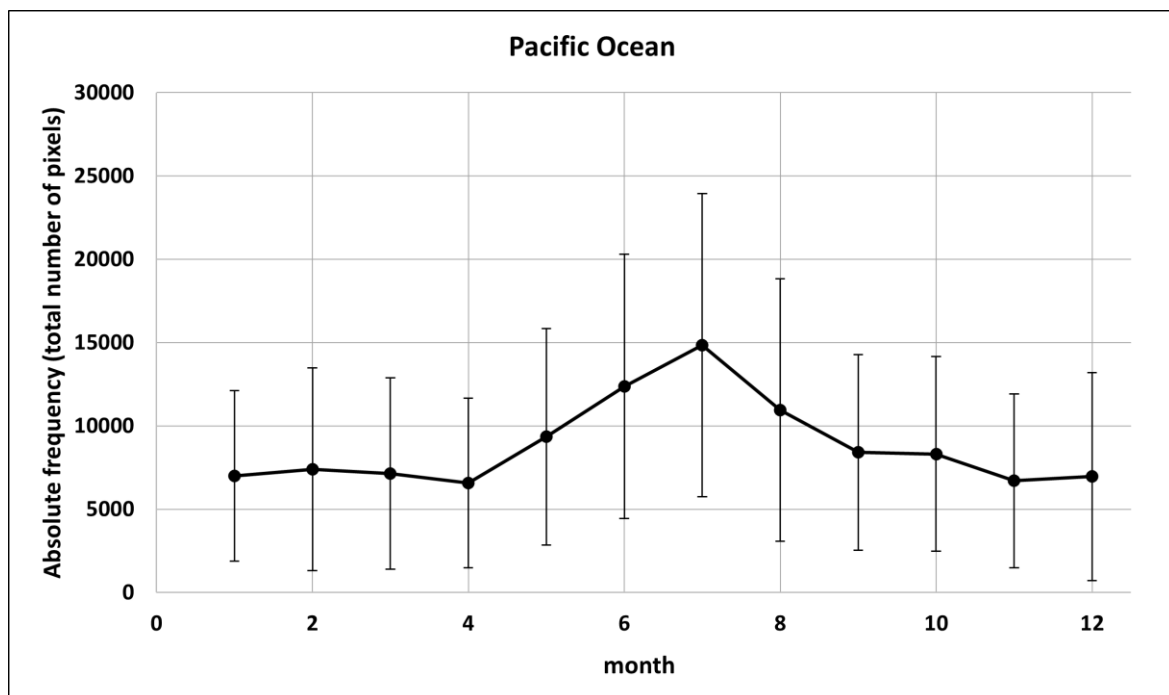
**Πίνακας 3.2.** Μεσοποιημένες κλιματολογικές (για την περίοδο 2005-2021) ετήσιες τιμές της απόλυτης και σχετικής περιοχικής συχνότητας εμφάνισης και του φορτίου (οπτικού βάθους) των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος στην περιοχή του Βορείου Ατλαντικού Ωκεανού και γραμμική τάση μεταβολής τους εκπεφρασμένη σε απόλυτες και σε επί τοις εκατό (%) σχετικές τιμές, κατά την περίοδο 2005-2021. Τα κελιά με γκρι χρώμα αντιστοιχούν στις περιπτώσεις στις οποίες εκτιμώμενες τάσεις μεταβολής είναι στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (βάσει του t-test).

<b><u>ΒΟΡΕΙΟΣ ΑΤΛΑΝΤΙΚΟΣ ΩΚΕΑΝΟΣ</u></b>	<b>Απόλυτη συχνότητα εμφάνισης (αριθμός κυψελίδων)</b>	<b>Σχετική συχνότητα εμφάνισης (%)</b>	<b>Οπτικό βάθος αερολυμάτων θαλασσίου άλατος</b>
<b>Μέση τιμή</b>	143769,9 ± 43917,3	0,072 ± 0,011	0,0154 ± 0,002
<b>Μεταβολή</b>	-111640,5 ± 25027,1	-0,0081 ± 0,0095	-0,0009 ± 0,00017
<b>Σχετική μεταβολή (%)</b>	<b>-77,7</b>	-11,3	-5,97

### 3.3.3 Ειρηνικός Ωκεανός

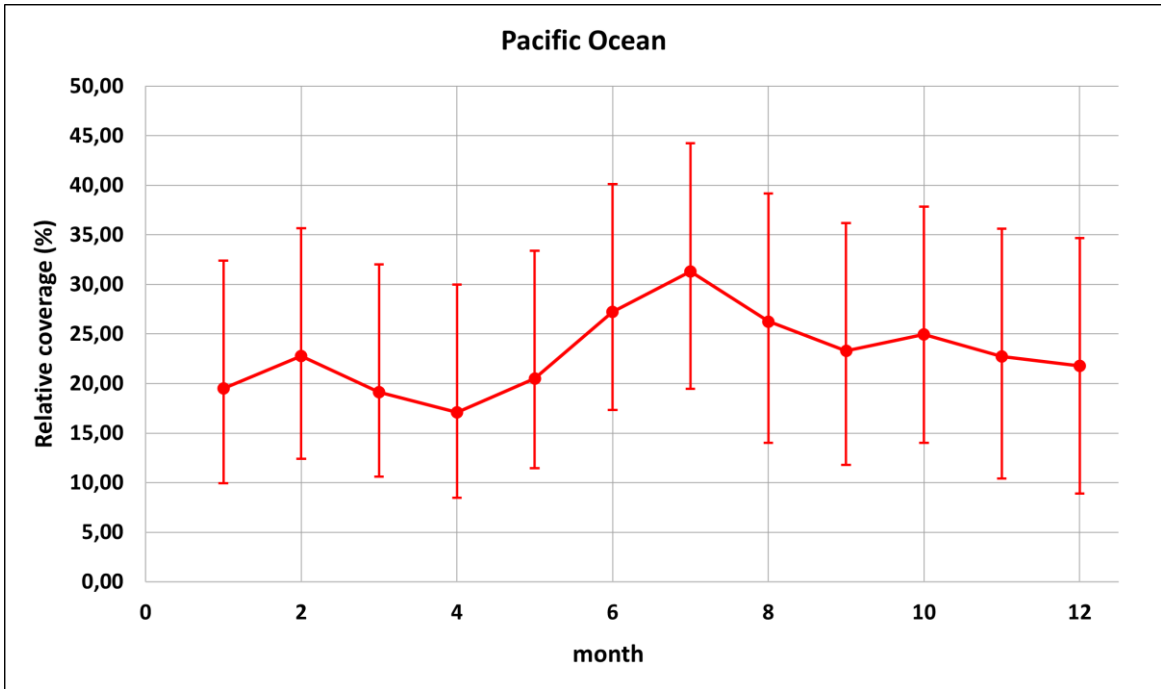
Στο Σχήμα 3.13 παρουσιάζονται και για αυτή την περιοχή η ενδοετήσια μεταβολή των μέσων μηνιαίων περιοχικών τιμών της απόλυτης και σχετικής (ποσοστιαίας επί τοις εκατό και επί του συνόλου της περιοχής) συχνότητας εμφάνισης των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος και του φορτίου (οπτικού βάθους) τους. Σύμφωνα με τα Σχήματα 3.13α και 3.13β φαίνεται ότι η απόλυτη και σχετική συχνότητα εμφάνισης παρουσιάζουν σχεδόν κοινό ενδοετήσιο κύκλο. Στην περιοχή του Ειρηνικού Ωκεανού τα θαλάσσια αερολύματα εμφανίζονται πιο συχνά τον Ιούλιο (πάνω από 14838 κυψελίδες ή το 27,6% του συνόλου

της περιοχής), ενώ δευτερευόντως συχνά εμφανίζονται τον Οκτώβριο (σε 8317 κυψελίδες ή το 21,7% του συνόλου της περιοχής). Ένα τρίτο μέγιστο εμφανίζεται για τη σχετική συχνότητα το Φεβρουάριο αντιστοιχώντας σε 7399 κυψελίδες ή το 21,02% της περιοχής. Αντίστοιχα, η απόλυτη συχνότητα εμφάνισης των θαλάσσιων αερολυμάτων, στη συγκεκριμένη περιοχή, δεν εμφανίζει τα ίδια μέγιστα με τη σχετική συχνότητα εμφάνισης, καθώς διακρίνεται μόνο ένα μέγιστο τον Ιούλιο (πάνω από 14838 κυψελίδες). Όσον αφορά στο φορτίο (οπτικό βάθος) των θαλασσίων αερολυμάτων στην περιοχή του Ειρηνικού Ωκεανού, αυτό εμφανίζει τα δυο ελαφρά μηνιαία μέγιστα, με το μέγιστο οπτικό βάθος να παρατηρείται τον Ιούλιο (ίσο με 0.0306), ενώ εξίσου μεγάλα φορτία παρατηρούνται το Φεβρουάριο (ίσο με 0,0303). Και σε αυτή την περιοχή, όπως και στις δύο προηγούμενες, όταν εμφανίζονται πιο συχνά τα αερολύματα στην περιοχή του Ειρηνικού Ωκεανού, τότε παρατηρούνται και τα μεγαλύτερα φορτία τους.

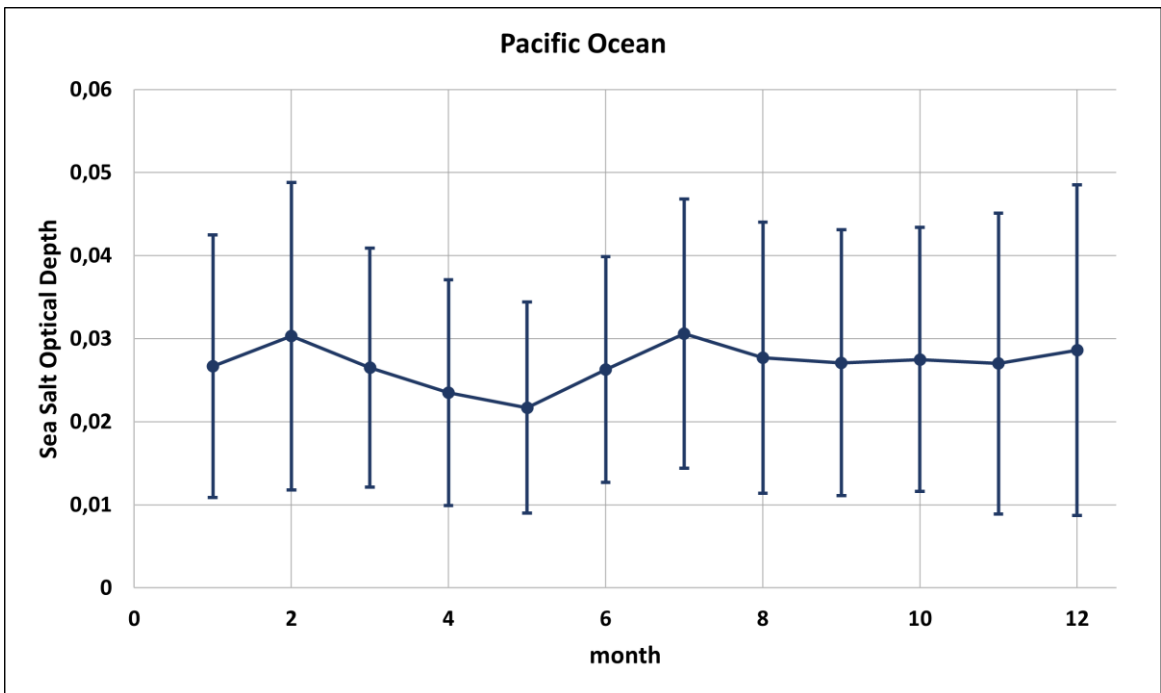


(α)





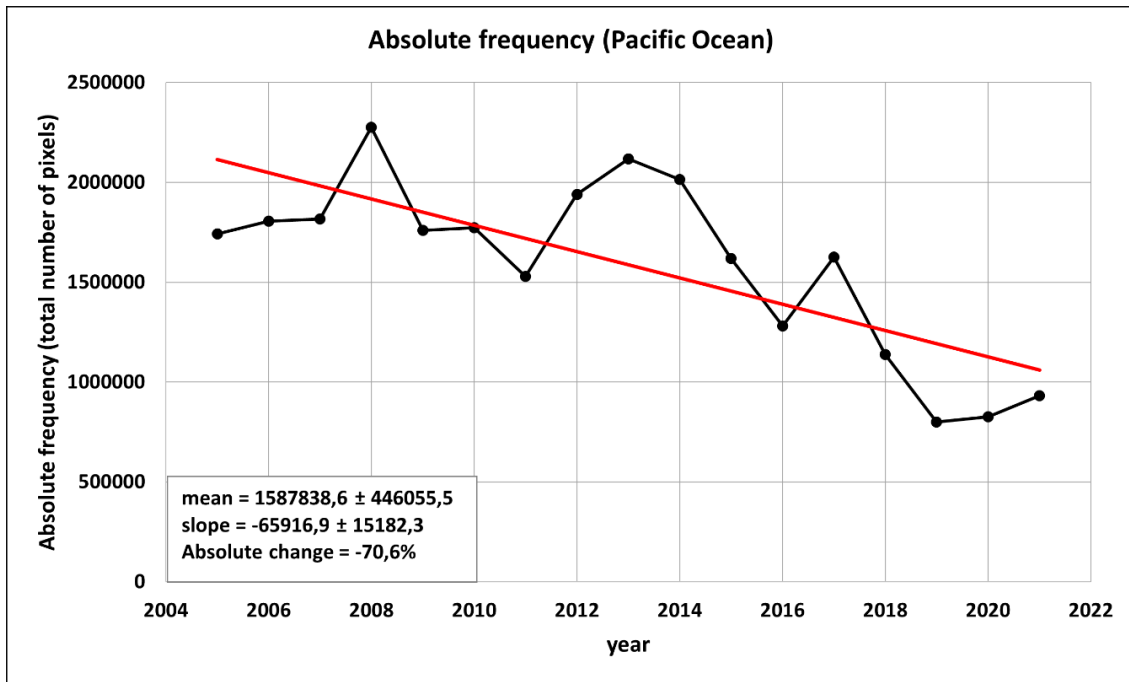
(β)



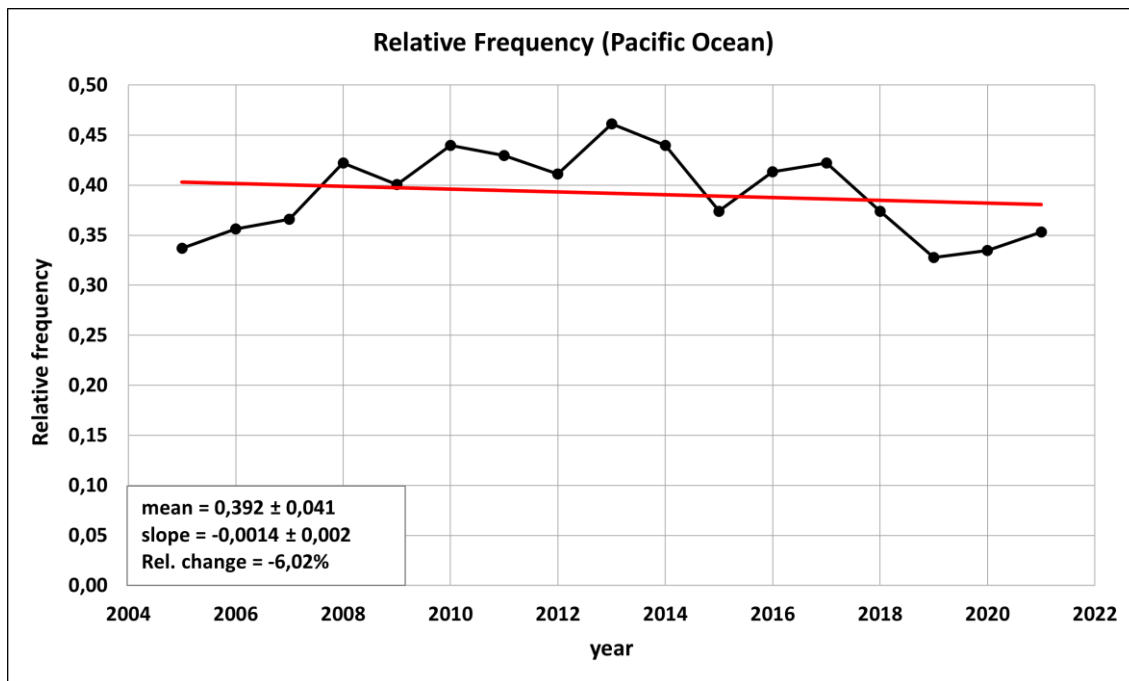
(γ)

**Σχήμα 3.13.** Ενδοετήσια διακύμανση της μέσης μηνιαίας τιμής και της αντίστοιχης τυπικής απόκλισης: (α) της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης αερολυμάτων θαλασσίου άλατος (του συνολικού αριθμού των  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$  κυψελίδων στις οποίες εμφανίστηκαν, μαύρο χρώμα), (β) της αντίστοιχης σχετικής συχνότητας εμφάνισής τους (εκπεφρασμένης σε επί τοις εκατό ποσοστό του συνολικού αριθμού κυψελίδων της περιοχής για τις οποίες λειτούργησε ο αλγόριθμος, κόκκινο χρώμα), και (γ) του φορτίου (οπτικού βάθους). Η μεσοποίηση αναφέρεται στην περιοχή του Ειρηνικού Ωκεανού και την περίοδο 2005-2021.

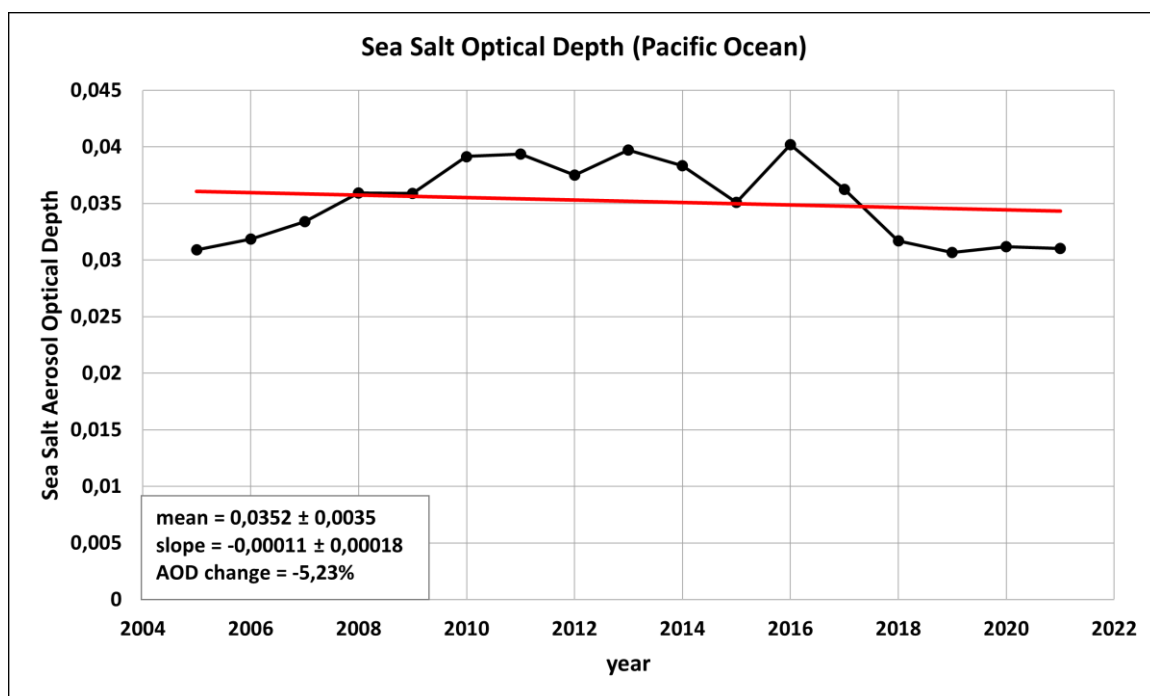
Στη συνέχεια, στο Σχήμα 3.14 παρουσιάζονται οι διαχρονικές μεταβολές των ετησίων τιμών της συχνότητας εμφάνισης (απόλυτης και σχετικής) και του φορτίου (οπτικού βάθους) των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος στην περιοχή του Ειρηνικού Ωκεανού. Τα αποτελέσματα είναι μεσοποιημένα για την περίοδο 2005-2021 και την περιοχή του Ειρηνικού Ωκεανού. Σύμφωνα με το Σχήμα 3.14α φαίνεται ότι ετησίως παρατηρούνται θαλάσσια αερολύματα σε 800.000-2.300.000 κυψελίδες (ή κατά μέσον όρο σε 1.587.838 κυψελίδες), με ένα σχετικά μεγάλο εύρος διακύμανσης της απόλυτης συχνότητας εμφάνισής τους (1.500.000 κυψελίδες ή 94,5% της μέσης τιμής). Δεν παρατηρείται κάποια περιοδικότητα στην απόλυτη συχνότητα εμφάνισης, ενώ υπάρχουν και έτη με ευδιάκριτα μεγάλες (2008, 2013, 2017) και μικρές συχνότητες εμφάνισης (2019). Διακρίνεται μία γραμμική τάση μείωσης της απόλυτης συχνότητας κατά την διάρκεια της περιόδου μελέτης (2005-2021), ίση με 70,6%, η οποία είναι στατιστικά σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 95%. Η από έτος σε έτος μεταβολή της σχετικής συχνότητας εμφάνισης των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος στον Ειρηνικό Ωκεανό (Σχήμα 3.14β) εμφανίζει όμοια χαρακτηριστικά με την αντίστοιχη μεταβολή της απόλυτης συχνότητας. Για παράδειγμα, μέγιστες και ελάχιστες τιμές της σχετικής συχνότητας εμφάνισης παρατηρούνται στα ίδια έτη (με μέγιστες καλύψεις της περιοχής του Ειρηνικού Ωκεανού ίσες με 32,5% το 2013 και ελάχιστες ίσες με 23,3% το 2019), ενώ παρατηρείται επίσης γραμμική τάση μείωσης, αρκετά μικρότερη και ίση με 6,02% (μη στατιστικά σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 95%). Τέλος, η διαχρονική μεταβολή του οπτικού βάθους των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος στον Ειρηνικό Ωκεανό (Σχήμα 3.14γ) εμφανίζει ασθενή διαχρονική μεταβλητότητα, με τα ετήσια μέγιστα και ελάχιστα να διακρίνονται με δυσκολία στη χρονοσειρά, με ένα σχετικά μικρό εύρος διακύμανσης των τιμών (από 0,031 έως 0,040). Επίσης, παρατηρείται και μία μικρή τάση μείωσης του φορτίου των αερολυμάτων, ίση με 5,23% (μη στατιστικά σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 95%).



( $\alpha$ )



( $\beta$ )



(γ)

**Σχήμα 3.14.** Διαχρονική μεταβολή (2005-2021) και γραμμική τάση μεταβολής των μέσων ετησίων περιοχικών τιμών: (α) της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης (σε αριθμό κυψελίδων ανά έτος), (β) της σχετικής περιοχικής κάλυψης (σε % του συνολικού αριθμού κυψελίδων για τις οποίες λειτούργησε ο αλγόριθμος στην περιοχή) και (γ) του φορτίου (οπτικού βάθους) των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος, στην περιοχή του Ειρηνικού Ωκεανού.

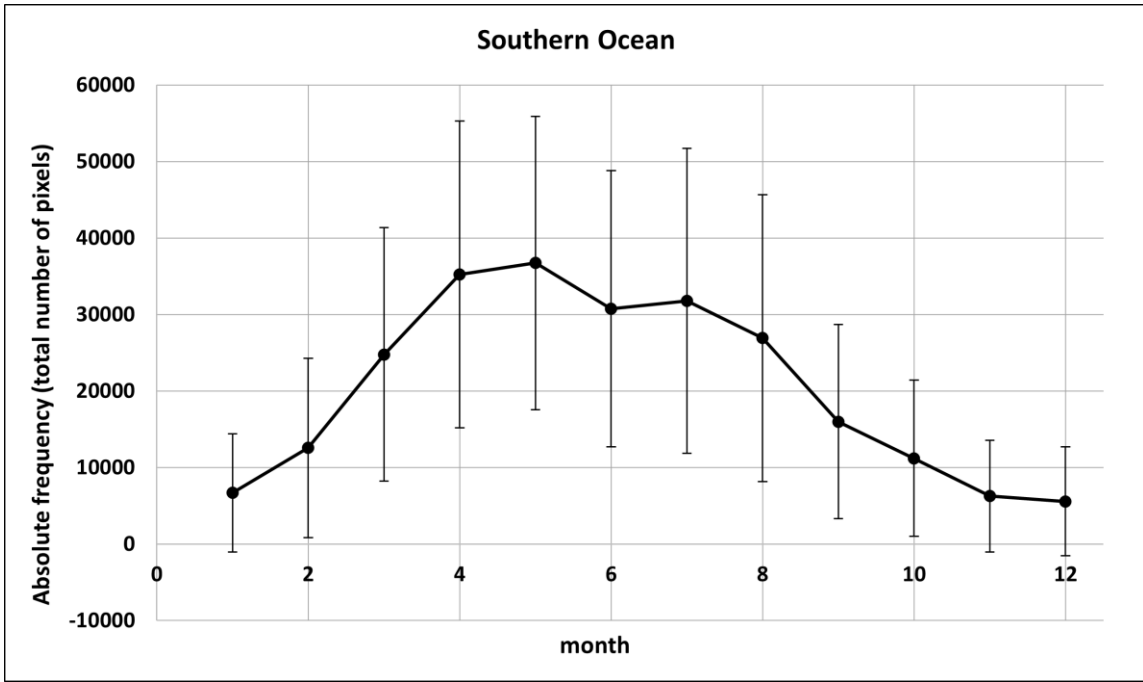
Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τη συχνότητα εμφάνισης και το φορτίο των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος στην περιοχή του Ειρηνικού Ωκεανού. Φαίνεται ότι η παρουσία των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος στον Ειρηνικό Ωκεανό εξασθένησε κατά την περίοδο των 17 ετών 2005-2021, τόσο ως προς τη συχνότητα εμφάνισής τους όσο και ως προς το φορτίο τους. Το εύρημα αυτό βρίσκεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της γεωγραφικής κατανομής του Σχήματος 3.2β, όπου φαίνεται ότι σε όλες σχεδόν τις κυψελίδες της περιοχής του Ειρηνικού Ωκεανού βρέθηκε τάση μείωσης της συχνότητας εμφάνισης των θαλάσσιων αερολυμάτων αντίθετα με το φορτίο τους, για το οποίο βρέθηκαν λίγες κυψελίδες με μείωση (Σχήμα 3.3β).

**Πίνακας 3.3.** Μεσοποιημένες κλιματολογικές (για την περίοδο 2005-2021) ετήσιες τιμές της απόλυτης και σχετικής περιοχικής συχνότητας εμφάνισης και του φορτίου (οπτικού βάθους) των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος στην περιοχή του Ειρηνικού Ωκεανού και γραμμική τάση μεταβολής τους, εκπεφρασμένη σε απόλυτες και σε επί τοις εκατό (%) σχετικές τιμές, κατά την περίοδο 2005-2021. Τα κελιά με γκρι χρώμα αντιστοιχούν στις περιπτώσεις στις οποίες εκτιμώμενες τάσεις μεταβολής είναι στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (βάσει του t-test).

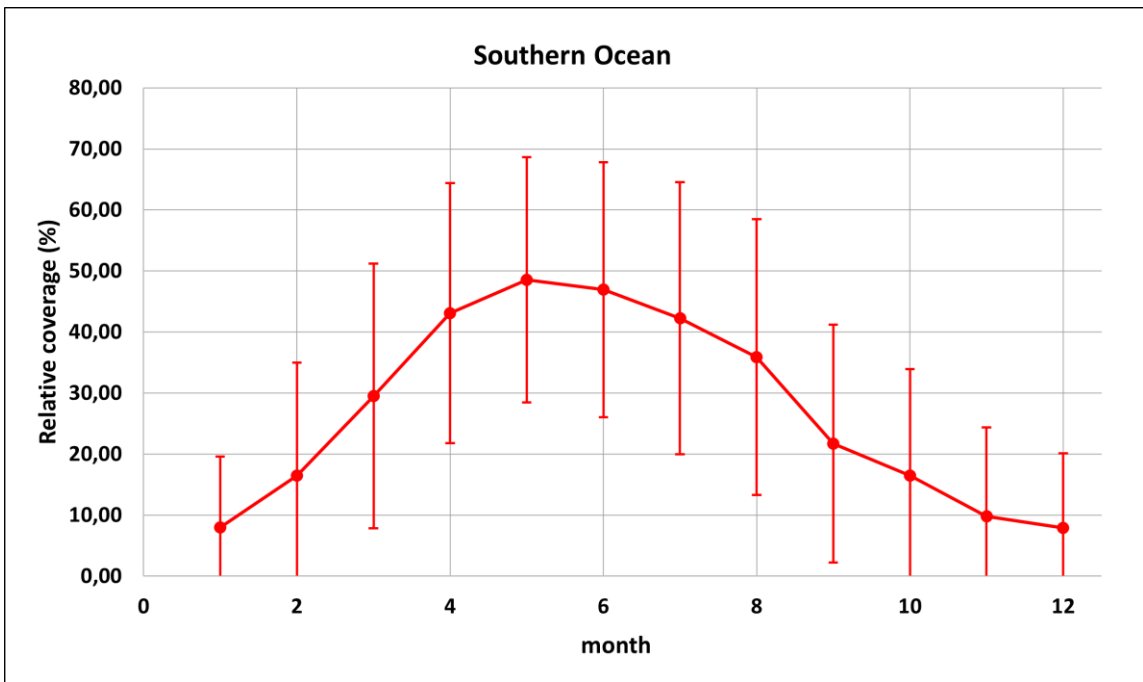
<b><u>ΕΙΡΗΝΙΚΟΣ ΩΚΕΑΝΟΣ</u></b>	<b>Απόλυτη συχνότητα εμφάνισης (αριθμός κυψελίδων)</b>	<b>Σχετική συχνότητα εμφάνισης (%)</b>	<b>Οπτικό βάθος αερολυμάτων θαλασσίου άλατος</b>
<b>Μέση τιμή</b>	1587838,6 ± 446055,5	0,392 ± 0,041	0,035 ± 0,0035
<b>Μεταβολή</b>	-1120588 ± 258098,8	-0,024 ± 0,036	-0,0018 ± 0,0029
<b>Σχετική μεταβολή (%)</b>	<b>-70,6</b>	-6,02	-5,23

### 3.3.4 Νότιος Ωκεανός

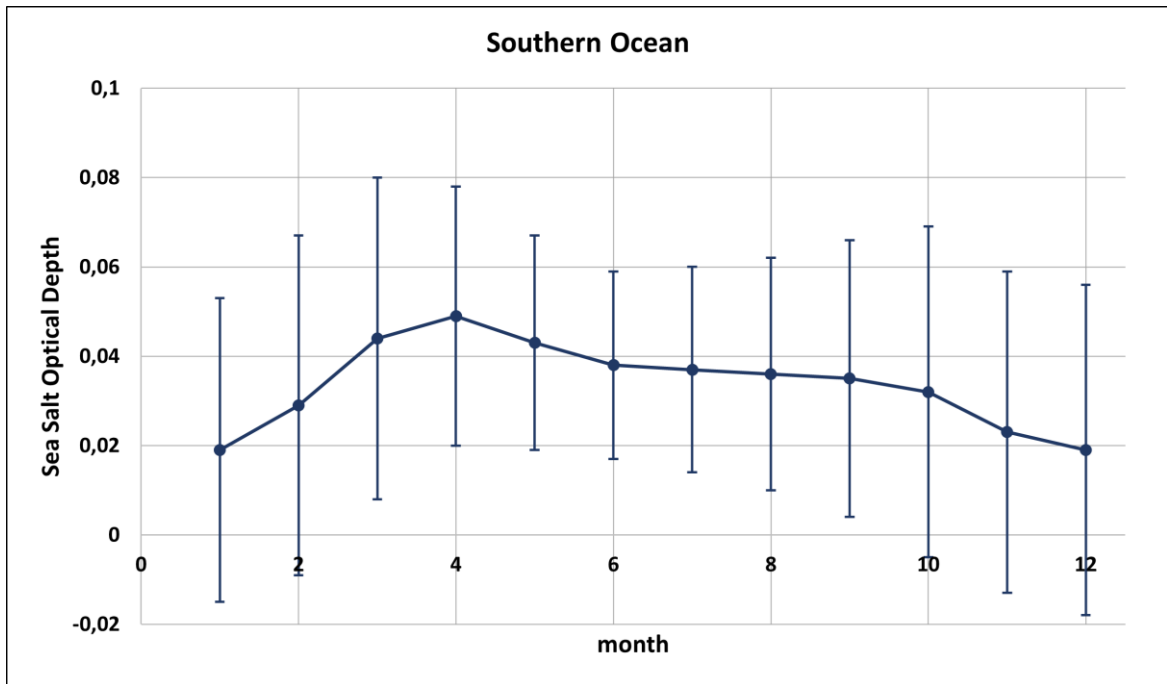
Στο Σχήμα 3.15 παρουσιάζονται για την περιοχή του Νότιου Ωκεανού η ενδοετήσια μεταβολή των μέσων μηνιαίων περιοχικών τιμών της απόλυτης και σχετικής (ποσοστιαίας επί τοις εκατό και επί του συνόλου της περιοχής) συχνότητας εμφάνισης των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος και του φορτίου (οπτικού βάθους) τους. Σύμφωνα με τα Σχήματα 3.15α και 3.15β φαίνεται ότι η απόλυτη και σχετική συχνότητα εμφάνισης παρουσιάζουν σχεδόν κοινό ενδοετήσιο κύκλο. Στην περιοχή του Νότιου Ωκεανού τα θαλάσσια αερολύματα φαίνεται ότι τα θαλάσσια αερολύματα εμφανίζονται πιο συχνά το Μάιο (πάνω από 36724 κυψελίδες ή το 60,4% του συνόλου της περιοχής), ενώ δευτερευόντως συχνά εμφανίζονται τον Απρίλιο (σε 35239 κυψελίδες ή το 54,3% του συνόλου της περιοχής), τον Ιούνιο (σε 30760 κυψελίδες ή το 56,6% του συνόλου της περιοχής) και τον Ιούλιο (σε 31803 κυψελίδες ή το 52,3% του συνόλου της περιοχής). Αντίστοιχα, η απόλυτη συχνότητα εμφάνισης των θαλάσσιων αερολυμάτων, στη συγκεκριμένη περιοχή, εμφανίζει τις μέγιστες τιμές την ίδια περίοδο με τη σχετική συχνότητα εμφάνισης, με ξεκάθαρο μέγιστο το Μάιο (πάνω από 36724 κυψελίδες). Όσον αφορά το φορτίο (οπτικό βάθος) των θαλασσίων αερολυμάτων στην περιοχή του Νότιου Ωκεανού, η μέγιστη τιμή του εμφανίζεται τον Απρίλιο (ίσο με 0,049).



( $\alpha$ )



( $\beta$ )

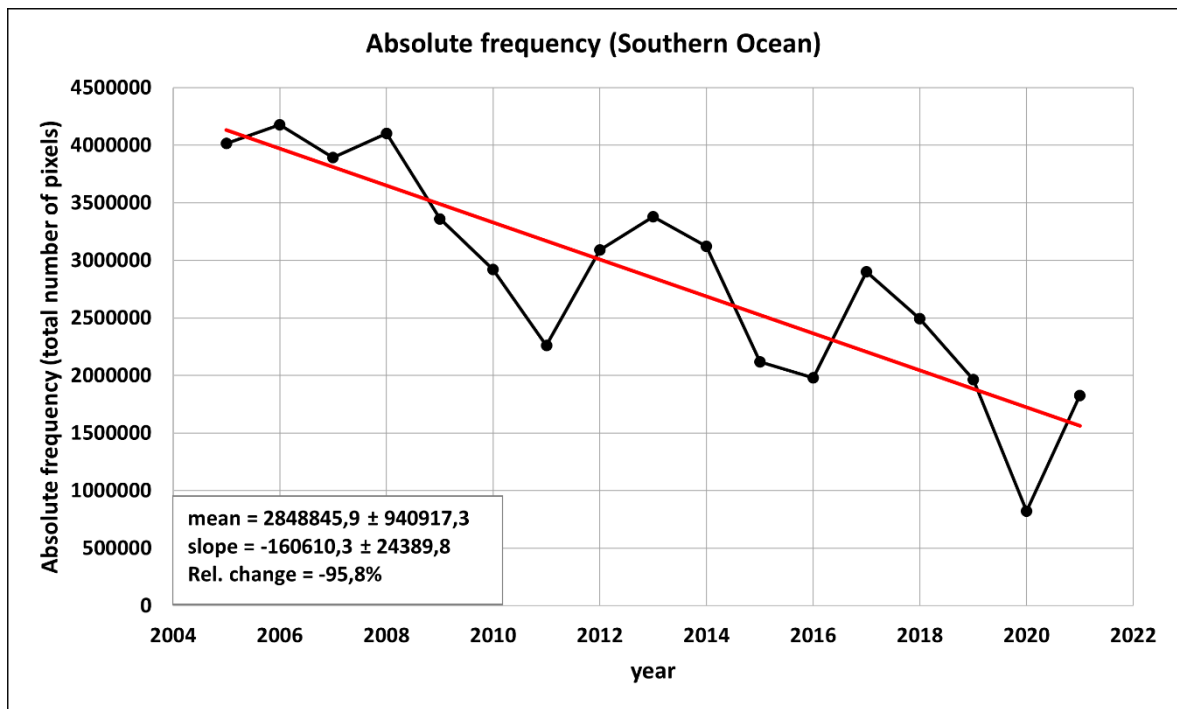


(γ)

**Σχήμα 3.15.** Ενδοετήσια διακύμανση της μέσης μηνιαίας τιμής και της αντίστοιχης τυπικής απόκλισης: (α) της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης αερολυμάτων θαλασσίου άλατος (του συνολικού αριθμού των 1°x1° κυψελίδων στις οποίες εμφανίστηκαν, μαύρο χρώμα), (β) της αντίστοιχης σχετικής συχνότητας εμφάνισής τους (εκπεφρασμένης σε επί τοις εκατό ποσοστό του συνολικού αριθμού κυψελίδων της περιοχής για τις οποίες λειτούργησε ο αλγόριθμος, κόκκινο χρώμα) και (γ) του φορτίου (οπτικού βάθους). Η μεσοποίηση αναφέρεται στην περιοχή του Νότιου Ωκεανού και την περίοδο μελέτης 2005-2021.

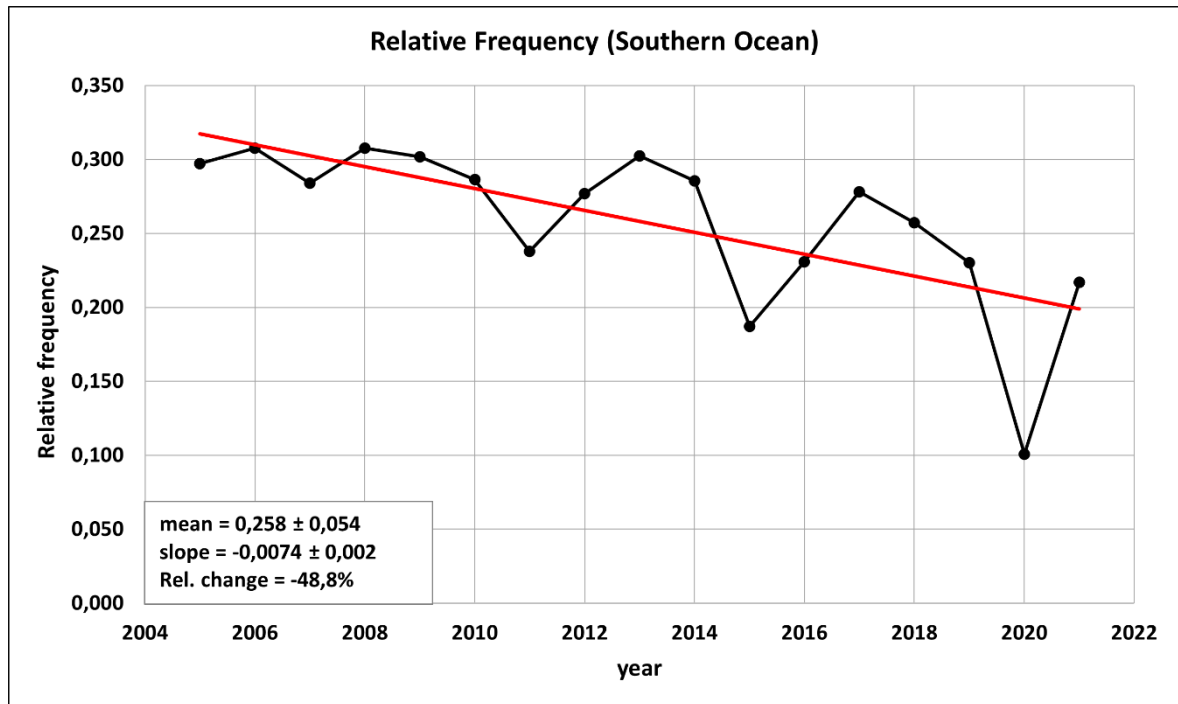
Στη συνέχεια, στο Σχήμα 3.16 παρουσιάζονται οι διαχρονικές μεταβολές των ετησίων τιμών της συχνότητας εμφάνισης (απόλυτης και σχετικής) και του φορτίου (οπτικού βάθους) των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος στην περιοχή του Νότιου Ωκεανού. Τα αποτελέσματα είναι μεσοποιημένα για την περίοδο 2005-2021 και την περιοχή του Νότιου Ωκεανού. Σύμφωνα με το Σχήμα 3.16α φαίνεται ότι ετησίως παρατηρούνται θαλάσσια αερολύματα σε 823.000-4.180.000 κυψελίδες (ή κατά μέσον όρο σε 2.850.000 κυψελίδες), με ένα μεγάλο εύρος διακύμανσης (3.360.000 κυψελίδες ή 117% της μέσης τιμής). Δεν παρατηρείται κάποια περιοδικότητα στην απόλυτη συχνότητα εμφάνισης, ενώ υπάρχουν έτη με ευδιάκριτα μεγάλες (2006, 2013, 2017) και μικρές (2020) συχνότητες εμφάνισης. Διακρίνεται μία γραμμική τάση μείωσης της απόλυτης συχνότητας κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης, ίση με 95,8%, η οποία είναι στατιστικά σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 95% σύμφωνα με το t-test, αλλά και τη σύγκριση μεταξύ της κλίσης (slope) και του αντίστοιχου σφάλματός της (slope error) της. Η διαχρονική μεταβολή της σχετικής συχνότητας (Σχήμα 3.16β) εμφανίζει όμοια χαρακτηριστικά με την αντίστοιχη μεταβολή

της απόλυτης συχνότητας. Για παράδειγμα, μέγιστες και ελάχιστες τιμές της σχετικής συχνότητας εμφάνισης παρατηρούνται στα ίδια έτη (με μέγιστες καλύψεις της περιοχής του Νότιου Ωκεανού ίσες με 36% το 2013 και ελάχιστες ίσες με 26,3% το 2019), ενώ παρατηρείται επίσης γραμμική τάση μείωσης, αρκετά μικρότερη και ίση με 48,8% (στατιστικά σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 95%). Τέλος, η διαχρονική μεταβολή του οπτικού βάθους των θαλάσσιων αερολυμάτων στον Νότιο Ωκεανό (Σχήμα 3.16γ) εμφανίζει ασθενή διαχρονική μεταβλητότητα, με τα ετήσια μέγιστα και ελάχιστα να διακρίνονται με δυσκολία στη χρονοσειρά, με ένα σχετικά μικρό εύρος διακύμανσης (από 0.018 έως 0.037). Επίσης, παρατηρείται και μία μικρή τάσης μείωσης του οπτικού βάθους των αερολυμάτων, ίση με 31,2% (στατιστικά σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 95%).

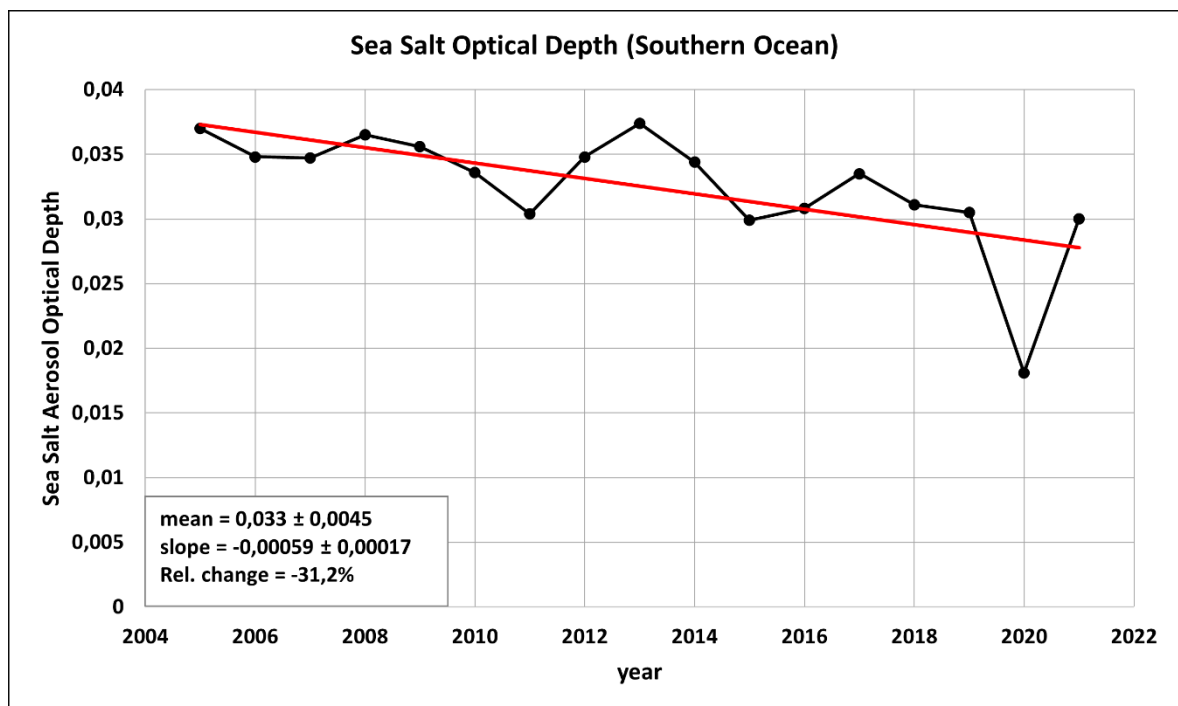


(α)





(β)



(γ)

**Σχήμα 3.16.** Διαχρονική μεταβολή (2005-2021) και γραμμική τάση μεταβολής των μέσων ετησίων περιοχικών τιμών: (α) της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης (σε αριθμό κυψελίδων ανά έτος), (β) της σχετικής περιοχικής κάλυψης (σε % του συνολικού αριθμού κυψελίδων για τις οποίες λειτούργησε ο αλγόριθμος στην περιοχή) και (γ) του φορτίου (οπτικού βάθους) των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος, στην περιοχή του Νότιου Ωκεανού.

Στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τη συχνότητα εμφάνισης και το φορτίο των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος στην περιοχή του Νότιου Ωκεανού . Φαίνεται ότι η παρουσία των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος στον Νότιο Ωκεανό μειώθηκε κατά την περίοδο των 17 ετών 2005-2021, τόσο ως προς τη συχνότητα εμφάνισής τους όσο και ως προς το φορτίο τους (με στατιστικά σημαντικές τάσεις μείωσης). Το εύρημα αυτό βρίσκεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της γεωγραφικής κατανομής του Σχήματος 3.2β, όπου φαίνεται ότι σε όλες σχεδόν τις κυψελίδες της περιοχής του Νότιου Ωκεανού βρέθηκε τάση μείωσης της συχνότητας εμφάνισης των θαλάσσιων αερολυμάτων αντίθετα με το φορτίο τους, για το οποίο βρέθηκαν λίγες κυψελίδες με μείωση (Σχήμα 3.3β).

**Πίνακας 3.4.** Μεσοποιημένες κλιματολογικές (για την περίοδο 2005-2021) ετήσιες τιμές της απόλυτης και σχετικής περιοχικής συχνότητας εμφάνισης και του φορτίου (οπτικού βάθους) των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος στην περιοχή του Νότιου Ωκεανού και γραμμική τάση μεταβολής τους, εκπεφρασμένη σε απόλυτες και σε επί τοις εκατό (%) σχετικές τιμές, κατά την περίοδο 2005-2021. Τα κελιά με γκρι χρώμα αντιστοιχούν στις περιπτώσεις στις οποίες εκτιμώμενες τάσεις μεταβολής είναι στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (βάσει του t-test).

<b><u>ΝΟΤΙΟΣ ΩΚΕΑΝΟΣ</u></b>	<b>Απόλυτη συχνότητα εμφάνισης (αριθμός κυψελίδων)</b>	<b>Σχετική συχνότητα εμφάνισης (%)</b>	<b>Οπτικό βάθος αερολυμάτων θαλασσίου άλατος</b>
<b>Μέση τιμή</b>	2848845,9 ± 940917,3	0,258 ± 0,054	0,033 ± 0,0045
<b>Μεταβολή</b>	-2730375,5 ± 414627,3	-0,13 ± 0,034	-0,0101 ± 0,0029
<b>Σχετική μεταβολή (%)</b>	<b>-95,8</b>	<b>-48,8</b>	<b>-31,2</b>

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> ΣΥΝΟΨΗ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένας δορυφορικός αλγόριθμος με σκοπό την ανίχνευση των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος στην ατμόσφαιρα σε παγκόσμια κλίμακα κατά τη χρονική περίοδο 2005-2021. Ο αλγόριθμος αυτός βασίστηκε στις οπτικές ιδιότητες των αερολυμάτων και χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισαγωγής το οπτικό βάθος των αερολυμάτων στα 550nm (AOD) και η λευκαύγεια μεμονωμένης σκέδασης (SSA) αερολυμάτων στα 388nm. Οι πληροφορίες για το οπτικό βάθος των αερολυμάτων αντλήθηκαν από την βάση δεδομένων MODIS-Aqua Collection 6.1 και χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από δύο διαφορετικούς αλγόριθμους: Deep blue Land (DB) και Dark Target (DT), ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή και πλήρης κάλυψη πάνω από ξηρά και θάλασσα, συμπεριλαμβανομένων και των ερημικών εκτάσεων. Τα δεδομένα της παραμέτρου SSA προέκυψαν από μετρήσεις του δορυφόρου OMI-Aura Satellite και πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές βάσεις δεδομένων πάνω από ξηρά (OMI-OMAEROe) και πάνω από ωκεανούς (OMI-OMAERUV). Η διαφοροποίηση του τύπου επιφάνειας της Γης επιτεύχθηκε με τη χρήση δεδομένων εδάφους από το πρόγραμμα International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) – Η Basic Series.

Ο αλγόριθμος λειτουργεί σε γεωγραφική ανάλυση  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  σε ημερήσια βάση και αρχικά κάνει τον υπολογισμό του εκθετικού παράγοντα Ångström Exponent (AE) χρησιμοποιώντας τα φασματικά δεδομένα του AOD. Στη συνέχεια εφαρμόζονται κατάλληλα όρια στον εκθετικό παράγοντα AE και στο συντελεστή SSA και έτσι επιτυγχάνεται η ανίχνευση της παρουσίας των αερολυμάτων αυτού του είδους. Με αυτόν τον τρόπο ο αλγόριθμος λειτουργεί για όλες τις ημέρες του κάθε έτους, που έχουν διαθέσιμα δεδομένα εισαγωγής του αλγορίθμου και προκύπτουν μηνιαία και ετήσια αποτελέσματα για τη συχνότητα εμφάνισης (σχετική και απόλυτη) σε σχέση με τον αριθμό των ημερών κατά τις οποίες λειτούργησε ο αλγόριθμος και το φορτίο (οπτικό βάθος) των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος. Τα ετήσια μηνιαία αποτελέσματα μεσοποιούνται για την περίοδο 17 ετών μελέτης (2005-2021) και έτσι προκύπτουν οι γεωγραφικές κατανομές των μέσων κλιματολογικών τιμών των τριών μεταβλητών και η διαχρονική και ενδοετήσια μεταβολή τους, τόσο για ολόκληρο τον πλανήτη όσο και για τέσσερις περιοχές του πλανήτη που επιλέχθηκαν, καθώς φάνηκε να έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Τα συμπεράσματα της παρούσας μελέτης συνοψίζονται ως εξής:

- Με βάση τη μέση ετήσια κλιματολογική κατανομή, φαίνεται ότι τα αερολύματα θαλασσίου άλατος εντοπίζονται κυρίως στο Νότιο Ημισφαίριο, μόνο πάνω από ωκεάνιες εκτάσεις και όχι πάνω από ηπειρωτικές. Οι μεγαλύτερες συχνότητες εμφάνισης, ιδιαίτερα οι σχετικές, παρατηρούνται στις περιοχές του Ινδικού Ωκεανού, του Νότιου Ωκεανού, του τροπικού και υποτροπικού Ειρηνικού Ωκεανού και λιγότερο του Βόρειου Ατλαντικού Ωκεανού.
- Οι χωρικές κατανομές της απόλυτης και της σχετικής συχνότητας εμφάνισης και του οπτικού βάθους των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος παρουσιάζουν σε ικανό βαθμό παρόμοια γεωγραφικά χαρακτηριστικά. Οι μεγαλύτερες τιμές της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης σε μέση ετήσια βάση παρατηρούνται στον Ινδικό και Νότιο τροπικό και υποτροπικό Ειρηνικό Ωκεανό, με 60-70 ημέρες εμφάνισης/έτος, και έπειτα στο Βόρειο τροπικό Ειρηνικό Ωκεανό με περίπου 40 ημέρες/έτος. Οι αντίστοιχες μεγαλύτερες τιμές της σχετικής συχνότητας εμφάνισης εμφανίζονται στις προαναφερθείσες περιοχές, όπου θαλάσσια αερολύματα παρατηρούνται έως και στο 40-65% των ημερών του έτους κατά τις οποίες λειτούργησε ο αλγόριθμος. Ωστόσο, παρόμοιες συχνότητες (έως 65%) παρατηρούνται και πάνω από το Νότιο Ωκεανό, ο οποίος καλύπτεται σε μεγάλο βαθμό από νέφη, τα οποία και αποτρέπουν τη δυνατότητα δορυφορικής παρατήρησης και ανίχνευσης αερολυμάτων. Τέλος, σε μέση ετήσια βάση, το μεγαλύτερο φορτίο (AOD) των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος ισοδύναμο με τιμές 0.05-0.1, παρατηρείται πάνω από τις προαναφερθείσες περιοχές στις οποίες εμφανίζονται αυτά, ενώ τα απολύτως μεγαλύτερα φορτία (0.1-0.15) παρατηρούνται πάνω από το Βόρειο τροπικό Ειρηνικό Ωκεανό, καθώς και πάνω από τη Θάλασσα Ross του Νότιου Ωκεανού. Επίσης, μεγάλα φορτία παρατηρούνται και πάνω από τον Κόλπο του Μεξικό, και πιο συγκεκριμένα στην ανατολική Καραϊβική Θάλασσα, όπου εκεί η τιμή ανήκει στο εύρος 0.1-0.15.
- Γενικά, οι μεγαλύτερες μηνιαίες τιμές της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης θαλασσίων αερολυμάτων (8-13 ημέρες/μήνα) παρατηρούνται την περίοδο Μαΐου-Ιουλίου και ιδιαίτερα τους μήνες Ιούνιο-Ιούλιο πάνω από τις υποτροπικές ωκεάνιες περιοχές (κυρίως του Ειρηνικού, αλλά και του Ατλαντικού, του Νοτίου Ημισφαιρίου). Σε ό,τι αφορά στη σχετική συχνότητα εμφάνισης, οι μεγαλύτερες μηνιαίες τιμές (60-100% των ημερών του μήνα) παρατηρούνται, κυρίως πάνω από τις ωκεάνιες περιοχές του Νοτίου Ημισφαιρίου την περίοδο Μαρτίου-Αυγούστου,

ενώ μεγάλες τιμές παρατηρούνται και πάνω από μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη, έως και στο Νότιο Ωκεανό ή το Βόρειο Ατλαντικό και Ειρηνικό Ωκεανό. Τα μεγαλύτερα φορτία (τιμές AOD έως περίπου 0.5) σε μηνιαία βάση, παρατηρούνται πάνω από τους τροπικούς και υποτροπικούς Ωκεανούς του πλανήτη, κατά την περίοδο Μαρτίου-Ιουλίου, ενώ σε μεμονωμένες κυψελίδες των εν λόγω περιοχών παρατηρούνται και φορτία ισοδύναμα με οπτικό βάθος ίσο με 1. Σε πλανητική κλίμακα και αθροιστική βάση, τα αερολύματα θαλασσίου άλατος παρατηρούνται περισσότερο συχνά την περίοδο Μαΐου-Ιουλίου, ενώ παρατηρούνται λιγότερο την περίοδο Σεπτεμβρίου-Ιανουαρίου. Εάν ληφθεί υπόψιν ο αριθμός των ημερών για τις οποίες λειτούργησε ο αλγόριθμος (πλανητική σχετική συχνότητα εμφάνισης) τα θαλάσσια αερολύματα εμφανίζονται συχνότερα, όπως και στην απόλυτη συχνότητα εμφάνισης, την περίοδο Μαΐου-Ιουλίου. Όσον αφορά στην ενδοετήσια μεταβολή του οπτικού βάθους των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος σε πλανητική κλίμακα δεν παρατηρείται σαφής εποχικός κύκλος, παρά το γεγονός ότι μεγαλύτερα φορτία παρατηρούνται τον Ιούλιο και την άνοιξη του Βορείου Ημισφαιρίου.

- Σε παγκόσμιο επίπεδο, βρέθηκε ότι κατά την περίοδο μελέτης 2005-2021 τόσο η συχνότητα εμφάνισης όσο και το φορτίο (οπτικό βάθος) των θαλασσίων αερολυμάτων μειώθηκαν σημαντικά, κατά 84,7% και 37,6% η απόλυτη και σχετική συχνότητα εμφάνισης και κατά 20,9% το φορτίο (στατιστικά σημαντικές μειώσεις). Παρατηρήθηκε, επίσης, αξιοσημείωτη από έτος σε έτος μεταβολή, με ικανό εύρος διακύμανσης τιμών, που αντιστοιχεί σε περίπου 200.000-800.000 κυψελίδες/έτος και περίπου στο 7%-15% των ημερών που λειτούργησε ο αλγόριθμος για την απόλυτη και τη σχετική συχνότητα εμφάνισης, αντίστοιχα. Υπάρχουν έτη (2008, 2013, 2017) στα οποία παρατηρήθηκαν πολύ συχνά και με μεγάλα φορτία τα θαλάσσια αερολύματα και άλλα, όπως το 2020 στα οποία παρατηρήθηκαν πολύ σπανιότερα και με χαμηλά φορτία.
- Οι μέγιστες τιμές της συχνότητας εμφάνισης των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος παρατηρούνται τους μήνες Ιούνιο, Δεκέμβριο και Φεβρουάριο στον Ινδικό Ωκεανό, τους μήνες Μάιο, Αύγουστο και Δεκέμβριο στο Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό, τους μήνες Ιούλιο, Οκτώβριο και Φεβρουάριο στον Ειρηνικό Ωκεανό και τους μήνες Μάιο και Ιούνιο στον Νότιο Ωκεανό. Οι μέγιστες τιμές του φορτίου των θαλάσσιων αερολυμάτων, για τις περιοχές του Ινδικού και Βόρειου Ατλαντικού Ωκεανού,

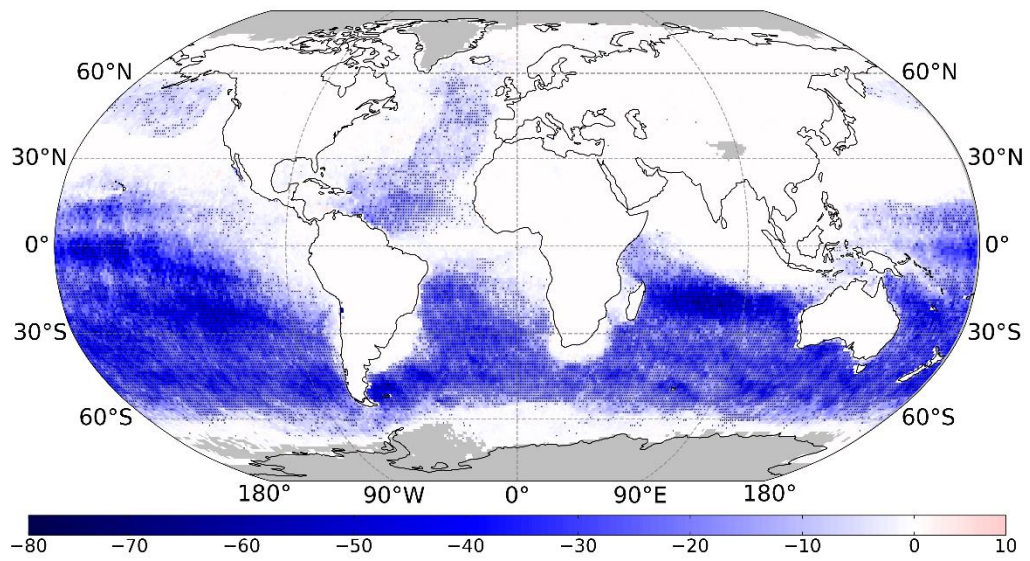
παρατηρούνται στους ίδιους μήνες που προαναφέρθηκαν και για την συχνότητα εμφάνισης, ενώ οι αντίστοιχες μέγιστες τιμές του φορτίου για τον Ειρηνικό Ωκεανό παρατηρούνται τους μήνες Ιούλιο και Φεβρουάριο και για τον Νότιο Ωκεανό τους μήνες Απρίλιο και Ιούνιο.

- Στην περιοχή του Ινδικού Ωκεανού παρατηρήθηκε μία στατιστικά σημαντική τάση μείωσης τόσο για την απόλυτη συχνότητα εμφάνισης όσο και για την σχετική, ίση με 74,6% και 17% αντίστοιχα και μία αρκετά μικρότερη και μη στατιστικά σημαντική για το φορτίο των αερολυμάτων (5,02%). Στην περιοχή του Βορείου Ατλαντικού Ωκεανού παρατηρείται στατιστικά σημαντική τάση μείωσης για την απόλυτη συχνότητα ίση με 77,7%, ενώ μη στατιστικά σημαντική μείωση για την σχετική συχνότητα εμφάνισης και το φορτίο ίση με 11,3% και 5,97%, αντίστοιχα. Στην περιοχή του Ειρηνικού Ωκεανού υποδεικνύεται και εκεί μία τάση μείωσης η οποία είναι ίση με 70,6% για την απόλυτη συχνότητας εμφάνισης (στατιστικά σημαντική), ενώ η σχετική συχνότητα εμφάνισης και το φορτίο παρουσιάζουν μία μείωση ίση με 6,02% και 5,2%, αντίστοιχα (στατιστικά μη σημαντικές). Τέλος, και στην περιοχή του Νότιου Ωκεανού παρατηρείται τάση μείωσης, η οποία είναι στατιστικά σημαντική και για τις τρεις μεταβλητές, και συγκεκριμένα ίση με 95,8% για την απόλυτη συχνότητα εμφάνισης, 48,7% για την σχετική συχνότητα εμφάνισης και 31,2% για το φορτίο των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος.

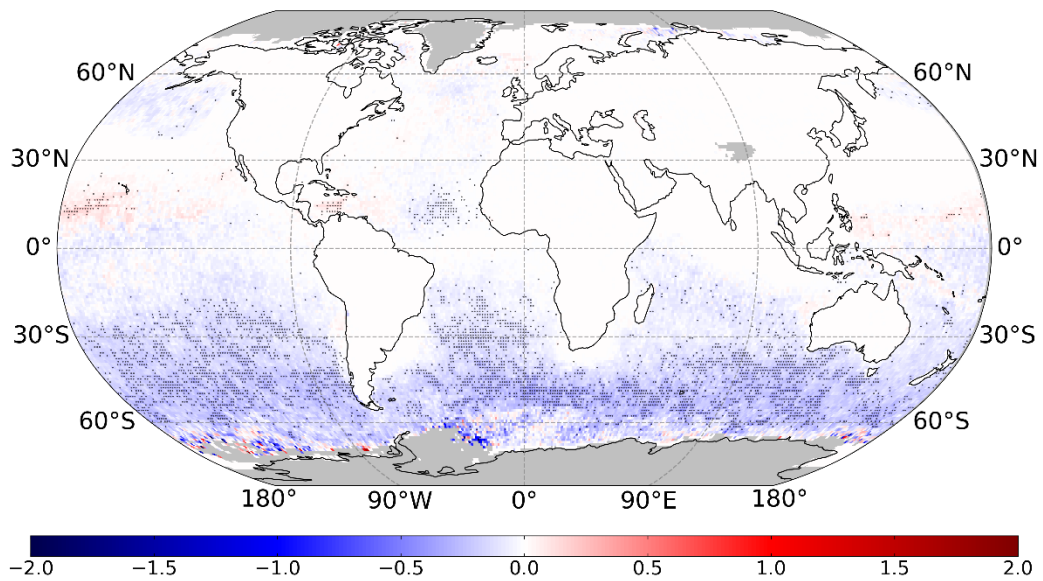
Η παρούσα μελέτη παρουσιάζει τα αποτελέσματα της κατανομής των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος σε παγκόσμιο επίπεδο και σε κλιματολογική βάση, τα οποία προέκυψαν με τη χρήση ενός αλγορίθμου που αξιοποιεί τις οπτικές ιδιότητες των αερολυμάτων από σύγχρονα και δορυφορικά όργανα μέτρησης. Ενδιαφέρον επίσης, θα παρουσίαζε και η αξιολόγηση/επικύρωση των αποτελεσμάτων του δορυφορικού αλγορίθμου με τη χρήση επίγειων μετρήσεων αναφοράς, όπως για παράδειγμα αυτών που παρέχει το δίκτυο σταθμών AERONET. Επίσης, θα μπορούσε να γίνει και περεταίρω ερμηνεία των ευρημάτων, όπως για παράδειγμα να ερευνηθούν οι παράγοντες που μπορεί να οδηγούν στη μείωση ή αύξηση της παρουσίας των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος, ή οι παράγοντες για τους οποίους εμφανίζονται πιο έντονα σε κάποιες ωκεάνιες περιοχές και όχι τόσο σε άλλες. Τέλος, θα μπορούσε να επεκταθεί η χρονοσειρά και η περίοδος μελέτης να περιλαμβάνει και το έτος 2023, και να γίνει εκτίμηση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (Direct Radiative Effect,

DRE) και της επίδρασης στο πλανητικό ισοζύγιο ακτινοβολίας, όπως για παράδειγμα την πλανητική λευκαύγεια των θαλασσίων αερολυμάτων.

# Παράρτημα

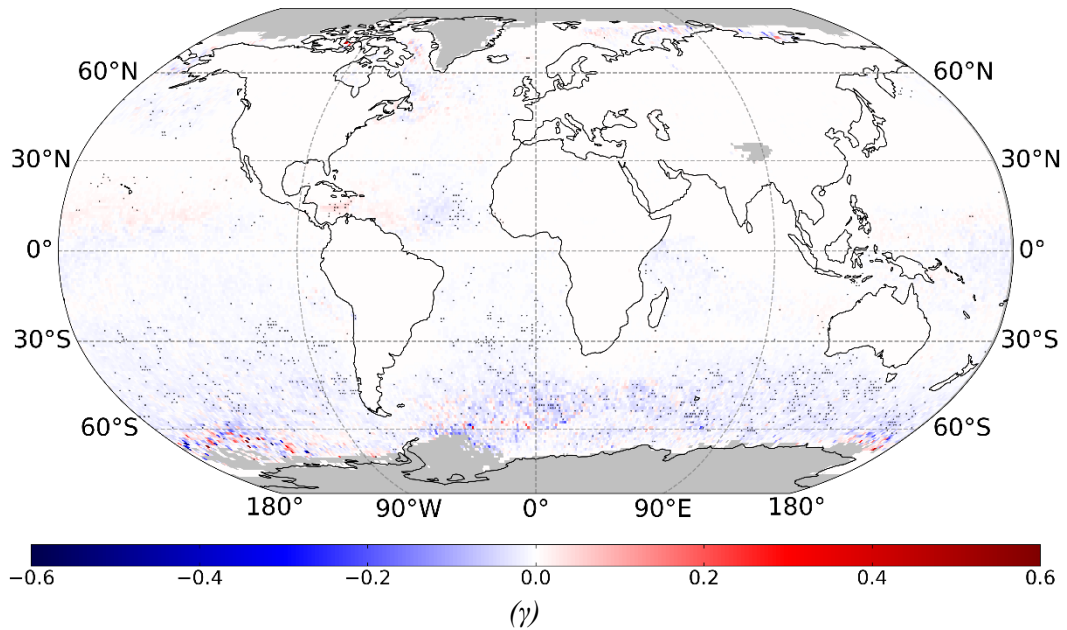


(a)

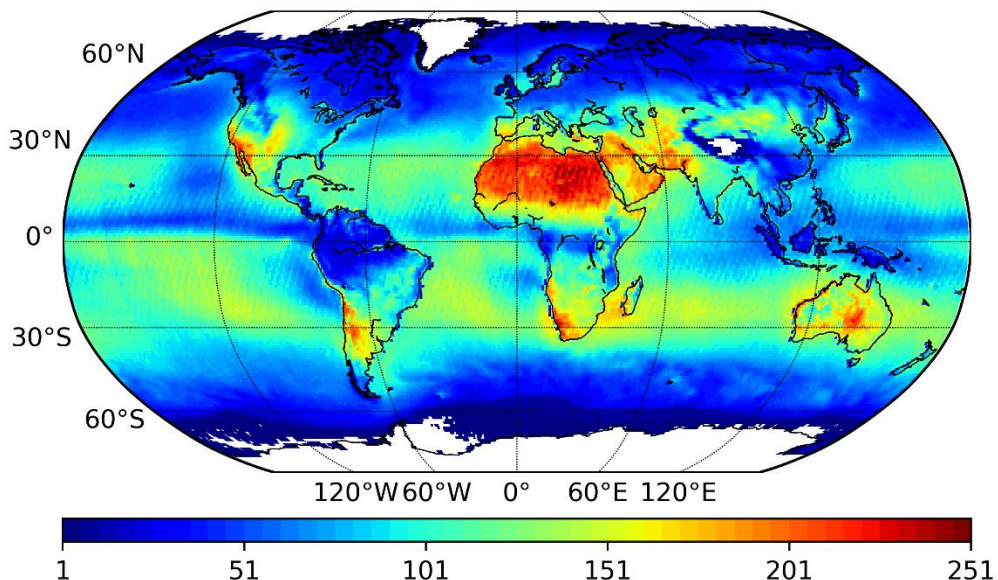


(β)

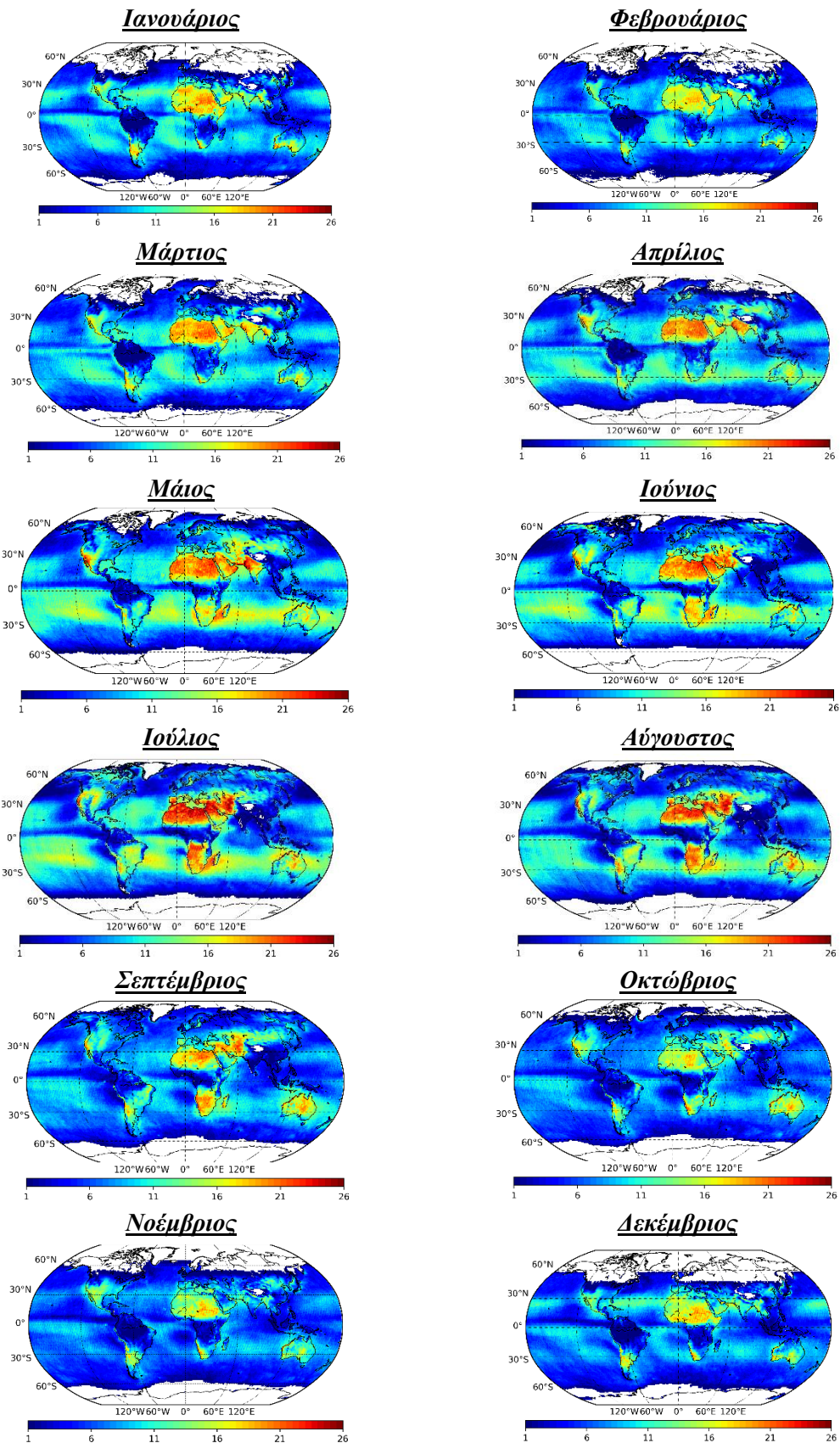




**Σχήμα Π1.** Κατανομές της τάσης μεταβολής σε παγκόσμιο επίπεδο με επισημασμένες τις τιμές που είναι στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο σημαντικότητας 99% (α) για την απόλυτη συχνότητα εμφάνισης, (β) για τη σχετική συχνότητα εμφάνισης και (γ) για το οπτικό βάθος (φορτίο) των αερολυμάτων θαλασσίου άλατος κατά την περίοδο 2005-2021. Το λευκό χρώμα υποδηλώνει περιοχές για τις οποίες υπάρχει μηδενική τάση μεταβολής και το γκρι χρώμα περιοχές όπου ο δορυφορικός αλγόριθμος δε λειτούργησε για καμία ημέρα σε όλη τη διάρκεια της περιόδου μελέτης.



**Σχήμα Π2.** Μέσες ετήσιες κλιματολογικές τιμές του αριθμού των ημερών/έτος για τις οποίες λειτούργησε ο δορυφορικός αλγόριθμος κατά την περίοδο μελέτης (2005-2021). Το λευκό χρώμα υποδηλώνει περιοχές για τις οποίες ο δορυφορικός αλγόριθμος δε λειτούργησε για καμία ημέρα σε όλη τη διάρκεια της περιόδου μελέτης.



**Σχήμα Π3.** Παγκόσμια κατανομή των μέσων μηνιαίων κλιματολογικών τιμών του αριθμού των ημερών για τις οποίες λειτούργησε ο δορυφορικός αλγόριθμος (ημέρες/μήνα). Οι τιμές είναι μεσοποιημένες για την περίοδο 2005-2021. Το λευκό χρώμα υποδηλώνει περιοχές για τις οποίες ο δορυφορικός αλγόριθμος δε λειτούργησε για καμία ημέρα σε όλη τη διάρκεια της περιόδου μελέτης.

# Βιβλιογραφική Λίστα Αναφορών

## Εργασίες σε επιστημονικά περιοδικά

Ackerman, A.S., Toon, O.B., Stevens, D.E., Heymsfield, A.J., Ramanathan, V., Welton, E.J.: Reduction of tropical cloudiness by soot, *Science*, **288**, 1042–1047, doi:10.1126/science.288.5468.1042, 2000.

Alpert, P., Ziv, B.: The Sharav Cyclone: Observations and some theoretical considerations, *Journal of Geophysical Research*, **94**, <https://doi.org/10.1029/JD094iD15p18495>, 18495-18514, 1989.

Bellouin, N., Quaas, J., Morcrette, J.-J., Boucher, O.: Estimates of aerosol radiative forcing from the MACC re-analysis, *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 2045–2062, <https://doi.org/10.5194/acp-13-2045-2013>, 2013.

Bilal, M., Nazeer, M., Qiu, Z., Ding, X., Wei, J.: Global Validation of MODIS C6 and C6.1 Merged Aerosol Products over Diverse Vegetated Surfaces, *Remote Sensing*, **10**, <https://doi.org/10.3390/rs10030475>, 2018.

Bond, T.C., Doherty, S.J., Fahey, D.W., Forster, P.M., Berntsen, T., DeAngelo, B.J., Flanner, M.G., Ghan, S., Kärcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P.K., Sarofim, M.C., Schultz, M.G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., Bellouin, N., Guttikunda, S.K., Hopke, P.K., Jacobson, M.Z., Kaiser, J.W., Klimont, Z., Lohmann, U., Schwarz, J.P., Shindell, D., Storelvmo, T., Warren, S.G., Zender, C.S.: Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **118**, 5380-5552, doi:10.1002/jgrd.50171, 2013.

Bougiatioti, A., Nikolaou, P., Stavroulas, I., Kouvarakis, G., Weber, R., Nenes, A., Kanakidou, M., Mihalopoulos, N.: Particle water and pH in the eastern Mediterranean: source variability and implications for nutrient availability, *Atmos. Chem. Phys.*, **16**, 4579-4591, <https://doi.org/10.5194/acp-16-4579-2016>, 2016.

Flaounas, E., Kotroni, V., Lagouvardos, K., Kazadzis, S., Gkikas, A., Hatzianastassiou, N.: Cyclone contribution to dust transport over the Mediterranean region, *Atmos. Sci. Let.*, **16**, 473–478, doi:10.1002/asl.584, 2015.

Fotiadi, A., Hatzianastassiou, N., Drakakis, E., Matsoukas, C., Pavlakis, K.G., Hatzidimitriou, D., Gerasopoulos, E., Mihalopoulos, N., Vardavas, I.: Aerosol physical and optical properties in the Eastern Mediterranean Basin, Crete, from Aerosol Robotic Network data, *Atmos. Chem Phys.*, **6**, 5399–5413, <https://doi.org/10.5194/acp-6-5399-2006>, 2006.

Gavrouzou, M., Hatzianastassiou, N., Gkikas, A., Korras-Carraca, M.B., Mihalopoulos, N.: A Global Climatology of Dust Aerosols Based on Satellite Data: Spatial, Seasonal and Inter-Annual Patterns over the Period 2005–2019, *Remote Sens.*, **13**, <https://doi.org/10.3390/rs13030359>, 2020.

Gkikas, A., Hatzianastassiou, N., Mihalopoulos, N., Torres, O.: Characterization of aerosol episodes in the greater Mediterranean Sea area from satellite observations (2000-2007), *Elsevier*, **128**, , 286-304, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.11.056>, 2015.

Gkikas, A., Hatzianastassiou, N., Mihalopoulos, N., Katsoulis, V., Kazadzis, S., Pey, J., Querol, X., Torres, O.: The regime of intense desert dust episodes in the Mediterranean based on contemporary satellite observations and ground measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 12135–12154, doi:10.5194/acp-13-12135-2013, 2013.

Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R.: Radiative forcing and climate response, *Journal of Geophysical Research*, **102**, 6831-6864, <https://doi.org/10.1029/96JD03436>, 1997.

- Hatzianastassiou, N., Kalaitzi, N., Gavrouzou, M., Gkikas, A., Korras-Carraca, M.B., Mihalopoulos, N.: A Climatological Satellite Assessment of Absorbing Carbonaceous Aerosols on a Global Scale, *Atmosphere*, **10**, doi:10.3390/atmos10110671, 2019.
- Hatzianastassiou, N., Katsoulis, B., Vardavas, I.: Global distribution of aerosol direct radiative forcing in the ultraviolet and visible arising under clear skies, *Tellus*, **56B**, 51-71, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2004.00085.x>, 2004.
- Israelevich, P.L., Levin, Z., Joseph, J.H., Ganor, E.: Desert aerosol transport in the Mediterranean region as inferred from the TOMS aerosol index, *Journal Of Geophysical Research*, **107**, 4572, doi:10.1029/2001JD002011, 2002.
- Johnson, B.T., Shine, K.P., Forster, P.M.: The semi-direct aerosol effect: Impact of absorbing aerosols on marine stratocumulus, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **130**, 1407–1422, <https://doi.org/10.1256/qj.03.61>, 2004.
- Jung, C., Schindler, D.: Global comparison of the goodness-of-fit of wind speed distributions, *Energy Conversion and Management*, **133**, 216-234, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.006>, 2016.
- Karlsson, K.G., Devasthale, A., Eliasson, S.: Global Cloudiness and Cloud Top Information from AVHRR in the 42-Year CLARA-A3 Climate Data Record Covering the Period 1979-2020, *Remote Sens, MDPI*, **15**, 3044, <https://doi.org/10.3390/rs15123044>, 2023.
- Koch, D., Del Genio, A.D.: Black carbon semi-direct effects on cloud cover: review and synthesis, *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 7685-7696, <https://doi.org/10.5194/acp-10-7685-2010>, 2010.
- Korras-Carraca, M.B., Gkikas, A., Matsoukas, C., Hatzianastassiou, N.: Global Clear-Sky Aerosol Speciated Direct Radiative Effects over 40 Years (1980–2019), *Atmosphere*, **12**, <https://doi.org/10.3390/atmos12101254>, 2021.
- Kruthika, E., Sreedharan, K.S., and Jayaraman, S.: Multi-satellite retrieval of single scattering albedo using the OMI–MODIS algorithm, *Atmos. Chem. Phys.*, **19**, 3307–3324, <https://doi.org/10.5194/acp-19-3307-2019>, 2019.
- Kubilay, N., Cokacar, T., Temel O.: Optical properties of mineral dust outbreaks over the northeastern Mediterranean, *Journal Of Geophysical Research*, **108**, 4666, doi:10.1029/2003JD003798, 2003.
- Levy, R.C., Mattoo, S., Munchak, L.A., Remer, L.A., Sayer, A.M., Patadia, F., Hsu, N.C.: The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean, *Atmos. Meas. Tech.*, **6**, 2989–3034, doi:10.5194/amt-6-2989-2013, 2013.
- Liao, H., Chen, W.T., Seinfeld, J.H.: Role of climate change in global predictions of future tropospheric ozone and aerosols, *J. Geophys. Res.*, **111**, <https://doi.org/10.1029/2005JD006852>, 2006.
- Lohmann, U., Feichter, J.: Global indirect aerosol effects: a review, *Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 715-737, <https://doi.org/10.5194/acp-5-715-2005>, 2005.
- Murphy, D.M., Froyd, K.D., Bian, H., Brock, C.A., Dibb, J.E., DiGangi, J.P., Diskin, G., Dollner, M., Kupc, A., Scheuer, E.M., Schill, G.P., Weinzierl, B., Williamson, C.J., Yu, P.: The distribution of sea-salt aerosol in the global troposphere, *Atmos. Chem. Phys.*, **19**, 4093–4104, <https://doi.org/10.5194/acp-19-4093-2019>, 2019.
- O'Dwod C.D., De Leeuw, G.: Marine aerosol production, a review of the current knowledge, *Phil. Trans. R. Soc. A*, **365**, 1753–1774, doi:10.1098/rsta.2007.2043, 2007.
- Penning de Vries, M.J.M., Beirle, S., Hörmann, C., Kaiser, J.W., Stammes, P., Tilstra, L.G., Tuinder, O.N.E., Wagner, T.: A global aerosol classification algorithm incorporating multiple satellite data sets of

aerosol and trace gas abundances, *Atmos. Chem. Phys.*, **15**, 10597–10618, doi:10.5194/acp-15-10597-2015, 2015.

Pieterneel, F.L., Joiner, J., Tamminen, J., Veefkind, J.P., Bhartia, P.K., Zweekers, D.C.S., Duncan, B.N., Streets, D.G., Eskes, H., Ronald van der A, McLinden, C., Fioletov, V., Carn, S., Jos de Laat, DeLand, M., Marchenko, S., McPeters, R., Ziemke, J., Fu, D., Liu, X., Pickering, K., Apituley, A., Abad, G.G., Arola, A., Boersma, F., Miller, C.C., Chance, K., Martin de Graaf, Hakkarainen, J., Hassinen, S., Ialongo, I., Kleipool, Q., Krotkov, N., Li, C., Lamsal, L., Newman, P., Nowlan, C., Suleiman, R., Tilstra, L.G., Torres, O., Wang, H., Wargan, K.: The Ozone Monitoring Instrument: overview of 14 years in space, *Atmos. Chem. Phys.*, **18**, 5699–5745, <https://doi.org/10.5194/acp-18-5699-2018>, 2018.

Prospero, J.M., Mayol-Bracero, O.M.: Understanding the Transport and Impact of African Dust on the Caribbean Basin, *Bull. American Meteorol. Soc.*, 1329-1337, doi: 10.1175/BAMS-D-12-00142.1, 2013.

Quinn, P.K., Coffman, D.J., Johnson, J.E., Upchurch, L.M., Bates, T.S.: Small fraction of marine cloud condensation nuclei made up of sea spray aerosol, *Nature Geosci.*, **10**, 674–679, <https://doi.org/10.1038/ngeo3003>, 2017.

Ramanathan, V., Crutzen, P.J., Kiehl, J.T., Rosenfeld, D.: Aerosols, Climate, and the Hydrological Cycle, *Science*, **294**, doi:10.1126/science.1064034, 2119-2124, 2001.

Remer, L.A., Kleidman, R.G., Levy, R.C., Kaufman, Y.J., Tanré, D., Mattoo, S., Martins, J.V., Ichoku, C., Koren, I., Yu, H., Holben, B.N.: Global aerosol climatology from the MODIS satellite sensors, *J. Geophys. Res. Atmosphere*, **113**, <https://doi.org/10.1029/2007JD009661>, 2008.

Self, S., Zhao, J.X., Holasek, R.E., Torres, R.C., King, A.J.: The Atmospheric Impact of the 1991 Mount Pinatubo Eruption, NASA/CR-93-207274, NAS 1.26:207274, SOEST-Contrib-3563, 1993.

Tegen, I., Werner, M., Harrison, S.P., Kohfeld, K.E.: Relative importance of climate and land use in determining present and future global soil dust emission, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, doi:10.1029/2003GL019216, 2004.

Teller A., Levin, Z.: The effects of aerosols on precipitation and dimensions of subtropical clouds: a sensitivity study using a numerical cloud model, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **6**, 67–80, <https://doi.org/10.5194/acp-6-67-2006>, 2006.

Xu, Y., Bahadur, R., Zhao, C., Ruby, L.: Estimating the radiative forcing of carbonaceous aerosols over California based on satellite and ground observations. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **118**, 11,148–11,160, <https://doi.org/10.1002/jgrd.50835>, 2013.

Young, A.H., Knapp, K.R., Inamdar, A., Hankins, W., and Rossow, W.B.: The International Satellite Cloud Climatology Project H-Series climate data record product, *Earth Syst. Sci. Data*, **10**, 583–593, <https://doi.org/10.5194/essd-10-583-2018>, 2018.

### Πτυχιακή Εργασία

Καπλάνη, Α.Μ.: Χωρική Κατανομή, εποχικότητα και τύποι αερολυμάτων από LIVAS στη λεκάνη της Μεσογείου, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Περιβάλλοντος, 72 pp., 2016.

## Βιβλία

- Boucher, O.: Atmospheric Aerosols, Properties and Climate Impacts, *Springer*, 322 pp., 2015.
- Kokhanovsky, A.A.: Aerosol Optics, Light Absorption and Scattering by Particles in the Atmosphere, *Praxis Publishing Ltd*, 154 pp., 2008.
- Lewis, E.R., Schwartz, S.E.: Sea Salt Aerosol Production Mechanisms, Methods, Measurements and Models- A critical review, *American Geophysical Union*, 421 pp., 2004.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N.: Atmospheric Chemistry and Physics, From Air Pollution to Climate Change, Second Edition, *Wiley-Interscience Publication*, 1248 pp., 2006.

## Εκθέσεις ερευνητικών αποτελεσμάτων (reports)

- Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A.: Climate Change 2001, The Scientific Basis, Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, 881 pp., 2001.
- Masson-Delmotte, V., Pirani, A., Chen, Y., Matthews, R.J.B., Yelekci, O., Lonnoy, E., Leitzell, K., Connors, S.L., Goldfarb, L., Berger, S., Yu, R., Maycock, T.K., Zhai, P., Pean, C., Gomis, M.I., Huang, M., Zhou, B., Waterfield, T., Caud, N.: Climate Change 2021, The Physical Science Basis, Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp., 2021.
- Stocker, T.F., Dahe, Q., Plattner, G.K., et al.: Climate Change 2013, Technical Summary, Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.
- Solomon S., Qin D., Manning M., Marquis M., Averyt K., Tingor M.M.B., Miller H.L., Chen Z.: Climate Change 2007, The Physical Science Basis, Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 165 pp., 2007.

## Ιστοσελίδες

- <https://www.gfdl.noaa.gov/aerosols-and-climate/> (last accessed on December 12<sup>th</sup>, 2022)
- <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Aerosols/page4.php> (last accessed on December 13<sup>th</sup>, 2022)
- <https://www.nasa.gov/centers/langley/news/factsheets/Aerosols.html> (last accessed on July 20<sup>th</sup>, 2022)
- <https://www.pnnl.gov/atmospheric-aerosols> (last accessed on July 21<sup>th</sup>, 2022)
- <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/> (last accessed on June 19<sup>th</sup>, 2022)
- <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/design.php> (last accessed on June 19<sup>th</sup>, 2022)
- <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/find-data/near-real-time/omi> (last accessed on June 22<sup>th</sup>, 2022)
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone\\_monitoring\\_instrument](https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone_monitoring_instrument) (last accessed on June 22<sup>th</sup>, 2022)

<https://aura.gsfc.nasa.gov/omi.html> (last accessed on June 20<sup>th</sup>, 2022)

[https://www.nasa.gov/mission\\_pages/terra/spacecraft/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/terra/spacecraft/index.html) (last accessed on June 20<sup>th</sup>, 2022)

[https://el.wikipedia.org/wiki/Aqua\\_%28%E4%BF%CF%81%CF%85%CF%86%CF%8C%CF%81%CE%BF%CF%82%29](https://el.wikipedia.org/wiki/Aqua_%28%E4%BF%CF%81%CF%85%CF%86%CF%8C%CF%81%CE%BF%CF%82%29) (last accessed on June 20<sup>th</sup>, 2022)

<https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/omi> (last accessed on June 22<sup>th</sup>, 2022)

[https://www.researchgate.net/figure/Model-of-the-Aura-spacecraft-showing-the-location-of-the-four-instruments-HIRDLS-MLS\\_fig3\\_3204054](https://www.researchgate.net/figure/Model-of-the-Aura-spacecraft-showing-the-location-of-the-four-instruments-HIRDLS-MLS_fig3_3204054) (last accessed on June 23<sup>th</sup>, 2022)

<https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/modis> (last accessed on June 19<sup>th</sup>, 2022)