



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

“ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ”

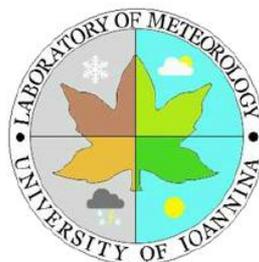
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ
ΗΜΕΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ ΙΣΧΥΡΩΝ
ΕΠΕΙΣΟΔΙΩΝ ΣΚΟΝΗΣ ΣΤΗΝ ΑΣΙΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**

ΚΙΜΟΥΡΤΖΗ ΜΑΡΙΑ

ΦΥΣΙΚΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΧΑΤΖΗΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ (ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ)



ΙΩΑΝΝΙΝΑ 2023



UNIVERSITY OF IOANNINA
SCHOOL OF SCIENCES
DEPARTMENT OF PHYSICS
POSTGRADUATE PROGRAM

“ATMOSPHERIC SCIENCES AND THE ENVIRONMENT”

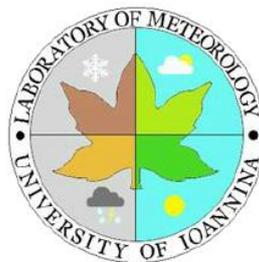
MASTER THESIS

**IDENTIFICATION AND CHARACTERIZATION OF
INTENSE DUST AEROSOL EPISODE DAYS AND
CASES IN ASIA USING CONTEMPORARY
SATELLITE DATA**

KIMOURTZI MARIA

PHYSICIST

SUPERVISOR: NIKOLAOS HATZIANASTASSIOU (PROFESSOR)



IOANNINA 2023

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	9
Περίληψη	11
Abstract	13
Ακρωνύμια	15
Εισαγωγή.....	17
Κεφάλαιο 1 ^ο	25
Θεωρητικό Υπόβαθρο – Βασικοί Ορισμοί	25
1.1 Ορισμός ατμοσφαιρικών αερολυμάτων	25
1.2 Κατηγοριοποίηση των αερολυμάτων.....	25
1.2.1 Ερημική σκόνη (Desert dust).....	28
1.2.2 Θαλάσσια αερολύματα (Sea salt aerosols)	30
1.2.3 Ηφαιστειακά αερολύματα (Volcanic aerosols)	31
1.2.4 Αερολύματα καύσης βιομάζας (Biomass burning aerosols).....	32
1.3 Οπτικές ιδιότητες των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων	33
1.3.1 Οπτικό βάθος αερολυμάτων (Aerosol Optical Depth, AOD)	34
1.3.2 Εκθετικός παράγοντας Ångström (Ångström Exponent, a)	35
1.3.3 Δείκτης αερολυμάτων (Aerosol Index, AI).....	36
Κεφάλαιο 2 ^ο	37
Μεθοδολογία – Δεδομένα	37
2.1 Δορυφορικά δεδομένα MODIS (MODIS satellite data)	37
2.2 Δορυφορικά δεδομένα OMI (OMI satellite data).....	39
2.3 Ορισμός ημερών και περιπτώσεων επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης (Dust Aerosol Episode Days, DAEDs; Dust Aerosol Episode Cases, DAECs).....	40
2.4 Μεθοδολογία	40
2.5 Περιοχή μελέτης.....	44
Κεφάλαιο 3 ^ο	47
Αποτελέσματα – Συζήτηση	47
3.1 Γεωγραφική κατανομή των ημερών με έντονα επεισόδια σκόνης (DAEDs).....	47
3.1.1 Γεωγραφική κατανομή σε μέση ετήσια βάση	47
3.1.2 Γεωγραφική κατανομή σε μέση εποχική βάση.....	52
3.1.3 Γεωγραφική κατανομή σε μέση μηνιαία βάση.....	54
3.2 Ενδοετήσια και διαχρονική μεταβολή των ημερών επεισοδίων σκόνης (DAEDs).....	58
3.2.1 Ενδοετήσια μεταβολή	59
3.2.2 Διαχρονική μεταβολή.....	61

3.3 Ενδοετήσια και διαχρονική μεταβολή των περιπτώσεων επεισοδίων σκόνης (DAECs)	67
3.3.1 Ενδοετήσια μεταβολή	68
3.3.2 Διαχρονική μεταβολή	69
Κεφάλαιο 4 ^ο	78
Σύνοψη - Συμπεράσματα	78
Βιβλιογραφία	82
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	92

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Χατζηαναστασίου Νικόλαος, Καθηγητής Τμήματος Φυσικής Πανεπιστημίου
Ιωαννίνων (Επιβλέπων)

Λώλης Χρήστος, Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήματος Φυσικής Πανεπιστημίου
Ιωαννίνων

Μπάκας Νικόλαος, Επίκουρος Καθηγητής Τμήματος Φυσικής Πανεπιστημίου
Ιωαννίνων

Ευχαριστίες

Ένας ακόμη κύκλος σπουδών κλείνει και επισφραγίζεται με αυτή τη διπλωματική εργασία. Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Ατμοσφαιρικές Επιστήμες και Περιβάλλον», του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Χατζηαναστασίου Νικόλαου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Χατζηαναστασίου για την πολύτιμη καθοδήγησή του, τις γνώσεις και τις συμβουλές που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας, η οποία ξεκινάει από τις προπτυχιακές μου σπουδές.

Επίσης, ευχαριστώ τους καθηγητές του μεταπτυχιακού προγράμματος κ. Κασσωμένο Παύλο, κ. Λώλη Χρήστο, κ. Μπάκα Νικόλαο και κ. Μπαρτζώκα Αριστείδη για τις γνώσεις που μου παρείχαν μέσω των μαθημάτων τους που συνέβαλαν στην ανάπτυξή μου τόσο σε ακαδημαϊκό όσο και σε προσωπικό επίπεδο. Ακόμη, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους υποψήφιους διδάκτορες κ. Γαβρούζου Μαρία, κ. Σταμάτη Μιχαήλ και στο μεταδιδάκτορα κ. Μάριο-Μπρούνο Κόρα-Καράσα, για την πολύτιμη βοήθειά τους και το χρόνο που μου αφιέρωσαν για την επεξεργασία των δεδομένων της παρούσας εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου που με ενθαρρύνει και με στηρίζει όλα αυτά τα χρόνια ώστε να πετύχω τους στόχους μου.

Κιμουρτζή Μαρία

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια προσδιορισμού των ημερών επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης (Dust Aerosol Episode Days, DAEDs), καθώς και των περιπτώσεων (Dust Aerosol Episode Cases, DACEs), στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας και της Κασπίας Θάλασσας, με τη χρήση ενός δορυφορικού αλγορίθμου, ο οποίος χρησιμοποιεί σύγχρονα δορυφορικά δεδομένα για τις οπτικές ιδιότητες των αερολυμάτων και εφαρμόζοντας κατάλληλα φίλτρα προσδιορίζει την ύπαρξη ή μη των ημερών και περιπτώσεων επεισοδίων, αλλά και τα ταξινομεί σε δυο κατηγορίες ανάλογα με την έντασή τους, τα ισχυρά και τα ακραία.

Ειδικότερα, τα δορυφορικά δεδομένα εισαγωγής που χρησιμοποιούνται στον αλγόριθμο είναι το οπτικό βάθος των αερολυμάτων (Aerosol Optical Depth, AOD), ο δείκτης απορροφητικότητας των αερολυμάτων (Aerosol Index, AI) και ο εκθετικός παράγοντας Ångström (Ångström Exponent, α). Τα δεδομένα φασματικού AOD (από τα οποία υπολογίζεται και ο εκθετικός παράγοντας Ångström) ελήφθησαν από τη βάση δεδομένων MODIS-Aqua Collection 6.1, ενώ τα δεδομένα AI προέρχονται από μετρήσεις OMI-Aura near-UV OMAERUV. Οι υπολογισμοί του αλγορίθμου έγιναν σε ημερήσια βάση και σε γεωγραφική ανάλυση $1^\circ \times 1^\circ$ γεωγραφικό μήκος και πλάτος, ενώ καλύπτουν τη χρονική περίοδο δεκαεπτά ετών 2005-2021. Η ανίχνευση των ημερών επεισοδίων σκόνης (DAEDs) πραγματοποιείται ανά ημέρα μέσω της εφαρμογής κατάλληλων φίλτρων/ορίων στα δεδομένα εισαγωγής του αλγορίθμου. Στη συνέχεια, υπολογίζονται σε μηνιαία, εποχική και ετήσια βάση η συχνότητα εμφάνισης των επεισοδίων σκόνης (απόλυτη σε αριθμό ημερών ανά μήνα/έτος) και η έντασή τους (σε όρους φορτίου ή οπτικού βάθους σκόνης). Από τις έντονες και συνεχόμενες ημέρες επεισοδίων σκόνης (DAEDs), υπολογίζονται οι περιπτώσεις επεισοδίων σκόνης (DAECs), για η διαδοχικές ημέρες (με $n \geq 1$), αποτελούμενες από τουλάχιστον μία ημέρα επεισοδίου.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου, οι ημέρες επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης (ισχυρών και ακραίων) παρουσιάζουν εποχικό κύκλο, με μέγιστες τιμές το καλοκαίρι και την άνοιξη και ελάχιστες έως μηδενικές το φθινόπωρο και το χειμώνα, τόσο για την απόλυτη συχνότητα εμφάνισης όσο και για το οπτικό βάθος. Σε ετήσια κλιματολογική βάση, οι μεγαλύτερες τιμές της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης (ημέρες/έτος) των ισχυρών επεισοδίων σκόνης σημειώνονται στην έρημο Ταρ (Ινδία), στα νότια τμήματα του Πακιστάν και την Αραβική Θάλασσα. Όσον αφορά στις ακραίες ημέρες επεισοδίων, παρατηρούνται περισσότερο συχνά κατά τη διάρκεια της άνοιξης στις ερήμους Τακλαμακάν και Γκόμπι. Οι μεγαλύτερες τιμές του μέσου οπτικού βάθους (AOD) σημειώνονται στην περιοχή ανατολικά της ερήμου Γκόμπι, όπου βρίσκεται το Πεκίνο και η Κίτρινη Θάλασσα, και ακολουθούν η έρημος Τακλαμακάν και η Ταρ, και τέλος η Αραβική Θάλασσα.

Όσον αφορά στη διαχρονική, από το 2005 έως το 2021, μεταβολή των ισχυρών και ακραίων ημερών επεισοδίων σκόνης για το σύνολο της περιοχής μελέτης, βρέθηκε μια μειούμενη τάση της απόλυτης συχνότητας και της έντασής τους (μέσο οπτικό βάθος). Ωστόσο, σταθερή ή ελαφρώς διαχρονική αυξητική τάση βρέθηκε για τη σχετική κάλυψη της περιοχής μελέτης από τα επεισόδια. Σχετικά με τη διαχρονική

τάση μεταβολής της απόλυτης συχνότητας, της έντασης και της μέσης ετήσιας διάρκειας των DAECs, παρουσιάζεται να είναι φθίνουσα, ενώ η αντίστοιχη σχετική χωρική κάλυψη φαίνεται να έχει μικρή αυξητική τάση. Αυτή η τάση μείωσης της έντασης των περιπτώσεων επεισοδίων σκόνης σε συνδυασμό με την τάση μείωσης της συχνότητας εμφάνισής τους, δείχνει ότι οι περιπτώσεις επεισοδίων (όπως και οι ημέρες επεισοδίων) συμβαίνουν πιο σπάνια και με μικρότερη ένταση, αλλά με αυξημένη χωρική έκταση.

Abstract

In the present study, the identification of Dust Aerosol Episode Days (DAEDs) and Dust Aerosol Episode Cases (DAECs) over the broader area of Asia and Caspian Sea is attempted with a satellite algorithm, which uses contemporary satellite data for the optical properties of aerosols, and specific thresholds to them, it determines the existence or not of DAEDs and DAECs, while it discriminates them, according to their intensity, to strong and extreme ones.

The satellite algorithm input data are: spectral Aerosol Optical Depth (AOD), Aerosol Index (AI) and Ångström Exponent (α). The spectral AOD data (from which the Ångström Exponent is computed) are taken from the MODIS-Aqua Collection 6.1 dataset, while the AI data are taken from the OMI-Aura near-UV OMAERUV dataset. The algorithm operated on a daily basis, and at $1^\circ \times 1^\circ$ latitude-longitude spatial resolution for the 17-year period 2005-2021. The detection and determination of dust aerosol episodes (DAEs) is first done at pixel level through the application of specific appropriate thresholds to the algorithm input aerosol optical properties. Then, applying specific criteria for the geographical coverage of DAEs, the DAEDs are determined, consisting in days characterized by extended dust episodes. The main characteristics of DAEDs, namely their frequency of occurrence (number of episodes per month/season/year) and their intensity, in terms of dust optical depth, are computed by the algorithm. Also, the identified intense and consecutive, for n ($n \geq 1$) consecutive days, DAEDs are finally grouped into Dust Aerosol Episode Cases (DAECs).

According to the algorithm results, the Asian DAEDs (strong and extreme ones) exhibit a clear seasonality, with maximum values in summer and spring, and minimum to zero values in autumn and winter. This seasonality is observed both for their absolute frequency of occurrence and for their intensity (optical depth). On an annual climatological basis, the highest values of the absolute frequency (days/year) of heavy dust events occur in the Thar Desert (India), southern parts of Pakistan and the Arabian Sea. As for the days of extreme episodes, they are more frequent during spring in the Taklamakan and Gobi deserts. The highest AOD values are found in the area east of the Gobi Desert, where Beijing and the Yellow Sea are located, while secondarily highest values are observed over the Taklamakan and Thar deserts, and then the Arabian Sea.

Regarding the interannual variation, from 2005 to 2021, a decreasing trend for the frequency and intensity of both strong and extreme DAEDs is found. Besides, either no trend or just a slightly increasing trend was found for the variation of the relative coverage of the study area by dust episodes (during DAEDs). The interannual variation of the absolute frequency, intensity and mean annual duration of DAECs reveals decreasing trends, while the corresponding relative spatial coverage seems to have slightly increased from 2005 to 2021. The decreasing intensity of dust episode cases, along with their decreasing frequency of occurrence and their increasing spatial coverage, indicate that the days and cases with intense dust episode episodes over the greater region of Asia occur less frequently and with less intensity, but with an increased spatial extent.

Ακρωνύμια

α : Ångström Exponent

AI: Aerosol Index

AOD: Aerosol Optical Depth

BC: Black Carbon

BrOC: Brown Organic Carbon

CALIOP: Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations

CCN: Cloud Condensation Nuclei

DA: Dust Aerosol

DAE: Dust Aerosol Episode

DAEC: Dust Aerosol Episode Case

DAED: Dust Aerosol Episode Day

DB: Deep Blue

DD: Desert Dust

DOD: Dust Optical Depth

DT: Dark Target

EDAE: Extreme Dust Aerosol Episode

EDAED: Extreme Dust Aerosol Episode Day

EOS: Earth Observing System

FMI: Finnish Meteorological Institute

FM-1: Flight Model 1

GOME: Global Ozone Monitoring Experiment

GOMOS: Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars

IN: Ice Nuclei

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

MODIS: MODerate resolution Imaging Spectrometer

NASA: National Aeronautics and Space Administration

NIR: NearInfraRed

NIVR: Nederlands Instituut voor Vliegtuigontwikkeling en Ruimtevaart

OMI: Ozone Monitoring Instrument

PFM: ProtoFlight Model

SCIAMACHY: Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric
Chartography

SDAE: Strong Dust Aerosol Episode

SDAED: Strong Dust Aerosol Episode Day

STDV: Standard Deviation

SWIR: ShortWave-IR

TOMS: Total Ozone Mapping Spectrometer

UV: UltraViolet

VIS: Visible

Εισαγωγή

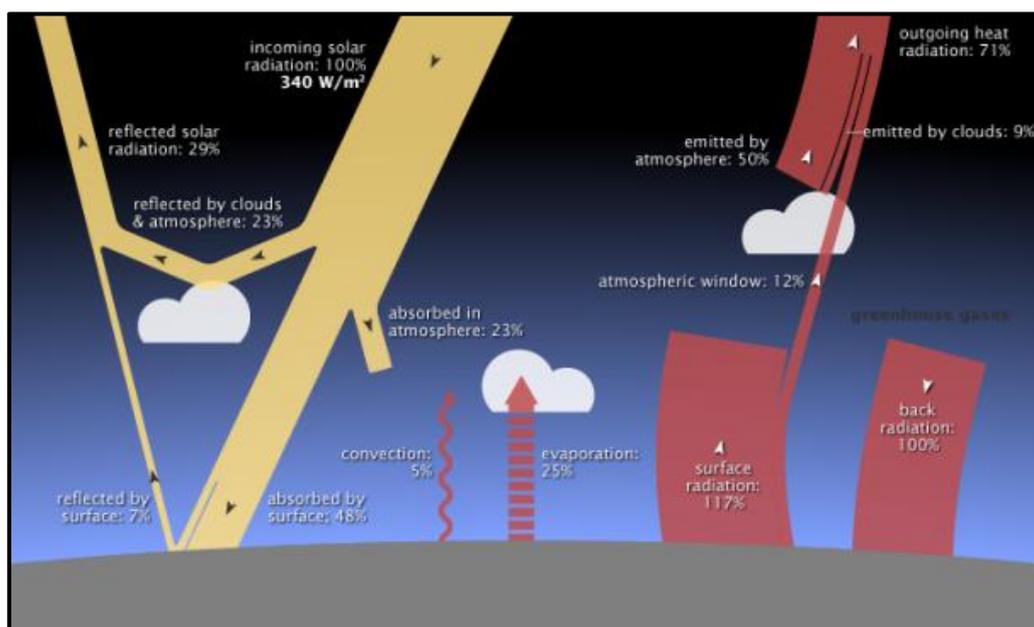
Ένα από τα θέματα που απασχολεί με ιδιαίτερο ενδιαφέρον τις τελευταίες δεκαετίες τη διεθνή επιστημονική κοινότητα, είναι το ζήτημα της κλιματικής αλλαγής που επιταχύνεται λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας (IPCC, 2013). Στο φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου έχουν προστεθεί τεράστιες ποσότητες αερίων του θερμοκηπίου, όπως διοξείδιο του άνθρακα και μεθάνιο, από ανθρωπογενείς πηγές που συνεισφέρουν στην ολοένα και αυξανόμενη θερμοκρασία του πλανήτη. Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής είναι ήδη αισθητές με συχνότερα και σοβαρότερα ακραία φαινόμενα να συμβαίνουν σε ολόκληρο τον πλανήτη σε συνάρτηση με την επιτάχυνση της θέρμανσης του πλανήτη (Seneviratne et al. 2014; Myhre et al. 2019), φαινόμενο που προβλέπεται να ενταθεί μέσα στις επόμενες δεκαετίες. Ολόκληρος ο πληθυσμός του πλανήτη είναι ευάλωτος στις τρέχουσες και επερχόμενες κλιματικές αλλαγές, σε διαφορετικό όμως βαθμό ανάλογα με τον τόπο και τρόπο που ζει. Για το λόγο αυτό διεξάγεται έρευνα σε παγκόσμιο επίπεδο από διάφορους επιστημονικούς κλάδους (όπως φυσική, χημεία, γεωλογία, ιατρική κ.ά.), για να προσεγγιστούν λύσεις και να απαντηθούν τα παραπάνω ερωτήματα.

Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο την εξέταση ενός παράγοντα που επηρεάζει το κλίμα, την υγεία των ανθρώπων ακόμη και την οικονομία περιοχών του πλανήτη, ιδιαίτερα αυτών που βρίσκονται κοντά σε ερήμους, αυτού των αερολυμάτων σκόνης (Dust Aerosols, DA), που αποτελεί κατηγορία ατμοσφαιρικών αερολυμάτων. Μέσω της παρούσας μελέτης επιδιώκεται η κατανόηση των επιπτώσεων τόσο στο περιβάλλον όσο και στην ανθρώπινη κοινωνία λόγω της εκπομπής σκόνης και της διάδοσής της σε περιοχικό και παγκόσμιο επίπεδο. Τα τελευταία χρόνια έχουν δημοσιευθεί διάφορες εργασίες που μελετούν την παρουσία ερημικής σκόνης και επεισόδια μεταφοράς της σε παγκόσμιο (Gavrouzou et al., 2021; Prospero et al., 2002) και τοπικό επίπεδο (Gkikas et al., 2016; Proestakis et al., 2018; Wang et al., 2021). Τα μεγαλύτερα ποσά αερολυμάτων σκόνης βρίσκονται στα Βόρειο Ημισφαίριο και πιο συγκεκριμένα σε μία ζώνη, η οποία εκτείνεται από τη δυτική ακτή της Βόρειας Αφρικής έως την Κεντρική Ασία και είναι γνωστή ως παγκόσμια ζώνη σκόνης (global dust belt, Ginoux et al., 2012).

Τα αερολύματα διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στις ατμοσφαιρικές διεργασίες και έχουν τόσο τοπικές όσο και παγκόσμιες επιπτώσεις. Σε τοπική κλίμακα, τα αερολύματα μπορούν να επηρεάσουν την ποιότητα του αέρα και την ορατότητα, ιδίως σε αστικές περιοχές με υψηλά επίπεδα ρύπανσης. Μπορούν επίσης να έχουν δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία όταν εισπνέονται, καθώς ορισμένα αερολύματα μπορεί να περιέχουν τοξικές ουσίες ή να χρησιμεύουν ως φορείς αλλεργιογόνων και παθογόνων μικροοργανισμών. Σε περιοχική και παγκόσμια κλίμακα, τα αερολύματα μπορούν να επηρεάσουν το κλίμα μέσω της αλληλεπίδρασής τους με την διαφόρων μηκών κύματος ακτινοβολία (Charlson et al., 1999), συγκεκριμένα με τη σκέδαση και την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας (Chou et al., 2005). Τα αερολύματα ανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία πίσω στο διάστημα, οδηγώντας σε ψύξη της γήινης επιφάνειας, ενώ επίσης απορροφούν μέρος αυτής, συμβάλλοντας στην αύξηση της θερμοκρασίας. Το φαινόμενο της πλανητικής σκίασης, δηλαδή η παρατηρούμενη μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης είναι ένα ζήτημα που

ενδιαφέρει ιδιαίτερα την επιστημονική κοινότητα καθώς σχετίζεται και με τα αυξημένα φορτία αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα (Pinker et al., 2005; Ramanathan et al., 2005).

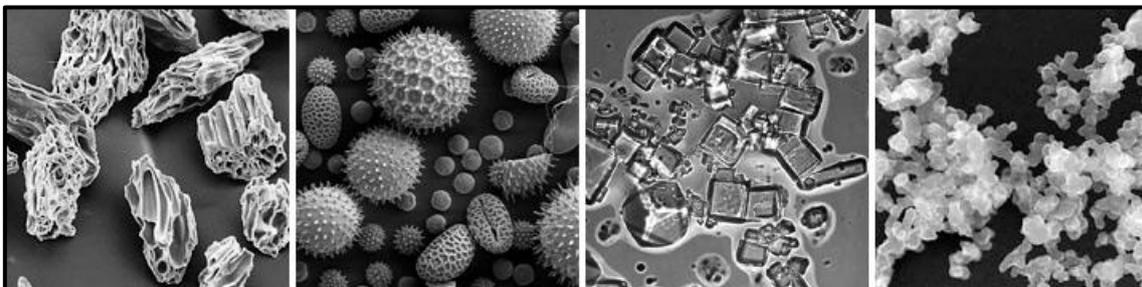
Ο Ήλιος εκπέμπει τη μικρού μήκους κύματος ηλιακή ακτινοβολία ($\lambda < 4\mu\text{m}$), η οποία απορροφάται μερικώς από τη Γη και την ατμόσφαιρά της, ενώ η ίδια η Γη (επιφάνεια και ατμόσφαιρα) εκπέμπει ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, τη λεγόμενη γήινη ή υπέρυθρη ακτινοβολία. Παρόλο που η εκπομπή ακτινοβολίας από τη Γη είναι πολύ μικρότερη από αυτήν του Ήλιου, σε μέση ετήσια βάση τα ποσοστά εκπομπής και απορρόφησης είναι περίπου ίσα. Αυτό σημαίνει ότι οι δύο αυτές συνιστώσες, η εισερχόμενη ηλιακή και η εξερχόμενη γήινη ακτινοβολία, απαρτίζουν το ενεργειακό ισοζύγιο ακτινοβολίας (radiation budget), ενώ καθορίζουν το ενεργειακό ισοζύγιο (energy budget) του συστήματος Γης - Ατμόσφαιρας. Παρότι η μέση τιμή της θερμοκρασίας σε διάφορες περιοχές του πλανήτη μπορεί να μεταβάλλεται από χρόνο σε χρόνο, το μέσο ενεργειακό ισοζύγιο του πλανήτη μεταβάλλεται ανεπαίσθητα σε ετήσια βάση. Το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής συνίσταται στη διατάραξη του ενεργειακού ισοζυγίου του συστήματος Γης-Ατμόσφαιρας. Οι διεργασίες μεταφοράς ακτινοβολίας και ενέργειας παρουσιάζονται στο Σχήμα Ε1.



Σχήμα Ε1. Σχηματική αναπαράσταση του παγκόσμιου ενεργειακού ισοζυγίου του συστήματος Γης – Ατμόσφαιρας. Τα ποσοστά είναι προσεγγιστικές τιμές που προέρχονται από παρατηρήσεις εδάφους και δορυφορικά δεδομένα (Πηγή: Lindsey, 2009)

Τα αερολύματα είναι σωματίδια που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα και προέρχονται από φυσικές (ηφαίστεια, έρημοι, πυρκαγιές, χερσαία και ωκεάνια βλάστηση) και ανθρωπογενείς πηγές (Σχήμα Ε2), και διαταράσσουν το ενεργειακό ισοζύγιο και το κλίμα του συστήματος Γης – Ατμόσφαιρας απορροφώντας ή σκεδάζοντας την ηλιακή ακτινοβολία. Με τον όρο «αερόλυμα» αναφερόμαστε σε όλα τα μικροσκοπικά σωματίδια, στερεής ή υγρής φάσης, τα οποία αιωρούνται στον ατμοσφαιρικό αέρα και είτε εκπέμπονται πρωτογενώς στην επιφάνεια της Γης, είτε παράγονται στην ατμόσφαιρα μέσω χημικών διεργασιών. Οι συγκεντρώσεις τους ποικίλουν ανάλογα

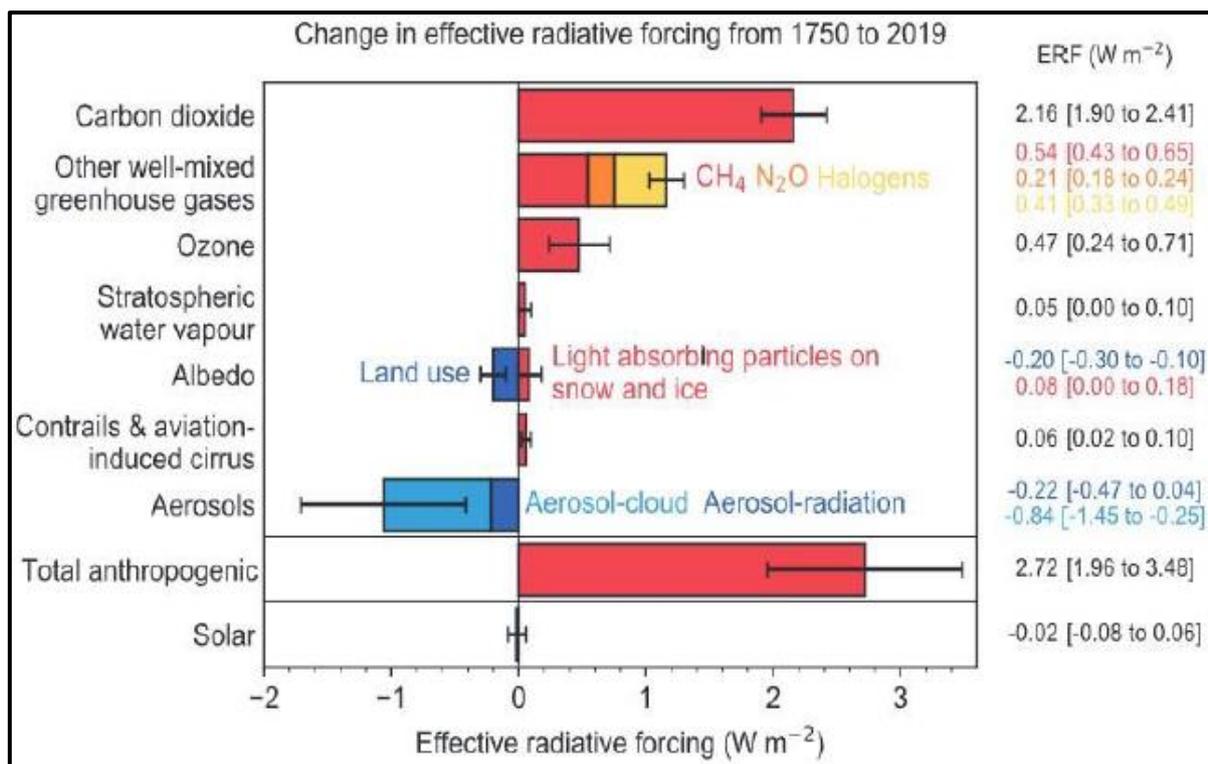
με το ύψος της ατμόσφαιρας στο οποίο βρίσκονται, με τις μεγαλύτερες να σημειώνονται κοντά στην επιφάνεια της Γης, ενώ έχουν την ικανότητα μέσω ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας να μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις από τις πηγές προέλευσής τους (Prospero, 1999; Griffin et al., 2001; Ansmann et al., 2003; Schepanski, 2018).



Σχήμα Ε2. Ατμοσφαιρικά αερολύματα όπως φαίνονται από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Από αριστερά προς τα δεξιά εμφανίζονται η ηφαιστειακή τέφρα, η γύρη, το θαλάσσιο άλας και η αιθάλη από καύσεις (Πηγή: Voiland 2010, <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Aerosols>).

Γενικά, τα αερολύματα ταξινομούνται με βάση διάφορα κριτήρια, όπως η προέλευση, το μέγεθος, η διαδικασία σχηματισμού και η χημική σύστασή τους, καθώς και ανάλογα με την επίδρασή τους στην ανθρώπινη υγεία. Τα σωματίδια απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα με δύο μηχανισμούς: μέσω της ξηρής εναπόθεσής τους (dry deposition) στην επιφάνεια της Γης λόγω βαρύτητας, και μέσω της υγρής εναπόθεσης (wet deposition), δηλαδή της ενσωμάτωσής τους στον υετό και της μεταφοράς τους στο έδαφος μέσω αυτού. Τα αερολύματα της τροπόσφαιρας ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό ως προς τη συγκέντρωση και τη σύνθεσή τους, δεδομένου ότι η γεωγραφική κατανομή των πηγών σωματιδίων είναι εξαιρετικά ανομοιόμορφη και η υγρή και η ξηρή εναπόθεση οδηγούν σε σχετικά μικρούς χρόνους παραμονής στην τροπόσφαιρα. Οι χρόνοι παραμονής τους στην τροπόσφαιρα κυμαίνονται από μερικές ημέρες έως μερικές εβδομάδες (Seinfeld and Pandis, 2006).

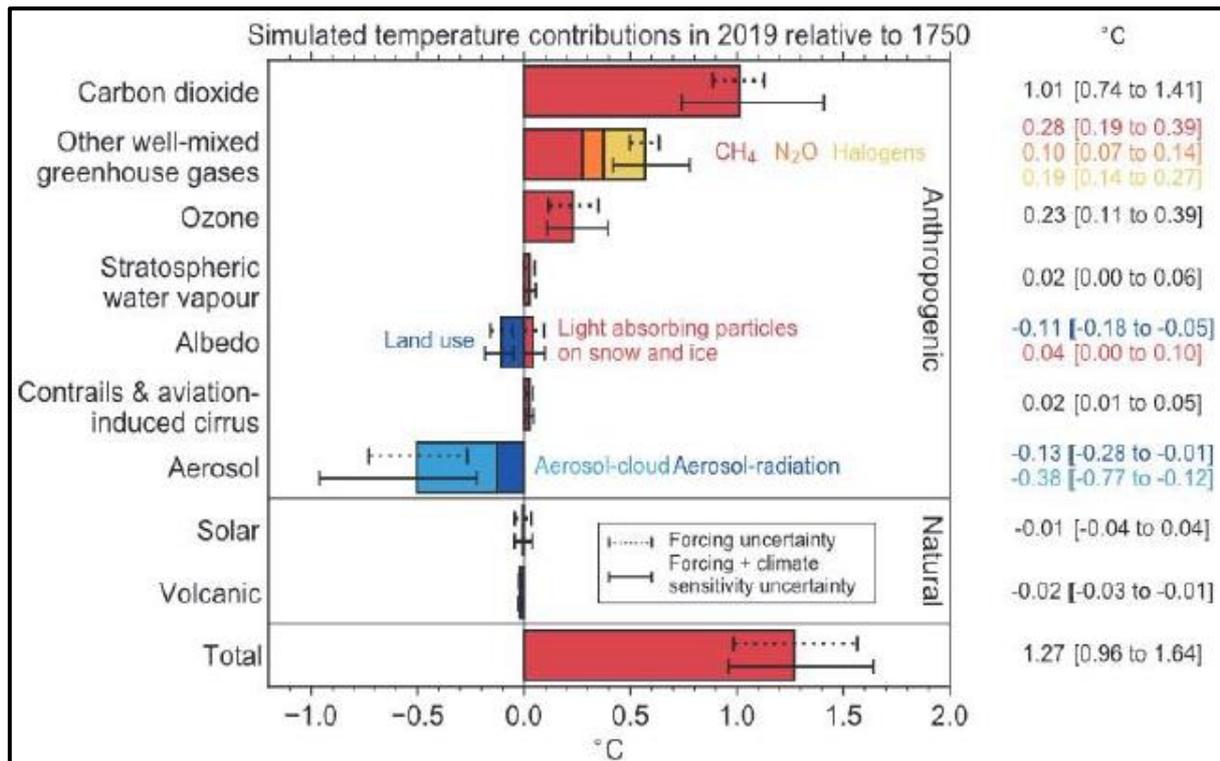
Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των αερολυμάτων είναι η επίδραση που ασκούν στο σύστημα Γης – Ατμόσφαιρας και συγκεκριμένα στο ισοζύγιο ακτινοβολίας, επομένως και στο κλίμα του πλανήτη. Σε αντίθεση με τα θερμοκηπικά αέρια που είναι γνωστή η συμβολή τους στην αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη, η επίδραση των αερολυμάτων εξακολουθεί να είναι αβέβαιη (IPCC 2013, 2021). Αυτό οφείλεται στην ποικιλία, τη χωρική και χρονική μεταβλητότητα και στους πολύπλοκους μηχανισμούς δράσης τους. Οι σημαντικότεροι παράγοντες διατάραξης του ενεργειακού ισοζυγίου Γης-Ατμόσφαιρας, σύμφωνα με την τελευταία έκθεση της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC, 2021), από την προβιομηχανική επανάσταση έως σήμερα (1750 - 2019), μαζί με τις εκτιμήσεις της συνεισφοράς του καθενός σε αυτή και της αντίστοιχης αβεβαιότητας, παρέχονται στο Σχήμα Ε3.



Σχήμα Ε3. Εκτιμώμενες μέσες πλανητικές τιμές διατάραξης της ακτινοβολίας (radiative forcing, RF) του συστήματος Γης-Ατμόσφαιρας (σε W/m²), λόγω των κυρίαρχων παραγόντων διαμόρφωσης του κλίματος, το 2019 σε σχέση με τα προβιομηχανικά έτη (Πηγή: IPCC, 2021).

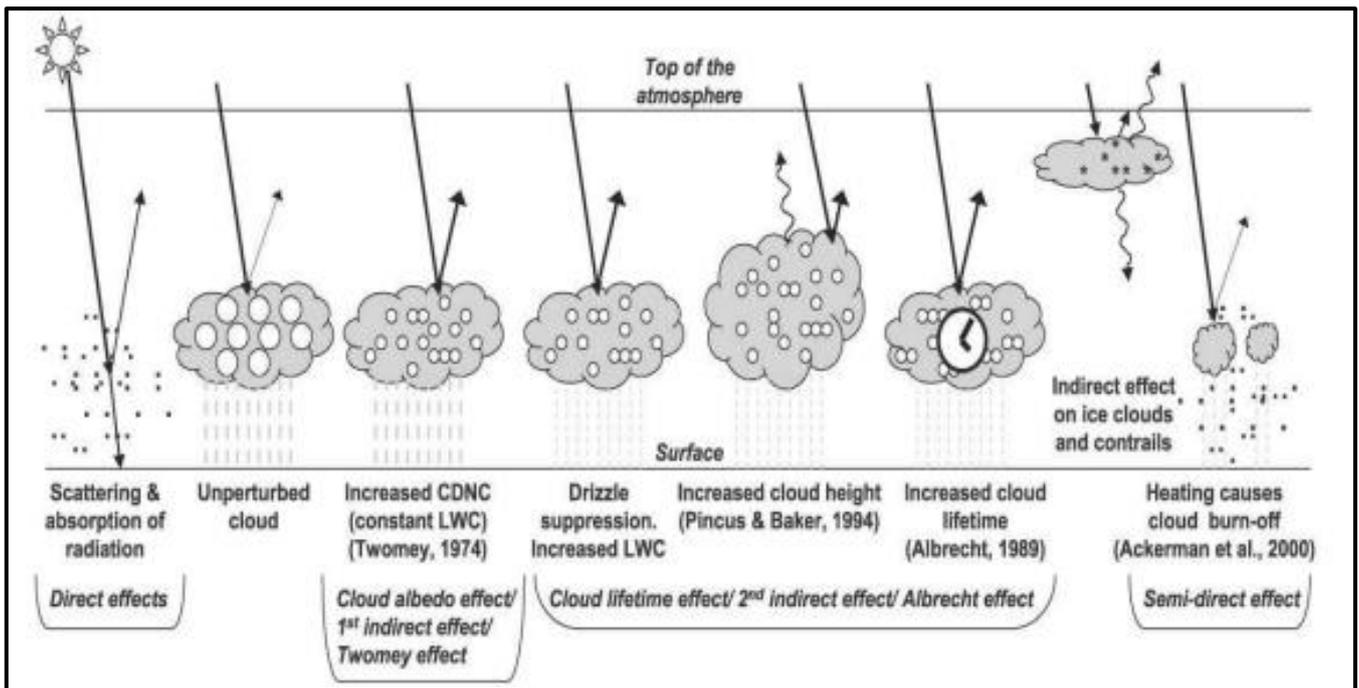
Σύμφωνα με αυτό, βλέπουμε ότι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) συνεισφέρει θετικά στη διαταραχή ακτινοβολίας κατά ένα ποσό της τάξεως του 2,16 W/m², αυξάνοντας τη θερμοκρασία του πλανήτη, ενώ τα υπόλοιπα αέρια του θερμοκηπίου συνεισφέρουν κατά 1,16 W/m². Αντίθετα, τα αερολύματα αφαιρούν από το ισοζύγιο ακτινοβολίας ένα σημαντικό ποσό της τάξης του 1,06 W/m², μειώνοντας τη θερμοκρασία του συστήματος Γης – Ατμόσφαιρας. Συνολικά, η συνεισφορά των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων και παραγόντων εκτιμάται ίση με 2,72 W/m², που βρίσκεται σε συμφωνία με την αυξανόμενη θέρμανση.

Το Σχήμα Ε4 είναι παρόμοιο με το Σχήμα Ε3, μόνο που εδώ παρουσιάζεται η διαταραχή του ισοζυγίου ακτινοβολίας εκπεφρασμένη σε όρους μεταβολής της θερμοκρασίας (σε °C). Όπως είναι φανερό, και στην περίπτωση αυτή το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) είναι το στοιχείο που συμβάλει περισσότερο στην αύξηση της θερμοκρασίας, οδηγώντας σε θέρμανση έως και 1,01 °C, κι έπειτα ακολουθούν τα υπόλοιπα αέρια του θερμοκηπίου με συμβολή 0,57 °C. Όπως και για τη διατάραξη της ακτινοβολίας, έτσι και για τη μεταβολή της θερμοκρασίας, τα ατμοσφαιρικά αερολύματα δρουν μειώνοντας τη θερμοκρασία του συστήματος Γης – Ατμόσφαιρας κατά 0,51 °C. Διαπιστώνεται ότι η δράση των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων είναι αντίθετη από αυτή των αερίων του θερμοκηπίου, προκαλώντας ψύξη και αντισταθμίζοντας την πλανητική θέρμανση, η οποία συνολικά αγγίζει τους 1,27 °C, αποτελώντας τον πιο σημαντικό αντισταθμιστικό παράγοντα του ανθρωπογενούς φαινομένου του θερμοκηπίου.



Σχήμα Ε4. Συμβολή των κυρίαρχων παραγόντων διαμόρφωσης του κλίματος της Γης, στη μεταβολή της θερμοκρασίας (σε °C) το έτος 2019 σε σχέση με τα προβιομηχανικά έτη (Πηγή: IPCC, 2021).

Οι μηχανισμοί της δράσης των αερολυμάτων είναι πολύπλοκοι και διακρίνονται τρεις τρόποι επίδρασης στο κλίμα του πλανήτη: ο άμεσος (direct effect), ο έμμεσος (indirect effect) και ο ημι-άμεσος (semi-direct effect). Ο άμεσος τρόπος αφορά στην αλληλεπίδραση των αερολυμάτων με την ηλιακή ακτινοβολία μέσω σκέδασης και απορρόφησης, ενώ ο έμμεσος τρόπος αφορά την τροποποίηση των φυσικών και οπτικών ιδιοτήτων των νεφών. Βασικές παράμετροι για τον προσδιορισμό της έμμεσης επίδρασης είναι η αποτελεσματικότητα ενός αερολύματος να λειτουργεί ως πυρήνας συμπύκνωσης νέφους (Cloud Condensation Nucleus, CCN), που είναι συνάρτηση του μεγέθους, της χημικής σύνθεσης και της κατάστασης εξωτερικής και εσωτερικής ανάμειξής τους (Hatzianastassiou et al., 1998). Επιπλέον, σύμφωνα με τον ημι-άμεσο τρόπο δράσης, τα αερολύματα μέσω της απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας θερμαίνουν τοπικά την ατμόσφαιρα προκαλώντας θέρμανση, εξάτμιση υδροσταγόνων του νέφους (Huang et al., 2006) και διάλυση των νεφών, ενώ παράλληλα μειώνουν τη σχετική υγρασία στο νέφος (Hansen et al., 1997). Στο Σχήμα Ε5 διακρίνονται οι τρεις τρόποι επίδρασης των αερολυμάτων στο κλίμα της Γης, ο άμεσος, ο έμμεσος και ο ημι-άμεσος.



Σχήμα Ε5. Μηχανισμοί επίδρασης των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων στα νέφη και το κλίμα. Οι μαύρες κουκκίδες αντιπροσωπεύουν τα αερολύματα, οι κύκλοι τα σταγονίδια των νεφών, οι ευθείες γραμμές την ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος και οι κυματιστές γραμμές την ακτινοβολία μεγάλων μηκών κύματος (Πηγή: IPCC, 2007).

Σύμφωνα με το παραπάνω Σχήμα Ε5, η άμεση επίδραση οφείλεται στη σκέδαση και απορρόφηση της ακτινοβολίας από τα ατμοσφαιρικά αερολύματα. Η έμμεση επίδραση διακρίνεται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη έμμεση επίδραση προκαλείται από την αύξηση του αριθμού και τη μείωση του μεγέθους των υδροσταγονιδίων στα νέφη, λόγω αυξημένης παρουσίας αερολυμάτων (Twomey, 1977), που οδηγεί στην αύξηση της ανακλαστικότητας των νεφών (Twomey effect or cloud albedo effect). Η δεύτερη έμμεση επίδραση είναι αποτέλεσμα της ελάττωσης του μεγέθους των υδροσταγονιδίων και συνίσταται στη μείωση της ικανότητας πρόκλησης υετού από ένα νέφος, την αύξηση της περιεκτικότητας του σε υγρής φάσης νερό και την επέκταση του χρόνου ζωής του, με τη διαδικασία αυτή να ονομάζεται φαινόμενο διάρκειας ζωής των νεφών ή φαινόμενο Albrecht (cloud lifetime effect or Albrecht effect) (Albrecht, 1989). Τέλος, στην ημι-άμεση επίδραση, η θέρμανση της ατμόσφαιρας λόγω απορρόφησης ακτινοβολίας από τα αερολύματα, μπορεί να οδηγήσει σε τροποποίηση των νεφών και στα ίχνη των αεροπλάνων (contrails) (Ackerman, 2000).

Όλες οι προαναφερθείσες αλληλεπιδράσεις των αερολυμάτων στα νέφη και το κλίμα εξαρτώνται από τις φυσικοχημικές και οπτικές ιδιότητές τους, οι οποίες με τη σειρά τους εξαρτώνται από τον τύπο των αερολυμάτων. Στην παρούσα εργασία επικεντρώνουμε το ενδιαφέρον μας στα αερολύματα σκόνης ερημικής προέλευσης, που αποτελούν έναν από τους κυρίαρχους τύπους αερολυμάτων. Η εκπομπή ερημικής σκόνης τόσο σε τοπικό όσο και σε πλανητικό, αλλά και σε χρονικό επίπεδο (εποχική και διαχρονική μεταβολή), είναι ένα φαινόμενο περίπλοκο που επηρεάζεται άμεσα από τις υπάρχουσες μετεωρολογικές συνθήκες και την ατμοσφαιρική κυκλοφορία. Στόχος της παρούσας μελέτης είναι ο προσδιορισμός και τα

χαρακτηριστικά των ημερών και περιπτώσεων επεισοδίων σκόνης ερημικής προέλευσης στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας και της Κασπίας Θάλασσας, καθώς και η μελέτη του εποχικού τους κύκλου και των διαχρονικών τάσεων μεταβολής τους. Η επιλογή της συγκεκριμένης περιοχής γίνεται για το λόγο ότι η Ασιατική ήπειρος είναι ένα από τα πιο πυκνοκατοικημένα μέρη της Γης (ειδικά η Ινδία και η Κίνα), ενώ ταυτόχρονα περιλαμβάνει κάποιες από τις μεγαλύτερες ερήμους του πλανήτη μας.

Η μεγάλη σημασία της περιοχής για τη διερεύνηση αυτών των φαινομένων, έχει οδηγήσει στη δημοσίευση εργασιών που αφορούν σε επεισόδια μεταφοράς σκόνης σε εκτεταμένη γεωγραφικά περιοχή με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων (Proestakis et al., 2018; Nobakht et al., 2021), με τη συνδυαστική χρήση δορυφορικών και επίγειων μετρήσεων (Wang et al., 2021) με χρήση δορυφορικών, επίγειων και δεδομένων επανάλυσης (reanalysis) από κλιματικά μοντέλα (Xi & Sokolik, 2016; An et al., 2018; Yao et al., 2021), με τη χρήση δορυφορικών και δεδομένων επανάλυσης (Tao et al., 2022; Han et al., 2022; Mohammadpour et al., 2022), με χρήση επίγειων και δεδομένων επανάλυσης (Kang et al., 2016) και μόνο επίγειων μετρήσεων (Indoitu et al., 2012; Bao et al., 2021).

Για μικρότερες εκτάσεις της Ασίας, έχουν δημοσιευθεί μελέτες με τη χρήση δορυφορικών και επίγειων δεδομένων (Shao et al., 2003; Kurosaki et al., 2005; Wang et al., 2008; Rashki & Kaskaoutis, 2019) ή μόνο με χρήση επίγειων μετρήσεων (Liu et al., 2021; Yang et al., 2021). Επίσης, έχουν μελετηθεί μεμονωμένα περιστατικά (cases) επεισοδίων σκόνης για μεγάλη χωρική κλίμακα με χρήση δορυφορικών και επίγειων μετρήσεων (Husar et al., 2001; Murayama et al., 2001; Darmenova et al., 2005; Lim & Chun, 2006; Zhang et al., 2018; Karami et al., 2021; Filonchuk, 2021; Gui et al., 2022; He et al., 2022) και σε συνοπτική κλίμακα με χρήση δορυφορικών προϊόντων (Nan & Wang, 2018), επίγειων μετρήσεων (Ling et al., 2011; Huang et al., 2013; Zhang et al., 2020) και δεδομένων επανάλυσης και κλιματικών μοντέλων (Banerjee et al., 2021).

Στην παρούσα εργασία, πραγματοποιείται η μελέτη των ημερών και περιπτώσεων επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης για μια εκτεταμένη γεωγραφική περιοχή, με την εφαρμογή σύγχρονων δορυφορικών δεδομένων και τη χρήση αξιόπιστου αλγόριθμου. Η εργασία αυτή έχει ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των υπάρχουσών καθώς καλύπτει για πρώτη φορά εκτεταμένη περιοχή μελέτης (μεγάλη χωρική κάλυψη της Ασίας), αλλά και αυξημένη χρονική ανάλυση (17 έτη μελέτης, 2005 - 2021). Επίσης, τα δορυφορικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται παρέχουν, όπως προείπαμε, μεγάλη χωρική κάλυψη έναντι των επίγειων μετρήσεων. Αυτό κατέστη δυνατό με τη χρήση των σύγχρονων δορυφορικών δεδομένων MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Collection C-6.1 και OMI (Ozone Monitoring Instrument) OMAERUV database. Τα δεδομένα αυτά παρέχουν φασματική πληροφορία σε υψηλή χωρική ανάλυση ($1^\circ \times 1^\circ$) σε επίπεδο κυψελίδας (pixel level) για το οπτικό βάθος αερολυμάτων (Aerosol Optical Depth, AOD) σε διάφορα μήκη κύματος, καθώς και για το δείκτη αερολυμάτων (Aerosol Index, AI), αντίστοιχα. Τα παραπάνω δεδομένα εισάγονται στον αλγόριθμο, ο οποίος αρχικά υπολογίζει τον εκθετικό παράγοντα Ångström (Ångström Exponent, α), χρησιμοποιώντας τη φασματική πληροφορία του οπτικού βάθους των αερολυμάτων. Στη συνέχεια, όπως έχει πραγματοποιηθεί σε προηγούμενη εργασία (Belimezis, 2023), εφαρμόζοντας κατάλληλα επίπεδα αποκοπής (threshold values) στις τιμές του

δείκτη αερολυμάτων και του εκθετικού παράγοντα Ångström, ο αλγόριθμος προσδιορίζει τελικά την παρουσία (ή την απουσία) των αερολυμάτων σκόνης στην ατμόσφαιρα και καταγράφει την τιμή του οπτικού βάρους (Dust Optical Depth, DOD) πάνω από κάθε γεωγραφική κυψελίδα και για κάθε ημέρα του κάθε έτους της περιόδου μελέτης. Ο αριθμός ημερών για τις οποίες ήταν διαθέσιμα όλα τα δεδομένα και δούλεψε ο αλγόριθμος καταγράφεται επίσης σε επίπεδο κυψελίδας. Στη συνέχεια, εφαρμόζοντας κατάλληλα όρια οπτικού βάρους αερολυμάτων σε κάθε κυψελίδα (pixel), σύμφωνα με τη μέση κλιματολογική τιμή του οπτικού βάρους, υπολογίζεται αν στη συγκεκριμένη κυψελίδα υφίσταται ή όχι επεισόδιο σκόνης και ταυτόχρονα το επεισόδιο κατατάσσεται είτε στα ισχυρά επεισόδια σκόνης (Strong Dust Aerosol Episode, SDAE) είτε στα ακραία επεισόδια σκόνης (Extreme Dust Aerosol Episode, EDAE). Έτσι, πραγματοποιήθηκε η ανίχνευση των επεισοδίων ερημικής σκόνης (DAEs) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας και της Κασπίας Θάλασσας (Belimezis, 2023). Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα αυτά στην παρούσα εργασία, ο αλγόριθμος προσδιορίζει σε επίπεδο κυψελίδας τις επονομαζόμενες ημέρες επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης (Dust Aerosol Episode Days, DAEDs). Τα DAEDs είναι ημέρες κατά τις οποίες συμβαίνουν έντονα DAEs σκόνης σε εκτεταμένη γεωγραφική περιοχή (πάνω από 70 κυψελίδες ή 700000 km² με ισχυρά/ακραία DAEs), ενώ, η επίμονη εμφάνιση DAEDs σε διαδοχικές ημέρες, ορίζεται ως περίπτωση επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης (Dust Aerosol Episode Cases, DAECs). Τα DAEDs, δηλαδή, κατηγοριοποιούνται σε περιπτώσεις DAECs, οι οποίες αποτελούνται από τουλάχιστον 1 έντονο DAED. Επομένως, μία περίπτωση επεισοδίου αερολυμάτων σκόνης μπορεί να διαρκεί από μία έως αρκετές συνεχόμενες ημέρες, όπως έχει μελετηθεί από τους Gavrrouzou et. al (2021), για περιοχή μελέτης όμως τη λεκάνη της Μεσογείου. Τέλος, υπολογίζονται οι μέσες μηνιαίες, εποχικές και ετήσιες τιμές της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των επεισοδίων, καθώς και η έντασή τους, αλλά και οι διαχρονικές τάσεις μεταβολής των χαρακτηριστικών των ημερών και περιπτώσεων επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από 4 Κεφάλαια και τη βιβλιογραφία. Στο Κεφάλαιο 1 παρέχεται ένα απαραίτητο συνοπτικό θεωρητικό υπόβαθρο και περιγράφονται εν συντομία τα βασικά χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες των αερολυμάτων. Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφονται αναλυτικά τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, καθώς και η μεθοδολογία και η φιλοσοφία λειτουργίας του δορυφορικού αλγορίθμου, όπως επίσης και η περιοχή μελέτης. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται και ερμηνεύονται τα αποτελέσματα του αλγορίθμου, σε γεωγραφικό, εποχικό και διαχρονικό επίπεδο. Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται σύνοψη των αποτελεσμάτων της εργασίας και εξάγονται τα κύρια συμπεράσματα. Στο τέλος, για λόγους πληρότητας παρατίθεται η σχετική βιβλιογραφία.

Κεφάλαιο 1^ο

Θεωρητικό Υπόβαθρο – Βασικοί Ορισμοί

1.1 Ορισμός ατμοσφαιρικών αερολυμάτων

Τα αερολύματα (aerosols) είναι μικροσκοπικά σωματίδια στερεής ή υγρής μορφής που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα της Γης. Αυτά τα σωματίδια, που προέρχονται είτε από φυσικές πηγές (όπως η ερημική σκόνη, το θαλασσινό αλάτι, η γύρη και η ηφαιστειακή τέφρα) είτε από ανθρωπογενείς δραστηριότητες (όπως οι βιομηχανικές διεργασίες, οι εκπομπές οχημάτων και η καύση ορυκτών καυσίμων), αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους ρύπους στην ατμόσφαιρα, ιδίως όταν έχουν ανθρωπογενή προέλευση. Παγκοσμίως, το 90%, περίπου, των αερολυμάτων εκτιμάται ότι είναι φυσικής προέλευσης, ενώ το υπόλοιπο 10%, ανθρωπογενούς (Tegen et al., 2004; Voiland, 2010). Τα αερολύματα είναι συγκεντρωμένα κυρίως στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, γνωστά και ως ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, κοντά στις πηγές παραγωγής τους. Ωστόσο, μπορούν να φτάσουν σε υψηλότερα στρώματα σε μικρότερες συγκεντρώσεις, στη στρατόσφαιρα, μέσω των ανοδικών κινήσεων του ατμοσφαιρικού αέρα και να μεταφερθούν μακριά από τις πηγές προέλευσής τους μέσω της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας (Prospero et al., 1981; Ramaswamy et al., 2017).

Παρότι η μάζα των αερολυμάτων αντιστοιχεί μόνο σε ένα πολύ μικρό ποσοστό της συνολικής μάζας της ατμόσφαιρας, παίζουν σημαντικό ρόλο αλληλοεπιδρώνοντας με άλλα συστατικά της ατμόσφαιρας και με την ακτινοβολία. Είναι ζωτικής σημασίας για τη δημιουργία νεφών, καθώς λειτουργούν ως πυρήνες συμπύκνωσής τους (Cloud Condensation Nuclei, CCN) και πυρήνες πάγου (Ice Nuclei, IN), από τα οποία σχηματίζονται σταγονίδια νέφους και κρύσταλλοι πάγου (Merikanto et al., 2009; DeMott et al., 2010). Τα αερολύματα έχουν ποικίλη διάμετρο, που κυμαίνεται από μερικά νανόμετρα (1nm) έως μερικές δεκάδες μικρόμετρα (10μm). Η διάρκεια παραμονής τους στην ατμόσφαιρα ποικίλει, καθώς εξαρτάται από το ύψος στο οποίο βρίσκονται και κυμαίνεται μεταξύ λίγων ωρών και μερικών εβδομάδων στην τροπόσφαιρα, ενώ στην στρατόσφαιρα το διάστημα αυτό μπορεί να φθάσει και τα δύο χρόνια (Boucher, 2015). Τα αερολύματα μπορούν να απομακρυνθούν από την ατμόσφαιρα μέσω δύο διαδικασιών, της ξηρής και της υγρής εναπόθεσης (dry and wet deposition) (Wesely et al., 2000; Zhenk et al., 2005).

1.2 Κατηγοριοποίηση των αερολυμάτων

Τα αερολύματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με ποικίλους τρόπους. Ένας από αυτούς αφορά στο μέγεθος της διαμέτρου τους και περιλαμβάνει δύο μεγάλες υποκατηγορίες. Μπορούν επίσης να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τον τρόπο με

τον οποίο σχηματίζονται και με τον τρόπο με τον οποίο εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα. Η ταξινόμηση των αερολυμάτων που βασίζεται στο μέγεθος της διαμέτρου τους τα διακρίνει σε δύο μεγάλες κατηγορίες (Whitby, 1978):

1. Λεπτόκοκκα ή Λεπτής Υφής ή Λεπτά αερολύματα (Fine aerosols) με διάμετρο $D_p < 2.5 \mu\text{m}$. Αυτά συχνά προέρχονται από καύση καυσίμων και βιομηχανικές διεργασίες.
2. Χονδρόκοκκα ή Χονδρής Υφής ή Αδρά αερολύματα (Coarse aerosols) με διάμετρο $2.5 \mu\text{m} < D_p < 10 \mu\text{m}$. Κυρίως προέρχονται από φυσικές διεργασίες, καθώς και από ανθρώπινες δραστηριότητες.

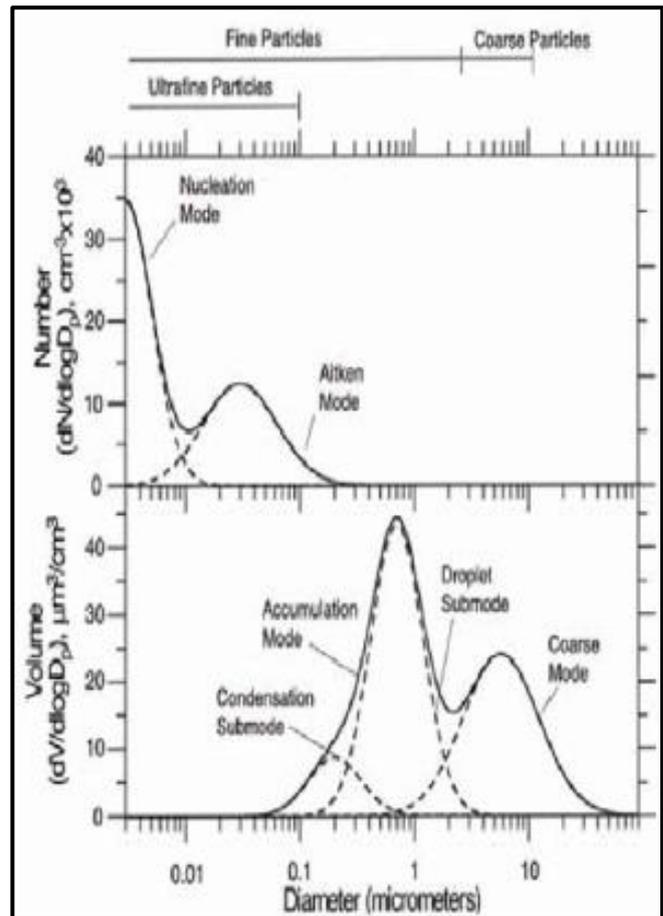
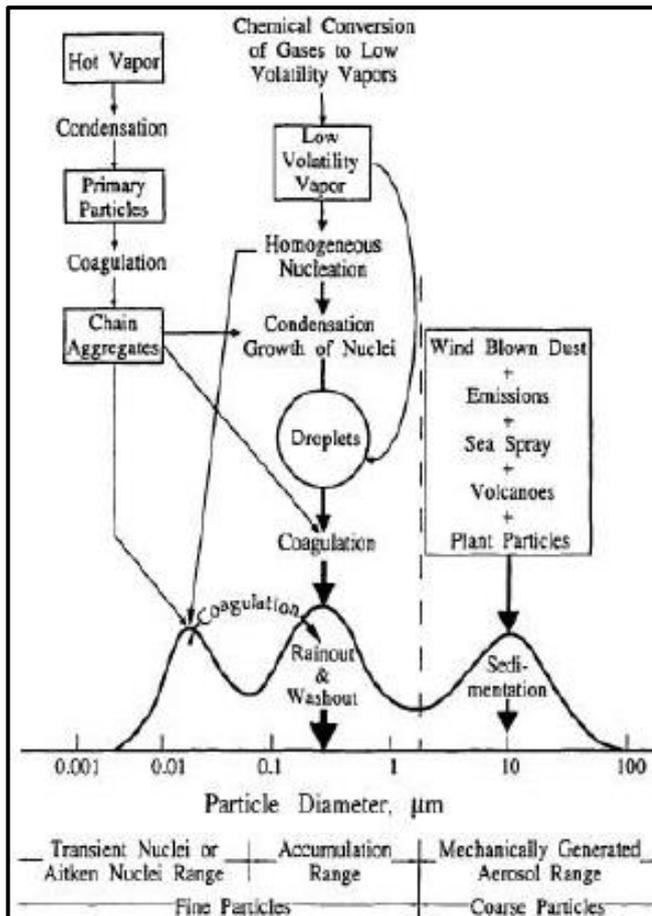
Μια περαιτέρω λεπτομερής κατηγοριοποίηση κατατάσσει τα λεπτόκοκκα αερολύματα σε:

- Αερολύματα περιοχής πυρήνωσης (nucleation mode): περιλαμβάνει τα σωματίδια με διάμετρο $D_p < 0.1 \mu\text{m}$, ενώ στη συγκεκριμένη κατηγορία ανήκουν και οι πυρήνες Aitken (Aitken nuclei), οι οποίοι είναι σωματίδια με διάμετρο $0.005 \mu\text{m} < D_p < 0.1 \mu\text{m}$. Είναι η κατηγορία των πλέον μικρών ατμοσφαιρικών σωματιδίων, τα οποία έχουν μεγάλο χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα.
- Αερολύματα περιοχής συσσώρευσης (accumulation mode): περιλαμβάνει σωματίδια με διάμετρο $0.1 \mu\text{m} < D_p < 2 \mu\text{m}$.

Πίνακας 1. Εκτιμήσεις εκπομπών των βασικών αερολυμάτων σε παγκόσμιο επίπεδο ανά έτος (Πηγή: Seinfeld and Pandis, 2006).

Source	Estimated Flux, Tg yr^{-1}	Reference
Natural		
Primary		
Mineral dust		Zender et al. (2003)
0.1-1.0 μm	48	
1.0-2.5 μm	260	
2.5-5.0 μm	609	
5.0-10.0 μm	573	
0.1-10.0 μm	1490	
Seasalt	10100	Gong et al. (2002)
Volcanic dust	30	Kiehl and Rodhe (1995)
Biological debris	50	Kiehl and Rodhe (1995)
Secondary		
Sulfates from DMS	12,4	Liao et al.(2003)
Sulfates from volcanic SO_2	20	Kiehl and Rodhe (1995)

Organic aerosol from biogenic VOC	11,2	Chung and Seinfeld (2002)
Anthropogenic		
Primary		
Industrial dust (except black carbon)	100	Kiehl and Rodhe (1995)
Black carbon	12	Liou et al. (1996)
Organic aerosol	81	Liou et al. (1996)
Secondary		
Sulfates from SO ₂	48,6	Liao et al.(2003)
Nitrates from NO _x	21,3	Liao et al.(2004)



Σχήμα 1.1. Εξιδανικευμένη σχηματική αναπαράσταση της κατανομής του μεγέθους των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων. Σημειώνονται οι βασικές τάξεις μεγέθους, οι πηγές και οι μηχανισμοί απομάκρυνσής τους (Πηγή: Seinfeld and Pandis, 1998, 2006).

Μία ακόμη κατηγοριοποίηση των αερολυμάτων αφορά στον τρόπο με τον οποίο αυτά σχηματίζονται και τα διακρίνει σε φυσικά και ανθρωπογενή αερολύματα. Τα φυσικά ή βιογενή αερολύματα προέρχονται από φυσικές διεργασίες και περιλαμβάνουν διάφορα στοιχεία όπως γύρη, σπόρους, υπολείμματα φυτών και ζώων, βακτήρια και μύκητες. Μπορούν να έχουν διαφορετικές διαστάσεις, που κυμαίνονται από μερικές δεκάδες nm έως μερικές δεκάδες μm . Ανάμεσά τους συγκαταλέγονται τα ηφαιστειακά σωματίδια, η ερημική σκόνη και το θαλάσσιο άλας, σωματίδια καπνού από πυρκαγιές, χερσαία και ωκεάνια βλάστηση. Από την άλλη

πλευρά, τα ανθρωπογενή αερολύματα προέρχονται από δραστηριότητες του ανθρώπου και συνδέονται συχνά με καύση καυσίμων και βιομηχανικές διεργασίες, όπως τα αστικά-βιομηχανικά αερολύματα και τα αερολύματα που προέρχονται από οικοδομικές ή κατασκευαστικές δραστηριότητες, την αστική θέρμανση, την αποψίλωση των δασών και την ερημοποίηση (Diner et al., 2004).

Ένας ακόμη σημαντικός διαχωρισμός των αερολυμάτων έχει να κάνει με την διάκρισή τους σε πρωτογενή και δευτερογενή. Με τον όρο πρωτογενή αναφέρονται τα αερολύματα τα οποία εκπέμπονται απευθείας στην ατμόσφαιρα, όπως καύση βιομάζας, ατελής καύση ορυκτών καυσίμων, ηφαιστειακές εκρήξεις, μεταφορά ερημικής σκόνης και θαλασσίου άλατος κλπ., ενώ ως δευτερογενή αερολύματα ορίζονται εκείνα που προκύπτουν ως αποτέλεσμα χημικών αντιδράσεων από πρόδρομες αέριες ενώσεις (Boucher et al., 2013). Κάθε χρονική στιγμή αερολύματα είτε εισέρχονται στον ατμοσφαιρικό αέρα πρωτογενώς, είτε παράγονται δευτερογενώς μέσω χημικών αντιδράσεων, ενώ περιέχουν θειικά, νιτρικά, και αμμωνιακά στοιχεία, οργανικά υλικά, οξείδια μετάλλων, ιόντα υδρογόνου και νερό, υφιστάμενα χημικές και φυσικές διεργασίες. Επομένως, η αλληλεπίδραση των αερολυμάτων με την ακτινοβολία εξαρτάται όχι μόνο από τη χωρική κατανομή τους, αλλά και από το μέγεθος, το σχήμα και τη χημική τους σύνθεση, καθώς και από τον υδρολογικό κύκλο (Boucher et al., 2013).

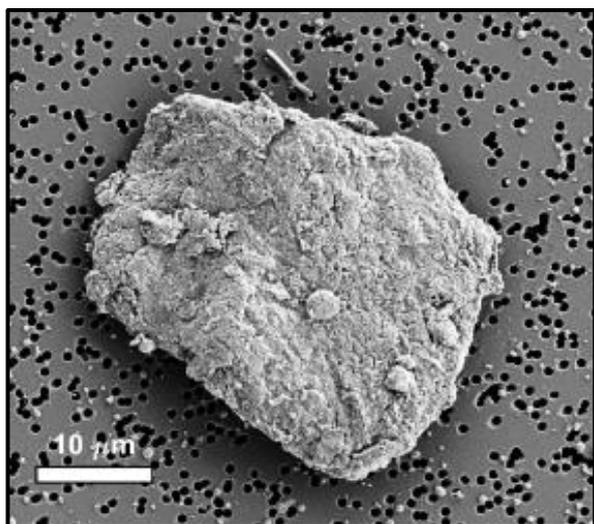
Όπως αναφέρθηκε, τα αερολύματα μπορούν να απομακρυνθούν από την ατμόσφαιρα μέσω της διαδικασίας εναπόθεσής τους στην επιφάνεια της Γης. Η εναπόθεση μπορεί να είναι είτε ξηρή (dry deposition), δηλαδή να πραγματοποιηθεί μεταφορά των αερολυμάτων στη Γη λόγω της βαρύτητας, είτε υγρή (wet deposition) κατά την οποία τα σωματίδια απομακρύνονται μέσω του υετού (Seinfeld and Pandis, 2006).

1.2.1 Ερημική σκόνη (Desert dust)

Τα αερολύματα ερημικής σκόνης είναι πανταχού παρόντα τόσο στην επιφάνεια της Γης, όσο και στον ατμοσφαιρικό αέρα και παρά το μικρό τους μέγεθος επηρεάζουν άμεσα το ενεργειακό ισοζύγιο, τον κύκλο του νερού και των χημικών στοιχείων, τα χερσαία και ωκεάνια οικοσυστήματα, καθώς και την υγεία του ανθρώπου (Sokolik, 2015). Οι σημαντικότερες πηγές σκόνης θεωρούνται οι έρημοι, οι ξηρές και οι ημίξηρες περιοχές του πλανήτη, που συνεισφέρουν το 90% της συνολικής εκπομπής σκόνης παγκοσμίως, ενώ οι γεωργικές και άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες θεωρούνται ως δευτερεύουσες πηγές σκόνης, με ποσοστό συνεισφοράς μόλις 10% (Tegen et al., 2004; Voiland, 2010). Παράγονται κυρίως από τη διάβρωση των βράχων και με την αποσάθρωση πετρωμάτων πάνω από ερήμους και άλλες άγονες επιφάνειες (Boucher et al., 2013), οι οποίες καλύπτουν περίπου το ένα τρίτο της παγκόσμιας χερσαίας έκτασης και αποτελούν σημαντικές πηγές (Seinfeld et al., 2006).

Κατατάσσονται στα χονδρά αερολύματα (coarse aerosols) και έχουν σπάνια σφαιρικό σχήμα, το οποίο μπορεί να ποικίλει από συμπαγή και στρογγυλεμένο έως λεπτή νιφάδα, όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 1.2α (Nousiainen, 2009). Το ασταθές

σχήμα τους και η απουσία υγρασίας στη δομή τους καθιστά δύσκολη τη μελέτη τους. Είναι κατά βάση αδιάλυτα στο νερό, άρα το σχήμα και η δομή τους δε μεταβάλλεται σημαντικά σε συνθήκες υγρασίας. Όμως, η επιφάνειά τους μπορεί να καλυφθεί με νερό ή πάγο σε περιβάλλον με υψηλή υγρασία, καθώς και όταν περιέχει υδρόφιλες χημικές ουσίες (όπως θειικά συστατικά) που μάλιστα σχηματίζονται κατά τη γήρανση των αερολυμάτων σκόνης. Οπότε, τα αερολύματα σκόνης παρά τη χαμηλή τους υγροσκοπικότητα (παράγοντας υγροσκοπικότητας, hygroscopicity parameter, $0.01 < k < 0.08$, Koehler et al., 2009) μπορούν υπό τέτοιες συνθήκες να δρουν ως CCN σε συνθήκες υποκορεσμού. Ένα επεισόδιο μεταφοράς ερημικής σκόνης πάνω από την περιοχή της Κασπίας Θάλασσας φαίνεται στο Σχήμα 1.2β. Το επεισόδιο αυτό συνέβη στις 6 Ιουνίου του 2016, με τη σκόνη να μεταφέρεται από τις ερημικές περιοχές ανατολικά της Κασπίας (Τουρκμενιστάν).



(α)



(β)

Σχήμα 1.2. (α) Αερόλυμα ερημικής σκόνης, όπως φαίνεται από μικροσκόπιο ηλεκτρονίων και (β) Επεισόδιο μεταφοράς ερημικής σκόνης την 6^η Ιουνίου 2016 (Πηγή: Dror et al., 2020; NASA).

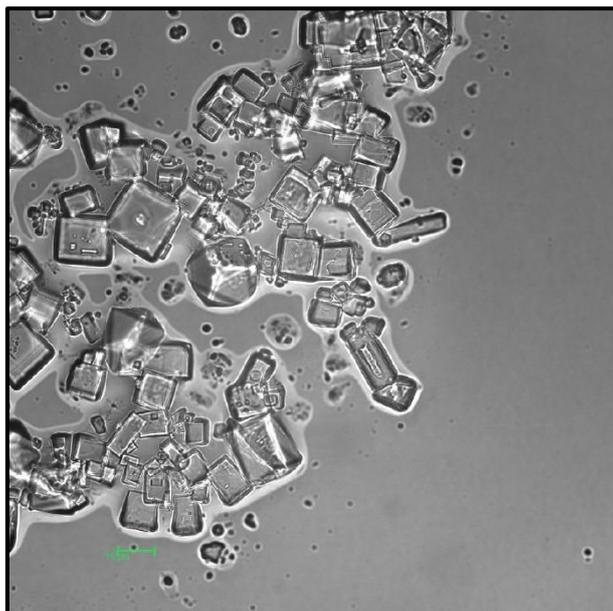
Οι σημαντικότερες πηγές σκόνης φυσικής προέλευσης συναντώνται κυρίως στον Ισημερινό και το Βόρειο Ημισφαίριο, όπου βρίσκονται και οι μεγαλύτερες έρημοι και λιγότερο στο Νότιο Ημισφαίριο (Gkikas et al., 2013). Η Έρημος Σαχάρα αποτελεί τη μεγαλύτερη πηγή σκόνης ερημικής προέλευσης παγκοσμίως, η οποία μεταφέρεται κυρίως προς τη Μεσόγειο Θάλασσα και τον Ατλαντικό Ωκεανό (Prospero and Carlson, 1972; Rodriguez et al., 2001). Άλλες περιοχές με μεγάλη συνεισφορά είναι η Αραβική Χερσόνησος, οι έρημοι Γκόμπι και Τακλαμακάν στην ανατολική Ασία, περιοχές στη βορειοδυτική Ινδία, η Έρημος Ατακάμα στη Νότια Αμερική, η Έρημος Καλαχάρι στη Νότια Αφρική, καθώς και ερημικές περιοχές στην Αυστραλία (Σχήμα 1.3).



Σχήμα 1.3. Οι σημαντικότερες πηγές ερημικής σκόνης του πλανήτη (Πηγή: NASA)

1.2.2 Θαλάσσια αερολύματα (Sea salt aerosols)

Τα θαλάσσια αερολύματα παράγονται μέσω της δράσης του ανέμου στην επιφάνεια της θάλασσας. Τα αερολύματα αυτά αποτελούνται από χλωριούχο νάτριο (NaCl) και δημιουργούνται στην επιφάνεια των ωκεανών λόγω της θραύσης των κυμάτων. Τα μεγαλύτερα σταγονίδια παραμένουν κοντά στην περιοχή όπου προέρχονται, ενώ τα μικρότερα σωματίδια με μεγέθη 0.1 έως 1 μm μπορούν να εισέλθουν στην ατμόσφαιρα και να παραμείνουν εκεί για μεγάλο χρονικό διάστημα (Kokhanovsky et al., 2008). Το σχήμα των σωματιδίων αυτών εξαρτάται από την υγρασία. Σε συνθήκες χαμηλής υγρασίας έχουν κυβικό σχήμα (Σχήμα 1.4), γεγονός που οφείλεται στην κυβική δομή του NaCl , το οποίο όμως είναι ευδιάλυτο στο νερό. Συνεπώς, τα αερολύματα αυτά που βρίσκονται πάνω από τις ωκεάνιες περιοχές όπου οι τιμές της σχετικής υγρασίας είναι υψηλές, αποκτούν σφαιρικό σχήμα. Λόγω της υδρόφιλης χημικής τους σύστασης δρουν ως πυρήνες συμπύκνωσης νεφών (CCN), συνεπώς ο ρόλος τους στην έμμεση επίδραση των αερολυμάτων είναι ύψιστης σημασίας (Guo et al., 2022).

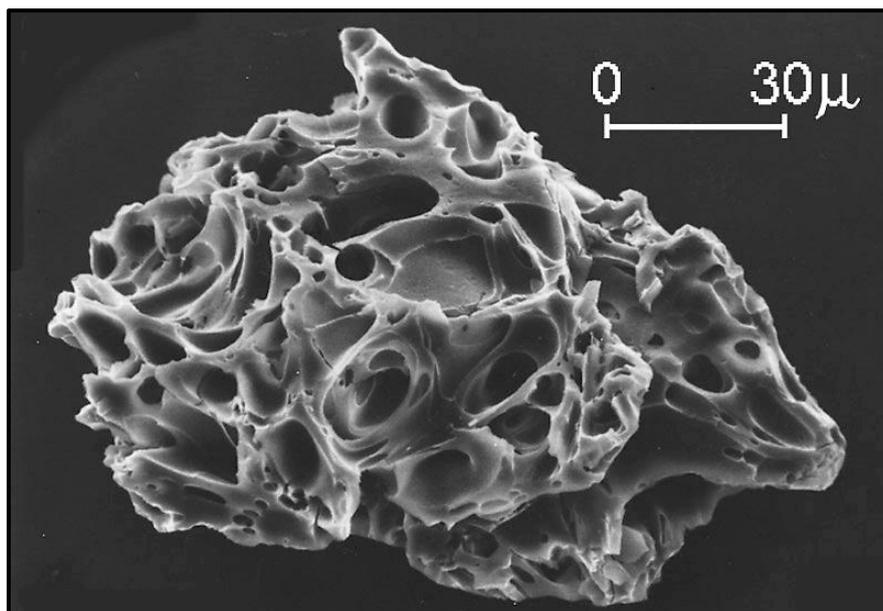


Σχήμα 1.4. Εικόνα θαλάσσιου αερολύματος, όπως φαίνεται από μικροσκόπιο ηλεκτρονίων (Πηγή: NASA, https://svs.gsfc.nasa.gov/10390#media_group_355097).

1.2.3 Ηφαιστειακά αερολύματα (Volcanic aerosols)

Τα ηφαιστειακά αερολύματα εισέρχονται στον ατμοσφαιρικό αέρα μέσω της ηφαιστειακής δραστηριότητας. Τα περισσότερα από αυτά τα σωματίδια είναι αδιάλυτα στο νερό. Κατά τη διάρκεια μιας ηφαιστειακής έκρηξης εκλύονται στην ατμόσφαιρα μεγάλα ποσά διοξειδίου του θείου (SiO_2), οξειδίου του αργιλίου (Al_2O_3) και οξειδίου του σιδήρου (Fe_2O_3), τα οποία παραμένουν στην τροπόσφαιρα και στη συνέχεια με διάφορες χημικές διεργασίες μετατρέπονται σε θειικά άλατα. Οι ηφαιστειακές πηγές παίζουν σημαντικό ρόλο στο φορτίο θειούχων αερολυμάτων κυρίως στα ανώτερα τμήματα της τροπόσφαιρας, όπου μπορούν να λειτουργήσουν ως πυρήνες συμπύκνωσης πάγου και να επηρεάσουν το ισοζύγιο της ακτινοβολίας. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορούν να εισέλθουν και στη στρατόσφαιρα, όπου η διάρκεια ζωής τους είναι 1-2 μήνες, λόγω της απομάκρυνσης με καθίζηση (Kokhanovsky et al., 2008).

Τα ηφαιστειακά αερολύματα με οπτικό βάθος στο ορατό 0,15, τα οποία όπως προαναφέρθηκε εισάγονται στην κατώτερη στρατόσφαιρα, έχουν επίδραση που διερευνάται για διαφορετικές χρονικές κλίμακες. Η επίδραση αυτή είναι στιγμιαία στη θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας, επίδραση για τα πρώτα χρόνια (με μικρή ψύξη της τροπόσφαιρας) και μακροπρόθεσμη επίδραση (50 χρόνια με σημαντική ψύξη της τροπόσφαιρας) (Rind et al., 1992). Χαρακτηριστικό παράδειγμα πρόσφατης ισχυρής ηφαιστειακής έκρηξης αποτελεί η έκρηξη του ηφαιστείου Pinatubo στις Φιλιππίνες τον Ιούνιο του 1991, όπου τα αερολύματα έφτασαν σε ύψος 40km στη στρατόσφαιρα και παρέμειναν εκεί για μεγάλο χρονικό διάστημα (Self et al., 1993). Η έκρηξη αυτή χαρακτηρίζεται ως η μεγαλύτερη ηφαιστειακή έκρηξη του 20ου αιώνα.



Σχήμα 1.5. Ηφαιστειακό αερόλυμα, όπως φαίνεται από μικροσκόπιο ηλεκτρονίων (Πηγή: NASA, https://svs.gsfc.nasa.gov/10392#media_group_355103).

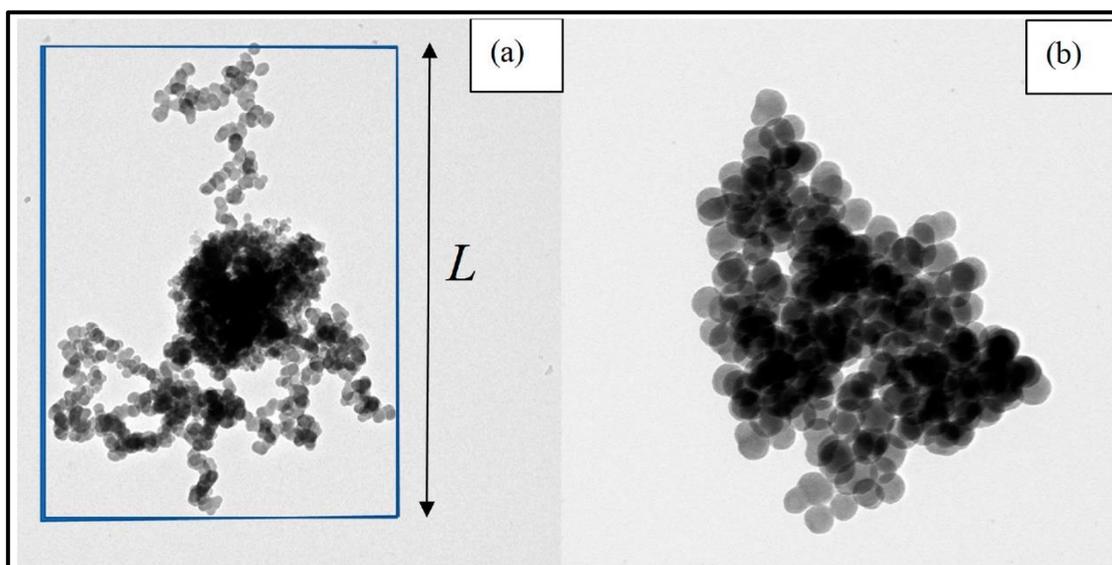
1.2.4 Αερολύματα καύσης βιομάζας (Biomass burning aerosols)

Η καύση βιομάζας αποτελεί σημαντική πηγή ατμοσφαιρικών σωματιδίων με επιπτώσεις στην υγεία, το κλίμα και την ποιότητα του αέρα. Το μεγαλύτερο μέρος αυτών των διαδικασιών καύσης εντοπίζεται στις τροπικές περιοχές (Hatzianastassiou et al., 2019), κυρίως κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου, και παράγει μεταξύ άλλων υδρογονάνθρακες, μεθάνιο, θειικά, νιτρικά και οργανικά χημικά συστατικά, καθώς και μαύρο άνθρακα (Black Carbon, BC) (Andreae et al., 2001). Τα αερολύματα αυτά είναι λεπτόκοκκα, με διάμετρο που κυμαίνεται 0.1 και 0.2 μm και αποτελούνται τόσο από το μαύρο άνθρακα, που είναι ιδιαίτερα απορροφητικός, όσο και από καστανό οργανικό άνθρακα (Brown Organic Carbon, BrOC) που είναι λιγότερο απορροφητικός (Saleh et al., 2014).

Κύριες πηγές προέλευσης των αερολυμάτων καύσης βιομάζας θεωρούνται οι πυρκαγιές που εκδηλώνονται σε μεγάλες δασικές εκτάσεις (π.χ. δάσος Αμαζονίου), οι καύσεις που εκδηλώνονται λόγω γεωργικών-κτηνοτροφικών δραστηριοτήτων και τέλος οι πυρκαγιές σε περιοχές σαβάνας (εκτάσεις κάτω από την έρημο Σαχάρα). Η ποσότητα και ο τύπος των εκπομπών αερολυμάτων από καύση βιομάζας εξαρτάται όχι μόνο από τον τύπο και την περιεκτικότητα σε υγρασία της βλάστησης, αλλά και από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, την υγρασία της ατμόσφαιρας και την ταχύτητα του ανέμου σε αυτή την περιοχή.

Τα αερολύματα που προέρχονται από καύση βιομάζας μπορούν να δρουν άμεσα κατά την παραγωγή τους ως πυρήνες συμπύκνωσης (CCN) των νεφών (Bougiatioti et al., 2016) και να επηρεάζουν τη βροχόπτωση (Lee et al., 2010), ενώ η ικανότητα τους αυτή να δρουν ως CCN αυξάνεται σε συνάρτηση με το χρόνο παραμονής τους στην

ατμόσφαιρα (Lohmann and Feichter, 2005). Εκτός από τη δημιουργία νεφών, μπορούν να δράσουν και με αντίθετο τρόπο, δηλαδή στη νεφοδιάλυση. Αυτό συμβαίνει όταν μέσα στο νέφος υπάρχει μεγάλος αριθμός απορροφητικών σωματιδίων τα οποία θερμαίνουν το νέφος και οδηγούν στη διάλυση του.



Σχήμα 1.6. Αερολύματα καύσης βιομάζας, όπως φαίνονται από μικροσκόπιο ηλεκτρονίων. (α) Σωματίδια από καύσιμο ευκάλυπτου και (β) Σωματίδια από καύσιμη ύλη ελιάς (Πηγή: Sarpong et al., 2020).

1.3 Οπτικές ιδιότητες των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων

Τα αερολύματα έχουν ορισμένες ιδιότητες που αφορούν στον τρόπο που αυτά αλληλεπιδρούν με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, είτε σκεδάζοντάς την είτε απορροφώντας την. Κάθε τύπος αερολύματος έχει διαφορετικές οπτικές ιδιότητες που εξαρτώνται από το μέγεθος, τη σύσταση και την υγρασία της ατμόσφαιρας ενώ έχουν άμεση εξάρτηση από το μήκος κύματος.

Οι σημαντικότερες παράμετροι που χαρακτηρίζουν τη σκέδαση και την απορρόφηση της ακτινοβολίας από ένα σωματίδιο αερολύματος είναι:

1. Το μήκος κύματος (λ) της προσπίπτουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας
2. Το μέγεθος του σωματιδίου σε σχέση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, που εκφράζεται με ένα αδιάστατο μέγεθος, την παράμετρο μεγέθους α . Ορίζεται ως ο λόγος της περιμέτρου του σφαιρικού σωματιδίου προς το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας

$$\alpha = \frac{\pi D_p}{\lambda} \quad (1.1)$$

3. Ο δείκτης διάθλασης του σωματιδίου που χαρακτηρίζει τις οπτικές ιδιότητές του σε σχέση με το περιβάλλον οπτικό μέσο

$$N = n + ik \quad (1.2)$$

Υπάρχουν διάφορες οπτικές ιδιότητες, όμως στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται το οπτικό βάθος των αερολυμάτων (Aerosol Optical Depth, AOD), ο εκθετικός παράγοντας Ångström (Ångström Exponent, α) και ο δείκτης αερολυμάτων (Aerosol Index, AI), ιδιότητες οι οποίες αναλύονται παρακάτω.

1.3.1 Οπτικό βάθος αερολυμάτων (Aerosol Optical Depth, AOD)

Το οπτικό βάθος ή πάχος των αερολυμάτων (AOD), είναι ένας κανονικοποιημένος συντελεστής εξασθένησης της άμεσης εισερχόμενης ακτινοβολίας που οφείλεται στη σκέδαση και την απορρόφηση των αερολυμάτων και αποτελεί ένα μέτρο των αερολυμάτων που περιέχονται σε μια κατακόρυφη στήλη της ατμόσφαιρας. Η εξασθένηση της ακτινοβολίας είτε με απορρόφηση είτε με σκέδαση ακολουθεί μία εκθετική μεταβολή σύμφωνα με το νόμο Beer - Lambert και η σχέση που περιγράφει τη διεργασία αυτή είναι η εξής:

$$I(z, \lambda) = I_0(\lambda) \exp \left[- \int_0^z b(z', \lambda) dz' \right] \quad (1.3)$$

όπου αν θεωρήσουμε τη διάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα σε όλη την ατμόσφαιρα και τα αερολύματα που αυτή περιέχει:

I: η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, στο έδαφος

I₀: η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στο ανώτατο όριο της γήινης ατμόσφαιρας

λ: το μήκος κύματος της ακτινοβολίας

z: η απόσταση που διανύει η ακτινοβολία σε ένα στρώμα αιωρούμενων σωματιδίων

b: ο συντελεστής εξασθένησης των αερολυμάτων

Το οπτικό βάθος τ σε ένα στρώμα πάχους z , ορίζεται ως το ολοκλήρωμα του συντελεστή εξασθένησης προς την απόσταση που διανύει η ακτινοβολία:

$$\tau(z) = \int_0^z b(\lambda, z') dz \quad (1.4)$$

Το συνολικό οπτικό βάθος αερολυμάτων είναι άθροισμα του οπτικού τους βάθους λόγω της σκέδασης και του οπτικού τους βάθους λόγω της απορρόφησης:

$$\tau = \tau_{abs} + \tau_{sc} \quad (1.5)$$

Το AOD αποτελεί τη σημαντικότερη οπτική ιδιότητα των αερολυμάτων δηλώνοντας το φορτίο τους στον ατμοσφαιρικό αέρα και αποτελώντας ταυτόχρονα ένα μέτρο της αέριας θόλωσης. Παίζει σημαντικό ρόλο στη μεταφορά ακτινοβολίας, στο κλίμα και στα γενικά μοντέλα κυκλοφορίας των σωματιδίων (Korras-Carraca et al., 2015). Παρουσιάζει έντονη εξάρτηση από το μήκος κύματος, λαμβάνοντας μέγιστες τιμές για μικρά μήκη όπου η σκέδαση είναι εντονότερη. Διακρίνεται για την εποχική μεταβλητότητά του, έχοντας γενικά μικρότερες τιμές κατά την υγρή και μεγαλύτερες κατά την ξηρή περίοδο του έτους (Paradimas et al., 2008; Hatzianastassiou et al. 2009).

1.3.2 Εκθετικός παράγοντας Ångström (Ångström Exponent, α)

Η εξάρτηση του συντελεστή εξασθένησης από το μήκος κύματος παριστάνεται με την εκθετική σχέση της μορφής:

$$b_e \approx \lambda^{-\alpha} \quad (1.6)$$

όπου:

b_e : ο συντελεστής εξασθένησης

α : ο παράγοντας Ångström

λ : το μήκος κύματος

Ο εκθέτης Ångström, ο οποίος εκφράζει το μέγεθος του σωματιδίου, υπολογίζεται από μετρήσεις του συντελεστή εξασθένησης για διάφορα μήκη κύματος. Στην περίπτωση όπου έχουμε δύο μήκη κύματος λ_1 και λ_2 , η σχέση με την οποία υπολογίζεται ο εκθέτης είναι:

$$\alpha = -\frac{d \log b_e}{d \log \lambda} \cong \frac{\log \frac{b_{e1}}{b_{e2}}}{\log \frac{\lambda_1}{\lambda_2}} \quad (1.7)$$

Ο παράγοντας αυτός είναι χρήσιμος για το διαχωρισμό του μεγέθους των διαφόρων αερολυμάτων σε σωματίδια μικρού μεγέθους (λεπτής υφής) και μεγάλου μεγέθους (χονδρής υφής). Σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, όταν ο εκθετικός παράγοντας Ångström λαμβάνει τιμές $\alpha < 1$ (Holben et al., 2001), τα σωματίδια είναι

μεγάλου μεγέθους χονδρόκοκκα αερολύματα (π.χ. ερημική σκόνη). Αντιθέτως, για τιμές $\alpha > 1$ (Dubovik et al., 2000; Gkikas et al., 2015), υπάρχει παρουσία λεπτόκοκκων σωματιδίων (π.χ. ανθρακούχα αερολύματα).

1.3.3 Δείκτης αερολυμάτων (Aerosol Index, AI)

Ο δείκτης αερολυμάτων (AI) αποτελεί έναν ποιοτικό δείκτη, που υποδεικνύει την παρουσία αερολυμάτων με σημαντική απορρόφηση. Ποσοτικοποιεί τη διαφορά μεταξύ της φασματικής εξάρτησης της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας σε ατμόσφαιρα που περιέχει μόνο αέρια (Rayleigh) και εκείνης σε ατμόσφαιρα η οποία περιέχει αερολύματα. Ο υπολογισμός του δείκτη στηρίζεται στη φασματική αντίθεση (contrast) σε μια περιοχή της υπεριώδους ακτινοβολίας στην οποία το όζον δεν απορροφά. Ο δείκτης αερολυμάτων ορίζεται, στην περίπτωση των μετρήσεων TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) και OMI (Ozone Monitoring Instrument), να είναι:

$$AI = 100 \log_{10} \left(\frac{I_{360}^{Meas}}{I_{360}^{Calc}} \right) \quad (1.8)$$

όπου I_{360}^{Meas} είναι η μετρούμενη (με αερολύματα) και I_{360}^{Calc} η θεωρητικά υπολογιζόμενη (χωρίς αερολύματα) οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία στα 360nm.

Οι θετικές τιμές του AI υποδηλώνουν την παρουσία απορροφητικών (absorbing) αερολυμάτων (π.χ. ερημική σκόνη) (Prospero et al., 2002), ενώ αντίθετα οι αρνητικές τιμές υποδηλώνουν την παρουσία μη απορροφητικών ή καθαρά σκεδαζόντων αερολυμάτων (π.χ. θαλάσσιο άλας).

Κεφάλαιο 2^ο

Μεθοδολογία – Δεδομένα

2.1 Δορυφορικά δεδομένα MODIS (MODIS satellite data)

Το φασματικό ραδιομέτρο MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (Σχήμα 2.1) αποτελεί σύγχρονο όργανο, το οποίο είναι τοποθετημένο στους δορυφόρους TERRA (γνωστό ως EOS AM-1) και AQUA (γνωστό ως EOS PM-1 της NASA). Πραγματοποιεί μετρήσεις με υψηλή φασματική ανάλυση σε 36 φασματικές ζώνες, σε ένα εύρος μηκών κύματος από 0.4 έως 14.2 nm, με χωρική διακριτική ικανότητα του οργάνου ίση με 250 m (στο ορατό-VIS, φασματικά κανάλια 1 και 2), 500 m (στο κοντινό υπέρυθρο-NIR, φασματικά κανάλια 3-7) και 1 km (στα φασματικά κανάλια 8-36). Το $\pm 55^\circ$ πεδίο σάρωσής του στο ύψος των 705 km πάνω από την επιφάνεια της Γης, επιτυγχάνει ένα εύρος σάρωσης ίσο με 2330 km και παρέχει παγκόσμια κάλυψη κάθε μία με δύο ημέρες. Το πρώτο ραδιόμετρο MODIS (ProtoFlight Model ή PFM) τοποθετήθηκε στο δορυφόρο Terra (EOS AM-1), ο οποίος εκτοξεύτηκε στις 18 Δεκεμβρίου 1999 και παρέχει δεδομένα από το Μάρτιο του 2000, έως το δεύτερο (Flight Model 1 ή FM-1) τοποθετήθηκε στο δορυφόρο Aqua (EOS PM-1), ο οποίος εκτοξεύτηκε στις 4 Μαΐου 2002 και παρέχει δεδομένα από το Μάιο του 2003. Οι πολικές τροχιές δορυφόροι του προγράμματος Earth Observing System (EOS) της NASA (National Aeronautic and Space Administration), περιστρέφονται με αντίθετες τροχιές (από βορρά προς νότο και αντίστροφα), περνώντας πάνω από το επίπεδο του Ισημερινού (overpass) στις 10:30 UTC ο TERRA και στις 13:30 UTC ο AQUA, αντίστοιχα. Τα όργανα του MODIS προσφέρουν δεδομένα για χερσαίες, ατμοσφαιρικές και ωκεάνιες περιοχές.



Σχήμα 2.1. Ο δορυφόρος AQUA της NASA (Πηγή: <https://www.worldofitech.com/modis-satellite/>).

Το ραδιόμετρο MODIS συλλέγει την ανακλώμενη ακτινοβολία, η οποία προέρχεται από την επιφάνεια της Γης, αλλά και από ολόκληρη την ατμοσφαιρική στήλη και με την εφαρμογή συγκεκριμένων αλγορίθμων ανεύρεσης που χρησιμοποιούν διάφορες φασματικές ζώνες στο ορατό (visible, VIS), το κοντινό υπέρυθρο (nearinfrared, NIR) και το ηλιακό υπέρυθρο (shortwave-IR, SWIR), εκτιμώνται οι διάφορες φυσικές και οπτικές ιδιότητες των αερολυμάτων. Οι ιδιότητες εξάγονται μέσω των αλγορίθμων ανάκτησης (retrieval algorithms) που εφαρμόζονται ξεχωριστά πάνω από ηπειρωτικές και θαλάσσιες εκτάσεις (Kaufman et al., 1997; Tanré et al., 1997; Remer et al., 2002). Χρησιμοποιούνται τρεις διαφορετικοί αλγόριθμοι ανάκτησης: δύο Dark Target (DT)- ένας για την ανάκτηση δεδομένων πάνω από την ξηρά και ένας πάνω από τους ωκεανούς (Kaufman et al., 1997; Levy et al., 2007), και ένας Deep Blue (DB), για ανάκτηση δεδομένων πάνω από ξηρές επιφάνειες (Hsu et al., 2013).



Σχήμα 2.2. Μεταφερόμενη σκόνη από την Έρημο Σαχάρα πάνω από τον Ατλαντικό Ωκεανό στις 16 Αυγούστου 2023, από το δορυφόρο Aqua της NASA (Πηγή: NASA, <https://modis.gsfc.nasa.gov/gallery/>).

Τα δεδομένα MODIS ταξινομούνται σε διαφορετικά επίπεδα (Levels). Τα δεδομένα του Επιπέδου 1 (Level 1) αποτελούν πρωτογενείς μετρήσεις (χωρίς επεξεργασία), το Επίπεδο 2 (Level 2) είναι δεδομένα υψηλής γεωγραφικής ανάλυσης (π.χ. για τα αερολύματα είναι 10 km x 10 km), ενώ, τέλος, τα δεδομένα του Επιπέδου 3 (Level 3) έχουν χωρική ανάλυση 1° x 1° γεωγραφικό μήκος και πλάτος (περίπου 100 km x 100 km). Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιούνται δεδομένα Επιπέδου 3 (Level 3) της τελευταίας συλλογής, Collection C-6.1 από το δορυφόρο AQUA. Το MODIS παρέχει φασματική πληροφορία οπτικού πάχους αερολυμάτων (AOD) και είναι διαθέσιμο σε

7 κανάλια μηκών κύματος 0.47, 0.55, 0.65, 0.86, 1.24, 1.63 και 2.13 μm , για την εκτίμησή τους πάνω από τη θάλασσα, και σε 3 κανάλια 0.47, 0.55 και 0.66 μm , για την εκτίμησή τους πάνω από ξηρά.

2.2 Δορυφορικά δεδομένα OMI (OMI satellite data)

Το φασματοφωτόμετρο OMI (Ozone Monitoring Instrument) κατασκευάστηκε από τη διαστημική Υπηρεσία της Ολλανδίας (NIVR, Nederlands Instituut voor Vliegtuigontwikkeling en Ruimtevaart) σε συνεργασία με το Ινστιτούτο Μετεωρολογίας της Φινλανδίας (FMI, Finnish Meteorological Institute) στα πλαίσια του προγράμματος Earth Observing System (EOS) της NASA και βρίσκεται στο δορυφόρο πολικής τροχιάς AURA (γνωστός ως EOS CH-1) (Σχήμα 2.3). Ο δορυφόρος AURA (Σχήμα) εκτοξεύτηκε στις 15 Ιουλίου 2004 και βρίσκεται σε υψόμετρο περίπου 710 km πάνω από την επιφάνεια της Γης, ενώ διέρχεται από τον Ισημερινό στις 13:15 τοπική ώρα. Το OMI (Σχήμα 2.3) αποτελεί το μεταγενέστερο/διάδοχο όργανο του ραδιομέτρου TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer), του GOME (Global Ozone Monitoring Experiment), του SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography) και του GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars). Το OMI συνδυάζει τα πλεονεκτήματα όλων των προγενέστερων οργάνων από αυτό, καθώς πραγματοποιεί μετρήσεις σε όλο το φάσμα των μηκών κύματος (υπεριώδες/ορατό/κοντινό υπέρυθρο) και με υψηλή χωρική (από 13 km \times 24 km έως και 13 km \times 12 km) και χρονική (καθημερινή κάλυψη) ανάλυση. Καταγράφει την ανακλώμενη από τη Γη (επιφάνεια και ατμόσφαιρα) ηλιακή ακτινοβολία σε ολόκληρο το φάσμα μηκών κύματος από 270 έως 500 nm, με μία φασματική ανάλυση περίπου 0.5 nm. Η 114° γωνία κάλυψης του τηλεσκοπίου αντιστοιχεί σε ένα εύρος σάρωσης στην επιφάνεια της Γης ίσο με 2600 km που επιτρέπει την καθημερινή παγκόσμια κάλυψη.



Σχήμα 2.3. Δορυφόρος EOS Aura της NASA με το φασματοφωτόμετρο OMI που είναι τοποθετημένο σε αυτόν (Πηγή: <https://www.tno.nl/en/newsroom/2023/05/satellite-instrument-omi-orbits-earth/>).

Το OMI αρχικά, σχεδιάστηκε για τη μέτρηση και παρακολούθηση του όζοντος (O_3) και ως εκ τούτου καταγράφει τις τιμές όζοντος στην τροπόσφαιρα και στην στρατόσφαιρα, καθώς και τιμές των χημικών ενώσεων NO_2 , SO , $OCIO$, BrO , $HCHO$ που είναι υπεύθυνες για την καταστροφή του. Ωστόσο, οι μετρήσεις του σε συνδυασμό με την ανάπτυξη κατάλληλου αλγορίθμου ανάκτησης, επέτρεψαν την εξαγωγή πληροφορίας σχετικής με τα αερολύματα. Επιτρέπει μετρήσεις στην υπεριώδη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (nearUV) της ηλιακής ακτινοβολίας, όπου στη συγκεκριμένη φασματική περιοχή παρουσιάζουν μεγάλες τιμές απορροφητικότητας οι περισσότερες κατηγορίες αερολυμάτων, όπως τα αερολύματα ερημικής προέλευσης, καύσης βιομάζας και τα ανθρωπογενούς 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 αερολυμάτων (AI), από τους αλγορίθμους ανεύρεσης των οπτικών ιδιοτήτων των αερολυμάτων (Torres et al., 2007). Στην τελευταία έκδοση των δεδομένων (OMAERUV) έχουν εφαρμοσθεί ειδικά φίλτρα για την εξάλειψη της συνεισφοράς των νεφών, τα οποία αποτελούν τον κύριο παράγοντα αβεβαιότητας στην ανάκτηση των προϊόντων των αερολυμάτων.

2.3 Ορισμός ημερών και περιπτώσεων επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης (Dust Aerosol Episode Days, DAEDs; Dust Aerosol Episode Cases, DAECs)

Οι ημέρες επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης (Dust Aerosol Episode Days, DAEDs), προσδιορίζονται σε παγκόσμιο ή τοπικό επίπεδο, βάσει των επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης (Dust Aerosol Episode, DAE). Τα DAEs υπολογίστηκαν σε επίπεδο κυψελίδας (pixel) σε προηγούμενη εργασία (Belimezis, 2023) για την ίδια περιοχή μελέτης που χρησιμοποιούμε στην παρούσα εργασία. Τα DAEDs είναι ημέρες κατά τις οποίες παρατηρούνται έντονα DAEs (ισχυρά και ακραία) με εκτεταμένη χωρική κάλυψη (πάνω από 70 κυψελίδες ή 700000 km^2 με ισχυρά/ακραία DAEs). Όταν τα DAEDs παρατηρούνται για μία ή/και περισσότερες διαδοχικές ημέρες n (με $n \geq 1$), τότε έχουμε τις επονομαζόμενες περιπτώσεις επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης (Dust Aerosol Episode Cases, DAECs). Οι περιπτώσεις αυτές αποτελούνται από τουλάχιστον μία ημέρα επεισοδίου σκόνης (DAED) που αφορά είτε ισχυρά είτε ακραία επεισόδια.

2.4 Μεθοδολογία

Η παρούσα εργασία στοχεύει στον προσδιορισμό των ημερών και των περιπτώσεων ισχυρών επεισοδίων ερημικής σκόνης, καθώς και στην ανίχνευση των χαρακτηριστικών τους, στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας και της Κασπίας Θάλασσας για τη χρονική περίοδο 2005-2021. Για την επιλογή της περιόδου μελέτης εφαρμόστηκε το κριτήριο της ταυτόχρονης διαθεσιμότητας των δορυφορικών δεδομένων MODIS και OMI. Όσον αφορά στην προαναφερθείσα μεθοδολογία, αυτή έλαβε υπόψη ότι τα αερολύματα ερημικής σκόνης εντάσσονται στην κατηγορία των

α) χονδρόκοκκων και β) απορροφητικών αερολυμάτων, δύο κύρια χαρακτηριστικά που τα διαχωρίζουν από τα υπόλοιπα αερολύματα, τα οποία διαθέτουν μία ή και καμία από τις δύο αυτές ιδιότητες. Στη συγκεκριμένη δυνατότητα ανίχνευσής τους βασίζεται και η λογική του δορυφορικού αλγορίθμου, ο οποίος έχει αναπτυχθεί και χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των αερολυμάτων ερημικής σκόνης.

Ο αλγόριθμος δέχεται ως δεδομένα εισαγωγής (input data), ημερήσια δεδομένα MODIS και OMI γεωγραφικής ανάλυσης $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ (ή 100 km x 100 km) και προσδιορίζει την παρουσία (ή την απουσία) αερολυμάτων σκόνης στην κάθε κυψελίδα (pixel) για κάθε ημέρα ξεχωριστά, της περιόδου από 1η Ιανουαρίου 2005 έως 31 Δεκεμβρίου 2021. Για την εύρεση των αερολυμάτων ερημικής σκόνης, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί δορυφορικά δεδομένα για τις εξής οπτικές ιδιότητες των αερολυμάτων, οι οποίες χαρακτηρίζουν ποιοτικά και ποσοτικά το φορτίο, το μέγεθος και την απορροφητικότητα των αερολυμάτων αυτών:

i. Το (φασματικό) οπτικό βάθος αερολυμάτων (AOD)

ii. Το δείκτη (απορρόφησης) των αερολυμάτων (AI)

iii. Τον εκθετικό παράγοντα Ångström (α)

Οι δύο πρώτες ιδιότητες (AOD και AI) παρέχονται άμεσα από τις βάσεις δεδομένων MODIS και OMI, αντίστοιχα, ενώ ο εκθετικός παράγοντας Ångström (α) υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση 1.7, από το λόγο των τιμών του οπτικού βάθους στα 470 nm και στα 660 nm πάνω από ξηρά, ενώ πάνω από τους ωκεανούς χρησιμοποιήθηκαν τα μήκη κύματος 470 nm και 2130 nm. Επισημαίνεται ότι για να λειτουργήσει ο αλγόριθμος χρειάζεται την ταυτόχρονη ύπαρξη (διαθεσιμότητα) των δεδομένων εισαγωγής και για τις δύο παραμέτρους, δηλαδή του παράγοντα Ångström (α) και του δείκτη των αερολυμάτων (AI). Εάν η μία ή και οι δύο παράμετροι δεν είναι διαθέσιμες, γεγονός που μπορεί να οφείλεται σε αδυναμία ανάκτησης των σχετικών οπτικών ιδιοτήτων των αερολυμάτων από τους αλγορίθμους ανάκτησης MODIS και OMI, τότε ο αλγόριθμος δε λειτουργεί και δεν πραγματοποιεί υπολογισμό.

Στην παρούσα εργασία έγινε συνδυαστική χρήση δεδομένων MODIS από τους αλγορίθμους Dark Target (DT) και Deep Blue (DB). Ο DB δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού/ανάκτησης δεδομένων οπτικού βάθους αερολυμάτων (AOD) πάνω από (μεγάλης λευκαύγειας) ερημικές εκτάσεις και ξηρές επιφάνειες, σε αντίθεση με τον αλγόριθμο DT, ο οποίος δεν κάνει ανάκτηση και δεν παρέχει δεδομένα πάνω από ερήμους, αλλά μόνο πάνω από ωκεανούς και την ξηρά (εκτός ερημικών περιοχών). Για τα OMI δεδομένα χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος OMI near-UV (OMAERUV), ο οποίος χρησιμοποιεί δύο μήκη κύματος υπεριώδους ακτινοβολίας (354 nm και 388 nm) για να εξαγάγει την εξασθένιση και απορρόφηση των αερολυμάτων. Οι παραπάνω εκδόσεις (MODIS C6.1 και OMAERUV) είναι και οι νεότερες που υπάρχουν.

Ο αλγόριθμος έχει αναπτυχθεί με τη φιλοσοφία ότι για να υπάρχουν αερολύματα σκόνης πάνω από μια γεωγραφική κυψελίδα (pixel), θα πρέπει οι τιμές του α και του AI να κυμαίνονται εντός συγκεκριμένων ορίων, τα οποία εξασφαλίζουν την παρουσία χονδρόκοκκων και απορροφητικών αερολυμάτων. Τα όρια αυτά ονομάζονται

οριακές τιμές ή όρια/επίπεδα αποκοπής (threshold values) και έχουν αποτελέσει αντικείμενο έρευνας διεθνώς. Οι Gkikas et al. (2013, 2016) προσδιόρισαν για τα αερολύματα σκόνης για τον εκθετικό παράγοντα Ångström (α) άνω όριο την τιμή 0.7 και για το δείκτη των αερολυμάτων (AI) την τιμή 1 σαν κάτω όριο. Στο συγκεκριμένο αλγόριθμο, όπως εξηγείται και στην εργασία (Belimezis, 2023), χρησιμοποιούνται τα κριτήρια για συγκεκριμένα threshold values, τα οποία θα πρέπει να πληρούνται ταυτόχρονα, ώστε το αερόλυμα να είναι ερημική σκόνη:

1) AI > 1

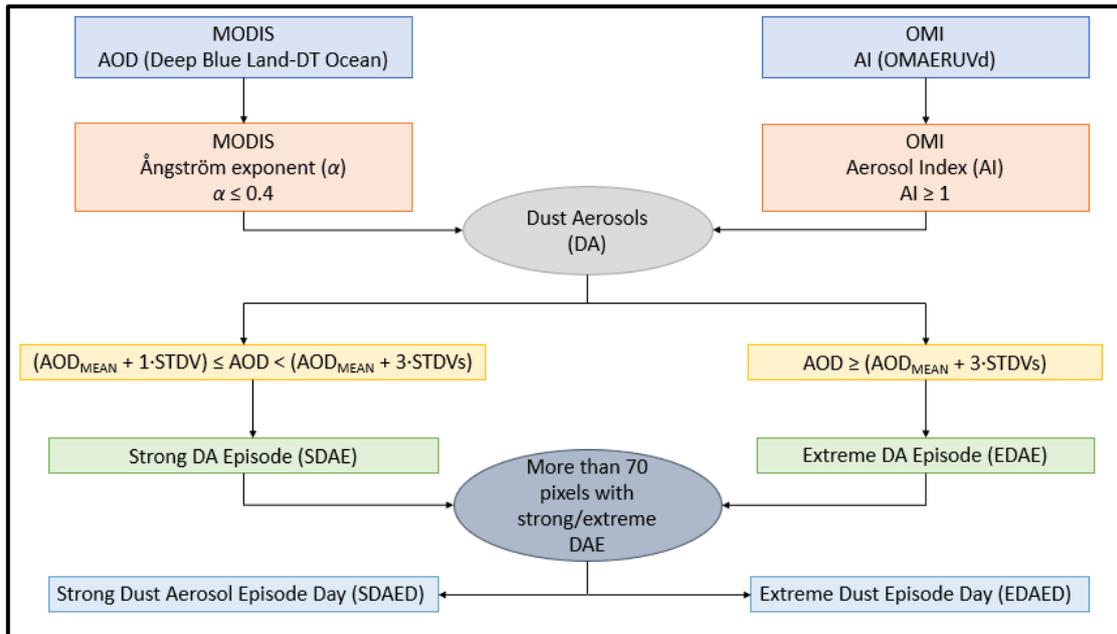
2) $\alpha \leq 0.4$

Το επόμενο στάδιο στον αλγόριθμο είναι ο εντοπισμός των επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης (DAEs) και η ταξινόμησή τους ανάλογα με την έντασή τους, σε ισχυρά (strong) ή ακραία (extreme). Ο εντοπισμός αυτός και η ταξινόμηση των επεισοδίων πραγματοποιήθηκε (Belimezis, 2023), χρησιμοποιώντας τη μέση τιμή (mean value) και την τυπική απόκλιση (standard deviation) των τιμών του οπτικού βάθους των αερολυμάτων (AOD). Οι δύο αυτές τιμές περιγράφουν την ποσότητα του φορτίου των αερολυμάτων σε κλιματολογική κλίμακα (μέση τιμή), καθώς επίσης και τη χρονική μεταβλητότητά του (τυπική απόκλιση). Ο υπολογισμός των επιπέδων αποκοπής, πραγματοποιείται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$Threshold_i = \overline{AOD_{550nm}} + i * STDV, \text{ με } i = 1 \text{ ή } 3 \quad (2.1)$$

όπου ο όρος $Threshold_i$ είναι η τιμή του επιπέδου αποκοπής του AOD, που ισούται με το άθροισμα της μέσης τιμής του οπτικού βάθους στα 550 nm και της αντίστοιχης μέσης τυπικής απόκλισης ($i=1$) ή της τριπλάσιας ($i=3$) μέσης τυπικής του απόκλισης (STDV). Επομένως, βάσει της Εξίσωσης (2.1), ορίζονται δύο επίπεδα αποκοπής (με βάση το οπτικό βάθος των αερολυμάτων), τα οποία χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση των επεισοδίων βάσει της έντασής τους, τα ισχυρά (strong) και τα ακραία (extreme). Αν σε μια μοναδιαία κυψελίδα τηρείται η συνθήκη ($AOD_{MEAN} + 1 \cdot STDV$) \leq $AOD < (AOD_{MEAN} + 3 \cdot STDVs)$, τότε έχουμε ισχυρό επεισόδιο (SDAE), ενώ αν τηρείται η συνθήκη $AOD \geq (AOD_{MEAN} + 3 \cdot STDVs)$, τότε συμβαίνει ακραίο επεισόδιο σκόνης (EDAE).

Οι τιμές του i προσδιορίστηκαν κατόπιν βιβλιογραφικής έρευνας (Gkikas et al., 2013; Gavrouzou et al., 2021) και μιας σειράς δοκιμαστικών τρεξιμάτων του αλγορίθμου (trial runs). Αρχικά, επιλέχθηκαν οι τιμές του i να είναι 2 και 4 για τον προσδιορισμό των επεισοδίων σκόνης, όπως σε προηγούμενη έρευνα για την περιοχή της Μεσογείου, όμως αυτές οι τιμές δεν κρίθηκαν αντιπροσωπευτικές για την τωρινή περιοχή μελέτης (Ασίας). Τα όρια αποκοπής (threshold values) για τα ισχυρά και ακραία επεισόδια υπολογίστηκαν (Belimezis, 2023) και παρέχονται στο Παράρτημα (Σχήμα Π1). Η μεθοδολογία του αλγορίθμου συνοψίζεται και στο διάγραμμα ροής (flowchart) του Σχήματος 2.4.



Σχήμα 2.4. Διάγραμμα ροής της δομής και της λειτουργίας του δορυφορικού αλγόριθμου για τον εντοπισμό των επεισοδίων σκόνης (DAEs) και των ημερών επεισοδίων σκόνης (DAEDs) στην Ασία.

Στη συνέχεια, βάσει των αποτελεσμάτων του αλγόριθμου, προσδιορίζονται οι ημέρες επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης από την ύπαρξη έντονων DAEs (ισχυρά και ακραία) με εκτεταμένη χωρική κάλυψη (πάνω από 70 κυψελίδες ή 700000 km² με ισχυρά/ακραία DAEs) και ταξινομούνται και πάλι σε ισχυρές και ακραίες ημέρες επεισοδίων. Έχοντας, επίσης, την πληροφορία για το οπτικό βάθος των αερολυμάτων σκόνης, από τη μεσοποίηση σε επίπεδο κυψελίδας υπολογίζονται οι κατανομές της συχνότητας και της έντασης των αερολυμάτων σκόνης σε μηνιαίο, εποχικό και ετήσιο επίπεδο. Έτσι υπολογίζεται η χωρική (γεωγραφική) κατανομή των επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης στην περιοχή ενδιαφέροντος. Εκτός, από την απόλυτη συχνότητα εμφάνισης των επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης, ο αλγόριθμος παρέχει πληροφορία για το φορτίο της σκόνης, δηλαδή το οπτικό της βάθος (Dust Optical Depth, DOD), το οποίο αποτελεί μέτρο του φορτίου, χρησιμοποιώντας τις τιμές του AOD για τις κυψελίδες κατά τις ημέρες που αυτά ανιχνεύθηκαν. Έπειτα, όπως και για τη συχνότητα, υπολογίζονται οι μέσες ετήσιες τιμές του οπτικού βάθους της σκόνης, με αντίστοιχη μεσοποίηση των ημερησίων τιμών.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας για τις ημέρες επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης, με την εργασία για τα επεισόδια αερολυμάτων σκόνης (Belimezis, 2023), παρατηρείται ότι η χωρική κατανομή των τιμών παρουσιάζει μεγάλη ομοιότητα. Ωστόσο, οι τιμές της απόλυτης συχνότητας των αερολυμάτων σκόνης διαφέρουν κατά μία τάξη μεγέθους. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς ημέρες επεισοδίων σκόνης έχουμε μόνο στις περιπτώσεις όπου η χωρική κάλυψη της περιοχής ξεπερνάει τις 70 κυψελίδες, άρα και η συχνότητα εμφάνισής τους είναι μικρότερη.

2.5 Περιοχή μελέτης

Η Ασία είναι η μεγαλύτερη ήπειρος της Γης καταλαμβάνοντας 43,82 εκατομμύρια km², δηλαδή περίπου το 8,7% της συνολικής επιφάνειας της Γης και το 30% της ξηράς. Αποτελεί την ήπειρο με τους περισσότερους κατοίκους, με πληθυσμό περίπου το 59,1% του παγκόσμιου πληθυσμού. Η Ασία βρίσκεται κυρίως στο Βόρειο Ημισφαίριο, ξεκινώντας από τον ισημερινό και φτάνοντας έως το βόρειο πόλο. Λόγω της τεράστιας έκτασής της και του ποικιλόμορφου αναγλύφου, υπάρχει επίσης μεγάλη ποικιλία στο κλίμα, πράγμα που καθιστά δυνατό να χωριστεί σε τέσσερις διακριτές ζώνες: την αρκτική, την εύκρατη, την τροπική και την ισημερινή. Οι βροχές που σημειώνονται εξαρτώνται από τη μορφολογία του εδάφους και το κλίμα, με τις περισσότερες να καταγράφονται στη νότια περιοχή των Ιμαλαΐων που βρίσκεται στην τροπική ζώνη, όπου κι έχει σημειωθεί παγκόσμιο ρεκόρ βροχοπτώσεων. Αντίθετα, σε άλλες περιοχές της Ασίας όπως η αρκτική ζώνη, το κλίμα είναι πιο ξηρό. Στην Κεντρική Ασία βρίσκεται το Όρος Έβερεστ το οποίο ανήκει στην Οροσειρά των Ιμαλαΐων, αποτελώντας την υψηλότερη κορυφή της Γης από την επιφάνεια της θάλασσας με υψόμετρο 8848 μέτρων.

Ο βασικός λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε η Ασία ως περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας είναι ότι στην ήπειρο αυτή βρίσκονται οι σημαντικότερες ερημικές περιοχές, που είναι υπεύθυνες για την εξαγωγή μεγάλων φορτίων ερημικής σκόνης στην ατμόσφαιρα κάθε χρόνο. Στον Πίνακα 2, έπειτα από βιβλιογραφική αναζήτηση, παρουσιάζονται οι συνολικές ερημικές εκτάσεις ή έρημοι, που περικλείονται στην περιοχή μελέτης, μαζί με την εδαφική τους έκταση. Συνολικά αποτελούν περίπου το 13% της έκτασης της υπό μελέτη περιοχής.

Πίνακας 2. Ερημικές περιοχές της περιοχής μελέτης, με την αντίστοιχη έκτασή τους.

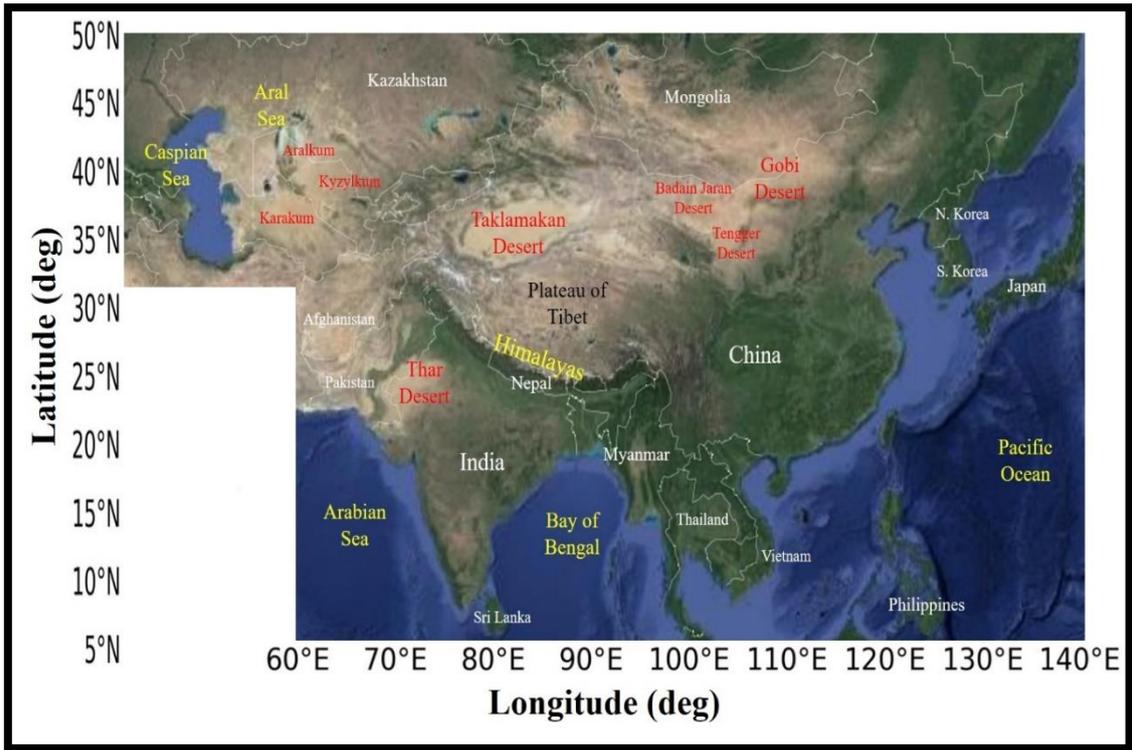
	Έρημοι	Έκταση (km²)
1	Gobi Desert	2300000
2	Karakum Desert	350000
3	Taklamakan Desert	337000
4	Kyzylkum Desert	300000
5	Thar Desert	238000
6	Ordos Desert	216000
7	Ustyurt Desert	200000
8	Dasht-e Margo Desert	150000
9	Registan Desert	150000
10	Dasht-e Kavir Desert	77600
11	Ladakh Desert	59150
12	Loot Desert	51800
13	Lop Desert	50000
14	Gurbantünggüt Desert	50000
15	Badain Jaran Desert	49200
16	Mu Us Desert	48300
17	Kharan Desert	48000

18	Aralkum Desert	40000
19	Tengger Desert	36700
20	Qaidam Desert	35000
21	Cholistan Desert	25800
22	Kumtag Desert	22800
23	Indus Valley Desert	19500
24	Kubuqi Desert	18600
25	Hobq Desert	14500
26	Ulan Buh Desert	12000
27	Thal Desert	10000

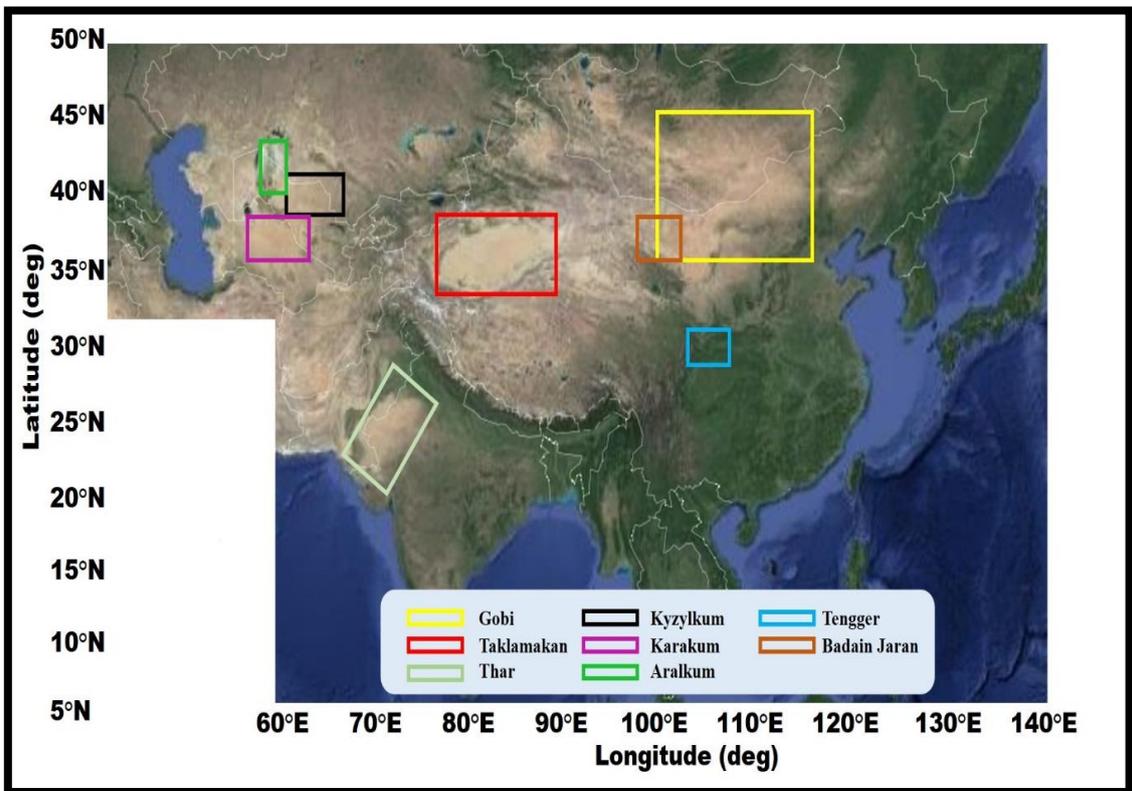
Η μεγαλύτερη και σημαντικότερη ερημική έκταση που ευθύνεται σε μεγάλο βαθμό για την παραγωγή ερημικής σκόνης είναι η Έρημος Γκόμπι που βρίσκεται στην ανατολική Ασία. Η μέση έκτασή της είναι 2,3 εκατομμύρια km², αποτελώντας την τρίτη μεγαλύτερη έρημο στον πλανήτη, μετά τη Σαχάρα και την Αραβική Έρημο. Μεγάλο μέρος της Γκόμπι δεν είναι αμμώδες, αλλά είναι βραχώδες και λόγω της τεράστιας έκτασής της το κλίμα της ποικίλει σημαντικά. Το βόρειο τμήμα της είναι πολύ ξηρό και κρύο λόγω της οροσειράς των Ιμαλαίων που εμποδίζει τις υγρές αέριες μάζες από τον Ινδικό Ωκεανό, ενώ το νότιο τμήμα της είναι πιο υγρό λόγω των θερινών μουσώνων που επικρατούν. Μία ακόμη σημαντική περιοχή που εξάγει μεγάλα ποσά ερημικής σκόνης είναι η Έρημος Τακλαμακάν. Βρίσκεται στην κεντρική Ασία, είναι ψυχρή έρημος και αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες αμμώδεις ερήμους στον κόσμο με έκταση 337000 km².

Επιπλέον, μία σημαντική ερημική έκταση είναι η Έρημος Ταρ που βρίσκεται στο βορειοδυτικό τμήμα της Ινδικής Χερσονήσου. Έχει έκταση περίπου 238000 km² που περιλαμβάνει κυρίως αμμώδες έδαφος με ξηρό κλίμα. Κατά τη διάρκεια των θερινών μουσώνων, ισχυροί επιφανειακοί άνεμοι ανυψώνουν και μεταφέρουν τη σκόνη σε κοντινές ή και σε μεγαλύτερη απόσταση περιοχές. Εκτός από τις προαναφερθείσες ερημικές εκτάσεις, στην περιοχή μελέτης μας υπάρχουν και άλλες μικρότερες περιοχές που συμβάλουν εξίσου με σημαντικό φορτίο αερολυμάτων σκόνης στην ατμόσφαιρα. Αυτές οι εκτάσεις βρίσκονται ανατολικά της Κασπίας Θάλασσας και αποτελούνται από τις Ερήμους Καρακούμ, Κιζυλκούμ και Αρακούμ.

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης επιλέχθηκε η προς μελέτη περιοχή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5, η οποία περιλαμβάνει μεγάλο μέρος της ασιατικής ηπείρου και τις παραπάνω σημαντικές περιοχές. Η περιοχή εκτείνεται από 42°E έως 140°E γεωγραφικό μήκος και 5°N έως 50°N γεωγραφικό πλάτος, εκτός της περιοχής με γεωγραφικό μήκος 42°E-59°E και γεωγραφικό πλάτος 5°N-34°N (λευκή περιοχή, Αραβική Χερσόνησος). Επιπλέον, στο Σχήμα 2.6 επισημαίνονται οι κυριότερες ερημικές περιοχές της Ασίας που εξάγουν μεγάλα φορτία σκόνης.



Σχήμα 2.5. Η γεωγραφική περιοχή μελέτης.



Σχήμα 2.6. Κυριότερες πηγές ερημικής σκόνης (έρημοι) στην περιοχή μελέτης.

Κεφάλαιο 3^ο

Αποτελέσματα – Συζήτηση

3.1 Γεωγραφική κατανομή των ημερών με έντονα επεισόδια σκόνης (DAEDs)

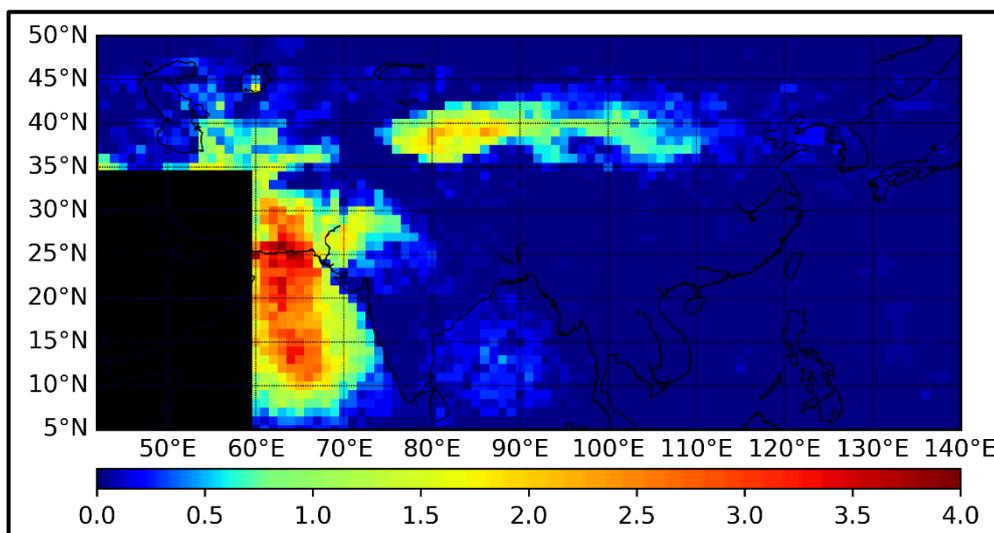
Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι γεωγραφικές κατανομές της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των ημερών επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης (DAEDs), καθώς και του οπτικού βάθους των αερολυμάτων σκόνης (AOD), για την ευρύτερη περιοχή της Ασίας και της Κασπίας Θάλασσας. Ο αλγόριθμος έπειτα από μεσοποίηση των DEADs σε επίπεδο κυψελίδας για την περίοδο 2005-2021, εξήγαγε γεωγραφικές κατανομές της συχνότητας εμφάνισης και του μέσου AOD, σε ετήσια, εποχική και μηνιαία βάση. Στην Ενότητα 3.1.1 παρουσιάζονται και σχολιάζονται οι γεωγραφικές κατανομές (χάρτες) των μέσων ετήσιων κλιματολογικών τιμών της απόλυτης (absolute) συχνότητας εμφάνισης, καθώς και του οπτικού βάθους σκόνης (AOD) των ισχυρών και ακραίων επεισοδίων αερολυμάτων ερημικής σκόνης. Στη συνέχεια, στην Ενότητα 3.1.2 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες κατανομές της απόλυτης συχνότητας, αλλά σε εποχική βάση, ενώ στην Ενότητα 3.1.3 σε μηνιαία βάση. Στην Ενότητα 3.2 παρουσιάζονται η ενδοετήσια και διαχρονική διακύμανση της απόλυτης συχνότητας, της μέσης τιμής του AOD και της σχετικής κάλυψης της περιοχής μελέτης για τις ημέρες επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης (DAEDs). Στην Ενότητα 3.3 παρουσιάζονται τα ίδια αποτελέσματα με την προηγούμενη ενότητα, αλλά για τις περιπτώσεις επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης (DAECs). Τέλος, στην Ενότητα 3.4 παρουσιάζεται η ενδοετήσια μεταβολή των DAECs σε μικρότερη περιοχική κλίμακα.

3.1.1 Γεωγραφική κατανομή σε μέση ετήσια βάση

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζονται οι μέσες ετήσιες (για την περίοδο 2005-2021) τιμές της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης (σε ημέρες/έτος) των ισχυρών επεισοδίων σκόνης που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια ημερών με έντονα επεισόδια σκόνης στην Ασία (SDAEDs). Επισημαίνεται ότι υπάρχουν περιοχές όπου ο αλγόριθμος λειτούργησε αλλά δεν υπολόγισε καμία ημέρα επεισοδίου σκόνης και αυτές παρουσιάζονται με σκούρο μπλε χρώμα (μηδενική συχνότητα εμφάνισης). Επίσης, η περιοχή η οποία φαίνεται με μαύρο χρώμα (Σαουδική Αραβία) δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης, καθώς αποτελεί μία ξεχωριστή ερημική περιοχή στην ευρύτερη περιοχή της Μέσης Ανατολής.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, σε μεγάλο μέρος της Ασίας, είτε ο αριθμός των ισχυρών επεισοδίων κατά τη διάρκεια ημερών με έντονα επεισόδια ερημικής σκόνης που συνέβησαν κατά την περίοδο 2005-2021 είναι πολύ μικρός, μικρότερος από 0,5 ημέρες ανά έτος (μπλε αποχρώσεις), είτε δε συνέβησαν καθόλου τέτοια επεισόδια κατά τη 17-ετή περίοδο. Παρόλα αυτά, υπάρχουν και εκτεταμένες περιοχές στις οποίες, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου, έλαβαν χώρα πιο συχνά έντονα επεισόδια σκόνης (κίτρινα και κόκκινα χρώματα). Οι μεγαλύτερες τιμές της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης ημερών επεισοδίων σκόνης (3 έως 4 ημέρες/έτος,

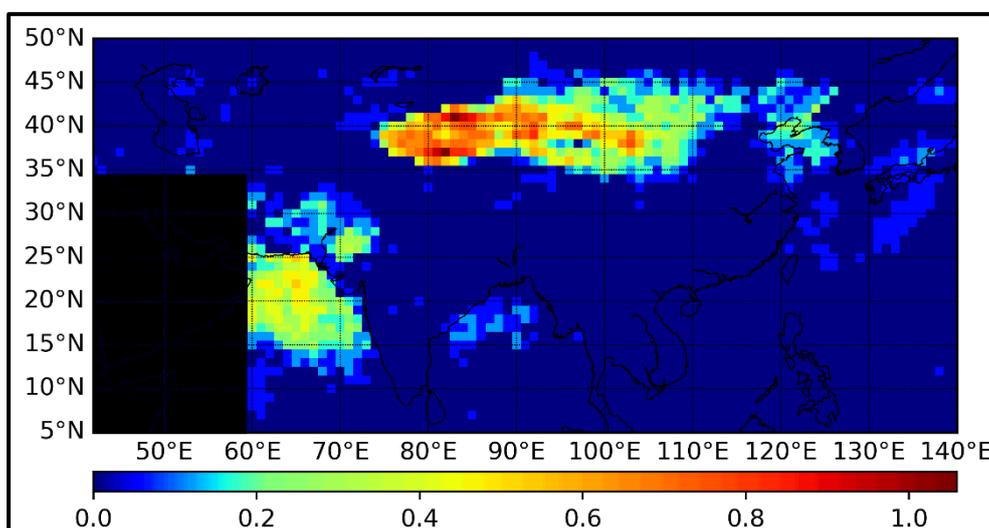
πορτοκαλί-κόκκινα χρώματα) παρατηρούνται στις ερήμους Τακλαμακάν και Ταρ και στα νότια τμήματα του Πακιστάν, τα δυτικά παράλια της Ινδίας και την Αραβική Θάλασσα. Μικρότερες συχνότητες (έως 1-2 ημέρες επεισοδίων/έτος, γαλαζοπράσινες και κίτρινες αποχρώσεις) παρατηρούνται στην έρημο Γκόμπι και στην περιοχή νοτιοανατολικά της Κασπίας Θάλασσας. Στο υπόλοιπο τμήμα της Ινδίας και της Κίνας, καθώς και στις ωκεάνιες και θαλάσσιες περιοχές, οι τιμές της απόλυτης συχνότητας είναι γενικά πολύ μικρές έως μηδενικές, με εξαίρεση όπως είπαμε την Αραβική Θάλασσα, όπου καταγράφονται οι μεγαλύτερες συχνότητες ημερών επεισοδίων ανά έτος (3-4 ημέρες/έτος). Επισημαίνεται ότι οι τιμές αυτές των συχνοτήτων εμφάνισης είναι ημέρες με έντονα επεισόδια σκόνης, δηλαδή παρατηρούνται κατά τη διάρκεια των έντονων DAEDs. Σε σύγκριση με τη γεωγραφική κατανομή της μέσης ετήσιας απόλυτης συχνότητας των ισχυρών επεισοδίων σκόνης (Belimezis, 2023), παρατηρείται ότι οι συχνότητες των ισχυρών DAEDs εμφανίζονται στις ίδιες περιοχές, είναι, όμως, μία τάξη μεγέθους μικρότερες από αυτές των αντίστοιχων DAEs. Αυτό συμβαίνει διότι οι συχνότητες των DAEDs είναι μεσοποιημένες σε επίπεδο κυψελίδας για την περίοδο 2005-2021. Ωστόσο, συγκρίνοντας τις αθροιστικές συχνότητες με τις αντίστοιχες των DAEDs στην περιοχή της Μεσογείου (Γανρουζου, 2021), παρατηρείται ότι οι συχνότητες είναι της ίδιας τάξης μεγέθους, με τις ημέρες ισχυρών επεισοδίων στην Ασία να είναι διπλάσιες από τις αντίστοιχες της Μεσογείου.



Σχήμα 3.1. Γεωγραφική κατανομή της μέσης (μεσοποιημένης για την περίοδο 2005-2021) ετήσιας απόλυτης συχνότητας εμφάνισης (επεισόδια/έτος) των ισχυρών επεισοδίων σκόνης που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια ημερών με έντονα επεισόδια σκόνης (SDAEDs) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

Στο παρακάτω Σχήμα 3.2 φαίνεται η αντίστοιχη γεωγραφική κατανομή της μέσης (μεσοποιημένης για την περίοδο 2005-2021) ετήσιας απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των ακραίων ημερών επεισοδίων σκόνης (EDAEDs) στην ευρύτερη

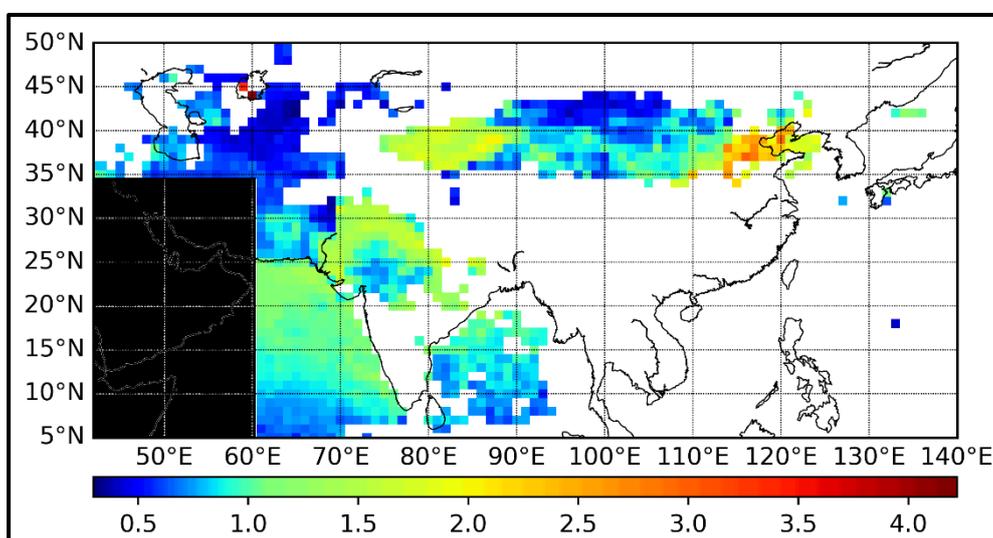
περιοχή της Ασίας. Με μια πρώτη ματιά παρατηρείται διαφορετική γεωγραφική κατανομή των μέγιστων τιμών, καθώς και η σπανιότερη συχνότητα των ακραίων επεισοδίων σε σχέση με τα ισχυρά. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου, οι ημέρες με ακραία επεισόδια σκόνης είναι πιο συχνές (από 0,8 έως 1 επεισόδιο/έτος, πορτοκαλί αποχρώσεις) στην έρημο Τακλαμακάν, ενώ στην έρημο Γκόμπι, στην έρημο Ταρ και στην Αραβική Θάλασσα εμφανίζονται επίσης σχετικά συχνότερα αλλά με μικρότερη συχνότητα (0,3 έως 0,5 ημέρες/έτος, κίτρινο-πράσινες αποχρώσεις). Στην υπόλοιπη περιοχή μελέτης οι ημέρες των επεισοδίων αυτών είναι λιγότερες από 0,1 ανά έτος ή και μηδενικές. Συγκρίνοντας και πάλι με τα αντίστοιχα αποτελέσματα (Belimezis, 2023), παρατηρούμε ότι οι συχνότητες των ισχυρών DAEDs εμφανίζονται στις ίδιες περιοχές με μία τάξη μεγέθους διαφορά. Επίσης, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα DAEDs για τη Μεσόγειο (Γανρουζου, 2021), παρατηρείται και πάλι ότι οι συχνότητες είναι της ίδιας τάξης μεγέθους, με τις ημέρες ισχυρών επεισοδίων στην Ασία να είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της Μεσογείου.



Σχήμα 3.2. Γεωγραφική κατανομή της μέσης (μεσοποιημένης για την περίοδο 2005-2021) ετήσιας απόλυτης συχνότητας εμφάνισης (επεισόδια/έτος) των ακραίων επεισοδίων σκόνης που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια ημερών με έντονα επεισόδια σκόνης (EDAEDs) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

Στη συνέχεια, υπολογίστηκε και παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3 η μέση κλιματολογική κατανομή του φορτίου (οπτικό βάθος) των αερολυμάτων κατά τη διάρκεια ημερών με ισχυρά επεισόδια ερημικής σκόνης (SDAEDs). Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν την ένταση των ημερών με τέτοια επεισόδια σκόνης, σε όρους οπτικού βάθους, καθώς υπενθυμίζεται ότι το οπτικό βάθος είναι αντιπροσωπευτικό του φορτίου των αερολυμάτων. Οι μεγαλύτερες τιμές του οπτικού βάθους (AOD) σημειώνονται στην περιοχή ανατολικά της ερήμου Γκόμπι, όπου βρίσκεται το Πεκίνο και η Κίτρινη Θάλασσα, με τιμές από 2,3 έως 3,3 (κίτρινες-πορτοκαλί αποχρώσεις). Ακολουθούν η έρημος Τακλαμακάν και η Ταρ, τα δυτικά παράλια της Ινδίας στην Αραβική Θάλασσα, καθώς και τμήμα ανατολικά της Ινδίας στον Κόλπο της Βεγγάλης, με τιμές από 1,3

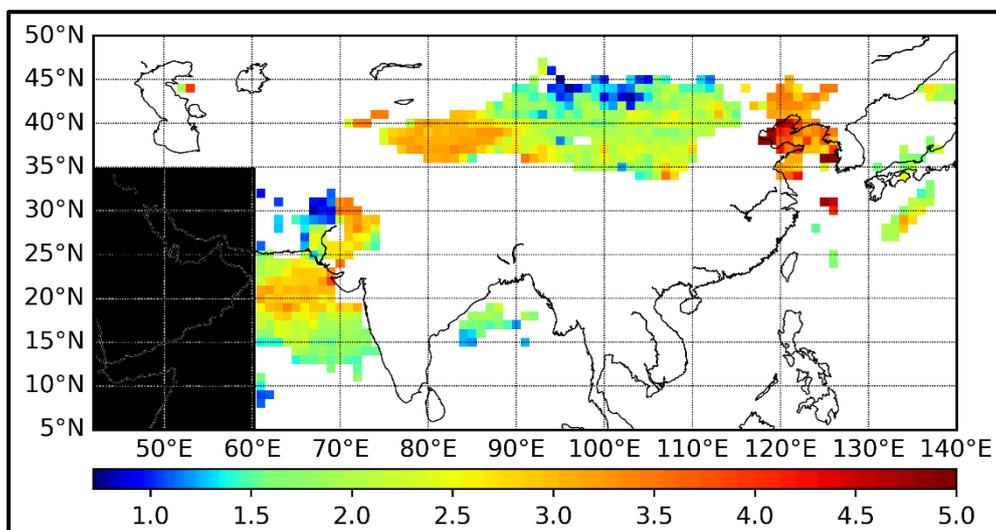
έως 2,0 (πράσινες αποχρώσεις). Στις υπόλοιπες περιοχές οι τιμές είναι μικρότερες του 1. Ωστόσο, πολύ μεγάλες τιμές (έως και 4,5) παρατηρούνται τοπικά στη λίμνη Αράλη. Ο κύριος λόγος για αυτό είναι ότι κατά τις τελευταίες δεκαετίες πραγματοποιείται σταδιακή αποξήρανση της λίμνης που την μετατρέπει σε ερημική περιοχή, εξαιτίας της εκτροπής των ποταμών που την εφοδίαζαν (Micklin 2007; Karami et al., 2021). Αυτό εξηγεί τις αυξημένες τιμές του οπτικού βάθους έναντι γειτονικών περιοχών, καθώς δημιουργούνται καταιγίδες σκόνης και άλατος. Επισημαίνεται ότι στις περιοχές όπου έχουμε τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης ημερών επεισοδίων σκόνης, δεν εμφανίζονται απαραίτητα και οι μέγιστες τιμές του οπτικού βάθους των αερολυμάτων. Αυτό το γεγονός είναι λογικό, καθώς η συχνότητα και η ένταση των επεισοδίων σκόνης είναι ανεξάρτητες παράμετροι και καθορίζονται από διαφορετικές παραμέτρους. Επομένως, έχουμε μικρό αριθμό επεισοδίων μεγάλης έντασης που λαμβάνουν χώρα σε περιοχές όπου υπάρχει ήδη αυξημένο φορτίο αερολυμάτων λόγω ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, όπως στο Πεκίνο. Συγκριτικά με το οπτικό βάθος σκόνης των ημερών επεισοδίων DAEs (Belimezis, 2023), η γεωγραφική κατανομή του οπτικού βάθους ερημικής σκόνης παρουσιάζει ομοιότητες, με τις μέγιστες τιμές να σημειώνονται στην περιοχή της Κίνας και της λίμνης Αράλη, αλλά και μερικές διαφορές πάνω από τις θαλάσσιες περιοχές (Θάλασσα της Ιαπωνίας και Θάλασσα των Φιλιππίνων). Στην περίπτωση του οπτικού βάθους σκόνης, οι τιμές των DAEDs και των DAEs είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τις μέγιστες τιμές να είναι έως 4 (πορτοκαλί και κόκκινες περιοχές). Σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές των DEADs της Μεσογείου (Gavrouzou, 2021), παρατηρείται ότι αυτές είναι μικρότερες από της Ασίας (μέγιστη τιμή 1,8 έναντι 4,5).



Σχήμα 3.3. Γεωγραφική κατανομή της μέσης (μεσοποιημένης για την περίοδο 2005-2021) ετήσιας τιμής του οπτικού βάθους ερημικής σκόνης (AOD) για τα ισχυρά επεισόδια που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια ημερών με έντονα επεισόδια σκόνης (SDAEDs) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Με λευκό χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων ή δε συμβαίνουν επεισόδια. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

Στο Σχήμα 3.4, παρουσιάζεται η μέση κλιματολογική κατανομή του φορτίου (οπτικό βάθος) των αερολυμάτων κατά τη διάρκεια ημερών με ακραία επεισόδια ερημικής σκόνης (EDAEDs). Η χωρική κατανομή του μέσου οπτικού βάθους των ακραίων επεισοδίων μοιάζει με αυτή των ισχυρών, μόνο που στην προκειμένη περίπτωση οι τιμές που σημειώνονται είναι υψηλότερες. Οι μεγαλύτερες τιμές από 4,0 έως 5,0 (πορτοκαλί-κόκκινες αποχρώσεις) παρουσιάζονται και πάλι στην περιοχή του Πεκίνου και της Κίτρινης Θάλασσας δυτικά της Κορέας. Ακολουθεί η έρημος Τακλαμακάν, η Ταρ και η Αραβική Θάλασσα, με τις τιμές να κυμαίνονται από 3,0 έως 4,0 (κίτρινες-πορτοκαλί αποχρώσεις). Μικρότερες τιμές, από 1,7 έως 2,7 παρατηρούνται στην έρημο Γκόμπι (πράσινες αποχρώσεις). Στις παραπάνω περιοχές, η συχνότητα εμφάνισης ακραίων ημερών επεισοδίων σκόνης είναι μικρή, πράγμα που σημαίνει ότι εκεί συμβαίνουν λίγα επεισόδια (λίγες ημέρες EDAEDs), αλλά με μεγάλη ένταση.

Συγκριτικά με το οπτικό βάθος σκόνης των ημερών επεισοδίων DAEs (Belimezis, 2023), η γεωγραφική κατανομή του οπτικού βάθους ερημικής σκόνης για τις ημέρες ακραίων επεισοδίων παρουσιάζει μεγάλες διαφορές τόσο πάνω από τις ηπειρωτικές όσο και από τις θαλάσσιες περιοχές (περιοχές ανατολικά της Κασπίας, Κόλπος της Βεγγάλης και ανατολικά παράλια Κίνας). Οι τιμές των DAEs και των EDAEDs είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τις μέγιστες τιμές να είναι έως 5 (πορτοκαλί και κόκκινες περιοχές). Σε σύγκριση με τις τιμές αντίστοιχες τιμές των DAEs της Μεσογείου (Γανρουζου, 2021), παρατηρείται ότι αυτές είναι ίδιες με της Ασίας (μέγιστη τιμή 5).



Σχήμα 3.4. Γεωγραφική κατανομή της μέσης (μεσοποιημένης για την περίοδο 2005-2021) ετήσιας τιμής του οπτικού βάθους ερημικής σκόνης (AOD) για τα ακραία επεισόδια που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια ημερών με έντονα επεισόδια σκόνης (EDAEDs) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Με λευκό χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων ή δε συμβαίνουν επεισόδια. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

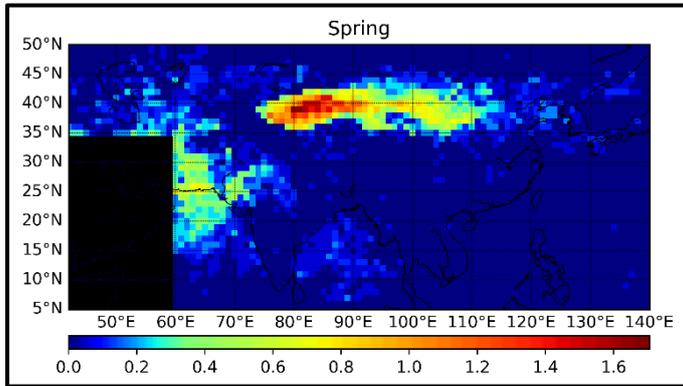
3.1.2 Γεωγραφική κατανομή σε μέση εποχική βάση

Έπειτα από την παράθεση των χαρακτηριστικών των ισχυρών και ακραίων επεισοδίων σε ετήσια βάση, παρουσιάζεται η αντίστοιχη συχνότητα εμφάνισής τους σε εποχική βάση, ώστε να μελετηθεί αναλυτικά ο εποχικός τους κύκλος. Στην αριστερή στήλη του Σχήματος 3.5 παρέχονται οι απόλυτες συχνότητες των ημερών ισχυρών επεισοδίων σκόνης (SDAEDs), ενώ στη δεξιά βρίσκονται οι ημέρες των ακραίων επεισοδίων (EDAEDs). Η απόλυτη συχνότητα εμφάνισης είναι εκπεφρασμένη σε αριθμό ημερών ανά έτος, κατόπιν μεσοποίησης για όλη την περίοδο μελέτης (2005-2021). Η αντίστοιχη αθροιστική συχνότητα (για όλα τα έτη) δίνεται στο Παράρτημα (Σχήμα Π2) και η γεωγραφική κατανομή του οπτικού βάρους δίνεται στο Παράρτημα (Σχήμα Π3).

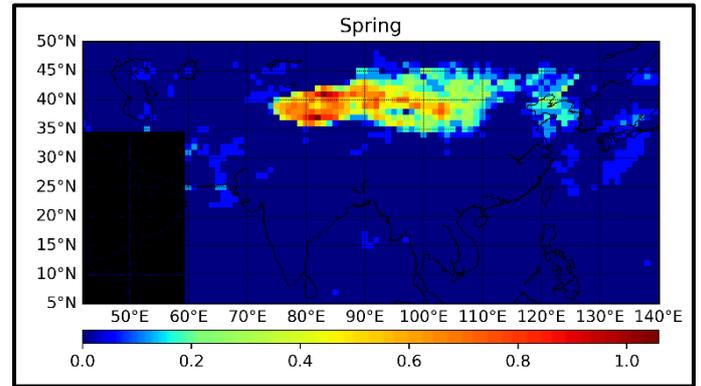
Με μια πρώτη ματιά, παρατηρούμε ότι ημέρες επεισοδίων σκόνης σημειώθηκαν στην Ασία κυρίως κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του θέρους, ενώ μία ημέρα επεισοδίου (ισχυρού) σημειώθηκε το χειμώνα και καμία το φθινόπωρο. Είναι εμφανής η διαφορά της χωρικής κατανομής των επεισοδίων μεταξύ άνοιξης και φθινοπώρου, καθώς την άνοιξη παρατηρείται συχνότερη εμφάνιση (τόσο των ισχυρών όσο και των ακραίων) πάνω από τις ερήμους Τακλαμακάν και Γκόμπι, ενώ το θέρος βρίσκονται πάνω από την έρημο Ταρ, την Αραβική Θάλασσα και στις ερημικές περιοχές ανατολικά της Κασπίας. Διαπιστώνεται, γενικά, ότι η συχνότητα εμφάνισης των ισχυρών ημερών επεισοδίων είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή των ακραίων, έως 1,7 ισχυρά επεισόδια ανά έτος έναντι 1,1 ακραίων για την άνοιξη και 3,3 ισχυρά έναντι 0,5 ακραία (ανά έτος) για το θέρος. Γενικά, παρατηρείται ομοιότητα μεταξύ των γεωγραφικών κατανομών των ημερών με ισχυρά και ακραία επεισόδια στην Ασία για την ίδια εποχή, ενώ για διαφορετικές εποχές (άνοιξη και θέρος), οι γεωγραφικές κατανομές παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές. Την άνοιξη, οι μεγαλύτερες συχνότητες εντοπίζονται στη βόρεια και κεντρική Ασία, ενώ το θέρος εντοπίζονται στη δυτική Ασία.

Κατά τη διάρκεια της άνοιξης, πάνω από την έρημο Τακλαμακάν παρατηρούνται οι μεγαλύτερες συχνότητες εμφάνισης (20-29 DAEDs ή 1,2-1,7 ημέρες/έτος για τα ισχυρά και 12-18 DAEDs ή 0,7-1,1 ημέρες/έτος για τα ακραία επεισόδια), και δευτερευόντως πάνω από την έρημο Γκόμπι (10-15 DAEDs ή 0,6-0,9 ημέρες/έτος για τα ισχυρά και 4-8 DAEDs ή 0,2-0,5 ημέρες/έτος για τα ακραία επεισόδια). Κατά τη διάρκεια του θέρους, οι μεγαλύτερες συχνότητες παρατηρούνται κυρίως πάνω από την έρημο Ταρ και την Αραβική Θάλασσα (40-56 DAEDs ή 2,4-3,3 ημέρες/έτος για τα ισχυρά και 5-8 DAEDs ή 0,3-0,5 ημέρες/έτος για τα ακραία επεισόδια). Κατά το θέρος, λαμβάνουν χώρα οι θερινοί μουσσώνες οι οποίοι μεταφέρουν μεγάλα φορτία σκόνης από την Αραβική Χερσόνησο στην Αραβική Θάλασσα φτάνοντας έως τις δυτικές ακτές της Ινδίας. Πάνω από την Ινδία δεν παρατηρείται σκόνη λόγω της υγρής της εναπόθεσης μέσω βροχοπτώσεων (Ramaswamy et al., 2017; Gandham et al., 2022). Κατά τη διάρκεια του χειμώνα, δεν υπάρχει σαφής κατανομή της συχνότητας εμφάνισης των επεισοδίων καθώς σημειώθηκε μόνο 1 DAED ή 0,1 ημέρα/έτος το οποίο έχει κατανεμηθεί στις ερήμους Γκόμπι, Τακλαμακάν, Ταρ και στην Αραβική Θάλασσα. Τέλος, κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου δε σημειώθηκε καμία ημέρα επεισοδίου.

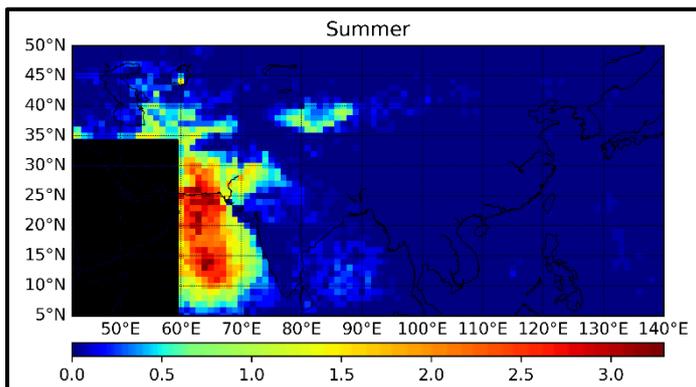
Σε σύγκριση με τις αντίστοιχες γεωγραφικές κατανομές των DAEDs σε εποχική βάση για την περιοχή της Μεσογείου (Γανρουζου, 2021), παρατηρείται μια ομοιότητα στην εμφάνιση των μέγιστων (το θέρους) και των ελαχίστων (το φθινόπωρο) συχνοτήτων, τόσο για των ισχυρών όσο και για των ακραίων ημερών επεισοδίων σκόνης. Ωστόσο, οι τιμές των μέγιστων συχνοτήτων για τις ισχυρές ημέρες επεισοδίων σκόνης αγγίζουν τις 56 ημέρες έναντι των 20 ημερών της Μεσογείου.



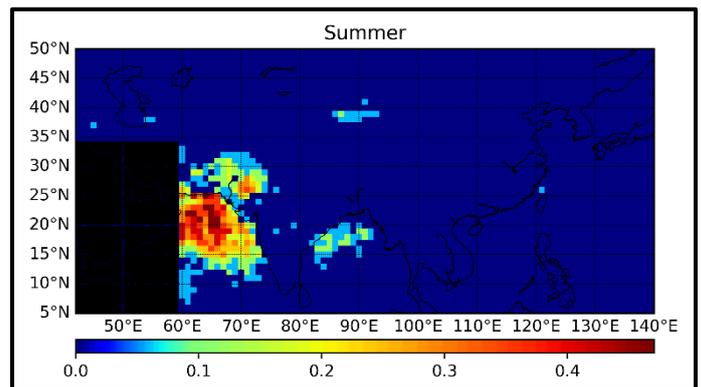
(i-α)



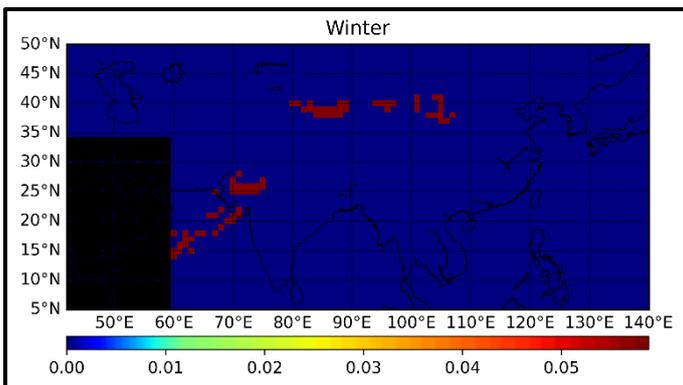
(i-β)



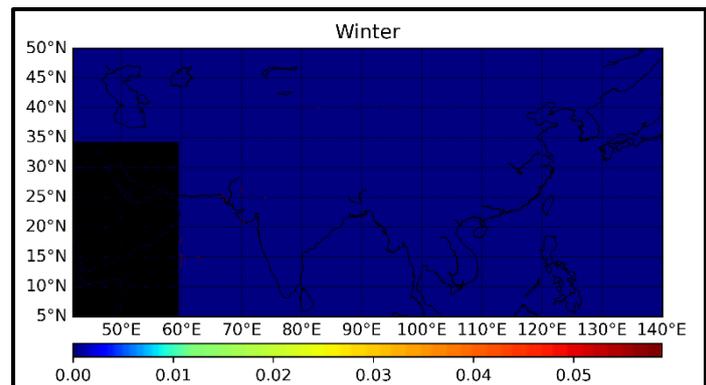
(ii-α)



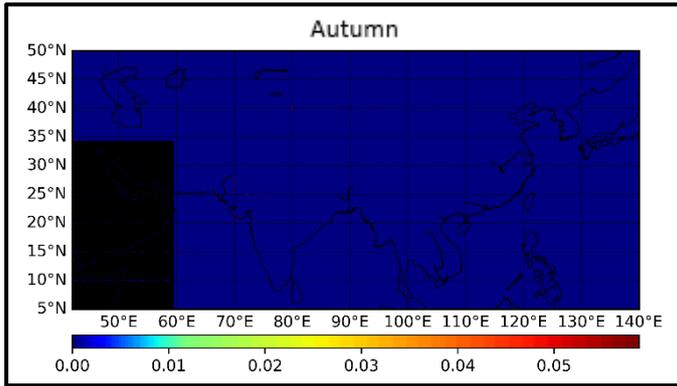
(ii-β)



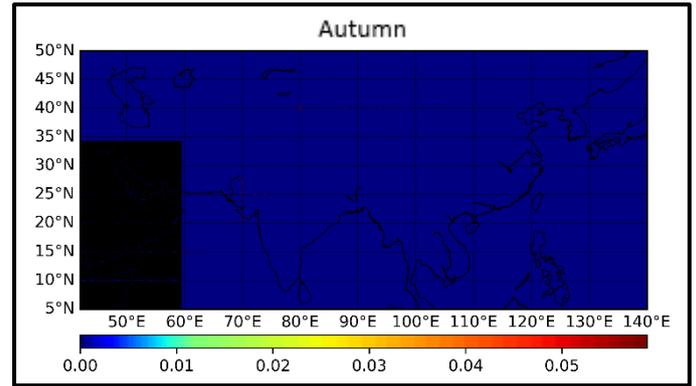
(iii-α)



(iii-β)



(iv-α)

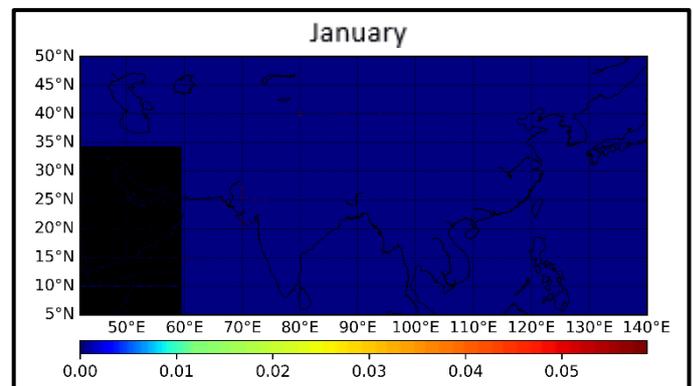
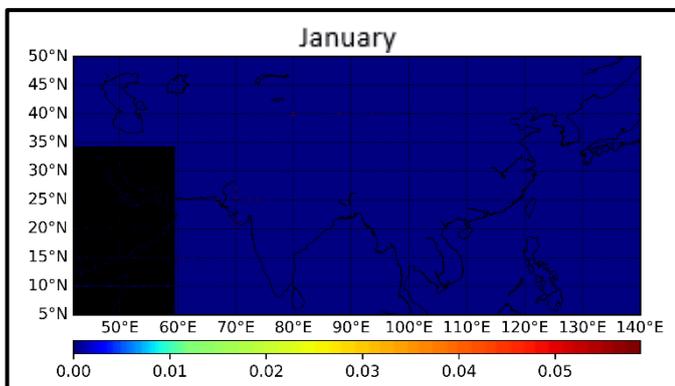


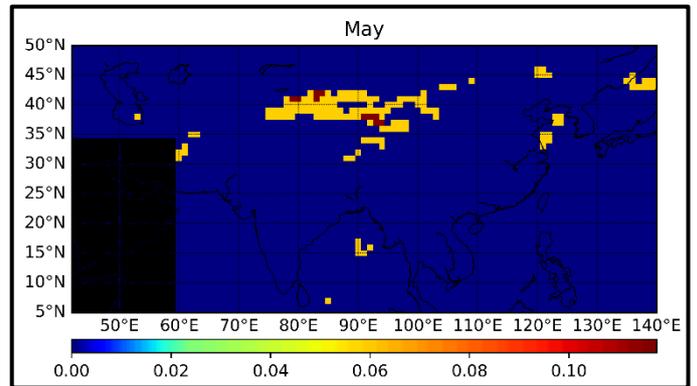
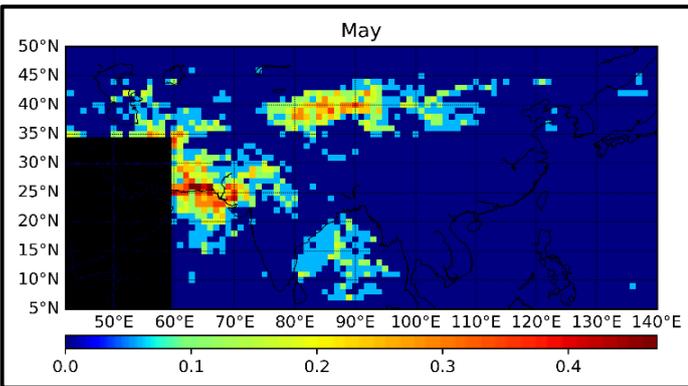
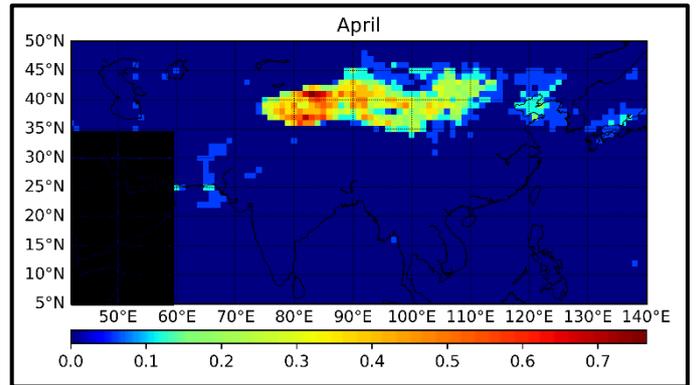
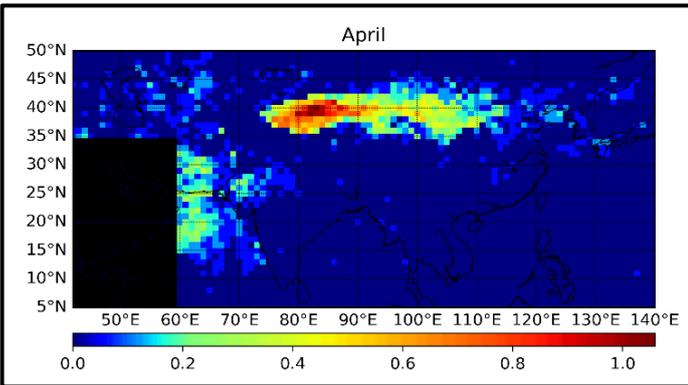
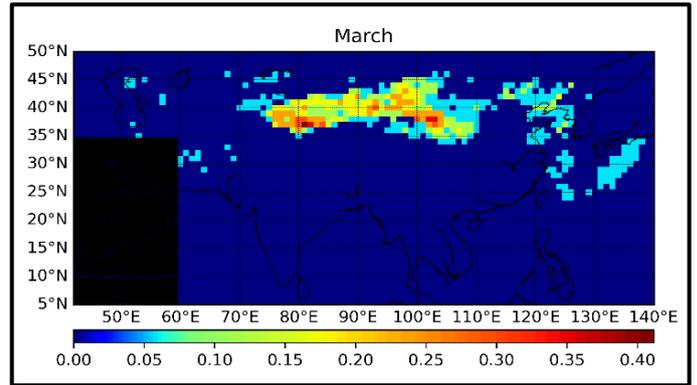
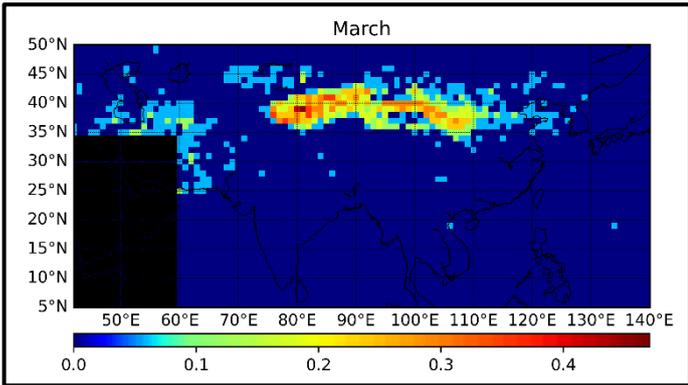
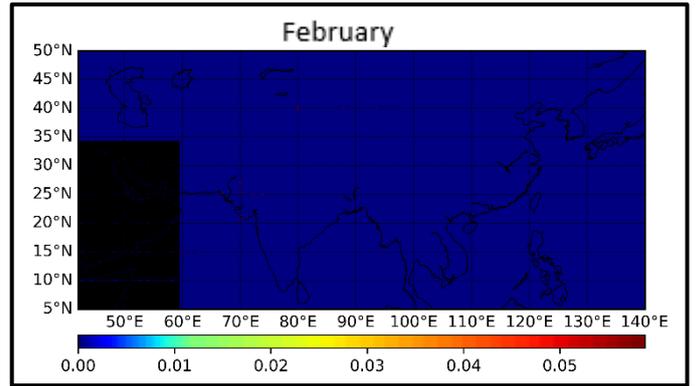
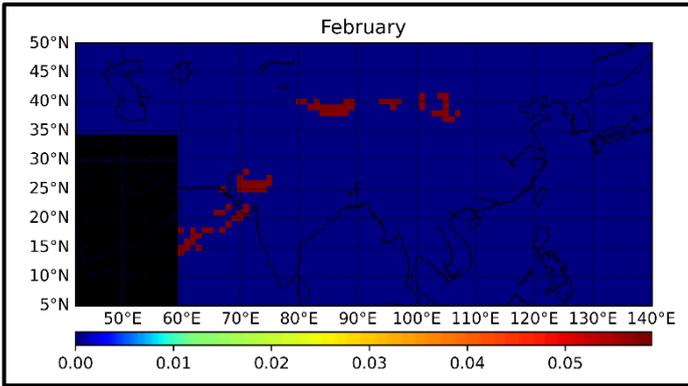
(iv-β)

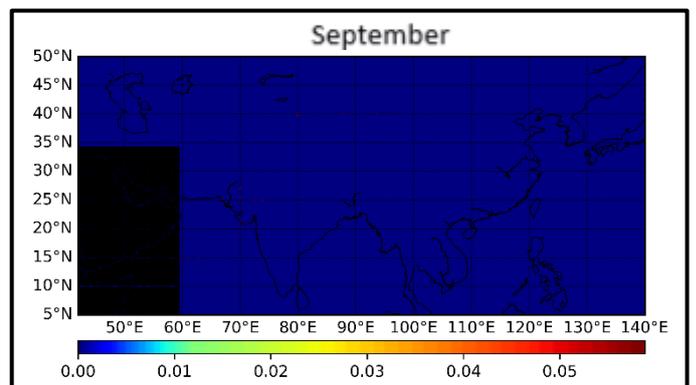
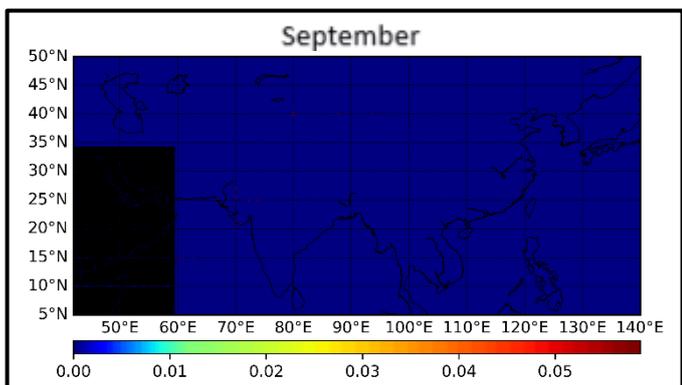
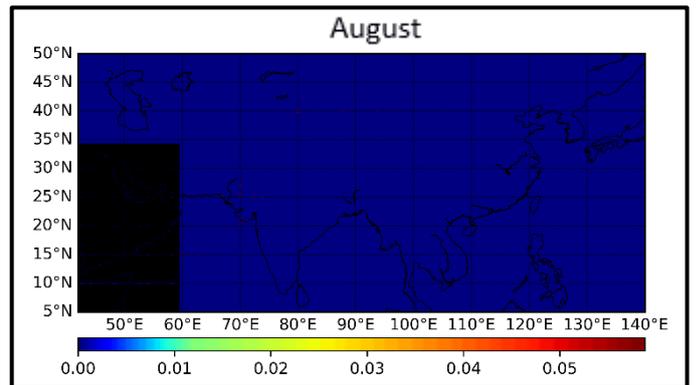
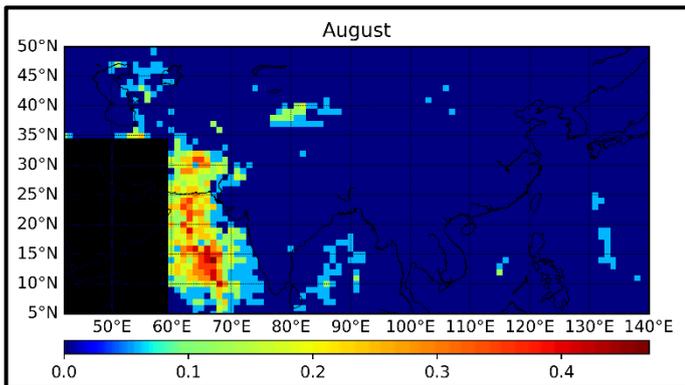
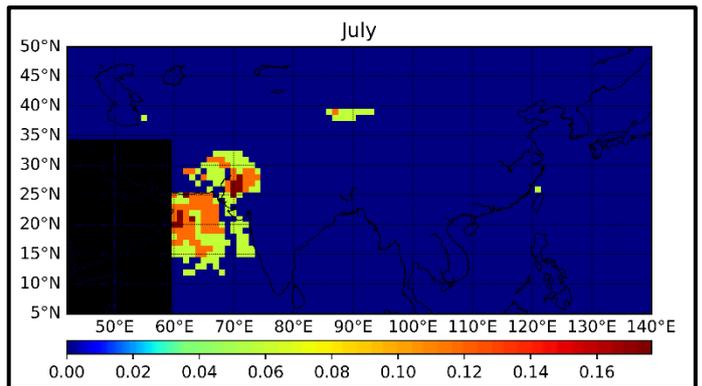
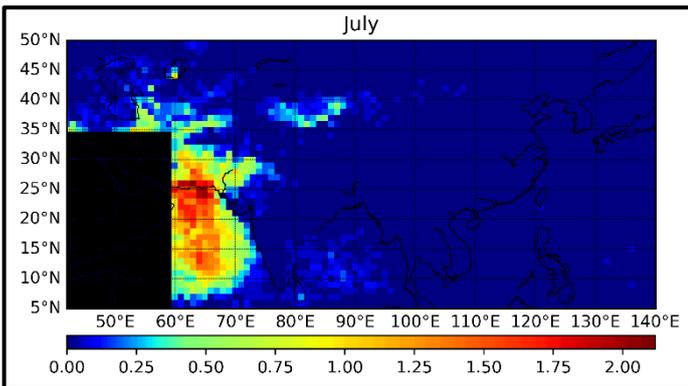
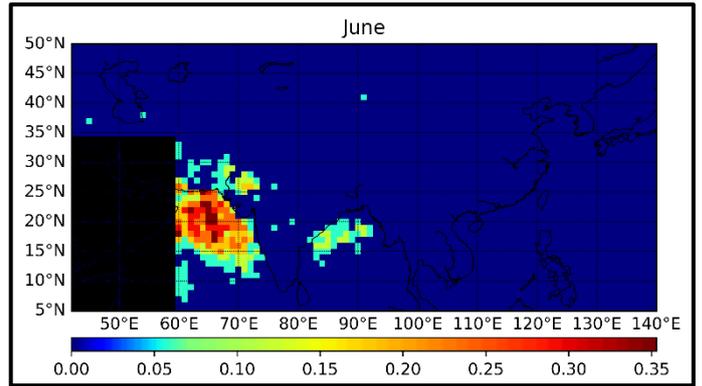
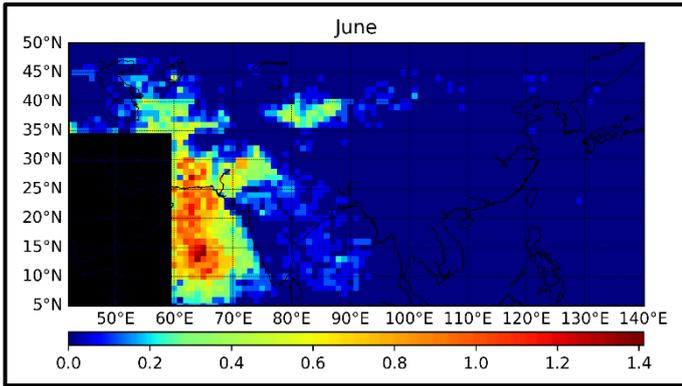
Σχήμα 3.5. Γεωγραφική κατανομή της μέσης εποχικής απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των ημερών ισχυρών (αριστερή στήλη) και ακραίων (δεξιά στήλη) επεισοδίων ερημικής σκόνης στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Οι παρεχόμενες τιμές είναι μεσοποιημένες για την περίοδο 2005-2021 και δίνονται για την άνοιξη, το θέρος και το χειμώνα. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

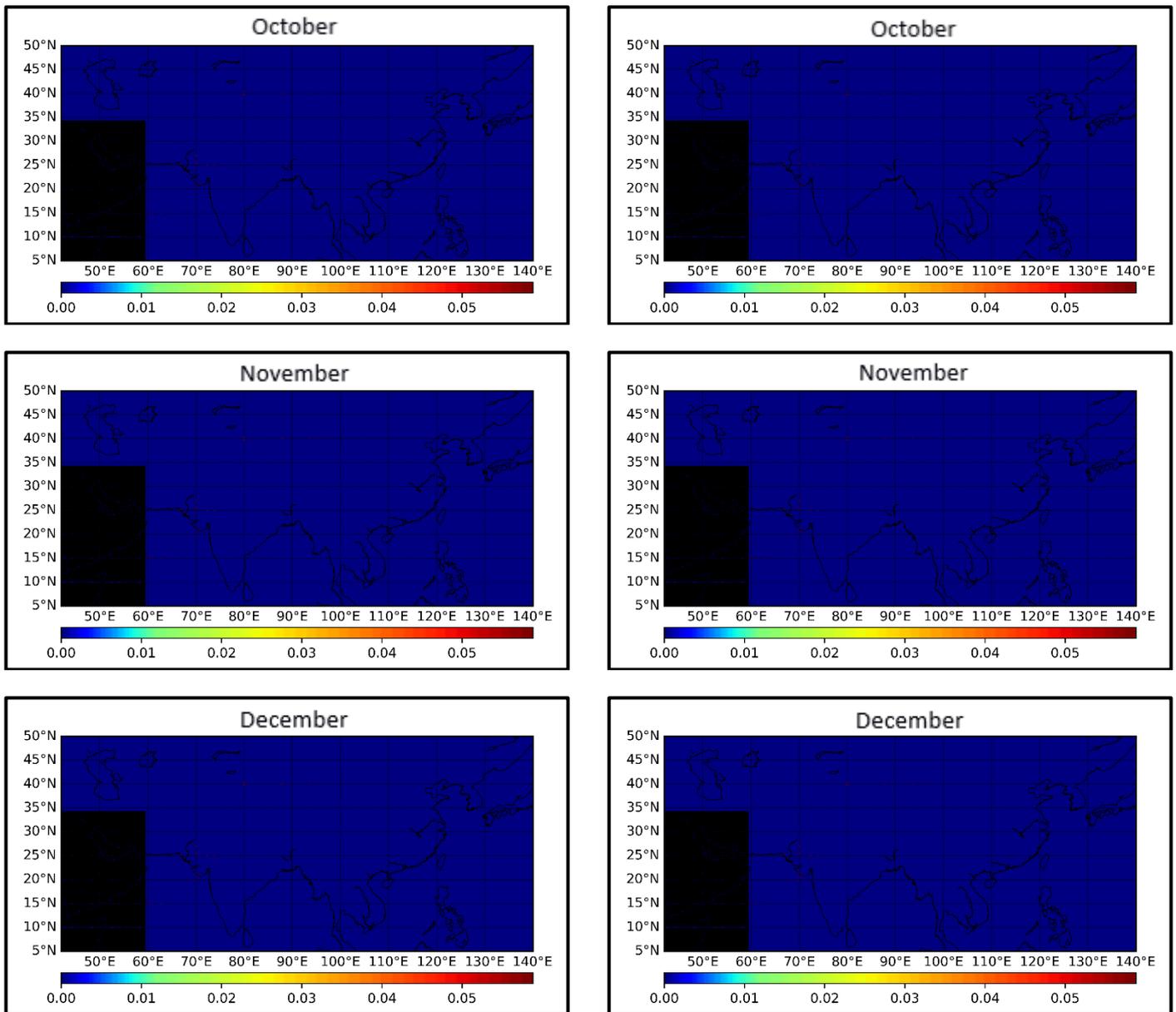
3.1.3 Γεωγραφική κατανομή σε μέση μηνιαία βάση

Στη συνέχεια της παράθεσης των χαρακτηριστικών των ισχυρών και ακραίων επεισοδίων σε ετήσια και εποχική βάση, παρουσιάζεται η αντίστοιχη συχνότητα εμφάνισής τους και σε μηνιαία βάση για την 17ετή περίοδο 2005-2021. Στην αριστερή στήλη του Σχήματος 3.6 παρέχονται οι απόλυτες συχνότητες των ημερών ισχυρών επεισοδίων σκόνης (SDAEDs), ενώ στη δεξιά βρίσκονται οι ημέρες ακραίων επεισοδίων (EDAEDs). Η απόλυτη συχνότητα εμφάνισης είναι εκπεφρασμένη σε αριθμό ημερών ανά έτος, κατόπιν μεσοποίησης για όλη την περίοδο μελέτης (2005-2021). Η αντίστοιχη αθροιστική συχνότητα (για όλα τα έτη) δίνεται στο Παράρτημα (Σχήμα Π4) και η γεωγραφική κατανομή του οπτικού βάθους δίνεται στο Παράρτημα (Σχήμα Π5).









Σχήμα 3.6. Γεωγραφική κατανομή της μέσης μηνιαίας απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των ημερών ισχυρών (αριστερή στήλη) και ακραίων (δεξιά στήλη) επεισοδίων ερημικής σκόνης στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Οι παρεχόμενες τιμές είναι μεσοποιημένες για την περίοδο 2005-2021 και δίνονται για κάθε μήνα. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μηνιαίων κατανομών, αναδεικνύεται ένας ενδοετήσιος κύκλος της συχνότητας εμφάνισης των ημερών επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης. Ειδικότερα, από το Σχήμα 3.6 συμπεραίνουμε ότι κατά τους μήνες Ιανουάριο, Σεπτέμβριο, Οκτώβριο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο η συχνότητα εμφάνισης είναι μηδενική, δηλαδή δε σημειώθηκε καμία ημέρα επεισοδίου σκόνης τόσο για τις ημέρες ισχυρών, όσο και για τις ημέρες ακραίων επεισοδίων. Κατά το μήνα Φεβρουάριο (ισχυρά επεισόδια), σχεδόν όλη η περιοχή μελέτης είναι καλυμμένη με σκούρο μπλε χρώμα που αντιστοιχεί σε μηδενικές συχνότητες εμφάνισης, εκτός από ορισμένες κυψελίδες όπου παρατηρείται 1 μεμονωμένο DAED σε ολόκληρη τη χρονική περίοδο (0,1 ημέρες/έτος). Καθώς μπαίνουμε στην περίοδο

της άνοιξης από το μήνα Μάρτιο, σημειώνεται μια απότομη αύξηση των ημερών επεισοδίων που φτάνει μέχρι τα 8 DAEDs (0,5 ημέρες/έτος) για τις ημέρες ισχυρών και 7 DAEDs (0,4 ημέρες/έτος) για τις ημέρες ακραίων επεισοδίων, κυρίως στην έρημο Τακλαμακάν και δευτερευόντως στη Γκόμπι. Κατά το μήνα Απρίλιο το φαινόμενο γίνεται πιο έντονο στις ίδιες περιοχές, καθώς σημειώνεται μέγιστος αριθμός επεισοδίων 18 DAEDs (1,1 ημέρες/έτος) για τις ημέρες ισχυρών επεισοδίων και 13 DAEDs (0,8 ημέρες/έτος) για τις ημέρες ακραίων επεισοδίων. Το Μάιο αρχίζει μια σταδιακή εξασθένηση των επεισοδίων, με τις μέγιστες συχνότητες να εμφανίζονται αυτή τη φορά στην έρημο Ταρ και στα παράλια του Πακιστάν με 8 ημέρες ισχυρών DAEDs (0,5 ημέρες/έτος), και δευτερευόντως στην έρημο Τακλαμακάν με 4-6 ημέρες ισχυρών DAEDs (0,3 ημέρες/έτος). Όσον αφορά στις ημέρες ακραίων επεισοδίων, παρατηρείται σημαντική μείωση τόσο χωρική όσο και αριθμητική, με τη συχνότητα εμφάνισης να φτάνει το 1 DAED (0,1 ημέρες/έτος) και σε ορισμένες κυψελίδες τα 2 DAEDs πάνω από την Τακλαμακάν. Κατά τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο εμφανίζεται σημαντική αύξηση στην έρημο Ταρ, στις ερημικές περιοχές ανατολικά της Κασπίας και στην Αραβική Θάλασσα, με τη συχνότητα να φτάνει τις 24 ημέρες ισχυρών DAEDs (1,4 ημέρες/έτος) τον Ιούνιο και τις 36 ημέρες ισχυρών DAEDs (2,1 ημέρες/έτος) τον Ιούλιο. Στην Γκόμπι οι συχνότητες εμφάνισης δεν ξεπερνάνε τις 7 ημέρες ισχυρών DAEDs (0,4 ημέρες/έτος), ενώ οι ημέρες ακραίων επεισοδίων είναι σχεδόν μηδενικές. Οι ημέρες ακραίων επεισοδίων κατά το μήνα Ιούνιο συγκεντρώνονται αποκλειστικά στην Αραβική Θάλασσα φτάνοντας τις 6 ημέρες DAEDs (0,3 ημέρες/έτος), ενώ τον Ιούλιο μειώνονται στις 3 ημέρες DAEDs (0,2 ημέρες/έτος) στην Αραβική Θάλασσα και στην έρημο Ταρ. Κατά το μήνα Αύγουστο τα ακραία επεισόδια είναι μηδενικά και ταυτόχρονα ξεκινάει η μείωση της συχνότητας των ισχυρών, με τις μέγιστες συχνότητες να παρουσιάζονται και πάλι στην ίδια περιοχή και να φτάνουν τις 8 ημέρες DAEDs (0,5 ημέρες/έτος) στην Αραβική Θάλασσα.

3.2 Ενδοετήσια και διαχρονική μεταβολή των ημερών επεισοδίων σκόνης (DAEDs)

Στην ενότητα αυτή παρέχονται τα αποτελέσματα που αφορούν στην ενδοετήσια μεταβολή της συχνότητας εμφάνισης για την περιοχή μελέτης (Ασία) των επεισοδίων σκόνης (ισχυρών και ακραίων) σε επίπεδο μεσοποιημένων τιμών για την περίοδο 2005-2021, καθώς και η διαχρονική μεταβολή της συχνότητας εμφάνισης, της έντασης και της σχετικής κάλυψης της υπό μελέτη περιοχής.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου (Πίνακας 3.1), σημειώθηκαν συνολικά 218 ημέρες έντονων επεισοδίων ερημικής σκόνης (DAEDs) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας και της Κασπίας Θάλασσας για τη χρονική περίοδο από 1 Ιανουαρίου 2005 έως 31 Δεκεμβρίου 2021. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι ημέρες επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης και το αντίστοιχο ποσοστό τους, όπως εξήχθησαν από τον αλγόριθμο, ανά εποχή συνολικά αλλά και ξεχωριστά για τα ισχυρά και ακραία επεισόδια. Συνολικά, οι περισσότερες ημέρες σημειώθηκαν το θέρος (133 ημέρες, 61%) και την άνοιξη (84 ημέρες, 38,5%), ενώ μόνο 1 ημέρα

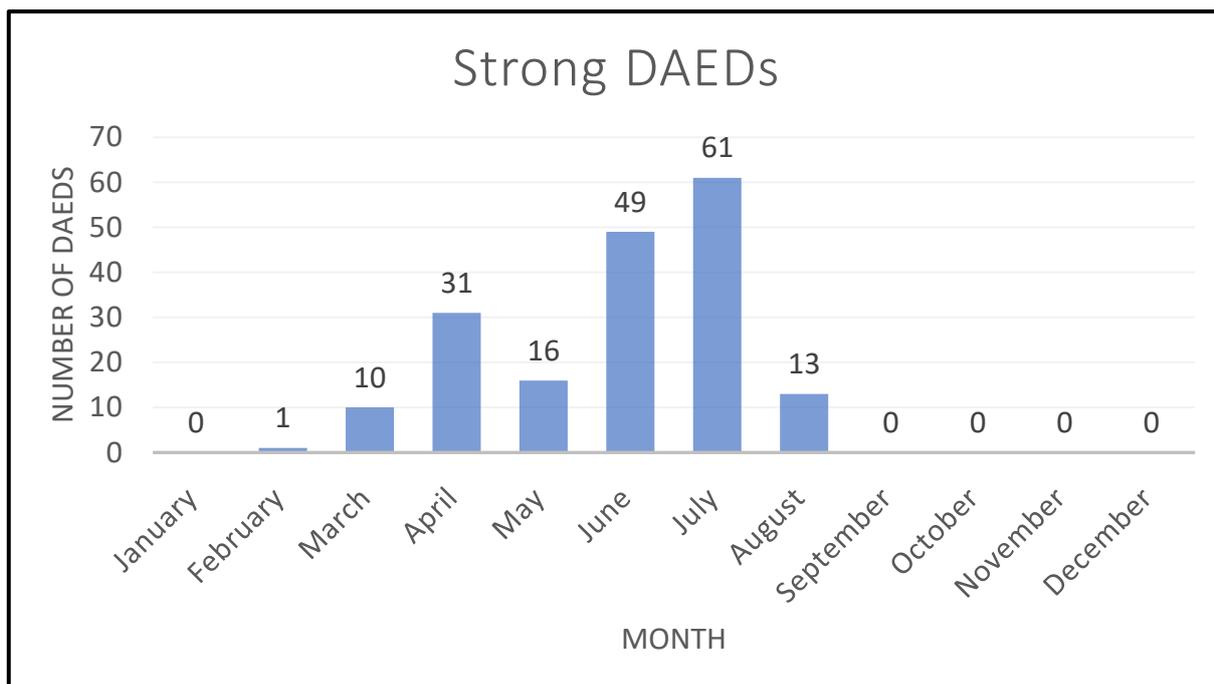
επεισοδίου από τις 218 καταγράφηκε το χειμώνα και καμία δε σημειώθηκε το φθινόπωρο.

Πίνακας 3.1. Ημέρες έντονων (ισχυρών και ακραίων) επεισοδίων ερημικής σκόνης (DAEDs) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας για την περίοδο 2005-2021.

Αριθμός Ημερών Επεισοδίων	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο	Σύνολο
Όλα τα επεισόδια	1 (0,5%)	84 (38,5%)	133 (61%)	0	218
Ισχυρά επεισόδια	1 (0,5%)	57 (31,5%)	123 (68%)	0	181
Ακραία επεισόδια	0	28 (76%)	9 (24%)	0	37

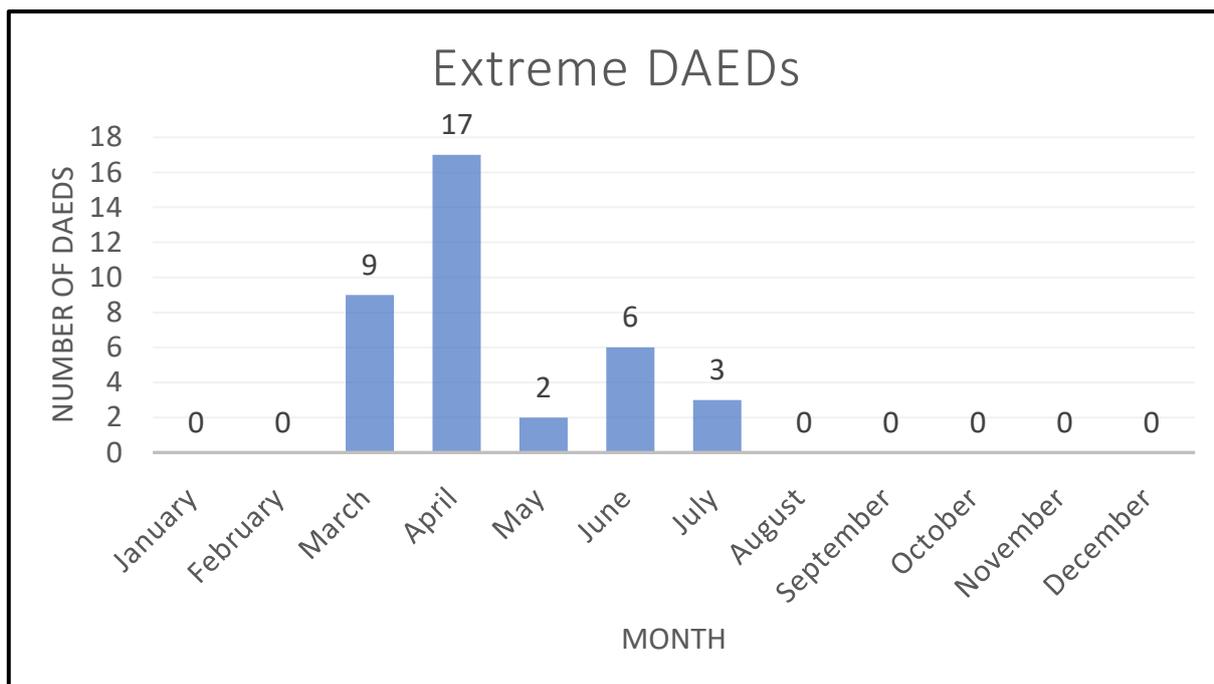
3.2.1 Ενδοετήσια μεταβολή

Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται ο μηνιαίος συνολικός (αθροιστικός, για το σύνολο της περιοχής μελέτης) αριθμός των ημερών ισχυρών επεισοδίων ερημικής σκόνης για την 17ετή περίοδο μελέτης. Όπως είναι φανερό, το κύριο μέγιστο σημειώνεται το θέρος, και πιο συγκεκριμένα τον Ιούλιο όταν συμβαίνουν 61 ημέρες ισχυρών επεισοδίων, ενώ τον Ιούνιο σημειώνονται 49 ημέρες ισχυρών επεισοδίων σκόνης. Την άνοιξη παρατηρείται ένα μέγιστο τον Απρίλιο, μήνα κατά τον οποίο λαμβάνουν χώρα πάνω από τις μισές ημέρες ισχυρών επεισοδίων σκόνης της εποχής αυτής (31 ημέρες). Κατά τη διάρκεια του χειμώνα, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, σημειώνεται μόνο 1 ημέρα ισχυρού επεισοδίου σκόνης, και πιο συγκεκριμένα το Φεβρουάριο, ενώ καμία ημέρα δεν καταγράφεται το φθινόπωρο. Η ενδοετήσια μεταβολή του μέσου οπτικού βάθους για τις ημέρες ισχυρών επεισοδίων σκόνης παρουσιάζεται στο Παράρτημα (Σχήμα Π6).



Σχήμα 3.7. Ενδοετήσια μεταβολή (μεσοποιημένες τιμές περιόδου 2005-2021) της αθροιστικής απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των ισχυρών επεισοδίων ερημικής σκόνης (SDAEDs) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8, ο ενδοετήσιος κύκλος των ημερών ακραίων επεισοδίων αερολυμάτων διαφέρει από εκείνο των ισχυρών, παρουσιάζοντας το κύριο μέγιστο κατά την άνοιξη και συγκεκριμένα τον Απρίλιο, με 17 ημέρες (ακραίων) επεισοδίων. Κατά τη διάρκεια του θέρους οι ημέρες ακραίων επεισοδίων σκόνης είναι λιγότερες από την άνοιξη με μόλις 9 ημέρες συνολικά, που συμβαίνουν πρωτίστως τον Ιούνιο (6 ημέρες) και τον Ιούλιο (3 ημέρες). Το φθινόπωρο, όπως και το χειμώνα, δε σημειώνεται καμία ημέρα ακραίου επεισοδίου σκόνης στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Η ενδοετήσια μεταβολή του μέσου οπτικού βάθους για τις ημέρες ακραίων επεισοδίων σκόνης παρουσιάζεται στο Παράρτημα (Σχήμα Π6).

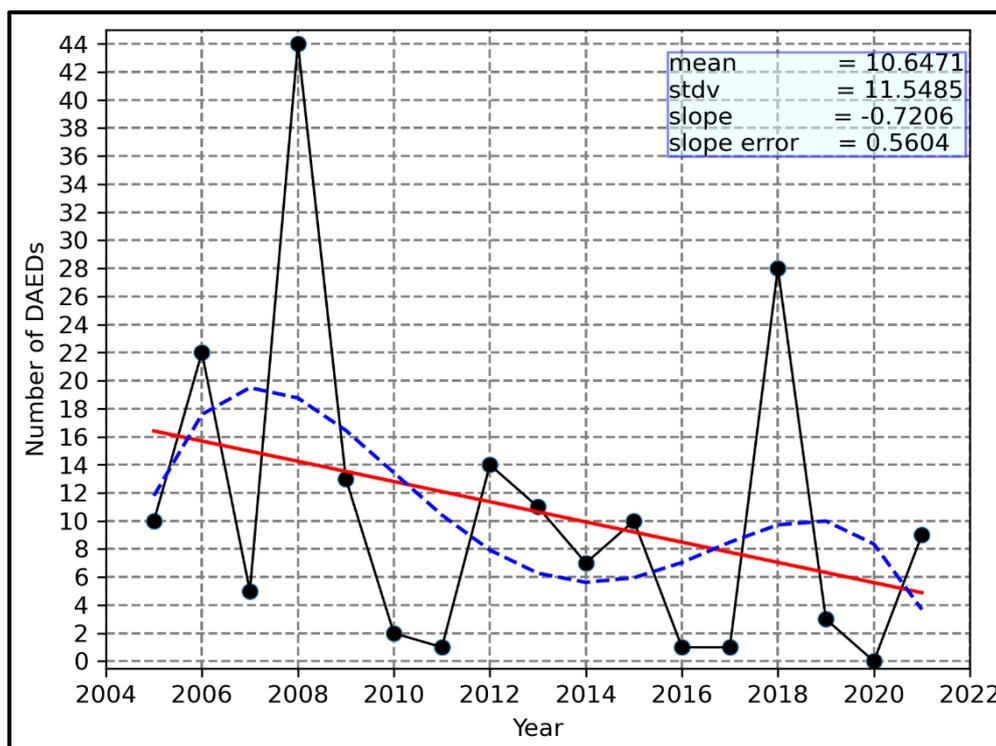


Σχήμα 3.8. Ενδοετήσια μεταβολή (μεσοποιημένες τιμές περιόδου 2005-2021) της αθροιστικής απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των ακραίων επεισοδίων ερημικής σκόνης (EDAEDs) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας.

3.2.2 Διαχρονική μεταβολή

Τα αποτελέσματα της διαχρονικής μεταβολής των έντονων (ισχυρών και ακραίων) επεισοδίων σκόνης στην Ασία υπολογίσθηκαν και παρέχονται για όλη την περιοχή μελέτης (αθροιστικά) για την περίοδο 2005-2021. Στο Σχήμα 3.9 παρουσιάζεται η διαχρονική (από έτος σε έτος) διακύμανση του συνολικού αριθμού (της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης) των ημερών ισχυρών επεισοδίων σκόνης. Επίσης, στη χρονοσειρά των ετήσιων τιμών έχει εφαρμοσθεί γραμμική παρεμβολή, μέσω της μεθόδου της γραμμικής παλινδρόμησης (Linear Regression), ενώ παρέχεται η μέση τιμή με την αντίστοιχη τυπική απόκλιση, καθώς και η κλίση της ευθείας με το αντίστοιχο σφάλμα της. Διαπιστώνεται μία σημαντική διακύμανση από έτος σε έτος της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των ισχυρών επεισοδίων σκόνης (SDAEDs) στην Ασία, με τιμές που κυμαίνονται από 0 έως 44 ημέρες επεισοδίων ανά έτος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα έτη 2008 και 2018, όταν σημειώθηκαν με διαφορά οι περισσότερες ημέρες ισχυρών επεισοδίων σκόνης, 44 και 28 ημέρες αντίστοιχα, ενώ αντιθέτως το 2020 δεν σημειώθηκε καμία ημέρα ισχυρού επεισοδίου. Αν εξαιρεθούν τα δύο αυτά ξεκάθαρα μέγιστα, η ετήσια συχνότητα κυμαίνεται από 0 έως περίπου 20 ισχυρά επεισόδια (ανά έτος). Επίσης, διακρίνεται μια στατιστικά σημαντική γραμμική φθίνουσα τάση, υποδηλώνοντας μια μείωση ίση με 115,06%. Σε σύγκριση με την αντίστοιχη διαχρονική μεταβολή των συχνοτήτων εμφάνισης των DAEDs για την περιοχή της Μεσογείου (Gavrouzou, 2021), παρατηρούμε ότι υπάρχει μια εμφανής ομοιότητα στα δύο μέγιστα το 2008 και το

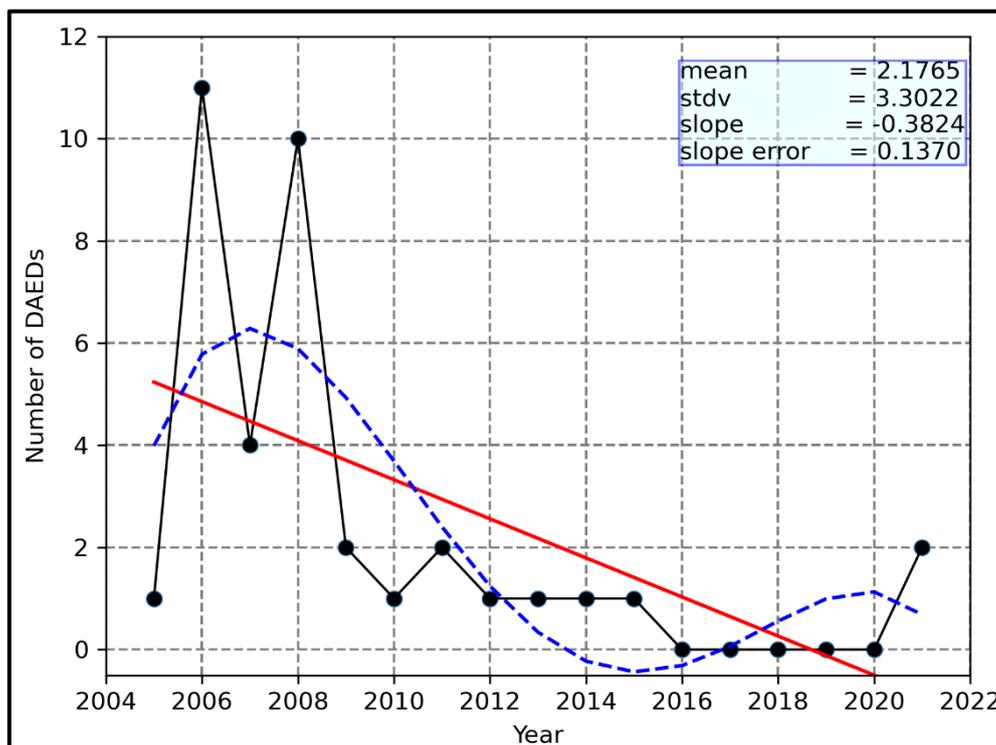
2018, με τις τιμές όμως της Μεσογείου να κυμαίνονται από 1 έως 18 ισχυρές ημέρες επεισοδίων έναντι 0 και 44 ημερών στην περιοχή της Ασίας. Επίσης εμφανής είναι και η διαφορά στην τάση μεταβολής, καθώς στη Μεσόγειο υπάρχει μικρότερη τάση μείωσης.



Σχήμα 3.9. Διαχρονική μεταβολή και γραμμική τάση μεταβολής του συνολικού ετήσιου αριθμού (απόλυτη συχνότητα) ισχυρών επεισοδίων ερημικής σκόνης (SDAEDs) στην περιοχή μελέτης κατά την περίοδο 2005-2021. Παρέχεται, επίσης, η εφαρμοσθείσα γραμμική, καθώς και η πολυωνυμική 4^{ης} τάξης παρεμβολή στη χρονοσειρά, όπως και η υπολογισθείσα κλίση της ευθείας γραμμικής παρεμβολής.

Στο Σχήμα 3.10 παρουσιάζεται η διαχρονική μεταβολή του συνολικού ετήσιου αριθμού (απόλυτης συχνότητας) εμφάνισης των ακραίων ημερών επεισοδίων σκόνης στην Ασία. Η εικόνα διαφέρει σημαντικά από αυτή των ισχυρών επεισοδίων με τις τιμές να είναι μικρότερες (έως 11 ακραία επεισόδια/έτος έναντι 44 ισχυρών επεισοδίων) και τα μέγιστα να εμφανίζονται κατά τα έτη 2006 και 2008, με 11 και 10 ημέρες ακραίων επεισοδίων, αντίστοιχα. Σε σύγκριση με τις αντίστοιχες ημέρες ακραίων επεισοδίων της Μεσογείου, παρατηρείται ότι οι δύο κατανομές διαφέρουν, με μόνη ομοιότητα το 2008 όπου σημειώθηκε ο μέγιστος αριθμός ημερών. Οι τιμές στη Μεσόγειο κυμαίνονται από 1 έως 8 ημέρες επεισοδίων έναντι των 0 έως 11 ημερών στην Ασία, ενώ και πάλι η φθίνουσα τάση μεταβολής είναι μικρότερη από αυτή της Ασίας. Στην πλειοψηφία των ετών οι τιμές είναι ελάχιστες έως μηδενικές (0 έως 2 ημέρες επεισοδίων ανά έτος), γεγονός που συμβάλλει στην ισχυρά φθίνουσα (στατιστικά σημαντική) γραμμική τάση μεταβολής (με το ποσοστό μείωσης να είναι ίσο με 298,68%). Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός της πολύ υψηλότερης συχνότητας εμφάνισης στην αρχή της περιόδου μελέτης, κατά τα έτη 2006 και 2008 από ότι στην υπόλοιπη περίοδο. Τα αίτια τόσο για αυτό, όσο και για την ισχυρή μείωση, μπορεί να σχετίζονται με την ισχύ των πηγών εκπομπής, συγκεκριμένα τον άνεμο που επηρεάζει

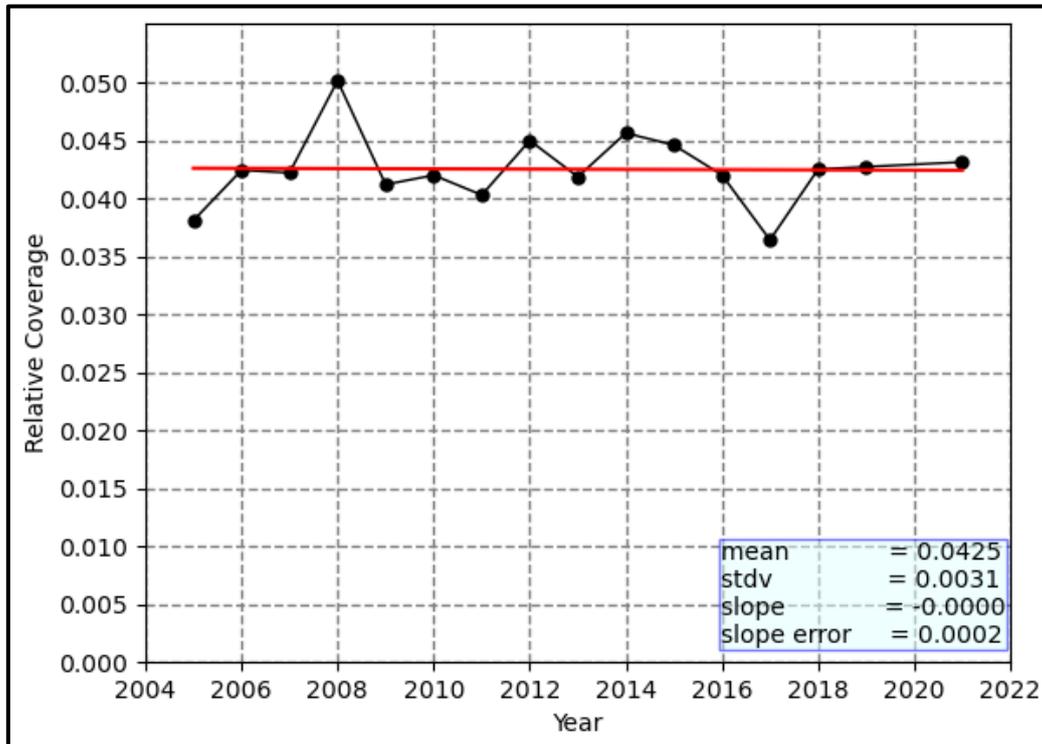
άμεσα την εκπομπή και τη μεταφορά των φορτίων σκόνης, την ξηρότητα του εδάφους, τα επικρατούντα βαρομετρικά συστήματα, καθώς και τον υετό, που λειτουργεί ως μηχανισμός (υγρής) απομάκρυνσης των αερολυμάτων από την ατμόσφαιρα. Η εξακρίβωση των αιτιών για την από έτος σε έτος μεταβολή της συχνότητας εμφάνισης τόσο των ακραίων όσο και των ισχυρών επεισοδίων σκόνης στην Ασία, είναι αντικείμενο περαιτέρω διερεύνησης.



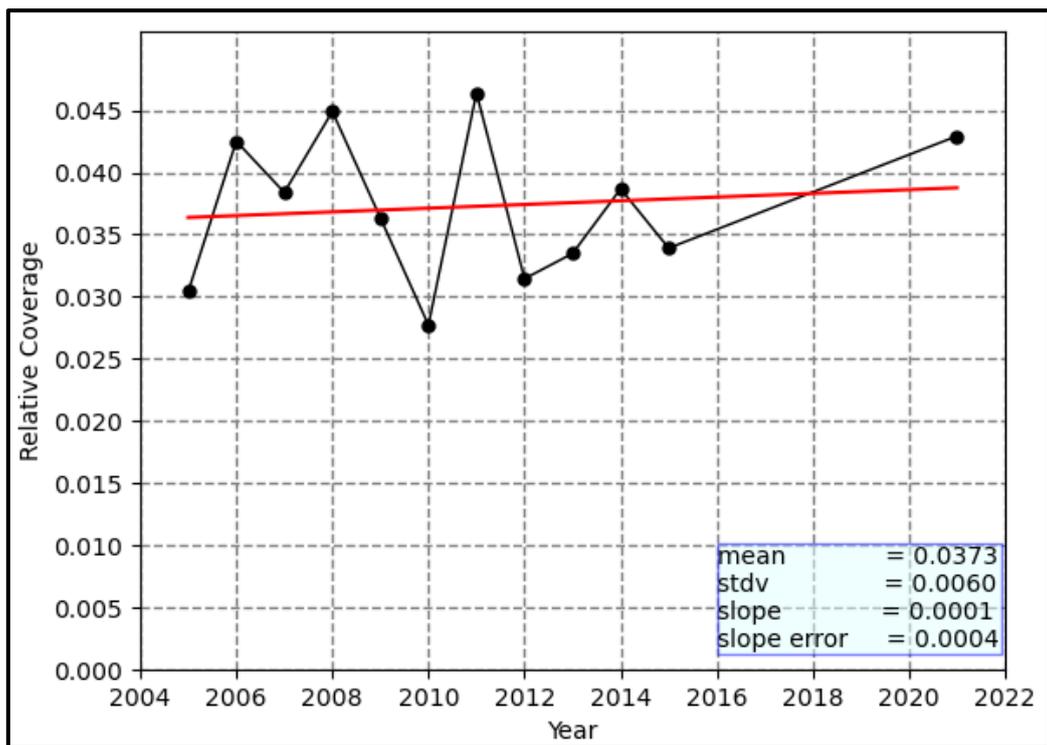
Σχήμα 3.10. Διαχρονική μεταβολή και γραμμική τάση μεταβολής του συνολικού ετήσιου αριθμού (απόλυτης συχνότητας) ακραίων επεισοδίων ερημικής σκόνης (EDAEDs) στην περιοχή μελέτης κατά την περίοδο 2005-2021. Παρέχεται, επίσης, η εφαρμοσθείσα γραμμική, καθώς και η πολυωνυμική 4^{ης} τάξης παρεμβολή στη χρονοσειρά, όπως και η υπολογισθείσα κλίση της ευθείας γραμμικής παρεμβολής.

Στα Σχήματα 3.11 και 3.12, παρέχεται η πληροφορία για τη σχετική χωρική κάλυψη της περιοχής μελέτης από ισχυρά και ακραία επεισόδια σκόνης αντίστοιχα. Ο υπολογισμός αυτός πραγματοποιείται για να εξετάσουμε αν η χωρική κάλυψη των επεισοδίων επηρεάζει τη συχνότητα εμφάνισής τους και σε ποιο βαθμό. Η χωρική έκταση των επεισοδίων και η περιοχική τους κάλυψη εξαρτάται από τις επικρατούσες συνοπτικές συνθήκες ή από τους μηχανισμούς εκπομπής και απομάκρυνσης, όπως η βροχόπτωση ή η καθίζηση. Στην περίπτωση των ισχυρών επεισοδίων, Σχήμα 3.11, η σχετική χωρική κάλυψη στην περίοδο μελέτης κατά μέσο όρο κυμαίνεται από 3,6% (ελάχιστη τιμή το 2017), έως 5% (μέγιστη τιμή το 2008). Στην περίπτωση αυτή δεν παρατηρείται ουσιαστική διαχρονική τάση μεταβολής και φαίνεται ότι η κάλυψη παραμένει σχεδόν σταθερή κατά την περίοδο 2005-2021. Στο Σχήμα 3.12, παρουσιάζεται η αντίστοιχη πληροφορία για τις ημέρες ακραίων επεισοδίων. Η εποχική τους κάλυψη κυμαίνεται από 2,8% (ελάχιστη τιμή το 2010), έως 4,6% (μέγιστη τιμή το 2011), όντας συγκρίσιμη με την κάλυψη των ισχυρών επεισοδίων.

Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου δείχνουν μια πολύ μικρή και μη στατιστικά σημαντική αυξητική τάση ίση με 4,56%. Επομένως, τα αποτελέσματα των σχημάτων 3.11 και 3.12 δείχνουν ότι τα αποτελέσματα της συχνότητας εμφάνισης (Σχήματα 3.9 και 3.10) δεν επηρεάζονται από την περιοχική κάλυψη (και χωρική έκταση) των επεισοδίων, ώστε τα αντίστοιχα ευρήματά τους να μπορούν να θεωρηθούν ασφαλή.

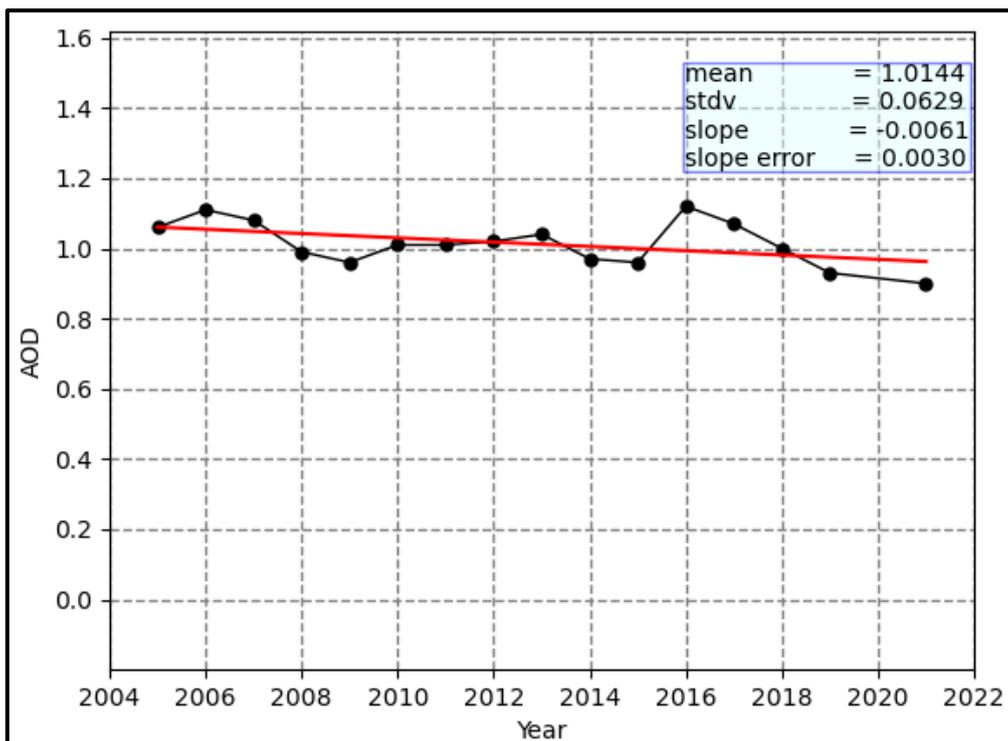


Σχήμα 3.11. Διαχρονική μεταβολή και γραμμική τάση μεταβολής της σχετικής χωρικής κάλυψης της περιοχής μελέτης (Ασίας) από κυψελίδες με ισχυρά επεισόδια σκόνης (SDAEDs) κατά την περίοδο 2005-2021.



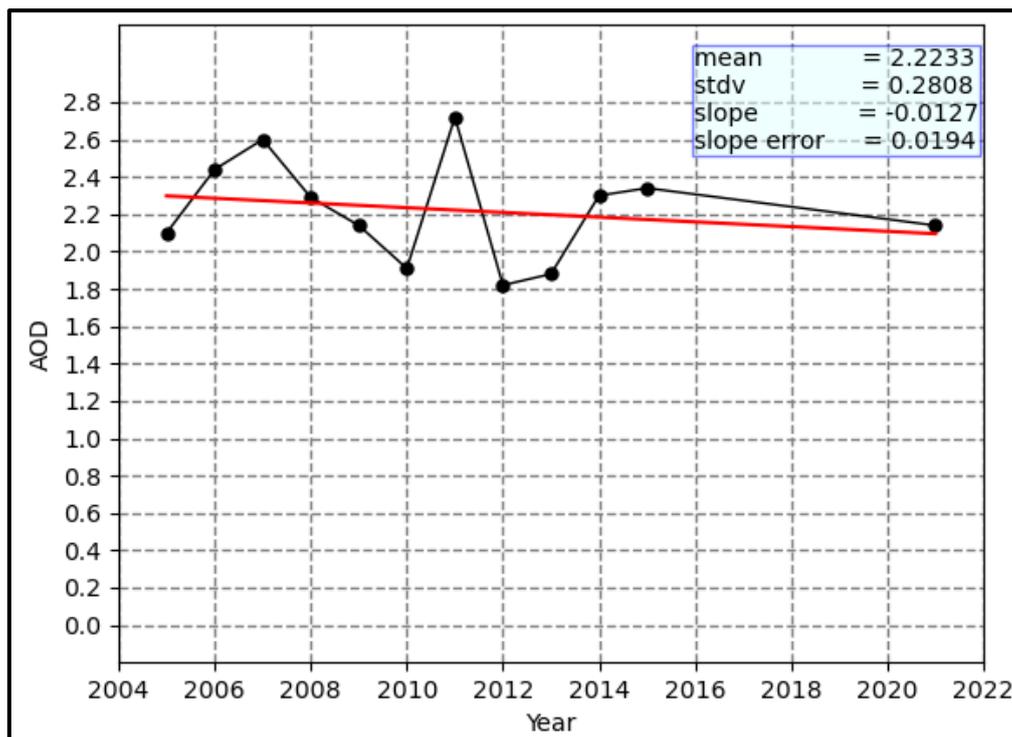
Σχήμα 3.12. Διαχρονική μεταβολή και γραμμική τάση μεταβολής της σχετικής χωρικής κάλυψης της περιοχής μελέτης (Ασίας) από κυψελίδες με ακραία επεισόδια σκόνης (EDAEDs) κατά την περίοδο 2005-2021.

Στα Σχήματα 3.13 και 3.14 παρέχεται η πληροφορία για τη διαχρονική μεταβολή του μέσου οπτικού βάθους των ημερών έντονων επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης (DAEDs) για την ευρύτερη περιοχή της Ασίας, για τα ισχυρά και ακραία επεισόδια αντίστοιχα. Στην περίπτωση των ισχυρών επεισοδίων (SDAEDs) η έντασή τους στην περίοδο μελέτης κυμαίνεται από 0,90 (ελάχιστη τιμή το 2021), έως 1,12 (μέγιστη τιμή το 2016) εμφανίζοντας ένα μικρό εύρος κύμανσης τιμών. Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου δείχνουν μια μικρή τάση μείωσης (στατιστικά σημαντική) της έντασης (του μέσου οπτικού βάθους) των ισχυρών επεισοδίων σκόνης στην Ασία κατά την περίοδο μελέτης (με το ποσοστό μείωσης να είναι ίσο με 10,22%). Αυτή η τάση μείωσης της έντασης των ισχυρών επεισοδίων σκόνης σε συνδυασμό με την τάση μείωσης της συχνότητας εμφάνισής τους, δείχνει ότι τα επεισόδια αυτής της κατηγορίας στην Ασία συμβαίνουν όλο και πιο σπάνια και με μικρότερη ένταση. Η τάση αυτή της μείωσης μπορεί να συμβαίνει λόγω των επικρατούντων συνοπτικών συνθηκών ή των μηχανισμών απόθεσης (βροχόπτωση ή καθίζηση), οι οποίοι εξαρτώνται από το μέγεθος των σωματιδίων. Όπως αποδείχθηκε σε γεωγραφική κατανομή, έτσι και σε διαχρονική κλίμακα, όταν έχουμε τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης ημερών επεισοδίων σκόνης, δεν εμφανίζονται και οι μέγιστες τιμές του οπτικού βάθους των αερολυμάτων. Σε σύγκριση με την αντίστοιχη διαχρονική μεταβολή της έντασης των DAEDs για την περιοχή της Μεσογείου (Gavrrouzu, 2021), παρατηρούμε ότι οι τιμές της Μεσογείου είναι μικρότερες και κυμαίνονται από 0,68 έως 0,86 έναντι 0,90 και 1,12 για την περιοχή της Ασίας. Όσον αφορά στην τάση μεταβολής φαίνεται να είναι παρόμοια με αυτήν της Ασίας.



Σχήμα 3.13. Διαχρονική μεταβολή και γραμμική τάση μεταβολής του μέσου οπτικού βάθους σκόνης (της έντασης) των ισχυρών επεισοδίων σκόνης (SDAEDs) στην Ασία κατά την περίοδο 2005-2021.

Σε ό,τι αφορά στις ημέρες ακραίων επεισοδίων σκόνης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.14, η έντασή τους κατά την περίοδο μελέτης κυμαίνεται από 1,82 (ελάχιστη τιμή το 2012), έως 2,72 (μέγιστη τιμή το 2011), όντας μεγαλύτερες σε μέγεθος, όπως είναι αναμενόμενο, από τις αντίστοιχες των ισχυρών και εμφανίζοντας μεγαλύτερο εύρος τιμών. Όπως συμβαίνει και με τα ισχυρά επεισόδια, έτσι και για τα ακραία παρατηρείται φθίνουσα (μη στατιστικά σημαντική) τάση της έντασης των επεισοδίων, δηλαδή του οπτικού τους βάθους, με το ποσοστό μείωσης να είναι ίσο με 9,71%. Και για τα ακραία επεισόδια σκόνης στην Ασία, διαπιστώνεται ότι συμβαίνουν στην Ασία όλο και πιο σπάνια και με μικρότερη ένταση. Σε σύγκριση με την αντίστοιχη διαχρονική μεταβολή της έντασης των DAEDs για την περιοχή της Μεσογείου (Γανρουζου, 2021), παρατηρούμε ότι οι τιμές της Μεσογείου για τις ημέρες ακραίων επεισοδίων είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες των ισχυρών, όμως είναι ελαφρώς μικρότερες από αυτές της Ασίας, και κυμαίνονται από 1,27 έως 2,46 έναντι 1,82 και 2,72 για την περιοχή της Ασίας. Όσον αφορά στην τάση μεταβολής φαίνεται να έχει μειωθεί δραστικά σε σχέση με της Ασίας.



Σχήμα 3.14. Διαχρονική μεταβολή και γραμμική τάση μεταβολής του οπτικού βάθους (της έντασης) των ακραίων επεισοδίων σκόνης (EDAEDs) στην Ασία κατά την περίοδο 2005-2021.

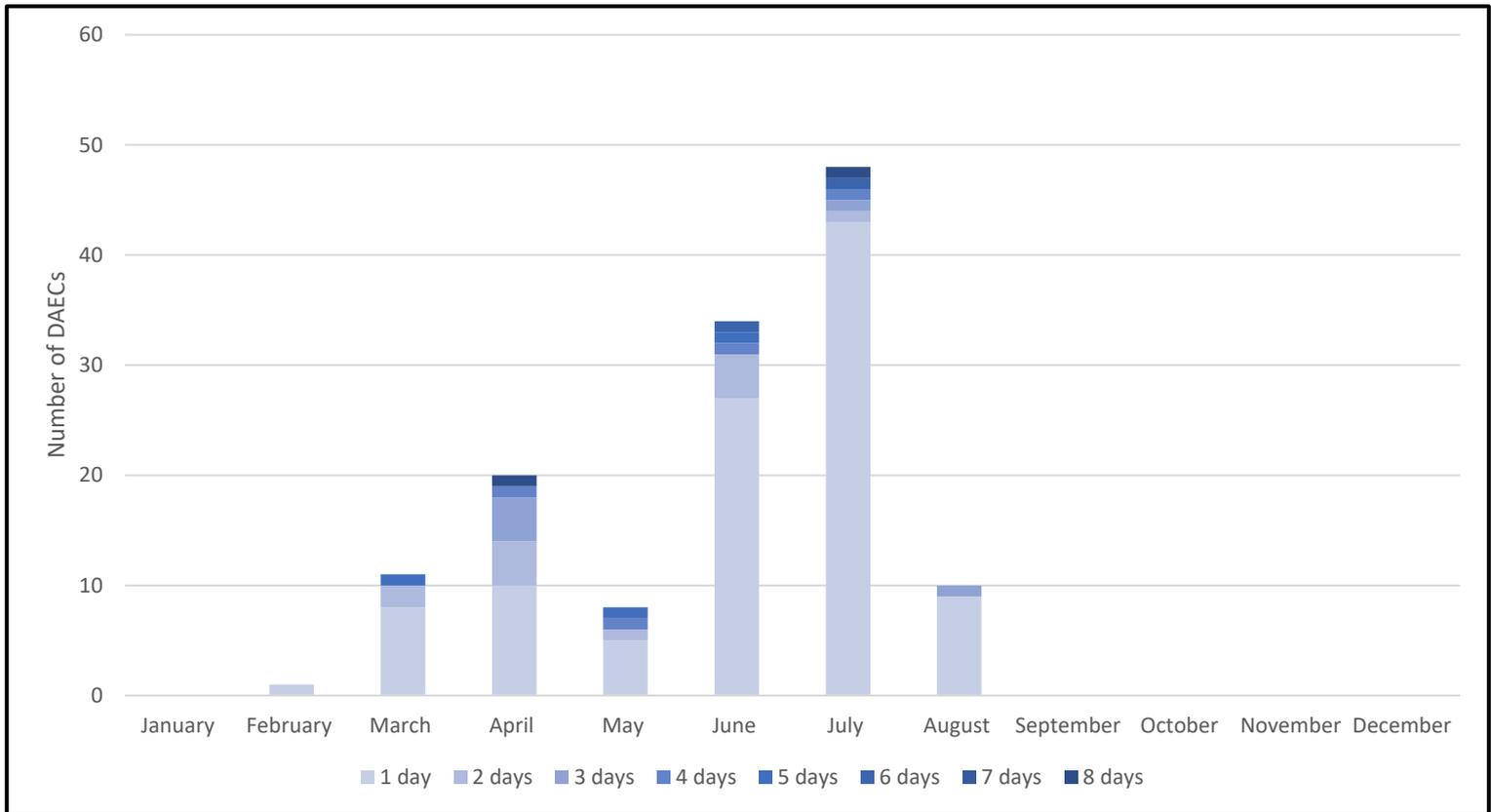
3.3 Ενδοετήσια και διαχρονική μεταβολή των περιπτώσεων επεισοδίων σκόνης (DAECs)

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται και συζητούνται η χρονική (ενδοετήσια και διαχρονική) μεταβλητότητα των περιπτώσεων επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης (DAECs), τόσο για το σύνολο της περιοχής μελέτης όσο και για συγκεκριμένες επιλεγμένες υποπεριοχές. Υπενθυμίζεται ότι (βλ. Ενότητα 2.3) οι περιπτώσεις επεισοδίων σκόνης ορίζονται ως η επίμονη φάση των DAEDs σε n διαδοχικές ημέρες (με $n \geq 1$). Σημειώνεται ότι για τον υπολογισμό των DAECs, λαμβάνονται υπόψη τόσο τα ισχυρά όσο και τα ακραία επεισόδια, και έτσι δεν αποτελεί έκπληξη το γεγονός ότι η διαχρονική μεταβλητότητα των DAECs είναι αρκετά παρόμοια με εκείνη των DAEDs. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου, υπολογίστηκαν συνολικά 132 DAECs, εκ των οποίων τα 92 συμβαίνουν το θέρος (69,7%), τα 39 την άνοιξη (29,5%), ενώ μόνο 1 συμβαίνει το χειμώνα (0,8%) και κανένα το φθινόπωρο. Συγκρίνοντας με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των DAECs για τη Μεσόγειο (Gavrrouzou, 2021), παρατηρείται ότι έχουμε περισσότερες περιπτώσεις επεισοδίων σκόνης, 132 στην Ασία έναντι 98 περιπτώσεις στη Μεσόγειο, με τα αντίστοιχα ποσοστά για την άνοιξη και το θέρος να είναι 46,9% και 36,7%. Παρακάτω παρουσιάζεται η ενδοετήσια και διαχρονική μεταβολή της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των περιπτώσεων

σκόνης, η μέση ετήσια διάρκειά τους, η σχετική χωρική τους κάλυψη και το μέσο οπτικό τους βάθος.

3.3.1 Ενδοετήσια μεταβολή

Στο Σχήμα 3.15 φαίνεται η ενδοετήσια μεταβολή των περιπτώσεων επεισοδίων σκόνης για την ευρύτερη περιοχή της Ασίας κατά τη 17ετή περίοδο μελέτης (2005-2021), καθώς και η διάρκεια σε ημέρες των περιπτώσεων αυτών. Η διάρκεια αυτή κυμαίνεται από 1 έως 8 συνεχόμενες ημέρες περιπτώσεων σκόνης. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, ο συνολικός αριθμός των DAECs είναι 132, με τα 92 να συμβαίνουν το θέρος, τα 39 την άνοιξη και 1 το χειμώνα. Σύμφωνα με το Σχήμα 3.15, το μέγιστο παρατηρείται πρωτίστως το μήνα Ιούλιο με 48 περιπτώσεις και δευτερευόντως τον Ιούνιο με 34 περιπτώσεις. Από αυτές τις 48 περιπτώσεις του Ιουλίου, οι 43 έχουν διάρκεια μιας ημέρας και οι υπόλοιπες 5 έχουν διάρκεια δύο, τριών, τεσσάρων, έξι και οκτώ ημερών αντίστοιχα. Για τις 34 περιπτώσεις του Ιουνίου, οι 27 έχουν διάρκεια μιας ημέρας, οι 4 έχουν διάρκεια δύο ημερών και οι 3 έχουν διάρκεια τεσσάρων, πέντε και έξι ημερών αντίστοιχα. Αντιθέτως, η εμφάνιση των DAECs τις υπόλοιπες εποχές είναι αμελητέα, με μόνο 1 περίπτωση διάρκειας 1 ημέρας να σημειώνεται το μήνα Φεβρουάριο. Τα περισσότερα από τα DAECs 78% (103 από τα 132) έχουν διάρκεια 1 ημέρας, ενώ το υπόλοιπο 22% αποτελούν οι περιπτώσεις οι οποίες διήρκησαν από 2 έως 8 ημέρες με τα ποσοστά αυτά να είναι ίσα με 9,1%, 4,5%, 3%, 2,3%, 1,5%, 0% και 1,5% για τις περιπτώσεις επεισοδίων 2, 3, 4, 5, 6, 7 και 8 ημερών αντίστοιχα. Επισημαίνεται ότι οι περιπτώσεις επεισοδίων σκόνης στην Ασία με διάρκεια μεγαλύτερη από 4 ημέρες λαμβάνουν χώρα τους μήνες Μάρτιο με Ιούλιο, με το μέγιστο να σημειώνεται το θέρος και συγκεκριμένα τον Ιούνιο. Σε σύγκριση με την αντίστοιχη ενδοετήσια μεταβολή των DAECs για την περιοχή της Μεσογείου (Γανρουζου, 2021), παρατηρείται ότι οι περιπτώσεις διαρκούν 1 έως 7 ημέρες έναντι των 1 έως 7 ημερών στην Ασία. Το 65,3% των περιπτώσεων έχουν διάρκεια 1 ημέρας, το 24,4% έχουν διάρκεια 2 ημερών, το 5,1% έχουν διάρκεια 3 ημερών, το 2% έχουν διάρκεια 4 ημερών και για διάρκεια 5,6 και 7 ημερών το ποσοστό είναι 1% για το καθένα.

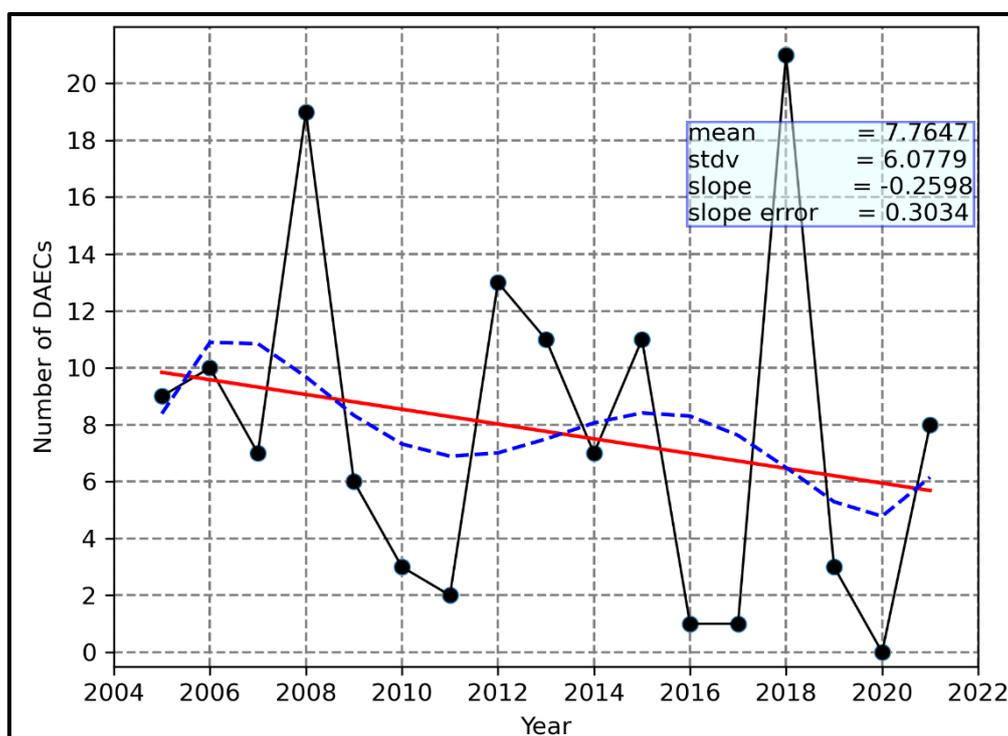


Σχήμα 3.15. Ενδοετήσια μεταβολή της αθροιστικής απόλυτης συχνότητας εμφάνισης (του συνολικού αριθμού) των περιπτώσεων επεισοδίων ερημικής σκόνης (DAECs) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας κατά την περίοδο 2005-2021. Επίσης, παρέχεται ο αριθμός συναρτήσεως της διάρκειας των περιπτώσεων επεισοδίων σε διαβαθμισμένη χρωματική κλίμακα.

3.3.2 Διαχρονική μεταβολή

Στο Σχήμα 3.16 παρουσιάζεται η διαχρονική διακύμανση του συνολικού αριθμού (απόλυτης συχνότητας) εμφάνισης των περιπτώσεων επεισοδίων σκόνης (DAECs) ανά έτος στην Ασία. Διαπιστώνεται μία σημαντική διακύμανση από έτος σε έτος της απόλυτης συχνότητας, με τιμές που κυμαίνονται από 0 έως 21 περιπτώσεις επεισοδίων ανά έτος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα έτη 2018 και 2008, όπου σημειώθηκε ο μέγιστος αριθμός περιπτώσεων επεισοδίων σκόνης, με 21 και 19 περιπτώσεις αντίστοιχα, ενώ αντιθέτως το 2020 δεν σημειώθηκε καμία περίπτωση. Κατά μέσο όρο σημειώνονται στην περιοχή μελέτης περίπου 8 (7,8) επεισόδια ανά έτος. Διαπιστώνεται ότι, η διαχρονική διακύμανση των DAECs σε σχέση με την αντίστοιχη των DAEDs είναι διαφορετική, παρουσιάζοντας όμως κοινό μέγιστο το 2008. Το μέγιστο του 2018 με τις 21 περιπτώσεις επεισοδίων προκύπτει αποκλειστικά από τις ημέρες ισχυρών επεισοδίων σκόνης, καθώς οι ημέρες ακραίων επεισοδίων είναι μηδενικές. Σε σύγκριση με τα DAECs της περιοχής της Μεσογείου (Gavrouzou, 2021), παρατηρείται ότι το 2008 και το 2018 έχουμε επίσης υψηλές τιμές (όχι τις

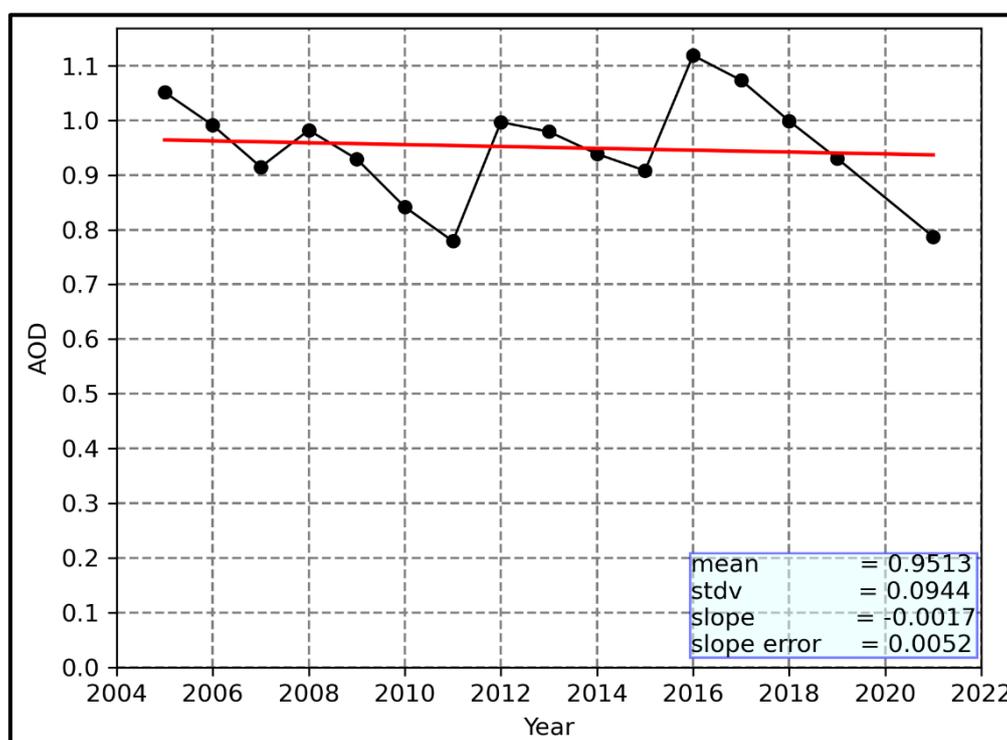
μέγιστες), με τις τιμές να κυμαίνονται από 1 έως 11 DAECs, έναντι των 1 έως 21 DAECs στην Ασία. Από την εφαρμοσθείσα γραμμική παρεμβολή προκύπτει ότι η συχνότητα εμφάνισης των DAECs παρουσιάζει (γραμμική) τάση μείωσης (μη στατιστικά σημαντική), ίση με 56,88%. Ωστόσο, αυτή η τάση μείωσης, στην πραγματικότητα δεν είναι μονότονη, όπως αποκαλύπτεται από την εφαρμοσθείσα 6^{ης} τάξης πολυωνυμική παρεμβολή. Έτσι, φαίνεται ότι από την αρχή της περιόδου μελέτης μέχρι το 2011 η συχνότητα εμφάνισης των DAECs μειώθηκε, στη συνέχεια αυξήθηκε μέχρι το 2015 και έπειτα μειώθηκε εκ νέου μέχρι το τέλος (2020). Αντιθέτως, στην περιοχή της Μεσογείου (Γανρουζου, 2021), παρατηρείται τάση αύξησης της συχνότητας εμφάνισης των περιπτώσεων επεισοδίων σκόνης.



Σχήμα 3.16. Διαχρονική μεταβολή της ανά έτος απόλυτης συχνότητας εμφάνισης συνολικό αριθμό των περιπτώσεων επεισοδίων ερημικής σκόνης (DAECs) που σημειώθηκαν στην περιοχή μελέτης κατά την περίοδο 2005-2021. Παρέχεται, επίσης, η εφαρμοσθείσα γραμμική, καθώς και η πολυωνυμική 6^{ης} τάξης παρεμβολή στη χρονοσειρά, όπως και η υπολογισθείσα κλίση της ευθείας γραμμικής παρεμβολής.

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό των περιπτώσεων επεισοδίων σκόνης (της Ασίας) είναι και η έντασή τους, η οποία ποσοτικοποιείται με τη βοήθεια του οπτικού βάθους σκόνης. Έτσι, στο Σχήμα 3.17 παρέχεται η πληροφορία για τη διαχρονική μεταβολή του μέσου οπτικού βάθους των περιπτώσεων επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης (DAECs) για την ευρύτερη περιοχή της Ασίας την περίοδο 2005-2021. Η έντασή τους στην περίοδο μελέτης κατά μέσο όρο κυμαίνεται από 0,78 (ελάχιστη τιμή το 2011 και το 2021), έως 1,12 (μέγιστη τιμή το 2016) και μια μέση τιμή ίση με 0,95.

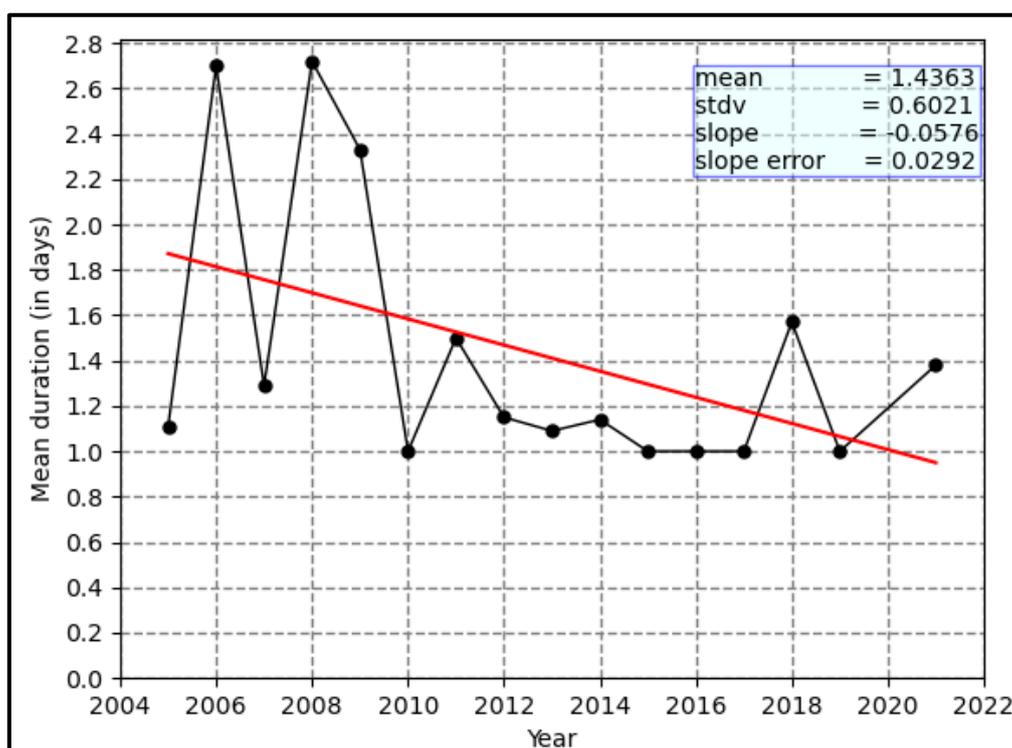
Η διακύμανση αυτή είναι μικρή (0,34) σε σχέση με τη μέση τιμή του οπτικού βάθους (0,95), δηλαδή περίπου το 30% αυτής. Διαπιστώνεται ότι, η διαχρονική διακύμανση των DAECs σε σχέση με των DAEDs είναι διαφορετική, με το μέγιστο του 2016 να προκύπτει από τις περιπτώσεις ισχυρών επεισοδίων. Η μέση τιμή της έντασης των DAECs είναι 0,78, ενώ των ημερών ισχυρών επεισοδίων είναι 1,01 και των ημερών ακραίων επεισοδίων είναι 2,22. Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου δείχνουν μια μικρή και μη στατιστικά σημαντική τάση μείωσης της έντασης (του μέσου οπτικού βάθους) των περιπτώσεων επεισοδίων σκόνης στην Ασία κατά την περίοδο μελέτης, με το ποσοστό μείωσης να είναι ίσο με 3,04%. Αυτή η τάση μείωσης της έντασης των περιπτώσεων επεισοδίων σκόνης σε συνδυασμό με την τάση μείωσης της συχνότητας εμφάνισής τους, δείχνει ότι οι περιπτώσεις επεισοδίων (όπως και οι ημέρες επεισοδίων) συμβαίνουν όλο και πιο σπάνια και με μικρότερη ένταση. Η ένταση των DAECs στην περιοχή της Μεσογείου (Gavrouzu, 2021) κυμαίνεται από 0,83 έως 1,76, με σημαντική διαφορά το 2011 όπου στη Μεσόγειο σημειώνεται το κύριο μέγιστο, ενώ ταυτόχρονα στην Ασία σημειώνεται η ελάχιστη τιμή.



Σχήμα 3.17. Διαχρονική μεταβολή και γραμμική τάση μεταβολής του οπτικού βάθους (της έντασης) των περιπτώσεων επεισοδίων ερημικής σκόνης (DAECs) που σημειώθηκαν στην περιοχή μελέτης κατά την περίοδο 2005-2021.

Στο Σχήμα 3.18, παρουσιάζεται η μέση ετήσια διάρκεια των περιπτώσεων επεισοδίων σκόνης (DAECs) στην Ασία σε ημέρες. Από τα αποτελέσματα του αλγορίθμου φαίνεται ότι η μέση ετήσια διάρκεια κυμαίνεται από 1 ημέρα έως 2,72 ημέρες με μια μέση τιμή περίπου 1,5 ημέρας. Η μέγιστη διάρκεια παρατηρείται το 2008 με 2,72 ημέρες και το 2006 με 2,70 ημέρες, ενώ για 5 έτη φαίνεται ότι η διάρκεια των περιπτώσεων ήταν πρακτικά 1 ημέρα (2010, 2015, 2016, 2017, 2019). Συγκριτικά με

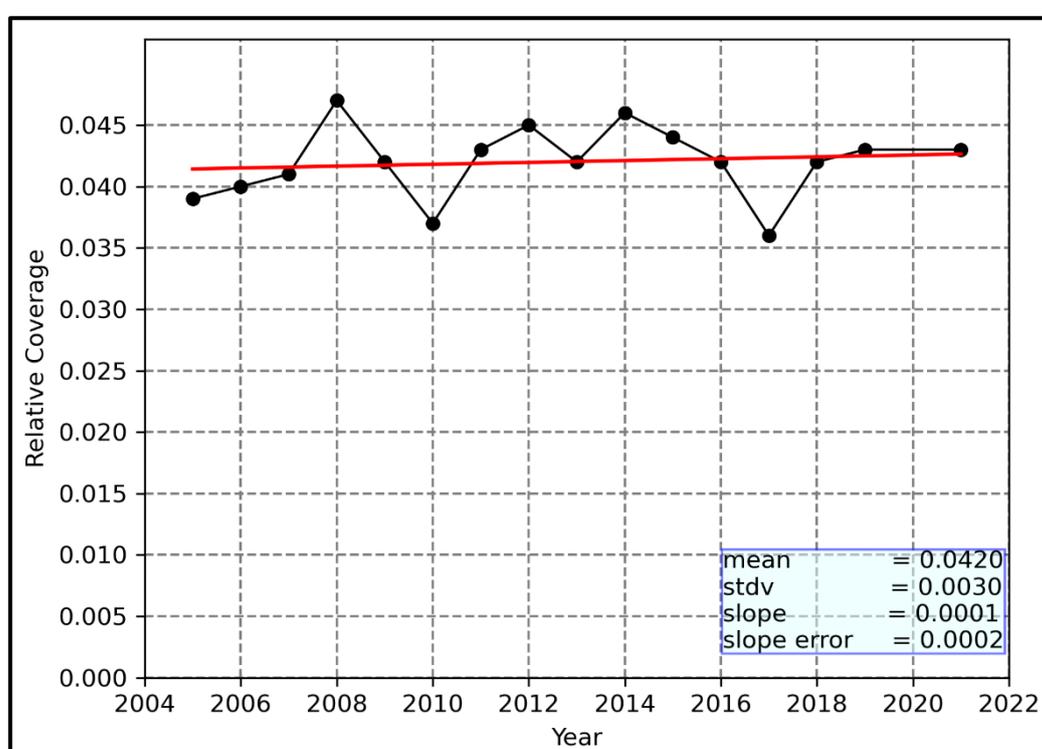
τη μέση ετήσια διάρκεια των DAECs της Μεσογείου (Gavrouzou, 2021), παρατηρείται ότι η μέση διάρκεια κυμαίνεται μεταξύ 1 και 2,3 ημέρες, με το μέγιστο να σημειώνεται το 2008, χρονιά όπου σημειώθηκε η μέγιστη μέση ετήσια διάρκεια των περιπτώσεων στην περιοχή της Ασίας. Η τάση μεταβολής παρουσιάζει μείωση ίση με 68,18%, η οποία είναι μη στατιστικά σημαντική. Σε σύγκριση με το Σχήμα 3.16, είναι σαφές ότι η μέση ετήσια διάρκεια των περιπτώσεων επεισοδίων σκόνης στην Ασία δεν είναι συνυφασμένη με την απόλυτη συχνότητά τους, δεδομένου ότι τα έτη με υψηλή συχνότητα δε χαρακτηρίζονται απαραίτητα και από μακρά διάρκεια. Για παράδειγμα, το έτος 2008 χαρακτηρίζεται από μεγάλη συχνότητα (19 περιπτώσεις/έτος), μακρά διάρκεια (2,7 ημέρες), όμως δε συμβαίνει το ίδιο και με το έτος 2018 (21 περιπτώσεις/έτος), το οποίο χαρακτηρίζεται από όχι τόσο μεγάλη διάρκεια περιπτώσεων επεισοδίων σκόνης (1,6 ημέρες). Από την άλλη πλευρά, τα έτος 2006 έχει περιπτώσεις επεισοδίων μεγάλης διάρκειας (2,7 ημέρες), όμως όχι τόσο συχνά (9 περιπτώσεις/έτος). Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι πρόκειται για δύο διαφορετικά και ασύνδετα χαρακτηριστικά των DAECs.



Σχήμα 3.18. Διαχρονική μεταβολή της μέσης ετήσιας διάρκειας (σε ημέρες) των περιπτώσεων επεισοδίων ερημικής σκόνης (DAECs) που σημειώθηκαν στην περιοχή μελέτης κατά την περίοδο 2005-2021.

Τέλος, στο Σχήμα 3.19, παρέχεται η πληροφορία για τη σχετική (σε σχέση με τη συνολική έκταση της περιοχής μελέτης) χωρική κάλυψη της περιοχής μελέτης των περιπτώσεων επεισοδίων σκόνης. Η σχετική χωρική κάλυψη στην περίοδο μελέτης κυμαίνεται από 3,6% (ελάχιστη τιμή το 2017), έως 4,7% (μέγιστη τιμή το 2008), ενώ κατά μέσο όρο η περιοχική κάλυψη είναι ίση με 4,2%. Έτσι, κρίνεται ότι οι περιπτώσεις των επεισοδίων ερημικής σκόνης της Ασίας καλύπτουν χωρικά σχετικά μικρό τμήμα της περιοχής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η περιοχή μελέτης είναι

εκτεταμένη (43,82 εκατομμύρια km²). Η αντίστοιχη σχετική χωρική κάλυψη της Μεσογείου (Γανρουζου, 2021) κυμαίνεται μεταξύ 5% και 7%, κάνοντας εμφανή την περισσότερο εκτεταμένη γεωγραφική κάλυψη. Αυτό δεν προκαλεί προβληματισμό, καθώς η περιοχή μελέτης της συγκεκριμένης εργασίας είναι μικρότερη από την περιοχή μελέτης της Ασίας. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο, η τάση μεταβολής από το 2005 έως το 2021 φαίνεται να είναι ελαφρώς αυξητική (μη στατιστικά σημαντική), με το ποσοστό αύξησης να είναι ίσο με 4,05%, πράγμα που σημαίνει ότι παρατηρείται μια αύξηση της χωρικής κάλυψης των περιπτώσεων επεισοδίων ερημικής σκόνης. Η αύξηση αυτή της χωρικής κάλυψης έρχεται σε αντίθεση με τη μείωση της χωρικής κάλυψης της περιοχής της Μεσογείου. Αν και η διαχρονική μεταβλητότητα της γεωγραφικής κάλυψης των DAECs δεν είναι παρόμοια με εκείνη της συχνότητάς τους, υπάρχουν μεμονωμένα έτη που χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές και των δύο παραμέτρων, όπως για παράδειγμα τα έτη 2008 και 2012. Ωστόσο, αυτό δε συμβαίνει κατά κανόνα, καθώς το 2014 έχουμε αυξημένη χωρική κάλυψη με σχετικά μικρή συχνότητα εμφάνισης των περιπτώσεων επεισοδίων σκόνης.



Σχήμα 3.19. Διαχρονική μεταβολή της σχετικής χωρικής κάλυψης, σε σχέση με την έκταση της περιοχής μελέτης των περιπτώσεων επεισοδίων ερημικής σκόνης (DAECs) που σημειώθηκαν στην περιοχή μελέτης κατά την περίοδο 2005-2021.

3.4 Περιπτώσεις επεισοδίων σκόνης (DAECs) σε περιοχική κλίμακα

Είναι ενδιαφέρον να μελετηθούν τα χαρακτηριστικά των DAECs σε υποπεριοχές ενδιαφέροντος. Αυτό πραγματοποιήθηκε μελετώντας την εποχικότητα των DAECs σε δύο (2) υποπεριοχές ενδιαφέροντος για την περίοδο μελέτης 2005-2021. Για το σκοπό αυτό, ορίστηκαν δύο περιοχές (Σχήμα 3.20), με βάση τη συχνότητα εμφάνισης

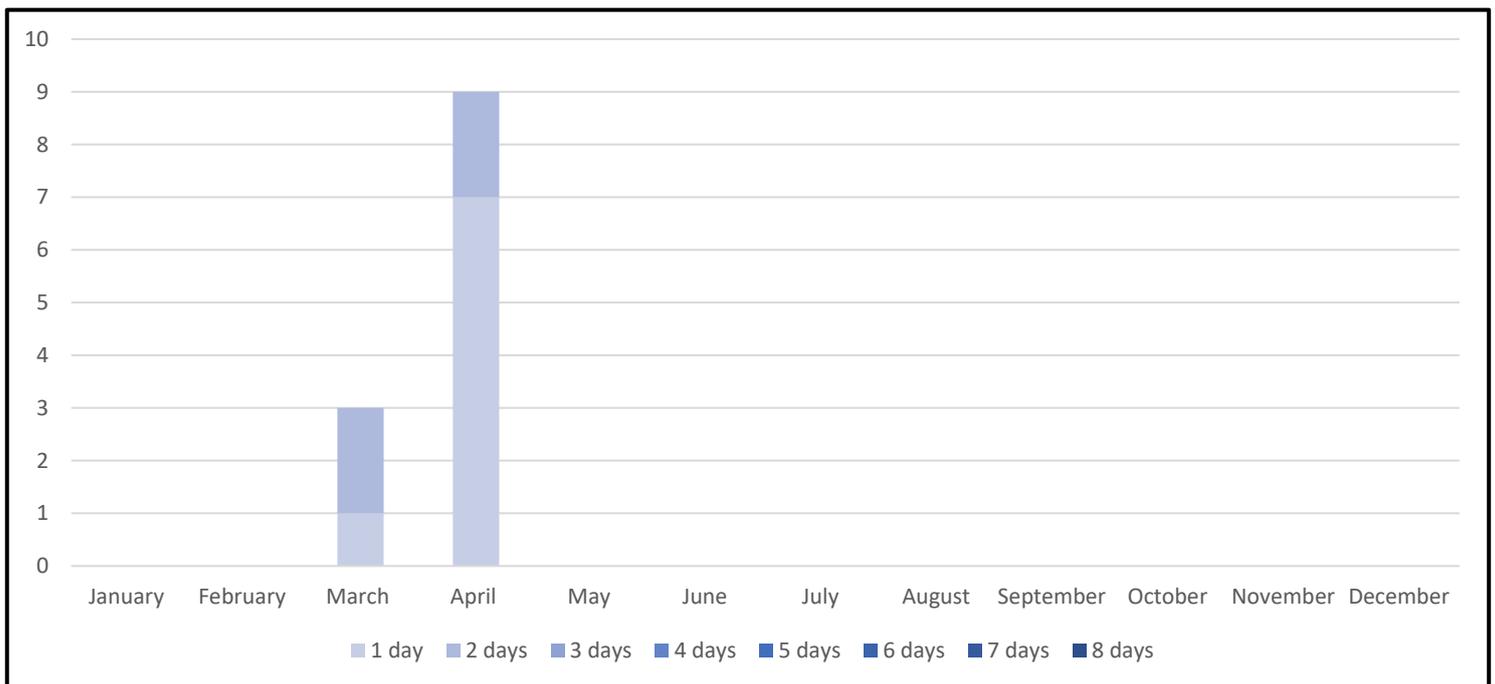
των ημερών επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης, ώστε να μελετηθεί η ενδοετήσια μεταβολή των DAECs στις περιοχές αυτές. Η Περιοχή 1 (γαλάζιο πλαίσιο) εκτείνεται από 80°E έως 110°E γεωγραφικό μήκος και 37°N έως 45°N γεωγραφικό πλάτος και περιλαμβάνει τις ερήμους Γκόμπι και Τακλαμακάν. Η Περιοχή 2 (κίτρινο πλαίσιο) εκτείνεται από 60°E έως 80°E γεωγραφικό μήκος και 10°N έως 35°N γεωγραφικό πλάτος και περιλαμβάνει την Αραβική Θάλασσα, την έρημο Ταρ, το Πακιστάν και το Αφγανιστάν.



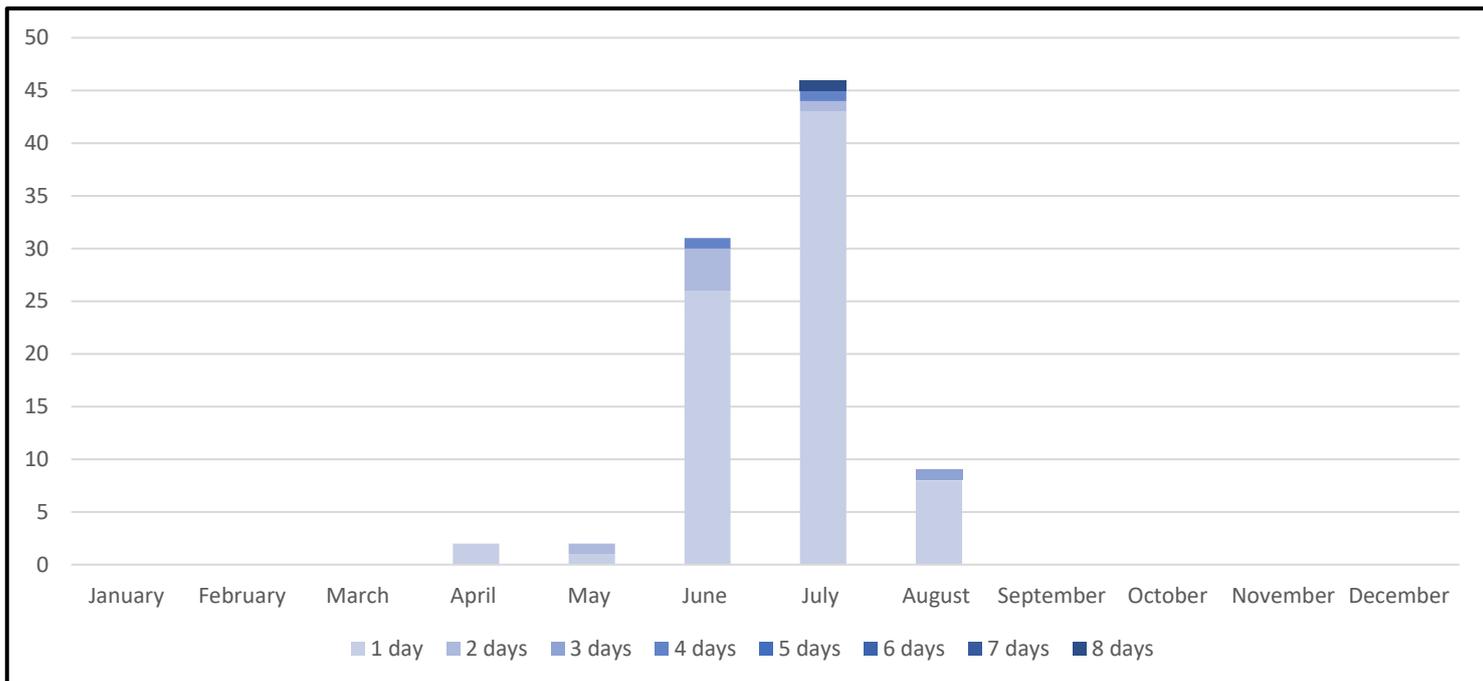
Σχήμα 3.20. Οι περιοχές (υποπεριοχές της περιοχής μελέτης) ενδιαφέροντος σκόνης της Ασίας. Με γαλάζιο χρώμα σημειώνεται η Περιοχή 1 και με κίτρινο η Περιοχή 2.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, παρατηρείται μια εμφανής εποχικότητα της αθροιστικής συχνότητας εμφάνισης (του συνολικού αριθμού) των DAECs στις δύο υποπεριοχές των Σχημάτων 3.21 και 3.22, στα οποία, παρουσιάζεται η ενδοετήσια κατανομή των DAECs για τις υποπεριοχές 1 και 2, αντίστοιχα. Επίσης, είναι εμφανής η σημαντικά μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης των DAECs στην υποπεριοχή 2 έναντι της υποπεριοχής 1 (90 έναντι 12 DAECs). Ακόμη, διαπιστώνεται ότι τα DAECs της υποπεριοχής 1 διαρκούν λιγότερο (έως 2 ημέρες) από εκείνα της υποπεριοχής 2 (έως 8 ημέρες). Στην υποπεριοχή 1 (Σχήμα 3.21), σημειώθηκαν συνολικά 12 περιπτώσεις επεισοδίων κατά την περίοδο 2005-2021, με τις 3 να συμβαίνουν το μήνα Μάρτιο και τις 9 τον Απρίλιο. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με τα αντίστοιχα της μέσης εποχικής κλιματολογικής κατανομής της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των DAEDs (Σχήμα 3.5), καθώς ο μέγιστος αριθμός ημερών επεισοδίων σκόνης στην υποπεριοχή 1 (Γκόμπι και Τακλαμακάν), σημειώνεται επίσης κατά την περίοδο της άνοιξης. Παρατηρείται ότι οι 12 αυτές περιπτώσεις έχουν μικρή διάρκεια, είτε μίας ημέρας

(66,7% των περιπτώσεων), είτε δύο ημερών (33,3% των περιπτώσεων). Στο Σχήμα 3.22 φαίνονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την υποπεριοχή 2. Στην περιοχή αυτή παρατηρείται ότι λαμβάνει χώρα μεγαλύτερος αριθμός περιπτώσεων, που είναι κατανομημένες στην ουσία κατά τη διάρκεια του θέρους. Σε σύγκριση με το Σχήμα 3.5, βλέπουμε ότι αυτό εξηγείται, καθώς οι μεγαλύτερες συχνότητες παρατηρούνται κυρίως πάνω από την έρημο Ταρ και την Αραβική Θάλασσα κατά το θέρος, όταν λαμβάνουν χώρα οι θερινοί μουσώνες οι οποίοι μεταφέρουν μεγάλα φορτία σκόνης από την Αραβική Χερσόνησο στην Αραβική Θάλασσα. Συγκεκριμένα, σημειώνονται συνολικά 90 περιπτώσεις επεισοδίων, με τον Ιούλιο να κυριαρχεί με 46 περιπτώσεις, ενώ ακολουθεί ο Ιούνιος με 31 περιπτώσεις και ο Αύγουστος με 9 περιπτώσεις επεισοδίων. Μόνο 3 περιπτώσεις σημειώνονται κατά τη διάρκεια της άνοιξης (Απρίλιος και Μάιος). Στην περιοχή αυτή, το 88,9% των περιπτώσεων έχουν διάρκεια 1 ημέρας και έπειτα ακολουθούν περιπτώσεις με διάρκεια 2, 3, 4 και 8 ημερών (11,1% των περιπτώσεων), με τα ποσοστά αυτά να είναι ίσα με 6,7%, 1,1%, 2,2% και 1,1% αντίστοιχα. Έπειτα από την ανάλυση σε υπο-περιοχική κλίμακα, παρατηρούμε ότι οι δύο επιλεγείσες υποπεριοχές μελέτης αναδεικνύουν και εξηγούν έναν εποχικό κύκλο των DAECs όλης της περιοχής μελέτης της Ασίας, ο οποίος κύκλος εμφανίζει διπλό μέγιστο την άνοιξη και το θέρος, γεγονός που αποδεικνύεται και οφείλεται στις υποπεριοχές 1 και 2.



Σχήμα 3.21. Ενδοετήσια μεταβολή της αθροιστικής απόλυτης συχνότητας εμφάνισης (του συνολικού αριθμού) των περιπτώσεων επεισοδίων ερημικής σκόνης (DAECs) στην υποπεριοχή ενδιαφέροντος 1 (της Ασίας) κατά την περίοδο 2005-2021. Επίσης, παρέχεται ο αριθμός συναρτήσεως της διάρκειας των περιπτώσεων επεισοδίων σε διαβαθμισμένη χρωματική κλίμακα.



Σχήμα 3.22. Ενδοετήσια μεταβολή της αθροιστικής απόλυτης συχνότητας εμφάνισης (του συνολικού αριθμού) των περιπτώσεων επεισοδίων ερημικής σκόνης (DAECs) στην υποπεριοχή ενδιαφέροντος 2 (της Ασίας) κατά την περίοδο 2005-2021. Επίσης, παρέχεται ο αριθμός συναρτήσεων της διάρκειας των περιπτώσεων επεισοδίων σε διαβαθμισμένη χρωματική κλίμακα.

Κεφάλαιο 4^ο

Σύνοψη- Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε ένας δορυφορικός αλγόριθμος με σκοπό την ανίχνευση και τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών των ημερών και περιπτώσεων αερολυμάτων σκόνης ερημικής προέλευσης στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας και της Κασπίας Θάλασσας κατά τη χρονική περίοδο 2005-2021. Ο αλγόριθμος αυτός προσδιορίζει τα οριακά επίπεδα (threshold levels) του φορτίου των αερολυμάτων και των οπτικών ιδιοτήτων τους, που σχετίζονται με το μέγεθος και την απορροφητικότητα τους, βάσει των οποίων ανιχνεύονται τα αερολύματα σκόνης και στη συνέχεια προσδιορίζονται οι ημέρες και οι περιπτώσεις επεισοδίων τους. Οι ημέρες κατά τις οποίες παρατηρούνται έντονα επεισόδια αερολυμάτων σκόνης DAES (ισχυρά και ακραία) με εκτεταμένη χωρική κάλυψη (πάνω από 70 κυψελίδες ή 700000 km² με ισχυρά/ακραία DAES) είναι οι επονομαζόμενες ημέρες επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης (DAEDs). Όταν τα DAEDs παρατηρούνται για μία ή/και περισσότερες διαδοχικές ημέρες n (με $n \geq 1$), τότε έχουμε τις επονομαζόμενες περιπτώσεις επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης (DAECs). Οι περιπτώσεις αυτές αποτελούνται από τουλάχιστον μία ημέρα επεισοδίου σκόνης (DAED) που αφορά είτε ισχυρά είτε ακραία επεισόδια. Ως δεδομένα εισαγωγής του αλγορίθμου χρησιμοποιούνται δορυφορικής προέλευσης δεδομένα οπτικών ιδιοτήτων των αερολυμάτων και συγκεκριμένα το φασματικό οπτικό τους βάθος (AOD), ο δείκτης απορρόφησης (AI) και ο εκθετικός παράγοντας Ångström (α). Το οπτικό βάθος (AOD) είναι μέτρο του φορτίου των αερολυμάτων, ο δείκτης αερολυμάτων (AI) είναι μέτρο της ικανότητας απορρόφησης τους και ο παράγοντας Ångström (α) είναι δείκτης του μεγέθους τους. Τα δεδομένα AOD και AI ελήφθησαν άμεσα από τις βάσεις δεδομένων MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) - Aqua και OMI (Ozone Monitoring Instrument) - Aura, αντίστοιχα, ενώ τα δεδομένα του εκθετικού παράγοντα Ångström Exponent (α) υπολογίστηκαν έμμεσα από τα φασματικά δεδομένα AOD του MODIS. Για το οπτικό βάθος αερολυμάτων χρησιμοποιήθηκαν συνδυαστικά δεδομένα AOD από τους αλγορίθμους Deep Blue Land (DB) και Dark Target (DT), έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ολοκληρωμένη χωρική κάλυψη της περιοχής μελέτης με τα καλύτερης ποιότητας δεδομένα AOD τόσο πάνω από θαλάσσιες όσο και πάνω από ηπειρωτικές εκτάσεις, συμπεριλαμβανομένων και των ερημικών περιοχών.

Τα δεδομένα που εισήχθησαν στον αλγόριθμο ήταν σε ημερήσια βάση και σε χωρική ανάλυση 1°x1° γεωγραφικού πλάτους και μήκους και κάλυπταν την περίοδο 17 ετών από την 1η Ιανουαρίου 2005 έως την 31η Δεκεμβρίου 2021. Ο αλγόριθμος εντόπισε τα αερολύματα σκόνης με ένα συνδυασμό κριτηρίων των οπτικών ιδιοτήτων AI και α , που είναι δεδομένα εισαγωγής του, για κάθε γεωγραφική κυψελίδα (pixel) 1°x1° για κάθε ημέρα κάθε μήνα κάθε έτους της περιόδου μελέτης. Έπειτα, ο αλγόριθμος παρήγαγε τα αποτελέσματα για τα επεισόδια σκόνης (DAEs), τα οποία κατέταξε ανάλογα με την έντασή τους σε ισχυρά (Strong DAEs, SDAEs) ή ακραία (Extreme DAEs, EDAEs). Τα αποτελέσματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για να προσδιοριστούν οι ημέρες επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης (Dust Aerosol Episode Days, DAEDs), δηλαδή

ημέρες κατά τις οποίες κυριαρχούν συνθήκες έντονων DAEs σε ευρεία έκταση (εκτεταμένη χωρική κάλυψη), ενώ, η επίμονη εμφάνιση τέτοιων DAEDs σε διαδοχικές ημέρες ορίστηκε ως περίπτωση επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης (Dust Aerosol Episode Cases, DAECs). Τα DAEDs χωρίστηκαν επίσης σε ισχυρά (Strong DAEDs, SDAEDs) και ακραία (Extreme DAEDs, EDAEDs), ενώ τα DAECs προέκυψαν αθροιστικά από τα ισχυρά και τα ακραία DAEDs. Ο αλγόριθμος υπολόγισε την απόλυτη (αθροιστική) συχνότητα εμφάνισης των ημερών επεισοδίων σκόνης, καθώς και την έντασή τους, σε όρους οπτικού βάθους ανά μήνα, εποχή και έτος. Έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία των αποτελεσμάτων αυτών, αναδείχθηκαν οι ενδοετήσιες και διαχρονικές κατανομές και τάσεις μεταβολής τόσο των ημερών επεισοδίων (DAEDs), όσο και των περιπτώσεων επεισοδίων σκόνης (DAECs).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου, σημειώθηκαν συνολικά 218 ημέρες επεισοδίων ερημικής σκόνης (DAEDs) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας και της Κασπίας Θάλασσας κατά τη 17-ετή χρονική περίοδο 2005-2021. Συνολικά, οι περισσότερες ημέρες σημειώθηκαν το θέρος (133 ημέρες, 61%) και δευτερευόντως την άνοιξη (84 ημέρες, 38,5%), ενώ μόνο 1 ημέρα επεισοδίου από τις 218 καταγράφηκε το χειμώνα και καμία δε σημειώθηκε το φθινόπωρο. Οι μέσες ετήσιες κλιματολογικές τιμές της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης και του φορτίου σκόνης διαφέρουν από εποχή σε εποχή και από έτος σε έτος. Γενικά, οι ισχυρές ημέρες επεισοδίων σκόνης παρατηρούνται περισσότερο συχνά πρωτίστως το θέρος και δευτερευόντως την άνοιξη, ενώ το φθινόπωρο και το χειμώνα σημειώνεται σχεδόν μηδενική συχνότητα εμφάνισης. Σε ετήσια κλιματολογική βάση, οι μεγαλύτερες τιμές της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης (ημέρες/έτος) των ισχυρών επεισοδίων σκόνης σημειώνονται στην έρημο Ταρ (Ινδία), στα νότια τμήματα του Πακιστάν και την Αραβική Θάλασσα, όπου συμβαίνουν 3 έως 4 ημέρες επεισοδίων/έτος. Όσον αφορά στις ημέρες ακραίων επεισοδίων, αυτές παρατηρούνται περισσότερο συχνά κατά τη διάρκεια της άνοιξης, με τιμές από 0,5 έως 1 ημέρα επεισοδίου/έτος, στις ερήμους Τακλαμακάν και Γκόμπι. Οι μεγαλύτερες τιμές του μέσου οπτικού βάθους (AOD) κατά τη διάρκεια των DAEDs σημειώνονται στην περιοχή ανατολικά της ερήμου Γκόμπι, όπου βρίσκεται το Πεκίνο και η Κίτρινη Θάλασσα, και ύστερα στις ερήμους Τακλαμακάν και Ταρ, και τέλος στην Αραβική Θάλασσα. Διαπιστώνεται ότι η γεωγραφική κατανομή των συχνοτήτων εμφάνισης των επεισοδίων αερολυμάτων (ισχυρών και ακραίων) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας και της Κασπίας Θάλασσας είναι διαφορετική σε σχέση με την αντίστοιχη κατανομή της έντασής τους. Για παράδειγμα, σε περιοχές της βόρειας και ανατολικής Κίνας (περιοχές με έντονη ανθρώπινη δραστηριότητα) και της Κίτρινης Θάλασσας, στις οποίες παρατηρούνται οι ημέρες με μεγαλύτερες εντάσεις επεισοδίων σκόνης, η συχνότητα των ισχυρών και ακραίων επεισοδίων είναι σχετικά χαμηλή, ενώ, επίσης και σε άλλες περιοχές στις οποίες συμβαίνουν τα πλέον συχνά επεισόδια, οι εντάσεις τους δεν είναι οι ισχυρότερες. Αυτό δεν είναι παράδοξο, καθώς η συχνότητα και η ένταση των επεισοδίων σκόνης είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους παράμετροι και καθορίζονται από διαφορετικές παραμέτρους. Όσον αφορά στη διαχρονική, από το 2005 έως το 2021, μεταβολή των ημερών ισχυρών και ακραίων επεισοδίων για το σύνολο της περιοχής μελέτης, βρέθηκε μια τάση μείωσης της απόλυτης συχνότητας και της έντασής τους. Ωστόσο, σταθερή ή ελαφρώς αυξητική τάση βρέθηκε για τη διαχρονική σχετική κάλυψη της περιοχής μελέτης. Φαίνεται, λοιπόν, ότι δεν υπάρχει άμεση συσχέτιση

της χωρικής κάλυψης με την απόλυτη συχνότητα και την ένταση των ημερών επεισοδίων σκόνης, γεγονός όχι παράξενο, δεδομένου ότι η ένταση των DAEDs δεν καθορίζεται από τους ίδιους παράγοντες που καθορίζουν τη συχνότητά τους και τη χωρική τους κάλυψη.

Αναφορικά με τις περιπτώσεις επεισοδίων σκόνης (DAECs), προσδιορίστηκαν 132 DAECs, εκ των οποίων τα 92 (69,7%) συνέβησαν το θέρος, τα 39 (29,5%) την άνοιξη, ενώ μόνο 1 (0,8%) συνέβη το χειμώνα και κανένα το φθινόπωρο. Σχετικά με τη διαχρονική τάση μεταβολής της απόλυτης συχνότητας, της έντασης και της μέσης ετήσιας διάρκειας των DAECs, αυτή βρέθηκε να είναι φθίνουσα, ενώ η αντίστοιχη σχετική χωρική κάλυψη βρέθηκε να έχει μικρή αυξητική τάση. Αυτό, σε συνδυασμό με την ευρεθείσα τάση μείωσης της έντασης των περιπτώσεων επεισοδίων σκόνης σε συνδυασμό με την τάση μείωσης της συχνότητάς τους, δείχνει ότι οι περιπτώσεις επεισοδίων (όπως και οι ημέρες επεισοδίων) συμβαίνουν στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας όλο και πιο αραιά, με μικρότερη ένταση, αλλά με αυξημένη χωρική έκταση. Τέλος, σύμφωνα με την ανάλυση των περιπτώσεων επεισοδίων σε μικρότερη περιοχική κλίμακα, παρατηρείται μια εμφανής εποχικότητα στην ενδοετήσια διακύμανση του συνολικού αριθμού των DAECs στις δύο επιλεγμένες και μελετημένες υποπεριοχές, με την πρώτη περιοχή (Τακλαμακάν και Γκόμπι) να εμφανίζει το μέγιστο κατά τη διάρκεια της άνοιξης και τη δεύτερη περιοχή (Αραβική Θάλασσα, Ταρ, Πακιστάν, Αφγανιστάν) να εμφανίζει το μέγιστο κατά τη διάρκεια του θέρους.

Έπειτα από την εξαγωγή των αποτελεσμάτων για τις ημέρες και τις περιπτώσεις επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης στην Ασία και τη σύγκρισή τους με τα αντίστοιχα αποτελέσματα στη Μεσόγειο, εξάγονται τα εξής συμπεράσματα. Όσον αφορά στις ημέρες επεισοδίων σκόνης, παρατηρείται μια ομοιότητα στην εμφάνιση των μέγιστων (το θέρος) και των ελαχίστων (το φθινόπωρο) συχνοτήτων, τόσο για των ισχυρών όσο και για των ακραίων ημερών επεισοδίων σκόνης. Οι συχνότερες εμφάνισης των ημερών (ισχυρών και ακραίων) επεισοδίων σκόνης στην περιοχή της Μεσογείου παρουσιάζουν ομοιότητες, ιδιαίτερα στα κύρια ισχυρά μέγιστα. Η ένταση των DAEDs στην περιοχή της Ασίας είναι μεγαλύτερη από την ένταση στη Μεσόγειο, με 0,86 μέγιστη στη Μεσόγειο έναντι 1,12 στην Ασία για τις ισχυρές ημέρες και 2,46 στη Μεσόγειο έναντι 2,72 στην Ασία για τις ακραίες ημέρες επεισοδίων σκόνης. Όσον αφορά στις περιπτώσεις επεισοδίων σκόνης, παρατηρείται ότι στην Ασία είναι περισσότερες σε αριθμό με μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης και μεγαλύτερη μέση ετήσια διάρκεια (2,72 ημέρες έναντι 2,3 ημέρες στη Μεσόγειο). Αντιθέτως, η ένταση των DAECs στην περιοχή της Μεσογείου είναι μεγαλύτερη (1,76 έναντι 1,12), όπως επίσης και η σχετική χωρική κάλυψη της περιοχής μελέτης, η οποία φτάνει το 7% στη Μεσόγειο, έναντι του 4,7% στην Ασία.

Η παρούσα μελέτη είναι σημαντική, καθώς για πρώτη φορά καταγράφει σε κλιματολογική βάση τα χαρακτηριστικά των έντονων επεισοδίων και συγκεκριμένα των ημερών και περιπτώσεων επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας, για μία εκτεταμένη χρονική περίοδο (2005-2021), βασιζόμενη σε σύγχρονα αξιόπιστα δορυφορικά δεδομένα. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα ανάλυση παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για τη συχνότητα και την ένταση των ημερών/περιπτώσεων επεισοδίων σκόνης σε ολόκληρη την περιοχή,

αλλά και σε τοπικό επίπεδο, αναδεικνύοντας πού και πότε συμβαίνουν τα πλέον συχνά και έντονα επεισόδια. Αυτά τα αποτελέσματα είναι σημαντικά και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μελέτες που σχετίζονται με την επίδραση των αερολυμάτων σκόνης στον καιρό και το κλίμα της περιοχής μελέτης, καθώς και σε άλλους τομείς, όπως η ανθρώπινη υγεία, η γεωργία ή οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Σε μελλοντική επέκταση της παρούσας εργασίας θα ήταν ενδιαφέρον ο αλγόριθμος να λειτουργήσει με χρήση και άλλων δεδομένων εισόδου, είτε δορυφορικών (π.χ. MISR, SeaWiFS) είτε επανάλυσης (MERRA-2), με σκοπό την εξέταση της ευαισθησίας των ευρημάτων της παρούσας μελέτης στα δεδομένα εισαγωγής του αλγορίθμου, έχοντας υπόψιν τις αβεβαιότητες των δεδομένων ανάκτησης από δορυφορικές μετρήσεις και αλγορίθμους και από θεωρητικά μοντέλα. Τέλος, ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε θα μπορούσε να βελτιωθεί, ώστε να συνδυάζει τη χρήση δεδομένων οπτικών ιδιοτήτων αερολυμάτων κατακόρυφης ανάλυσης, για παράδειγμα αυτών από το CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations), εξασφαλίζοντας έτσι την περισσότερο αξιόπιστη ανίχνευση των αερολυμάτων σκόνης, καθώς και πληροφορία για το ύψος εμφάνισής τους, αλλά και την πιθανή τους συνύπαρξη με άλλα είδη αερολυμάτων, έστω και με μικρότερη χρονική κάλυψη.

Βιβλιογραφία

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, 2000.

An, L., Che, H., Xue, M., Zhang, T., Wang, H., Wang, Y., Zhou, C., Zhao, H., Gui, K., Zheng, Y., Sun, T.: Temporal and spatial variations in sand and dust storm events in East Asia from 2007 to 2016: Relationships with surface conditions and climate change, *Sci. Tot. Environ.*, **633**, 452–462, 2018.

Albrecht, B.A.: Aerosols, Cloud Microphysics, and Fractional Cloudiness, *Science*, **245**, 1227-1230, 1989.

Andreae, M. O., and Merlet, P.: Emission of trace gases and aerosols from biomass burning, *Glob. Biogeochem. Cycles.*, **15**(4), 955– 966, doi:10.1029/2000GB001382, 2001.

Ansmann, A., Bösenberg, J., Chaikovsky, A., Comerón, A., Eckhardt, S., Eixmann, R., Freudenthaler, V., Ginoux, P., Komguem, L., Linné, H., Márquez, M. A. L., Matthias, V., Mattis, I., Mitev, V., Müller, D., Music, S., Nickovic, S., Pelon, J., Sauvage, L., Sobolewsky, P., Srivastava, M. K., Stohl, A., Torres, O., Vaughan, G., Wandinger, U., and Wiengner, M.: Long-range transport of Saharan dust to northern Europe: The 11-16 October 2001 outbreak observed with EARLINET, *J. Geophys. Res.: Atmos.*, **108**, 2003.

Banerjee, P., Satheesh, S. K., Moorthy, K. K.: The unusual severe dust storm of May 2018 over Northern India: Genesis, propagation, and associated conditions, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **126**, <https://doi.org/10.1029/2020JD032369>, 2021.

Bao, T., Gao, T., Nandintsetseg, B., Yong, M., Jin, E.: Variations in Frequency and Intensity of Dust Events Crossing the Mongolia–China Border, *SOJA*, **17**, 145–150, 2021.

Belimezis, P.: Spatiotemporal characteristics of dust aerosol episodes over Asia based on contemporary climatological satellite data and satellite algorithm, Master Thesis, University of Ioannina, 142, 2023.

Boucher, O.: Atmospheric aerosols, *Atmos. Aeros.*, 9–24, 2015.

Boucher, O., Randall, D., Artaxo, P., Bretherton, C., Feingold, G., Forster, P., Kerminen, V.-M., Kondo, Y., Liao, H., Lohmann, U., Rasch, P., Satheesh, S. K., Sherwood, S., Stevens B., and Zhang, X.Y.: Clouds and Aerosols. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, 2013.

Bougiatioti, A., Bezantakos, S., Stavroulas, I., Kalivitis, N., Kokkalis, P., Biskos, G., Mihalopoulos, N., Papayannis, A., and Nenes, A.: Biomass-burning impact on CCN

number, hygroscopicity and cloud formation during summertime in the eastern Mediterranean, *Atmos. Chem. Phys.*, **16**, 7389–7409, 2016.

Charlson, R. J., Anderson, T. L., Rodhe, H.: Direct climate forcing by anthropogenic aerosols: quantifying the link between atmospheric sulfate and radiation, *Contrib. Atmos. Phys.*, **72**, 79–94, 1999.

Chou, C., Neelin, J. D., Lohmann, U., and Feichter, J.: Local and remote impacts of aerosol climate forcing on tropical precipitation, *J. Clim.*, **18**(22), 4621-4636, <https://doi.org/10.1175/JCLI3554.1>, 2005.

Darmenova, K., Sokolik, I.N., Darmenov, A.: Characterization of East Asian dust outbreaks in the spring of 2001 using ground-based and satellite data, *J. Geophys. Res.*, **110**, 2005.

DeMott, P. J., Prenni, A. J., Liu, X., Kreidenweis, S. M., Petters, M. D., Twohy, C. H., Richardson M.S., Eidhammer, T., Rogers, D.: Predicting global atmospheric ice nuclei distributions and their impacts on climate, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, **107**(25), 11217-11222, 2010.

Diner D. J., Ackerman, T. P., Anderson, T. L., Bösenberg, J., Braveman, A. J., Charlson, R. J., Collins, W. D., Davies, R., Holben, B. N., Hostetler, C. A., Kahn, R. A., Martonchik, J. V., Menzies, R. T., Miller, M. A., Orgen, J. A., Penner, J. E., Rasch, P. J., Schwartz, S. E., Seinfeld, J. H., Stephens, G. L., Torres, O., Travis, L. D., Wielicki, B. A., and Yu, B.: PARAGON: An integrated approach for characterizing aerosol climate impacts and environmental interactions, 1491-1502, <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-10-1491>, 2004.

Dror, T., Flores, J. M., Altaratz, O., Dagan, G., Levin, Z., Vardi, A., and Koren, I.: Sensitivity of warm clouds to large particles in measured marine aerosol size distributions – a theoretical study, *Atmos. Chem. Phys.*, **20**, 15297–15306, <https://doi.org/10.5194/acp-20-15297-2020>, 2020.

Dubovik, O., King, M. D.: A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements, *J. Geophys. Res.*, **105**(D16), 20 673-20 696, 2000.

Filonchyk, M.: Characteristics of the severe March 2021 Gobi Desert dust storm and its impact on air pollution in China, *Chemosphere*, **287**, 132219, 2022.

Gandham, H., Dasari, H. P., Karumuri, A., Ravuri, P. M. K., and Hoteit, I.: Three-dimensional structure and transport pathways of dust aerosols over West Asia, *Clim. Atmos. Sci.*, **5**, 45, <https://doi.org/10.1038/s41612-022-00266-2>, 2022.

Gavrouzou, M.: Detection of aerosol dust and determination of its properties on a planetary scale using MODIS and OMI satellite data, Master Thesis, University of Ioannina, 117, 2018.

Gavrouzou, M., Hatzianastassiou, N., Gkikas, A., Korras-Carraca, M.B., and Mihalopoulos, N.: A Global Climatology of Dust Aerosols Based on Satellite Data: Spatial, Seasonal and Inter-Annual Patterns over the Period 2005–2019, *Rem. Sens.*, **13**(3), 359, <https://doi.org/10.3390/rs13030359>, 2021.

Gavrouzou, M., Hatzianastassiou, N., Gkikas, A., Lolis, C.J., and Michalopoulos, N.: A climatological assessment of intense desert dust episodes over the broader Mediterranean basin based on satellite data, *Rem. Sens.*, **13**, 2895, <https://doi.org/10.3390/rs13152895>, 2021.

Ginoux P., Prospero J. M., Gill T. E., Hsu N. C., and Zhao M.: Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products, *Rev. Geophys.*, **50**(3), 2012.

Gkikas, A., Hatzianastassiou, N., Mihalopoulos, N., Katsoulis, V., Kazadzis, S., Pey, J., Querol, X., and Torres, O.: The regime of intense desert dust episodes in the Mediterranean based on contemporary satellite observations and ground measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, **13**(23), 12135–12154, <https://doi.org/10.5194/acp-13-12135-2013>, 2013.

Gkikas A., Houssos, E. E., Lolis, C.J., Bartzokas, A., Mihalopoulos, N., and Hatzianastassiou, N.: Atmospheric circulation evolution related to desert-dust episodes over the Mediterranean, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **141**, 1634–1645, <https://doi.org/10.1002/qj.2466>, 2015.

Gkikas, A., Basart, S., Hatzianastassiou, N., Marinou, E., Amiridis, V., Kazadzis, S., Pey, J., Querol, X., Jorba, O., Gassó, S., and Baldasano, J. M.: Mediterranean intense desert dust outbreaks and their vertical structure based on remote sensing data, *Atmos. Chem. Phys.*, **16**, 8609–8642, <https://doi.org/10.5194/acp-16-8609-2016>, 2016.

Griffin, D. W., Kellogg, C. A., and Shinn, E. A.: Dust in the wind: Long range transport of dust in the atmosphere and its implications for global public and ecosystem health, *Glob. Change Hum. Health*, **2**, 20–33, <https://doi.org/10.1023/A:1011910224374>, 2001.

Gui, K., Yao, W., Che, H., An, L., Zheng, Y., Li, L., Zhao, H., Zhang, L., Zhong, J., Wang, Y., Zhang, X.: Record-breaking dust loading during two mega dust storm events over northern China in March 2021: Aerosol optical and radiative properties and meteorological drivers, *Atmos. Chem. Phys.*, **22**, pp. 7905–7932, 2022.

Gui, L., Tao, M., Wang, Y., Wang, L., Chen, L., Lin, C., Tao, J., Wang, J., Yu, C.: Climatology of aerosol types and their vertical distribution over East Asia based on CALIPSO lidar measurements, *Intern. J. Clim.*, **42**(11), pp. 6042–6054, 2022.

Guo, J., Luo, Y., Yang, J., Furtado, K., and Lei, H.: Effects of anthropogenic and sea salt aerosols on a heavy rainfall event during the early-summer rainy season over coastal Southern China, *Atmos. Res.*, **265**, 105923, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105923>, 2022.

Han, Y., Tianhe Wang, T., Tan, R., Tang, J., Wang, C., He, S., Dong, Y., Huang, Z., Bi, J.: CALIOP-Based Quantification of Central Asian Dust Transport, *Rem. Sens.*, **14**, 1416, 2022.

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

Hatzianastassiou, N., Gkikas, A., Mihalopoulos, N., Torres, O., and Katsoulis, B. D.: Natural versus anthropogenic aerosols in the eastern Mediterranean basin derived from multiyear TOMS and MODIS satellite data, *J. Geophys. Res.*, **114**(D24), <https://doi.org/10.1029/2009JD011982>, 2009.

Hatzianastassiou, N., Kalaitzi, N., Gavrouzou, M., Gkikas, A., Korras-Carraca, M. B., and Mihalopoulos, N.: A climatological satellite assessment of absorbing carbonaceous aerosols on a global scale, *Atmosphere*, **10**(11), 671, <https://doi.org/10.3390/atmos10110671>, 2019.

Hatzianastassiou, N., Wobrock, W., Flossmann, A. I.: The effect of cloud-processing of aerosol particles on clouds and radiation, *Tellus B: Chem. Phys. Meteo.*, **50**, 478-490 1998.

He, Y., Yi, F., Yin, Z., Liu, F., Yi, Y., Zhou, J.: Mega Asian dust event over China on 27–31 March 2021 observed with space-borne instruments and ground-based polarization lidar, *Atmos. Environ.*, **285**, 119238, 2022.

Hodshire, A. L., Akherati, A., Alvarado, M. J., Brown-Steiner, B., Jathar, S. H., Jimenez, J. L., Kreidenweis, S. M., Lonsdale, C. R., Onasch, T. B., Ortega, A. M., and Pierce, J. R.: Aging effects on biomass burning aerosol mass and composition: A critical review of field and laboratory studies, *Environ. Sci. Technol.*, **53** (17), 10007-10022, 2019.

Holben, B. N., Tanré, D., Smirnov, A., Eck, T. F., Slutsker, I., Abuhassan, N., Newcomb, W. W., Schafer, J. S., Chatenet, B., Lavenu, F., Kaufman, Y. J. et al.: An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET, *J. Geophys. Res.*, **106**(D11), 12067-12097, <https://doi.org/10.1029/2001JD900014>, 2001.

Hsu, N. C., Jeong, M. J., Bettenhausen, C., Sayer, A. M., Hansell, R., Seftor, C. S., and Tsay, S. C.: Enhanced Deep Blue aerosol retrieval algorithm: The second generation., *J. Geophys. Res.*, **118**(16), 9296-9315, 2013.

Huang, J., Lin, B., Minnis, P., Wang, T., Wang, X., Hu, Y., Yi, Y., and Ayers, J. K.: Satellite-based assessment of possible dust aerosols semi-direct effect on cloud water path over East Asia, *Geophys. Res. Lett.*, **33**(19), 2006.

Huang, X.X., Wang, T.J., Jiang, F., Liao, J.B., Cai, Y.F., Yin, C.Q., Zhu, J.L., Han, Y.: Studies on a severe dust storm in East Asia and its impact on the air quality of Nanjing, China, *Aeros. Air Qual. Res.*, **13**, pp.179–193, 2013.

Husar, R. B., Tratt, D. M., Schichtel, B. A., Falke, S. R., Li, F., Jaffe, D., Gassó, S., Gill, T., Laulainen, N. S., Lu, F., Reheris, M. C., Chun, Y., Westphal, D., Holben, N. N., Guemard,

C., McKendry, I., Kuring, N., Feldman, G. C., McClain, C., Frouin, R. J., Merrill, J., DuBois, D., Vingola, F., Murayama, T., Nickovic, S., Wilson, W. E., Sassen, K., Sugimoto, N., and Malm, W. C.: Asian dust events of April 1998, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **106**(D16), 18317-18330, 2001.

Indoitu, R., Orlovsky, L., Orlovsky, N.: Dust storms in Central Asia: Spatial and temporal variations, *J. Arid Environ.*, **85**, 62-70, 2012.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)[Chapter 7]: Forster, P., Storelvmo, T., Armour, K., Collins, W., Dufresne, J.L., D. Frame, D., Lunt, D.J., Mauritsen, T., Palmer, M.D., Watanabe, M., Wild, M., Zhang, H.: The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity, In *Climate Change: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 923–1054, 2021.

Kang, L., Huang, J., Chen, S., Wang, X.: Long-term trends of dust events over Tibetan Plateau during 1961–2010, *Atmos. Environ.*, **125**, 188–198, 2016.

Karami, S., Hamzeh, N. H., Kaskaoutis, D. G., Rashki, A., Alam, K., and Ranjbar, A.: Numerical simulations of dust storms originated from dried lakes in central and southwest Asia: The case of Aral Sea and Sistan Basin, *Aeolian Res.*, **50**, 100679, <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2021.100679>, 2021.

Kaufman, Y. J., Tanré, D., Remer, L. A., Vermote, E. F., Chu, A., and Holben, B. N.: Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, *J. Geophys. Res.*, **102**, 17051–17065, 1997.

Kohler, A., Böcker, U., Warringer, J., Blomberg, A., Omholt, S. W., Stark, E., and Martens, H.: Reducing inter-replicate variation in Fourier transform infrared spectroscopy by extended multiplicative signal correction, *Appl. Spectr.*, **63**(3), 296–305, 2009.

Kokhanovsky A.: *Aerosol Optics: Light Absorption and Scattering by Particles in the Atmosphere*, Springer, Germany, 2008.

Korras-Carraca, M. B., Hatzianastassiou, N., Matsoukas, C., Gkikas, A., and Papadimas, C. D.: The regime of aerosol asymmetry parameter over Europe, the Mediterranean and the Middle East based on MODIS satellite data: evaluation against surface AERONET measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, **15**, 13113-13132, doi:10.5194/acp-15-13113-2015, 2015.

Kurosaki, Y., & Mikami, M.: Regional difference in the characteristic of dust event in East Asia: Relationship among dust outbreak, surface wind, and land surface condition, *J. Meteor. Soc. Japan*, **83**, 1-18, 2005.

Lee, W.S. and Kim, M.K.: Effects of radiative forcing by black carbon aerosol on spring rainfall decrease over Southeast Asia, *Atmos. Environ.*, **44**, 3739-3744, 2010.

- Levy, R. C., Remer, L. A., Mattoo, S., Vermote, E. F., and Kaufman, Y. J.: Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer spectral reflectance, *J. Geophys. Res.*, **112**(D13), <https://doi.org/10.1029/2006JD007811>, 2007.
- Lim, J.Y., Chun, Y.: The characteristics of Asian dust events in Northeast Asia during the springtime from 1993 to 2004, *Glob. Planet. Change*, **52**, 231–247, 2006.
- Lindsey, R.: Climate and earth's energy budget, *NASA Earth Observ.*, **680**, 2009.
- Ling, X., Guo, W., Zhao, Q., Zhang, B.: A case study of a typical dust storm event over the Loess Plateau of northwest China, *Atmos. Ocean. Sci. Lett.*, **4** (6), 344e348, 2011.
- Liu, X., Song, H., Leid, T., Liu, P., Xue, C., Wang, D., Yang, Z., Xia, X., Wang, T., Zhao, H.: Effects of natural and anthropogenic factors and their interactions on dust events in Northern China, *Catena*, **196**, 104919, 2021.
- Lohmann, U. and Feichter, J.: Global indirect aerosol effects: a review, *Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 715–737, 2005.
- Merikanto, J., Spracklen, D. V., Mann, G. W., Pickering, S. J., Carslaw, K. S.: Impact of nucleation on global CCN, *Atmos. Chem. Phys.*, **9**(21), 8601-8616, 2009.
- Micklin, P.: The Aral Sea disaster, *An. Rev. Earth and Plan. Sci.*, **35**, 47-72, <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.35.031306.140120>, 2007.
- Myhre, G., Alterskjær, K., Stjern, C. W., Hodnebrog, O., Marelle, L., Samset, B. H., Sillmann, J., Schaller, N., Fischer, E., Schulz, M., and Stohl, A.: Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming, *Sci. Rep.*, **9**, 16063, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52277-4>, 2019.
- Mohammadpour, K., Rashki, A., Sciortino, M., Kaskaoutis, D.G., Bolorani, A.D.: A statistical approach for identification of dust-AOD hotspots climatology and clustering of dust regimes over Southwest Asia and the Arabian Sea, *Atmos. Pol. Res.*, **13**, 101395, 2022.
- Murayama, T., Sugimoto, N., Uno, I., Kinoshita, K., Aoki, K., Hagiwara, N., ... & Iwasaka, Y.: Ground-based network observation of Asian dust events of April 1998 in east Asia, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **106**(D16), 18345-18359, 2001.
- Nan, Y., Wang, Y.: De-coupling interannual variations of vertical dust extinction over the Taklimakan Desert during 2007–2016 using CALIOP, *Sci. Tot. Environ.*, **633**, 608–617, 2018.
- Nobakht, M., Shahgedanova, M., White, K.: New inventory of dust emission sources in Central Asia and northwestern China derived from MODIS imagery using dust enhancement technique, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **126**, <https://doi.org/10.1029/2020JD033382>, 2021.

Nousiainen T.: Optical modeling of mineral dust particles: A review, *J. Quant. Spectr. Rad. Trans.*, **110**, 1261–1279, <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2009.03.002>, 2009.

Pinker, R. T., Zhang, B., and Dutton, E. G.: Do satellites detect trends in surface solar radiation?, *Science*, **308**(5723), 850-854, 2005.

Papadimas, C. D., Hatzianastassiou, N., Mihalopoulos, N., Querol, X., and Vardavas, I.: Spatial and temporal variability in aerosol properties over the Mediterranean basin based on 6-year (2000–2006) MODIS data, *J. Geophys. Res.*, **113**(D11), <https://doi.org/10.1029/2007JD009189>, 2008.

Proestakis, E., Amiridis, V., Marinou, E., Georgoulas, A.K., Solomos, S., Kazadzis, S., Chimot, J., Che, H. et al.: Nine-year spatial and temporal evolution of desert dust aerosols over South and East Asia as revealed by CALIOP, *Atmos. Chem. Phys.*, **18**, 1337–1362, 2018.

Prospero, J. M.: Long-range transport of mineral dust in the global atmosphere: Impact of African dust on the environment of the southeastern United States, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, **96**(7), 3396-3403, 1999.

Prospero, J. M. and Carlson, T.: Saharan air outbreaks over the tropical North Atlantic, *Pure Appl Geophys.*, **119**, 678-691, 1972.

Prospero, J. M., Glaccum, R. A., and Nees, R. T. Atmospheric transport of soil dust from Africa to South-America, *Nature*, **289**, 570–572, 1981.

Prospero, M. J., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S. E., and Gill, T. E.: Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product, *Rev. Geophys.*, **40**(1), 1002, 2002.

Ramanathan, V., Chung, C., Kim, D., Bettge, T., Buja, L., Kiehl, J. T., Washington, W. M., Fu, Q., Sikka, D. R. and Wild, M.: Atmospheric brown clouds: Impacts on South Asian climate and hydrological cycle, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, **102**(15), 5326-5333, 2005.

Ramaswamy, V., Muraleedharan, P. M. and Babu, C. P.: Mid-troposphere transport of Middle-East dust over the Arabian Sea and its effect on rainwater composition and sensitive ecosystems over India, *Sci. Rep.*, **7**, 13676, <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13652-1>, 2017.

Rashki, A., Kaskaoutis, D. G., Sepehr, A.: Statistical evaluation of the dust events at selected stations in Southwest Asia: From the Caspian Sea to the Arabian Sea, *Catena*, **165**, 590-603, 2018.

Remer, L. A., Tanré, D., Kaufman, Y. J., Ichoku, C., Mattoo, S., Levy, R., Chu, D. A., Holben, B., Dubovik, O., Smirnov, A., Martins, J.V., Li, R.-R., and Ahman, Z.: Validation of MODIS aerosol retrieval over ocean, *Geophys. Res. Lett.*, **29**(12), 8008, 2002.

Rind, D., Balachandran, N. K., and Suozzo, R.: Climate Change and the Middle Atmosphere. Part II: The Impact of Volcanic Aerosols, *J. Climat.*, **5**, 189-208, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1992\)005<0189:CCATMA>2.0.CO;21](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1992)005<0189:CCATMA>2.0.CO;21), 1992.

Rodriguez, S., Querol, X., Alastey, A., Kallos, G., and Kakaliagou, O.: Saharan dust contributions to PM10 and TSP levels in southern and eastern Spain, *Atmos. Environ.*, **35**, 2433-2447, 2001.

Saleh, R., Robinson, E. S., Tkacik, D. S., Ahern, A. T., Liu, S., Aiken, A. C., Sullivan, R. C., Presto, A. A., Dubey, M. K., Yokelson, R. J., Donahue, N. M., and Robinson, A. L.: Brownness of organics in aerosols from biomass burning linked to their black carbon content, *Nat. Geosci.*, **7**, 647–650, <https://doi.org/10.1038/ngeo2220>, 2014.

Sarpong, E., Smith, D., Pokhrel, R., Fiddler, M. N., Bililign, S.: Refractive Indices of Biomass Burning Aerosols Obtained from African Biomass Fuels Using RDG Approximation, *Atmosphere*, **11**(1), 62, <https://doi.org/10.3390/atmos11010062>, 2020.

Schepanski, K.: Transport of mineral dust and its impact on climate, *Geosci.*, **8**, 151, 2018.

Seinfeld, J. H., and Pandis, S. N.: From Air Pollution to Climate, *Atmos. Chem. Phys.*, **2**, 2006.

Seneviratne, S. I., Donat, M. G., Mueller, B., and Alexander, L. V.: No pause in the increase of hot temperature extremes, *Nat. Clim. Change*, **4**, 161–163, <https://doi.org/10.1038/nclimate2145>, 2014.

Self, S., Zhao, J. X., Holasek, R. E., Torres, R. C., and King, A. J.: The Atmospheric impact of the 1991 Mount Pinatub, *Environ. Sci.*, 1993.

Shao, Y., & Wang, J.: A climatology of Northeast Asian dust events, *Meteo. Zeitschrift*, **12**(4), 187-196, 2003.

Sokolik, I. N.: AEROSOLS – Dust, *Encycl. Atmos. Sci.*, **2**, 48-52, 2015.

Tanré, D., Kaufman, Y. J., Herman, M., and Mattoo, S.: Remote sensing of aerosol properties over oceans using the MODIS/EOS spectral radiances, *J. Geophys. Res.*, **102**, 16971–16988, 1997.

Tao, M., Chen, L., Wang, J., Wang, L., Wang, W., Lin, C., Gui, L., Wang, L., Yu, C., Wang, Y.: Characterization of dust activation and their prevailing transport over East Asia based on multi-satellite observations, *Atmos. Res.*, **265**, 105886, 2022.

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**(5), 2004.

Torres, O., Tanskanen, A., Veihelmann, B., Ahn, C., Braak, R., Bhartia, P.K., Veefkind, P., and Levelt, P.: Aerosols and surface UV products from Ozone Monitoring Instrument observations: An overview, *J. Geophys. Res.*, **112**, <https://doi.org/10.1029/2007JD008809>, 2007.

Twomey, S.: The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds, *J. Atmos. Sci.*, **34**(7), 1149-1152, 1977.

Voiland, A.: Aerosols: Tiny Particles, Big Impact, *NASA Earth Observ.*, 2010.

Wang, X., Huang, J., Jia, M., Higuchi, K.: Variability of East Asia dust events and their long-term trend, *Atmos. Environ.*, **42**, 3156–3165, 2008.

Wang, S., Yu, Y., Zhang, X.X., Lu, H., Zhang, X.Y., Xu, Z.: Weakened dust activity over China and Mongolia from 2001 to 2020 associated with climate change and land-use management, *Environ. Res. Lett.*, **16**, Number 12, 2021.

Wesely, M. L. and Hicks, B. B.: A review of the current status of knowledge on dry deposition, *Atmos. Environ.*, **34**, 12-14, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00467-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00467-7), 2000.

Whitby, K. T.: The physical characteristics of sulfur aerosols, *Atmos. Environ.*, **12**, 135–159, [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(78\)90196-8](https://doi.org/10.1016/0004-6981(78)90196-8), 1978.

Xi, X., Sokolik, I.N.: Dust interannual variability and trend in Central Asia from 2000 to 2014 and their climatic linkages, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **120**, 12175–12197, <https://doi.org/10.1002/2015JD024092>, 2016.

Yang, L., Zhang, S., Huang, Z., Yang, Y., Wang, L., Han, W., Li, X.: Characteristics of Dust Events in China from 2015 to 2020, *Atmosphere*, **12**, 952, 2021.

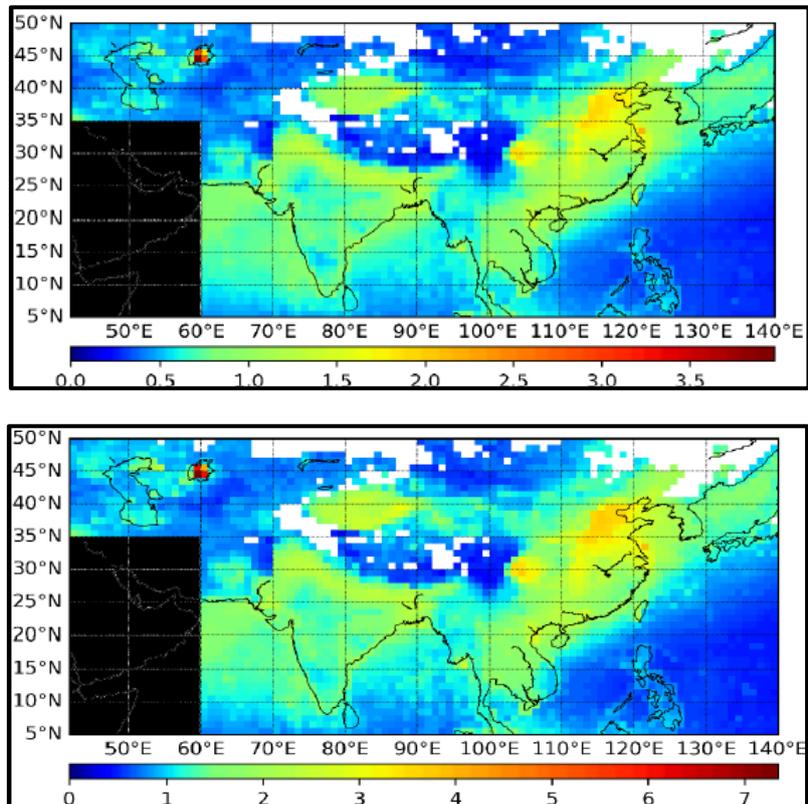
Yao, W., Gui, K., Wang, Y., Che, H., Zhang, X.: Identifying the dominant local factors of 2000–2019 changes in dust loading over East Asia, *Sci. Tot. Environ.*, **777**, 146064, 2021.

Zhang, X.X., Sharratt, B., Liu, L.Y., Wang, Z.F., Pan, X.L, Lei, J.Q., Wu, S.X., Huang, S.Y., Guo, Y.H. et al.: East Asian dust storm in May 2017: observations, modelling, and its influence on the Asia-Pacific region, *Atmos. Chem. Phys.*, **18**, 8353–8371, 2018.

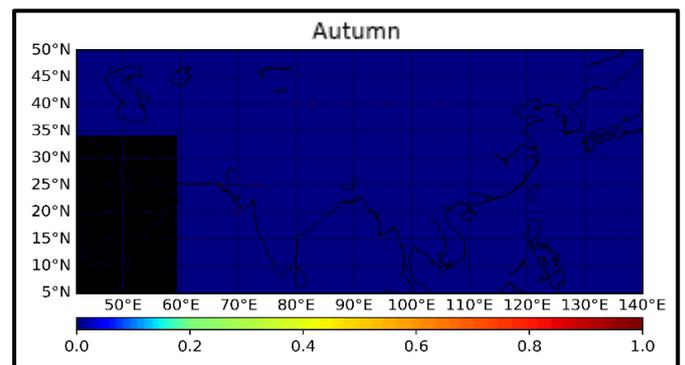
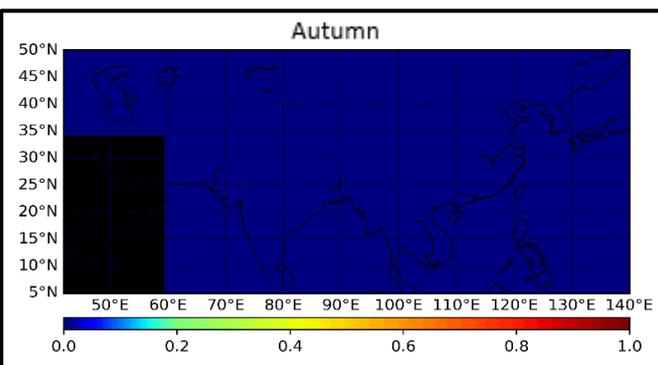
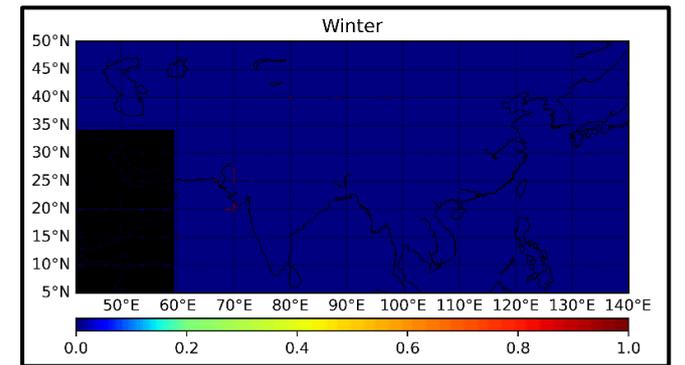
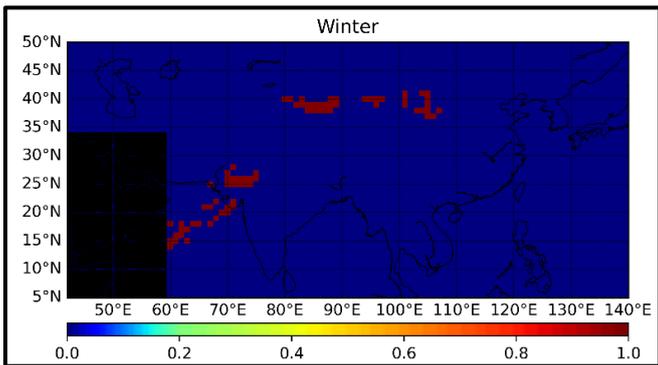
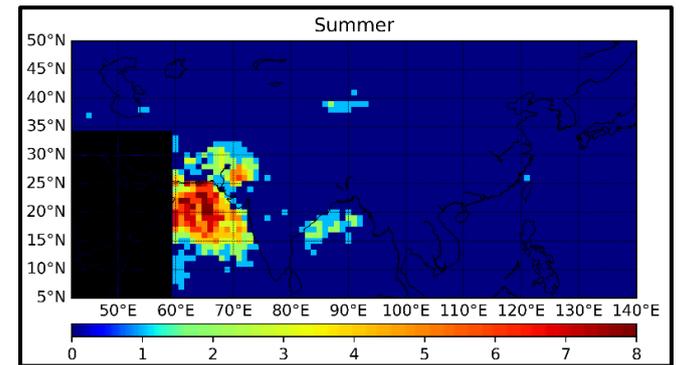
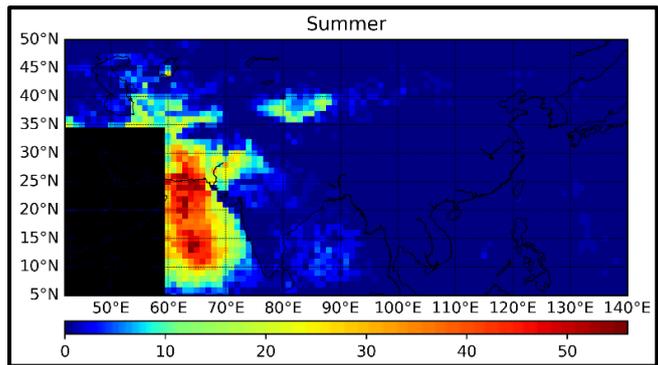
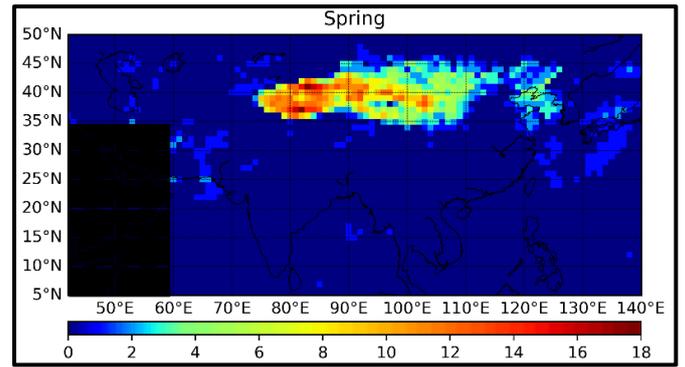
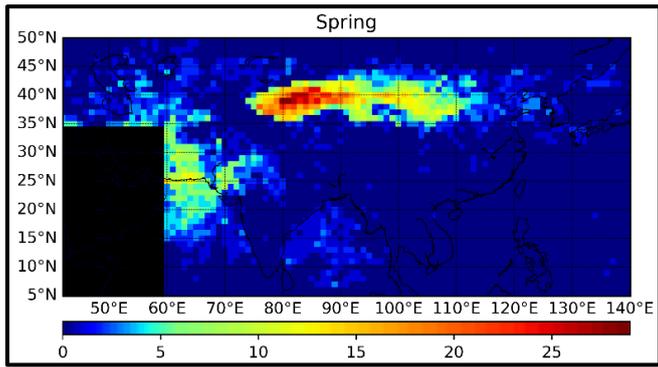
Zhang, Y., Cai, Y.J, Yu, F., Luo, G., Chou, C.C.K.: Seasonal Variations and Long-term Trend of Mineral Dust Aerosols over the Taiwan Region, *Aeros. Air Qual. Res.*, **21**, Issue 5, 200443, 2020.

Zheng, M., Guo, Z., Fang, A., Rahn, K. A., and Kester, D. R.: Dry and wet deposition of elements in Hong Kong, *Marine Chem.*, **97**, 1-2, <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2005.05.007>, 2005.

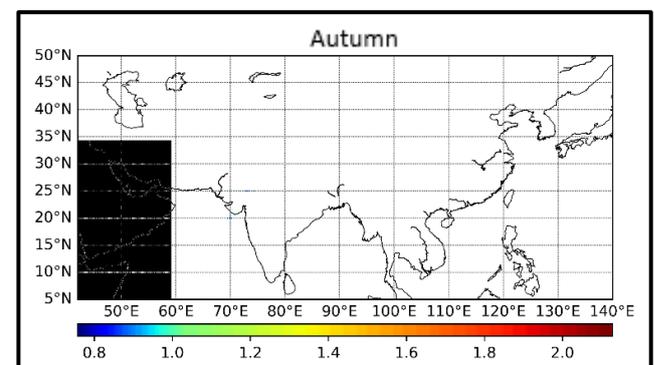
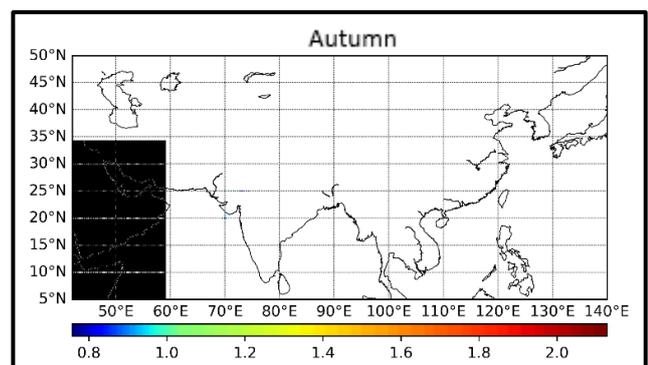
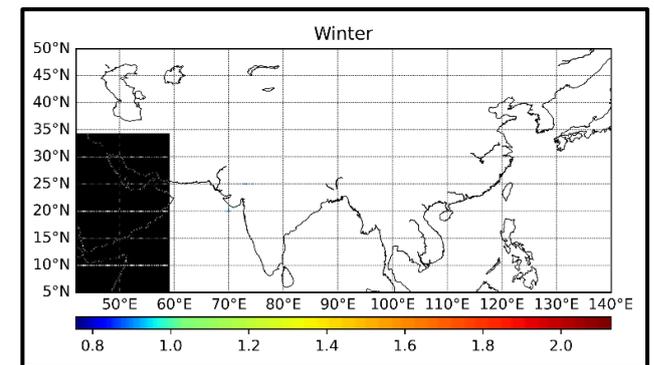
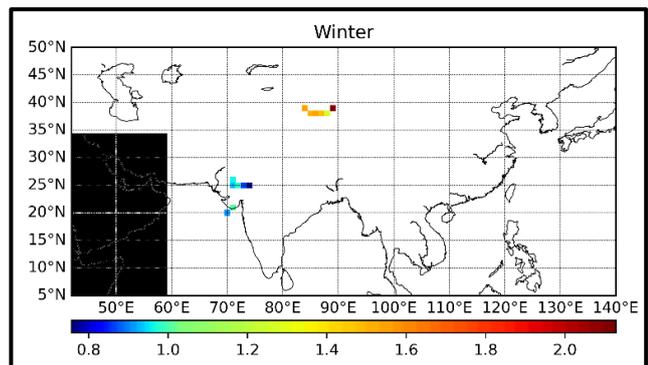
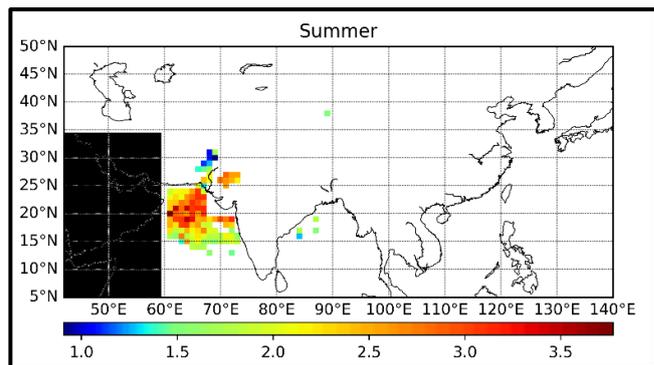
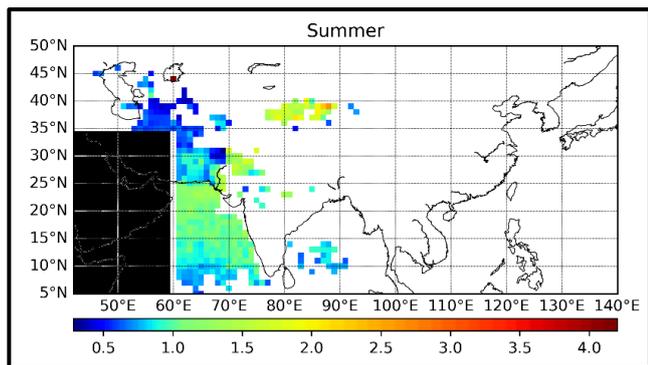
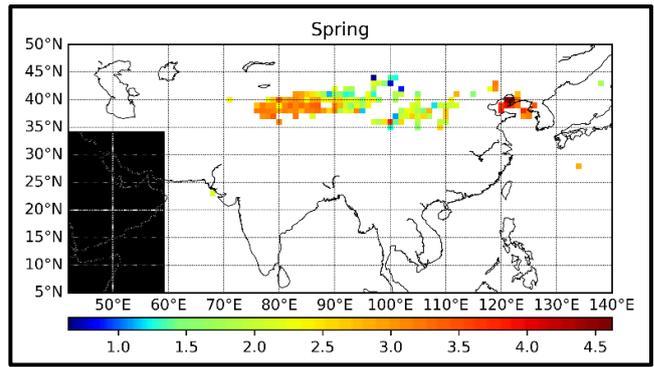
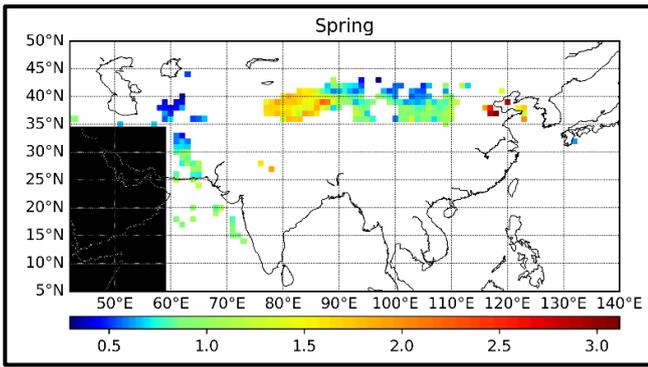
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



Σχήμα Π1. Όρια αποκοπής (threshold values) για τα ισχυρά και ακραία επεισόδια σκόνης.

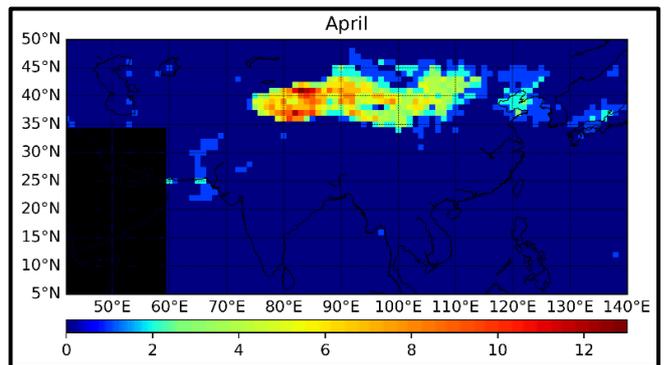
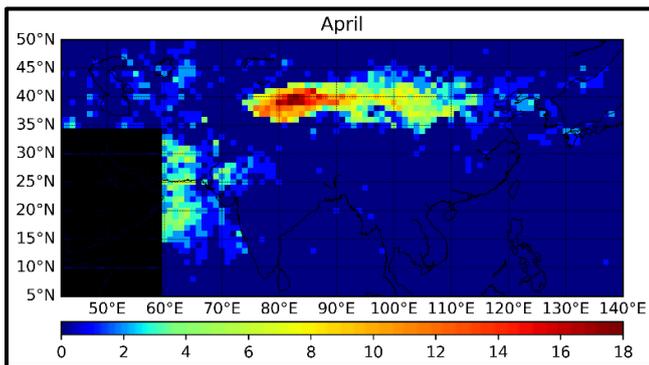
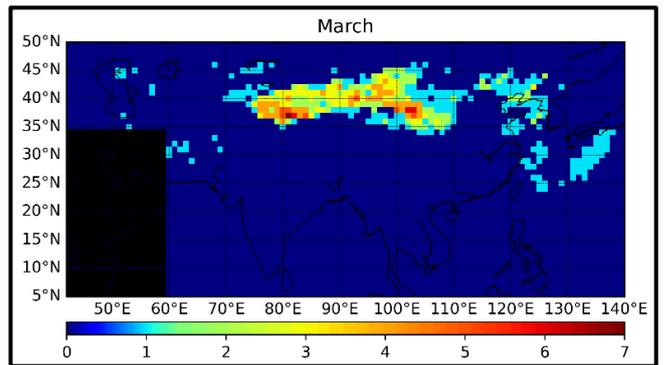
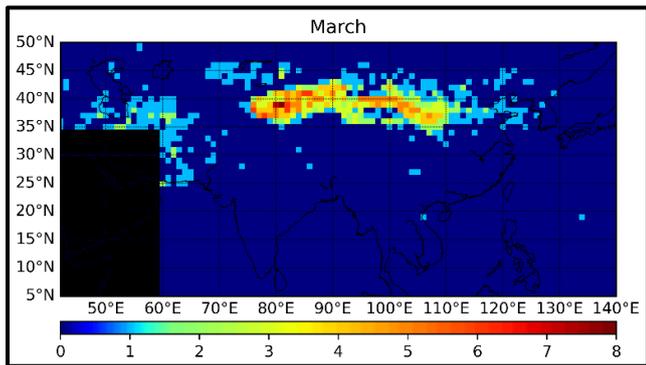
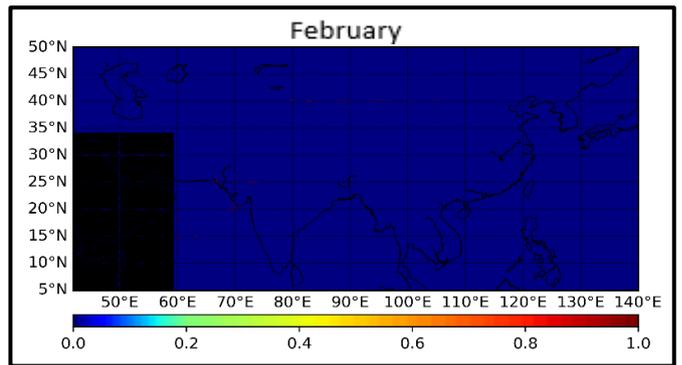
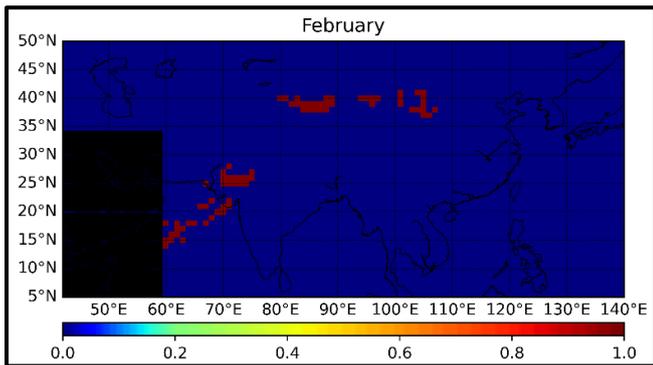
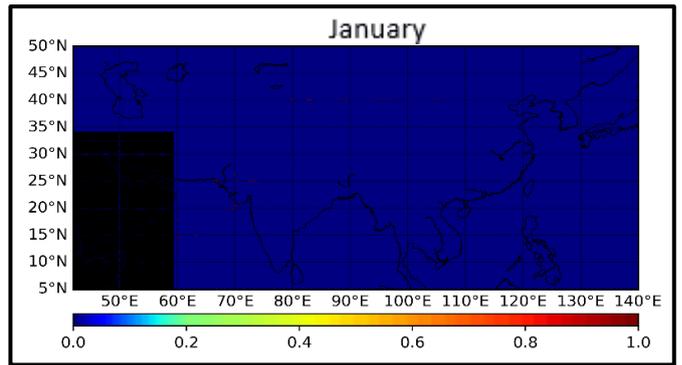
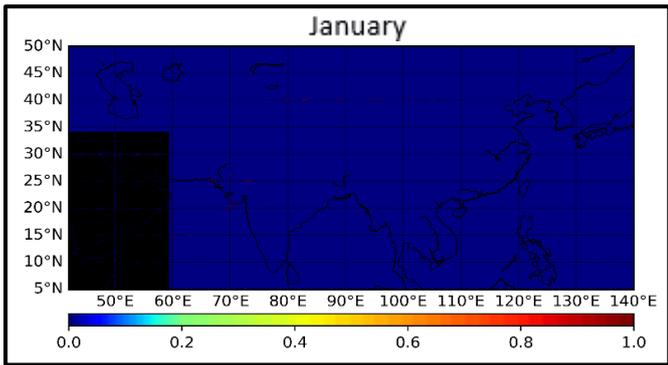


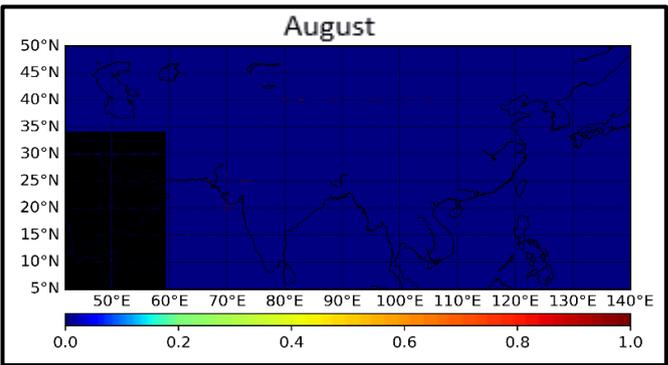
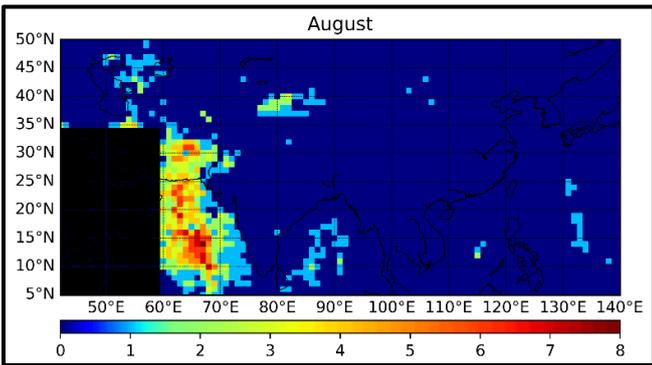
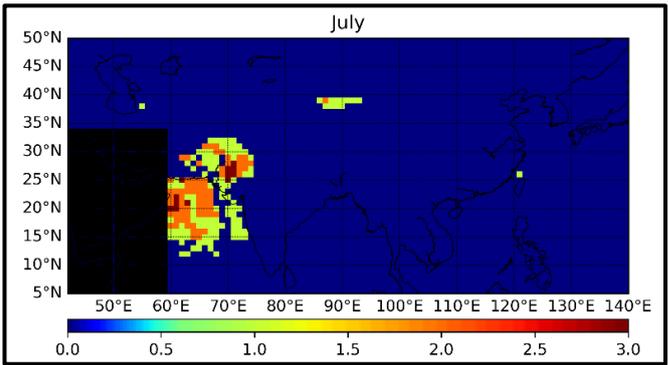
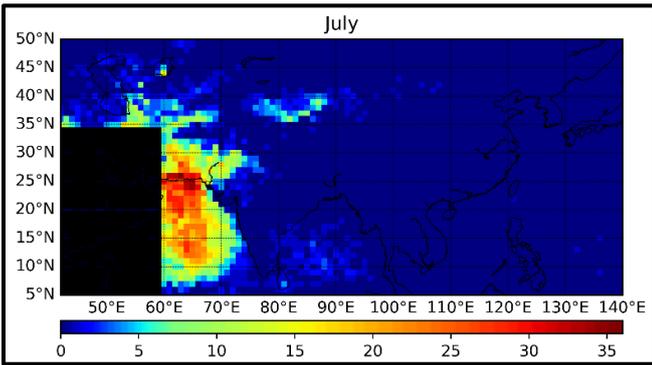
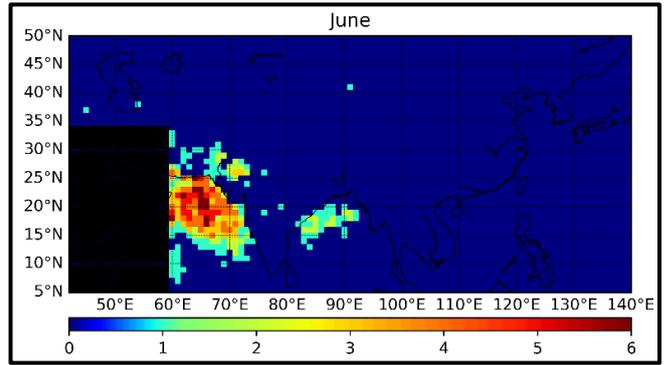
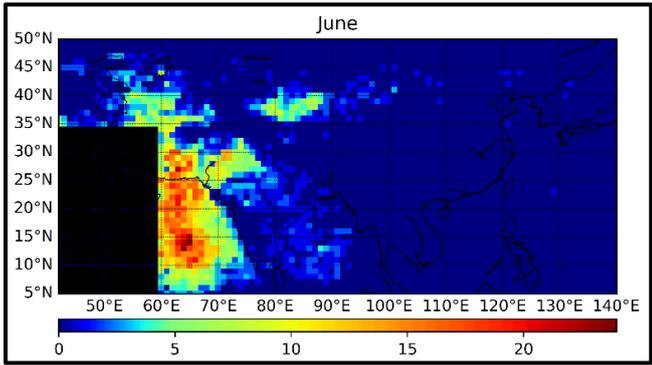
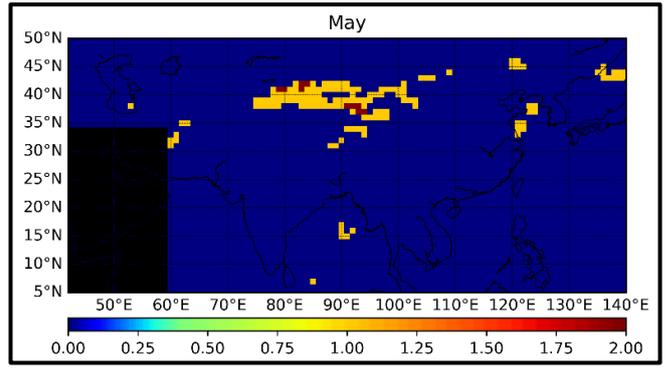
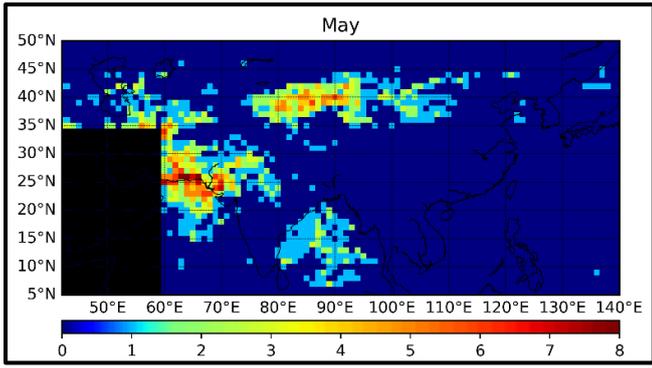
Σχήμα Π2. Γεωγραφική κατανομή της μέσης εποχικής αθροιστικής συχνότητας εμφάνισης των ημερών ισχυρών (αριστερή στήλη) και ακραίων (δεξιά στήλη) επεισοδίων ερημικής σκόνης στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Οι παρεχόμενες τιμές είναι μεσοποιημένες για την περίοδο 2005-2021 και δίνονται για την άνοιξη, το θέρος και το χειμώνα. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

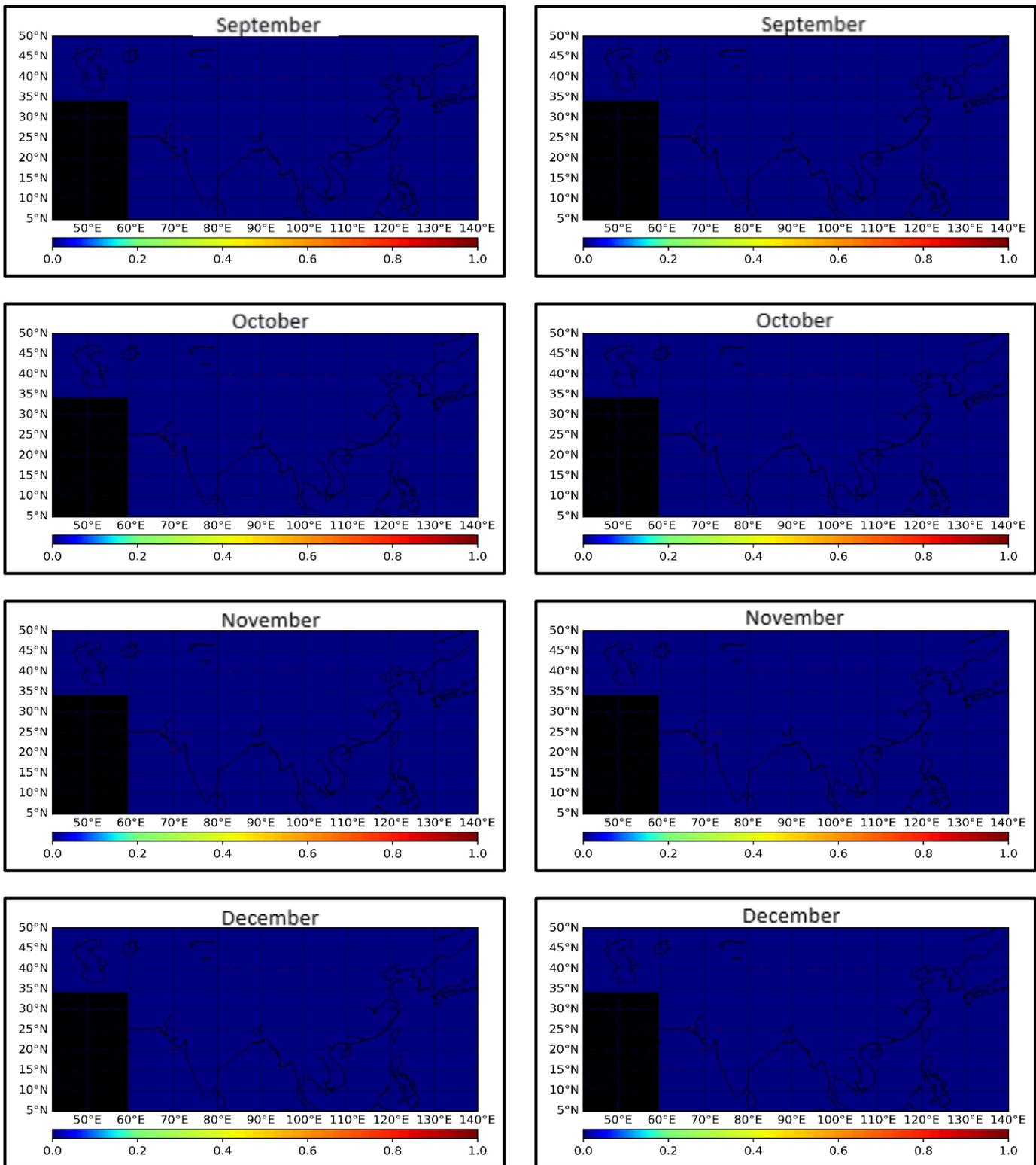


Σχήμα Π3. Γεωγραφική κατανομή της μέσης εποχικής τιμής του οπτικού βάθους ερημικής σκόνης (AOD) των ημερών ισχυρών (αριστερή στήλη) και ακραίων (δεξιά στήλη) επεισοδίων ερημικής σκόνης, που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια ημερών με έντονα επεισόδια σκόνης στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Οι παρεχόμενες τιμές είναι μεσοποιημένες για την περίοδο 2005-2021 και δίνονται για την

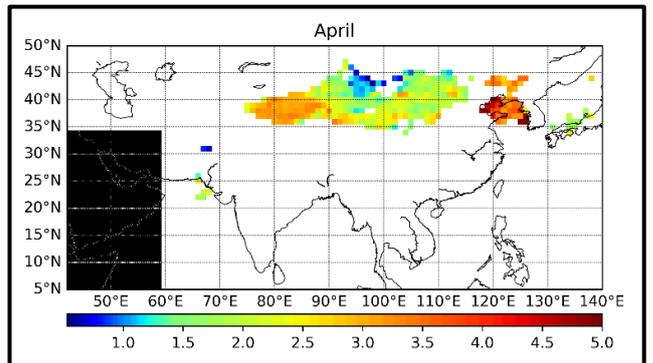
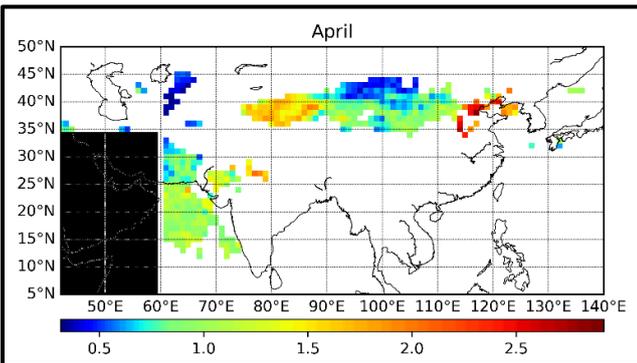
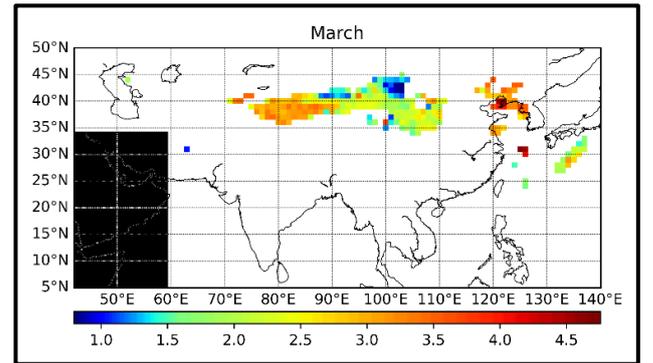
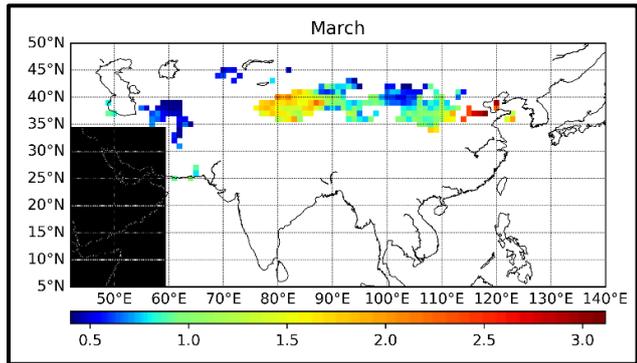
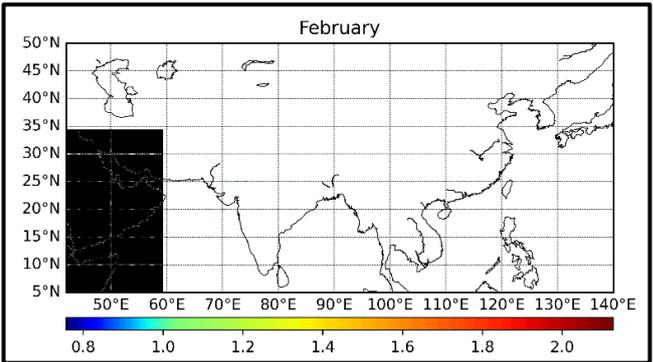
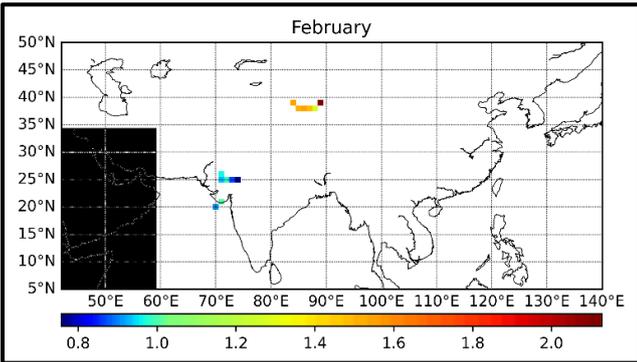
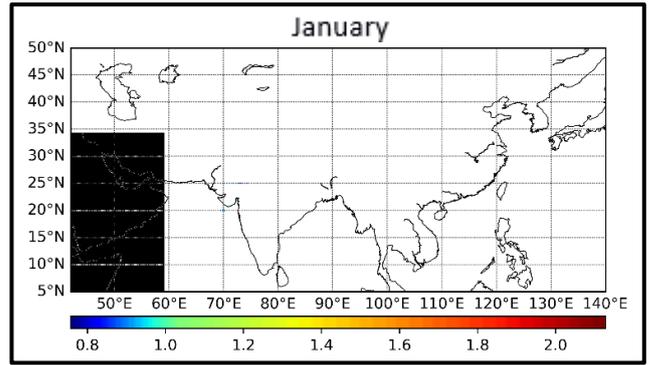
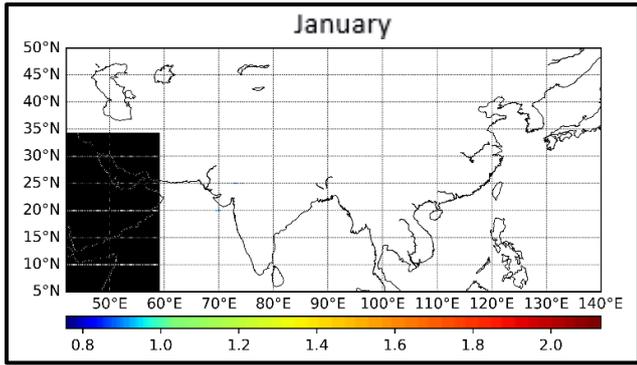
άνοιξη, το θέρος και το χειμώνα. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης. Με λευκό χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων ή δε συμβαίνουν επεισόδια.

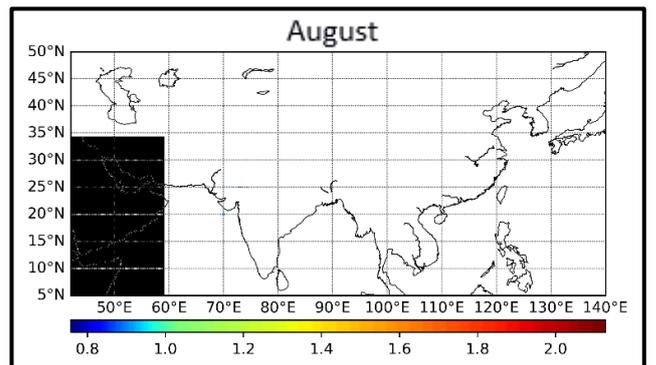
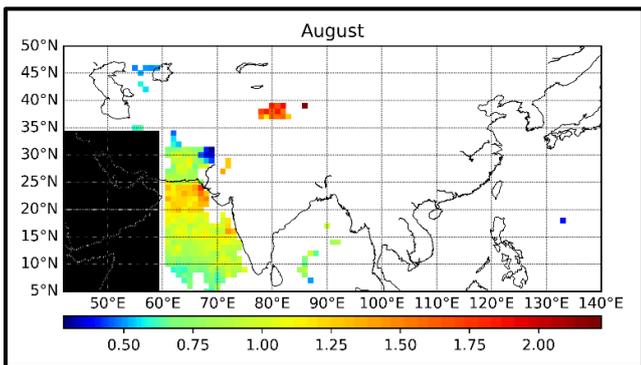
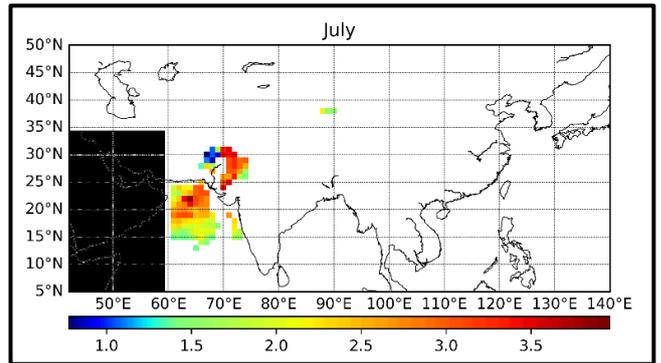
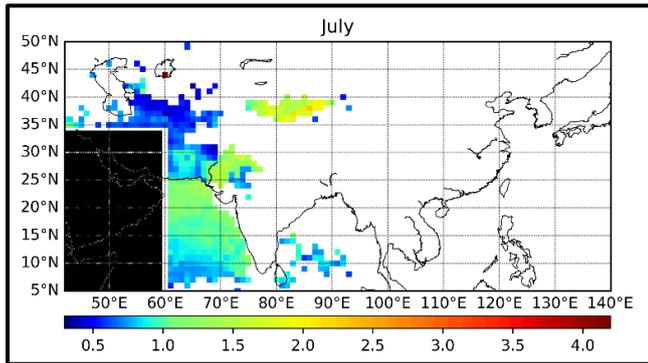
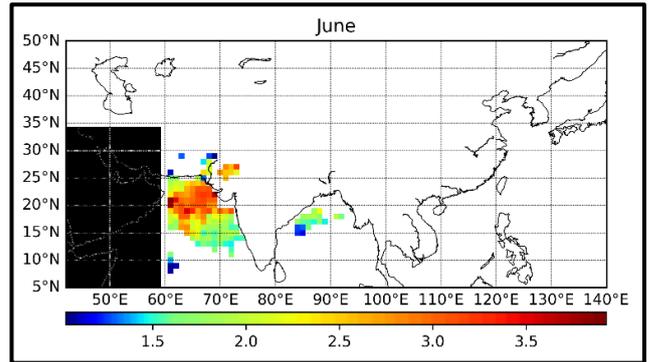
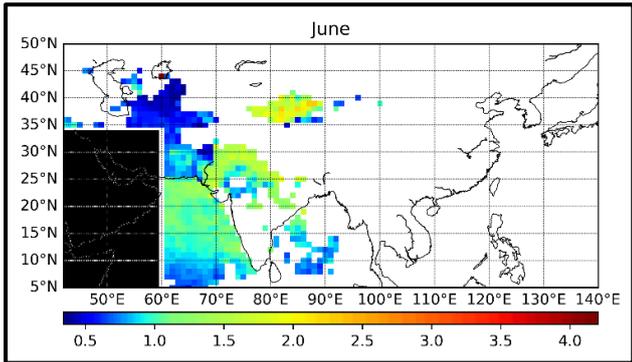
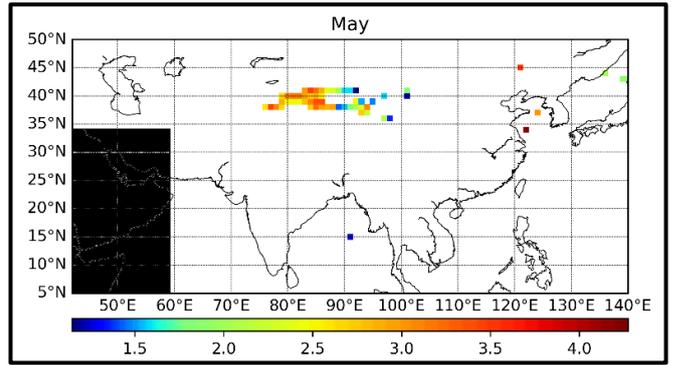
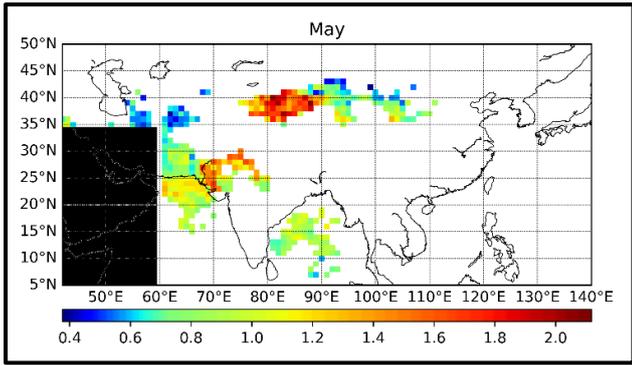


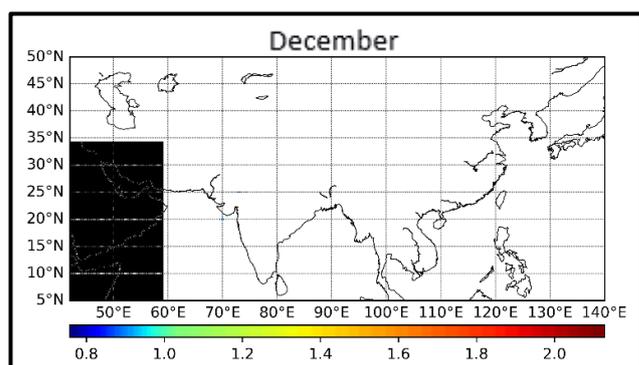
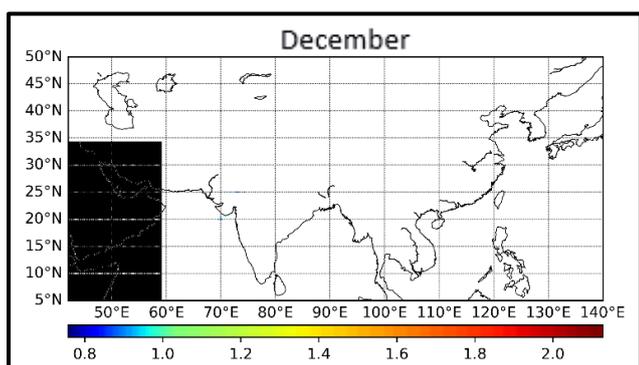
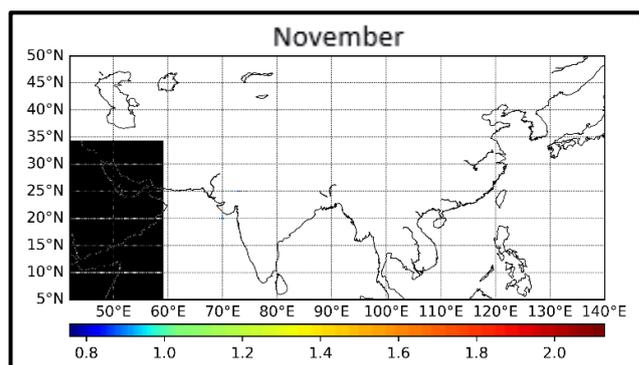
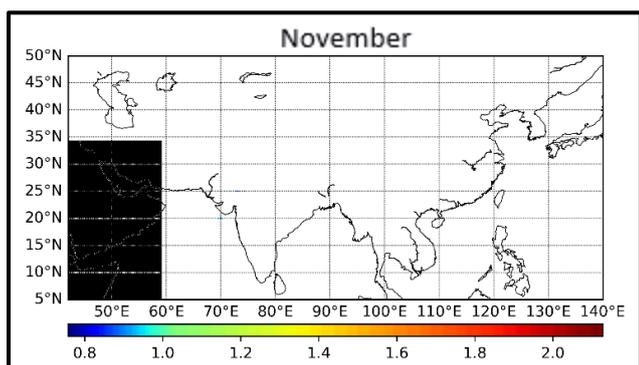
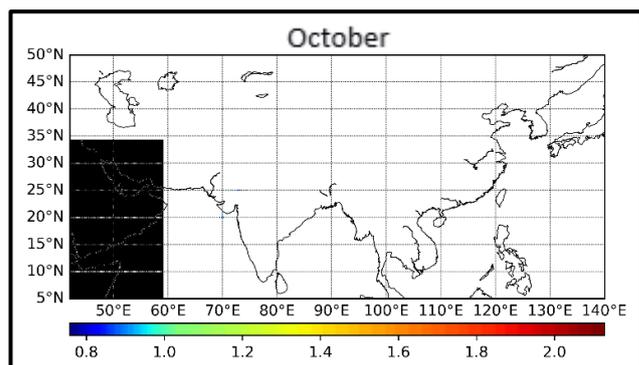
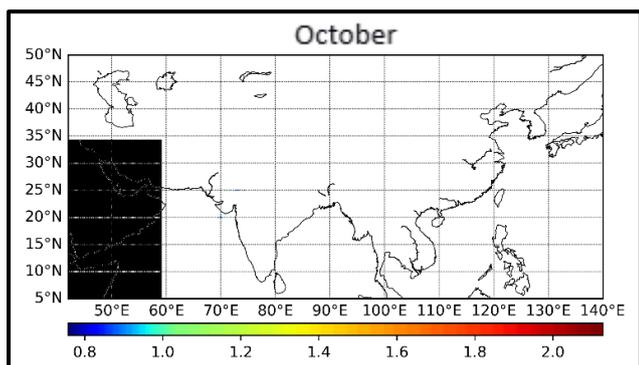
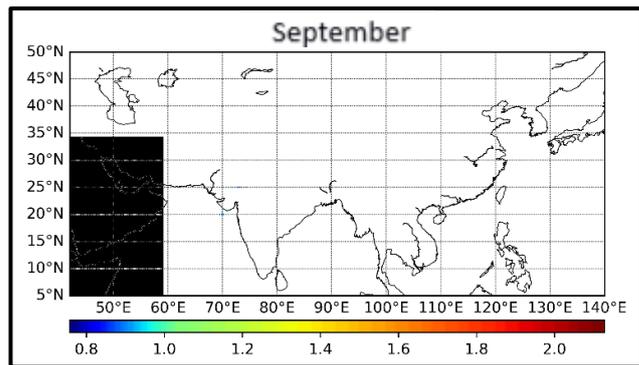
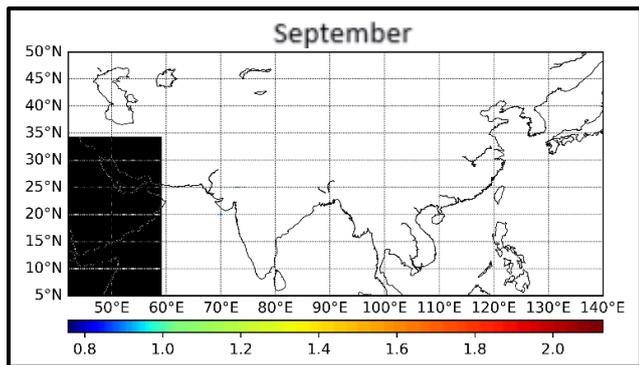




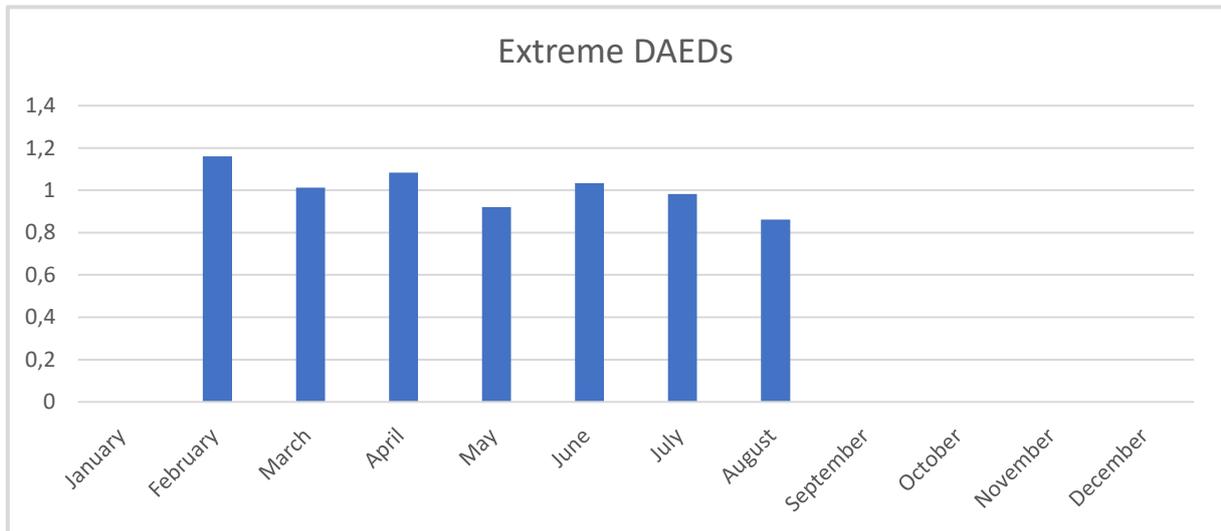
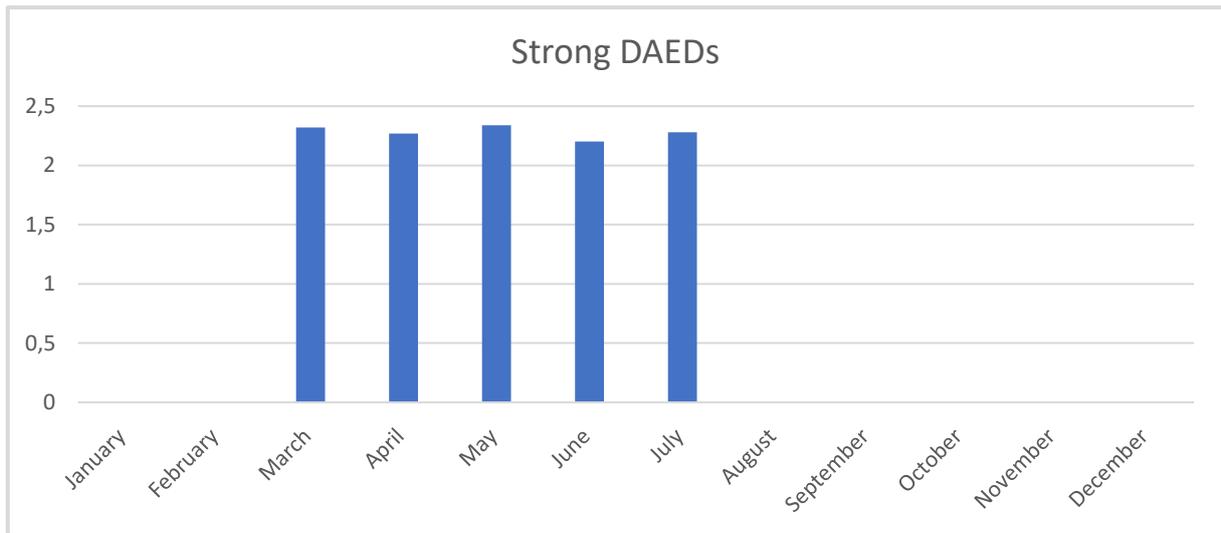
Σχήμα Π4. Γεωγραφική κατανομή της μέσης μηνιαίας αθροιστικής συχνότητας εμφάνισης των ημερών ισχυρών (αριστερή στήλη) και ακραίων (δεξιά στήλη) επεισοδίων ερημικής σκόνης στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Οι παρεχόμενες τιμές είναι μεσοποιημένες για την περίοδο 2005-2021 και δίνονται για κάθε μήνα. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.







Σχήμα Π5. Γεωγραφική κατανομή της μέσης μηνιαίας τιμής του οπτικού βάθους ερημικής σκόνης (AOD) των ημερών ισχυρών (αριστερή στήλη) και ακραίων (δεξιά στήλη) επεισοδίων ερημικής σκόνης, που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια ημερών με έντονα επεισόδια σκόνης στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Οι παρεχόμενες τιμές είναι μεσοποιημένες για την περίοδο 2005-2021. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης. Με λευκό χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων ή δε συμβαίνουν επεισόδια.



Σχήμα Π6. Ενδοετήσια μεταβολή (μεσοποιημένες τιμές περιόδου 2005-2021) του οπτικού βάθους ερημικής σκόνης (AOD) των ημερών ισχυρών και ακραίων επεισοδίων ερημικής σκόνης (EDAEDs) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας.