



University of Ioannina

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ  
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ



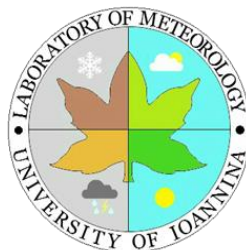
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
“ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ”

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΧΩΡΟΧΡΟΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ  
ΤΩΝ ΕΠΕΙΣΟΔΙΩΝ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΩΝ  
ΣΚΟΝΗΣ ΣΤΗΝ ΑΣΙΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ  
ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΩΝ  
ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ  
ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ**

**ΠΕΤΡΟΣ ΜΠΕΛΙΜΕΖΗΣ**  
ΦΥΣΙΚΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΧΑΤΖΗΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ  
(ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ)



ΙΩΑΝΝΙΝΑ 2023





University of Ioannina

**UNIVERSITY OF IOANNINA  
SCHOOL OF SCIENCES  
DEPARTMENT OF PHYSICS  
POSTGRADUATE PROGRAM**



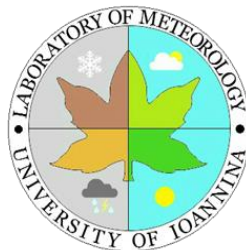
“ATMOSPHERIC SCIENCES AND THE ENVIRONMENT”

MASTER THESIS

**SPATIOTEMPORAL  
CHARACTERISTICS OF DUST  
AEROSOL EPISODES OVER ASIA  
BASED ON CONTEMPORARY  
CLIMATOLOGICAL SATELLITE  
DATA AND SATELLITE ALGORITHM**

**PETROS BELIMEZIS**  
PHYSICIST

SUPERVISOR: NIKOLAOS HATZIANASTASSIOU (PROFESSOR)



IOANNINA 2023



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>Ευχαριστίες</b> .....	9
<b>Περίληψη</b> .....	11
<b>Abstract</b> .....	13
<b>Λίστα Ακρωνυμίων</b> .....	15
<b>Εισαγωγή</b> .....	17
<b>Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup></b>	
<b>Θεωρητικό Υπόβαθρο – Βασικοί Ορισμοί</b> .....	27
1.1 Τι είναι τα ατμοσφαιρικά αερολύματα.....	27
1.2 Κατηγοριοποίηση αερολυμάτων.....	27
1.2.1 Αερολύματα σκόνης (Dust aerosols).....	30
1.2.2 Θαλάσσια αερολύματα (Sea salt aerosols).....	31
1.2.3 Αερολύματα καύσης βιομάζας (Biomass burning aerosols).....	32
1.2.4 Ηφαιστειακά αερολύματα (Volcanic aerosols).....	33
1.2.5 Νιτρικά και θειικά αερολύματα (Nitrite & sulfate aerosols).....	33
1.3 Οπτικές ιδιότητες των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων.....	34
1.3.1 Οπτικό βάθος αερολυμάτων (Aerosol Optical Depth, AOD).....	35
1.3.2 Δείκτης Αερολυμάτων (Aerosol Index, AI).....	36
1.3.3 Εκθετικός παράγοντας Ångström (Ångström Exponent, $\alpha$ ).....	36
1.4 Επιπτώσεις αερολυμάτων.....	37
<b>Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup></b>	
<b>Μεθοδολογία – Δεδομένα – Περιοχή Μελέτης</b> .....	39
2.1 Ορισμός επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης (Dust Aerosol Episodes).....	39
2.2 Μεθοδολογία - Περιγραφή αλγορίθμου για τον προσδιορισμό των επεισοδίων.....	40
2.3 Δορυφορικά δεδομένα MODIS (MODIS satellite data).....	44
2.4 Δορυφορικά δεδομένα OMI (OMI satellite data).....	47
2.5 Περιοχή και υποπεριοχές μελέτης (Region and subregions of study).....	48

2.5.1 Έρημος Γκόμπι (Gobi Desert).....	50
2.5.2 Έρημος Τακλαμακάν (Taklamakan Desert).....	51
2.5.3 Έρημος Ταρ (Thar Desert).....	52
2.5.4 Άλλες μικρότερες ερημικές περιοχές.....	52

### **Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>**

<b>Αποτελέσματα – Συζήτηση.....</b>	<b>55</b>
3.1 Γεωγραφική κατανομή των επεισοδίων σκόνης (DAEs).....	55
3.1.1 Μέσες ετήσιες κλιματολογικές κατανομές.....	55
3.1.2 Μέσες μηνιαίες κλιματολογικές κατανομές.....	66
3.2 Ενδοετήσια και διαχρονική μεταβολή των επεισοδίων σκόνης.....	83
3.2.1 Ενδοετήσια μεταβολή των επεισοδίων σκόνης .....	83
3.2.2 Διαχρονική μεταβολή των επεισοδίων σκόνης.....	88
3.2.2.1 Αποτελέσματα για όλη την περιοχή μελέτης (Ασία).....	89
3.2.2.2 Αποτελέσματα κατά τόπους (σε επίπεδο κυψελίδας).....	95

### **Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>**

<b>Σύνοψη – Συμπεράσματα.....</b>	<b>101</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>107</b>
<b>Παράρτημα.....</b>	<b>115</b>

## **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





# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλλαν στην εκπόνησή της.

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 προσωπικά τον κύριο Χατζηαναστασίου για την πολύτιμη συνεισφορά και καθοδήγησή του σε καίρια σημεία για την ολοκλήρωση της εργασίας, με τις συμβουλές, τις γνώσεις του και τις εποικοδομητικές υποδείξεις. Επίσης, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους υποψήφιους διδάκτορες κ. Γαβρούζου Μαρία, κ. Σταμάτη Μιχαήλ και το μεταδιδάκτορα κ. Μάριο-Μπρούνο Κόρα-Καράσα για τη βοήθειά και τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσαν για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τους υπόλοιπους καθηγητές του μεταπτυχιακού προγράμματος, τους κ. Μπαρτζώκα Αριστείδη, Λώλη Χρήστο, Μπάκα Νικόλαο και Κασσωμένο Παύλο για τις γνώσεις και συμβουλές που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, τόσο σε ακαδημαϊκό όσο και σε προσωπικό επίπεδο για την εξέλιξή μου.

Τέλος, φυσικά θέλω να ευχαριστήσω πολύ τους γονείς μου, οι οποίοι υπήρξαν στήριγμα για μένα καθ’ όλη τη διαδρομή των σπουδών μου μέχρι σήμερα.

*Πέτρος Μπελιμέζης*



# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια ανίχνευσης των επεισοδίων ερημικής σκόνης (Dust Aerosol Episodes, DAEs) 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 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,  $\alpha$ ). 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 επεισοδίων σκόνης (dust aerosol episodes, DAEs) πραγματοποιείται ανά ημέρα μέσω της εφαρμογής κατάλληλων φίλτρων/ορίων στα δεδομένα εισαγωγής του αλγορίθμου. Στη συνέχεια, υπολογίζονται σε μηνιαία και ετήσια βάση η συχνότητα εμφάνισης των επεισοδίων σκόνης (απόλυτη σε αριθμό ημερών ανά μήνα/έτος και σχετική ως ποσοστό επί του αριθμού των ημερών για τις οποίες λειτούργησε ο αλγόριθμος ανά μήνα/έτος) και η έντασή τους (σε όρους οπτικού βάθους σκόνης).

Σύμφωνα, με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου, τα επεισόδια αερολυμάτων σκόνης (ισχυρά και ακραία) παρουσιάζουν εποχικό κύκλο, με μέγιστες τιμές την άνοιξη και νωρίς το καλοκαίρι και ελάχιστες το φθινόπωρο και το χειμώνα, τόσο για την απόλυτη και τη σχετική συχνότητα εμφάνισης όσο και για το οπτικό βάθος. Η ενδοετήσια αυτή μεταβολή διαφοροποιείται από περιοχή σε περιοχή, με τα μέγιστα των συχνοτήτων να παρατηρούνται την άνοιξη κατά κύριο λόγο στην έρημο Τακλαμακάν και δευτερευόντως στην έρημο Ταρ και σε μεγάλο μέρος του Πακιστάν, ενώ κατά τους θερινούς μήνες στο Πακιστάν (και κυρίως στα παραθαλάσσια τμήματά του), την κοιλάδα του Ινδού, την έρημο Ταρ και την Αραβική Θάλασσα. Ελάχιστες ή μηδενικές συχνότητες εμφάνισης επεισοδίων παρατηρούνται σε όλες τις περιοχές κατά το φθινόπωρο και το χειμώνα. Όσον αφορά στην ένταση, δηλαδή στο οπτικό βάθος (DOD) των επεισοδίων σκόνης, η έρημος Τακλαμακάν έχει σχετικά μεγάλες τιμές σχεδόν όλο το έτος, με την Κίτρινη Θάλασσα και τον Κόλπο της Βεγγάλης να έχουν τις μεγαλύτερες τιμές (DOD = 3.5-5) την άνοιξη για τα ακραία επεισόδια, ενώ για τα ισχυρά επεισόδια η τιμή του οπτικού βάθους είναι κατά μέσο όρο γύρω στο 1.5. Βρέθηκε μια μειούμενη τάση της απόλυτης και σχετικής συχνότητας εμφάνισης ισχυρών και ακραίων επεισοδίων κατά την περίοδο 2005-2021, η οποία όμως δεν είναι στατιστικά σημαντική (κατά Mann-Kendall test), ενώ για την έντασή τους (DOD) σημειώθηκε μια μείωση για τα ισχυρά επεισόδια, η οποία μάλιστα βρέθηκε στατιστικά σημαντική (Mann-Kendall), ενώ αντίθετα για τα ακραία επεισόδια βρέθηκε αυξητική τάση, χωρίς να είναι στατιστικά σημαντική.



# **ABSTRACT**

In the present study, the presence of dust aerosol episodes (DAs) over the wide region 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 Dust Aerosol Episodes (DAEs), while it discriminates them, according to their intensity, to strong and extreme ones.

Specifically, the satellite algorithm input data are: the spectral Aerosol Optical Depth (AOD), the Aerosol Index (AI) and the Ångström Exponent (a). 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 of DAEs is made per day, through the application of specific appropriate thresholds to the algorithm input aerosol optical properties. Then, the frequency of occurrence (either the absolute, in number of episodes per month/year and the relative, in percentage terms with respect to the number of days for which the algorithm operated in a month/year) and the intensity, in terms of dust optical depth, are computed by the algorithm.

According to the algorithm results, the dust aerosol episodes (strong and extreme) exhibit a clear seasonality, with maximum values in spring and early summer, and minimum in autumn and winter, both for their absolute and relative frequencies of occurrence and for their intensity (optical depth). This seasonal cycle varies from a region to another, with maximum frequencies in spring, primarily over the Taklamakan desert and secondarily over the Thar desert and a great part of Pakistan, and in summer over Pakistan (mainly over its coastal areas), the Indus Valley, the Thar Desert and the Arabian Sea. Minimum or zero frequencies are observed over the entire study area during autumn and winter. As it concerns the intensity of Asian dust episodes, in terms of dust optical depth (DOD), it is quite strong over the Taklamakan Desert throughout the year, except for winter, while over the Yellow Sea and the Gulf of Bengal it is stronger during spring (DOD = 3.5-5) as it concerns the extreme episodes. On the other hand, the DOD is equal to about 1.5 on average for strong episodes. A decreasing trend of the absolute and relative frequency of the strong and extreme dust episodes was found, but this is not statistically significant (Mann-Kendall). As it concerns their intensity (DOD), a decreasing and statistically significant trend (according to the Mann-Kendall test) was found for the strong episodes, while, on the contrary, an increasing, but not statistically significant, trend was found for the extreme episodes.



# ΛΙΣΤΑ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ

$\alpha$ : Ångström Exponent

AERONET: AErosol RObotic NETwork

AI: Aerosol Index

AOD: Aerosol Optical Depth

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

EOS: Earth Observing System

ESOTC: European State Of The Climate

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

OMI: Ozone Monitoring Instrument

SCIAMACHY: Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography

SDAE: Strong Dust Aerosol Episode

STDV: Standard Deviation

TOMS: Total Ozone Mapping Spectrometer

TROPOMI: TROPospheric Monitoring Instrument

UV: Ultra Violet





# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

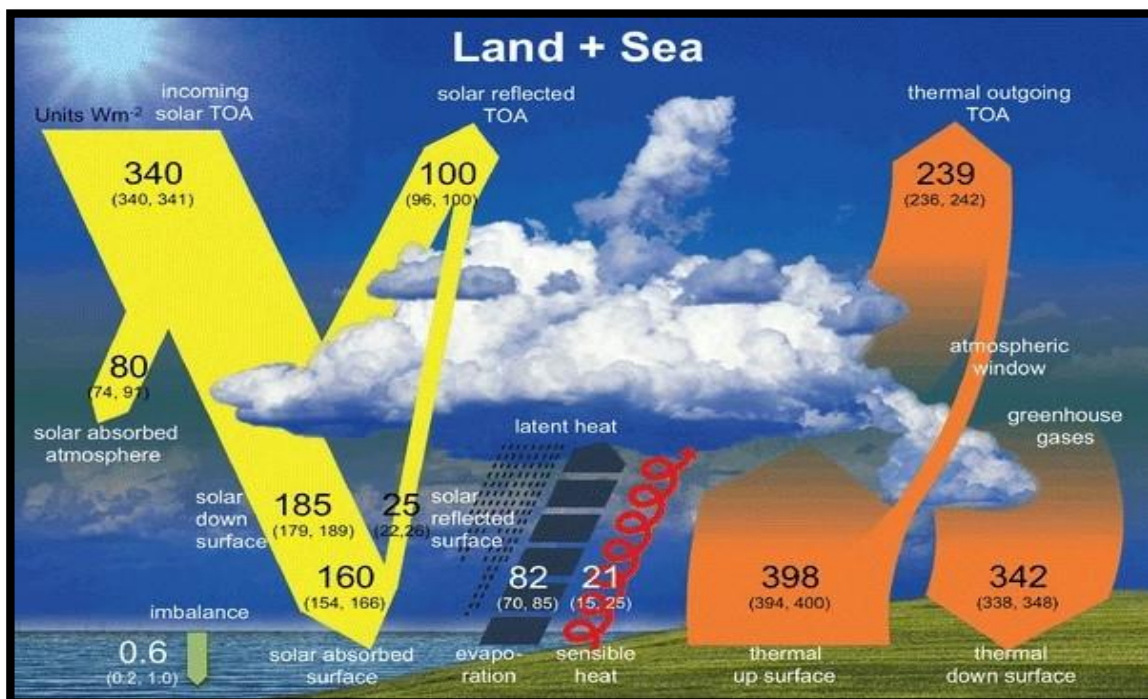
Η αλλαγή του κλίματος της Γης, η οποία συμβαίνει από την αρχή δημιουργίας της, αλλά έχει επιταχυνθεί τις τελευταίες δεκαετίες λόγω της ανθρώπινης παρέμβασης (IPCC, 2013), έχει κάνει επιτακτική την ανάγκη μελέτης και κατανόησης των παραγόντων που συντελούν σε αυτήν την αλλαγή. Η ανθρώπινη δραστηριότητα προσθέτει τεράστιες ποσότητες αερίων του θερμοκηπίου σε εκείνες που απαντώνται φυσιολογικά στην ατμόσφαιρα. Η επιπλέον ποσότητα αυτών των αερίων, προέρχεται κυρίως από την καύση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας, καθώς και από άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως η αποψύλωση των τροπικών δασών, η γεωργία, η κτηνοτροφία και η παραγωγή χημικών ουσιών. Αυτό έχει ως συνέπεια η θερμοκρασία της Γης να αυξάνεται με πρωτοφανείς ρυθμούς, πέραν του κανονικού και να επέρχονται σημαντικές αλλαγές στο κλίμα. Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής είναι ήδη αισθητές σ' ολόκληρο τον κόσμο και προβλέπεται να γίνουν συχνότερες και εντονότερες τις επόμενες δεκαετίες (ESOTC, 2019). Όλοι οι πληθυσμοί είναι ευάλωτοι στην κλιματική αλλαγή, αλλά μερικοί είναι σε μεγαλύτερο βαθμό. Όλοι οι άνθρωποι σε παγκόσμια κλίμακα πρόκειται να επηρεαστούν, αλλά ο βαθμός που θα επηρεαστεί η υγεία των πληθυσμών ποικίλλει, ανάλογα με τον τόπο και τρόπο που ζούνε οι άνθρωποι. Γι' αυτόν το λόγο, επιστήμονες από αρκετούς κλάδους (όπως φυσικοί, χημικοί, βιολόγοι, μηχανικοί κ.ά.) διεξάγουν έρευνες, αυτόνομοι ή σε συνεργασία, για να απαντηθούν τα παραπάνω ερωτήματα.

Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο τη μελέτη ενός παράγοντα, του οποίου η χωρική και χρονική μεταβλητότητα μπορεί να επιφέρει αλλαγές στην υγεία, την οικονομική δραστηριότητα, τον τρόπο ζωής των ανθρώπων, αλλά και στον καιρό και το κλίμα περιοχών του πλανήτη που βρίσκονται κοντά σε ερήμους. Αυτός ο παράγοντας είναι τα *αερολύματα σκόνης* (*dust aerosols, DA*), που αποτελεί μια κατηγορία ατμοσφαιρικών αερολυμάτων. Τα αερολύματα σκόνης, όπως θα εξηγηθεί παρακάτω, είναι κυρίως φυσικής προελεύσεως, όμως οι ανθρώπινες δραστηριότητες μπορούν να επηρεάσουν την εκπομπή και διάδοσή τους, τόσο σε τοπικό όσο και σε 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*).

Για την παρακολούθηση και την περιγραφή των φυσικών, χημικών και οπτικών ιδιοτήτων των αερολυμάτων σκόνης, αλλά και γενικότερα των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων, σε διαφορετικές χωρικές και χρονικές κλίμακες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές διαφορετικής φιλοσοφίας. Αυτές είναι η χρήση δορυφορικών και επίγειων μετρήσεων, αλλά και αριθμητικών μοντέλων, με το κάθε είδος να παρουσιάζει τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Το βασικό πλεονέκτημά των δορυφορικών μετρήσεων είναι η αυξημένη χωρική κάλυψη που παρέχουν σε πλανητική κλίμακα, με αρκετά ικανοποιητική χρονική κάλυψη, ιδιαίτερα με τη ραγδαία ανάπτυξή τους τα τελευταία έτη. Μειονέκτημα τους, αποτελεί

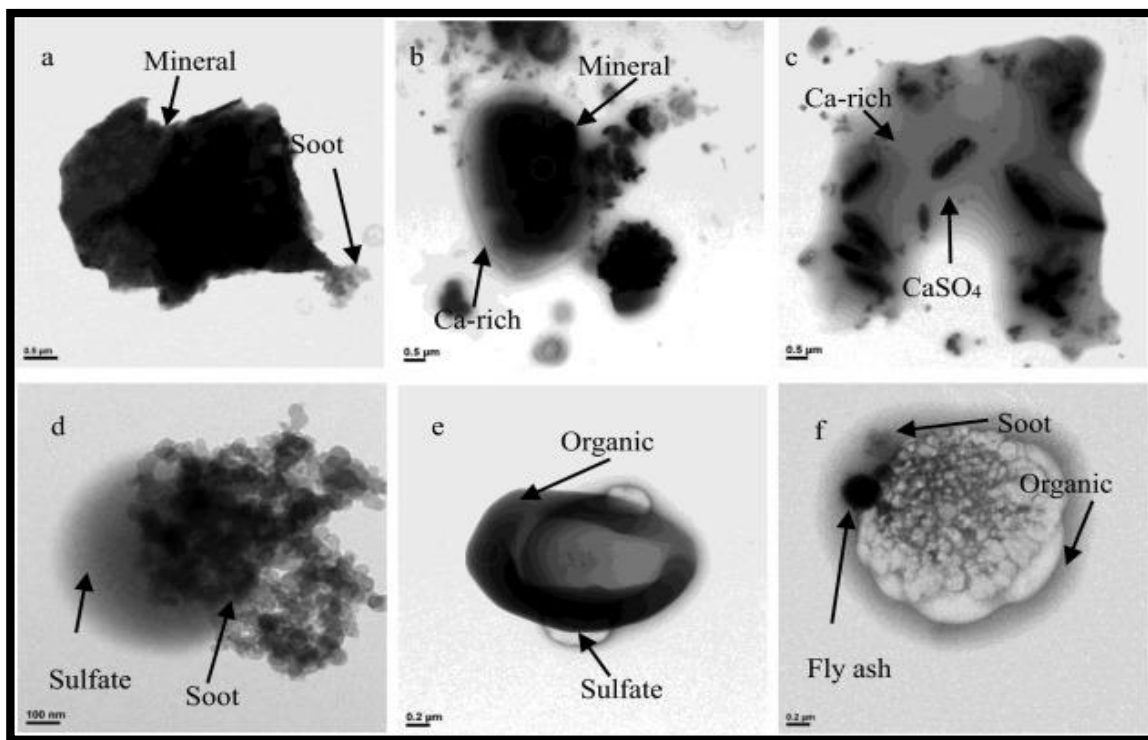
η περιορισμένη ακρίβεια τους, η οποία όμως κι αυτή βελτιώνεται με την πάροδο των ετών. Όσον αφορά στις επίγειες μετρήσεις, χαρακτηρίζονται ως οι πλέον αξιόπιστες, αλλά με το σοβαρό μειονέκτημα ότι είναι τοπικά περιορισμένες. Τέλος, τα αριθμητικά μοντέλα έχουν το πλεονέκτημα ότι παρέχουν καλύτερη χωρική και χρονική κάλυψη έναντι των δύο προηγούμενων μεθόδων, αλλά χρειάζονται αξιολόγηση και διεξοδική επαλήθευση για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων τους.

Κινητήριο μοχλό του κλίματος της Γης αποτελεί η εισερχόμενη ακτινοβολία ενέργεια (ακτινοβολία) από τον Ήλιο. Η εισερχόμενη, μικρού μήκους κύματος ηλιακή ακτινοβολία αυξάνει τη θερμοκρασία του πλανήτη μας, ο οποίος με τη σειρά του εκπέμπει προς το διάστημα μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία. Οι δύο αυτές συνιστώσες, η εισερχόμενη ηλιακή και η εξερχόμενη γήινη ακτινοβολία, απαρτίζουν το ισοζύγιο ακτινοβολίας (radiation budget), ενώ καθορίζουν το ενεργειακό ισοζύγιο (energy budget) του συστήματος Γης-Ατμόσφαιρας. Παρότι η μέση τιμή της θερμοκρασίας σε διάφορες περιοχές της Γης μπορεί να μεταβάλλεται από χρόνο σε χρόνο, το μέσο ενεργειακό ισοζύγιο του πλανήτη μεταβάλλεται ανεπαίσθητα σε ετήσια βάση, καθώς το σύστημα Γη-Ατμόσφαιρα αποβάλλει στο διάστημα σχεδόν την ίδια ποσότητα ακτινοβολίας (ουσιαστικά και ενέργειας) με αυτήν που δέχεται από τον Ήλιο. Το ίδιο ισχύει και για την επιφάνεια της Γης, όπου σε ετήσια βάση η γήινη επιφάνεια επιστρέφει στην ατμόσφαιρα σχεδόν το ίδιο ποσό ενέργειας με αυτό που απορροφά. 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.** Αναπαράσταση του ενεργειακού ισοζυγίου του συστήματος Γης – Ατμόσφαιρας. Οι αριθμοί υποδεικνύουν τις καλύτερες εκτιμήσεις για τα μεγέθη των συνιστωσών του μέσου παγκόσμιου ενεργειακού ισοζυγίου, μαζί με τα εύρη αβεβαιότητάς τους σε παρενθέσεις, που αντιπροσωπεύουν τις σημερινές κλιματικές συνθήκες στις αρχές του 21<sup>ου</sup> αιώνα. Τα μεγέθη δίδονται σε  $W/m^2$  (Πηγή: Wild et al., 2015).

Τα ατμοσφαιρικά αερολύματα (*atmospheric aerosols*), όπως και τα αέρια του φαινομένου του θερμοκηπίου (*greenhouse effect*), συγκαταλέγονται μεταξύ των σημαντικότερων παραγόντων διαταραχής του ενεργειακού ισοζυγίου και του κλίματος του συστήματος Γης-Ατμόσφαιρας, καθώς απορροφούν ή σκεδάζουν πρωτίστως την ηλιακή ακτινοβολία, αλλά – ειδικότερα η σκόνη - και τη γήινη ακτινοβολία. Με τον όρο «*αερόλυμα*» αναφερόμαστε σε όλα τα μικροσκοπικά σωματίδια, στερεής ή υγρής φάσης, τα οποία αιωρούνται στον ατμοσφαιρικό αέρα. Τα αερολύματα ή αιωρούμενα σωματίδια (Σχήμα E2) εισέρχονται στην ατμόσφαιρα μέσω φυσικών ή ανθρωπογενών διεργασιών, με τις συγκεντρώσεις τους να ποικίλουν κατά τάξεις μεγέθους και να παρουσιάζουν μεταβολές, τόσο σε γεωγραφικό όσο και χρονικό επίπεδο. Γενικά, τα αερολύματα βρίσκονται σε διάφορα ύψη στην ατμόσφαιρα, με τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις τους να βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια της Γης, ενώ έχουν την ικανότητα, μέσω της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας, να μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις (*long-range transport*) από τις πηγές προέλευσής τους (Prospero, 1999; Griffin et al., 2001; Ansmann et al., 2003).

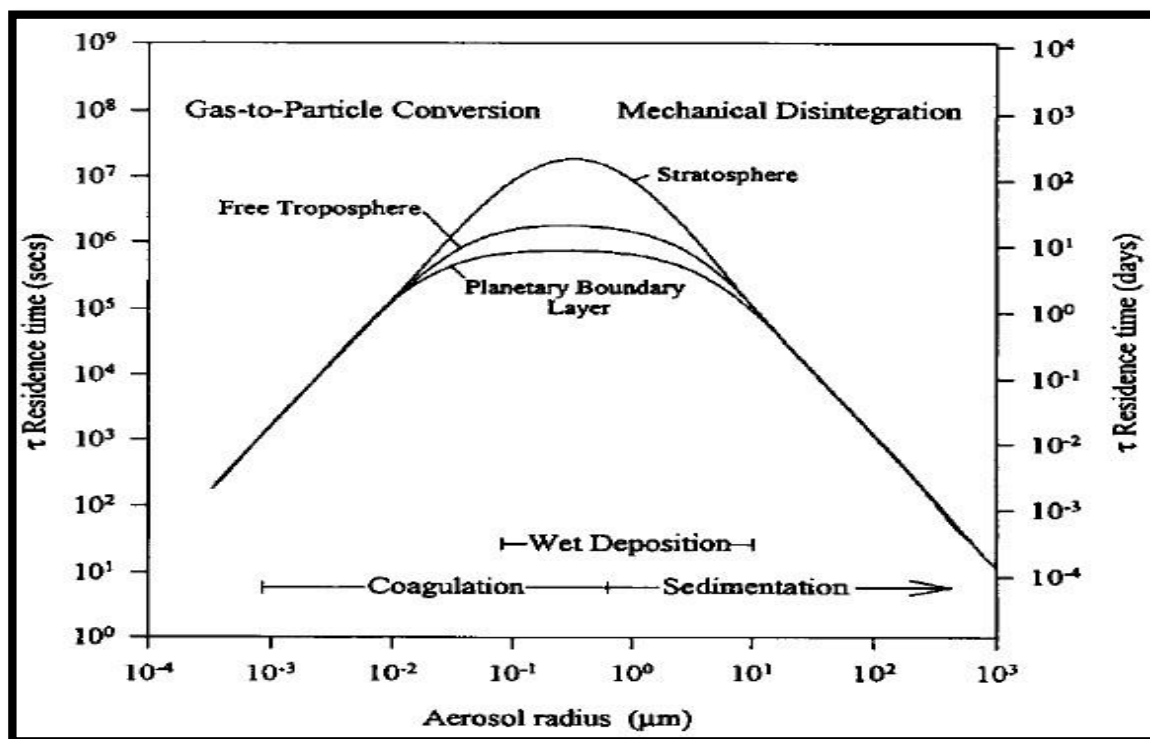


**Σχήμα E2.** Ατμοσφαιρικά αερολύματα διαφόρων ειδών, όπως φαίνονται σε μικροσκόπιο ηλεκτρονίων (*electron microscope*), από ανατολική περιοχή στο Οροπέδιο του Θιβέτ (Πηγή: Fan et al., 2016).

Εκτός των άλλων, τα αερολύματα επιδρούν και στην ανθρώπινη υγεία, στα οικοσυστήματα και γενικά στη βιόσφαιρα. Τα αερολύματα ταξινομούνται με βάση διάφορα κριτήρια, όπως: την προέλευσή τους, το μέγεθός τους, τη διαδικασία σχηματισμού και τη χημική σύστασή τους, καθώς και την επίδρασή τους στην ανθρώπινη υγεία. Η απομάκρυνσή τους από την ατμόσφαιρα λαμβάνει χώρα μέσω της διαδικασίας της εναπόθεσής τους (*deposition*), η οποία διακρίνεται σε ξηρή (*dry deposition*), δηλαδή τη βαρυντική καθίζηση στο έδαφος και σε υγρή (*wet deposition*), κατά την οποία το σωματίδιο ενσωματώνεται σε

σταγονίδια νερού και μεταφέρεται στο έδαφος μέσω του υετού (βροχή, χιόνι, χαλάσι). Η ξηρή εναπόθεση διακρίνεται σε δύο κατηγορίες: α) τη βαρυτική εναπόθεση (συμβαίνει στα μεγάλα σωματίδια) και β) την εναπόθεση λόγω διάχυσης Brown (συμβαίνει στα μικρά σωματίδια). Τα αερολύματα που έχουν ενδιάμεσο μέγεθος δεν έχουν κάποιο σημαντικό μηχανισμό απομάκρυνσης από την ατμόσφαιρα, μέσα στην οποία γι' αυτόν το λόγο συσσωρεύονται (και ονομάζονται αερολύματα συσσώρευσης, accumulation aerosols), γι' αυτό έχουν και το μεγαλύτερο χρόνο ζωής (Colbeck, 1998; Papastefanou, 2006).

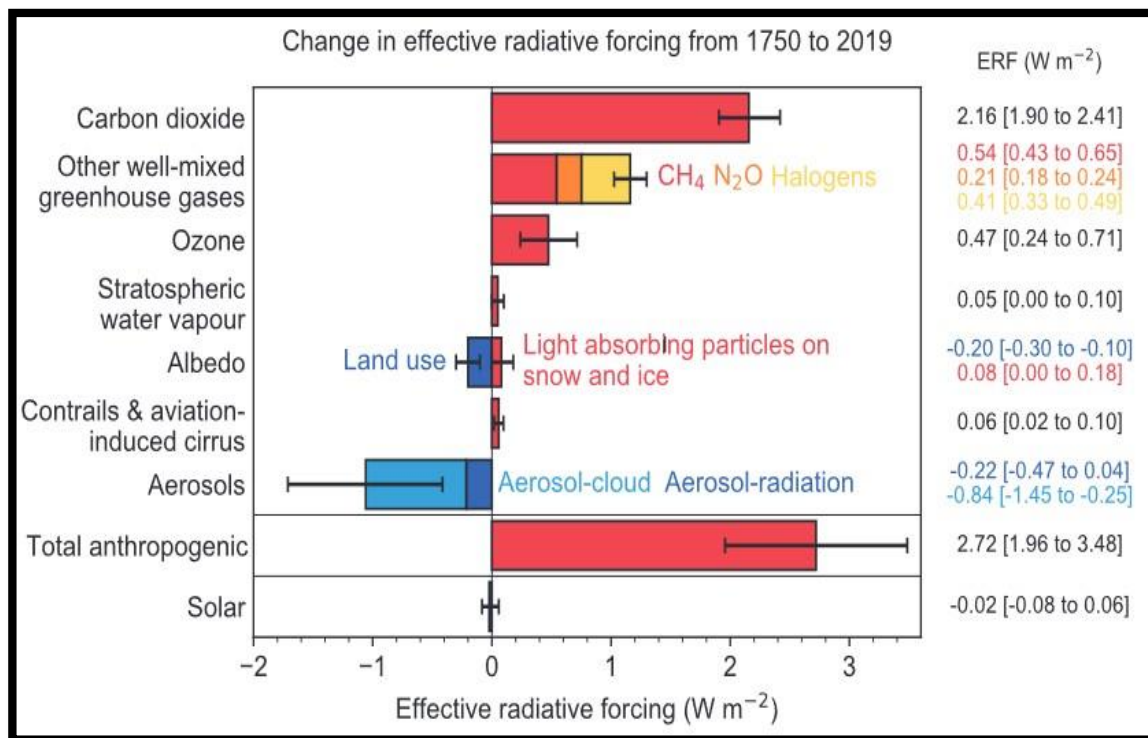
Ο χρόνος παραμονής των αερολυμάτων (Σχήμα E3) που αιωρούνται μέσα στην ατμόσφαιρα είναι συνάρτηση του ρυθμού παραγωγής και απομάκρυνσής τους, του μεγέθους τους, του ύψους στο οποίο βρίσκονται μέσα στην ατμόσφαιρα και των επικρατούντων μετεωρολογικών συνθηκών.



**Σχήμα E3.** Χρόνος παραμονής των αερολυμάτων στη γήινη ατμόσφαιρα, συναρτήσεως του μεγέθους τους και του ύψους στο οποίο βρίσκονται (Πηγή: Colbeck, 1998).

Τα ατμοσφαιρικά αερολύματα, αν και κατέχουν ένα μικρό ποσοστό μάζας και όγκου της γήινης ατμόσφαιρας, απαιτούν τη μελέτη και κατανόησή τους, διότι, εκτός των άλλων επιδράσεών τους, που ήδη αναφέρθηκαν, επιδρούν στο ισοζύγιο ακτινοβολίας, άρα και στο κλίμα της Γης. Μάλιστα, σε αντίθεση με τα αέρια του θερμοκηπίου, η επίδραση των αερολυμάτων στο ενεργειακό ισοζύγιο και στο κλίμα (παρελθοντικό, τωρινό και μελλοντικό) εξακολουθεί να παραμένει ο παράγοντας με τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα (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 τα επίπεδα της προβιομηχανικής επανάστασης εποχή, μαζί με τις εκτιμήσεις της συνεισφοράς του καθενός σε αυτή και της αντίστοιχης αβεβαιότητας, παρέχονται στο Σχήμα Ε4.

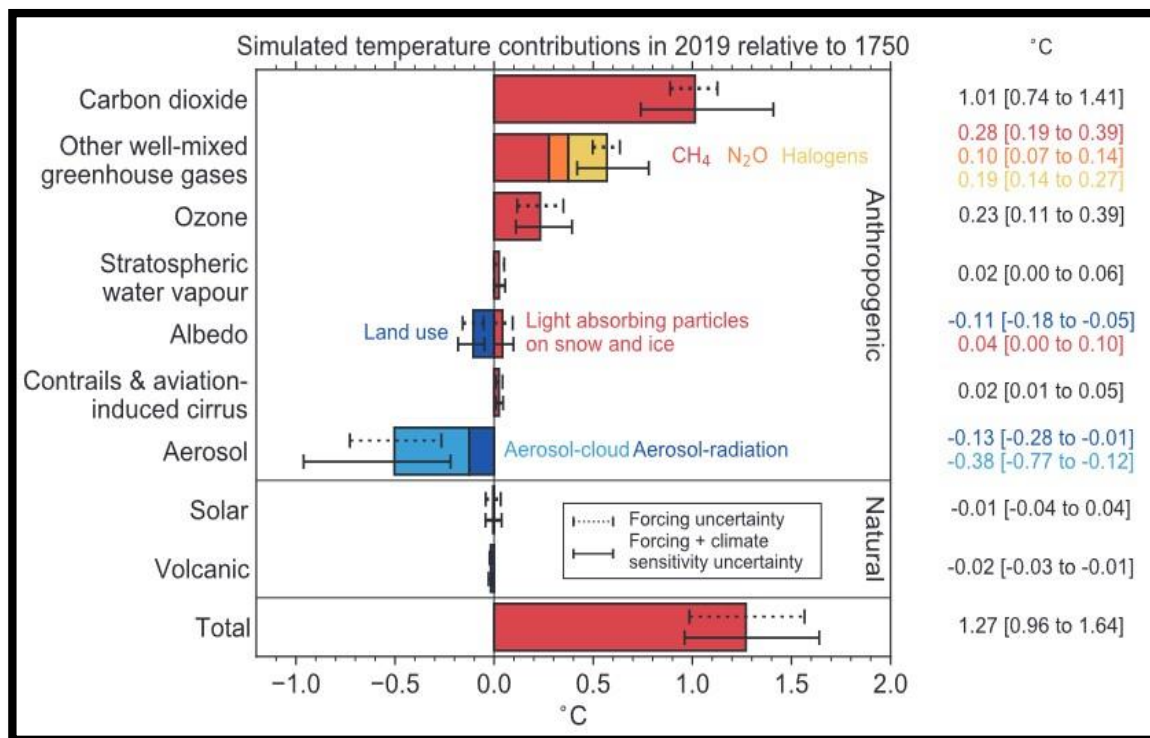


**Σχήμα Ε4.** Εκτιμώμενες μέσες πλανητικές τιμές διατάραξης της ακτινοβολίας (radiative forcing, RF) του συστήματος Γης-Ατμόσφαιρας (σε W/m<sup>2</sup>), λόγω των κυρίαρχων παραγόντων διαμόρφωσης του κλίματος, το 2019 σε σχέση με τα προβιομηχανικά έτη (Πηγή: IPCC, 2021).

Σύμφωνα, με το παραπάνω Σχήμα Ε4, παρατηρούμε ότι τα καλώς αναμεμιγμένα αέρια του θερμοκηπίου (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O και αλογόνα) συνεισφέρουν θετικά στη διαταραχή κατά ένα ποσό της τάξεως των 3.32 W/m<sup>2</sup>, δηλαδή στην ουσία αυξάνουν τη θερμοκρασία του συστήματος Γης-Ατμόσφαιρας. Η διαταραχή αυτή, που είναι η καλύτερα κατανοητή από αυτές που οφείλονται στις ανθρώπινες δραστηριότητες, έχει θετικές τιμές, καθώς το κάθε αέριο κατακρατά μέρος της και μειώνει την εξερχόμενη γήινη υπέρυθη ακτινοβολία στο διάστημα. Μεταξύ των αερίων του θερμοκηπίου, η αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) έχει προκαλέσει τη μεγαλύτερη διαταραχή στην ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της περιόδου παρακολούθησης μετά τη βιομηχανική επανάσταση. Αντίθετα, όπως φαίνεται στο Σχήμα Δ, τα αερολύματα αφαιρούν από το ισοζύγιο 1.06 W/m<sup>2</sup>, δηλαδή μειώνουν τη θερμοκρασία του συστήματος Γης-Ατμόσφαιρας, όντας ο σημαντικότερος παράγοντας ψύξης του. Γενικά, οι ανθρώπινες δραστηριότητες κατά τη βιομηχανική εποχή έχουν προσθέσει 2.72 W/m<sup>2</sup> στο σύστημα Γης-Ατμόσφαιρας, οδηγώντας στη θέρμανσή του.

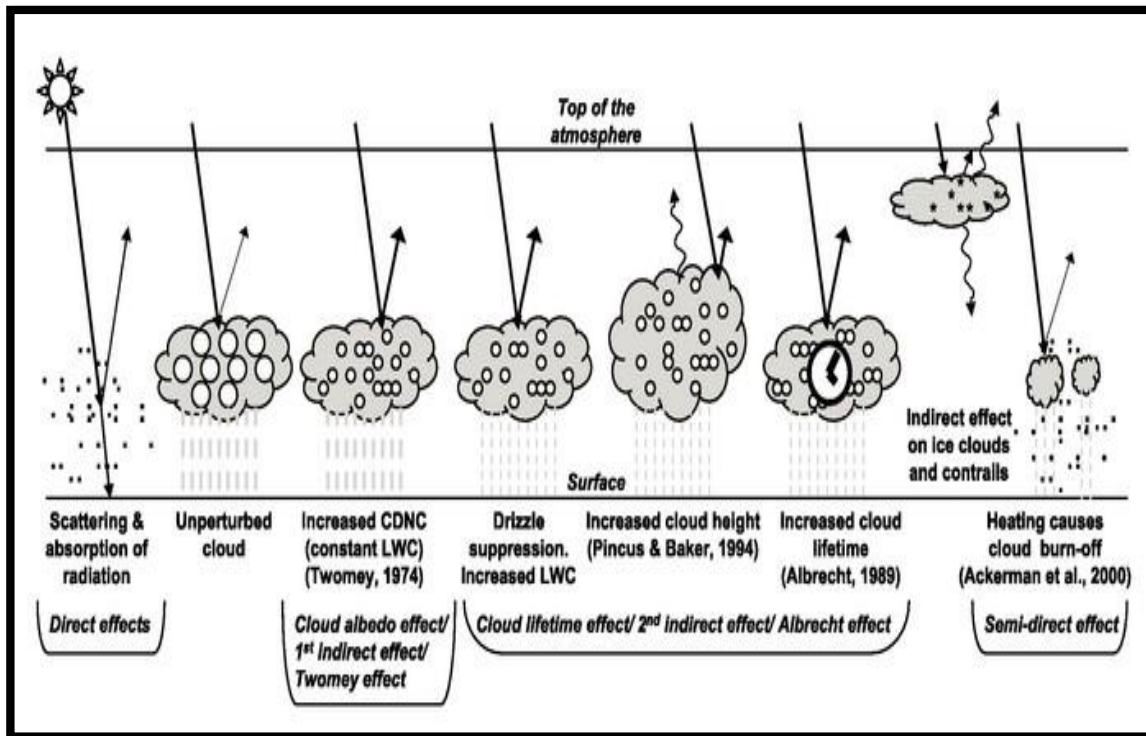
Το Σχήμα Ε5 συνδέεται με το προηγούμενο Σχήμα Ε4, το οποίο μας δείχνει τον τρόπο με τον οποίο το πλεόνασμα ή έλλειμμα ενέργειας στο ενεργειακό ισοζύγιο μεταφράζεται στη μεταβολή της θερμοκρασίας του συστήματος Γης-Ατμόσφαιρας. Το διοξείδιο του άνθρακα (που αποτελεί το κυριότερο θερμοκηπικό αέριο) αυξάνει περισσότερο απ' όλους τους

παράγοντες τη θερμοκρασία, κατά  $1.01^{\circ}\text{C}$ . Αντίθετα, τα ατμοσφαιρικά αερολύματα μειώνουν τη θερμοκρασία κατά  $0.51^{\circ}\text{C}$ . Καταλαβαίνουμε ότι η κλιματική επίδραση των αερολυμάτων συνίσταται σε ψύξη του πλανήτη, κατά μέσον όρο, η οποία αντισταθμίζει μερικώς την πλανητική θέρμανση που προκαλούν τα θερμοκηπικά αέρια, δηλαδή λειτουργώντας αντίρροπα. Η ψύξη που προκαλείται από τα αερολύματα είναι συγκρίσιμη, σε επίπεδο τάξης μεγέθους, αλλά μικρότερη σε μέγεθος από την αντίστοιχη θέρμανση που οφείλεται στα θερμοκηπικά αέρια. Συνολικά, σύμφωνα με την έκθεση του IPCC (2021), έχουμε τώρα μια αύξηση της θερμοκρασίας του συστήματος Γης-Ατμόσφαιρας κατά  $1.27^{\circ}\text{C}$  σε σχέση με την προ βιομηχανικής επανάστασης εποχή.



**Σχήμα E5.** Η συμβολή των κυρίαρχων παραγόντων διαμόρφωσης του κλίματος της Γης, στην αλλαγή θερμοκρασίας του 2019 σε σχέση με τα προβιομηχανικά έτη (Πηγή: IPCC, 2021).

Η αλληλεπίδραση των αερολυμάτων με την ακτινοβολία έχει ως αποτέλεσμα την εξαναγκασμένη διατάραξη (διαταραχή) του πεδίου της (radiative forcing), η οποία πραγματοποιείται με άμεσο (φαινόμενα σκέδασης και απορρόφησης), με έμμεσο (τροποποίηση των φυσικών/οπτικών ιδιοτήτων των νεφών) και με ημι-άμεσο τρόπο. Τα αερολύματα επιδρούν στα νέφη με έμμεσο τρόπο, καθώς τροποποιούν τις μικροφυσικές και συνεπώς τις οπτικές και τις ιδιότητες ακτινοβολίας τους, καθώς επίσης και την ποσότητα, τη διάρκεια ζωής ή και την ικανότητα παραγωγής υετού 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). Στο Σχήμα E6 διακρίνονται οι τρεις τρόποι επίδρασης των αερολυμάτων στο κλίμα της Γης: i) ο άμεσος (direct effect), ii) ο έμμεσος (indirect effect) και iii) ο ημι-άμεσος (semi-direct effect).



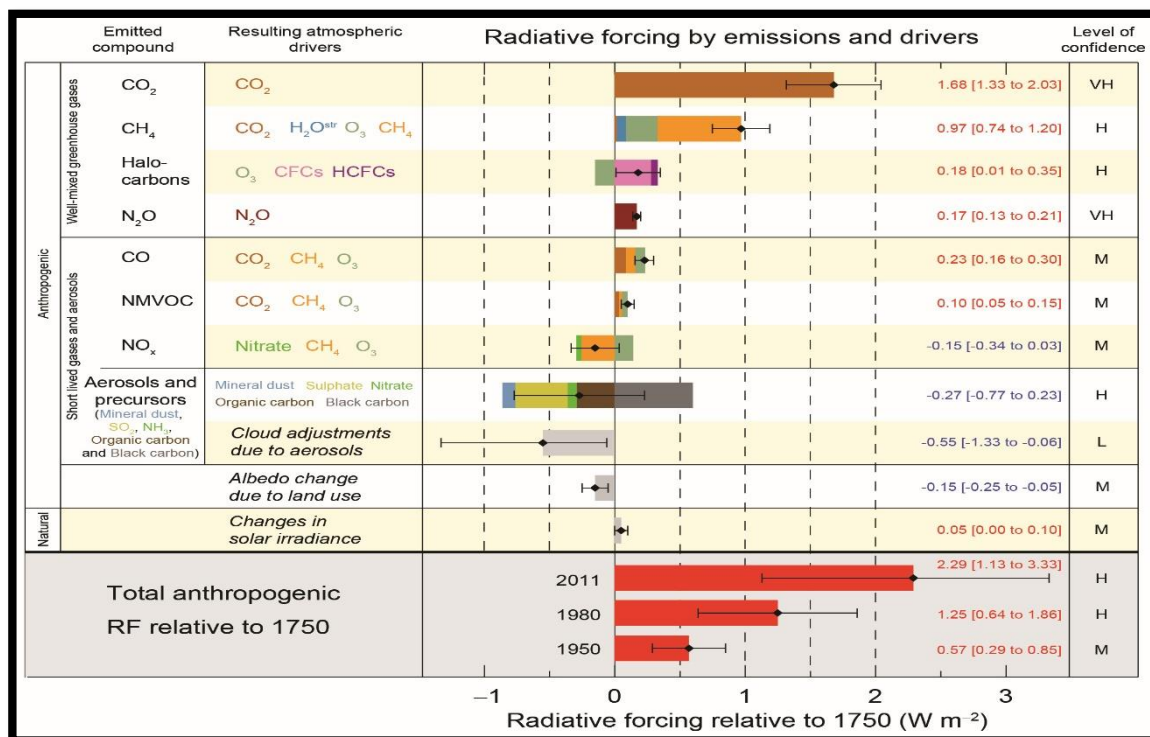
Σχήμα Ε6. Μηχανισμοί επίδρασης των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων στα νέφη (Πηγή: IPCC, 2007).

Σύμφωνα με το παραπάνω Σχήμα Ε6, η άμεση επίδραση οφείλεται στη σκέδαση και απορρόφηση της ακτινοβολίας από τα αερολύματα. 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). Τέλος, 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 νετού 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). Σύμφωνα, με μελέτη των Lohmann & Feichter (2005) το φαινόμενο Twomey (cloud albedo effect) είναι αρκετά σημαντικότερο από το φαινόμενο Albrecht (cloud lifetime effect).

Η ερημική σκόνη αποτελεί έναν από τους κυρίαρχους τύπους αερολυμάτων σε πολλά μέρη του κόσμου, αλλά και σε πλανητικό επίπεδο, με την προέλευσή της να είναι σε πολύ μεγάλο βαθμό από φυσικές πηγές (Huan et al., 2004; Tegen & Schepanski, 2009; Engelbrecht & Derbyshire, 2010; Choobari et al., 2014; Schepanski, 2018). Η εκπομπή ερημικής σκόνης είναι ένα περίπλοκο φαινόμενο, τόσο σε χωρικό όσο και σε χρονικό επίπεδο, που επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις μετεωρολογικές συνθήκες (π.χ. άνεμος, βροχόπτωση). Άλλοι παράγοντες είναι η υγρασία, η τραχύτητα και η υφή του εδάφους, η βλάστηση κ.λπ.. Ο

άνθρωπος, επίσης, μπορεί να επηρεάσει την εκπομπή σκόνης, μέσα από τις διάφορες δραστηριότητές του, όπως αγροτικές εργασίες, υπεράντληση του υδροφόρου ορίζοντα κ.ά.

Τα αερολύματα σκόνης έχουν την ικανότητα, λόγω της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας, να μεταφερθούν σε αποστάσεις πολλών χιλιάδων χιλιομέτρων από την πηγή προέλευσής τους. Μαζί με τα υπόλοιπα (άλλων ειδών) αερολύματα προκαλούν σημαντική διαταραχή του ισοζυγίου ακτινοβολίας του συστήματος Γης-Ατμόσφαιρας, που σύμφωνα με το Σχήμα E7 είναι για το σύνολο των αερολυμάτων, αλλά και για τη σκόνη, ψύξη (μείωση της ενέργειας). Ωστόσο, παρά την πρόοδο των τελευταίων ετών για τον προσδιορισμό της ενεργειακής διαταραχής των αερολυμάτων, συμπεριλαμβανομένης της σκόνης, υφίσταται ακόμη σημαντικός βαθμός αβεβαιότητας. Τα τελευταία χρόνια γίνεται συστηματική μελέτη των αερολυμάτων σκόνης και ειδικότερα των επεισοδίων της, καθώς μεταβολές στις συγκεντρώσεις σκόνης σε τοπικό ή πλανητικό επίπεδο μπορούν να προκαλέσουν μεταβολές στα χαρακτηριστικά του καιρού και του κλίματος (Schepanski, 2018; Kok et al., 2023).



**Σχήμα E7.** Εκτιμώμενες μέσες πλανητικές τιμές διατάραξης της ακτινοβολίας (radiative forcing, RF) του συστήματος Γης-Ατμόσφαιρας (σε W/m<sup>2</sup>), λόγω των κυρίαρχων παραγόντων διαμόρφωσης του κλίματος, το 2011 σε σχέση με τα προβιομηχανικά έτη (Πηγή: IPCC, 2013)

Στόχος της παρούσας μελέτης αποτελεί ο χαρακτηρισμός (η ανίχνευση) και η καταγραφή των επεισοδίων ερημικής σκόνης και των χαρακτηριστικών τους (συχνότητας εμφάνισης και έντασης) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας και της Κασπίας Θάλασσας, καθώς και η μελέτη του εποχικού κύκλου τους και των διαχρονικών τάσεων μεταβολής τους. Η επιλογή της συγκεκριμένης περιοχής για μελέτη γίνεται για το λόγο ότι η ευρύτερη περιοχή της Ασίας είναι ένα από τα πιο πυκνοκατοικημένα μέρη της Γης (ειδικά η Ινδία και η Κίνα),



φιλοξενώντας ένα μεγάλο ποσοστό του πληθυσμού της Γης, ενώ ταυτόχρονα περιλαμβάνει κάποιες από τις μεγαλύτερες ερήμους του πλανήτη μας. Έτσι, οι αλλαγές στο κλίμα και τις καιρικές συνθήκες επηρεάζουν τις ζωές και την υγεία πολλών ανθρώπων. Όπως αναφέρθηκε, στην Ασία, υπάρχουν πολλές ερημικές περιοχές, από τις οποίες μεγάλες ποσότητες αερολυμάτων σκόνης (dust aerosols, DAs) εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα, όπου παραμένουν για λίγες ώρες έως και αρκετές ημέρες, μεταφερόμενες και σε κατοικημένες περιοχές που βρίσκονται και σε μεσαίες και μεγάλες αποστάσεις. Η μεγάλη σημασία της περιοχής για τη διερεύνηση αυτών των φαινομένων, έχει οδηγήσει στη δημοσίευση εργασιών που αφορούν επεισόδια μεταφοράς σκόνης σε εκτεταμένη γεωγραφικά περιοχή με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων (Proestakis et al., 2015; 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 έχουν δημοσιευθεί μελέτες με τη χρήση δορυφορικών και επίγειων δεδομένων (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 (Darmenova et al., 2005; Lim & Chun, 2006; Zhang et al., 2018; Karami et al., 2021; Filonchik, 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 επεισοδίων αερολυμάτων για μια εκτεταμένη γεωγραφική περιοχή της Ασιατικής ηπείρου, με την εφαρμογή σύγχρονων και αξιολογημένων δορυφορικών μετρήσεων και ενός αντικειμενικού και δυναμικού αλγορίθμου. Η παρούσα εργασία έχει ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των υπάρχουσών μέχρι σήμερα μελετών, το ότι η περιοχή μελέτης δεν είναι περιορισμένη χωρικά, αλλά είναι εκτεταμένη, συμπεριλαμβάνοντας μεγάλες εκτάσεις (έχει δηλαδή σημαντική χωρική κάλυψη). Επίσης, χρησιμοποιεί σύγχρονα και αξιολογημένα δορυφορικά δεδομένα, των οποίων η αξιοπιστία έχει βελτιωθεί κατά την τελευταία δεκαετία. Επίσης, τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται παρέχουν υψηλή χρονική και χωρική ανάλυση, ενώ η περίοδος μελέτης είναι η πιο πρόσφατη δυνατή μέχρι την έναρξη και δημοσίευση της εργασίας. Όπως αναφέρθηκε, είναι σημαντικό ότι μέσω των χρησιμοποιούμενων δορυφορικών δεδομένων εξασφαλίζεται ικανοποιητική χωρική κάλυψη, αντίθετα με τις επίγειες μετρήσεις που είναι χωρικά περιορισμένες (τοπικές). Έτσι, στην παρούσα εργασία έγινε χρήση των σύγχρονων δορυφορικών δεδομένων *MODIS* (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Collection C-6.1 και *OMI* (Ozone Monitoring Instrument) OMAERUV database, τα οποία παρέχουν φασματική πληροφορία σε υψηλή χωρική ανάλυση ( $1^\circ \times 1^\circ$ ) σε επίπεδο κυψελίδας (pixel level) για το οπτικό βάθος (Aerosol Optical Depth, AOD) για διάφορα μήκη κύματος, όπως και το δείκτη των 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, εφαρμόζοντας κατάλληλα επίπεδα αποκοπής (threshold values) στο δείκτη αερολυμάτων και τον εκθετικό παράγοντα Ångström, ο αλγόριθμος προσδιορίζει τελικά την παρουσία (ή την απουσία) των αερολυμάτων σκόνης στην ατμόσφαιρα και καταγράφει την τιμή του οπτικού της βάθους (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 βάθους αερολυμάτων σε κάθε κυψελίδα (pixel), σύμφωνα με τη μέση κλιματολογική τιμή του οπτικού βάθους, υπολογίζεται αν η συγκεκριμένη κυψελίδα υφίσταται ή όχι επεισόδιο σκόνης και ταυτόχρονα κατατάσσεται είτε στα ισχυρά επεισόδια σκόνης (strong dust aerosol episode, SDAE) είτε στα ακραία επεισόδια σκόνης (extreme dust aerosol episode, EDAE).

Η παρούσα διπλωματική μεταπτυχιακή εργασία αποτελείται από 4 Κεφάλαια, τη βιβλιογραφία και το Παράρτημα. Στο Κεφάλαιο 1 παρέχεται ένα απαραίτητο συνοπτικό θεωρητικό υπόβαθρο και περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά 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 και το παράρτημα με ορισμένα αποτελέσματα, τα οποία παρέχονται χωρίς σχολιασμό.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## Θεωρητικό Υπόβαθρο – Βασικοί Ορισμοί

### 1.1 Τι είναι τα ατμοσφαιρικά αερολύματα

Ως *αερολύματα (aerosols)* ορίζονται τα μικροσκοπικά σωματίδια στερεής ή υγρής φάσης, τα οποία αιωρούνται μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα. Αποτελούν, ιδιαίτερα αυτά που έχουν ανθρωπογενή προέλευση, έναν από τους σημαντικότερους ρύπους στη γήινη ατμόσφαιρα, με το μεγαλύτερο μέρος τους να βρίσκεται συγκεντρωμένο στα κατώτερα τμήματα της τροπόσφαιρας (οριακό στρώμα), δηλαδή κοντά στις πηγές προέλευσής τους (Πίνακας 1.1). Μπορούν, ωστόσο, να βρίσκονται και ψηλότερα στην ατμόσφαιρα (στρατόσφαιρα), αλλά με μικρότερες συγκεντρώσεις. Αν και η συνολική τους μάζα (τάξης  $10^{12}$  Tg, Textor and Kinne et al., 2006) είναι μικρή συγκρινόμενη με τη συνολική μάζα της ατμόσφαιρας (τάξης  $10^{18}$  Kg, Trenberth and Smith, 2005), τα αερολύματα είναι απαραίτητα για τη δημιουργία των νεφών, καθώς χρησιμεύουν ως *πυρήνες συμπύκνωσής τους (Cloud Condensation Nuclei, CCN)* και *πυρήνες πάγου τους (Ice Nuclei, IN)* (Merikanto et al., 2009; DeMott et al., 2010). Τα αερολύματα έχουν διάμετρο από μερικά nm έως μερικές δεκάδες  $\mu\text{m}$ . Το διάστημα παραμονής των αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα (residence time) ποικίλει, καθώς εξαρτάται από το υψόμετρο στο οποίο βρίσκονται. Κυμαίνεται μεταξύ λίγων ωρών και μερικών εβδομάδων στην τροπόσφαιρα, ενώ στην στρατόσφαιρα το διάστημα αυτό μπορεί να φθάσει και τα δύο χρόνια (Boucher et al., 2015). Τέλος, τα ατμοσφαιρικά αερολύματα που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα αποτελούν βασική αιτία μείωσης της ορατότητας σε πολλές περιοχές.

### 1.2 Κατηγοριοποίηση αερολυμάτων

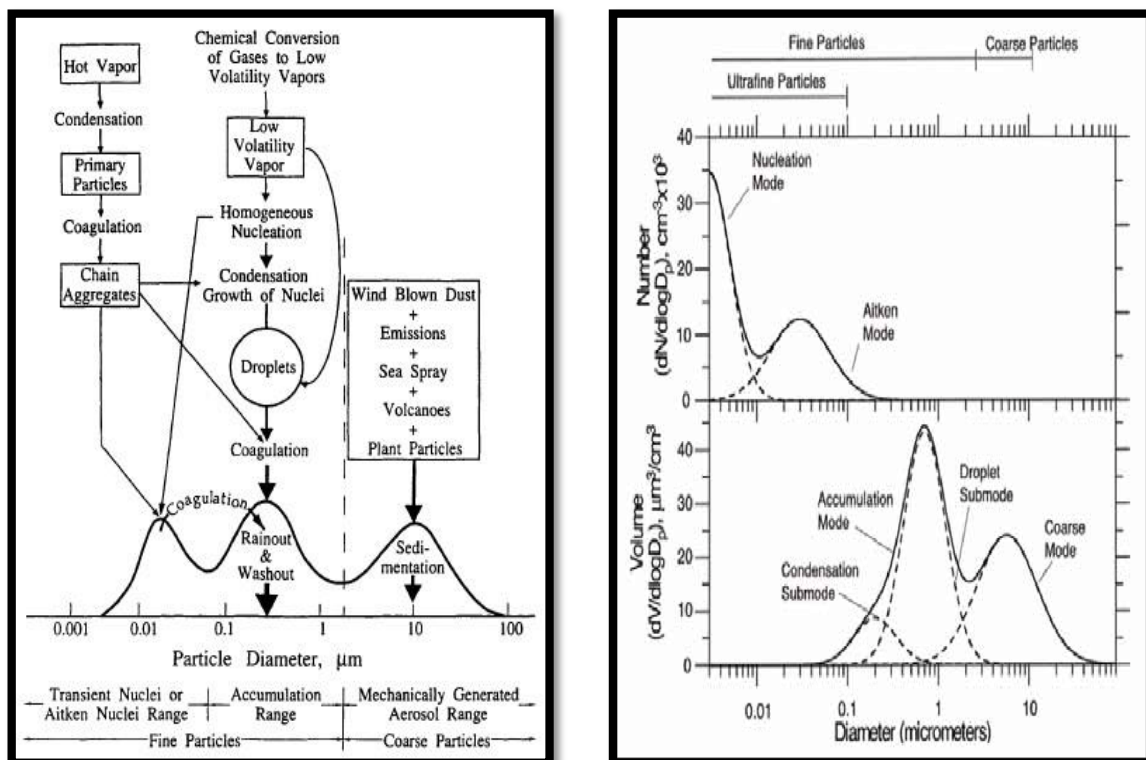
Η κατηγοριοποίηση των αερολυμάτων μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Μια βασική κατηγοριοποίηση των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων, η οποία γίνεται με βάση το μέγεθος της διαμέτρου τους ( $D_p$ ), τα ταξινομεί σε τρεις βασικές κατηγορίες (ή περιοχές ή τύπους), που είναι οι εξής (Whitby, 1978):

- **Περιοχή πυρήνωσης (nucleation mode):** Περιλαμβάνει τα σωματίδια με διάμετρο  $D_p < 0.1 \mu\text{m}$ , ενώ στη συγκεκριμένη κατηγορία υπάγονται και οι πυρήνες Aitken (Aitken nuclei), οι οποίοι είναι σωματίδια με διάμετρο  $0.005 \mu\text{m} < D_p < 0.1 \mu\text{m}$ .
- **Περιοχή συσσώρευσης (accumulation mode):** Περιλαμβάνει σωματίδια με διάμετρο  $0.1 \mu\text{m} < D_p < 2 \mu\text{m}$ .
- **Περιοχή χονδρόκοκκων σωματιδίων (coarse mode):** Περιλαμβάνει σωματίδια με  $D_p > 2 \mu\text{m}$  που σχηματίζονται από διάφορες μηχανικές διεργασίες.

**Πίνακας 1.1.** Εκτιμήσεις εκπομπών των βασικών αερολυμάτων σε παγκόσμιο επίπεδο ανά έτος (Πηγή: Seinfeld and Pandis, 2006).

Source	Estimated Flux, Tg yr <sup>-1</sup>	Reference
<b>Natural</b>		
<b>Primary</b>		
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	10,100	Gong et al. (2002)
Volcanic dust	30	Kiehl and Rodhe (1995)
Biological debris	50	Kiehl and Rodhe (1995)
<b>Secondary</b>		
Sulfates from DMS	12.4	Liao et al. (2003)
Sulfates from volcanic SO <sub>2</sub>	20	Kiehl and Rodhe (1995)
Organic aerosol from biogenic VOC	11.2	Chung and Seinfeld (2002)
<b>Anthropogenic</b>		
<b>Primary</b>		
Industrial dust (except black carbon)	100	Kiehl and Rodhe (1995)
Black carbon	12 <sup>a</sup>	Lioussé et al. (1996)
Organic aerosol	81 <sup>a</sup>	Lioussé et al. (1996)
<b>Secondary</b>		
Sulfates from SO <sub>2</sub>	48.6 <sup>b</sup>	Liao et al. (2003)
Nitrates from NO <sub>x</sub>	21.3 <sup>c</sup>	Liao et al. (2004)

<sup>a</sup>Tg C.  
<sup>b</sup>Tg S.  
<sup>c</sup>Tg NO<sub>3</sub>.



**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).

Μια περαιτέρω κατηγοριοποίηση, πάλι με βάση το μέγεθος των αερολυμάτων, είναι αυτή που τα διακρίνει σε *λεπτά (fine)*, με διάμετρο  $D_p < 2.5 \mu\text{m}$  και *αδρά ή χονδρόκοκκα (coarse)*, με διάμετρο  $D_p > 2.5 \mu\text{m}$ , όπως φαίνεται και στο παραπάνω Σχήμα 1.1. Τα χονδρόκοκκα αερολύματα παράγονται συνήθως με μηχανικές διεργασίες και έχουν μικρό χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα, αφού λόγω της βαρυτικής δύναμης κατακρημνίζονται σχετικά γρήγορα.

Ένας τρίτος τρόπος κατηγοριοποίησης των αερολυμάτων βασίζεται στον τρόπο με τον οποίο σχηματίζονται και τα διακρίνει σε *βιογενή* (φυσικά), που παράγονται μέσω φυσικών διεργασιών και σε *ανθρωπογενή*, που παράγονται με ανθρώπινες διεργασίες. Τα βιογενή αερολύματα αποτελούνται από τμήματα φυτών, οργανική ύλη και μικροβιακά σωματίδια, ενώ εξαιτίας διαφορετικών πηγών και διαδικασιών προέλευσης οι διαστάσεις τους κυμαίνονται από μερικές δεκάδες nm έως μερικές δεκάδες  $\mu\text{m}$ . Αναλυτικότερα, η βιογενής σωματιδιακή ύλη περιλαμβάνει γύρη, σπόρους και υπολείμματα φυτών και ζώων, βακτήρια, φύκη, πρωτόζωα, και μύκητες. Οι αριθμητικές συγκεντρώσεις τους κυμαίνονται μεταξύ κάποιων δεκάδων και εκατοντάδων σωματιδίων ανά κυβικό εκατοστό ( $\text{cm}^3$ ).

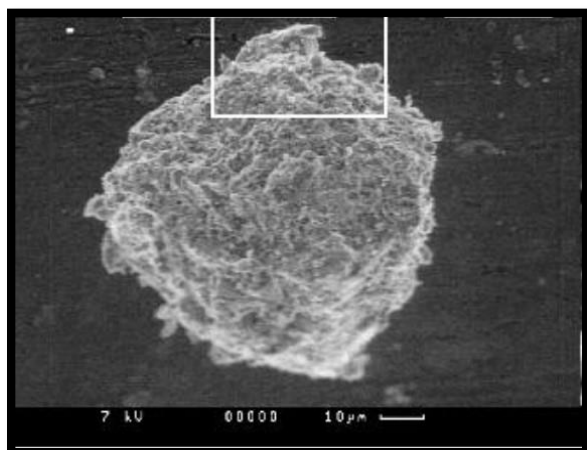
Ακόμη, ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα, τα αερολύματα ταξινομούνται στα *πρωτογενή (primary)* και τα *δευτερογενή (secondary)*. Με τον όρο πρωτογενή αναφερόμαστε στα αερολύματα που εκπέμπονται απευθείας από τις πηγές τους μέσα στην ατμόσφαιρα (όπως καύση βιομάζας, ατελής καύση ορυκτών καυσίμων, ηφαιστειακές εκρήξεις, μεταφορά ερημικής σκόνης και θαλασσίου άλατος κλπ.), ενώ τα δευτερογενή δεν εκπέμπονται άμεσα στην ατμόσφαιρα, αλλά προκύπτουν σαν αποτέλεσμα διαφόρων χημικών αντιδράσεων μετατροπής αερίων σε σωματίδια (gas-to-particle conversion) και μετασχηματισμών τους από πρόδρομες αέριες ενώσεις (precursor gases). Ο σχηματισμός των δευτερογενών αερολυμάτων γίνεται αρχικά με την οξείδωση δρώντων οργανικών αερίων ή ενώσεων. Αρχικά, πραγματοποιείται οξείδωση είτε αέριας είτε υγρής φάσης πτητικών οργανικών πρόδρομων αερίων ενώσεων (Volatile Organic Compounds, VOCs) με αποτέλεσμα το σχηματισμό ημι-πτητικού οργανικού άνθρακα, ο οποίος στη συνέχεια μέσω της διαδικασίας της συμπύκνωσης (condensation), της απορρόφησης (absorption) και της προσρόφησης (adsorption) έχουμε τη δημιουργία των αερολυμάτων. Οι πτητικές ενώσεις εκπέμπονται τόσο από θαλάσσιες και χερσαίες πηγές, όσο και από ανθρωπογενείς. Οι σημαντικότερες ανθρωπογενείς πτητικές ενώσεις που μπορούν να αναπαράγουν δευτερογενή αερολύματα είναι οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες (τολουόλιο, ξυλόλιο).

Στη συνέχεια, παρέχεται σύντομη περιγραφή των κυριότερων τύπων αερολυμάτων που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα της Γης.

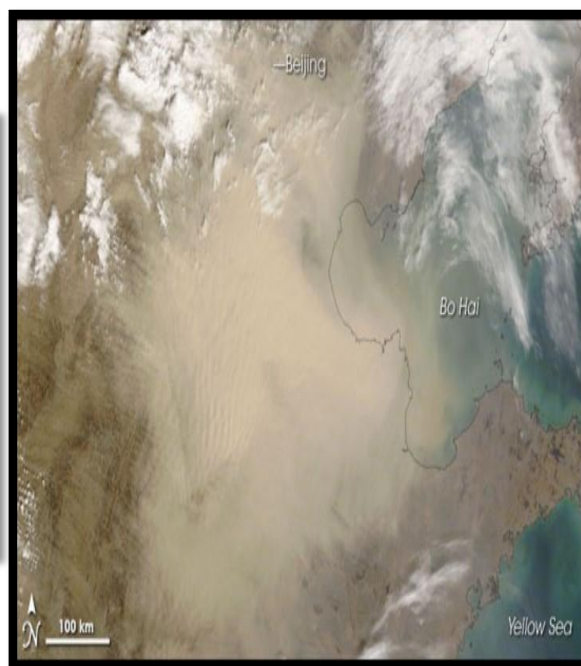
### 1.2.1 Αερολύματα σκόνης (Dust aerosols)

Το *ατμοσφαιρικό ορυκτό αερόλυμα*, γνωστό και ως *ορυκτή σκόνη (mineral dust)*, ή απλά σκόνη, παίζει σημαντικό ρόλο στο σύστημα Γης-Ατμόσφαιρας, επηρεάζοντας το ενεργειακό ισοζύγιο ακτινοβολίας, τον υδρολογικό και βιοχημικό κύκλο, τα χερσαία και ωκεάνια οικοσυστήματα και φυσικά την ανθρώπινη υγεία (Sokolik, 2015). Τα σωματίδια που προέρχονται από τις ξηρές ή ημίξηρες (ερημικές) περιοχές του πλανήτη, οι οποίες καλύπτουν περίπου το 1/3 της χερσαίας έκτασης της Γης, χαρακτηρίζονται ως *ατμοσφαιρικά ερημικά αερολύματα (dust aerosols)* και αποτελούν τον κυρίαρχο τύπο αερολυμάτων σε πλανητική κλίμακα από απόψεως φορτίου μάζας (Sokolik, 2015). Οι κυριότερες πηγές ερημικής σκόνης, βρίσκονται ως επί το πλείστον στο Βόρειο Ημισφαίριο, με την κύρια περιοχή να είναι η έρημος Σαχάρα στη βόρεια Αφρική. Άλλες σημαντικές ερημικές περιοχές είναι η Αραβική Χερσόνησος, οι Έρημοι Τακλαμακάν και Γκόμπι στην Ασία (αποτελώντας τη δεύτερη μεγαλύτερη πηγή ερημικής σκόνης στον κόσμο, Chen et al., 2017), περιοχές στη βορειοδυτική Ινδία, η Έρημος Ατακάμα στη Νότια Αμερική, στη Νότια Αφρική η Έρημος Καλαχάρι, καθώς και ερημικές περιοχές στην Αυστραλία. Αν και υπάρχουν διάφορες ομοιότητες μεταξύ των ξηρών και των ημίξηρων περιοχών, οι ενεργές πηγές σκόνης παρουσιάζουν σημαντική χωρική μεταβλητότητα και διαφέρουν ως προς την ισχύ εκπομπής σκόνης. Μέχρι σήμερα, δεν υπάρχει γενική θεωρία που να εξηγεί την αιτία που ορισμένες περιοχές είναι περισσότερο ενεργές στο να εκπέμπουν αερολύματα σκόνης, έναντι άλλων περιοχών (Sokolik, 2015).

Τα αερολύματα ερημικής σκόνης κατατάσσονται στην κατηγορία των απορροφητικών (τιμές δείκτη αερολυμάτων  $\geq 1$ ) και χονδρόκοκκων σωματιδίων, των οποίων το μεγαλύτερο ποσοστό έχει ακτίνα κυμαινόμενη από 1 έως 5  $\mu\text{m}$  (Tanré et al., 2001). 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. Οπότε, τα αερολύματα σκόνης παρά τη χαμηλή τους υγροσκοπικότητα (παράγοντας υγροσκοπικότητας, hygroscopicity parameter,  $0.01 < \kappa < 0.08$ , Koehler et al., 2009) μπορούν να δρουν ως CCN σε συνθήκες υποκορεσμού. Οι πηγές των αερολυμάτων σκόνης είναι κυρίως φυσικές, αλλά έχει βρεθεί ότι ένα μικρό ποσοστό της τάξης του 10% προέρχεται από αστικές περιοχές (Tegen et al., 2004). Τα αερολύματα αυτά όταν επικρατούν κατάλληλες μετεωρολογικές συνθήκες μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις από τις πηγές προέλευσής τους. Ο ρυθμός εκπομπής τους, εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα του ανέμου και από τα εδαφικά χαρακτηριστικά (είδος ορυκτής σκόνης, υγρασία εδάφους, κάλυψη/τύπος βλάστησης). Εκτός, από τη χωρική μεταβλητότητα, οι μεταβολές του φορτίου των ερημικών αερολυμάτων, σε διάφορες χρονικές κλίμακες, οφείλονται στις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες.



(α)



(β)

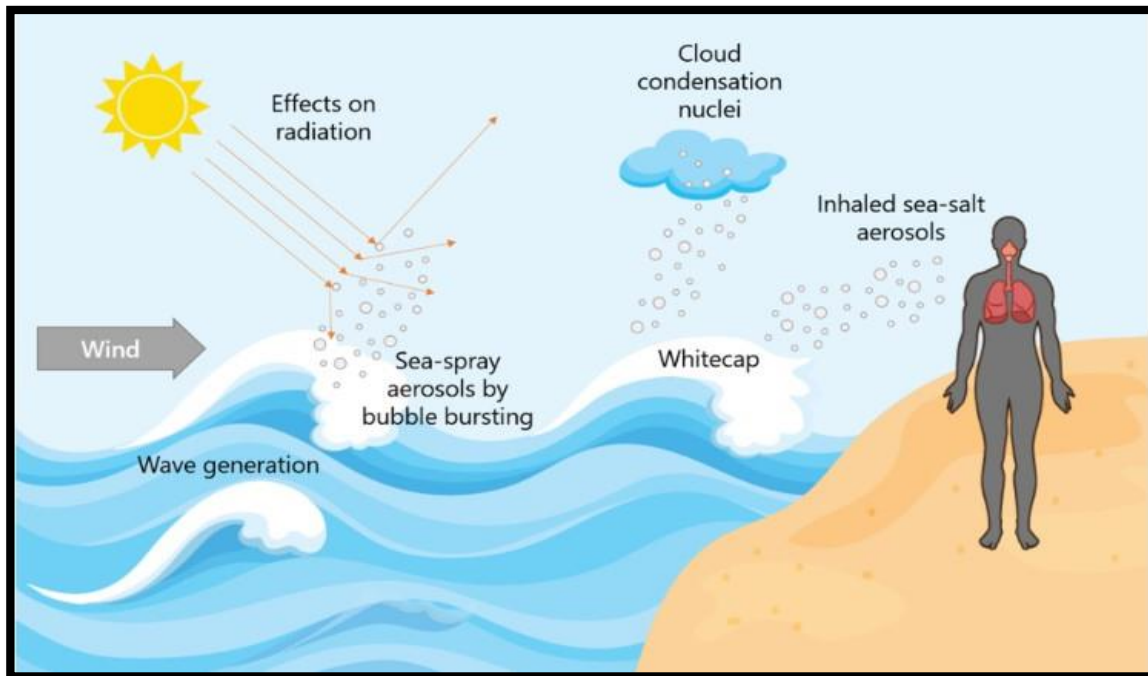
**Σχήμα 1.2.** (α) Αερόλυμα ερημικής σκόνης, όπως φαίνεται από μικροσκόπιο ηλεκτρονίων και (β) Επεισόδιο μεταφοράς ερημικής σκόνης στην Ανατολική Ασία την 1<sup>η</sup> Μαρτίου 2008. (Πηγή: McCall et al., NASA)

### 1.2.2 Θαλάσσια αερολύματα (Sea salt aerosols)

Τα αερολύματα που διοχετεύονται στην ατμόσφαιρα εξαιτίας της επίδρασης του ανέμου στην επιφάνεια της θάλασσας προκαλώντας κυματισμό, χαρακτηρίζονται ως **θαλάσσια αερολύματα**. Τα εν λόγω αερολύματα αποτελούνται συνήθως από χλωριούχο νάτριο (NaCl), ενώ είναι ο κυρίαρχος τύπος αερολυμάτων πάνω από απομακρυσμένες θαλάσσιες περιοχές (Lewis and Schwartz, 2004). Τα αερολύματα θαλάσσιου άλατος, ένα από τα πιο άφθονα είδη αερολυμάτων στους παγκόσμιους ωκεανούς, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο για το κλίμα της Γης (Chen et al., 2020). Τα θαλάσσια αερολύματα ποικίλουν σε μέγεθος και αποτελούνται από σωματίδια της περιοχής των πυρήνων Aitken ( $D_p < 0.1 \mu\text{m}$ ), της περιοχής συσσωματώματος ( $0.1 \mu\text{m} < D_p < 1.0 \mu\text{m}$ ) και των αδρών σωματιδίων ( $D_p > 0.1 \mu\text{m}$ ).

Κύρια χαρακτηριστικά τους αποτελούν οι μικρές τιμές οπτικού βάθους (εξαιτίας της μικρής τους αριθμητικής συγκέντρωσης) και οι υψηλές τιμές του συντελεστή λευκαύγειας μεμονωμένης σκέδασης (single scattering albedo). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα σωματίδια αυτά να απορροφούν ελάχιστα ποσά ακτινοβολίας και να είναι εξαιρετικά σκεδάζοντα. Επίσης, ο παράγοντας ασυμμετρίας (asymmetry parameter) για τα θαλάσσια αερολύματα έχει μεγάλες τιμές, υποδηλώνοντας την επικράτηση της εμπρόσθιας σκέδασης (forward scattering) της ακτινοβολίας, γεγονός που οφείλεται στο μεγάλο μέγεθός τους. Ο ρυθμός παραγωγής των θαλασσιών αερολυμάτων είναι ισχυρά εξαρτώμενος από την ταχύτητα του ανέμου και είναι ιδιαίτερα αυξημένος για ταχύτητες μεγαλύτερες από 9 m/s (Prijith et al., 2014).

Γενικά, τα θαλάσσια αερολύματα αποτελούν ένα από τους κύριους τύπους αιωρούμενων σωματιδίων που δρουν ως πυρήνες συμπύκνωσης (CCN), λόγω της χημικής τους σύστασης (είναι υδρόφιλα).



**Σχήμα 1.3.** Σχηματική απεικόνιση παραγωγής θαλασσίου άλατος, λόγω της αλληλεπίδρασης του ανέμου με τα επιφανειακά ύδατα της θάλασσας. Τα αερολύματα θαλασσίου άλατος επηρεάζουν με άμεσο και έμμεσο τρόπο το περιβάλλον και τον άνθρωπο (Πηγή: Varlas et al., 2021).

### 1.2.3 Αερολύματα καύσης βιομάζας (Biomass burning aerosols)

Η **καύση βιομάζας** αποτελεί μία από τις κυριότερες πηγές ατμοσφαιρικών αερολυμάτων, τα οποία παρουσιάζουν σημαντική γεωγραφική διακύμανση. Η καύση βιομάζας είναι ευρέως διαδεδομένη στις τροπικές περιοχές (Hatzianastassiou et al., 2019), κυρίως κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου. Κύριες πηγές προέλευσης των αερολυμάτων καύσης βιομάζας θεωρούνται οι πυρκαγιές που εκδηλώνονται σε μεγάλες δασικές εκτάσεις (π.χ. Αμαζονία στη Νότια Αμερική), οι καύσεις που εκδηλώνονται λόγω γεωργικών-κτηνοτροφικών δραστηριοτήτων και τέλος οι πυρκαγιές σε περιοχές σαβάνας (υπο-σαχάριες εκτάσεις). Τα αερολύματα καύσης βιομάζας παράγονται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες κυρίως κατά τους χειμερινούς μήνες για θέρμανση. Τα αερολύματα αυτά είναι λεπτόκοκκα με διάμετρο που κυμαίνεται μεταξύ  $d = 0.1-0.2 \mu\text{m}$  και αποτελούνται από μερικώς οξειδωμένη οργανική ύλη, αναμειγνύονται με το μαύρο άνθρακα (Black Carbon, BC) και είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά σε ό,τι αφορά στη σκέδαση και ιδιαίτερα την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο μαύρος άνθρακας είναι ισχυρός απορροφητής της ηλιακής ακτινοβολίας και η τιμή του παράγοντα Ångström είναι  $a = 1$ , όμως παρατηρήσεις δείχνουν ότι έχει εύρος τιμών 0.6-1.3 (Liu et al, 2018). Τα αερολύματα καύσης βιομάζας περιλαμβάνουν και τον καστανό



οργανικό (Brown Organic Carbon, BrOC), ο οποίος είναι λιγότερο απορροφητικός συγκριτικά με το μαύρο άνθρακα (Koch et al., 2009; Yang et al., 2015; Talukbar et al., 2019).

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 (π.χ. μαύρος άνθρακας), τα οποία θερμαίνουν το νέφος και οδηγούν στη διάλυση του. Το φαινόμενο αυτό έχει περιγραφεί στο Σχήμα Ε6 και ονομάζεται ημί-άμεση επίδραση (semi-direct effect, Johnson et al., 2004).

### 1.2.4 Ηφαιστειακά αερολύματα (Volcanic aerosols)

Τα **ηφαιστειακά αερολύματα** εισέρχονται στην ατμόσφαιρα εξαιτίας της ηφαιστειακής δραστηριότητας. Στη διάρκεια μιας έντονης ηφαιστειακής έκρηξης, εισέρχονται στην ατμόσφαιρα μεγάλα ποσά διοξειδίου του θείου ( $\text{SiO}_2$ ), οξειδίου του αργιλίου ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) και οξειδίου του σιδήρου ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), που στη συνέχεια με διάφορες χημικές διεργασίες μετατρέπονται σε θειικά άλατα. Οι ισχυρές ηφαιστειακές εκρήξεις (El Chichon-1982, Pinatubo-1991) αυξάνουν τις συγκεντρώσεις και των στρατοσφαιρικών αερολυμάτων. Εκεί, οι άνεμοι στη στρατόσφαιρα εξαπλώνουν τα αερολύματα μέχρι να καλύψουν ουσιαστικά την υδρόγειο, ενώ παραμένουν στη στρατόσφαιρα για περίπου δύο χρόνια. Αντίθετα, στα χαμηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας, λόγω του μεγάλου μεγέθους τους, απομακρύνονται γρήγορα (χρόνος παραμονής 1-2 μήνες) από την ατμόσφαιρα μέσω καθίζησης. Τα ηφαιστειακά αερολύματα παίζουν σημαντικό ρόλο στο ενεργειακό ισοζύγιο του συστήματος Γης-Ατμόσφαιρας, καθώς ανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία, μειώνοντας την ποσότητα της ενέργειας που φτάνει στην κατώτερη ατμόσφαιρα και την επιφάνεια της Γης, ψύχοντάς τες.

### 1.2.5 Νιτρικά και θειικά αερολύματα (Nitrite & sulfate aerosols)

Τα αερολύματα της συγκεκριμένης κατηγορίας, χαρακτηρίζονται ως δευτερογενή αερολύματα και παράγονται από την οξείδωση του διοξειδίου του θείου ( $\text{SO}_2$ ) και οξειδίων του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ), που προέρχονται από διαδικασίες καύσης βιομάζας και καύσης ορυκτών καυσίμων. Επίσης, τα θειικά αερολύματα παράγονται και μέσω συμπύκνωσης σε προϋπάρχοντα σωματίδια και αύξησης του μεγέθους τους. Είναι λεπτόκοκκα σκεδαστικά σωματίδια, ενώ είναι δυνατόν να προκύψουν τόσο από φυσικά όσο και από ανθρωπογενή αίτια. Η παραγωγή των θειικών αερολυμάτων από ανθρωπογενείς δραστηριότητες είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη από φυσικά αίτια, ενώ το αντίστροφο ισχύει για τα νιτρικά αερολύματα. Τα κυριότερα νιτρικά είναι:  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}_5$  και  $\text{NH}_3$ .

### 1.3 Οπτικές ιδιότητες των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων

Οι οπτικές ιδιότητες των αερολυμάτων εμφανίζονται ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εισέρχεται στην ατμόσφαιρα με τα αερολύματα και οι οποίες περιγράφουν ποιοτικά και ποσοτικά την αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο αυτών παραγόντων. Οι διαδικασίες της σκέδασης και της απορρόφησης της ακτινοβολίας είναι αυτές που δίνουν τον οπτικό ‘χαρακτήρα’ σε κάθε τύπο αιωρούμενων σωματιδίων. Οι οπτικές ιδιότητες μας δίνουν πληροφορίες για το φορτίο, το μέγεθος και τον τύπο τους. Παρουσιάζουν ισχυρή εξάρτηση από το μήκος κύματος, η οποία καθορίζεται κυρίως από το μέγεθος, τη σύστασή τους και τη σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας.

Η σκέδαση και η απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από ένα αερόλυμα εξαρτώνται τόσο από τις ιδιότητες της ακτινοβολίας, όσο και από τα χαρακτηριστικά του αερολύματος. Οι τρεις σημαντικότεροι παράμετροι είναι:

1. το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.
2. το μέγεθος του αερολύματος, το οποίο εκφράζεται με ένα αδιάστατο μέγεθος, την παράμετρο μεγέθους  $a$ . Αυτή ορίζεται ως η περίμετρος του σφαιρικού σωματιδίου προς το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας:

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

3. ο δείκτης διάθλασης  $N$  του αερολύματος είναι ένα μιγαδικό μέγεθος και χαρακτηρίζει τις οπτικές ιδιότητες του μέσου. Το πραγματικό μέρος του δείκτη διάθλασης έχει να κάνει με τη σκέδαση, ενώ το φανταστικό του μέρος σχετίζεται με το φαινόμενο της απορρόφησης της ακτινοβολίας. Και τα δύο μέρη εξαρτώνται από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας:

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

Οι κύριες οπτικές ιδιότητες των αερολυμάτων είναι το οπτικό βάθος των αερολυμάτων (*Aerosol Optical Depth, AOD*), ο εκθετικός παράγοντας Ångström (*Ångström Exponent, a*), ο δείκτης αερολυμάτων (*Aerosol Index, AI*), η αναλογία των λεπτόκκοκων προς το σύνολο των αιωρούμενων σωματιδίων (*Fine Fraction, FF*), η μέση ενεργός ακτίνα (*Effective Radius, ER*), ο συντελεστής λευκάγειας μεμονωμένης σκέδασης (*Single Scattering Albedo, SSA*) και ο παράγοντας ασυμμετρίας (*Asymmetry Factor, AF*). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το οπτικό βάθος (AOD), ο εκθετικός παράγοντας Ångström ( $a$ ) και ο δείκτης των αερολυμάτων (AI), οι ιδιότητες των οποίων αναλύονται παρακάτω.

### 1.3.1 Οπτικό βάθος αερολυμάτων (Aerosol Optical Depth, AOD)

Το *οπτικό βάθος (AOD)* είναι ένα αδιάστατο μέγεθος (με τιμές μεγαλύτερες του μηδενός) και αποτελεί ένα μέτρο των αερολυμάτων που περιέχονται σε μια κατακόρυφη στήλη της ατμόσφαιρας. Η συγκεκριμένη παράμετρος ποσοτικοποιεί τη συνολική εξασθένηση που υφίσταται η ηλιακή ακτινοβολία όταν διέρχεται από ένα στρώμα το οποίο περιέχει αερολύματα, λόγω σκέδασης και απορρόφησης. 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:

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

I: ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως υπολογίζεται στο έδαφος

I<sub>0</sub>: ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας πριν εισέλθει στη γήινη ατμόσφαιρα

λ: μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας

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

b: συντελεστής εξασθένησης των αερολυμάτων

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

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

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

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

Το οπτικό βάθος (AOD) είναι η σημαντικότερη ίσως ιδιότητα των αερολυμάτων, όπου δηλώνει το φορτίο τους στην ατμόσφαιρα και ταυτόχρονα εκφράζει ένα μέτρο της αέριας θόλωσης. Μεταβάλλεται φασματικά λόγω της εξάρτησής του συντελεστή εξασθένησης από το μήκος κύματος και λαμβάνει μικρότερες τιμές όταν το μήκος κύματος της ακτινοβολίας αυξάνεται. Θεωρείται ίσο με μηδέν στο ανώτατο σημείο της ατμόσφαιρας.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του AOD είναι ότι παρουσιάζει εποχική μεταβλητότητα, έχοντας γενικά μεγαλύτερες τιμές τη ξηρή περίοδο του έτους και μικρότερες τιμές κατά την υγρή περίοδο (π.χ. Papadimas et al., 2008; Hatzianastassiou et al., 2009). Μεταβλητότητα παρουσιάζει και ως προς τη χωρική κάλυψη, με τις μεγαλύτερες τιμές επικρατούν πάνω από ηπειρωτικές σε σχέση με θαλάσσιες περιοχές (Remer et al., 2008).

### 1.3.2 Δείκτης Αερολυμάτων (Aerosol Index, AI)

Ο δείκτης αερολυμάτων (AI) αποτελεί έναν ποιοτικό δείκτη, που υποδεικνύει την παρουσία αερολυμάτων με σημαντική απορρόφηση. Οι κύριοι τύποι απορροφητικών αερολυμάτων είναι η ερημική σκόνη, τα αερολύματα που προέρχονται από την καύση βιομάζας και τα ηφαιστειακά αερολύματα. Ένα πλεονέκτημα του δείκτη αερολυμάτων είναι ότι μπορεί να καθοριστεί για καθαρό ουρανό (clear sky) καθώς και (μερικώς) νεφελώδη ουρανό (partly cloudy). 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 αερολυμάτων βασίζεται σε αλλαγές που εξαρτώνται από το μήκος κύματος στη σκέδαση Rayleigh, στο φάσμα της υπεριώδους ακτινοβολίας (UV), όπου η απορρόφηση του όζοντος (O<sub>3</sub>) είναι πολύ μικρή. Ποσοτικοποιημένα, ο δείκτης αερολυμάτων (AI) υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$AI = 100 \log_{10} \left[ \frac{I_{360}^{Meas}}{I_{360}^{Calc}} \right] \quad (1.6)$$

όπου,  $I_{360}^{Meas}$  είναι η μετρούμενη ακτινοβολία από το ραδιόμετρο TOMS (Total Ozone Mapping Spectroradiometer), υπό πραγματικές συνθήκες και  $I_{360}^{Calc}$  είναι η θεωρητικά υπολογισμένη (ανακτημένη με θεωρητικό μοντέλο) ακτινοβολία, για ατμόσφαιρα στην οποία επικρατεί σκέδαση Rayleigh, στο ίδιο μήκος κύματος. Παρόμοιο μήκος κύματος χρησιμοποιεί και το ραδιόμετρο OMI (Ozone Monitoring Instrument), ενώ το TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) χρησιμοποιεί το ζεύγος μηκών κύματος στη φασματική ζώνη 3: 340/380 nm.

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).

### 1.3.3 Εκθετικός παράγοντας Ångström (Ångström Exponent, $\alpha$ )

Ο εκθετικός παράγοντας Ångström ( $\alpha$ ) είναι χρήσιμος για το διαχωρισμό του μεγέθους των διαφόρων αερολυμάτων σε μικρού μεγέθους (λεπτής υφής, *fine mode*) και σε μεγάλου μεγέθους (χονδρής υφής, *coarse mode*) σωματίδια, καθώς θεωρείται συγκεκριμένη ιδιότητα κάθε αερολύματος. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, όταν ο εκθετικός παράγοντας Ångström λαμβάνει τιμές  $\alpha < 1$  (Holben et al., 2001) τα αερολύματα είναι μεγάλου μεγέθους (π.χ. ερημική σκόνη). Για τιμές  $\alpha > 1$  (Dubovik et al., 2000; Gkikas et al., 2015) έχουμε την παρουσία λεπτόκκοκων σωματιδίων (π.χ. ανθρακούχα αερολύματα).

Ποσοτικοποιείται από τη σχέση:

$$b_e \approx \lambda^{-\alpha} \quad (1.7)$$

$b_e$ : συντελεστής απόσβεσης

$\alpha$ : παράγοντας Ångström

$\lambda$ : μήκος κύματος

Υπολογίζεται από τις τιμές του συντελεστή εξασθένησης για δύο συγκεκριμένα μήκη κύματος  $\lambda_1$  και  $\lambda_2$  και περιγράφεται μαθηματικά από τη σχέση:

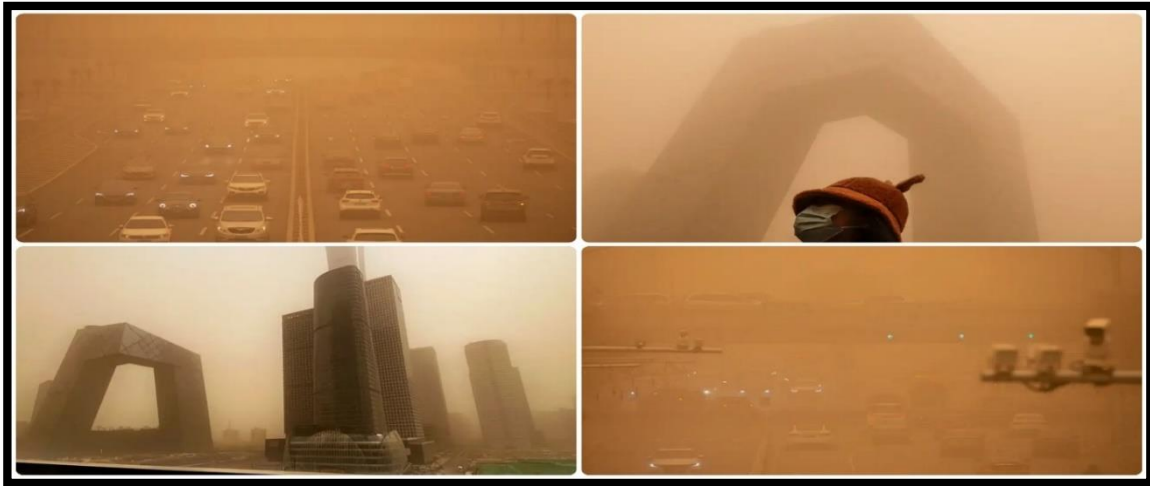
$$\alpha = - \frac{d \log b_e}{d \log \lambda} \approx \frac{\log \frac{b_{e1}}{b_{e2}}}{\log \frac{\lambda_1}{\lambda_2}} \quad (1.8)$$

#### 1.4 Επιπτώσεις αερολυμάτων

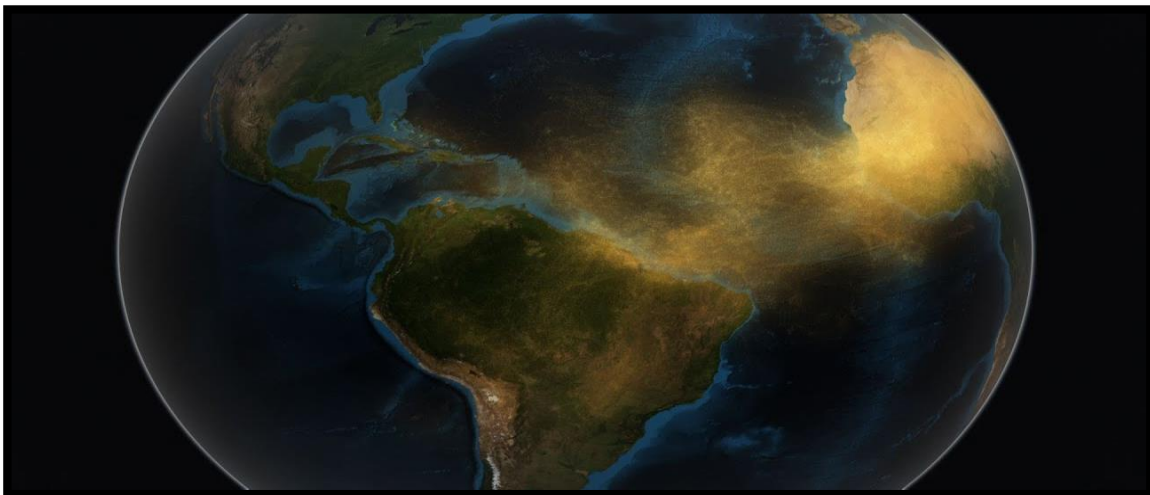
Τα ατμοσφαιρικά αερολύματα μελετώνται εκτενώς τις τελευταίες δεκαετίες σε όλο τον κόσμο, επειδή σχετίζονται άμεσα με την κλιματική αλλαγή, την ανθρώπινη υγεία, το χρόνο ζωής των πολιτιστικών μνημείων, τη βιοποικιλότητα, την ορατότητα κ.ά. Πολλές επιστημονικές μελέτες έχουν δείξει ότι τα αερολύματα μπορούν να έχουν επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό (Kennedy, 2007; Mauderly, 2008; Fussel, 2021). Οι επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία λόγω της εναπόθεσης των αερολυμάτων στο αναπνευστικό σύστημα, εκτός από τις κλασικές παραμέτρους που είναι η συγκέντρωση του ρύπου και ο χρόνος έκθεσης, εξαρτώνται επίσης 1) από το μέγεθός τους, 2) τη χημική τους σύσταση, 3) τις φυσικές και χημικές τους ιδιότητες και 4) την περιοχή εναπόθεσης στο αναπνευστικό σύστημα. Τα αερολύματα προκαλούν άμεσες και χρόνιες επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό, όπως βλάβες στο αναπνευστικό σύστημα (βρογχίτιδα, πνευμονία) και επιδείνωση χρόνιων αποφρακτικών νόσων, καρδιακά προβλήματα, εξασθένηση των φυσικών λειτουργιών του οργανισμού, οξειδωτικό στρες, φλεγμονές στους πνεύμονες, θρομβώσεις στο αίμα και μερικά ακόμα ανεπιθύμητα προβλήματα.

Τα αερολύματα επιδρούν στην ορατότητα, δηλαδή το μέτρο της απόστασης στην οποία ένα αντικείμενο ή ένα φως μπορεί να διακριθεί καθαρά, αποτελώντας την κυριότερη αιτία μείωσης της ορατότητας στις αστικές και βιομηχανικές περιοχές. Ειδικότερα, για τα αερολύματα σκόνης, όταν έχουμε ακραία επεισόδια μεταφοράς ερημικής σκόνης η ορατότητα μπορεί να πέσει σε μερικές δεκάδες μέτρα (Σχήμα 1.5). Επίσης, παίζουν σημαντικό ρόλο στον κύκλο του νερού, δρώντας σαν πυρήνες συμπύκνωσης (CCN) στο σχηματισμό των υδροσταγόνων. Μέσω της απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας θερμαίνουν τα κατώτερα ατμοσφαιρικά στρώματα, όπου η συγκέντρωσή τους είναι μεγαλύτερη, συμβάλλοντας έτσι στην τροποποίηση της θερμοβαθμίδας και κατά συνέπεια στη στρωμάτωση της ατμόσφαιρας.

Τα αερολύματα συνεισφέρουν σημαντικά στις ετερογενείς χημικές αντιδράσεις της ατμόσφαιρας και κυρίως στη στρατόσφαιρα, όπου ο χρόνος παραμονής τους είναι μεγαλύτερος, συμβάλλοντας μέσω των χημικών αντιδράσεων στη μείωση της στοιβάδας του στρατοσφαιρικού όζοντος ( $O_3$ ). Η μεταφορά τους μπορεί να προκαλέσει αλλαγή του pH και των θρεπτικών υλικών των ποταμών και λιμνών και καταστροφή ευαίσθητων δασικών συστημάτων και καλλιεργειών. Ακόμη, τα ατμοσφαιρικά αερολύματα συμβάλλουν στη μεταφορά μη-πτητικών συστατικών από μια περιοχή σε άλλη. Για παράδειγμα, κάθε χρόνο μεταφέρονται από την Έρημο Σαχάρα τεράστιες ποσότητες ερημικής σκόνης (Σχήμα 1.6) που περιέχουν διάφορες ευεργετικές ενώσεις (π.χ. φώσφορος, μεταλλικά στοιχεία) στο δάσος του Αμαζονίου (που αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς πνεύμονες οξυγόνου της Γης), βοηθώντας στη λίπανσή του (Yu et al., 2015). Αν μειωθούν οι ποσότητες του φωσφόρου, αυτό θα μπορούσε να έχει καταστροφικές συνέπειες για τα είδη που κατοικούν στο τροπικό δάσος, καθώς επαρκή επίπεδα θρεπτικών συστατικών είναι κρίσιμα για την υποστήριξη της βιοποικιλότητας του Αμαζονίου (Sanchez et al., 1989).



**Σχήμα 1.4.** Επεισόδιο μεταφοράς ερημικής σκόνης στην πρωτεύουσα της Κίνας το Πεκίνο (15 Μαρτίου 2021) (Πηγή: weather.com)



**Σχήμα 1.5.** Επεισόδιο μεταφοράς ερημικής σκόνης από την έρημο Σαχάρα στον Αμαζόνιο (Πηγή: NASA).

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>Ο</sup>

## Μεθοδολογία – Δεδομένα - Περιοχή Μελέτης

### 2.1 Ορισμός επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης (Dust Aerosol Episodes)

Για να προσδιορίσει κάποιος τα *επεισόδια αερολυμάτων (dust aerosol episodes, DAEs)* σε παγκόσμιο ή τοπικό επίπεδο, θα πρέπει να ορίσει συγκεκριμένες τιμές ως *όρια αποκοπής (threshold levels)*. Στη διεθνή βιβλιογραφία δεν υπάρχει μια τυποποιημένη μεθοδολογία για τον ακριβή προσδιορισμό των επεισοδίων, πέραν του παραπάνω τρόπου. Τα παραπάνω όρια προέρχονται κυρίως από κλιματολογικές αναλύσεις και αναφέρονται είτε σε μια παράμετρο είτε σε συνδυασμό αυτών. Συνήθως, εφαρμόζονται είτε για φυσικές ιδιότητες αερολυμάτων (π.χ. συγκέντρωση φορτίου) είτε για οπτικές τους ιδιότητες (π.χ. οπτικό βάθος αερολυμάτων). Στις περιπτώσεις για τις οποίες οι τιμές συγκέντρωσης του φορτίου των σωματιδίων υπερβαίνουν τα όρια αποκοπής, δηλαδή παρατηρούνται ασυνήθιστα υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων, είτε σε ένα/μία συγκεκριμένο σημείο/περιοχή, είτε σε μια εκτεταμένη γεωγραφική περιοχή χαρακτηρίζονται ως επεισόδια. Πιο συγκεκριμένα, είναι η περίπτωση εκείνη κατά την οποία καταγράφεται μεγάλο φορτίο αερολυμάτων, είτε τοπικά παραγόμενο είτε μεταφερόμενο από απομακρυσμένες περιοχές, προκαλώντας υπέρβαση των μέσων τιμών συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων, στη συγκεκριμένη περιοχή. Το φορτίο των αερολυμάτων κατά τις περιπτώσεις αυτές καθορίζεται κυρίως από το ρυθμό παραγωγής τους και από τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες. Στη δική μας περίπτωση που μελετάμε επεισόδια μεταφοράς ερημικής σκόνης, αυτά μπορεί να είναι εκτεταμένα, ενώ αντίθετα τα επεισόδια αστικής ρύπανσης είναι τοπικά περιορισμένα.

Τα επεισόδια αερολυμάτων έχουν αποτελέσει έως σήμερα αντικείμενο μελέτης αρκετών ερευνητών, οι οποίοι βασίστηκαν i) σε επίγειες μετρήσεις ii) σε δορυφορικές μετρήσεις iii) σε αριθμητικά μοντέλα και iv) σε συνδυασμό των προηγούμενων για ολόκληρο τον πλανήτη ή για διάφορες περιοχές. Πιο συγκεκριμένα, για την περιοχή της Ασίας έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες για επεισόδια μεταφοράς ερημικής σκόνης ή πως η μεταφορά σκόνης επηρεάζει τις τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες (π.χ. βροχόπτωση) από δορυφορικές ή επίγειες μετρήσεις και με διάφορες μεθόδους, σε εκτεταμένη γεωγραφική κάλυψη (Darmenova et al., 2005; Zhao et al., 2005; Prospero et al., 2008; Dey & Girolamo, 2010; Kang et al., 2016; Xi and Sokolik, 2016; An et al., 2018; Yu et al., 2019; Yao et al., 2021; Zhang et al., 2021; Filonchuk, 2022; Tao et al., 2022) ή και σε περιοχικό επίπεδο (Dey et al., 2004; Lim and Chun, 2006; Wang et al., 2008; Indoitu et al., 2012; Prijith et al., 2013; Pandey et al., 2017; Ramaswamy et al., 2017; Wang et al., 2018; Nan and Wang, 2018; Rashki and Kaskaoutis, 2019; Bao et al., 2021; Karami et al., 2021; Nobakht et al., 2021; Liu et al., 2021; Yang et al., 2021).

## 2.2 Μεθοδολογία - Περιγραφή αλγορίθμου για τον προσδιορισμό των επεισοδίων

Η παρούσα εργασία ασχολείται σε πρώτο στάδιο με την ανεύρεση/ανίχνευση και ταυτοποίηση αερολυμάτων ερημικής σκόνης, τα οποία προέρχονται από φυσικές πηγές (ερημικές περιοχές) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας και της Κασπίας Θάλασσας για τη χρονική περίοδο 2005-2021. Κατά τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο εφαρμόστηκε το κριτήριο της ταυτόχρονης συνδυασμένης διαθεσιμότητας των δεδομένων MODIS και OMI. Όπως, έχει ήδη εξηγηθεί (Παράγραφος 1.2.1), τα αερολύματα αυτά εντάσσονται στην κατηγορία των α) χονδρόκοκκων και β) απορροφητικών αερολυμάτων, δύο κύρια χαρακτηριστικά που τα διαφοροποιούν έναντι των υπολοίπων αερολυμάτων, που διαθέτουν μία ή και καμία από τις δύο αυτές ιδιότητες. Οπότε, στη συγκεκριμένη δυνατότητα ανίχνευσης τους βασίζεται και η λογική του δορυφορικού αλγορίθμου, ο οποίος θα μπορεί βασισμένος σε σύγχρονα δορυφορικά προϊόντα και ιδιότητες/δεδομένα που αναφέρονται στις παραπάνω δύο φυσικές ιδιότητες (μέγεθος/διάσταση και απορροφητικότητα) να ανιχνεύει και να ταυτοποιεί τα αερολύματα 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 μέγεθος την απορροφητικότητα των αερολυμάτων αυτών:

- i. Το (φασματικό) οπτικό βάθος αερολυμάτων (AOD)
- ii. Το δείκτη (απορρόφησης) των αερολυμάτων (AI)
- iii. Τον εκθετικό παράγοντα Ångström ( $\alpha$ )

Επισημαίνεται, ότι για να λειτουργήσει ο αλγόριθμος χρειάζεται την ταυτόχρονη ύπαρξη (διαθεσιμότητα) των δεδομένων εισαγωγής και για τις δύο παραμέτρους, δηλαδή του παράγοντα Ångström ( $\alpha$ ) 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. Οι δύο πρώτες ιδιότητες (AOD και AI) παρέχονται άμεσα από τις βάσεις δεδομένων MODIS και OMI αντίστοιχα, ενώ ο εκθετικός παράγοντας Ångström ( $\alpha$ ) υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση 1.8, από το λόγο των τιμών του οπτικού βάθους στα 470 nm και στα 660 nm πάνω από ξηρά, ενώ για πάνω από τους ωκεανούς χρησιμοποιήθηκαν τα μήκη κύματος 470 nm και 2130 nm.

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 τη ξηρά. 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 εξάγει την εξασθένιση και απορρόφηση των αερολυμάτων. Οι παραπάνω εκδόσεις (MODIS C6.1-OMAERUV) είναι και οι νεότερες.



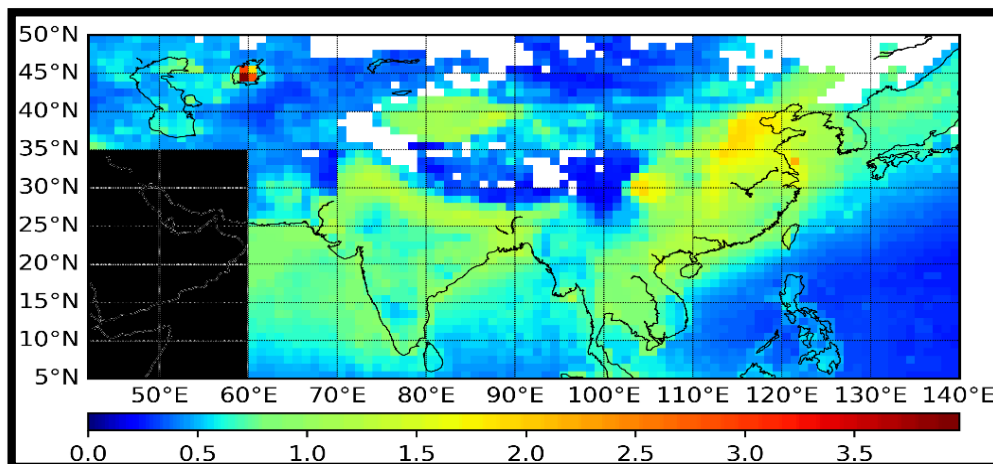
Ο αλγόριθμος έχει αναπτυχθεί με τη φιλοσοφία ότι για να υπάρχουν αερολύματα σκόνης σε μια μοναδιαία κυψελίδα (pixel), θα πρέπει οι τιμές του  $\alpha$  και του AI να κυμαίνονται εντός συγκεκριμένων ορίων, τα οποία εξασφαλίζουν την παρουσία χονδρόκοκκων και απορροφητικών αερολυμάτων. Τα όρια αυτά ονομάζονται *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 ( $\alpha$ ) άνω όριο την τιμή 0.7 και για το δείκτη των αερολυμάτων (AI) την τιμή 1 σαν κάτω όριο. Στο συγκεκριμένο αλγόριθμο χρησιμοποιούνται τα εξής threshold values, τα οποία θα πρέπει να τηρούνται ταυτόχρονα, ώστε το αερόλυμα να είναι ερημική σκόνη:

- 1)  $AI > 1$
- 2)  $\alpha \leq 0.4$

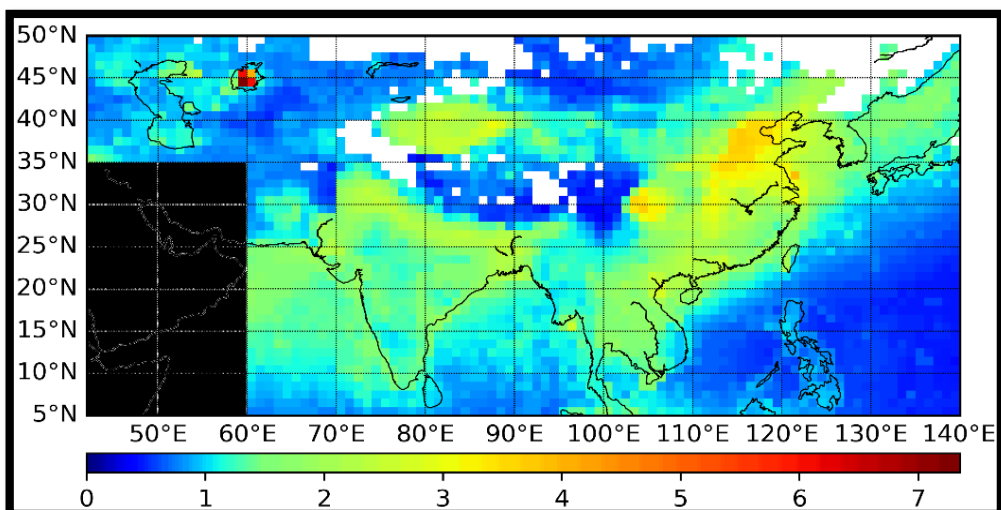
Επόμενο στάδιο στον αλγόριθμο είναι ο εντοπισμός των *επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης* (DAEs) και η ταξινόμησή τους ανάλογα με την έντασή τους, σε *ισχυρά* (strong) ή *ακραία* (extreme). Και σε αυτό το στάδιο εφαρμόστηκαν επίπεδα αποκοπής (threshold values) με κύριο στόχο τον αντικειμενικό υπολογισμό τους και γνώμονα την αποφυγή ορισμού αυθαίρετων ορίων. Έτσι, χρησιμοποιήθηκε η *μέση τιμή* (mean value) και η *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 μεταβλητότητα 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 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) (Σχήμα 2.1) και τα ακραία (extreme) (Σχήμα 2.2). 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 (EDAЕ).



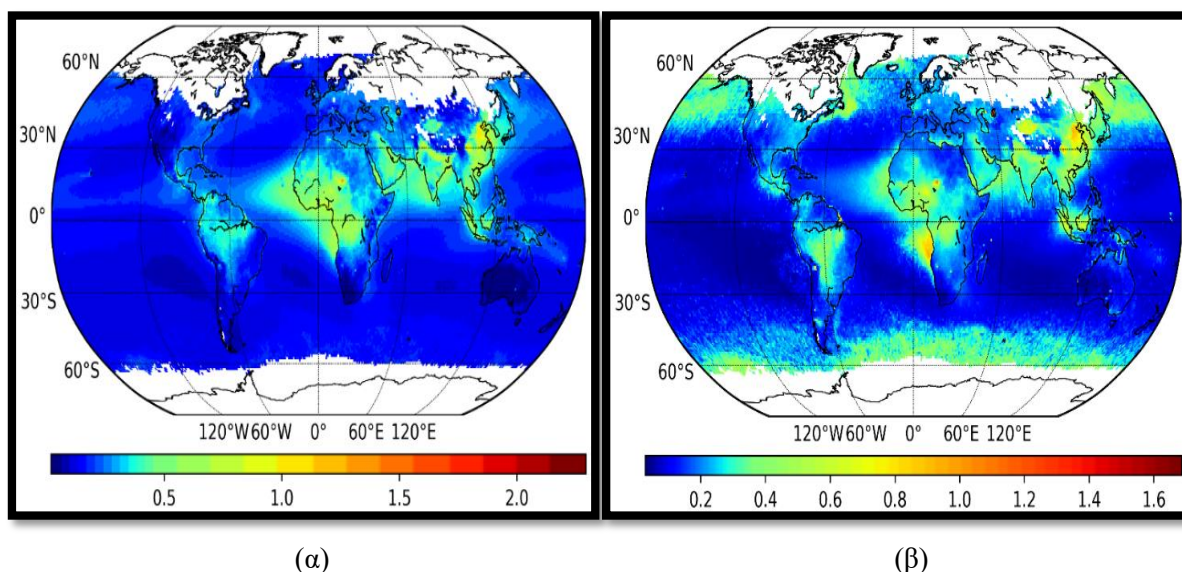
Σχήμα 2.1. Όρια αποκοπής (threshold values) για τα ισχυρά επεισόδια σκόνης (strong DAEs).



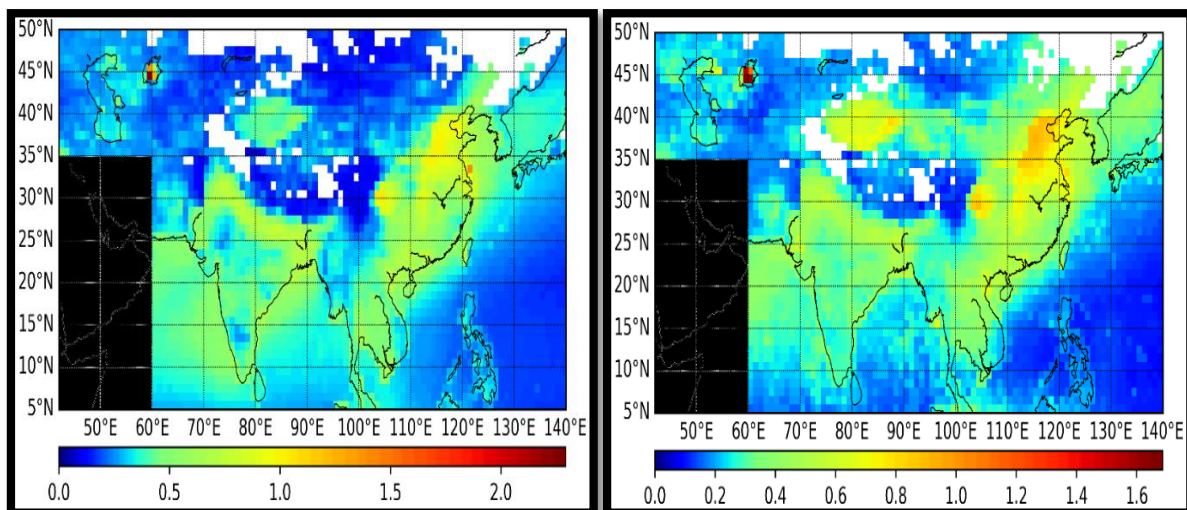
**Σχήμα 2.2.** Όρια αποκοπής (threshold values) για τα ακραία επεισόδια σκόνης (extreme DAEs).

Οι τιμές του  $i$  προσδιορίστηκαν κατόπιν βιβλιογραφικής έρευνας (Gkikas et al., 2013; Ganrouzou 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).

Η επιλογή του μήκους κύματος των 550 nm βασίζεται στο γεγονός ότι εκεί, περίπου, βρίσκεται η μέγιστη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, οπότε μεγιστοποιούνται και οι επιπτώσεις των επεισοδίων αερολυμάτων, ενώ τα 550 nm είναι και το μήκος κύματος που χρησιμοποιείται συνήθως στις δορυφορικές και στις επίγειες μετρήσεις. Η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση (Σχήμα 2.3α & 2.3β) υπολογίζονται για τη χρονική περίοδο 2005-2018, για κάθε γεωγραφική κυψελίδα σε πλανητικό επίπεδο αλλά και την ευρύτερη περιοχή της Ασίας (Σχήμα 2.4α & 2.4β).



**Σχήμα 2.3.** α) Μέση τιμή οπτικού βάθους (AOD) στα 550 nm και β) τυπική απόκλιση (STDV) οπτικού βάθους στα 550 nm, σε πλανητικό επίπεδο για την περίοδο 2005-2018.



(α)

(β)

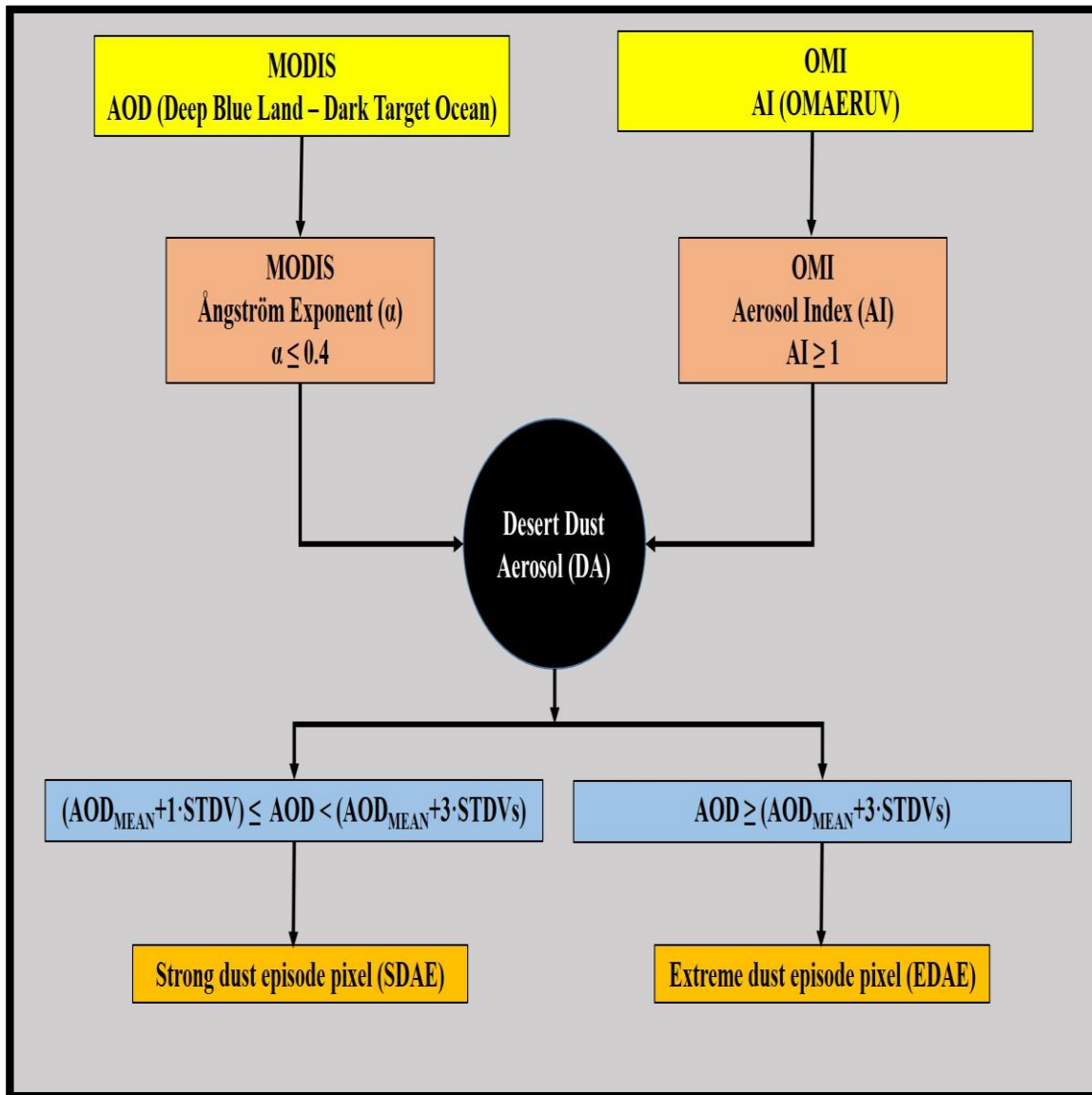
**Σχήμα 2.4.** α) Μέση τιμή οπτικού βάθους (AOD) στα 550 nm και β) τυπική απόκλιση (STDV) οπτικού βάθους στα 550 nm, για την περιοχή της Ασίας για την περίοδο 2005-2018.

Βάσει των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου, προσδιορίζονται η απόλυτη (absolute frequency,  $N_{abs}$ ) και η επί τοις εκατό σχετική (relative frequency,  $N_{rel\%}$ ) συχνότητα επεισοδίων ερημικής σκόνης σε κάθε κυψελίδα, σε μηνιαίο και σε ετήσιο επίπεδο. Ο υπολογισμός της σχετικής συχνότητας εμφάνισης γίνεται σε σχέση με το συνολικό αριθμό ημερών κάθε μήνα (ή έτους), και ορίζεται ως ο λόγος:

$$N_{rel\%} = \frac{N_{DAEs}}{N_{COUNT}} \times 100 \quad (2.2)$$

όπου  $N_{DAEs}$  είναι ο αριθμός των ημερών μήνα (έτους) για τις οποίες ανιχνεύεται επεισόδιο σκόνης και  $N_{COUNT}$  είναι ο αριθμός των ημερών του μήνα (έτους) για τις οποίες έτρεξε ο αλγόριθμος (υπήρχε ταυτόχρονη διαθεσιμότητα όλων των παραμέτρων εισόδου). Έτσι, προσδιορίζεται η χωρική (γεωγραφική) κατανομή και ο εποχικός κύκλος εμφάνισης των επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης στην περιοχή ενδιαφέροντος. Εκτός, από τη συχνότητα εμφάνισης (απόλυτη και σχετική) 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 μηνιαίες και ετήσιες τιμές του οπτικού βάθους της σκόνης, με αντίστοιχη μεσοποίηση των ημερησίων τιμών. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται και μελετάται η εποχική και γεωγραφική μεταβλητότητα του οπτικού βάθους των επεισοδίων σκόνης στην περιοχή μελέτης.

Η μεθοδολογία του αλγορίθμου συνοψίζεται και στο διάγραμμα ροής (flowchart) του παρακάτω Σχήματος 2.3.

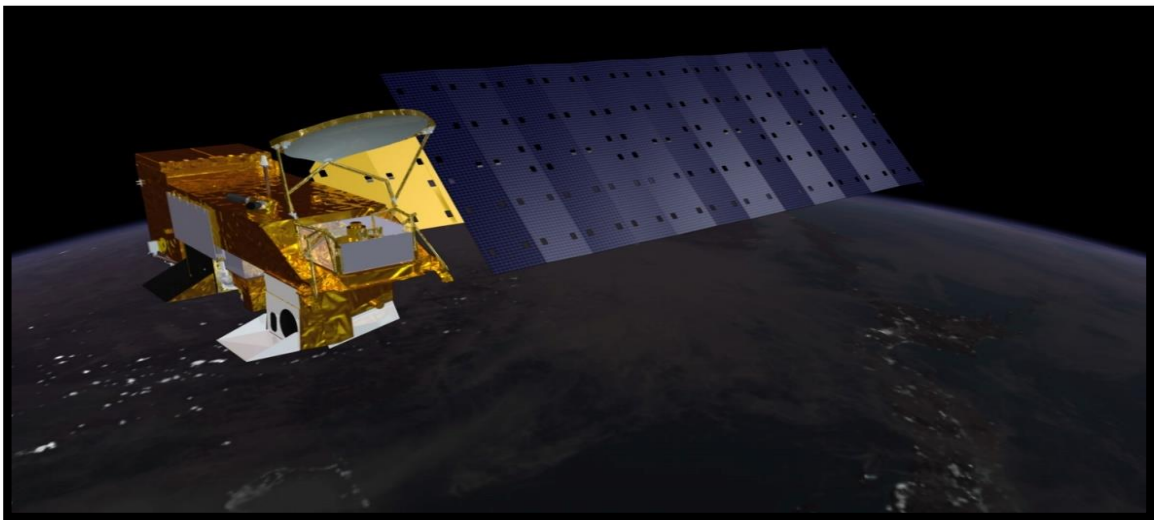


**Σχήμα 2.3.** Διάγραμμα ροής της δομής και της λειτουργίας του δορυφορικού αλγόριθμου για τον εντοπισμό των επεισοδίων σκόνης (DAEs).

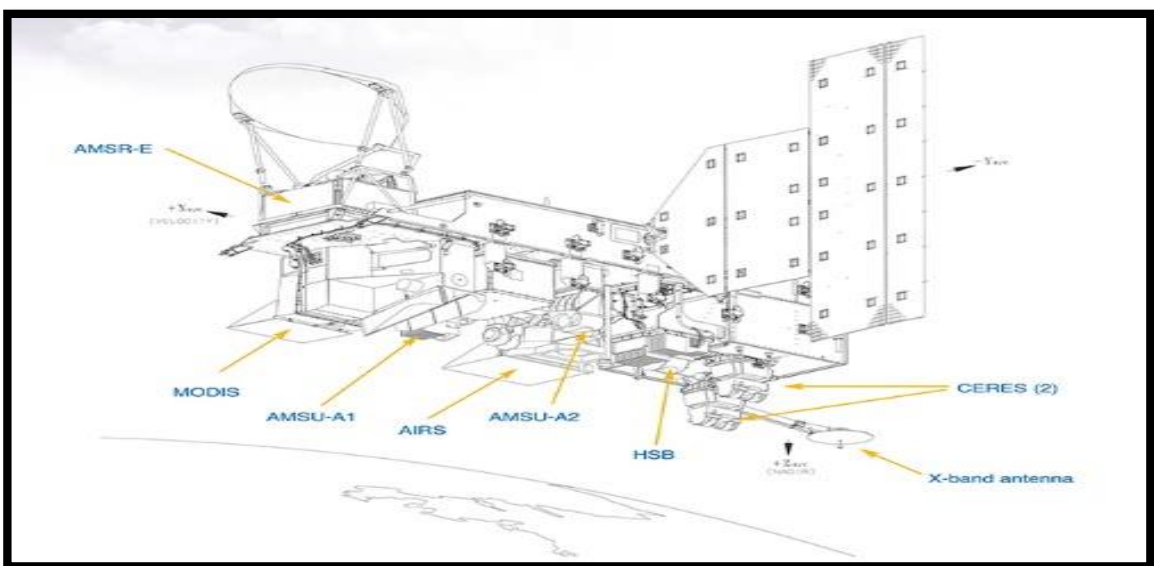
### 2.3 Δορυφορικά δεδομένα MODIS (MODIS satellite data)

Το φασματικό ραδιομέτρο *MODIS* (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) (Σχήμα 2.5) αποτελεί σύγχρονο όργανο, το οποίο είναι τοποθετημένο στους δορυφόρους *TERRA* (γνωστό ως EOS AM-1) και *AQUA* (γνωστό ως EOS PM-1) (Σχήμα 2.4). 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 (φασματικά κανάλια 8-36). Οι δύο δορυφόροι περιστρέφονται σε αντίθετες τροχιές και σε υψόμετρο 705 km από την επιφάνεια της Γης, περνώντας πάνω από το επίπεδο του Ισημερινού (overpass) στις 10:30 UTC ο *TERRA* και στις 13:30 UTC ο *AQUA*, αντίστοιχα. Οι δύο δορυφόροι κατασκευάστηκαν στα πλαίσια του

προγράμματος EOS (Earth Observing System) της NASA (National Aeronautic and Space Administration) και εκτοξεύτηκαν στις 18 Δεκεμβρίου 1999 (TERRA) και στις 4 Μαΐου 2002 (AQUA). Το MODIS παρέχει πλήθος ποιοτικών μετρήσεων για διάφορες παραμέτρους της ατμόσφαιρας, της λιθόσφαιρας, της υδρόσφαιρας και της κρύοσφαιρας σε υψηλή φασματική διακριτική ικανότητα. Το κύριο πλεονέκτημά του αποτελεί η ευρεία γωνία σάρωσής του (scanning angle), που είναι της τάξεως των  $110^\circ$ , καλύπτοντας ένα εύρος σάρωσης τροχιάς (swath width) ίσο με 2330 km. Διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη επικυρωμένων δεδομένων από μοντέλα μελέτης και είναι σε θέση να προβλέπει παγκόσμιες αλλαγές με ακρίβεια, καθώς και να συνδράμει σε χάραξη ορθών αποφάσεων με κύριο στόχο την προστασία του περιβάλλοντός μας. Οι πληροφορίες που συλλέγει το MODIS για την ακτινοβολία, χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της βλάστησης, το φθορισμό της χλωροφύλλης των ωκεανών, τις ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων, τις ιδιότητες των νεφών, την περίπτωση πυρκαγιάς, τη χιονοκάλυψη και της έκτασης του θαλασσίου πάγου στους ωκεανούς.



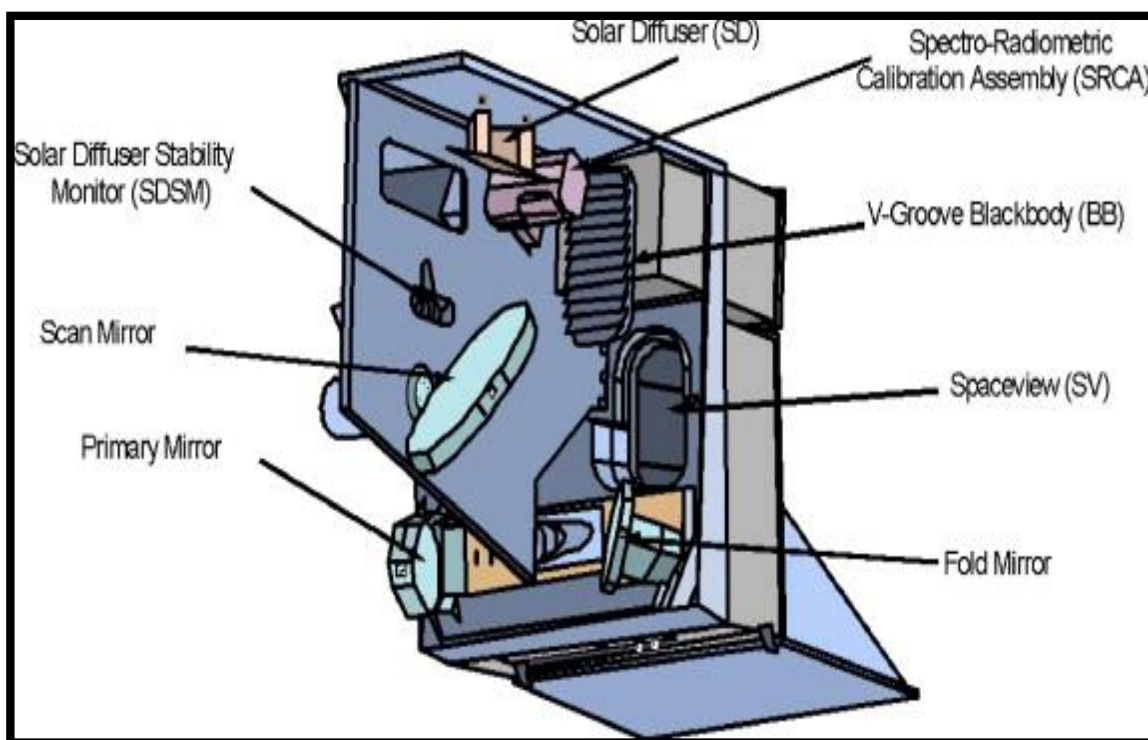
Σχήμα 2.4. Ο δορυφόρος AQUA της NASA (Πηγή: NASA).



Σχήμα 2.5. Τα όργανα του δορυφόρου AQUA της NASA (Πηγή: NASA).

Για την ανεύρεση των φυσικών και οπτικών ιδιοτήτων των αερολυμάτων, χρησιμοποιούνται 7 κανάλια μεταξύ 0.47 και 2.13  $\mu\text{m}$  (0.47, 0.55, 0.65, 0.86, 1.24, 1.63, 2.13  $\mu\text{m}$ ) για την εκτίμησή τους πάνω από θάλασσα και 3 κανάλια (0.47, 0.55, 0.66  $\mu\text{m}$ ) για την εκτίμησή τους πάνω από ξηρά. 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). Για την ακριβέστερη εξαγωγή των ιδιοτήτων των αερολυμάτων και αποφυγή τάσεων υπερεκτίμησης «αφαιρείται» η επίδραση των νεφών (cloud screening) και του εδάφους (surface screening). Σύμφωνα, με μελέτες (Chu et al., 2002; Remer et al., 2005) οι μετρήσεις του AOD είναι ακριβέστερες πάνω από τη θάλασσα έναντι της ξηράς, λόγω της μικρότερης λευκάγειας (albedo).

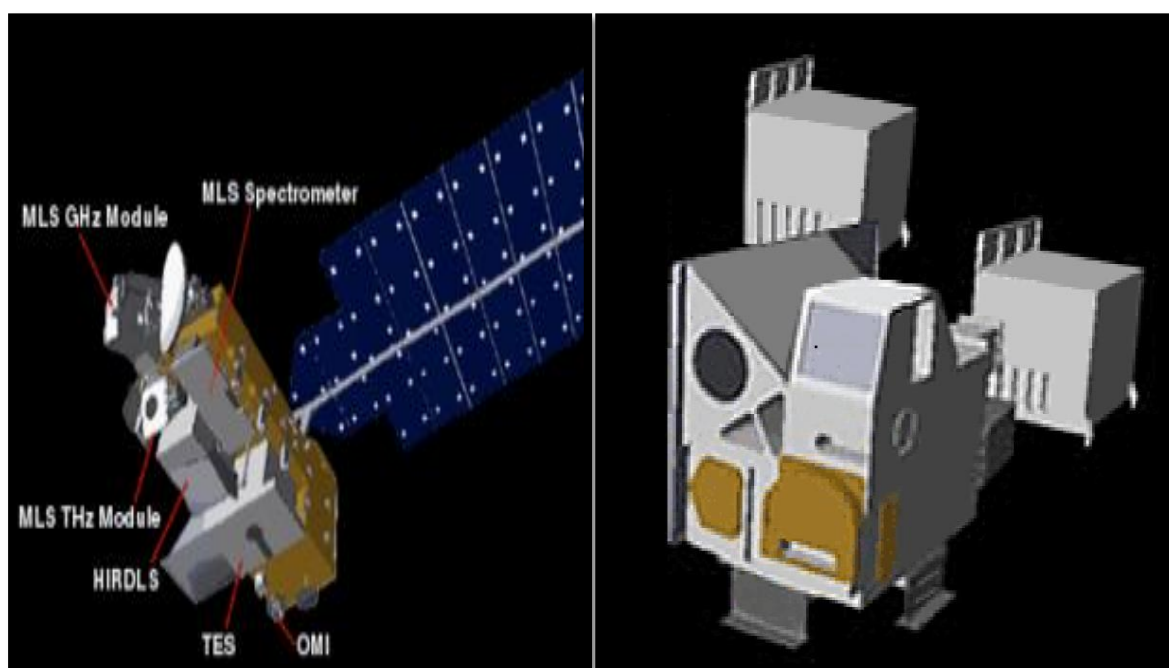
Τα δεδομένα MODIS ταξινομούνται σε διαφορετικά επίπεδα (Levels). Τα δεδομένα του Επιπέδου 1 (Level 1) αποτελούν πρωτογενείς μετρήσεις (χωρίς επεξεργασία), το Επίπεδο 2 (Level 2) είναι δεδομένα υψηλής γεωγραφικής ανάλυσης (π.χ. για τα αερολύματα 10 km x 10 km), ενώ τέλος τα δεδομένα του Επιπέδου 3 (Level 3) έχουν χωρική ανάλυση  $1^\circ \times 1^\circ$  γεωγραφικό μήκος και πλάτος ( $\sim 100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ ). Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιούνται δεδομένα Επιπέδου 3 (Level 3) της τελευταίας συλλογής, Collection C-6.1 από το δορυφόρο AQUA (Σχήμα 2.4). Ο δορυφόρος βρίσκεται σε ύψος 705 km και κινείται σχεδόν σε πολική τροχιά και σε συγχρονισμένη τροχιά με τον Ήλιο. Η εκκεντρότητα του είναι 0,0015°, ενώ η περίοδος του διαρκεί 98,8 λεπτά. Αρχικά, σχεδιάστηκε να συλλέγει δεδομένα για έξι χρόνια, με το στόχο αυτό να ξεπερνιέται κατά πολύ, καθώς είκοσι χρόνια μετά συνεχίζει τη λειτουργία του. Το MODIS δεν καταγράφει άμεσα τις ιδιότητες των αερολυμάτων, αλλά χρησιμοποιεί την ανακλώμενη ακτινοβολία για τον υπολογισμό των οπτικών ιδιοτήτων (π.χ. AOD), μέσω κατάλληλων αλγορίθμων.



**Σχήμα 2.6.** Το φασματοφωτόμετρο MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) με τα διάφορα εξαρτήματά του, που έχει τοποθετηθεί στους δορυφόρους TERRA & AQUA (Πηγή: Xiong et al., 2008).

## 2.4 Δορυφορικά δεδομένα OMI (OMI satellite data)

Το *φασματοφωτόμετρο OMI (Ozone Monitoring Instrument)* (Σχήμα 2.7β) κατασκευάστηκε από τη διαστημική Υπηρεσία της Ολλανδίας (NIVR, Nederlands Instituut voor Vliegtuigontwikkeling en Ruimtevaart) σε συνεργασία με το Ινστιτούτο Μετεωρολογίας της Φινλανδίας (FMI) στα πλαίσια του προγράμματος Earth Observing System (EOS) της NASA και βρίσκεται στο δορυφόρο πολικής τροχιάς AURA (γνωστός ως EOS CH-1) (Σχήμα 2.7α). Ο δορυφόρος AURA (Σχήμα 2.7α) 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 2.7β) 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 Chartography) και του GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars). Το OMI συνδυάζει τα πλεονεκτήματα και των προγενέστερων οργάνων απ' αυτό, καθώς πραγματοποιεί μετρήσεις σε όλο το φάσμα των μηκών κύματος (υπεριώδες/ορατό/κοντινό υπέρυθρο) και με υψηλή χωρική (από 13 km × 24 km έως και 13 km × 12 km) και χρονική (καθημερινή κάλυψη) ανάλυση.



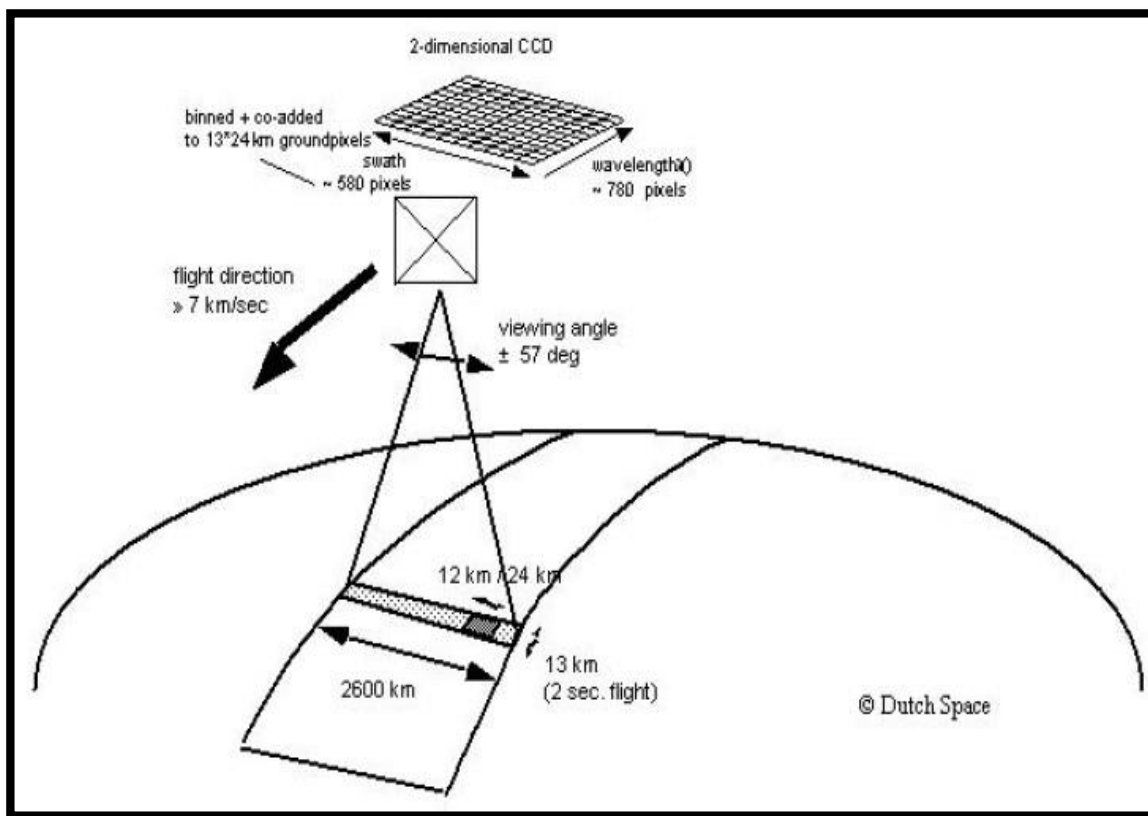
(α)

(β)

**Σχήμα 2.7.** α) Δορυφόρος EOS AURA της NASA με τα διάφορα όργανά του και β) φασματοφωτόμετρο OMI (Ozone Monitoring Instrument) που είναι τοποθετημένο στο δορυφόρο AURA (Πηγή: NASA).

Το OMI με την προηγμένη τεχνολογία του και τους αλγόριθμους ανεύρεσής του, παρέχει δεδομένα υψηλής χωρικής ανάλυσης  $1^\circ \times 1^\circ$  για ολόκληρη την ατμοσφαιρική κολώνα, σε πλανητική κλίμακα. 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 (Σχήμα 2.8). Αρχικά, σχεδιάστηκε για τη μέτρηση και παρακολούθηση του όζοντος (O<sub>3</sub>) και ως εκ τούτου καταγράφει τις τιμές όζοντος στην τροπόσφαιρα και στην στρατόσφαιρα, καθώς και τιμές των χημικών ενώσεων NO<sub>2</sub>, SO, OCIO, BrO, HCHO που είναι υπεύθυνες για την καταστροφή του. Όπως ειπώθηκε παραπάνω, 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.



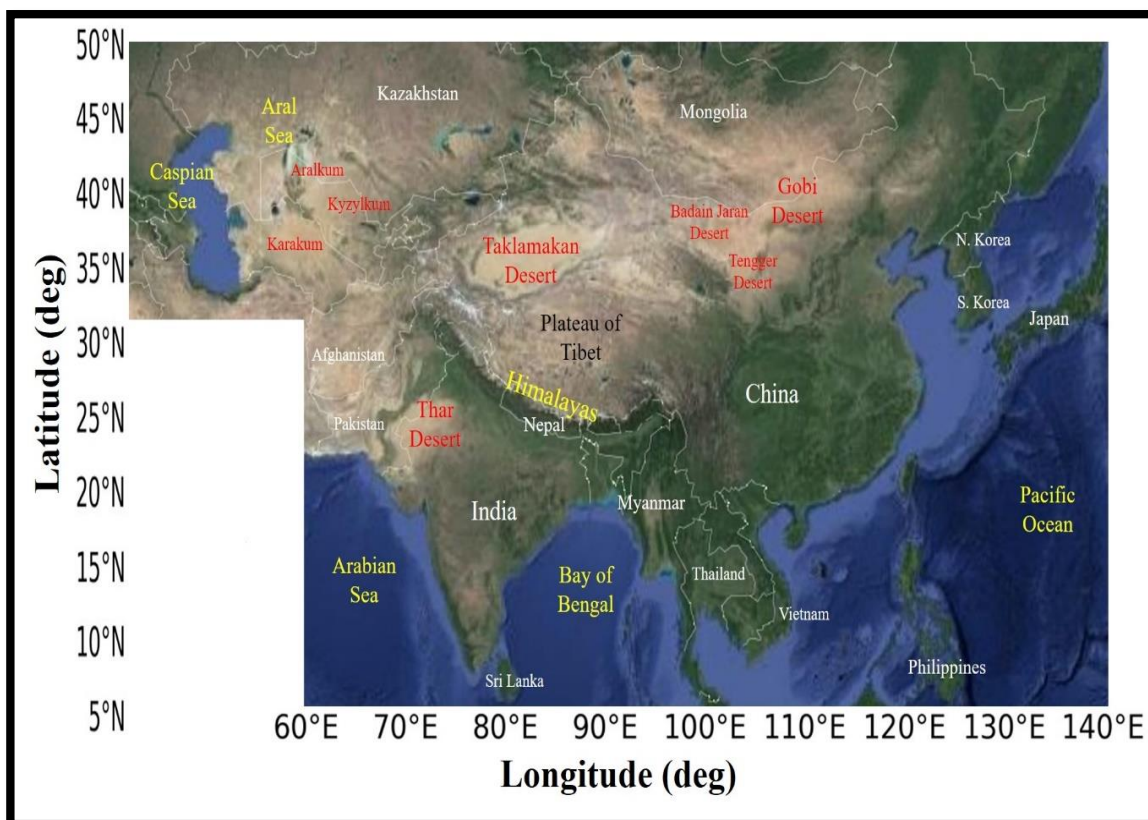
Σχήμα 2.8. Σχεδιάγραμμα λειτουργίας του φασματικού ραδιομέτρου OMI (Πηγή: OMI User's Guide).

## 2.5 Περιοχή και υποπεριοχές μελέτης (Region and subregions of study)

Η *Ασία* αποτελεί τη μεγαλύτερη από τις έξι ηπείρους της Γης, καταλαμβάνοντας έκταση 43,82 εκατομμυρίων km<sup>2</sup>, δηλαδή καταλαμβάνει περίπου το 8,7% της συνολικής

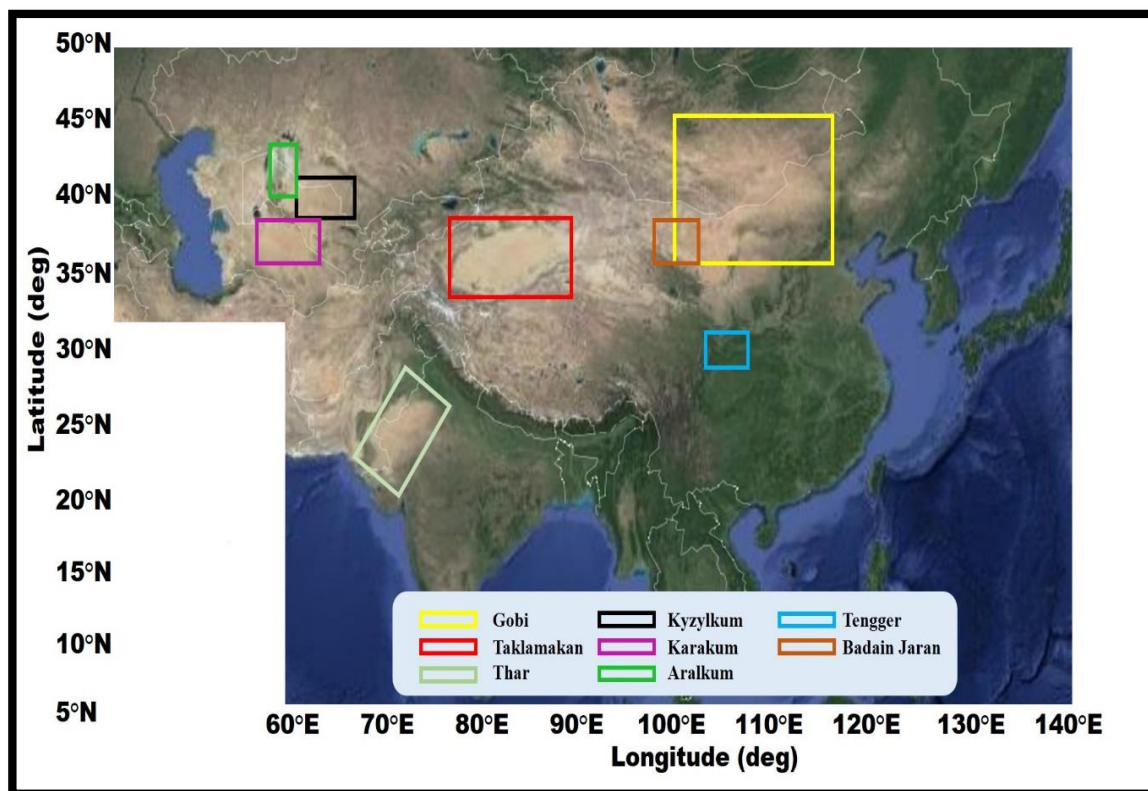


επιφάνειας της Γης και το 30% της στεριάς. Επίσης, είναι η ήπειρος με τους περισσότερους κατοίκους, με πληθυσμό περίπου το 59,4% του παγκόσμιου πληθυσμού. Περιέχει αντιθέσεις ως προς την κατανομή του πληθυσμού, με χώρες/περιοχές όπως η Ινδία, Κίνα, Σιγκαπούρη, Χονγκ Κονγκ, Μακάου να είναι πυκνοκατοικημένες, ενώ στην αντίπερα όχθη και ανεβαίνοντας βορειότερα (Μογγολία, Καζακστάν, Σιβηρία) η πληθυσμιακή πυκνότητα μικραίνει. Από γεωμορφολογικής απόψεως η Ασία περιλαμβάνει μεγάλη ποικιλία από μεγάλες οροσειρές, ψηλές κορυφές, μεγάλες λίμνες, πεδιάδες, στέπες οροπέδια και φυσικά ερημικές εκτάσεις. Στην Κεντρική Ασία βρίσκεται το Όρος Έβερεστ το οποίο ανήκει στην Οροσειρά των Ιμαλαίων, αποτελώντας τη ψηλότερη κορυφή της Γης από την επιφάνεια της θάλασσας με υψόμετρο 8848 μέτρων. Πολύ γνωστό και σημαντικό είναι επίσης το Οροπέδιο του Θιβέτ. Όσον αφορά τις κλιματολογικές συνθήκες, έχουμε και εδώ σημαντική ποικιλία, διότι η ήπειρος εκτείνεται από τον Ισημερινό έως τον Αρκτικό κύκλο. Ανάλογα με το κλίμα και τη μορφολογία του εδάφους, διαμορφώνονται και οι βροχοπτώσεις που σημειώνονται σ' ένα τόπο, που στην περίπτωση της Ασίας το μεγαλύτερο ύψος βροχής σημειώνεται στη νότια πλευρά των Ιμαλαίων (δρουν σαν "τείχος" → ομβροπλευρά). Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης επιλέχθηκε η περιοχή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.9, περιλαμβάνοντας 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).



Σχήμα 2.9. Περιοχή μελέτης (study domain).

Επιπλέον, στο Σχήμα 2.10 επισημαίνονται οι κυριότερες ερημικές περιοχές, που είναι υπεύθυνες για την εξαγωγή μεγάλων φορτίων ερημικής σκόνης στην ατμόσφαιρα κάθε χρόνο και οι οποίες αναλύονται στις παρακάτω υποενότητες.



Σχήμα 2.10. Κυριότερες πηγές ερημικής σκόνης στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας.

### 2.5.1 Έρημος Γκόμπι (Gobi Desert)

Η Έρημος Γκόμπι (*Gobi Desert*) βρίσκεται στην Ανατολική Ασία (Σχήμα 2.11), καλύπτοντας τμήματα της Βόρειας και Βορειοδυτικής Κίνας και της Νότιας Μογγολίας., με τη μέση έκτασή της για τον 21<sup>ο</sup> αιώνα να είναι 2.3 εκατομμύρια km<sup>2</sup>, αποτελώντας την τρίτη μεγαλύτερη έρημο στον πλανήτη, μετά τη Σαχάρα και την Αραβική Έρημο (Sternberg et al., 2015). Οριοθετείται από τα όρη Αλτάι (Altay Mountains), τις στέπες και τα λιβάδια της Μογγολίας στα βόρεια, το διάδρομο Χεχσί (Hexi Corridor) και το οροπέδιο του Θιβέτ (Tibetan Plateau) στα νοτιοδυτικά και τη βόρεια πεδιάδα της Κίνας στα νοτιοανατολικά. Μεγάλο μέρος της Γκόμπι δεν είναι αμμώδες, αλλά είναι βραχώδες. Το παγκόσμιο και τοπικό κλίμα, το υψόμετρο, η ηπειρωτική θέση και οι τεράστιες θερμοκρασιακές διαφορές (−40°C έως +40°C), επηρεάζουν τη ξηρότητα και τη βλάστηση της Ερήμου Γκόμπι. Η οροσειρά των Ιμαλαίων παίζει κυρίαρχο ρόλο στα ποσά της βροχόπτωσης, καθώς εμποδίζει τις υγρές αέριες μάζες που έρχονται από τον Ινδικό Ωκεανό. Αν και οι νοτιοανατολικοί μουσώνες επηρεάζουν τα νοτιοανατολικά τμήματα της Γκόμπι, η περιοχή χαρακτηρίζεται γενικά από υπερβολική λειψυδρία, ειδικά κατά τη διάρκεια του χειμώνα, όταν ο Σιβηρικός αντικυκλώνας είναι στην κορύφωσή του. Το νότιο και το κεντρικό τμήμα της ερήμου Γκόμπι έχουν μεταβλητή βλάστηση, λόγω της δραστηριότητας των μουσώνων. Οι πιο βόρειες περιοχές είναι πολύ κρύες και ξηρές, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να υποστηρίξει μεγάλη ανάπτυξη βλάστησης. Αυτό αποδίδεται στις υψηλές πιέσεις που αναπτύσσονται στην περιοχή Σιβηρίας-Μογγολίας. Η μεταβλητότητα των βροχοπτώσεων, οι σύντομες περίοδοι βλάστησης και οι περιορισμένες ημέρες χωρίς παγετό, προκαλούν σημαντικές διακυμάνσεις των ορίων της ερήμου χρόνο σε χρόνο, που επιδρά και στο φορτίο σκόνης που εκπέμπεται και μεταφέρεται στην ατμόσφαιρα.



Σχήμα 2.11. Η Έρημος Γκόμπι (Πηγή: ESRI 2019).

### 2.5.2 Έρημος Τακλαμακάν (Taklamakan Desert)

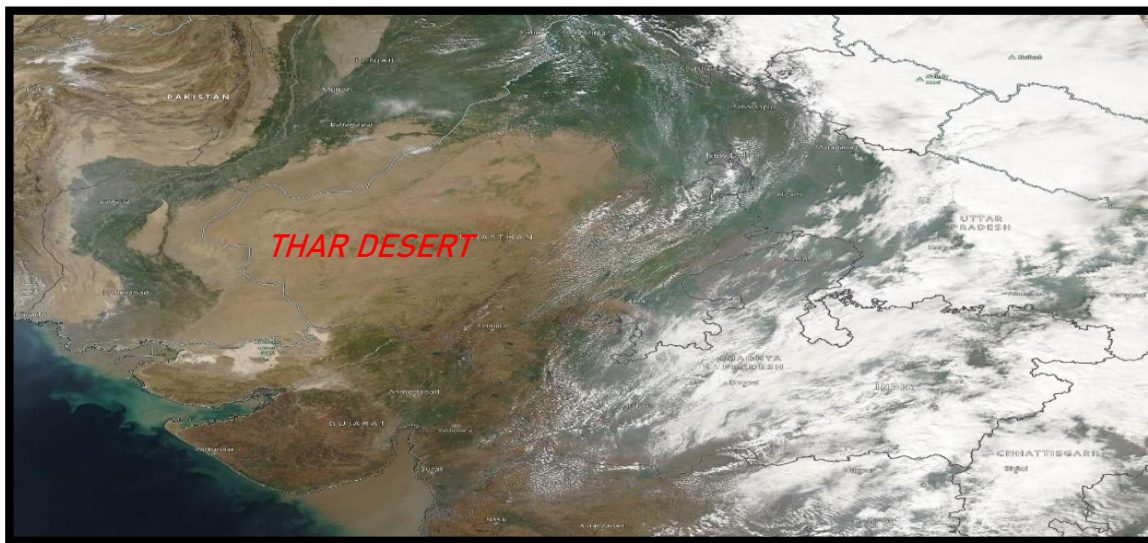
Η Έρημος Τακλαμακάν (*Taklamakan Desert*) βρίσκεται στην Κεντρική Ασία (Σχήμα 2.12), στην επαρχία Σιντσιάνγκ (Xinjiang) στη Βορειοδυτική Κίνα. Περικλείεται από την οροσειρά Κουνλούν (Kunlun Mountains) στα νότια και τις οροσειρές Παμίρ (Pamir Mountains) και Τιάν Σαν (Tian Shan) στα δυτικά και βόρεια. Αποτελεί μια απ' τις μεγαλύτερες αμμώδεις ερήμους στον κόσμο, με έκταση περίπου 337.000 km<sup>2</sup>. Είναι ψυχρή έρημος, καθώς δέχεται πολύ ψυχρές αέριες μάζες από τη Σιβηρία, οι οποίες κατεβάζουν τις θερμοκρασίες σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα, μερικές φορές ακόμη και κάτω από τους -20°C, ενώ το καλοκαίρι ο υδράργυρος μπορεί να ανέλθει στους +40°C. Η βροχόπτωση στην Τακλαμακάν είναι εξαιρετικά χαμηλή και κυμαίνεται από 38 mm στα δυτικά και έως 10 mm στα ανατολικά, ετησίως. Το καλοκαίρι επικρατούν βόρειοι και βορειοδυτικοί άνεμοι στη δυτική περιοχή.



Σχήμα 2.12. Η Έρημος Τακλαμακάν (Πηγή: Encyclopædia Britannica).

### 2.5.3 Έρημος Ταρ (Thar Desert)

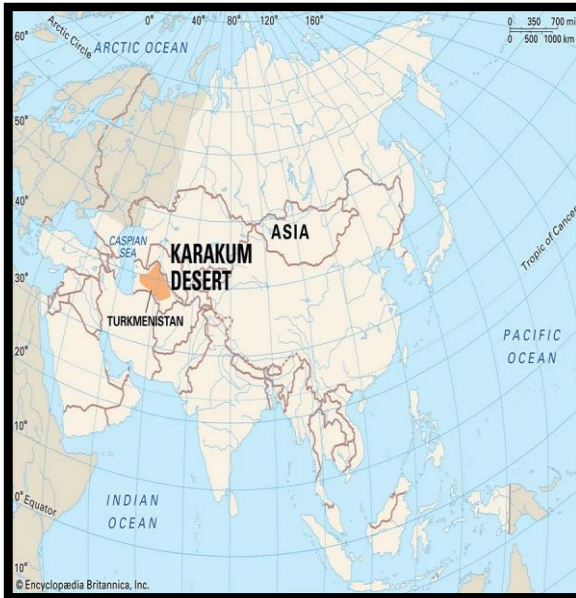
Η Έρημος Ταρ (*Thar Desert*), γνωστή και ως Μεγάλη Ινδική Έρημος, βρίσκεται στο βορειοδυτικό τμήμα της Ινδικής Χερσονήσου (Σχήμα 2.13), με έκταση περίπου 238.000 km<sup>2</sup>. Αποτελεί φυσικό σύνορο μεταξύ Ινδίας και Πακιστάν, με το 85% της έκτασής της να βρίσκεται στην Ινδία και το υπόλοιπο 15% στο Πακιστάν. Το έδαφος της Ταρ είναι κυρίως άμμος. Οι βροχοπτώσεις κυμαίνονται μεταξύ 100 και 500 mm ετησίως, σχεδόν αποκλειστικά μεταξύ Ιουνίου και Σεπτεμβρίου (περίοδος μουσώνων). Το κλίμα της είναι ξηρό και υποτροπικό, με τη μέση θερμοκρασία να ποικίλλει ανάλογα με την εποχή. Οι ακραίες τιμές μπορεί να κυμαίνονται από σχεδόν 0°C το χειμώνα, φτάνοντας τους καλοκαιρινούς μήνες τους 50°C. Κατά τη ξηρή περίοδο ισχυροί επιφανειακοί άνεμοι ανυψώνουν και μεταφέρουν τη σκόνη σε κοντινές ή και σε μεγαλύτερη απόσταση περιοχές.



Σχήμα 2.13. Η Έρημος Ταρ (Πηγή: NASA Worldview – TERRA Satellite).

### 2.5.4 Άλλες μικρότερες ερημικές περιοχές

Εκτός από τις τρεις προαναφερθείσες ερήμους, στην περιοχή μελέτης υπάρχουν και άλλες μικρότερες ερημικές περιοχές που συμβάλουν εξίσου με σημαντικό αριθμό φορτίου αερολυμάτων σκόνης στην ατμόσφαιρα. Μια από αυτές είναι η έρημος *Καρακούμ* (*Karakum Desert*) (Σχήμα 2.14α), που βρίσκεται στην Κεντρική Ασία, ανατολικά της Κασπίας Θάλασσας και νότια της λίμνης Αράλης. Καταλαμβάνει περίπου το 70% της χώρας του Τουρκμενιστάν. Το κλίμα της Καρακούμ είναι ηπειρωτικό, με μακρά, ζεστά και ξηρά καλοκαίρια και απρόβλεπτους αλλά σχετικά ζεστούς χειμώνες. Οι μέσες θερμοκρασίες του αέρα κυμαίνονται από 26°C έως 34°C το καλοκαίρι και από -4°C έως 4°C το χειμώνα. Ωστόσο δε λείπουν και οι ακραίες εποχικές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, με εύρος από -20°C το χειμώνα έως +50°C το καλοκαίρι, αντίστοιχα. Όσον αφορά τις βροχοπτώσεις σε ετήσια βάση, είναι σπάνιες και κυμαίνονται από 70 mm στα βόρεια έως 150 mm στα νότια τμήματα. Μια ακόμη έρημος είναι η *Κιζυλκούμ* (*Kyzylkum Desert*) (Σχήμα 2.14β) που βρίσκεται στην Κεντρική Ασία, αποτελώντας την πέμπτη μεγαλύτερη έρημο της Ασίας και χωρίζεται μεταξύ των Καζακιστάν, Τουρκμενιστάν και Ουζμπεκιστάν. Η ετήσια βροχόπτωσή κυμαίνεται μεταξύ 100 και 200 mm.



(α)



(β)

**Σχήμα 2.14.** α) Η Έρημος Καρακούμ και β) η Έρημος Κιζυλκούμ (Πηγή: Encyclopædia Britannica, NASA)

Αντικαθιστώντας τις συρρικνούμενες περιοχές της Λίμνης Αράλης, η έρημος *Αραλκούμ* (*Aralkum Desert*) (Σχήμα 2.15) βρίσκεται στο Ουζμπεκιστάν και το Καζακιστάν, καθιστώντας την τη νεότερη έρημο στη Γη. Δημιουργήθηκε εξ' ολοκλήρου λόγω ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, όπως η υπεράντληση των υδάτων των ποταμών Αμού Ντάρια (*Amu Darya*) και Συρ Ντάρια (*Syr Darya*), που είχαν τις εκβολές στην Αράλη. Από την αρχική έκταση της λίμνης σήμερα έχει χαθεί πάνω από το 50%, δημιουργώντας μια ερημική έκταση με μεγάλες ποσότητες άμμου και αλατιού. Το κλίμα της περιοχής έχει αλλάξει, με τους χειμώνες να είναι πιο κρύοι και τα καλοκαίρια πιο ζεστά, με τον ετήσιο υετό να είναι περίπου 150 mm.



**Σχήμα 2.13.** Η Έρημος Αραλκούμ (Πηγή: NASA Worldview – AQUA Satellite).

Μετά από βιβλιογραφική αναζήτηση, στον Πίνακα 2.1 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 2.1.** Ερημικές περιοχές της περιοχής μελέτης, με την αντίστοιχη έκτασή τους.

<b>RANK</b>	<b>NAME</b>	<b>AREA (km<sup>2</sup>)</b>
1.	<b>Gobi Desert</b>	2.300.000
2.	<b>Karakum Desert</b>	350.000
3.	<b>Taklamakan Desert</b>	337.000
4.	<b>Kyzylkum Desert</b>	300.000
5.	<b>Thar Desert</b>	238.000
6.	<b>Ordos Desert</b>	216.000
7.	<b>Ustyurt Desert</b>	200.000
8.	<b>Dasht-e Margo Desert</b>	150.000
9.	<b>Registan Desert</b>	150.000
10.	<b>Dasht-e Kavir Desert</b>	77.600
11.	<b>Ladakh Desert</b>	59.150
12.	<b>Loot Desert</b>	51.800
13.	<b>Lop Desert</b>	50.000
14.	<b>Gurbantünggüt Desert</b>	50.000
15.	<b>Badain Jaran Desert</b>	49.200
16.	<b>Mu Us Desert</b>	48.300
17.	<b>Kharan Desert</b>	48.000
18.	<b>Aralkum Desert</b>	40.000
19.	<b>Tengger Desert</b>	36.700
20.	<b>Qaidam Desert</b>	35.000
21.	<b>Cholistan Desert</b>	25.800
22.	<b>Kumtag Desert</b>	22.800
23.	<b>Indus Valley Desert</b>	19.500
24.	<b>Kubuqi Desert</b>	18.600
25.	<b>Hobq Desert</b>	14.500
26.	<b>Ulan Buh Desert</b>	12.000
27.	<b>Thal Desert</b>	10.000

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

## Αποτελέσματα - Συζήτηση

### **3.1 Γεωγραφική κατανομή των επεισοδίων σκόνης (DAEs)**

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι γεωγραφικές κατανομές της *απόλυτης* και *σχετικής συχνότητας* εμφάνισης των επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης (DAEs), καθώς και του *οπτικού βάθους* των αερολυμάτων σκόνης (DOD), για την ευρύτερη περιοχή της Ασίας και της Κασπίας Θάλασσας. Ο αλγόριθμος έτρεξε ξεχωριστά για κάθε έτος της περιόδου μελέτης (2005-2021) και εξήγαγε γεωγραφικές κατανομές των συχνοτήτων εμφάνισης (απόλυτη και σχετική) και του μέσου DOD, τόσο σε ετήσια όσο και σε μηνιαία βάση. Στη συνέχεια, έγινε μεσοποίηση των αποτελεσμάτων όλων των ετών με σκοπό τη δημιουργία μιας «κλιματολογίας» των σχετικών παραμέτρων των DAEs. Στην Ενότητα 3.1.1 παρουσιάζονται και σχολιάζονται οι γεωγραφικές κατανομές (χάρτες) των μέσων ετήσιων κλιματολογικών τιμών της απόλυτης (absolute) και σχετικής συχνότητας εμφάνισης (relative), καθώς και του οπτικού βάθους σκόνης (DOD) των ισχυρών και ακραίων επεισοδίων αερολυμάτων ερημικής σκόνης. Στη συνέχεια, στην Ενότητα 3.1.2 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες κατανομές, αλλά σε μηνιαία βάση. Στην Ενότητα 3.2 δείχνονται η ενδοετήσια μεταβολή της απόλυτης και σχετικής συχνότητας και του οπτικού βάθους σκόνης (Ενότητα 3.2.1), καθώς και η διαχρονική μεταβολή των παραπάνω παραμέτρων (απόλυτη-σχετική συχνότητα, οπτικό βάθος) κατά την περίοδο μελέτης (Ενότητα 3.2.2).

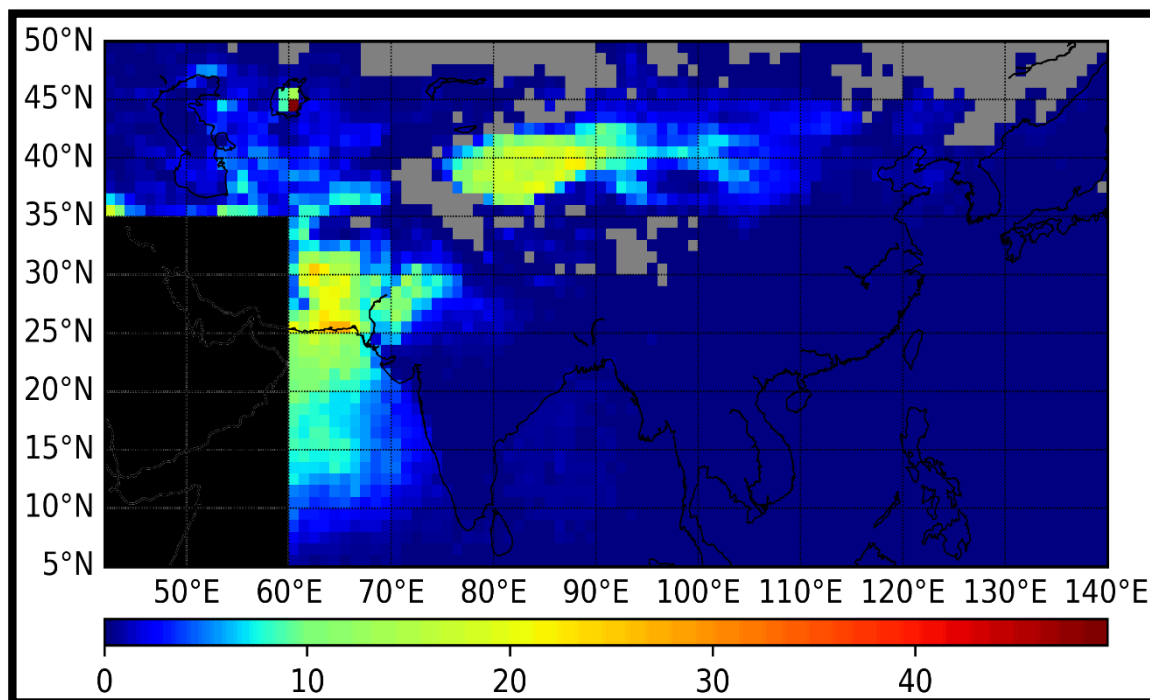
Για λόγους πληρότητας, επιλέχθηκαν αντιπροσωπευτικά και παρατίθενται στο Παράρτημα, χωρίς σχολιασμό, οι μέσες ετήσιες τιμές της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης και του οπτικού βάθους των επεισοδίων (ισχυρά και ακραία) για τα έτη 2005 και 2018 (Σχήματα Π.14-Π.17).

#### **3.1.1 Μέσες ετήσιες κλιματολογικές κατανομές**

*Συχνότητα εμφάνισης επεισοδίων σκόνης*

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζονται οι μέσες ετήσιες κλιματολογικές τιμές της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης (σε ημέρες/έτος) των ισχυρών επεισοδίων σκόνης (SDAEs) στην περιοχή μελέτης. Οι γκρι περιοχές (κυψελίδες), οι οποίες παρατηρούνται στο χάρτη, αντιστοιχούν σε περιοχές όπου ο αλγόριθμος δε λειτούργησε καθόλου (για καμία ημέρα του έτους), λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας των απαραίτητων δεδομένων. Επισημαίνεται, ότι οι περιπτώσεις αυτές είναι διαφορετικές από εκείνες για τις οποίες ο αλγόριθμος λειτούργησε και δεν υπολόγισε κανένα επεισόδιο σκόνης (μηδενική συχνότητα εμφάνισης, περιοχές με βαθύ

μπλε χρώμα). Επίσης, η περιοχή η οποία φαίνεται με μαύρο χρώμα (Σαουδική Αραβία) δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχής μελέτης, καθώς αποτελεί μία ξεχωριστή ερημική περιοχή στην ευρύτερη περιοχή της Μέσης Ανατολής. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, σε μεγάλο μέρος της Ασίας, ο αριθμός των επεισοδίων ερημικής σκόνης ανά έτος είναι μικρότερος από 5 ημέρες (μπλε αποχρώσεις), ενώ σε μεγάλο επίσης μέρος της περιοχής μελέτης (πλέον βαθύ μπλε χρώμα) δε συνέβη κανένα επεισόδιο κατά τη 17-ετή περίοδο. Παρόλα αυτά, υπάρχουν και εκτεταμένες περιοχές στις οποίες, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου, λαμβάνουν χώρα πιο συχνά επεισόδια σκόνης. Οι μεγαλύτερες τιμές της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης επεισοδίων σκόνης (15 έως 30 ημέρες/έτος, κιτρινο-κόκκινα χρώματα) παρατηρούνται στις ερήμους Τακλαμακάν και Ταρ και στα νότια τμήματα του Πακιστάν, που συνορεύουν με την Αραβική Θάλασσα (ανοιχτές πράσινες-κίτρινες-πορτοκαλί αποχρώσεις, Σχήμα 3.1). Μικρότερες συχνότητες (5-15 επεισόδια/έτος, γαλαζοπράσινες αποχρώσεις) παρατηρούνται στο αριστερό τμήμα της Γκόμπι και στην έρημο Καρακούμ. Στις ωκεάνιες και θαλάσσιες περιοχές οι τιμές της απόλυτης συχνότητας είναι γενικά πολύ μικρές έως μηδενικές, με εξαίρεση την Αραβική Θάλασσα, όπου καταγράφονται 7-18 επεισόδια ανά έτος (γαλάζιες-πράσινες αποχρώσεις).

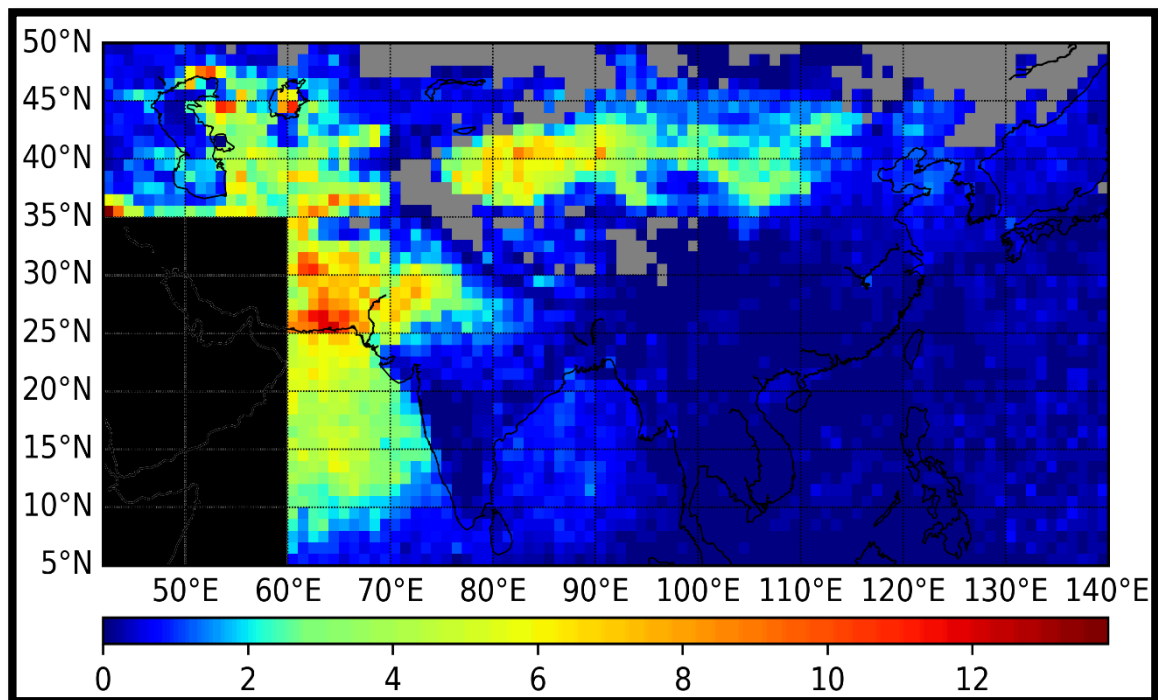


**Σχήμα 3.1.** Γεωγραφική κατανομή της μέσης ετήσιας απόλυτης συχνότητας εμφάνισης (επεισόδια/έτος) των ισχυρών επεισοδίων ερημικής σκόνης (SDAEs) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η γεωγραφική κατανομή της τυπικής απόκλισης (STDV) της απόλυτης συχνότητας των ισχυρών επεισοδίων ερημικής σκόνης (SDAEs), η οποία



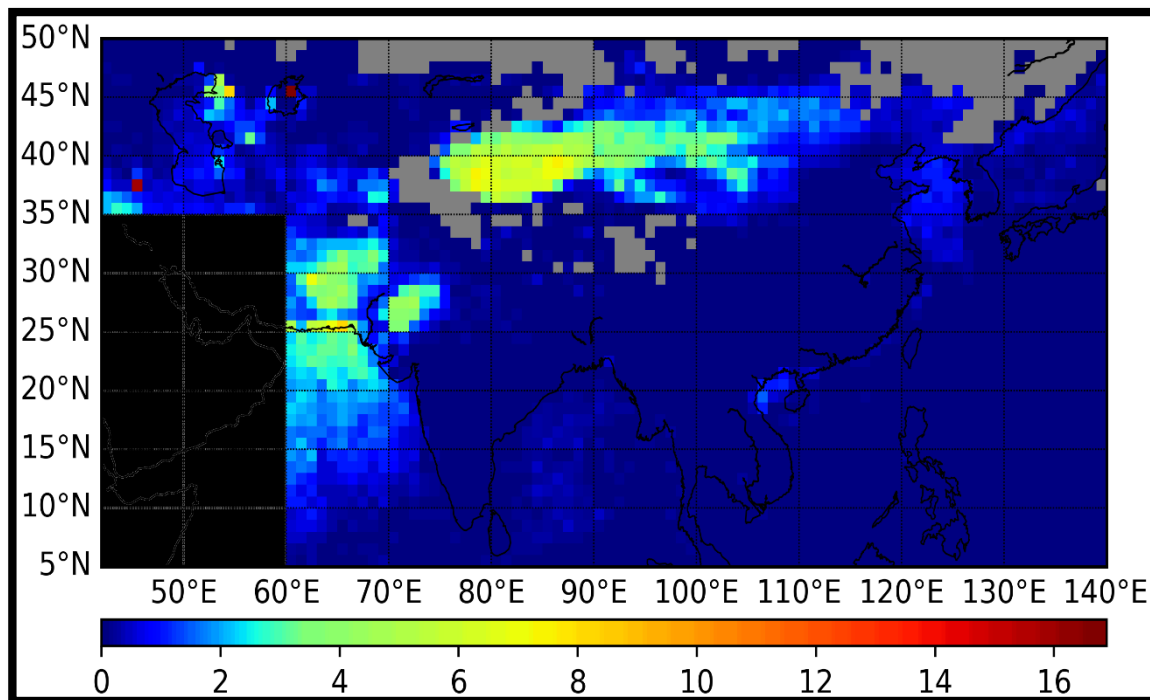
εκφράζει την από έτος σε έτος μεταβολή της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης. Οι μεγαλύτερες τιμές καταγράφονται στο νότιο Πακιστάν (κόκκινες-κίτρινες αποχρώσεις), στην έρημο Τακλαμακάν, στην Αραβική Θάλασσα και στις ερήμους Καρακούμ, Κιζυλκούμ και Αραλκούμ (ανατολικά της Κασπίας Θάλασσας), αλλά και στην έρημο Γκόμπι (σύνορα Μογγολίας-Κίνας). Στην ουσία, η ισχυρότερη μεταβλητότητα των επεισοδίων σκόνης εμφανίζεται στις περιοχές της Ασίας οι οποίες υφίστανται και τα περισσότερα επεισόδια.



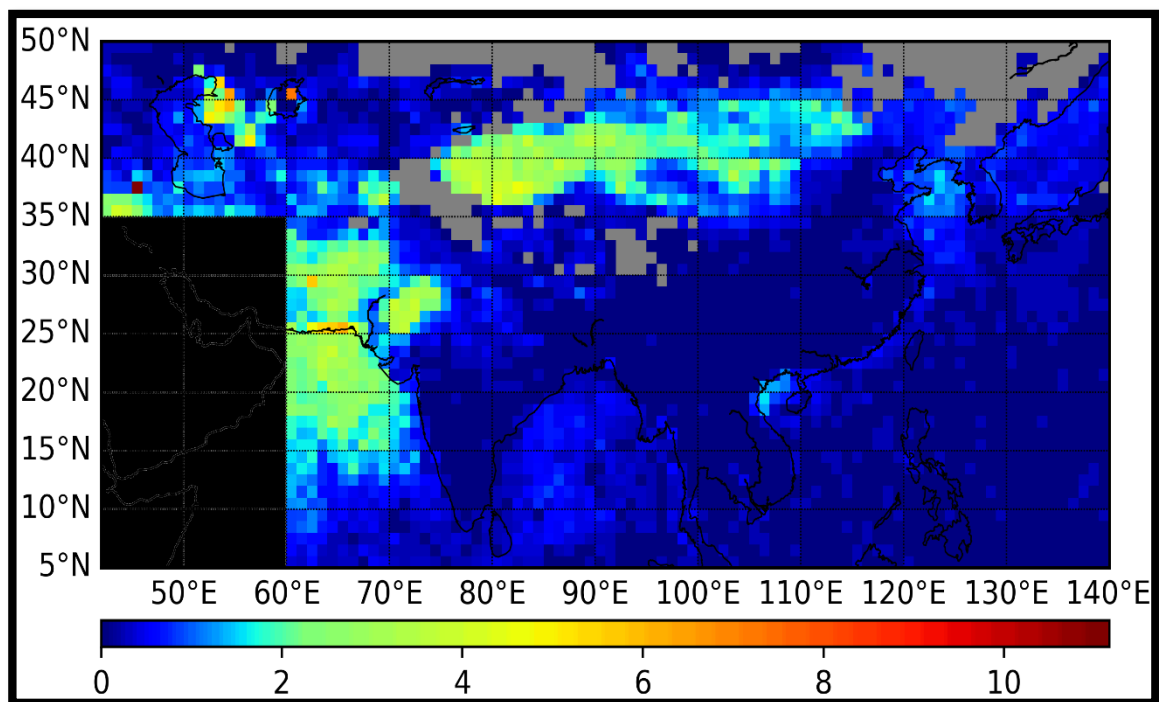
**Σχήμα 3.2.** Γεωγραφική κατανομή της τυπικής απόκλισης (STDV) της μέσης ετήσιας απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των ισχυρών επεισοδίων σκόνης (SDAEs, επεισόδια/έτος) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας κατά την περίοδο 2005-2021. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

Στο παρακάτω Σχήμα 3.3 δείχνεται η γεωγραφική κατανομή της μέσης ετήσιας κλιματολογικής απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των ακραίων επεισοδίων σκόνης (EDAEs) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας κατά την περίοδο 2005-2021. Φαίνεται ότι, γενικά, τα ακραία επεισόδια σκόνης είναι πιο σπάνια από τα ισχυρά (μέγιστη συχνότητα 17 έναντι 50 επεισόδια/έτος), γεγονός που είναι αναμενόμενο. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου, τα ακραία επεισόδια σκόνης είναι πιο συχνά (από 5 έως 7 επεισόδια ανά έτος) στην έρημο Τακλαμακάν, στις ακτές του Πακιστάν και στην έρημο Ταρ. Στις ακτές του Πακιστάν σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, οι υψηλές τιμές του οπτικού βάθους σκόνης δικαιολογούνται από τη μεταφορά ερημικής σκόνης από πηγές της Μέσης Ανατολής και Αφρικής (π.χ. Αραβική Έρημος, Έρημος Νουβίας), που δε συμπεριλαμβάνονται στην παρούσα περιοχή μελέτης (Ramaswamy et al., 2017; Jin et al., 2021). Λιγότερα ακραία επεισόδια συμβαίνουν στην Αραβική Θάλασσα και στις ηπειρωτικές περιοχές περίξ της

Κασπίας Θάλασσας (1-3 επεισόδια/έτος). Σε κάποιες κυψελίδες βορειοανατολικά της Κασπίας σημειώνονται 5-8 επεισόδια/έτος, λόγω μείωσης των βροχοπτώσεων και αύξησης της εξάτμισης (Koriche et al., 2021). Στην υπόλοιπη περιοχή μελέτης τα επεισόδια είναι λιγότερα από 1 ανά έτος ή και μηδενικά. Οι μέγιστες συχνότητες εμφάνισης (8-17 επεισόδια/έτος) συμβαίνουν σε μεμονωμένες κυψελίδες, όπως σε περιοχές γύρω από τη βόρεια Κασπία Θάλασσα και την Αράλη . Οι ασυνήθιστα υψηλές αυτές τιμές πιθανόν οφείλονται σε σφάλμα των δορυφορικών αλγορίθμων (Dark Target & Deep Blue) του MODIS (Levy et al., 2010; Hsu et al., 2013; Remer et al., 2020). Η τυπική απόκλιση (από έτος σε έτος μεταβολή) της απόλυτης συχνότητας των ακραίων επεισοδίων σκόνης, υπολογισμένη για την περίοδο 2005-2021, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4. Γενικά, όπως και για τα ισχυρά επεισόδια σκόνης, η μεγαλύτερη χρονική μεταβλητότητα παρατηρείται στις περιοχές με τα περισσότερα επεισόδια. Πιο συγκεκριμένα, οι μεγαλύτερες τιμές λαμβάνουν χώρα στις ερήμους Τακλαμακάν και Ταρ, στο κεντρικό και νότιο Πακιστάν, την Αραβική Θάλασσα και ηπειρωτικές περιοχές ανάμεσα στην Κασπία Θάλασσα και τη Λίμνη Αράλη.



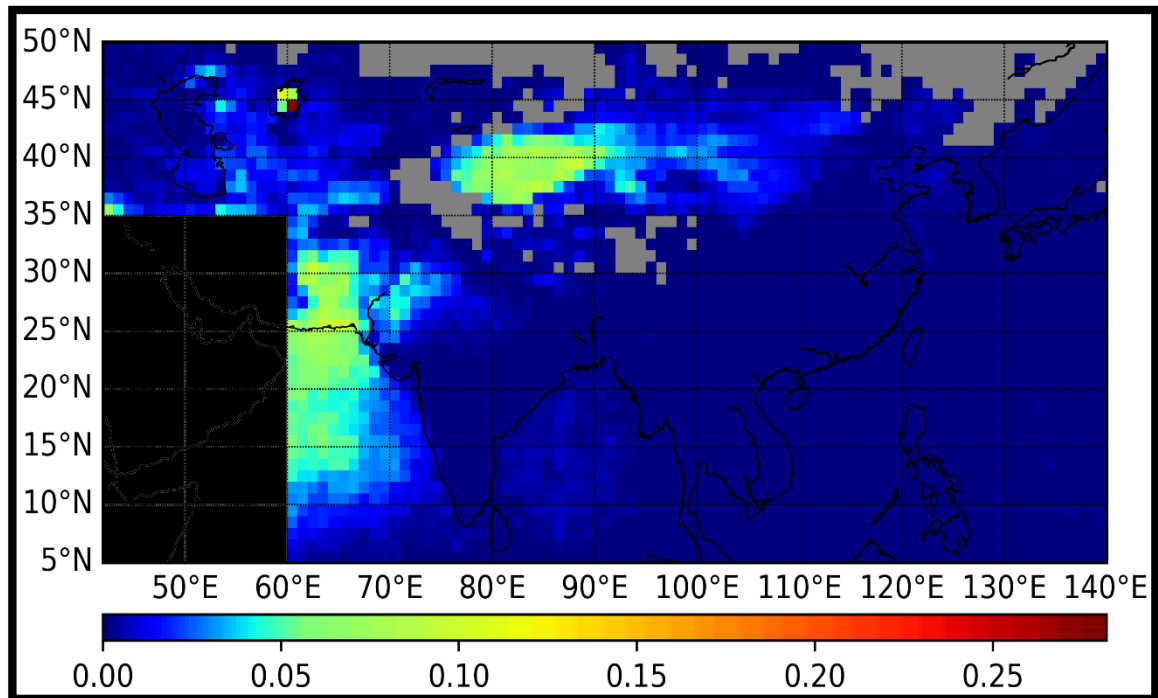
**Σχήμα 3.3.** Γεωγραφική κατανομή της μέσης ετήσιας απόλυτης συχνότητας εμφάνισης (επεισόδια/έτος) των ακραίων επεισοδίων ερημικής σκόνης (EDAEs) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.



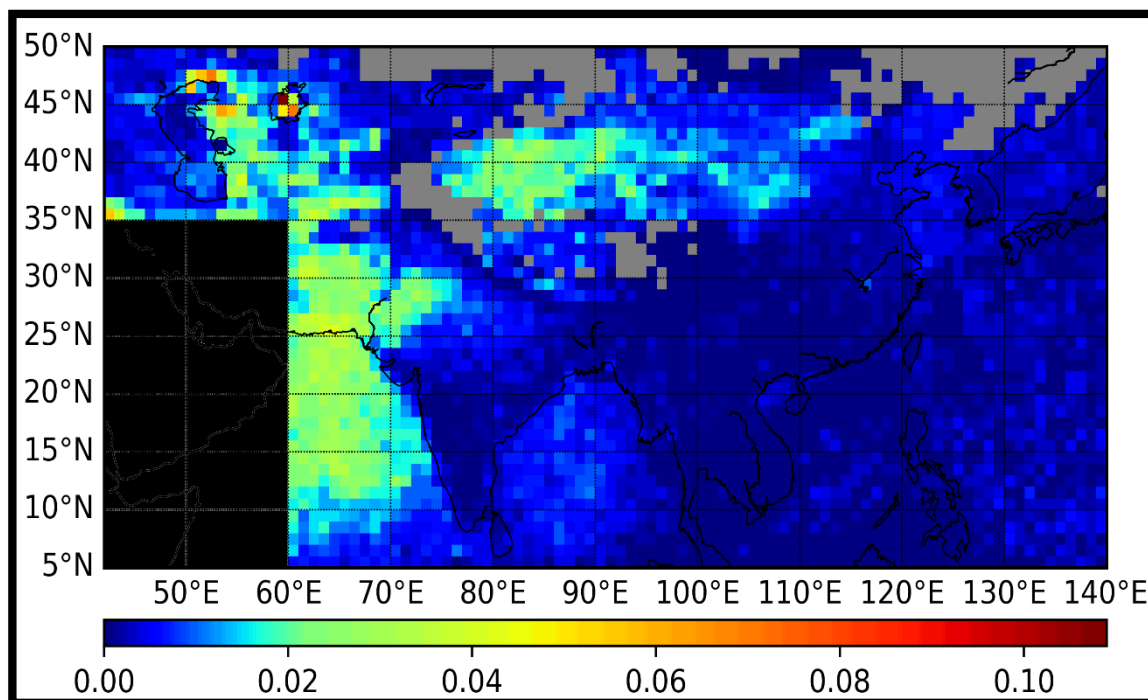
**Σχήμα 3.4.** Γεωγραφική κατανομή της τυπικής απόκλισης (STDV) της μέσης ετήσιας απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των ακραίων επεισοδίων σκόνης (EDAEs, επεισόδια/έτος) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας κατά την περίοδο 2005-2021. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

Ίσως, πιο αντιπροσωπευτική από την απόλυτη είναι η σχετική συχνότητα εμφάνισης επεισοδίων σκόνης (Εξίσωση 2.2), καθώς η πρώτη δε λαμβάνει υπόψιν τον αριθμό των ημερών κατά τις οποίες λειτούργησε ο αλγόριθμος, ένας αριθμός που μπορεί να ποικίλει από περιοχή σε περιοχή. Η σχετική συχνότητα εμφάνισης παρέχεται σε σχέση με τον αριθμό των ημερών του έτους κατά τις οποίες ο αλγόριθμος λειτούργησε και έδωσε αποτελέσματα. Στα Σχήματα 3.5 και 3.6 παρουσιάζονται οι γεωγραφικές κατανομές της μέσης ετήσιας κλιματολογικής σχετικής συχνότητας εμφάνισης των ισχυρών επεισοδίων σκόνης (SDAEs) και της αντίστοιχης τυπικής απόκλισης (STDV). Γενικά, τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά της σχετικής συχνότητας εμφάνισης είναι πολύ όμοια με εκείνα της απόλυτης συχνότητας, πράγμα που δείχνει ότι ο αλγόριθμος λειτούργησε πρακτικά για ίδιο αριθμό ημερών σε όλη την περιοχή μελέτης. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα, πολύ μεγάλες τιμές (μέχρι και 25%) παρατηρούνται στη Λίμνη Αράλη, σε μια αρκετά περιορισμένη περιοχή. Ουσιαστικά, οι μεγαλύτερες τιμές (από 6 έως 12%) παρατηρούνται στην έρημο Τακλαμακάν, την Αραβική Θάλασσα και μεγάλο μέρος του Πακιστάν, ενώ μεγάλες τιμές (από περίπου 3 έως 12%) παρατηρούνται πάνω από την έρημο Ταρ και το αριστερό τμήμα της ερήμου Γκόμπι. Μικρότερες τιμές (<4%) εμφανίζονται πάνω από τις ερημικές περιοχές στα ανατολικά της Κασπίας Θάλασσας και ακόμη μικρότερες (2%) στον Κόλπο της Βεγγάλης, ενώ στην υπόλοιπη περιοχή μελέτης οι τιμές είναι μηδενικές. Σε ό,τι αφορά στην από έτος σε έτος μεταβολή (STDV) της σχετικής συχνότητας εμφάνισης των ισχυρών επεισοδίων σκόνης,

διαπιστώνεται ότι βρέθηκε και για την απόλυτη συχνότητα, δηλαδή ότι αυτή είναι μεγαλύτερη εκεί όπου παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές σχετικής συχνότητας, φτάνοντας τιμές κυρίως έως και 5%, αλλά και μέγιστες τιμές έως 12%.

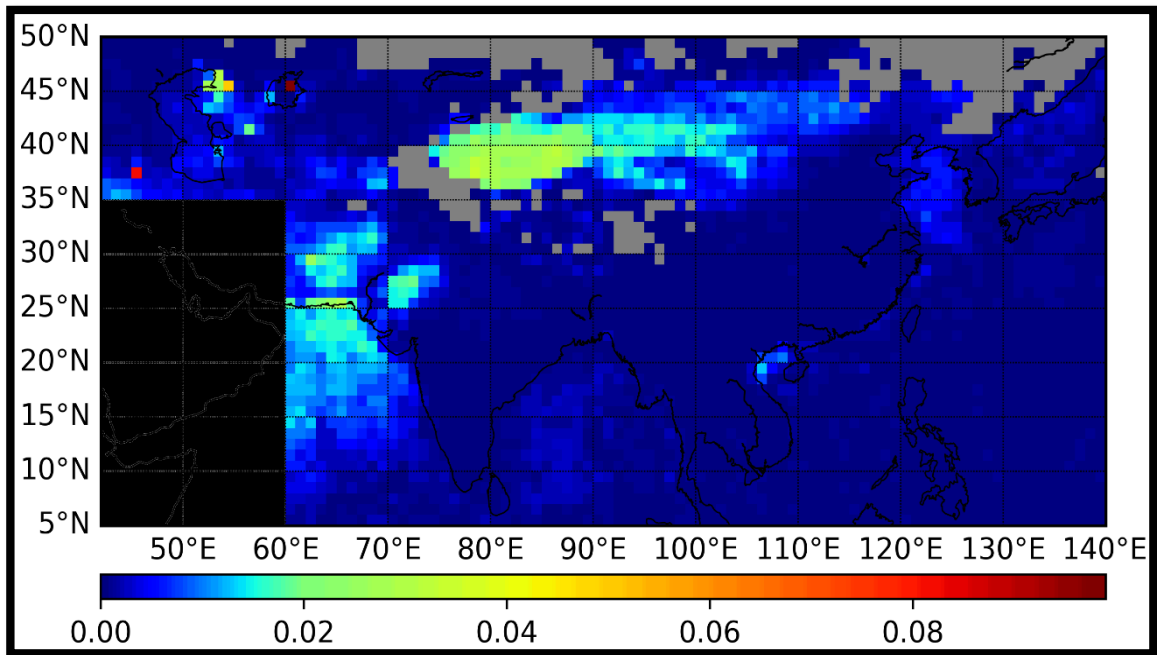


**Σχήμα 3.5.** Γεωγραφική κατανομή της κλιματολογικής (για την περίοδο 2005-2021) μέσης ετήσιας σχετικής συχνότητας εμφάνισης ισχυρών επεισοδίων σκόνης (SDAEs) (υπολογισμένης σε σχέση με τον αριθμό των ημερών ανά έτος για τις οποίες ήταν διαθέσιμα τα δορυφορικά δεδομένα και δούλεψε ο αλγόριθμος) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

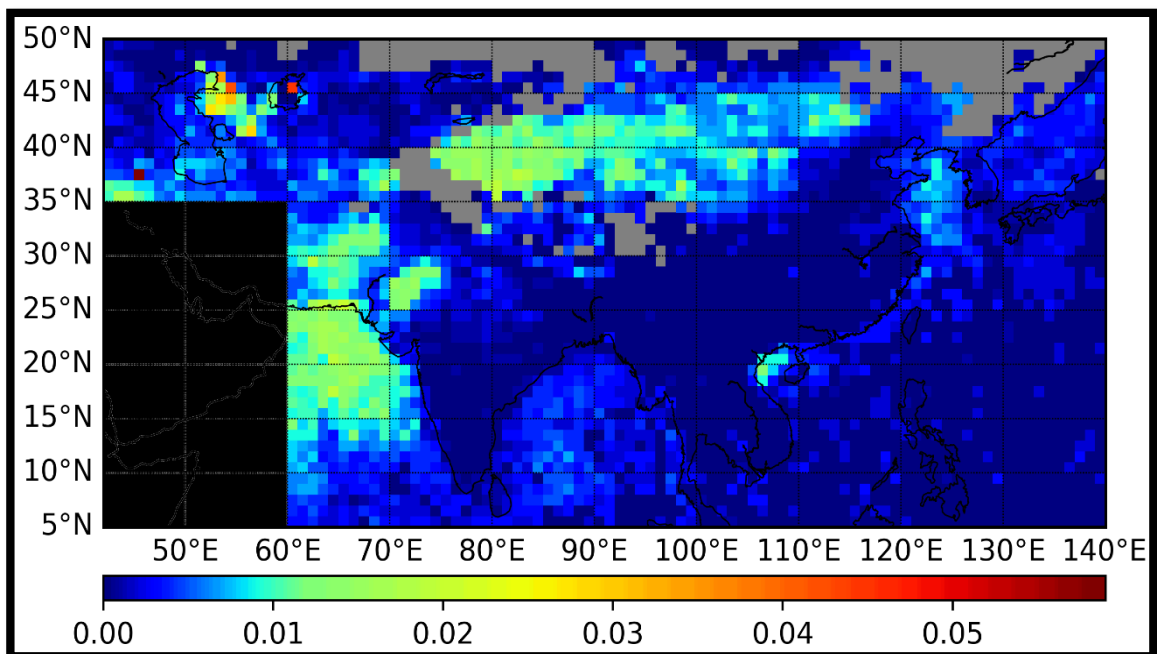


**Σχήμα 3.6.** Γεωγραφική κατανομή της τυπικής απόκλισης (STDV) της κλιματολογικής (για την περίοδο 2005-2021) μέσης ετήσιας σχετικής συχνότητας εμφάνισης ισχυρών επεισοδίων σκόνης (SDAEs) (υπολογισμένης σε σχέση με τον αριθμό των ημερών ανά έτος για τις οποίες ήταν διαθέσιμα τα δορυφορικά δεδομένα και δούλεψε ο αλγόριθμος) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

Οι αντίστοιχες με τα Σχήματα 3.5 και 3.6 κατανομές της σχετικής συχνότητας εμφάνισης, αλλά για τα ακραία επεισόδια σκόνης, παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.7 και 3.8. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7, η κατανομή της σχετικής συχνότητας των ακραίων επεισοδίων σκόνης στην Ασία παρουσιάζει παρόμοια γεωγραφικά χαρακτηριστικά τόσο με εκείνη της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης ακραίων επεισοδίων (Σχήμα 3.3) όσο και με εκείνη των ισχυρών επεισοδίων (Σχήμα 3.1). Με εξαίρεση μεμονωμένες περιοχές με μέγιστες τιμές (>5%, κόκκινα χρώματα) οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται κυρίως πάνω από την έρημο Τακλαμακάν (2 με 4%) και λιγότερο πάνω από την Ταρ (1-3%), καθώς και πάνω από την Αραβική Θάλασσα και τμήματα του Πακιστάν (έως 3%). Μεγάλες τιμές (έως 0.025%) σημειώνονται επίσης στις ερήμους Μπαντέιν Τζάραν (Badain Jaran) και Τέντζερ (Tengger), ενώ στις υπόλοιπες περιοχές της Ασίας δεν έχουν καταγραφεί ακραία επεισόδια. Και πάλι, η μεγαλύτερη διαχρονική μεταβλητότητα (μεγαλύτερες τιμές STDV) της σχετικής συχνότητας εμφάνισης ακραίων επεισοδίων σκόνης παρατηρούνται πάνω από τις περιοχές με τις μεγαλύτερες συχνότητες εμφάνισης.



**Σχήμα 3.7.** Γεωγραφική κατανομή της κλιματολογικής (για την περίοδο 2005-2021) μέσης ετήσιας σχετικής συχνότητας εμφάνισης ακραίων επεισοδίων σκόνης (EDAEs) (υπολογισμένης σε σχέση με τον αριθμό των ημερών ανά έτος για τις οποίες ήταν διαθέσιμα τα δορυφορικά δεδομένα και δούλεψε ο αλγόριθμος) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

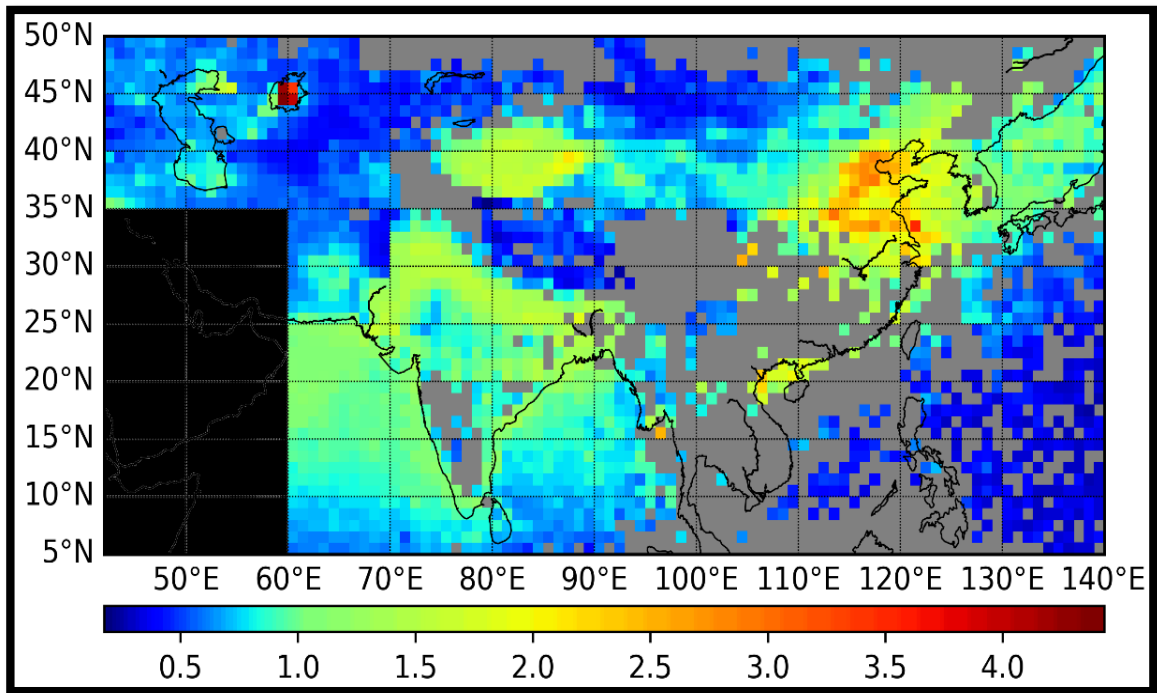


**Σχήμα 3.8.** Γεωγραφική κατανομή της τυπικής απόκλισης (STDV) της κλιματολογικής (για την περίοδο 2005-2021) μέσης ετήσιας σχετικής συχνότητας εμφάνισης ακραίων επεισοδίων σκόνης (EDAEs) (υπολογισμένης σε σχέση με τον αριθμό των ημερών ανά έτος για τις οποίες ήταν διαθέσιμα τα δορυφορικά δεδομένα και δούλεψε ο αλγόριθμος) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

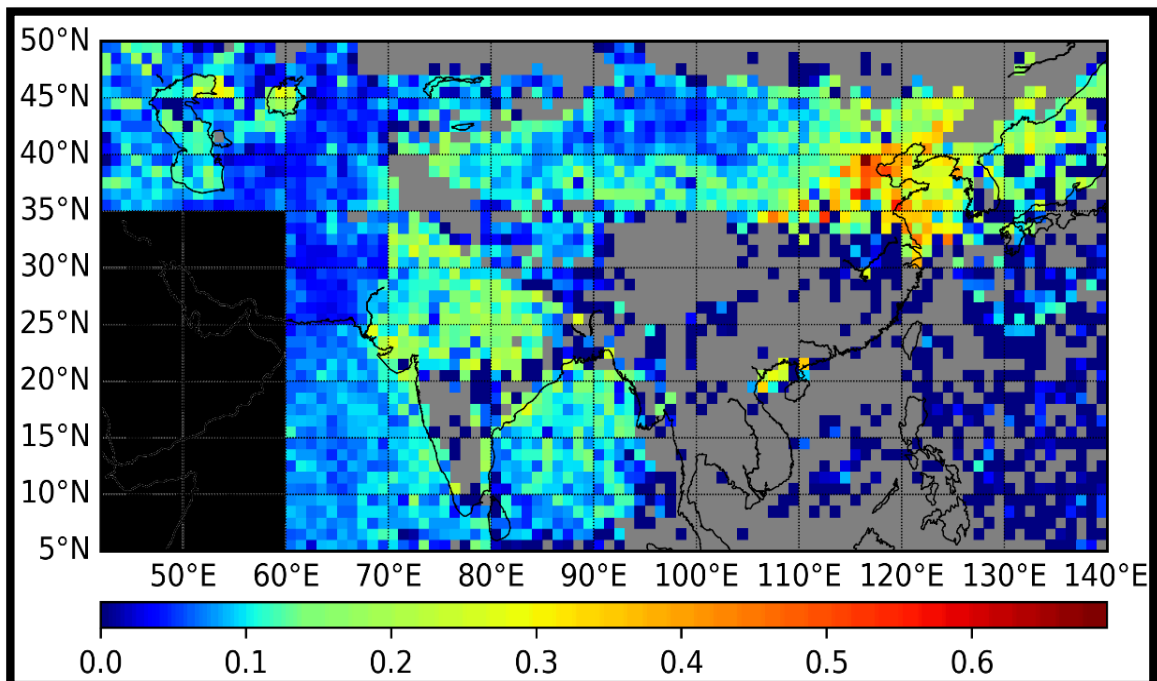
### *Ένταση (οπτικό βάθος) επεισοδίων σκόνης*

Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται οι μέσες κλιματολογικές γεωγραφικές κατανομές της έντασης των ισχυρών επεισοδίων αερολυμάτων ερημικής σκόνης (SDAEs) (Σχήμα 3.9) και της αντίστοιχης τυπικής απόκλισης (STDV, Σχήμα 3.10). Υπενθυμίζεται ότι η ένταση είναι εκπεφρασμένη σε τιμές οπτικού βάθους σκόνης, καθώς το οπτικό βάθος είναι αντιπροσωπευτικό του φορτίου των αερολυμάτων. Οι μεγαλύτερες τιμές DOD σημειώνονται στη βορειοανατολική Κίνα, στα νοτιοδυτικά τμήματα της ερήμου Γκόμπι και την Κίτρινη Θάλασσα, με τιμές από 2.0 έως 3.3 (κίτρινες και πορτοκαλί αποχρώσεις). Ακολουθούν οι έρημοι Τακλαμακάν και Ταρ, η Αραβική Θάλασσα και ο Κόλπος της Βεγγάλης, με τιμές από περίπου 1 έως 2 (πράσινα χρώματα). Στις υπόλοιπες περιοχές οι τιμές είναι μικρότερες του 1. Πολύ μεγάλες τιμές (έως και 4) παρατηρούνται στη λίμνη Αράλη. Ο κύριος λόγος είναι ότι τις τελευταίες δεκαετίες λαμβάνει χώρα η σταδιακή αποξήρανση της λίμνης, εξαιτίας της εκτροπής των ποταμών που την εφοδίαζαν, μετατρέποντας σε ερημική περιοχή, δηλαδή μια νέα πηγή σκόνης (Breckle & Wucherer, 2012; White, 2013; Loodin, 2020; Doede & DeGuzman, 2020). Αυτό εξηγεί τις αυξημένες τιμές του οπτικού βάθους έναντι γειτονικών περιοχών.

Επισημαίνεται, ότι η μεγάλη ένταση των ισχυρών επεισοδίων σκόνης στη βορειοανατολική Κίνα δε συνάδει με τις πολύ μικρές συχνότητες εμφάνισης τέτοιων επεισοδίων εκεί, ενώ, αντίθετα, η ένταση των ισχυρών επεισοδίων στις περιοχές με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης δεν είναι η μεγαλύτερη. Αυτό δεν είναι παράδοξο, δεδομένου ότι η συχνότητα και η ένταση (το φορτίο) των επεισοδίων σκόνης είναι ανεξάρτητες παράμετροι και δε σχετίζονται μεταξύ τους, καθώς καθορίζονται/καθοδηγούνται από διαφορετικές παραμέτρους/διαφορετικούς παράγοντες. Εν προκειμένω, αυτό που συμβαίνει είναι ότι λαμβάνουν χώρα λίγα επεισόδια μεγάλης έντασης. Στις περιπτώσεις αυτές το φορτίο των αερολυμάτων σκόνης προστίθεται στο ήδη μεγάλο φορτίο αερολυμάτων που υπάρχει στις ανθρωπογενείς περιοχές της ανατολικής Ασίας και ιδιαίτερα στην ευρύτερη περιοχή του Πεκίνου. Η μεγαλύτερη διαχρονική μεταβλητότητα της έντασης των ισχυρών επεισοδίων σκόνης στην Ασία, δηλαδή οι μεγαλύτερες τιμές της αντίστοιχης τυπικής απόκλισης, παρατηρούνται εκεί όπου λαμβάνουν χώρα και τα εντονότερα ισχυρά επεισόδια. Έτσι, οι μέγιστες τιμές (>0.3 και έως 0.6-0.7) σημειώνονται στη βορειοανατολική Κίνα και πιο συγκεκριμένα στην ευρύτερη περιοχή του Πεκίνου και στην Κίτρινη Θάλασσα.



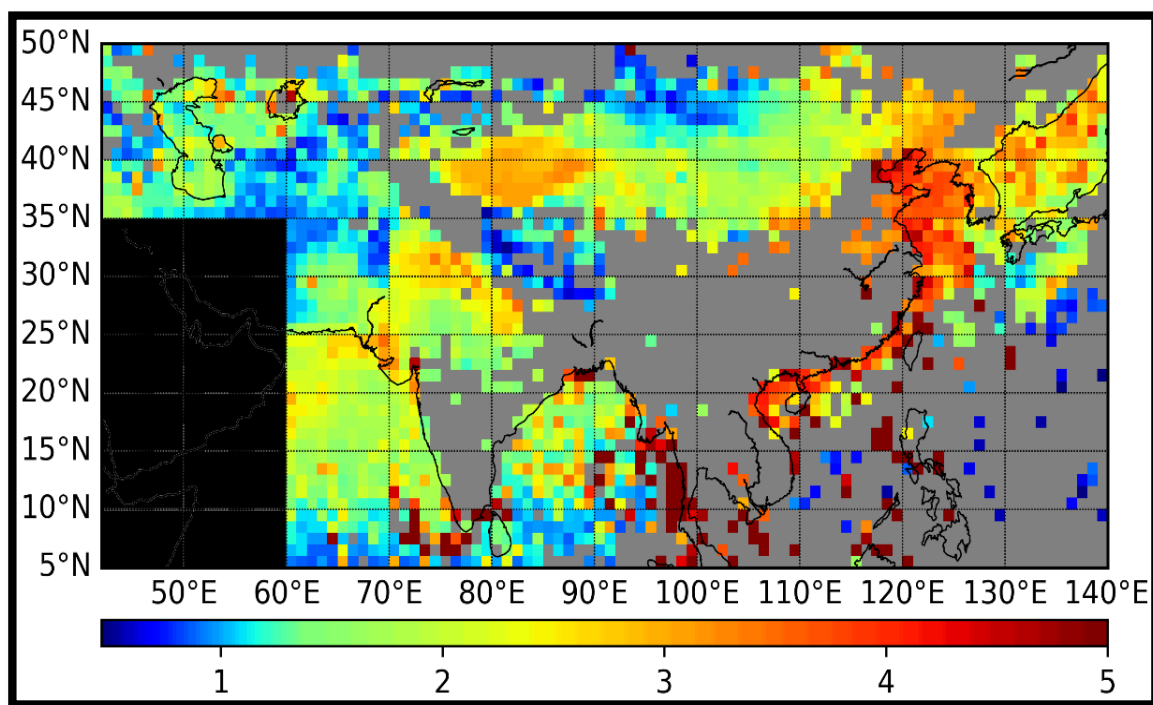
**Σχήμα 3.9.** Γεωγραφική κατανομή της μέσης ετήσιας κλιματολογικής (για την περίοδο 2005-2021) τιμής του οπτικού βάθους ερημικής σκόνης (DOD) για τα ισχυρά επεισόδια (SDAEs) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων ή δε συμβαίνουν επεισόδια. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.



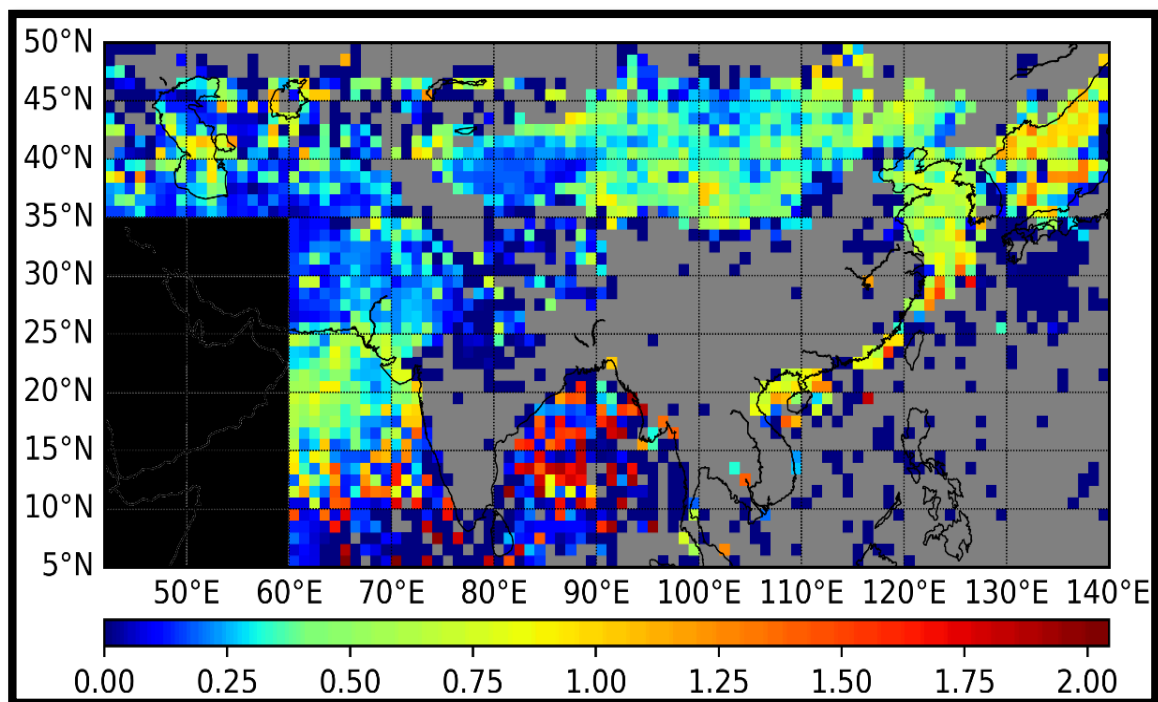
**Σχήμα 3.10.** Γεωγραφική κατανομή της τυπικής απόκλισης (STDV) της μέσης ετήσιας κλιματολογικής (για την περίοδο 2005-2021) τιμής του οπτικού βάθους ερημικής σκόνης (DOD) για τα ισχυρά επεισόδια (SDAEs) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων ή δε συμβαίνουν επεισόδια. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.



Το μέσο οπτικό βάθος των αερολυμάτων για τα ακραία επεισόδια ερημικής σκόνης είναι μεγαλύτερο στις παράκτιες και θαλάσσιες περιοχές πλησίον των ακτών της ανατολικής Ασίας, με τιμές από 3.5 έως 5 (Σχήμα 3.11). Υψηλές τιμές έχουμε και στην Κίτρινη Θάλασσα (3.5 με 4.5), ενώ ακολουθεί η Θάλασσα της Ιαπωνίας (θαλάσσια περιοχή ανάμεσα στην Ιαπωνία και τη χερσόνησο της Κορέας) και η έρημος Τακλαμακάν, με τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 2.5-3.3. Στις παραπάνω περιοχές η συχνότητα εμφάνισης επεισοδίων (Σχήμα 3.3) είναι 1-3 επεισόδια/έτος, δηλαδή είναι μικρότερη από τις τιμές των κύριων ερημικών περιοχών-πηγών σκόνης (4-10 επεισόδια/έτος). Αυτό σημαίνει ότι η μέση τιμή του οπτικού βάθους προέρχεται από μικρό αριθμό επεισοδίων, αλλά με μεγάλη ένταση. Μεγάλες τιμές οπτικού βάθους ( $\approx 2.5$ ) σημειώνονται και σε ορισμένες περιοχές πλησίον της Κασπίας εξαιτίας της μεταφοράς σκόνης από τις διπλανές ερημικές περιοχές. Η ισχυρότερη διαχρονική μεταβλητότητα της έντασης των ακραίων επεισοδίων ερημικής σκόνης, δηλαδή οι μεγαλύτερες τιμές τυπικής απόκλισης του φορτίου (οπτικού βάθους) των ακραίων επεισοδίων ερημικής σκόνης ( $>1.25$ , Σχήμα 3.12), εμφανίζεται κυρίως στον Κόλπο της Βεγγάλης και λιγότερο στα νότια τμήματα της Αραβικής Θάλασσας και σε περιορισμένες περιοχές της Κίτρινης Θάλασσας και της Θάλασσας της Ιαπωνίας.



**Σχήμα 3.11.** Γεωγραφική κατανομή της μέσης ετήσιας κλιματολογικής (για την περίοδο 2005-2021) τιμής του οπτικού βάθους ερημικής σκόνης (DOD) για τα ακραία επεισόδια (EDAEs) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Με γκρι 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.



**Σχήμα 3.12.** Γεωγραφική κατανομή της τυπικής απόκλισης (STDV) της μέσης ετήσιας κλιματολογικής (για την περίοδο 2005-2021) τιμής του οπτικού βάθους ερημικής σκόνης (DOD) για τα ακραία επεισόδια (EDAEs) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Με γκρι 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 Μέσες μηνιαίες κλιματολογικές κατανομές

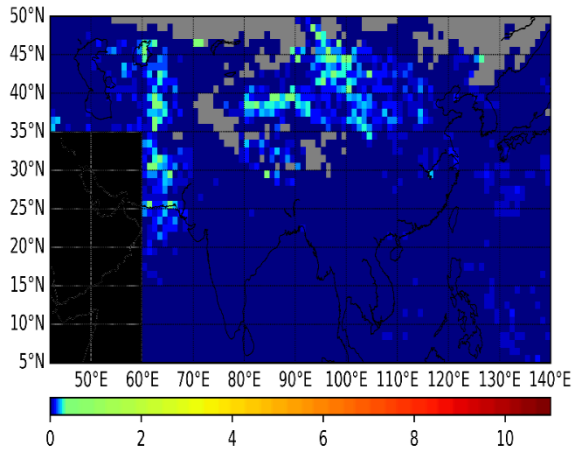
Μετά την εξέταση των χαρακτηριστικών (συχνότητας εμφάνισης και έντασης) των ισχυρών και ακραίων επεισοδίων σκόνης στην Ασία για την περίοδο 2005-2021 σε ετήσια βάση, παρουσιάζονται στην παρούσα ενότητα τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά σε μηνιαία βάση, ώστε να μελετηθεί αναλυτικά, κατά τόπους και για όλη την περιοχή, ο εποχικός κύκλος των επεισοδίων. Τα αποτελέσματα δίνονται ξεχωριστά για τα ακραία και τα ισχυρά επεισόδια.

#### *Συχνότητα εμφάνισης επεισοδίων σκόνης*

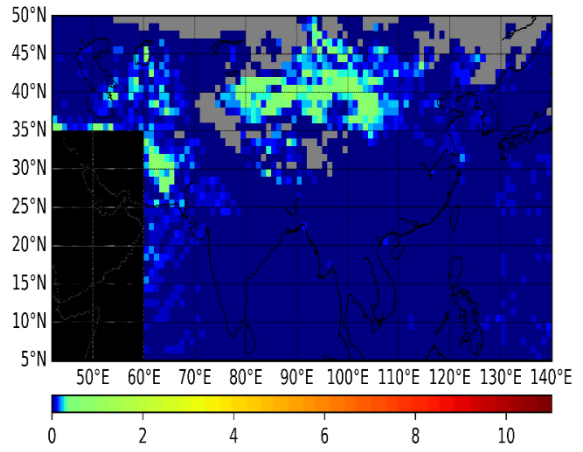
Από τα αποτελέσματα για την απόλυτη συχνότητα εμφάνισης των ισχυρών και των ακραίων επεισοδίων σκόνης (Σχήματα 3.13 και 3.14, αντίστοιχα), φαίνεται ότι υπάρχει και για τα δύο ένας σαφής ενδοετήσιος κύκλος, με ελάχιστο το φθινόπωρο και το χειμώνα, πάνω από ολόκληρη την περιοχή μελέτης και μέγιστο την άνοιξη ή/και το καλοκαίρι. Οι μέγιστες συχνότητες φτάνουν σε τιμές έως και περίπου 11 ισχυρά και 4.6 ακραία επεισόδια ανά μήνα. Ειδικότερα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.13, τον Ιανουάριο και το Φεβρουάριο σχεδόν όλη η περιοχή μελέτης είναι καλυμμένη με μπλε σκούρο χρώμα, το οποίο αντιστοιχεί σε μηδενικές

συχνότητες εμφάνισης. Εξαιρέση αποτελούν οι περιοχές των ερήμων Τακλαμακάν (ιδιαίτερα) και Γκόμπι (λιγότερο), καθώς και κάποιες περιοχές του Πακιστάν και Αφγανιστάν, όπου φαίνεται να εμφανίζεται κατά μέσο όρο έως 1 ισχυρό επεισόδιο το μήνα. Το Μάρτιο και τον Απρίλιο η συχνότητα εμφάνισης αυξάνεται αρκετά στις ερήμους Τακλαμακάν και Γκόμπι, όπου εμφανίζονται έως και 3-7 επεισόδια/μήνα. Τους μήνες αυτούς παρατηρούνται επίσης μη-μηδενικές συχνότητες εμφάνισης στη Β. Κίνα και προς την Κίτρινη Θάλασσα, οι οποίες συνδέονται με τη μεταφορά σκόνης από τις ερήμους Τακλαμακάν και Γκόμπι προς το Βόρειο Ειρηνικό Ωκεανό (Proestakis et al., 2018). Το Μάιο διατηρούνται οι μεγάλες τιμές της απόλυτης συχνότητας πάνω από τις περιοχές αυτές, ενώ μεγάλες τιμές (έως και 4 επεισόδια/μήνα) εμφανίζονται και πάνω από την πεδιάδα του Ινδο-Γάγγη και το Πακιστάν. Από τον Ιούνιο και καθ' όλο το θέρος, η κατάσταση μεταβάλλεται, καθώς τα ισχυρά επεισόδια σκόνης εμφανίζονται όλο και αραιότερα στις ερημικές περιοχές Τακλαμακάν και Γκόμπι, ενώ, αντίθετα, αυξάνονται στην κοιλάδα του Ινδο-Γάγγη, το Πακιστάν και την Αραβική Θάλασσα. Πιο συγκεκριμένα, τον Ιούνιο οι συχνότητες εμφάνισης πάνω από την Τακλαμακάν και την Γκόμπι δεν ξεπερνούν τα 3 επεισόδια/μήνα, ενώ οι μέγιστες τιμές (έως και 6 επεισόδια/μήνα) καταγράφονται πάνω από την Αραβική Θάλασσα, το Πακιστάν και τον Ινδο-Γάγγη. Η συχνότητα εμφάνισης στις περιοχές αυτές μεγιστοποιείται τον Ιούλιο, όταν οι τιμές φθάνουν τα 9 επεισόδια/μήνα. Η παρουσία σκόνης στην περιοχή αυτή οφείλεται στη μεταφορά της από ερημικές περιοχές της Αραβικής Χερσονήσου (Jin et al., 2018; Kumar et al., 2020), της Κασπίας Θάλασσας (Rashki et al., 2018) και της Αφρικής (Rashki et al., 2019). Ακόμη οφείλεται και στην απουσία βλάστησης και στα εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα βροχόπτωσης, που δε ξεπερνούν τα 0.5mm/έτος και παρουσιάζουν ελάχιστο αργά την άνοιξη και νωρίς το καλοκαίρι (Adler et al., 2003). Από τον Αύγουστο ο αριθμός των επεισοδίων μειώνεται πάνω από ολόκληρη την περιοχή μελέτης, γεγονός που οφείλεται στον μουσσόνα της νότιας Ασίας (South Asian Monsoon) και στις βροχοπτώσεις που αρχίζουν Ιούνιο-Ιούλιο και διαρκούν ως τον Οκτώβριο (Pandey et al, 2017; Jin and Wang, 2018). Έτσι, κατά το τρίμηνο Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος η γεωγραφική κατανομή της συχνότητας εμφάνισης ισχυρών επεισοδίων σκόνης είναι παρόμοια με αυτήν του Ιανουαρίου και του Φεβρουαρίου, με εξαιρετικά μικρές τιμές πάνω από σχεδόν ολόκληρη την περιοχή.

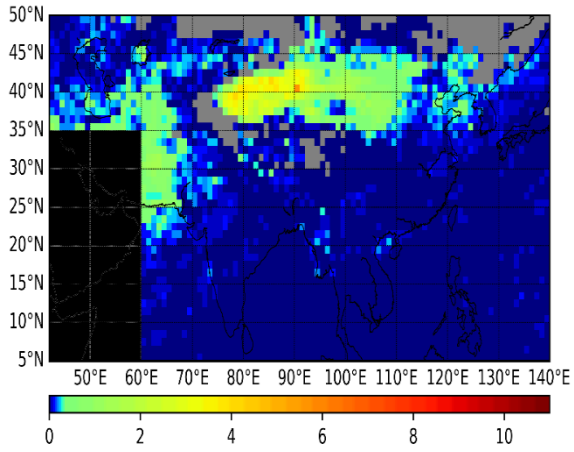
**JANUARY**



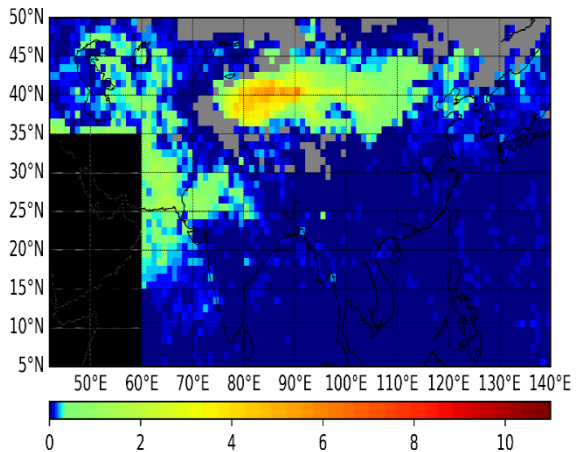
**FEBRUARY**



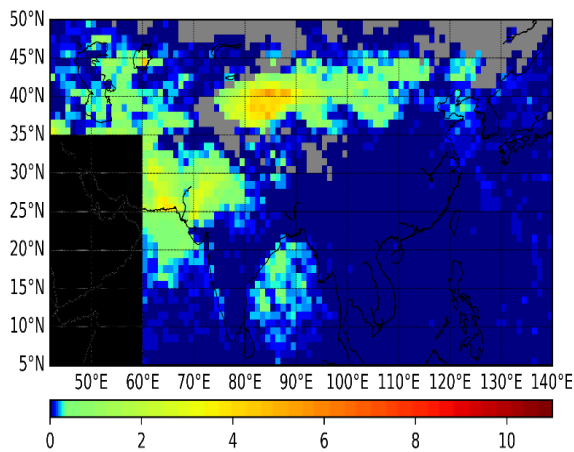
**MARCH**



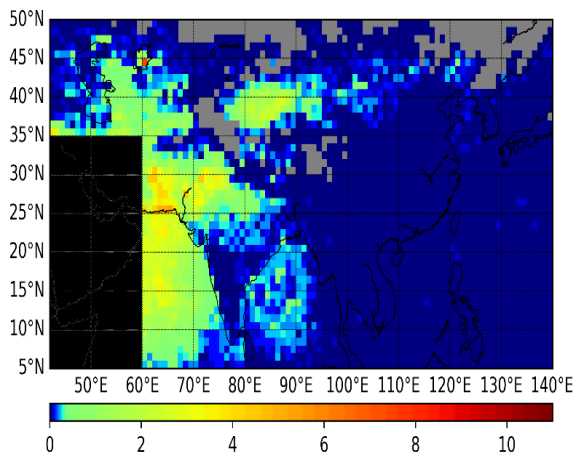
**APRIL**

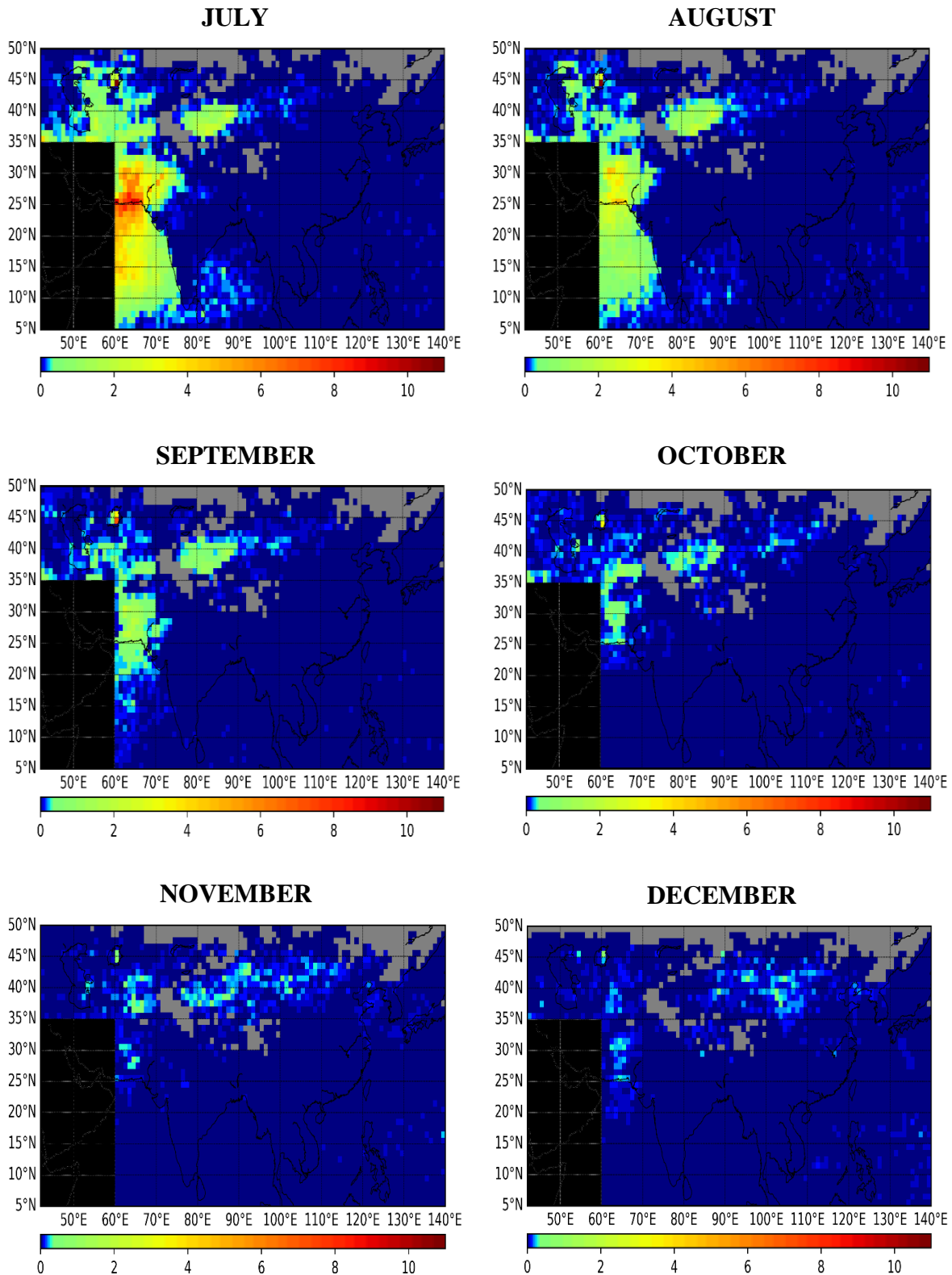


**MAY**



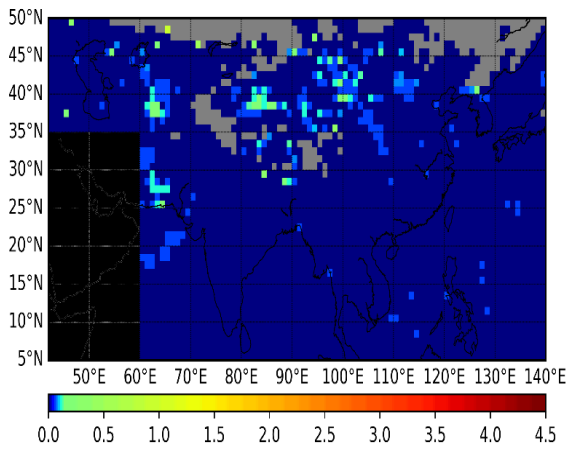
**JUNE**



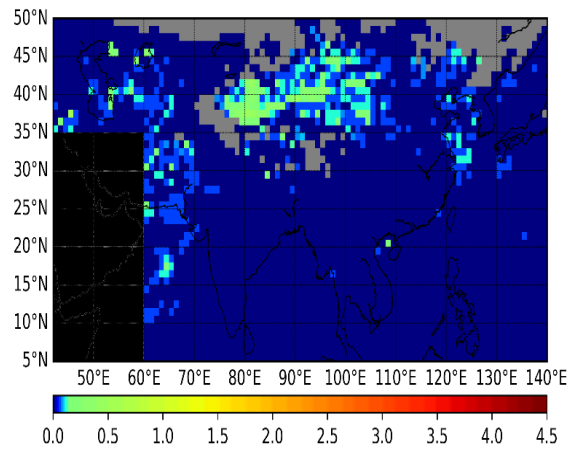


**Σχήμα 3.13.** Γεωγραφική κατανομή της κλιματολογικής (για την περίοδο 2005-2021) μέσης μηνιαίας απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των ισχυρών επεισοδίων ερημικής σκόνης (SDAEs) (επεισόδια/μήνα) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

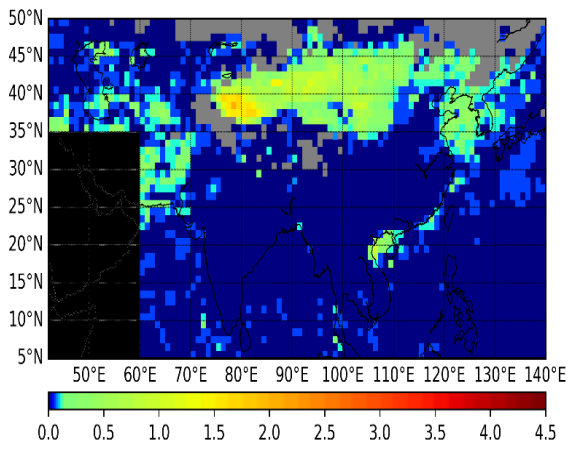
**JANUARY**



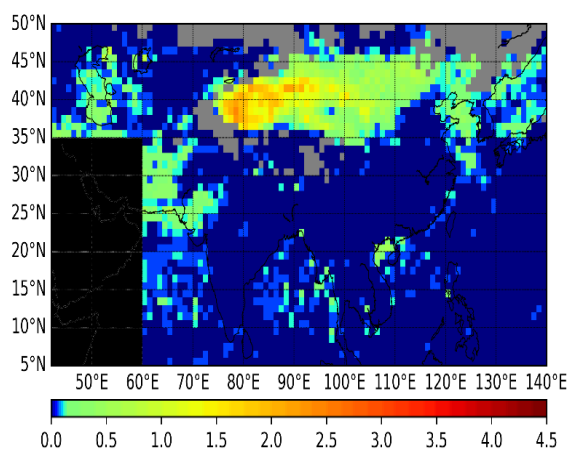
**FEBRUARY**



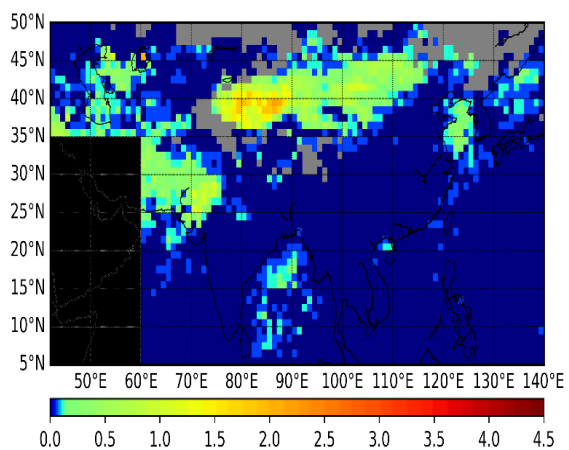
**MARCH**



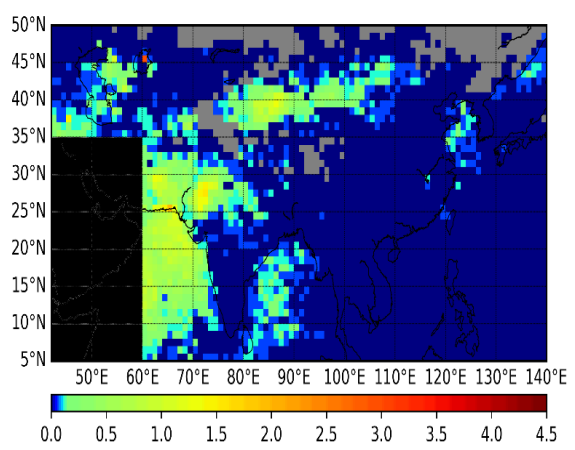
**APRIL**

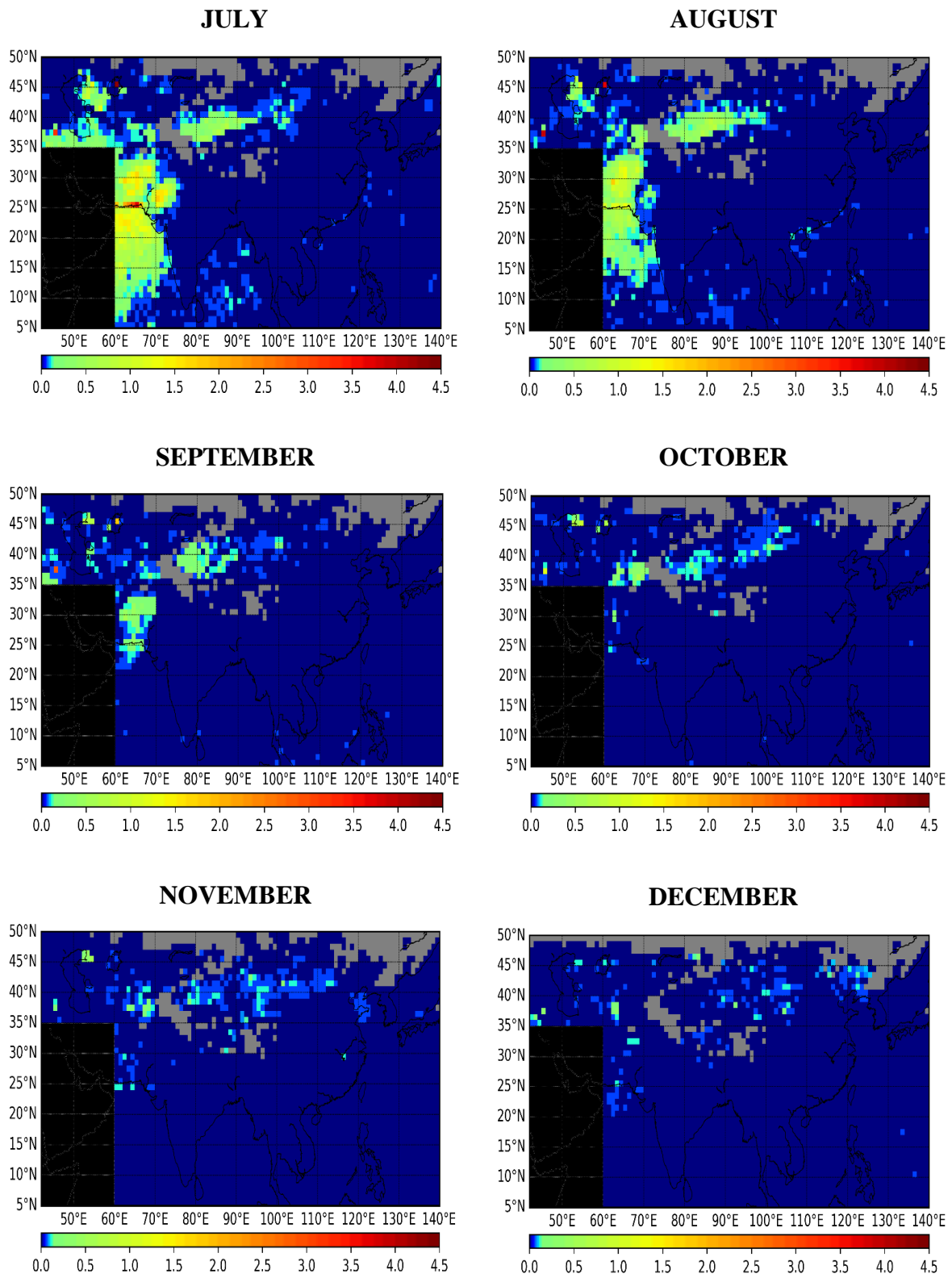


**MAY**



**JUNE**





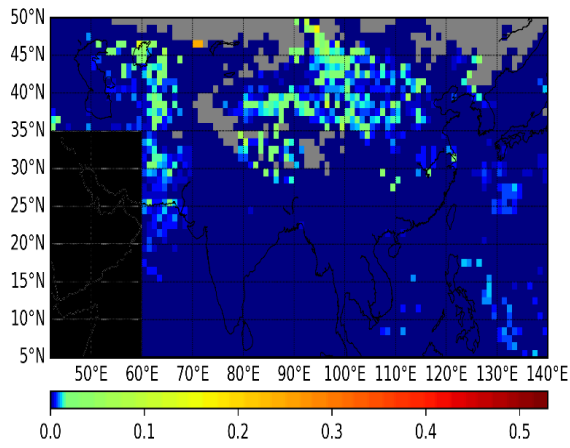
**Σχήμα 3.14.** Γεωγραφική κατανομή της κλιματολογικής (για την περίοδο 2005-2021) μέσης μηνιαίας απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των ακραίων επεισοδίων ερημικής σκόνης (EDAEs, (επεισόδια/μήνα) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

Στο Σχήμα 3.14 παρουσιάζονται οι γεωγραφικές κατανομές της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των ακραίων επεισοδίων ερημικής σκόνης σε μέση μηνιαία βάση. Ο ενδοετήσιος κύκλος και τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά είναι παρόμοια με εκείνα των ισχυρών επεισοδίων. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι στην περίπτωση των ακραίων επεισοδίων σκόνης οι συχνότητες εμφάνισης δεν ξεπερνούν τα περίπου 4 επεισόδια/μήνα. Ειδικότερα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.14, τους χειμερινούς μήνες Δεκέμβριο-Ιανουάριο-Φεβρουάριο σχεδόν όλη η περιοχή μελέτης είναι καλυμμένη με μπλε σκούρο χρώμα, που αντιστοιχεί σε μηδενικές συχνότητες εμφάνισης. Εξάιρεση, όπως και στα ισχυρά επεισόδια, αποτελούν οι περιοχές των ερήμων Τακλαμακάν (ιδιαίτερα) και Γκόμπι (λιγότερο), καθώς και κάποιες περιοχές του Πακιστάν και Αφγανιστάν, όπου φαίνεται να εμφανίζεται κατά μέσο όρο έως 1 ακραίο επεισόδιο το μήνα. Το Μάρτιο και τον Απρίλιο η συχνότητα εμφάνισης αυξάνεται στις ερήμους Τακλαμακάν και Γκόμπι, όπου εμφανίζονται έως και 2-3 επεισόδια/μήνα. Το Μάιο διατηρούνται οι μεγάλες τιμές της απόλυτης συχνότητας πάνω από τις περιοχές αυτές, ενώ ακραία επεισόδια σκόνης (1 επεισόδια/μήνα) εμφανίζονται και πάνω από την Έρημο Ταρ και την πεδιάδα του Ινδο-Γάγγη και το Πακιστάν. Από τον Ιούνιο και καθ' όλο το θέρος, η κατανομή των επεισοδίων μεταβάλλεται, όπως συνέβη και με τα ισχυρά επεισόδια, με τα ακραία επεισόδια σκόνης να εμφανίζονται όλο και αραιότερα στις ερημικές περιοχές Τακλαμακάν και Γκόμπι, ενώ, αντίθετα, αυξάνονται στην κοιλάδα του Ινδο-Γάγγη, το Πακιστάν και την Αραβική Θάλασσα. Πιο συγκεκριμένα, τους μήνες Ιούνιο-Ιούλιο-Αύγουστο οι συχνότητες εμφάνισης πάνω από την Τακλαμακάν και τη Γκόμπι δεν ξεπερνούν τα 0.5-1 επεισόδια/μήνα, ενώ οι μέγιστες τιμές (έως και 3 επεισόδια/μήνα) καταγράφονται πάνω από την Αραβική Θάλασσα, το Πακιστάν και τον Ινδο-Γάγγη. Από το φθινόπωρο ο αριθμός των ακραίων επεισοδίων μειώνεται δραστικά, με τη γεωγραφική κατανομή της συχνότητας εμφάνισης των ακραίων επεισοδίων σκόνης να είναι παρόμοια με αυτή των χειμερινών μηνών, δηλαδή μηδενικές τιμές στο σύνολο της περιοχής μελέτης.

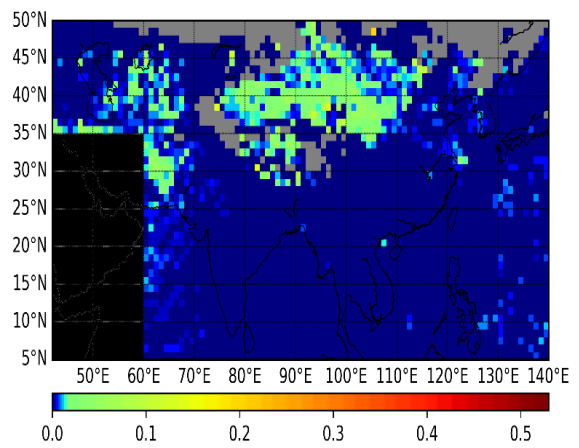
Όπως έγινε και με τα ετήσια αποτελέσματα, έτσι και εδώ, στα Σχήματα 3.15 και 3.16 παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες κλιματολογικές (2005-2021) γεωγραφικές κατανομές της σχετικής συχνότητας εμφάνισης των ισχυρών και των ακραίων επεισοδίων σκόνης στην Ασία, αντίστοιχα. Σύμφωνα, με τα αποτελέσματα, η σχετική συχνότητα τόσο των ισχυρών (Σχήμα 3.15) όσο και των ακραίων (Σχήμα 3.16) επεισοδίων παρουσιάζει κοινά χωροχρονικά χαρακτηριστικά με τις αντίστοιχες απόλυτες συχνότητες εμφάνισης (Σχήματα 3.13 και 3.14), με τις τιμές να φτάνουν έως και το 55% και 20%, αντίστοιχα, των ημερών μήνα για τις οποίες λειτούργησε ο αλγόριθμος. Για τα κοινά αυτά χαρακτηριστικά φαίνεται να υπάρχει εξήγηση από το γεγονός ότι δε συμβαίνει κάποια σημαντική εποχικότητα στη διαθεσιμότητα των δεδομένων εισαγωγής του αλγορίθμου, που παρουσιάζονται στο Σχήμα Π.13. Παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτά που εμφανίζονται στα Σχήματα 3.13-3.16, παρατηρούνται επίσης στους αντίστοιχους χάρτες για τη μηνιαία τυπική απόκλιση της απόλυτης και σχετικής συχνότητας εμφάνισης των ισχυρών και ακραίων επεισοδίων σκόνης, οι οποίοι παρατίθενται στα Σχήματα Π.1-Π.4.



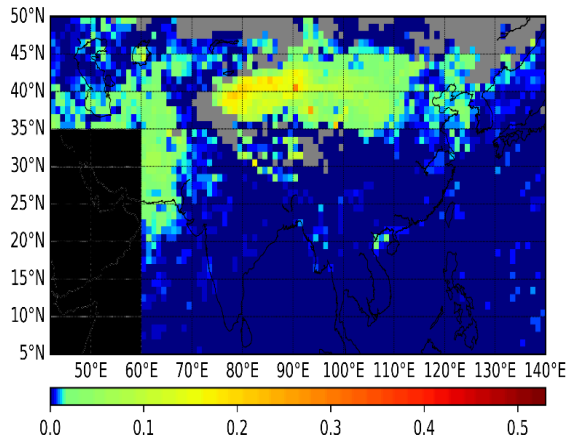
**JANUARY**



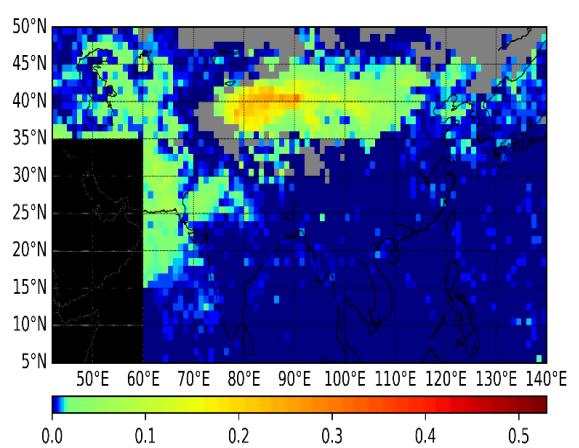
**FEBRUARY**



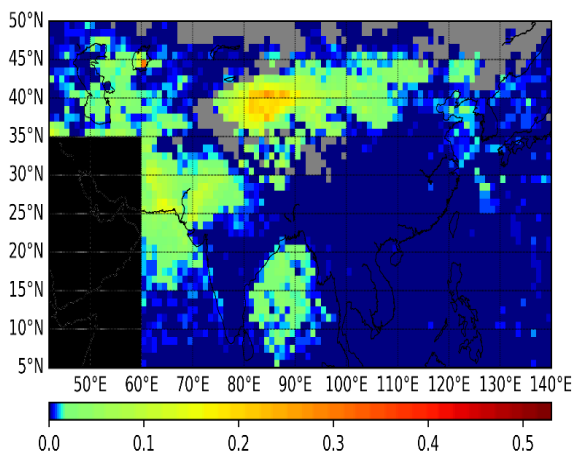
**MARCH**



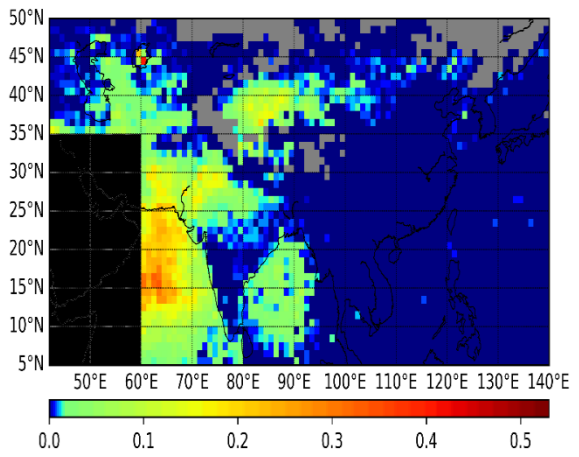
**APRIL**

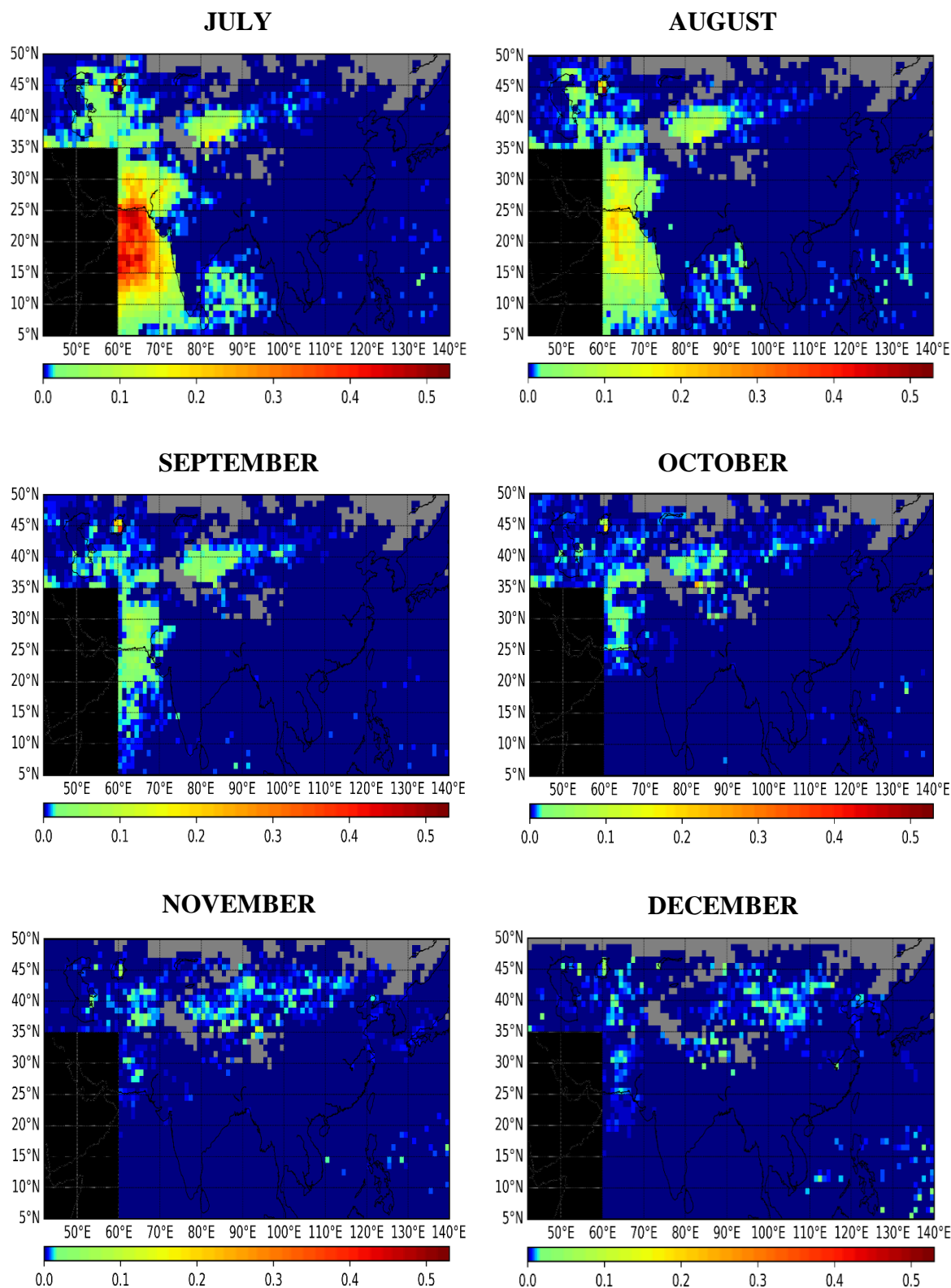


**MAY**



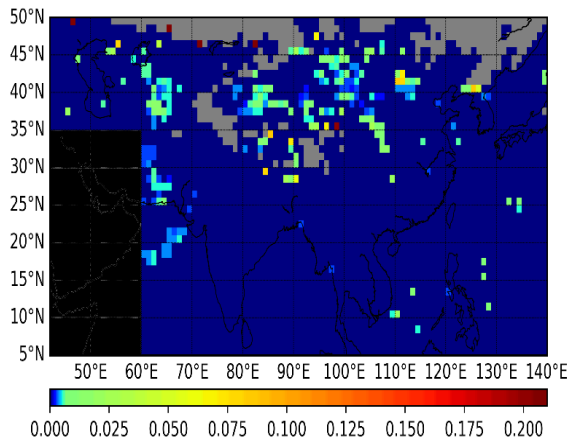
**JUNE**



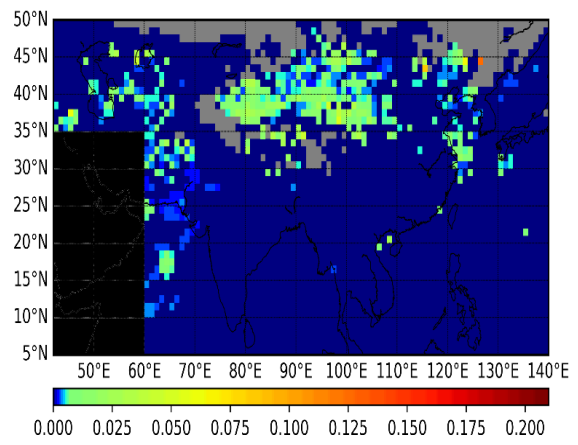


**Σχήμα 3.15.** Γεωγραφική κατανομή της κλιματολογικής (για την περίοδο 2005-2021) μέσης μηνιαίας σχετικής συχνότητας των ισχυρών επεισοδίων ερημικής σκόνης (SDAEs) (υπολογισμένης σε σχέση με τον αριθμό των ημερών ανά μήνα για τις οποίες ήταν διαθέσιμα τα δορυφορικά δεδομένα και δούλεψε ο αλγόριθμος) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

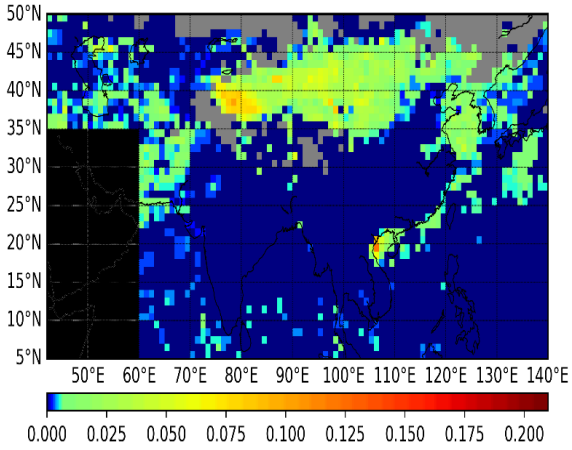
### JANUARY



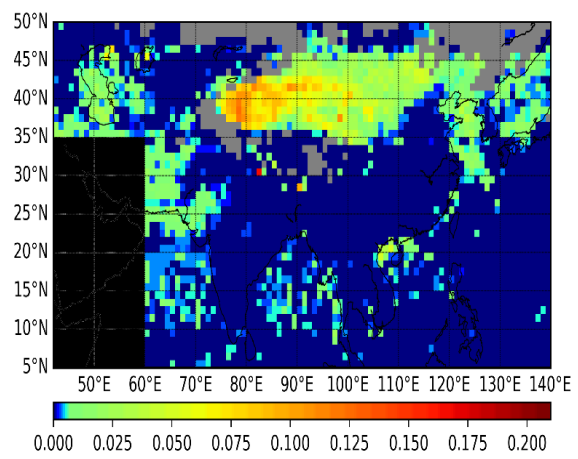
### FEBRUARY



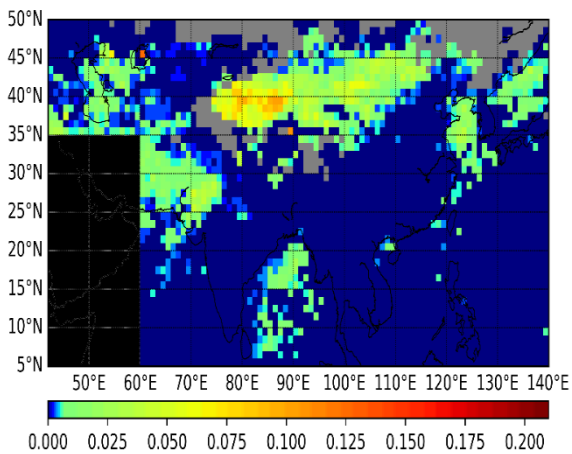
### MARCH



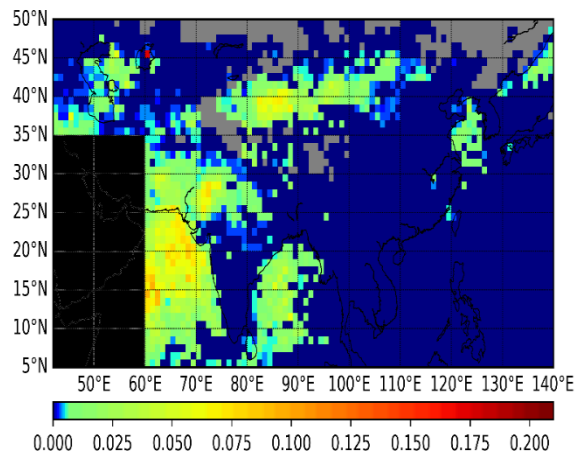
### APRIL

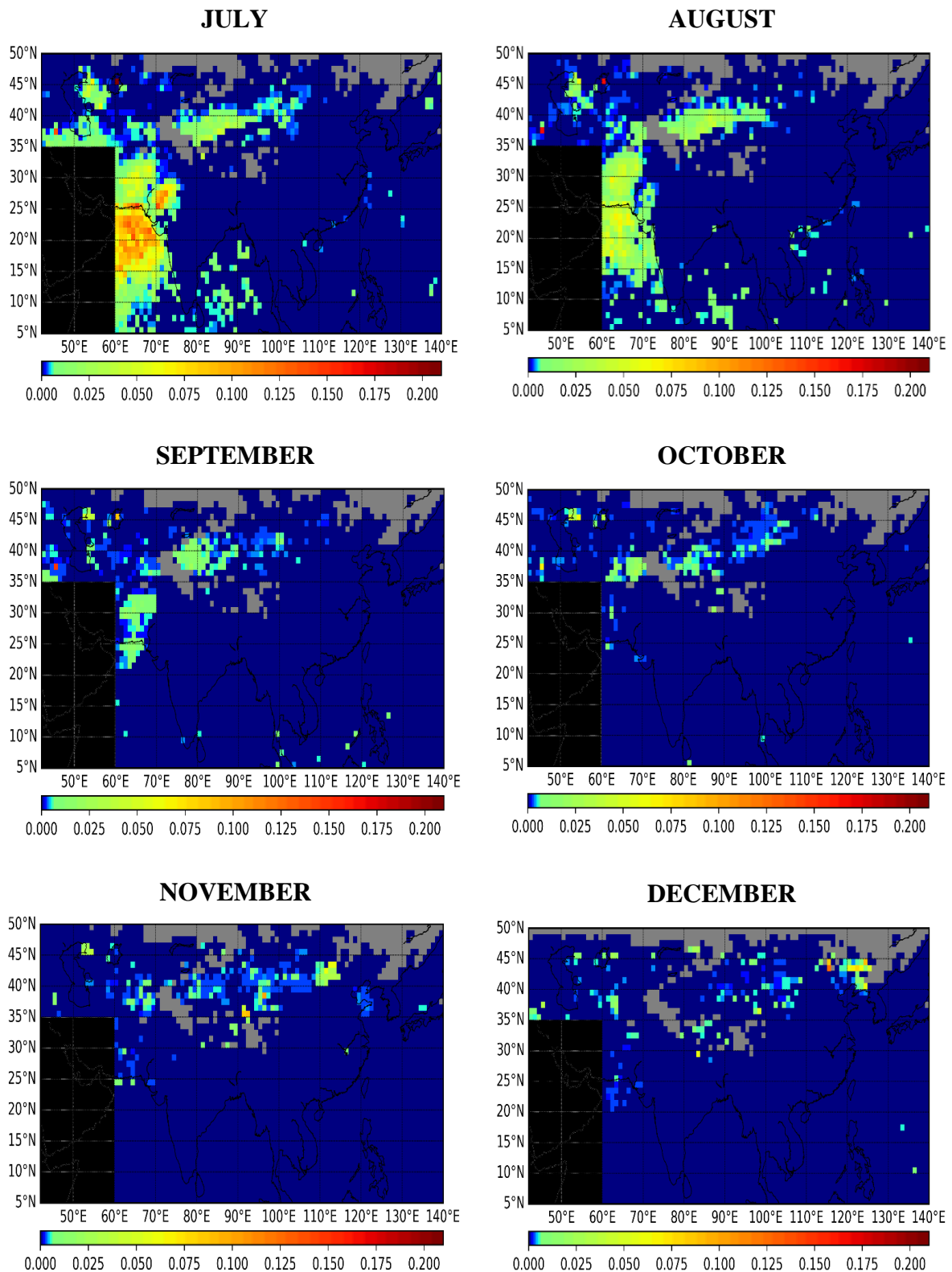


### MAY



### JUNE





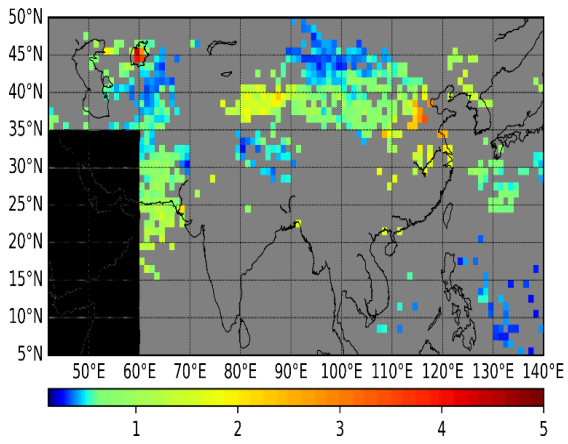
**Σχήμα 3.16.** Γεωγραφική κατανομή της κλιματολογικής (για την περίοδο 2005-2021) μέσης μηνιαίας σχετικής συχνότητας των ακραίων επεισοδίων ερημικής σκόνης (EDAEs) (υπολογισμένης σε σχέση με τον αριθμό των ημερών ανά μήνα για τις οποίες ήταν διαθέσιμα τα δορυφορικά δεδομένα και δούλεψε ο αλγόριθμος) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

## *Ένταση (οπτικό βάθος) επεισοδίων σκόνης*

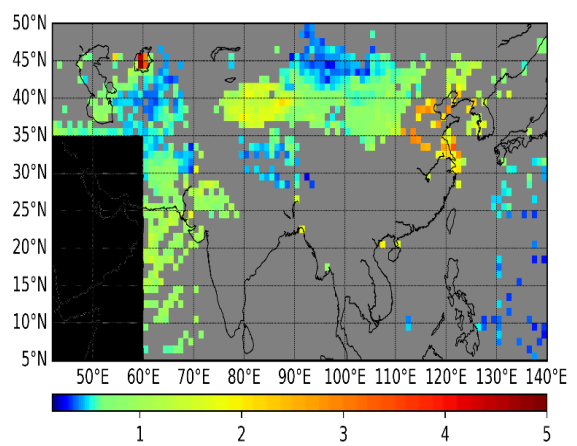
Οι γεωγραφικές κατανομές των μέσων μηνιαίων κλιματολογικών τιμών του οπτικού βάθους σκόνης DOD κατά τη διάρκεια ισχυρών και ακραίων επεισοδίων σκόνης στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας και της Κασπίας Θάλασσας κατά την περίοδο μελέτης (2005-2021) παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.17 και 3.18, αντίστοιχα. Γενικά, παρατηρείται ένας παρόμοιος εποχικός κύκλος με αυτόν που περιγράφηκε πιο πάνω για την απόλυτη και σχετική συχνότητα εμφάνισης επεισοδίων σκόνης, ενώ για τα ισχυρά επεισόδια οι πιο δραστήριες περιοχές φαίνεται να είναι η έρημοι Τακλαμακάν, Γκόμπι, Ταρ, Καρακούμ, Κιζυλκούμ και Αρακούμ, το νότιο Πακιστάν, η Αραβική και η Κίτρινη Θάλασσα. Ωστόσο, παρατηρείται στα Σχήματα 3.17 και 3.18 ότι στην περιοχή μελέτης υπάρχουν αρκετές κυψελίδες που δεν έχουν τιμές (γκρι χρώμα). Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι στις περιοχές αυτές δε συμβαίνουν επεισόδια, οπότε δεν ορίζεται τιμή οπτικού βάθους ίση με μηδέν. Αυτό σημαίνει ότι δεν έχουμε μηδενικές τιμές στους χάρτες και η μη ύπαρξη επεισοδίων λαμβάνεται σαν ελλείπουσα τιμή (missing value) και όχι με μηδέν.

Πιο συγκεκριμένα, οι μέγιστες τιμές του οπτικού βάθους φτάνουν σε τιμή περίπου στο 3.5 για τα ισχυρά και το 5 για τα ακραία επεισόδια. Το DOD λαμβάνει τιμές καθ' όλη τη διάρκεια του έτους κατά κύριο λόγο στην έρημο Τακλαμακάν και στη συνέχεια την έρημο Γκόμπι, τις ερημικές περιοχές ανατολικά και νότια της Κασπίας Θάλασσας (έρημοι Αρακούμ, Κιζυλκούμ και Καρακούμ) και το Πακιστάν. Ειδικότερα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.17, τον Ιανουάριο και το Φεβρουάριο η μεγαλύτερη έκταση της περιοχής μελέτης είναι καλυμμένη με γκρι χρώμα, το οποίο αντιστοιχεί σε μη εμφάνιση επεισοδίων. Εξαιρέση, αποτελούν οι περιοχές των ερήμων Τακλαμακάν και Γκόμπι, ερημικές περιοχές περίξ της λίμνης Αράλης, του Πακιστάν και της Κίτρινης Θάλασσας. Κατά τους ανοιξιάτικους μήνες παράλληλα με την αύξηση της συχνότητας εμφάνισης επεισοδίων, λαμβάνει χώρα και εμφάνιση περιοχών με μη μηδενικό οπτικό βάθος. Χαρακτηριστικά φαίνονται περιοχές με τιμές οπτικού βάθους που φτάνουν κατά μέσο όρο το 2, όπως η κοιλάδα του Κίτρινου Ποταμού, η Κίτρινη Θάλασσα, η πεδιάδα του Ινδο-Γάγγη και η περιοχή νότια της οροσειράς των Ιμαλαΐων. Κατά τους θερινούς μήνες η κατάσταση μεταβάλλεται στη Βόρεια Κίνα και την Κίτρινη Θάλασσα, όπου δεν έχουμε επεισόδια και συνεπώς δεν ορίζεται οπτικό βάθος, ενώ αντίθετα στον Κόλπο της Βεγγάλης και την Αραβική Θάλασσα το DOD έχει τιμές μεταξύ 1 και 1.5, λόγω μεταφορά σκόνης. Τέλος, από το Σεπτέμβριο και μετά, καθώς η δραστηριότητα της σκόνης σταδιακά ελαττώνεται, υπάρχουν τιμές του DOD κυρίως πάνω και σε παρακείμενες στις συνήθεις ερημικές περιοχές, με τιμές χαμηλότερες έναντι της προηγούμενης περιόδου με έντονη δραστηριότητα. Κατά το τρίμηνο Οκτώβριο-Νοέμβριο-Δεκέμβριο οι υψηλότερες κατά μέσο όρο τιμές, έως 1.8-2, του οπτικού βάθους σημειώνονται στην έρημο Τακλαμακάν, τη Βόρεια Κίνα-Κίτρινη Θάλασσα και την Αραβική Θάλασσα ενώ, όμως, το κύριο χαρακτηριστικό του παραπάνω χρονικού διαστήματος είναι ότι το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης καλύπτεται από γκρι χρώμα.

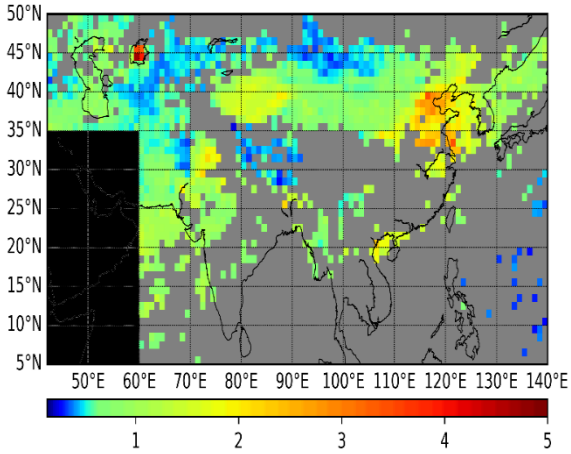
### JANUARY



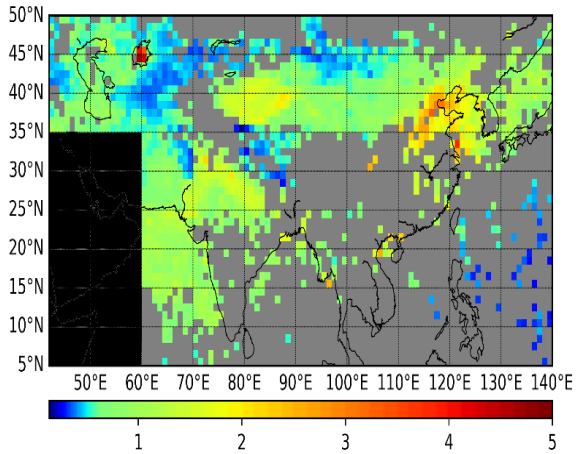
### FEBRUARY



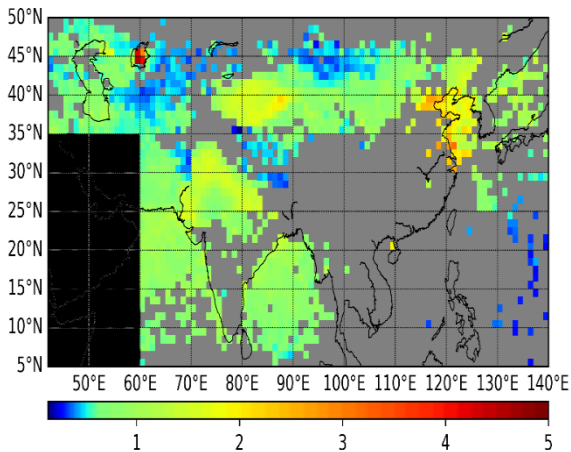
### MARCH



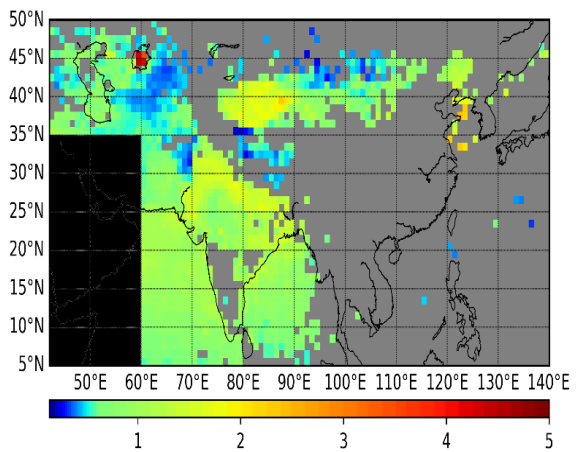
### APRIL

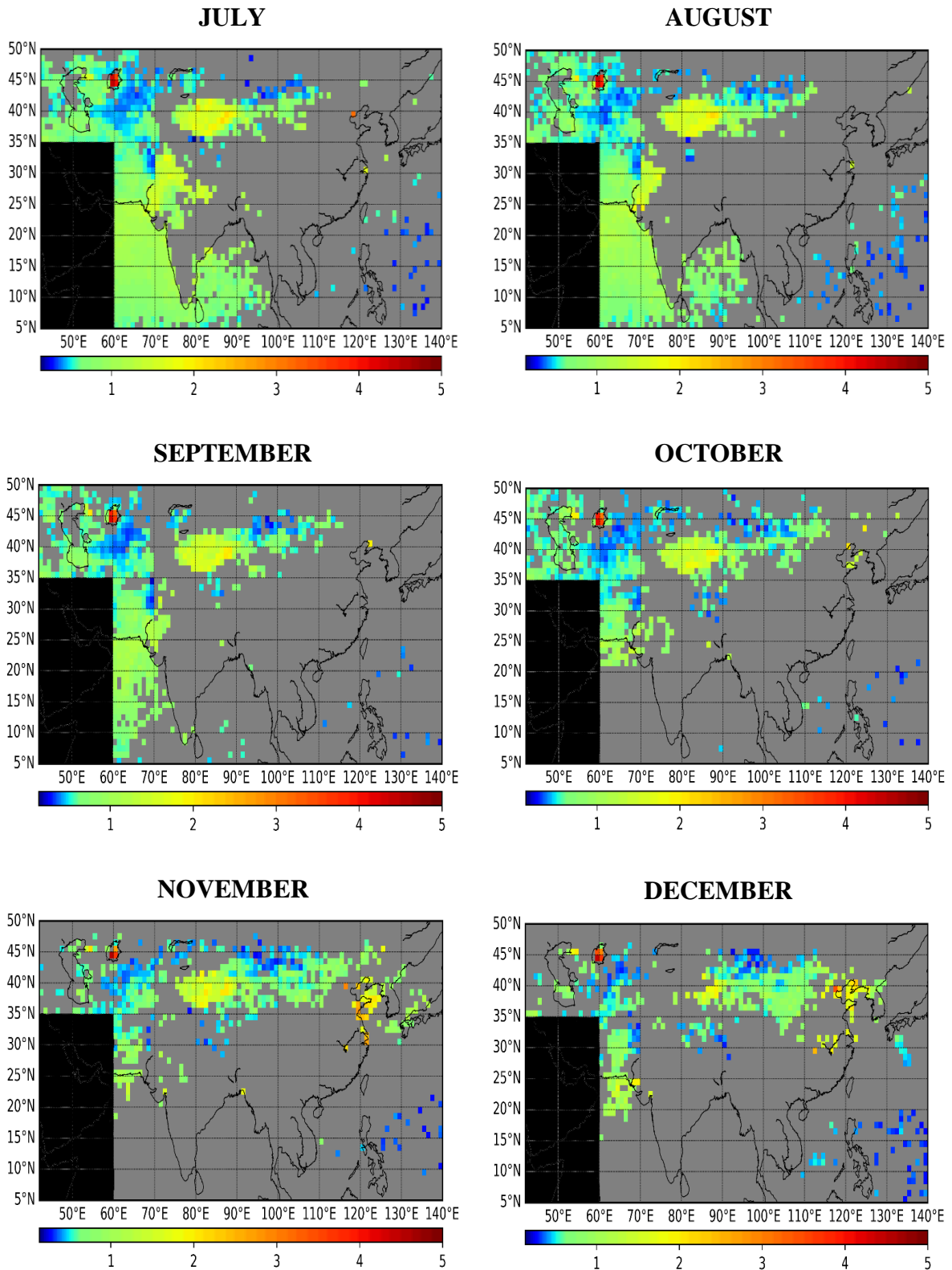


### MAY



### JUNE





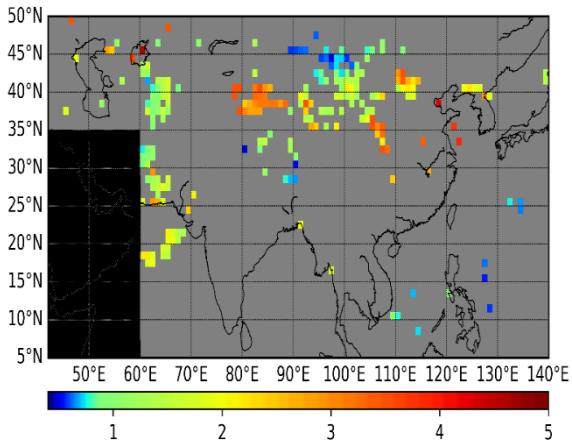
**Σχήμα 3.17.** Γεωγραφική κατανομή των μέσων μηνιαίων τιμών του οπτικού βάθους (DOD) των ισχυρών επεισοδίων ερημικής σκόνης (SDAEs) για την περίοδο 2005-2021. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες είτε ο αλγόριθμος δε λειτούργησε, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων, είτε λειτούργησε αλλά δε συνέβησαν επεισόδια. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

Οι τιμές του οπτικού βάθους σκόνης για τα ακραία επεισόδια (EDAEs) παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.18. Και σε αυτή την περίπτωση δεν έχουμε μηδενικές τιμές στους χάρτες και η απουσία επεισοδίων λαμβάνεται σαν ελλείπουσα τιμή (missing value) και όχι με μηδέν. Σε αντίθεση με τα ισχυρά επεισόδια, εμφανίζονται νέες περιοχές με πολύ έντονη δραστηριότητα, οι οποίες καλύπτονται με πορτοκαλί/κόκκινες αποχρώσεις. Αυτές είναι η Κίτρινη Θάλασσα, η Ανατολική και Νότια Θάλασσα της Κίνας (Χερσόνησος Ινδοκίνας) και ο Κόλπος της Ταϊλάνδης. Κατά το χειμερινό τρίμηνο των μηνών Δεκεμβρίου-Ιανουαρίου-Φεβρουαρίου το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης είναι καλυμμένο με γκρι χρώμα, που υποδηλώνει ότι εκεί δε συμβαίνουν ακραία επεισόδια σκόνης. Αντίθετα, σε αυτό το διάστημα λαμβάνουν χώρα επεισόδια σκόνης στις ερήμους Τακλαμακάν, Γκόμπι και Καρακούμ, στο Πακιστάν και την Κίτρινη Θάλασσα. Οι υψηλότερες τιμές του οπτικού βάθους σκόνης, από 3.5 έως 5, σημειώνονται στην έρημο Τακλαμακάν και την Κίτρινη Θάλασσα. Κατά την άνοιξη εμφανίζονται ακραία επεισόδια σκόνης και σε νέες περιοχές, όπως η Αραβική Θάλασσα, η Ανατολική και Νότια Θάλασσα της Κίνας με την ένταση των επεισοδίων εκεί να κυμαίνεται από 3.5 έως 5. Αυτό έρχεται σε συμφωνία και με άλλες μελέτες, σύμφωνα με τις οποίες η μεταφορά σκόνης προς τον Ειρηνικό Ωκεανό κορυφώνεται την άνοιξη (Yoon et al., 2019). Το καλοκαίρι οι υψηλότερες τιμές του DOD σημειώνονται στις ερήμους Τακλαμακάν και Ταρ, αλλά και στην κοιλάδα του Ινδο-Γάγγη, με τιμές 3 έως 4. Τέλος, από το Σεπτέμβριο η δραστηριότητα της ερημικής σκόνης, όπως και στα ισχυρά επεισόδια, σταδιακά ελαττώνεται και υπάρχουν τιμές του DOD κυρίως πάνω από και σε παρακείμενες περιοχές των ερήμων Τακλαμακάν, Γκόμπι και Καρακούμ.

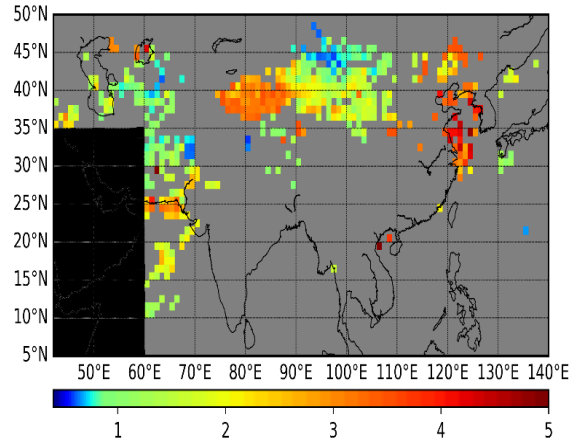
Για πληρέστερη ανάλυση, παρέχεται στο Παράρτημα (Σχήμα Π.5 και Π.6), η γεωγραφική κατανομή της τυπικής απόκλισης του οπτικού βάθους (DOD) των μέσων μηνιαίων ισχυρών και ακραίων επεισοδίων ερημικής σκόνης για την περίοδο 2005-2021. Παρατηρείται ότι οι μεγαλύτερες τιμές της τυπικής απόκλισης, σε σχέση με τη μέση τιμή, εμφανίζονται στην έρημο Τακλαμακάν σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια του έτους (κυρίως την άνοιξη και το καλοκαίρι), ενώ την άνοιξη αυξάνονται οι τιμές στην έρημο Γκόμπι και βορειοανατολικά τμήματα της Κίνας. Τους καλοκαιρινούς μήνες λόγω της αυξημένης επεισοδιακής δραστηριότητας σκόνης, αυξάνονται και οι τιμές της τυπικής απόκλισης στην Αραβική Θάλασσα, την έρημο Ταρ και του Πακιστάν. Τέλος, χαμηλές είναι οι τιμές το φθινόπωρο και το χειμώνα, λόγω και της περιορισμένης δραστηριότητας της ερημικής σκόνης.



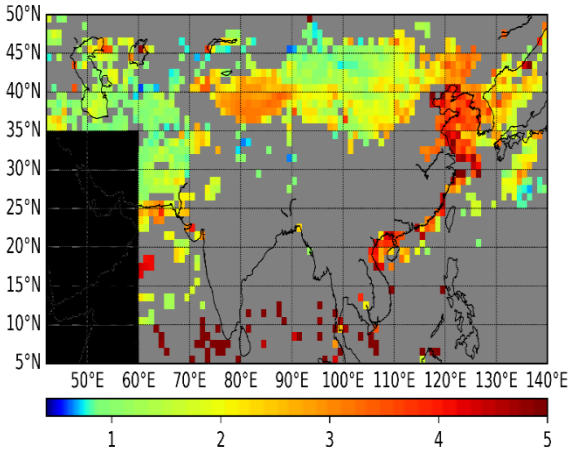
### JANUARY



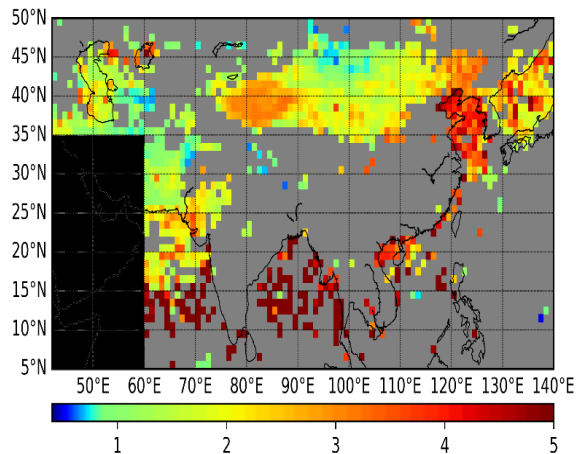
### FEBRUARY



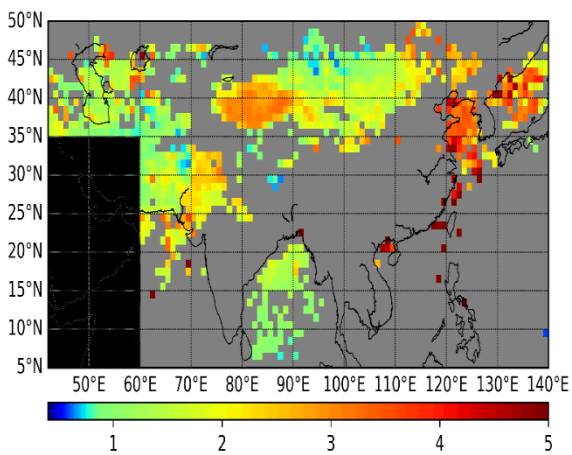
### MARCH



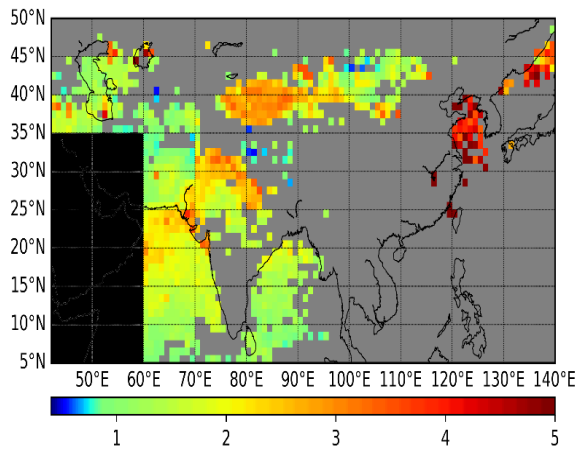
### APRIL

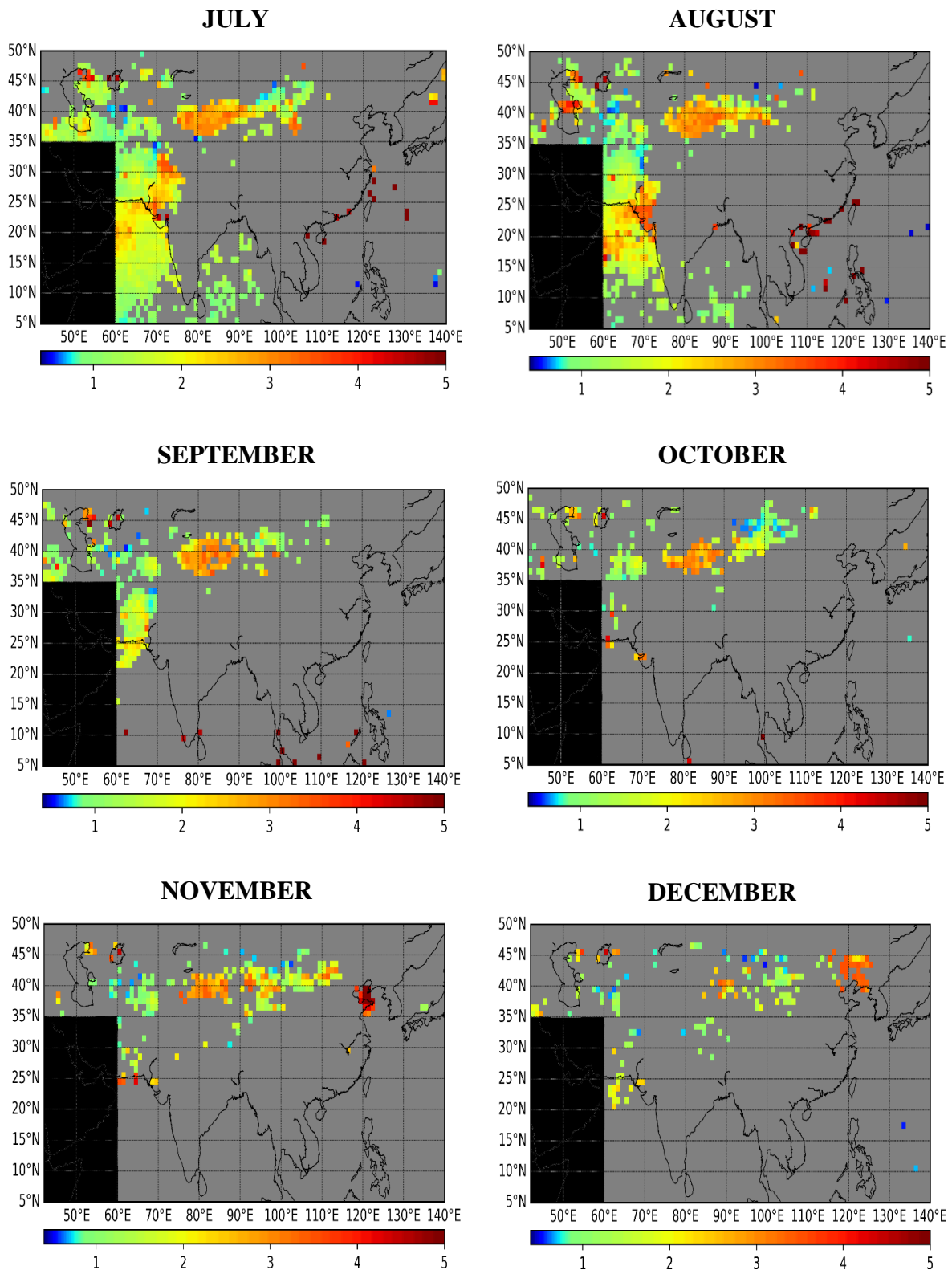


### MAY



### JUNE





**Σχήμα 3.18.** Γεωγραφική κατανομή των μέσων μηνιαίων τιμών του οπτικού βάθους (DOD) των ακραίων επεισοδίων ερημικής σκόνης (SDAEs) για την περίοδο 2005-2021. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες είτε ο αλγόριθμος δε λειτούργησε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων, είτε λειτούργησε αλλά δε συνέβησαν επεισόδια. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

## 3.2 Ενδοετήσια και διαχρονική μεταβολή των επεισοδίων σκόνης

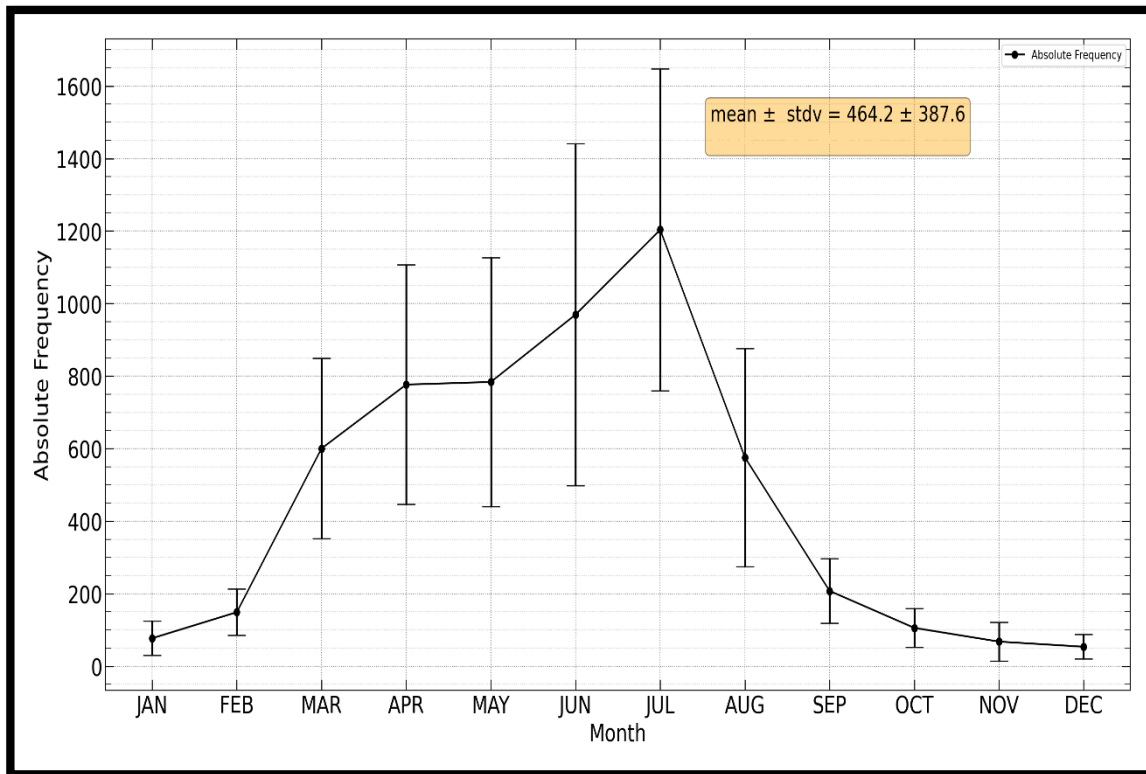
Στην ενότητα αυτή παρέχονται τα αποτελέσματα που αφορούν στην ενδοετήσια και διαχρονική (από έτος σε έτος) μεταβολή της συχνότητας εμφάνισης και της έντασης των επεισοδίων (ισχυρών και ακραίων) σκόνης στην Ασία για την περίοδο 2005-2021. Η ενδοετήσια μεταβολή έχει κατά κάποιον τρόπο αναδειχθεί μέσω των μηνιαίων χαρτών (Ενότητα 3.1.2), που την παρουσιάζουν ανά τόπους (σε επίπεδο κυψελίδας), όμως εδώ αυτή δείχνεται πιο ξεκάθαρα, καθώς τα αποτελέσματα (συχνότητες και οπτικό βάθος) είναι μεσοποιημένα για το σύνολο της περιοχής μελέτης. Επιπλέον, εδώ παρουσιάζεται για πρώτη φορά ξεκάθαρα η διαχρονική μεταβολή, δεδομένου ότι στις προηγούμενες ενότητες δείχθηκε μόνο η διαχρονική μεταβλητότητα (όχι η μεταβολή) μέσω των αποτελεσμάτων της τυπικής απόκλισης της συχνότητας και της έντασης (Σχήματα Π1, Π2, Π3, Π4, Π5 και Π6).

Πρώτα δίνονται τα αποτελέσματα για την ενδοετήσια μεταβολή και στη συνέχεια για τη διαχρονική μεταβολή.

### 3.2.1 Ενδοετήσια μεταβολή των επεισοδίων σκόνης

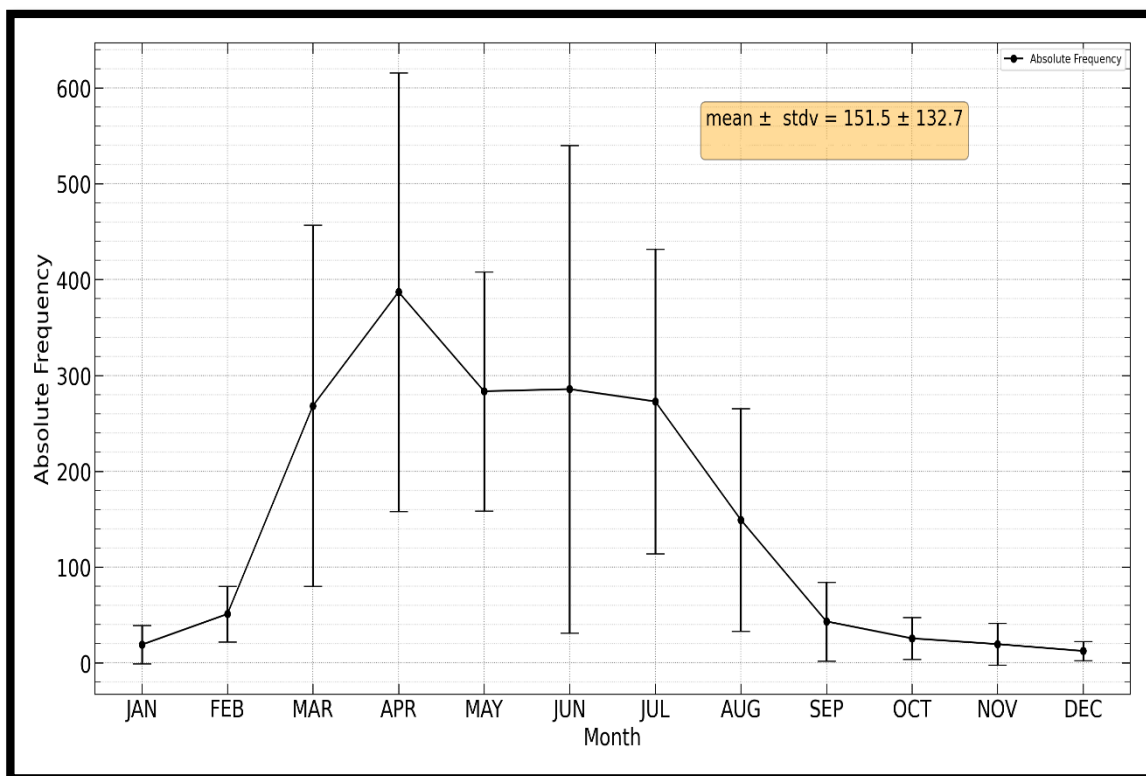
#### *Συχνότητα εμφάνισης επεισοδίων σκόνης*

Στο Σχήμα 3.19 παρουσιάζεται ο μέσος (μεσοποιημένος για την περίοδο 2005-2021) μηνιαίος συνολικός (αθροιστικός, για το σύνολο της περιοχής μελέτης) αριθμός των ισχυρών επεισοδίων ερημικής σκόνης, καθώς επίσης και η τυπική απόκλιση των μηνιαίων αυτών τιμών. Η τυπική απόκλιση αντιστοιχεί στην από έτος σε έτος μεταβολή του αριθμού των επεισοδίων (στη χρονική μεσοποίηση). Για κάθε μήνα κάθε έτους, αθροίστηκε ο αριθμός των ισχυρών επεισοδίων και στη συνέχεια μεσοποιήθηκαν οι τιμές του κάθε μήνα όλων των ετών και υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι και οι αντίστοιχες τυπικές αποκλίσεις. Παρατηρούμε ότι αναδεικνύεται ένας ξεκάθαρος ενδοετήσιος κύκλος με ελάχιστο (77 DAEs) το Δεκέμβριο, όταν η παρουσία σκόνης είναι σπάνια και χωρικά περιορισμένη (Σχήμα 3.13), εμφανιζόμενη μόνον πάνω από τις ισχυρές πηγές σκόνης (ερήμους) και με μέγιστο (1204 επεισόδια) τον Ιούλιο, όταν παρατηρείται έντονη δραστηριότητα πάνω από τις πηγές σκόνης, αλλά και εκτεταμένη εξαγωγή αυτής σε κοντινές και μακρινές ηπειρωτικές και ωκεάνιες περιοχές (π.χ. Αραβική Θάλασσα και Κίτρινη Θάλασσα). Επίσης, κατά την άνοιξη παρατηρείται ένα δευτερεύον μέγιστο της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης ισχυρών επεισοδίων σκόνης, με τιμή 784 επεισόδια το Μάιο. Το δευτερεύον εαρινό μέγιστο οφείλεται στις μεγάλες τιμές συχνότητας επεισοδίων κυρίως πάνω από τις μεγάλες ερημικές περιοχές της περιοχής μελέτης (έρημοι Τακλαμακάν, Γκόμπι, Ταρ, νότια παράκτια τμήματα Πακιστάν, βλ. Σχήμα 3.13). Η τυπική απόκλιση λαμβάνει τις μεγαλύτερες τιμές κατά τους θερινούς μήνες, με μέγιστη τιμή τον Ιούνιο με 943 επεισόδια, ενώ αντίθετα μειώνεται το φθινόπωρο και χειμώνα, με τη μικρότερη τιμή της να σημειώνεται το Δεκέμβριο με 68 επεισόδια.



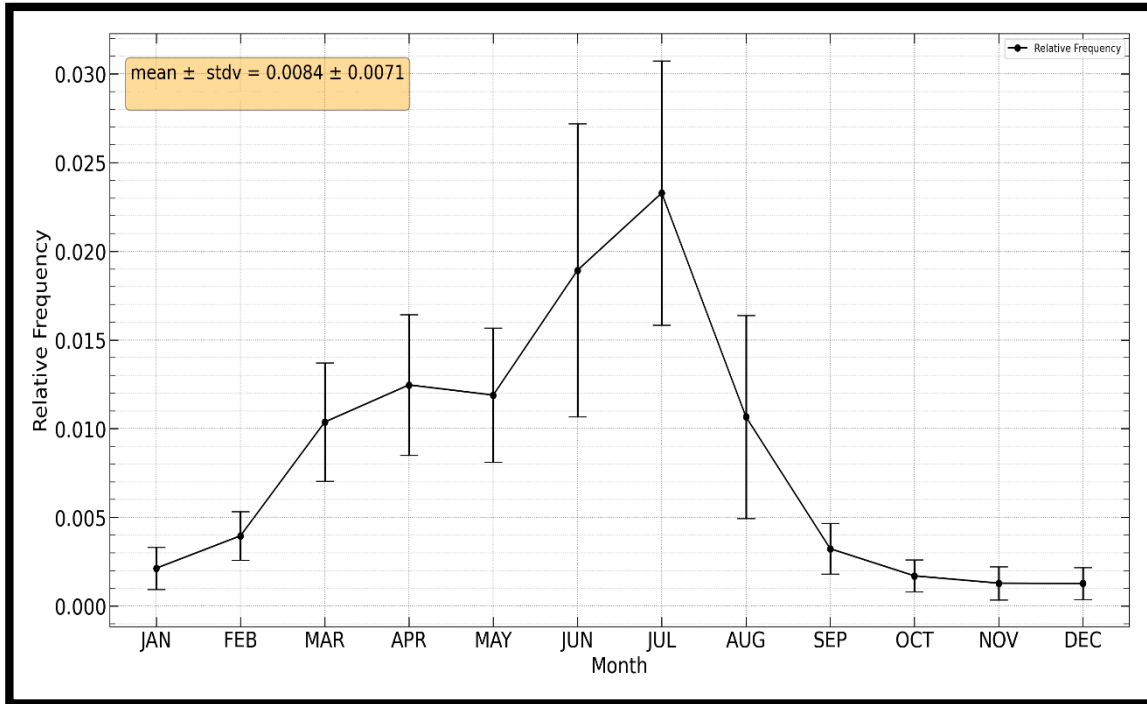
**Σχήμα 3.19.** Ενδοετήσια μεταβολή της μέσης κλιματολογικής (περίοδος 2005-2021) αθροιστικής απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των ισχυρών επεισοδίων ερημικής σκόνης (SDAEs) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Τα error bars αντιστοιχούν στη μέση τυπική απόκλιση που αντιστοιχεί στη μέση τιμή του κάθε μήνα και εκφράζει τη διαχρονική μεταβλητότητα της εικονιζόμενης παραμέτρου.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.20, ο ενδοετήσιος κύκλος (η εποχικότητα) των ακραίων επεισοδίων σκόνης στην Ασία διαφέρει από εκείνον των ισχυρών επεισοδίων. Εμφανίζεται και πάλι μια ξεκάθαρη εποχικότητα, όμως τα ακραία επεισόδια εμφανίζονται πιο έντονα την άνοιξη (387 επεισόδια τον Απρίλιο) και λιγότερο το θέρος (δευτερεύον μέγιστο, 286 επεισόδια τον Ιούνιο). Επιπλέον, είναι ξεκάθαρο ότι η συχνότητα των ακραίων επεισοδίων είναι αισθητά μικρότερη από αυτήν των ισχυρών, περίπου το ένα τρίτο αυτής, ενώ παρουσιάζουν και μία ισχυρότερη από έτος σε έτος μεταβολή (μεγαλύτερη τυπική απόκλιση σε επίπεδο ποσοστού της αντίστοιχης μέσης τιμής). Η τυπική απόκλιση, αντίθετα, είναι μεγαλύτερη τον Ιούνιο με 509 επεισόδια, ενώ τον Απρίλιο λαμβάνει την τιμή 458 επεισόδια. Οι τιμές αυτές των τυπικών αποκλίσεων αντιστοιχούν στο 88% και 59% των αντίστοιχων μέσων τιμών.

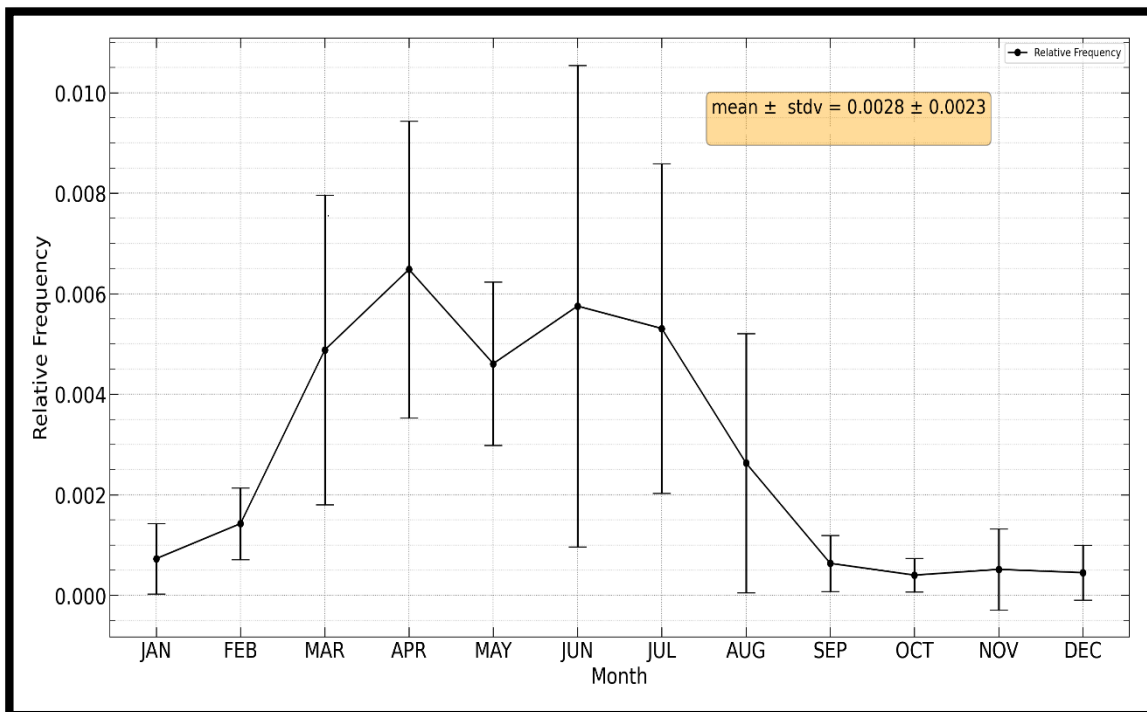


**Σχήμα 3.20.** Ενδοετήσια μεταβολή της μέσης κλιματολογικής (περίοδος 2005-2021) αθροιστικής απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των ακραίων επεισοδίων ερημικής σκόνης (EDAEs) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Τα error bars αντιστοιχούν στη μέση τυπική απόκλιση που αντιστοιχεί στη μέση τιμή του κάθε μήνα και εκφράζει τη διαχρονική μεταβλητότητα της εικονιζόμενης παραμέτρου.

Ανάλογη είναι και η ενδοετήσια κύμανση των μέσων τιμών της σχετικής συχνότητας εμφάνισης των ισχυρών και ακραίων επεισοδίων ερημικής σκόνης (Σχήματα 3.21 και 3.22), η οποία εμφανίζει μέγιστο και ελάχιστο τους ίδιους μήνες με αυτούς της απόλυτης συχνότητας, τόσο για τα ισχυρά όσο και για τα ακραία επεισόδια. Η σχετική συχνότητα εμφάνισης των ισχυρών επεισοδίων σκόνης ανέρχεται σε έως και 2.3%, ενώ αυτή των ακραίων επεισοδίων έως και 0.65%. Η μόνη πιο ουσιαστική διαφορά παρατηρείται στα ακραία επεισόδια, για τα οποία η δευτερευόντως μεγαλύτερη σχετική συχνότητα εμφάνισής τους το θέρος, εμφανίζεται πιο ισχυρή από ό,τι για την απόλυτη συχνότητα εμφάνισης (δευτερεύον μέγιστο τον Ιούνιο, με 0.53%, που προσεγγίζει το πρωτεύον ανοιξιάτικο μέγιστο του Απριλίου, με 0.65%). Αυτό σημαίνει ότι η συχνότητα ανίχνευσης σκόνης από το δορυφορικό αλγόριθμο δεν αλλάζει ουσιαστικά από μήνα σε μήνα για τα ισχυρά επεισόδια, ενώ για τα ακραία είναι λίγο μεγαλύτερη κατά το θέρος.



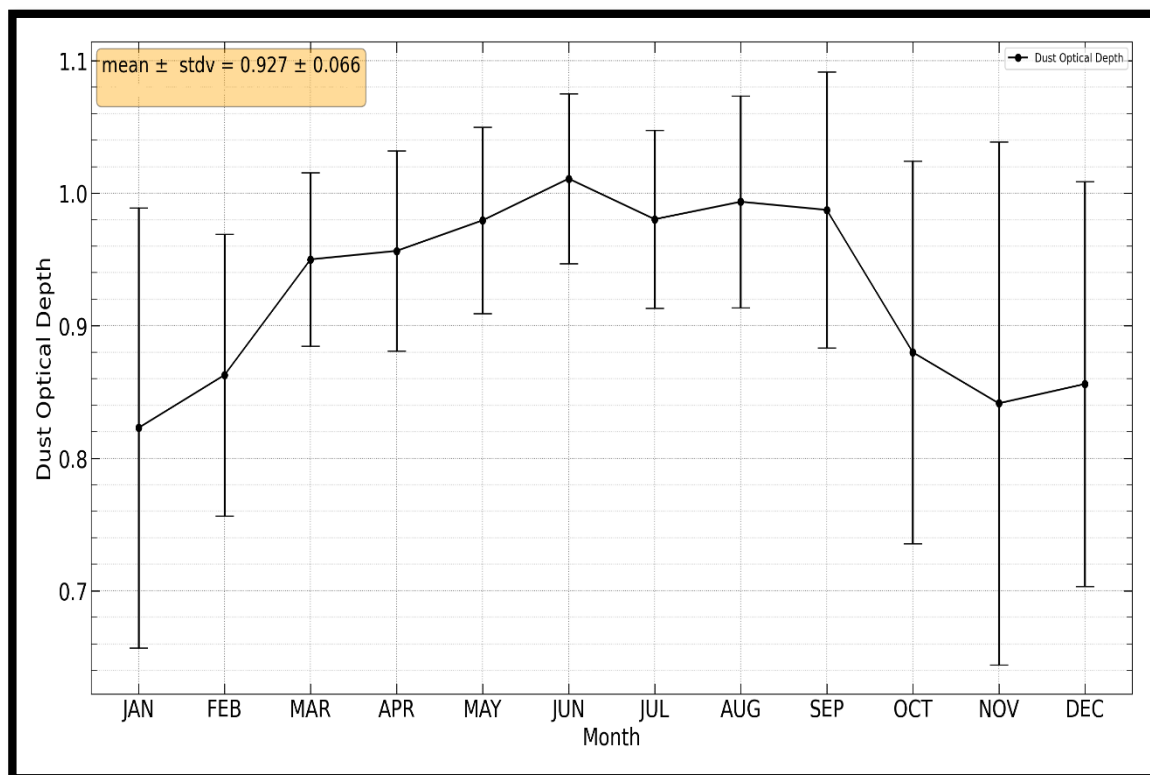
**Σχήμα 3.21.** Ενδοετήσια μεταβολή της μέσης κλιματολογικής (περίοδος 2005-2021) αθροιστικής σχετικής συχνότητας εμφάνισης των ισχυρών επεισοδίων ερημικής σκόνης (SDAEs) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Τα error bars αντιστοιχούν στη μέση τυπική απόκλιση που αντιστοιχεί στη μέση τιμή του κάθε μήνα και εκφράζει τη διαχρονική μεταβλητότητα της εικονιζόμενης παραμέτρου.



**Σχήμα 3.22.** Ενδοετήσια μεταβολή της μέσης κλιματολογικής (περίοδος 2005-2021) αθροιστικής σχετικής συχνότητας εμφάνισης των ακραίων επεισοδίων ερημικής σκόνης (EDAEs) στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Τα error bars αντιστοιχούν στη μέση τυπική απόκλιση που αντιστοιχεί στη μέση τιμή του κάθε μήνα και εκφράζει τη διαχρονική μεταβλητότητα της εικονιζόμενης παραμέτρου.

### Ένταση (οπτικό βάθος) επεισοδίων σκόνης

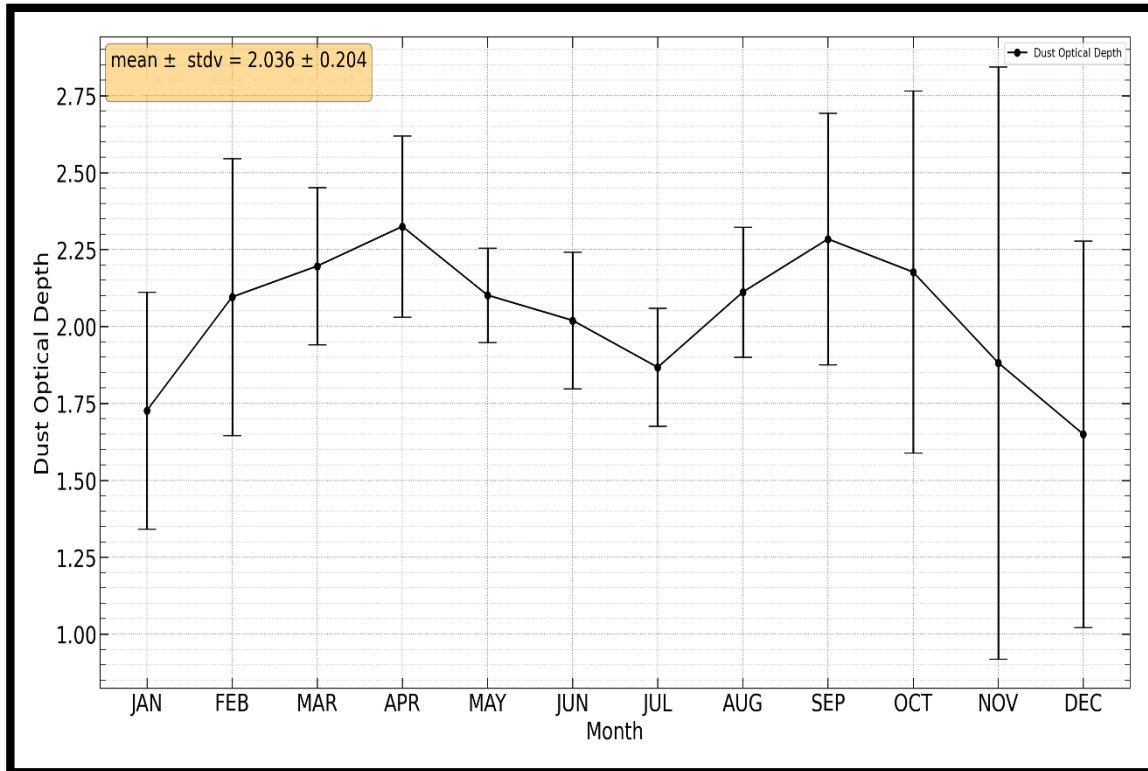
Τα αποτελέσματα της ενδοετήσιας μεταβολής της έντασης (του οπτικού βάθους) των ισχυρών επεισοδίων ερημικής σκόνης στην Ασία (Σχήμα 3.23) αποκαλύπτουν έναν εποχικό κύκλο, ο οποίος είναι εμφανώς πιο ασθενής από τον αντίστοιχο εποχικό κύκλο των συχνοτήτων εμφάνισης. Μάλιστα, η αναδεικνυόμενη εποχικότητα καθίσταται σχεδόν αβέβαιη λόγω των μεγάλων τυπικών αποκλίσεων κατά την περίοδο με το μικρότερο οπτικό βάθος (το χειμώνα). Πέραν αυτών, βάσει των αποτελεσμάτων, παρατηρείται ένας εποχικός κύκλος με μεγάλες τιμές (από 0.83 έως 1.01) από το Μάρτιο ως το Σεπτέμβριο, δηλαδή τη θερμή περίοδο του έτους), έχοντας ένα ασθενές πρωτεύον μέγιστο. Επισημαίνεται ότι τόσο οι μεγαλύτερες, όμως ακόμη και οι μικρότερες τιμές οπτικού βάθους, οι οποίες υπερβαίνουν το 0.8, είναι μεγάλες συγκρινόμενες με τις κατά μέσον όρο τιμές οπτικού βάθους των αερολυμάτων στην Ασία, οι οποίες στις ερημικές περιοχές δε ξεπερνούν το 0.2 (Korras-Carraca et al., 2021).



**Σχήμα 3.23.** Ενδοετήσια μεταβολή της μέσης κλιματολογικής (περίοδος 2005-2021) τιμής του οπτικού βάθους των ισχυρών επεισοδίων ερημικής σκόνης (SDAEs). Τα error bars αντιστοιχούν στη μέση τυπική απόκλιση που αντιστοιχεί στη μέση τιμή του κάθε μήνα και εκφράζει τη διαχρονική μεταβλητότητα της εικονιζόμενης παραμέτρου.

Σε ό,τι αφορά στα ακραία επεισόδια ασιατικής σκόνης (Σχήμα 3.24), παρατηρείται μια διπλή κύμανση κατά τη διάρκεια του έτους. Εμφανίζονται δύο παρόμοια μέγιστα, ένα τον Απρίλιο με τιμή 2.33 και ένα δεύτερο το Σεπτέμβριο με 2.28. Οι μικρότερες τιμές του DOD σημειώνονται τους χειμερινούς μήνες, με ελάχιστη τιμή το Δεκέμβριο (1.65). Αξιοσημείωτο

είναι ότι, σε αντίθεση με τις συχνότερες εμφάνιση των επεισοδίων, το οπτικό βάθος τους είναι μεγάλο το φθινόπωρο (Σεπτέμβριο και Οκτώβριο με 2.28 και 2.18, αντίστοιχα), συγκριτικά με τους θερινούς μήνες. Αυτό σημαίνει ότι το φθινόπωρο στην περιοχή μελέτης συμβαίνουν όχι τόσο πολλά, όμως έντονα επεισόδια σκόνης.



**Σχήμα 3.24.** Ενδοετήσια μεταβολή της μέσης κλιματολογικής (περίοδος 2005-2021) τιμής του οπτικού βάθους των ακραίων επεισοδίων ερημικής σκόνης (EDAEs). Τα error bars αντιστοιχούν στη μέση τυπική απόκλιση που αντιστοιχεί στη μέση τιμή του κάθε μήνα και εκφράζει τη διαχρονική μεταβλητότητα της εικονιζόμενης παραμέτρου.

### 3.2.2 Διαχρονική μεταβολή των επεισοδίων σκόνης

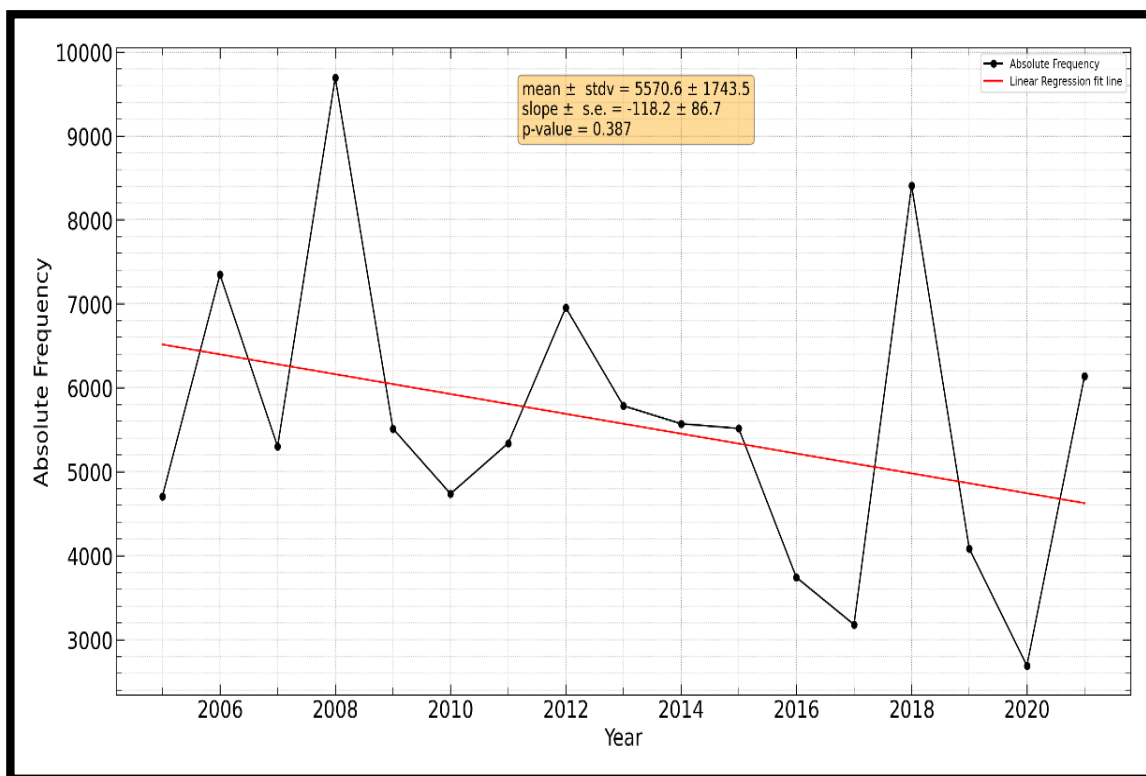
Τα αποτελέσματα της διαχρονικής μεταβολής υπολογίσθηκαν και παρέχονται τόσο για όλη την περιοχή μελέτης (αθροιστικά) όσο και κατά τόπους (σε επίπεδο κυψελίδας). Παρουσιάζονται πρώτα τα αποτελέσματα για όλη την περιοχή και στη συνέχεια αυτά σε επίπεδο κυψελίδας.



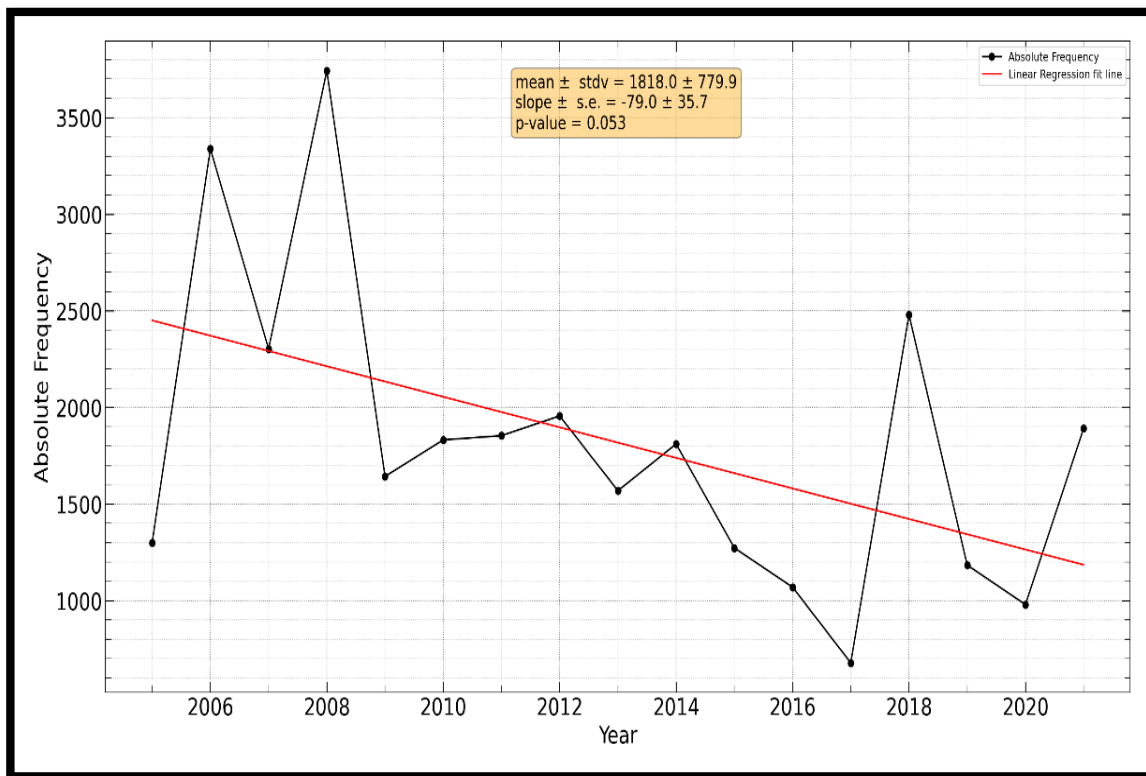
### 3.2.2.1 Αποτελέσματα για όλη την περιοχή μελέτης (Ασία)

#### Συχνότητα εμφάνισης επεισοδίων σκόνης

Στα Σχήματα 3.25 και 3.26 παρουσιάζεται η διαχρονική (από έτος σε έτος) μεταβολή των μέσων ετήσιων τιμών της απόλυτης συχνότητας, για την περίοδο μελέτης 2005-2021, των ισχυρών (Σχήμα 3.31) και ακραίων (Σχήμα 3.32) επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης (DAEs) για την ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Η απόλυτη συχνότητα ανά έτος είναι εκπεφρασμένη σε συνολικό αριθμό κυψελίδων ( $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ), στις οποίες έλαβε χώρα επεισόδιο σκόνης μέσα στο έτος. 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 και την τιμή p-value. Τέλος, η στατιστική σημαντικότητα των τάσεων μεταβολής αξιολογείται με το μη παραμετρικό έλεγχο Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975).



**Σχήμα 3.25.** Διαχρονική μεταβολή (2005-2021) και γραμμική τάση μεταβολής της ανά έτος απόλυτης συχνότητας εμφάνισης (συνολικός/αθροιστικός αριθμός κυψελίδων με επεισόδιο στην περιοχή ανά έτος) των ισχυρών επεισοδίων ερημικής σκόνης (SDAEs) στην περιοχή μελέτης.



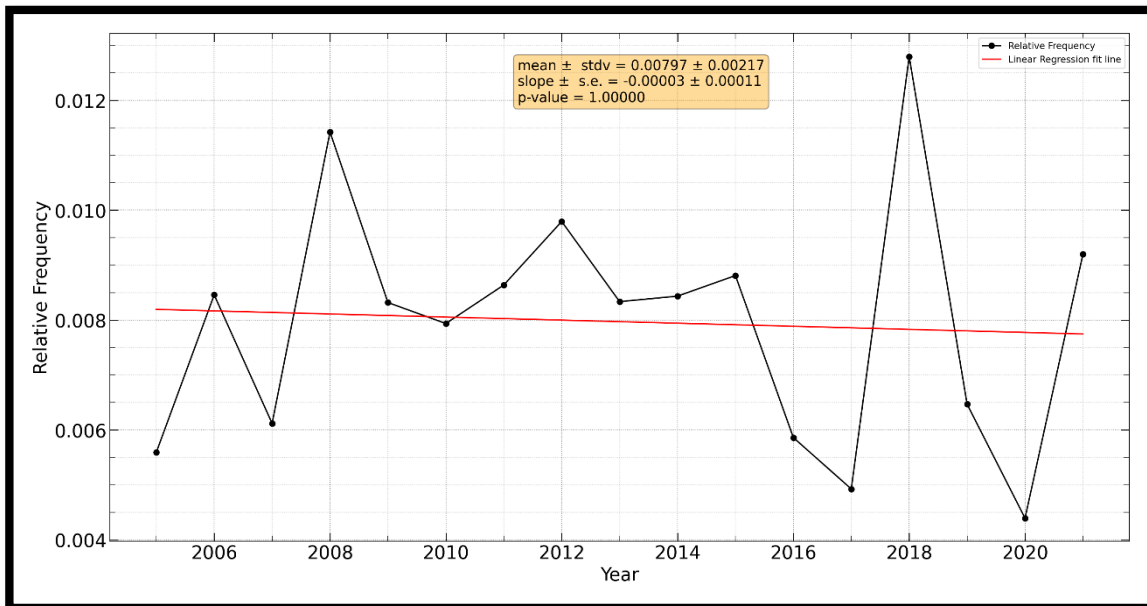
**Σχήμα 3.26.** Διαχρονική μεταβολή (2005-2021) και γραμμική τάση μεταβολής της ανά έτος απόλυτης συχνότητας εμφάνισης (συνολικός/αθροιστικός αριθμός κυψελίδων με επεισόδιο στην περιοχή ανά έτος) των ακραίων επεισοδίων ερημικής σκόνης (EDAEs) στην περιοχή μελέτης.

Διαπιστώνεται μία σημαντική διακύμανση από έτος σε έτος της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των ισχυρών επεισοδίων σκόνης (SDAEs) στην Ασία, με τιμές που κυμαίνονται από 2689 έως 9695 επεισόδια/έτος. Αυτό σημαίνει ότι τα ισχυρά επεισόδια σημειώνονται σε συχνότητα που μπορεί να είναι έως και περίπου τέσσερις (4) φορές μεγαλύτερη, σε ετήσια βάση. Υπάρχουν έτη, π.χ. το 2008 και 2018, στα οποία σημειώθηκαν πολλά ισχυρά επεισόδια σκόνης, και άλλα, π.χ. το 2020, στα οποία σημειώθηκαν εξαιρετικά λίγα. Οι αιτίες αυτής της μεταβολής μπορεί να είναι διάφορες, όπως η ισχύς των πηγών εκπομπής, η οποία επηρεάζεται από την ξηρότητα του εδάφους ή τον άνεμο, η ισχύς των μηχανισμών απομάκρυνσης από την ατμόσφαιρα, όπως ο υετός και η εναπόθεση, καθώς και η ένταση του ανέμου, που μεταφέρει τη σκόνη από τις πηγές της (ερήμους) σε άλλες περιοχές. Η εξακρίβωση των αιτιών της από έτος σε έτος μεταβολής είναι αντικείμενο περαιτέρω διερεύνησης. Επίσης, παρατηρείται ότι τα ισχυρά επεισόδια σκόνης στην Ασία λαμβάνουν χώρα με μειούμενη τάση με την πάροδο των ετών, από το 2005 ως το 2021. Πιο συγκεκριμένα, η μείωση αυτή είναι ίση με 2009 κυψελίδες ή σε ποσοστό 36.1%. Ωστόσο, η τάση αυτή δε βρέθηκε να είναι στατιστικά σημαντική σύμφωνα με το εφαρμοσθέν κριτήριο Mann-Kendall. Αντίστοιχο αποτέλεσμα, δηλαδή η απουσία στατιστικής σημαντικότητας σε επίπεδο 95% φαίνεται και από την υπολογισθείσα τιμή p-value που ισούται με 0.387 (>0.05 που ορίζεται ως η τιμή για στατιστικά σημαντική μεταβολή σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%). Οι αιτίες αυτής της γενικής μείωσης της

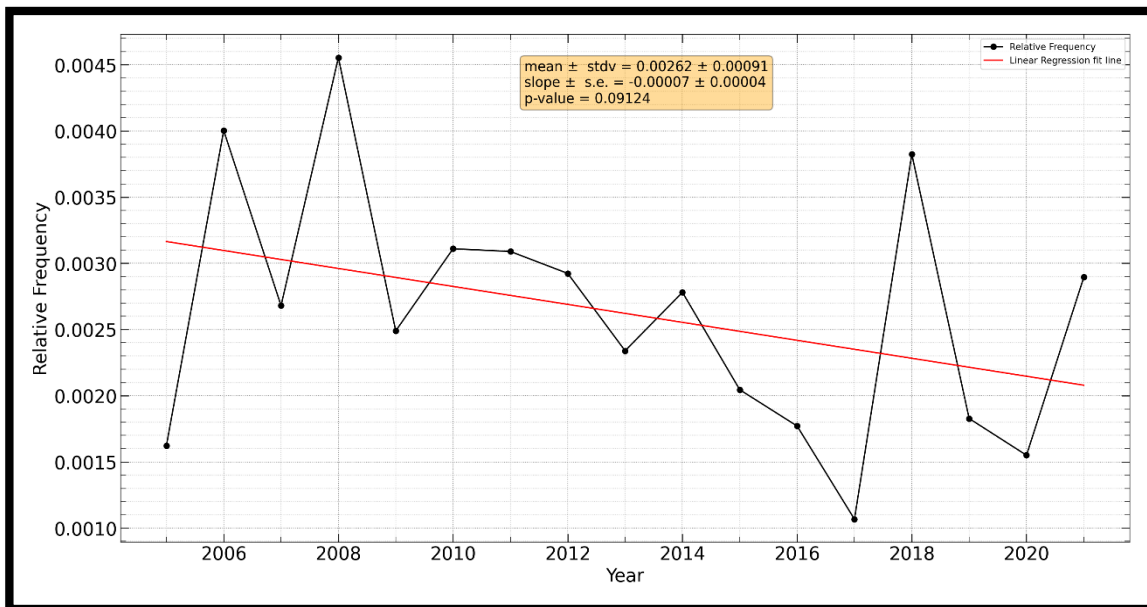
συχνότητας εμφάνισης των ισχυρών επεισοδίων σκόνης στην Ασία μετά το 2000 αποτελεί, επίσης, αντικείμενο περαιτέρω έρευνας.

Και για τα ακραία επεισόδια (EDAEs, Σχήμα 3.26) παρατηρείται μειούμενη τάση εμφάνισης στην περίοδο μελέτης που ισούται με 1343 κυψελίδες ή σε ποσοστό 73.9%, με τιμές που κυμαίνονται από 678 έως 3743 επεισόδια (κυψελίδες) ανά έτος, εμφανίζοντας μια ισχυρή από έτος σε έτος μεταβολή, που είναι ακόμη μεγαλύτερη από εκείνη των ισχυρών επεισοδίων. Δηλαδή, τα ακραία επεισόδια σημειώνονται σε συχνότητα που μπορεί να είναι έως και περίπου πέντε (5) φορές μεγαλύτερη, σε ετήσια βάση. Μάλιστα, σε αντίθεση με τα ισχυρά επεισόδια, στην περίπτωση των ακραίων επεισοδίων η μείωση της συχνότητας εμφάνισης είναι στατιστικά σημαντική σε επίπεδο 95%, σύμφωνα με την τιμή p-value (0.05), αλλά και βάσει του κριτηρίου Mann-Kendall. Όπως συνέβη για τα ισχυρά, έτσι και τα περισσότερα ακραία επεισόδια έλαβαν χώρα το 2008 (3743 επεισόδια), και έπειτα το 2006 και το 2018 (3339 και 2480 επεισόδια, αντίστοιχα). Αντίθετα, τα λιγότερα ακραία επεισόδια σκόνης συνέβησαν το 2017 (μόλις 678 επεισόδια). Αξίζει να σημειωθεί ότι τα έτη 2008 και 2018 ήταν αυτά με την πρώτη και δεύτερη υψηλότερη, αντίστοιχα, συχνότητα εμφάνισης τόσο των ισχυρών, όσο και των ακραίων επεισοδίων σκόνης. Αυτό σημαίνει ότι, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου, τα δύο αυτά έτη ήταν τα πλέον δραστήρια από άποψη εκδήλωσης επεισοδίων σκόνης.

Τα αποτελέσματα των Σχημάτων 3.25 και 3.26, για τη σχετική συχνότητα των ισχυρών επεισοδίων σκόνης, εμπεριέχουν αβεβαιότητα, καθώς δεν είναι δεδομένη η ίδια γεωγραφική κάλυψη της περιοχής μελέτης με αποτελέσματα του αλγορίθμου για κάθε έτος. Η κάλυψη αυτή μπορεί να διαφέρει από έτος σε έτος, για παράδειγμα λόγω διαφορετικής ημερήσιας διαθεσιμότητας των δεδομένων εισόδου του αλγορίθμου για την κάθε περιοχή (κυψελίδα), επηρεάζοντας έτσι τη συνολική συχνότητα ανά έτος, η οποία είναι αθροιστική σε όλη την περιοχή. Άρα, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψιν στους υπολογισμούς αυτή η πληροφορία, πράγμα που γίνεται στη σχετική συχνότητα εμφάνισης, η οποία εκφράζεται συναρτήσει των διαθέσιμων ημερών για τις οποίες δούλεψε ο αλγόριθμος. Αυτό γίνεται στα Σχήματα 3.27 και 3.28, όπου παρουσιάζεται η διαχρονική μεταβολή της σχετικής συχνότητας εμφάνισης των ισχυρών και των ακραίων επεισοδίων σκόνης στην Ασία από το 2005 έως το 2021, αντίστοιχα. Διακρίνεται ότι για τα ισχυρά επεισόδια σκόνης το 2018 σημειώθηκε η υψηλότερη τιμή της σχετικής συχνότητας με τιμή 0.013 (1.3%), η δεύτερη μεγαλύτερη συχνότητα σημειώθηκε το 2008, με 0.011 (1.1%), ενώ η χαμηλότερη συχνότητα το 2020 με 0.004 (0.4%). Παρατηρήθηκε μείωση της σχετικής συχνότητας των ισχυρών επεισοδίων που ισούται με 0.00051 ή σε ποσοστό 6.4%. Για τα ακραία επεισόδια, το 2008 σημειώθηκε η μέγιστη τιμή της σχετικής συχνότητας, ίση με 0.0046 (0.46%), ύστερα το 2006 με 0.0040 (0.4%), ενώ η μικρότερη συχνότητα σημειώθηκε το 2017, με 0.0011 (0.11%). Η τάση της σχετικής συχνότητας των ακραίων επεισοδίων βρέθηκε, όπως και των ισχυρών επεισοδίων, μειούμενη και ίση με 0.00119 ή σε ποσοστό 45.4%. Επίσης, βρέθηκε ότι τόσο για τα ισχυρά επεισόδια ( $p\text{-value} = 1 > 0.05$ ), όσο και για τα ακραία επεισόδια ( $p\text{-value} = 0.091 > 0.05$ ), δεν υπήρξε στατιστικά σημαντική μεταβολή.



**Σχήμα 3.27.** Διαχρονική μεταβολή (2005-2021) και γραμμική τάση μεταβολής της συνολικής/αθροιστικής σχετικής συχνότητας εμφάνισης (ποσοστού της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης, δηλαδή του γινομένου του αριθμού των κυψελίδων της περιοχής μελέτης με επεισόδιο με τον αριθμό ημερών του έτους που υπέστησαν επεισόδιο, επί του μέγιστης δυνατής συχνότητας εμφάνισης, δηλαδή του γινομένου του αριθμού των κυψελίδων της περιοχής μελέτης με επεισόδιο με το συνολικό αριθμό ημερών του έτους) των ισχυρών επεισοδίων ερημικής σκόνης (SDAEs) στην περιοχή μελέτης.



**Σχήμα 3.28.** Διαχρονική μεταβολή (2005-2021) και γραμμική τάση μεταβολής της συνολικής/αθροιστικής σχετικής συχνότητας εμφάνισης (ποσοστού της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης, δηλαδή του γινομένου του αριθμού των κυψελίδων της περιοχής μελέτης με επεισόδιο με τον αριθμό ημερών του έτους που υπέστησαν επεισόδιο, επί του μέγιστης δυνατής συχνότητας εμφάνισης, δηλαδή του γινομένου του αριθμού των κυψελίδων της περιοχής μελέτης με επεισόδιο με το συνολικό αριθμό ημερών του έτους) των ακραίων επεισοδίων ερημικής σκόνης (EDAEs) στην περιοχή μελέτης.

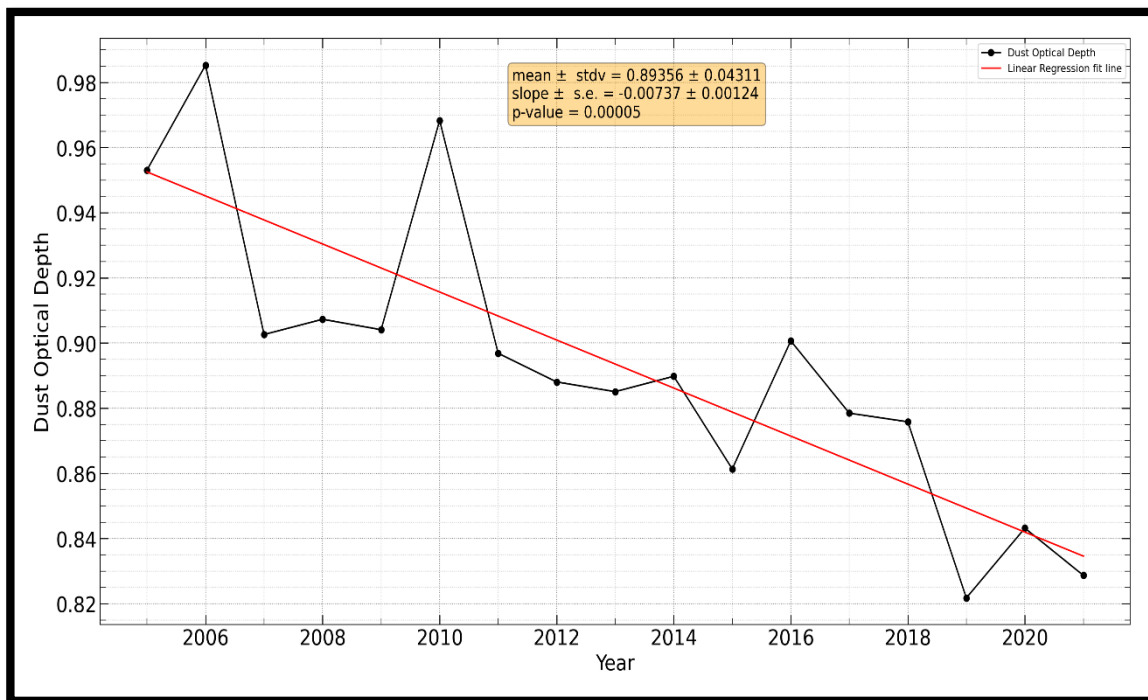
Συγκρίνοντας τα έτη με τις μέγιστες τιμές της απόλυτης και σχετικής συχνότητας εμφάνισης επεισοδίων σκόνης, διαπιστώνεται ότι για τα ισχυρά επεισόδια οι μέγιστες τιμές των συχνοτήτων δε σημειώθηκαν το ίδιο έτος (2008 για την απόλυτη και 2018 για τη σχετική συχνότητα), ενώ για τα ακραία επεισόδια σημειώθηκαν το ίδιο έτος (2008). Το ίδιο ισχύει και για τα δευτερεύοντα μέγιστα, για τα οποία τα έτη είναι το 2018 για την απόλυτη και το 2008 για τη σχετική συχνότητα. Αντίθετα, σε ό,τι αφορά στις ελάχιστες τιμές συχνότητας υπάρχει συμφωνία μεταξύ των δύο συχνοτήτων (απόλυτης και σχετικής) εμφάνισης ισχυρών επεισοδίων σκόνης, καθώς το 2020 σημειώθηκαν οι ελάχιστες τιμές. Αντίθετα, για τα ακραία επεισόδια σκόνης βρέθηκε πλήρης συμφωνία, όσον αφορά στις μέγιστες και τις δευτερεύουσες μέγιστες τιμές των συχνοτήτων, καθώς το 2008 σημειώθηκαν οι μέγιστες τιμές και το 2006 οι δευτερεύουσες μέγιστες τιμές. Επίσης, η ελάχιστη τιμή σημειώθηκε το έτος 2017 και στις δύο περιπτώσεις (απόλυτη και σχετική συχνότητα εμφάνισης επεισοδίων σκόνης).

### *Ένταση (οπτικό βάθος) επεισοδίων σκόνης*

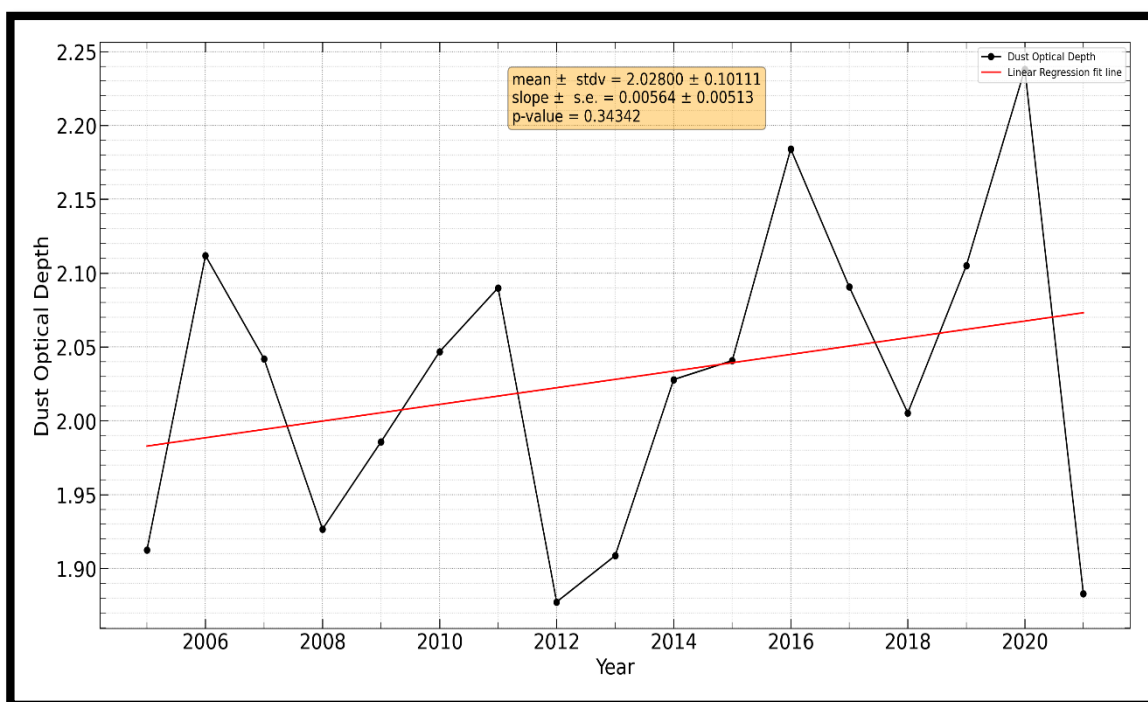
Στα Σχήματα 3.29 και 3.30 παρέχεται η πληροφορία για την από έτος σε έτος και διαχρονική μεταβολή του οπτικού βάθους των δυο κατηγοριών επεισοδίων σκόνης στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας.

Στην περίπτωση των ισχυρών επεισοδίων (SDAEs) η έντασή τους στην περίοδο μελέτης κατά μέσο όρο κυμαίνεται από 0.82 (ελάχιστη τιμή, το 2019), έως 0.99, (μέγιστη τιμή, το 2006). Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου (Σχήμα 3.29) δείχνουν μια σαφή τάση μείωσης της έντασης (του οπτικού βάθους) των ισχυρών επεισοδίων σκόνης στην Ασία διακρίνεται κατά την περίοδο μελέτης (2005-2021). Η μείωση αυτή είναι ίση με 0.13 (ή σε ποσοστό 14.6%) και είναι στατιστικά σημαντική σύμφωνα με το Mann-Kendall τεστ ( $p$ -value = 0.00005). Αυτή η τάση μείωσης της έντασης των ισχυρών επεισοδίων σκόνης στην Ασία σε συνδυασμό με την ελαφρά τάση μείωσης της συχνότητας εμφάνισής τους, δείχνει ότι αυτής της κατηγορίας τα επεισόδια συμβαίνουν τα τελευταία 20 έτη στην Ασία τόσο πιο αραιά όσο και με μικρότερη ένταση. Επιπλέον, φαίνεται ότι τα ισχυρά επεισόδια σκόνης δε συμβαίνουν στην Ασία με ταυτόχρονα μεγάλη/μικρή συχνότητα και ένταση, καθώς σε άλλα έτη παρατηρούνται τα περισσότερα και σε άλλα τα εντονότερα επεισόδια αυτής της κατηγορίας.

Σε ό,τι αφορά στα ακραία επεισόδια σκόνης, η τιμή του οπτικού βάθους κυμαίνεται από 1.88 (ελάχιστη τιμή, το 2012), έως 2.24 (μέγιστη τιμή, το 2020). Αντίθετα από ό,τι συμβαίνει στα ισχυρά επεισόδια, στα ακραία επεισόδια διακρίνεται μια σαφής αυξητική τάση, ίση με 0.1 ή σε ποσοστό 4.93%, η οποία όμως δεν είναι στατιστικά σημαντική σύμφωνα με το τεστ Mann-Kendall ( $p$ -value = 0.343). Η τάση ελαφράς αύξησης της έντασης των ακραίων επεισοδίων σκόνης στην Ασία βρίσκεται σε αντίθεση με την παρατηρούμενη τάση μείωσης της συχνότητας εμφάνισής τους (Σχήματα 3.26 και 3.28), γεγονός που σημαίνει ότι αυτής της κατηγορίας τα επεισόδια συμβαίνουν τα τελευταία 20 έτη στην Ασία πιο αραιά, όμως με μεγαλύτερη ένταση (DOD). Και για τα ακραία επεισόδια διαπιστώνεται ότι δε συμβαίνουν στην Ασία με ταυτόχρονα μεγάλη/μικρή συχνότητα και ένταση.



**Σχήμα 3.29.** Διαχρονική μεταβολή και γραμμική τάση μεταβολής του οπτικού βάθους (της έντασης) των ισχυρών επεισοδίων σκόνης (SDAEs) στην Ασία κατά την περίοδο 2005-2021.



**Σχήμα 3.30.** Διαχρονική μεταβολή και γραμμική τάση μεταβολής του οπτικού βάθους (της έντασης) των ακραίων επεισοδίων σκόνης (EDAEs) στην Ασία κατά την περίοδο 2005-2021.

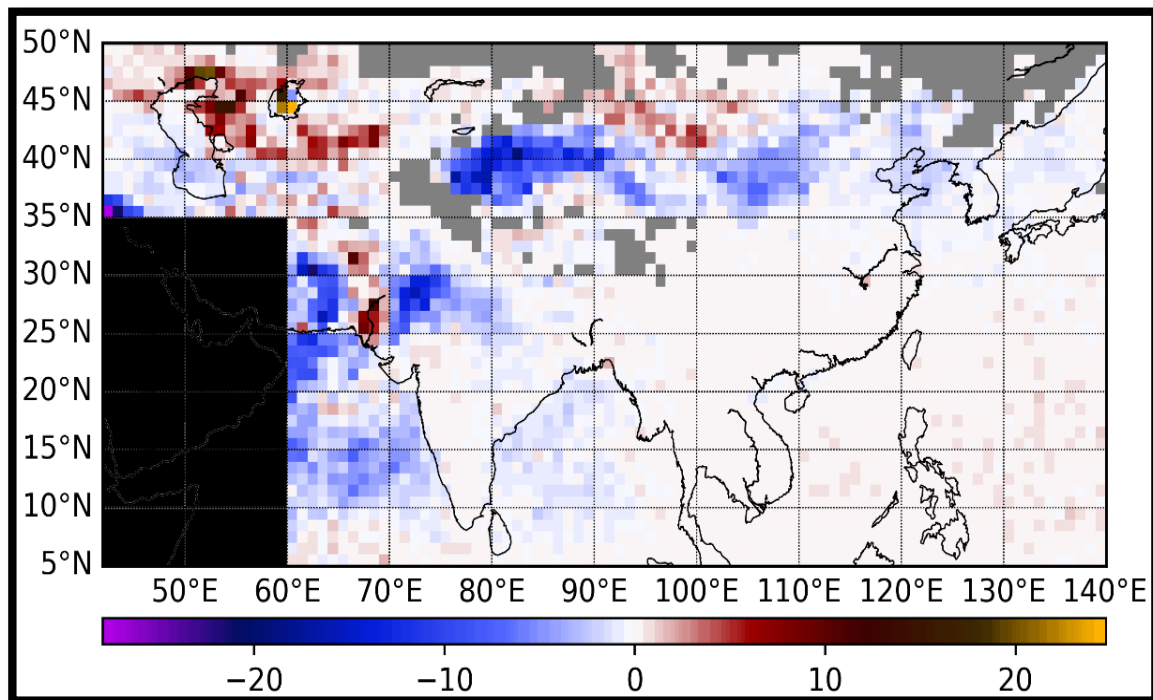
### 3.2.2.2 Αποτελέσματα κατά τόπους (σε επίπεδο κυψελίδας)

Στην παρούσα ενότητα παρέχεται η πληροφορία για την κατά τόπους (σε επίπεδο γεωγραφικής κυψελίδας) διαχρονική μεταβολή των ισχυρών και ακραίων επεισοδίων σκόνης στην Ασία και πιο συγκεκριμένα της συχνότητας εμφάνισής τους (απόλυτης και επί τοις εκατό) και της έντασης (φορτίου ή οπτικού βάθους τους). Τα αποτελέσματα αυτά είναι χρήσιμα, καθώς είναι πιο λεπτομερή από αυτά που δόθηκαν για όλη την περιοχή μελέτης (Ενότητα 3.2.1). Αυτό είναι σημαντικό, διότι τα μεσοποιημένα για όλη την περιοχή αποτελέσματα είναι δυνατό να αποκρύπτουν αντίθετες τάσεις μεταβολής που υπάρχουν σε τοπική κλίμακα. Να σημειωθεί ότι για τον υπολογισμό των μεταβολών σε επίπεδο κυψελίδας, τόσο σε από έτος σε έτος όσο και σε μηνιαίο επίπεδο, επιλέχθηκε το κριτήριο κάθε κυψελίδα ξεχωριστά να λαμβάνει τιμή (δηλαδή να συμβαίνει επεισόδιο) για τουλάχιστον 4 έτη από τα 17 συνολικά της περιόδου μελέτης, ώστε να εξάγονται όσο το δυνατόν ασφαλέστερα συμπεράσματα για τις μεταβολές των επεισοδίων (ισχυρών και ακραίων).

Βάσει των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου (Σχήματα 3.31 και 3.33) παρατηρείται ότι διαχρονικά έχει υπάρξει αύξηση (κόκκινες αποχρώσεις) της συχνότητας εμφάνισης, τόσο της απόλυτης όσο και της σχετικής (που είναι σχεδόν πανομοιότυπες), των ισχυρών επεισοδίων σκόνης (SDAEs) στην περιοχή ανάμεσα στην Κασπία Θάλασσα και τη λίμνη Αράλη, αλλά και στις ερήμους Καρακούμ, Κιζιλκούμ και Αραλκούμ. Η αύξηση της συχνότητας των ισχυρών επεισοδίων για όλη την περίοδο είναι της τάξης των 8 με 14 κατά απόλυτη τιμή (ισοδύναμα κατά 0.5-0.8 περισσότερα επεισόδια/έτος). Οι αντίστοιχες μεταβολές των σχετικών συχνοτήτων των ισχυρών επεισοδίων είναι 1.5% με 8%. Μια αύξηση γύρω στα 8 με 10 επεισόδια ή 0.5-0.6 επεισόδια/έτος (3% με 8% αντίστοιχα για τη σχετική συχνότητα) έχει λάβει χώρα στην κοιλάδα του Ινδού ποταμού, μεταξύ Ινδίας και Πακιστάν, ενώ αύξηση των ισχυρών επεισοδίων έχει υπάρξει και στην περιοχή ανάμεσα στις δύο μεγάλες ερήμους, της Γκόμπι και της Τακλαμακάν, που κυμαίνονται περίπου από 3 έως 7 (0.2 έως 0.4 περισσότερα επεισόδια/έτος), με τη σχετική συχνότητα εμφάνισης να κυμαίνεται από 1% έως 3%. Αντίθετα, διακρίνεται σημαντική τάση μείωσης της εμφάνισης των ισχυρών επεισοδίων (κατά 10-15 επεισόδια και πολύ τοπικά έως και κατά 20 κατά απόλυτη τιμή) από το 2005 στο 2021 στις ερήμους Τακλαμακάν και Ταρ, στο Πακιστάν και στην Αραβική Θάλασσα. Ασθενέστερη μείωση των ισχυρών επεισοδίων έχει συμβεί στην έρημο Γκόμπι και ακόμη μικρότερη στην Κίτρινη Θάλασσα και στη Θάλασσα της Ιαπωνίας. Στις υπόλοιπες περιοχές η μεταβολή της απόλυτης συχνότητας είναι μηδέν ή κυμαίνεται γύρω από αυτή την τιμή. Φαίνεται, γενικά, ότι οι περιοχές με μείωση της συχνότητας είναι περισσότερες από εκείνες με αύξηση, γεγονός που εξηγεί την ελαφρά τάση μείωσης που παρατηρήθηκε για το σύνολο της περιοχής (Σχήματα 3.25 και 3.27).

Στα Σχήματα Π.7 και Π.9 του Παραρτήματος, για λόγους πληρότητας παρουσιάζεται η κατά τόπους διαχρονική μεταβολή της απόλυτης και σχετικής συχνότητας εμφάνισης των ισχυρών επεισοδίων σκόνης (SDAEs) ανά μήνα. Σύμφωνα με αυτά, η μεταβολή ανά μήνα της απόλυτης και σχετικής συχνότητας χαρακτηρίζονται από παρόμοια συμπεριφορά, όπως επίσης έχουν κοινά χαρακτηριστικά με την από έτος σε έτος τάση μεταβολής σε περιοχικό επίπεδο. Διαπιστώνεται ότι οι τάσεις μείωσης που αναφέρθηκαν πάνω από τις μεγάλες ερήμους (Τακλαμακάν, Γκόμπι και Ταρ) παρατηρούνται κυρίως στο πρώτο μισό του έτους και αυτή

στην Αραβική Θάλασσα τον Ιούλιο, ενώ οι τάσεις αύξησης τους μήνες Ιανουάριο-Φεβρουάριο και Μάιο-Σεπτέμβριο.



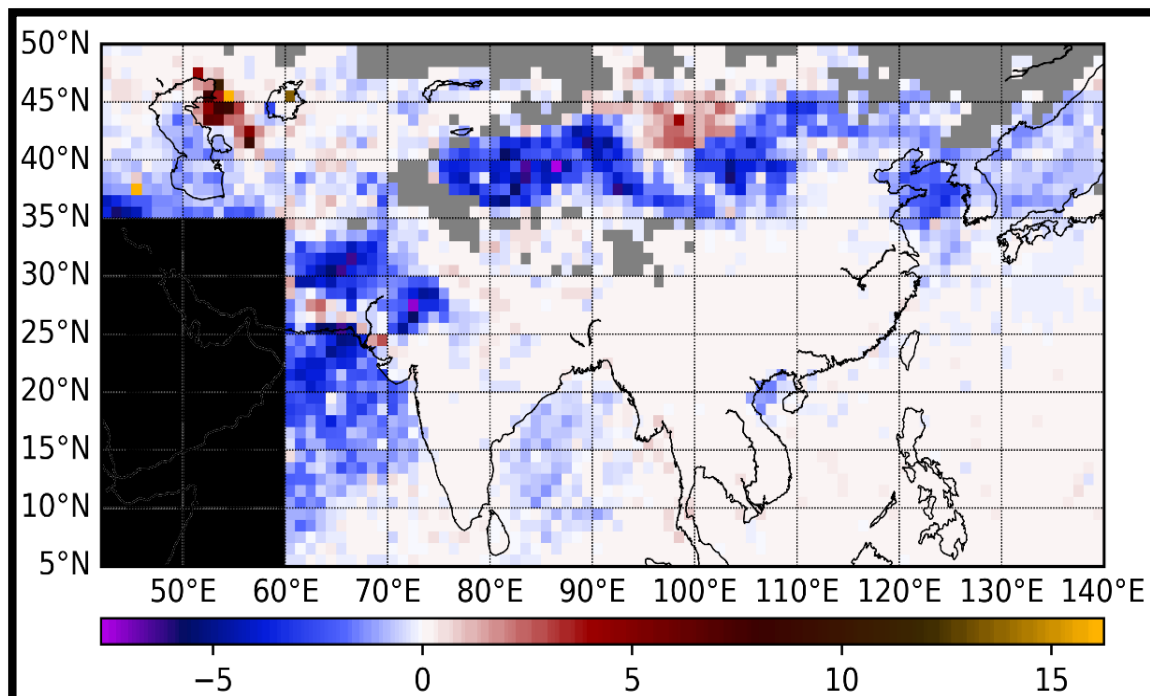
**Σχήμα 3.31.** Γεωγραφική κατανομή της διαχρονικής μεταβολής της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των ανά έτος ισχυρών επεισοδίων ερημικής σκόνης (SDAEs) στην Ασία κατά την περίοδο 2005-2021. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

Τα αποτελέσματα για τη μεταβολή της απόλυτης και σχετικής συχνότητας εμφάνισης των ακραίων επεισοδίων σκόνης (EDAEs) στην Ασία κατά την περίοδο 2005-2021 (Σχήματα 3.32 και 3.34) εμφανίζουν παρόμοια αποτελέσματα με τα αντίστοιχα των ισχυρών επεισοδίων. Υπάρχει ομοιότητα ως προς τα πρόσημα και τις περιοχές στις οποίες εμφανίζονται. Οι κυριότερες, μικρές όμως, διαφορές ως προς την ένταση εντοπίζονται στο ότι η μείωση για τα ακραία επεισόδια είναι πιο έντονη από ό,τι για τα ισχυρά, ενώ ταυτόχρονα η αύξηση είναι πιο ασθενής. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην αλλαγή προσήμου της μεταβολής, μεταξύ ισχυρών και ακραίων επεισοδίων, σε περιορισμένα τμήματα της περιοχής μελέτης, κυρίως ανατολικά της Κασπίας Θάλασσας. Ταυτόχρονα, εξηγεί την ήδη αναφερθείσα ισχυρότερη τάση μείωσης των ακραίων επεισοδίων από ό,τι των ισχυρών για το σύνολο της περιοχής (Ενότητα 3.2.2.1). Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται μία διαχρονική αύξηση ανατολικά της Κασπίας Θάλασσας, με περίπου 5-10 επεισόδια (ή 0.3-0.6 επεισόδια/έτος), με τη σχετική συχνότητα να κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 4% με 7% (τοπικά λίγο παραπάνω). Αύξηση στη συχνότητα εμφάνισης κατά 3 επεισόδια κατά μέσο όρο περιοχικά έχουμε και στα τμήματα που χωρίζουν τις ερήμους Γκόμπι και Τακλαμακάν (σχετική συχνότητα 2%). Σε σχέση με τα ισχυρά επεισόδια, διακρίνεται σαφής μείωση της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των ακραίων επεισοδίων σε

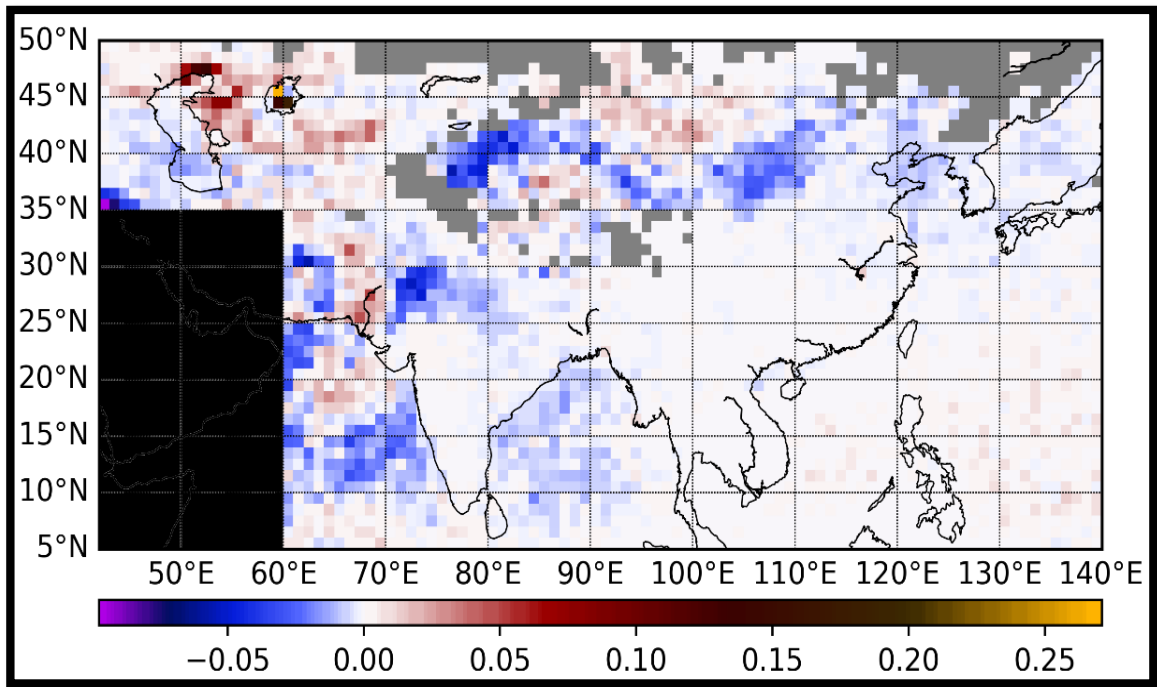


αρκετές υποπεριοχές της συνολικής περιοχής μελέτης, με τις μεγαλύτερες τιμές να καταγράφονται στις ερήμους Τακλαμακάν, Γκόμπι και Ταρ, το Πακιστάν (4-10 επεισόδια ή 0.2-0.6 επεισόδια/έτος), με τη σχετική συχνότητα να κυμαίνεται από -2.5% έως -1.5%. Μικρότερη μεταβολή έχουμε στην Αραβική Θάλασσα, τμήματα νότια της Κασπίας Θάλασσας και την Κίτρινη Θάλασσα με 1 έως 4 λιγότερα επεισόδια (0.05-0-2 επεισόδια/έτος) και σχετική συχνότητα -2% έως -0.5%. Στα περισσότερα τμήματα διακρίνονται λευκής απόχρωσης χρώματα, που υποδηλώνουν μηδενική μεταβολή των συχνοτήτων εμφάνισης των ακραίων επεισοδίων σκόνης.

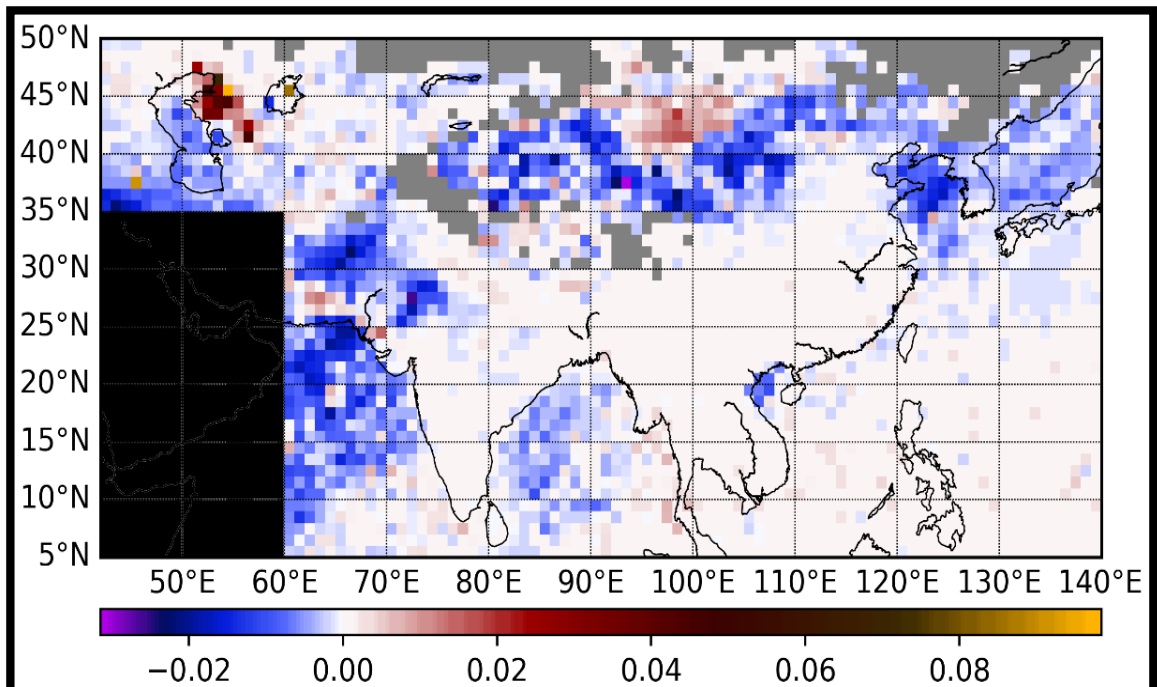
Σε ό,τι αφορά στην αντίστοιχη μεταβολή σε μηνιαία βάση (Σχήματα Π.8 και Π.10 Παραρτήματος), βρέθηκε ότι η μεταβολή ανά μήνα της απόλυτης και σχετικής συχνότητας των ακραίων επεισοδίων, χαρακτηρίζεται από παρόμοια συμπεριφορά, όπως επίσης ότι έχει κοινά χαρακτηριστικά με την από έτος σε έτος τάση μεταβολής σε περιοχικό επίπεδο. Βρέθηκε ότι υπάρχει τάση μείωσης κατά την άνοιξη πάνω από τις ερήμους Γκόμπι και Τακλαμακάν και την Κίτρινη Θάλασσα (ιδιαίτερα τον Απρίλιο) και τους καλοκαιρινούς μήνες στην Αραβική Θάλασσα, την έρημο Ταρ και τα νότια τμήματα του Πακιστάν, με εξαίρεση τον Αύγουστο όταν στην Αραβική Θάλασσα παρατηρείται αυξητική τάση των επεισοδίων. Το πρώτο μήνα του φθινοπώρου βρέθηκε μείωση της τάσης στο Πακιστάν και την έρημο Τακλαμακάν, ενώ αντίθετα τον Οκτώβριο αυξητική τάση στις ερήμους Τακλαμακάν και Γκόμπι και περίξ της Κασπίας Θάλασσας, με το Νοέμβριο χωρίς σημαντικές μεταβολές. Κατά τους χειμερινούς παρατηρείται ουδέτερη κατάσταση και μόνο σε πολύ τοπικό επίπεδο (έρημοι Τακλαμακάν, Γκόμπι και Καρακούμ) παρατηρούνται αυξομειώσεις της τάσης μεταβολής.



**Σχήμα 3.32.** Γεωγραφική κατανομή της διαχρονικής μεταβολής της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των ανά έτος ακραίων επεισοδίων ερημικής σκόνης (EDAEs) στην Ασία κατά την περίοδο 2005-2021. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

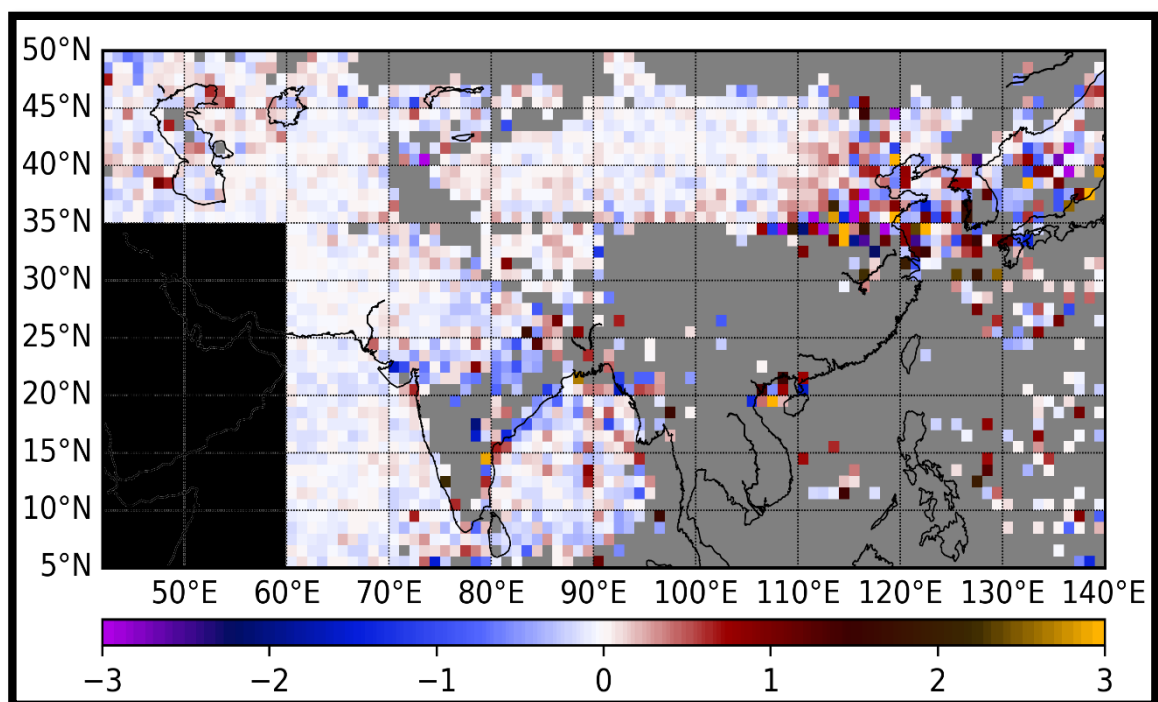


**Σχήμα 3.33.** Γεωγραφική κατανομή της διαχρονικής μεταβολής της σχετικής συχνότητας εμφάνισης των ανά έτος ισχυρών επεισοδίων ερημικής σκόνης (SDAEs) στην Ασία κατά την περίοδο 2005-2021. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

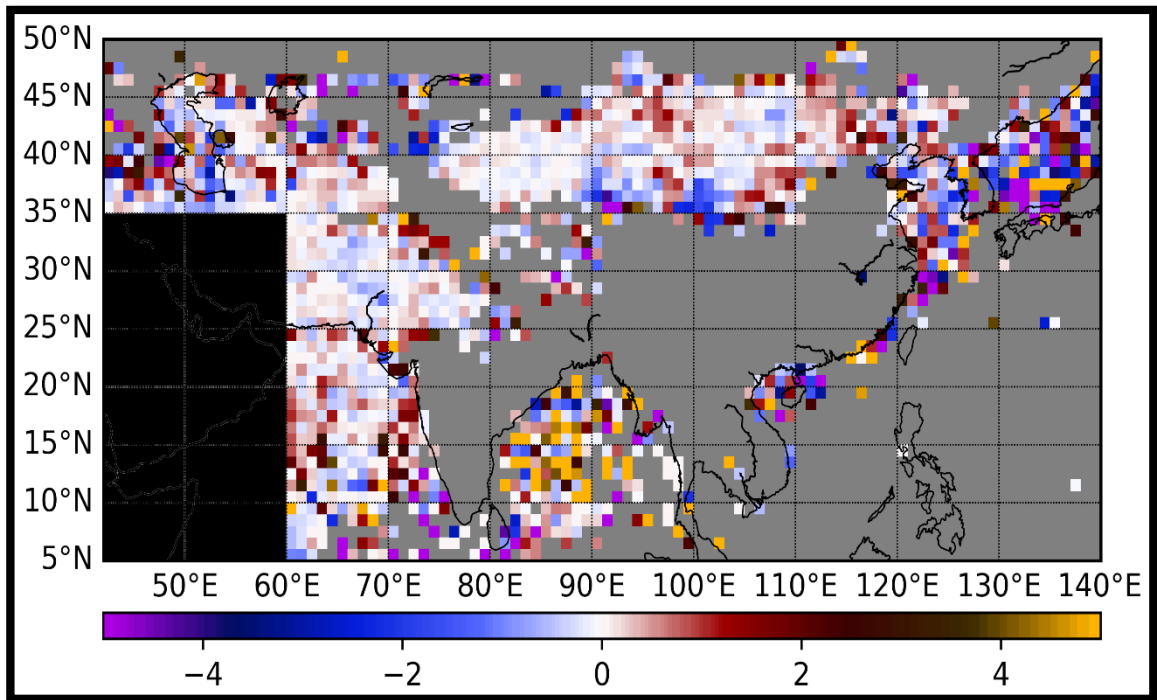


**Σχήμα 3.34.** Γεωγραφική κατανομή της διαχρονικής μεταβολής της σχετικής συχνότητας εμφάνισης των ανά έτος ακραίων επεισοδίων ερημικής σκόνης (EDAEs) στην Ασία κατά την περίοδο 2005-2021. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

Στα Σχήματα 3.35 και 3.36 παρουσιάζεται η γεωγραφική μεταβολή, σε τοπικό επίπεδο, της έντασης (του οπτικού βάθους) των ισχυρών και των ακραίων επεισοδίων σκόνης, αντίστοιχα, στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας κατά την περίοδο 2005-2021. Σύμφωνα, με τα αποτελέσματα φαίνεται ότι, γενικά, δεν υπάρχει σημαντική μεταβολή του οπτικού βάθους (περισσότερες λευκές αποχρώσεις) στις περιοχές στις οποίες κυρίως συμβαίνουν επεισόδια (ισχυρά και ακραία), όπως για παράδειγμα στις ερήμους Τακλαμακάν, Γκόμπι και Ταρ ή η την Αραβική Θάλασσα. Ουσιαστική μεταβολή παρατηρείται στα βορειοανατολικά τμήματα της Κίνας, όπου τοπικά παρατηρούνται θετικές και αρνητικές μεταβολές της έντασης των επεισοδίων, όπως επίσης και στη χερσόνησο της Κορέας και την Κίτρινη Θάλασσα. Παρατηρείται, μία μικρή αύξηση της έντασης των ισχυρών επεισοδίων σκόνης γύρω από την Κασπία Θάλασσα (Σχήμα 3.35) και των ακραίων επεισοδίων στον Κόλπο της Βεγγάλης (Σχήμα 3.36). Τέλος, στα Σχήματα Π.11 και Π.12 του Παραρτήματος, παρουσιάζεται η ανά μήνα γεωγραφική μεταβολή του οπτικού βάθους των ισχυρών (SDAEs) και των ακραίων επεισοδίων ερημικής σκόνης (EDAEs) για την περίοδο 2005-2021. Σύμφωνα με αυτά, η μεταβολή ανά μήνα του οπτικού βάθους σκόνης των ακραίων επεισοδίων, χαρακτηρίζεται από παρόμοια συμπεριφορά, όπως επίσης έχει κοινά χαρακτηριστικά με την από έτος σε έτος τάση μεταβολής σε περιοχικό επίπεδο.



**Σχήμα 3.35.** Γεωγραφική κατανομή της διαχρονικής μεταβολής του οπτικού βάθους των ανά έτος ισχυρών επεισοδίων ερημικής σκόνης (SDAEs) στην Ασία κατά την περίοδο 2005-2021. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.



**Σχήμα 3.36.** Γεωγραφική κατανομή της διαχρονικής μεταβολής του οπτικού βάθους των ανά έτος ακραίων επεισοδίων ερημικής σκόνης (EDAEs) στην Ασία κατά την περίοδο 2005-2021. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

## Σύνοψη – Συμπεράσματα

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία χρησιμοποιήθηκε ένας δορυφορικός αλγόριθμος, που λειτουργεί χρησιμοποιώντας σύγχρονα δορυφορικά δεδομένα εισαγωγής, με σκοπό τον προσδιορισμό των επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης στην ευρύτερη περιοχή της ηπείρου της Ασίας, η οποία περιέχει αρκετές από τις μεγαλύτερες ερήμους παγκοσμίως. Ο αλγόριθμος αυτός προσδιορίζει τα οριακά επίπεδα (threshold levels) του φορτίου των αερολυμάτων και κρίσιμων οπτικών ιδιοτήτων τους, που σχετίζονται με το μέγεθος και την απορροφητικότητά τους, βάσει των οποίων ανιχνεύονται τα αερολύματα σκόνης και προσδιορίζονται οι περιπτώσεις επεισοδίων τους, δηλαδή εκείνες στις οποίες το φορτίο σκόνης είναι ασυνήθιστα υψηλό. Τα επεισόδια των αερολυμάτων σκόνης κατατάσσονται από τον αλγόριθμο, βάσει της έντασής τους, δηλαδή του φορτίου τους, σε ισχυρά (strong) και ακραία (extreme). Ως δεδομένα εισαγωγής χρησιμοποιούνται δορυφορικής προέλευσης δεδομένα οπτικών ιδιοτήτων των αερολυμάτων και πιο συγκεκριμένα οι εξής τρεις οπτικές ιδιότητες των αερολυμάτων: το φασματικό οπτικό τους βάθος (AOD), ο δείκτης απορρόφησης (AI) και ο εκθετικός παράγοντας Ångström (Ångström Exponent,  $\alpha$ ). Το οπτικό βάθος (AOD) είναι μέτρο του φορτίου των αερολυμάτων, ο δείκτης αερολυμάτων (AI) είναι μέτρο της ικανότητας απορρόφησής τους και ο παράγοντας Ångström ( $\alpha$ ) 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 ( $\alpha$ ) υπολογίστηκαν έμμεσα (από τα φασματικά δεδομένα AOD του MODIS), από το λόγο δυο επιλεγμένων μηκών κύματος ακτινοβολίας (470 nm και 660 nm πάνω από ξηρά και 470 nm και 2130 nm πάνω από ωκεανούς). Για το οπτικό βάθος αερολυμάτων χρησιμοποιήθηκαν συνδυαστικά δεδομένα AOD από τους αλγόριθμους Deep Blue Land (DB) και Dark Target (DT), έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ολοκληρωμένη χωρική κάλυψη 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  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  γεωγραφικού πλάτους και μήκους και κάλυπταν την περίοδο 17 ετών από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2005 έως την 31<sup>η</sup> Δεκεμβρίου 2021. Ο αλγόριθμος εντοπίζει τα αερολύματα σκόνης (DA) με ένα συνδυασμό κριτηρίων/οριακών τιμών αποκοπής των οπτικών ιδιοτήτων AI και  $\alpha$ , που είναι δεδομένα εισαγωγής του, για κάθε γεωγραφική κυψελίδα (pixel)  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  για κάθε ημέρα κάθε μήνα κάθε έτους της περιόδου μελέτης. Έπειτα, εφαρμόζονται κατάλληλα επιλεγμένα φίλτρα αποκοπής προσδιορίστηκαν τα επεισόδια σκόνης (DAEs) και η ταξινόμησή τους, ανάλογα με την έντασή τους, σε ισχυρά (Strong DAEs, SDAEs) ή ακραία (Extreme DAEs, EDAEs). Ο αλγόριθμος υπολόγισε τη συχνότητα εμφάνισης των επεισοδίων αερολυμάτων ερημικής σκόνης (DAEs) ανά μήνα και έτος, τόσο σε απόλυτες όσο και σχετικές (επί τοις εκατό) τιμές (σε σχέση με το συνολικό αριθμό ημερών του μήνα και έτους για τις οποίες λειτούργησε ο αλγόριθμος), καθώς και την έντασή τους (το φορτίο τους), σε όρους

οπτικού τους βάθους, που ορίζεται έτσι ως οπτικό βάθος σκόνης (DOD). Τα αποτελέσματα μεσοποιήθηκαν και αθροίσθηκαν και για το σύνολο της περιοχής, καθώς και για επιλεγμένες υποπεριοχές, με σκοπό την ανάδειξη με ξεκάθαρο τρόπο των ενδοετήσιων/εποχικών, καθώς και των από έτος σε έτος μεταβολών. Επίσης, με την εφαρμογή της μεθόδου γραμμικής παλινδρόμησης εκτιμήθηκε η διαχρονική τάση μεταβολής των χαρακτηριστικών των επεισοδίων αερολυμάτων, δηλαδή της συχνότητας και της έντασης, ενώ αξιολογήθηκε και η στατιστική τους σημαντικότητα.

Σύμφωνα, με τα αποτελέσματα, οι μέσες ετήσιες κλιματολογικές τιμές της απόλυτης και σχετικής συχνότητας εμφάνισης και του φορτίου σκόνης στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας διαφέρουν από εποχή σε εποχή, αλλά και από έτος σε έτος. Γενικά, τα επεισόδια σκόνης παρατηρούνται περισσότερο συχνά και με μεγαλύτερη ένταση την άνοιξη και νωρίς το καλοκαίρι, ενώ τα πιο ασθενή και αραιά επεισόδια σημειώνονται το φθινόπωρο και το χειμώνα. Σε ετήσια κλιματολογική (για τα 17 έτη μελέτης 2005-2021) βάση, οι μεγαλύτερες τιμές της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης (ημέρες/έτος) των ισχυρών επεισοδίων σκόνης σημειώνονται στην έρημο Τακλαμακάν, την έρημο Ταρ (Ινδία) και στα νότια τμήματα του Πακιστάν, που συνορεύουν με την Αραβική Θάλασσα, όπου συμβαίνουν 15 έως 30 ημέρες επεισοδίων/έτος. Παρόμοια γεωγραφικά χαρακτηριστικά παρουσιάζει και η σχετική συχνότητα εμφάνισης, με τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 6 και 12%. Όσον αφορά στην ένταση των επεισοδίων σκόνης (εκπεφρασμένης σε όρους DOD), οι μεγαλύτερες εντάσεις παρατηρούνται στη βορειοανατολική Κίνα, στα νότια τμήματα της ερήμου Γκόμπι, την Κίτρινη Θάλασσα και την Κασπία Θάλασσα, ενώ ισχυρά είναι και τα επεισόδια στις ερήμους Τακλαμακάν και Ταρ και στην Αραβική θάλασσα, με τιμές έως και 1.6 και 3.5 για τα ισχυρά και τα ακραία επεισόδια, αντίστοιχα. Αναδεικνύεται ένας ξεκάθαρος εποχικός κύκλος της συχνότητας εμφάνισης των ισχυρών και ακραίων επεισοδίων σκόνης και για το σύνολο της περιοχής μελέτης, με ένα μέγιστο το θέρος (τον Ιούλιο) για τα ισχυρά επεισόδια και ένα διπλό μέγιστο για τα ακραία επεισόδια (πρωτεύον την άνοιξη – τον Απρίλιο – και δευτερεύον το θέρος – τον Ιούνιο). Αντίθετα, δεν υπάρχει αντίστοιχος ξεκάθαρος ετήσιος κύκλος για την ένταση των επεισοδίων (DOD), τα οποία ωστόσο είναι πιο έντονα την άνοιξη και το θέρος τα ισχυρά και την άνοιξη και το φθινόπωρο τα ακραία.

Διαπιστώνεται ότι η γεωγραφική κατανομή των συχνοτήτων εμφάνισης των επεισοδίων αερολυμάτων (ισχυρά και ακραία) 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 και της Κίτρινης Θάλασσας, στις οποίες παρατηρούνται οι μεγαλύτερες εντάσεις επεισοδίων σκόνης (τιμές DOD), 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. Μια τέτοια διαφοροποίηση δεν είναι παράδοξη, καθώς η συχνότητα και η ένταση των επεισοδίων έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά και λόγο ύπαρξης και προσδιορίζονται από διαφορετικές παραμέτρους. Έτσι, το πόσο συχνά ή σπάνια συμβαίνουν επεισόδια σκόνης οφείλεται σε παράγοντες όπως τα επικρατούντα βαρομετρικά συστήματα και η κατανομή και τα χαρακτηριστικά των πηγών εκπομπής των αερολυμάτων, ενώ οι ακραίες τιμές της έντασης των επεισοδίων καθορίζονται κυρίως από μεμονωμένα ισχυρά βαρομετρικά συστήματα ή από έντονη παραγωγή από τις πηγές τους (π.χ. ιδιαίτερα ισχυρή ανύψωση και μεταφορά ερημικής σκόνης). Ως εκ τούτου, δεν είναι παράδοξο να συμβαίνουν λίγα επεισόδια σκόνης, όμως τα οποία να είναι πολύ ισχυρά, όταν μάλιστα λαμβάνουν χώρα σε περιοχές που

έχουν υπόβαθρο υψηλού φορτίου αερολυμάτων, όπως είναι οι περιοχές με έντονη ανθρώπινη δραστηριότητα της ανατολικής Ασίας.

Επίσης, η σημαντικότητα του προσδιορισμού των επιπέδων αποκοπής για τα επεισόδια αερολυμάτων αναδεικνύεται από τη διαφοροποίηση των χωρικών χαρακτηριστικών της συχνότητας εμφάνισης των ισχυρών και των ακραίων επεισοδίων. Ο ρυθμός εμφάνισης των ακραίων επεισοδίων είναι με 7 με 8 επεισόδια ανά έτος και των ισχυρών περίπου 30 επεισόδια ανά έτος, όντας σημαντικά μικρότερος από τον αντίστοιχο των ισχυρών. Μια ομοιότητα μεταξύ ισχυρών και ακραίων επεισοδίων ερημικής σκόνης, είναι ότι και τα δύο σημειώνονται σε γειτονικές ή ίδιες περιοχές και κυρίως σε ηπειρωτικές περιοχές και πολύ λιγότερο σε θαλάσσιες ή ωκεάνιες περιοχές, γεγονός που αποδίδεται στην ισχυρότερη/ασθενέστερη μεταφορά ερημικής σκόνης από τις ερήμους σε κοντινές/μακρινές αποστάσεις. Εξαιρέση αποτελεί η Αραβική Θάλασσα, στην οποία όμως μεταφέρεται σκόνη και από τη γειτονική Σαουδική Αραβία (το θέρος), που δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης μας. Η ένταση των ισχυρών επεισοδίων, σε ετήσια βάση, φτάνει κυρίως σε τιμές οπτικού βάθους σκόνης έως περίπου 2, ενώ οι αντίστοιχες τιμές για τα ακραία επεισόδια είναι 3, με εξαίρεση μεγαλύτερες τιμές, τόσο για τα ισχυρά όσο και τα ακραία επεισόδια, κοντά σε ανθρωπογενείς περιοχές με μεγάλο πληθυσμό και βιομηχανική δραστηριότητα.

Η ανάλυση αναδεικνύει την έντονη μεταβλητότητα, από έτος σε έτος, της συχνότητας των επεισοδίων σκόνης στην Ασία, η οποία είναι στενά συνδεδεμένη με το ρυθμό παραγωγής των αερολυμάτων σκόνης από τις πηγές τους και την ένταση των μηχανισμών μεταφοράς και απομάκρυνσής τους, οι οποίοι με τη σειρά τους εξαρτώνται από τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες. Αντίστοιχη μεγάλη μεταβολή από έτος σε έτος βρέθηκε και για το σύνολο της περιοχής, τόσο για την απόλυτη συχνότητα των ισχυρών και ακραίων επεισοδίων (που κυμαίνεται από 2689 έως 9695 κυψελίδες για τα ισχυρά και από 678 έως 3743 κυψελίδες για τα ακραία επεισόδια), όσο και για την έντασή τους (που σε τιμές DOD κυμαίνεται από 0.82 έως 0.99 για τα ισχυρά και από 1.88 έως 2.24 για τα ακραία επεισόδια).

Όσον αφορά στη διαχρονική, από το 2005 έως το 2021, μεταβολή των ισχυρών και ακραίων επεισοδίων για το σύνολο της περιοχής μελέτης, βρέθηκε μια μειούμενη τάση της απόλυτης και σχετικής συχνότητας, η οποία όμως δεν είναι στατιστικά σημαντική, σύμφωνα με το στατιστικό τεστ Mann-Kendall. Επίσης, εκτιμήθηκε μια στατιστικά σημαντική (σύμφωνα με το τεστ Mann-Kendall) μειούμενη τάση της έντασης των ισχυρών επεισοδίων σκόνης, ενώ αντίθετα για τα ακραία επεισόδια βρέθηκε αυξητική τάση, μη στατιστικά σημαντική. Σε τοπικό επίπεδο παρατηρείται ότι διαχρονικά έχει υπάρξει αύξηση της συχνότητας εμφάνισης, τόσο της απόλυτης όσο και της σχετικής, των ισχυρών επεισοδίων σκόνης στην περιοχή ανάμεσα στην Κασπία Θάλασσα και τη λίμνη Αράλη, αλλά και στις ερήμους Καρακούμ, Κιζυλκούμ και Αραλούμ, με την αύξηση των ισχυρών επεισοδίων να είναι της τάξης των 8 με 14 κατά απόλυτη τιμή (ή ισοδύναμα κατά 0.5-0.8 περισσότερα επεισόδια/έτος), με τις αντίστοιχες μεταβολές των σχετικών συχνοτήτων να είναι 8-1.5%. Για τα ακραία επεισόδια, των οποίων η διαχρονική μεταβολή είναι παρόμοια με αυτή των ισχυρών, η μεγαλύτερη διαχρονικά αύξηση συμβαίνει ανατολικά της Κασπίας Θάλασσας με περίπου 5-10 επεισόδια (ή 0.3-0.6 επεισόδια/έτος), με την αύξηση της σχετικής συχνότητας κυμαίνεται μεταξύ 4 και 7%. Η σημαντικότερη μείωση της εμφάνισης των ισχυρών επεισοδίων από το 2005 στο 2021 (κατά 10-15 επεισόδια και πολύ τοπικά έως και κατά 20 κατά απόλυτη τιμή), συμβαίνει στις ερήμους Τακλαμακάν και Ταρ, στο Πακιστάν και στην Αραβική Θάλασσα. Για τα ακραία επεισόδια, μείωση της απόλυτης συχνότητας καταγράφεται στις ερήμους

Τακλαμακάν, Γκόμπι και Ταρ, το Πακιστάν (4-10 επεισόδια ή 0.2-0.6 επεισόδια/έτος), με την αντίστοιχη μεταβολή της σχετικής συχνότητας να κυμαίνεται από -1.5 έως -2.5%. Για το οπτικό βάθος δεν υπάρχει σημαντική μεταβολή στις περιοχές στις οποίες κυρίως συμβαίνουν επεισόδια (ισχυρά και ακραία) (π.χ. έρημοι Τακλαμακάν, Γκόμπι και Ταρ ή Αραβική Θάλασσα). Ουσιαστική μεταβολή παρατηρείται στα βορειοανατολικά τμήματα της Κίνας, όπου τοπικά παρατηρούνται θετικές και αρνητικές μεταβολές της έντασης των επεισοδίων, όπως επίσης στη χερσόνησο της Κορέας και την Κίτρινη Θάλασσα. Για τα ακραία επεισόδια παρατηρείται αύξηση του DOD γύρω από την Κασπία Θάλασσα και τον Κόλπο της Βεγγάλης, ενώ δε διακρίνεται διαχρονικά μείωση της έντασης των επεισοδίων (ισχυρών και ακραίων).

Η παρούσα μελέτη είναι σημαντική, καθώς για πρώτη φορά καταγράφει σε κλιματολογική βάση (περίοδος 2005-2021) τα χαρακτηριστικά των επεισοδίων αερολυμάτων σκόνης σε μια εκτεταμένη χωρικά έκταση της Ασίας, η οποία περιλαμβάνει σημαντικές περιοχές, τόσο σε οικονομικό όσο και πολιτιστικό επίπεδο. Σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία δεν έχει δημοσιευτεί άλλη μελέτη που να παρέχει τόσο εκτεταμένη γεωγραφική και ταυτόχρονα τόσο μεγάλη (17-ετής περίοδος) χρονική κάλυψη. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν δίνουν σημαντική πληροφορία για τη συχνότητα και την ένταση των επεισοδίων σκόνης τόσο σε τοπικό επίπεδο, όσο για το σύνολο της περιοχής, αναδεικνύοντας πού συμβαίνουν περισσότερο συχνά και με μεγαλύτερη ένταση τα επεισόδια. Επίσης, ανέδειξε και πάλι σε τοπικό επίπεδο και για το σύνολο της περιοχής σε ποια εποχή του έτους και σε ποια έτη συμβαίνουν τα πλέον συχνά και έντονα επεισόδια. Μελλοντικά, είναι ενδιαφέρουσα η ανάδειξη των διαφορετικών εποχικών κύκλων της ερημικής σκόνης, αλλά και των διαχρονικών τάσεων μεταβολής της, ανά περιοχή, με το χωρισμό της περιοχής μελέτης σε επιμέρους υποπεριοχές. Στις προοπτικές συνέχισης της μελέτης συμπεριλαμβάνεται και η περαιτέρω ανάλυση των ημερών επεισοδίων ερημικής σκόνης (DAEDs), δηλαδή ημερών κατά τις οποίες τα επεισόδια σκόνης έχουν ιδιαίτερα μεγάλη χωρική έκταση, όπως έχει γίνει για άλλες περιοχές (Μεσόγειος, Gkikas et al., 2013, 2015; Gavrouzou et al., 2021), για να εξαχθούν συμπεράσματα που αφορούν στη γεωγραφική και διαχρονική μεταβολή τους. Επιπλέον, θα έχει ενδιαφέρον με τη χρήση κατάλληλα τροποποιημένης έκδοσης του αλγορίθμου, να προσδιοριστούν οι περιπτώσεις των περιπτώσεων επεισοδίων ερημικής σκόνης (Dust Aerosol Episode Cases, DAECs), δηλαδή συνεχόμενων επεισοδιακών ημερών (DAEDs) με  $n \geq 1$  (όπου  $n$  ο αριθμός των επεισοδιακών ημερών). Ακόμη, μελλοντικά, ο αλγόριθμος μπορεί να λειτουργήσει με χρήση άλλων δεδομένων εισόδου, είτε δορυφορικών (π.χ. MISR, SeaWIFS) είτε επανανάλυσης (MERRA-2), με σκοπό την εξέταση της ευαισθησίας των ευρημάτων της παρούσας μελέτης στα δεδομένα εισαγωγής του αλγορίθμου, δεδομένων των αβεβαιοτήτων των δεδομένων ανάκτησης από δορυφορικές μετρήσεις και αυτών από θεωρητικά μοντέλα. Τα δορυφορικά δεδομένα MODIS, όπως και αυτά του OMI, που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έκδοση του αλγορίθμου είναι δεδομένα ατμοσφαιρικής κολώνας (columnar). Αυτό έχει ως συνέπεια την ύπαρξη αβεβαιοτήτων, ως ένα βαθμό, στα αποτελέσματα, καθώς, μέσω της εφαρμογής των κατάλληλων ορίων αποκοπής, θεωρείται ότι ανιχνεύεται η παρουσία των αερολυμάτων σκόνης στην ατμόσφαιρα μια περιοχής, όμως αυτή πρέπει να εννοείται πιο σωστά ως επικράτηση στην ατμόσφαιρα και όχι παρουσία μόνο αυτού του τύπου των αερολυμάτων. Αυτό δε συμβαίνει πάντοτε στην πραγματικότητα, διότι συνυπάρχουν κάποιες φορές διαφορετικού τύπου αερολύματα, τα οποία συνεισφέρουν, έστω και σε μικρό βαθμό στις περιπτώσεις επεισοδίων σκόνης, στις οπτικές ιδιότητες των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων. Έτσι, ο αλγόριθμος μπορεί να βελτιωθεί, με σκοπό τη μείωση αυτών των αβεβαιοτήτων, ώστε να συνδυάζει τη χρήση δεδομένων οπτικών ιδιοτήτων αερολυμάτων κατακόρυφης ανάλυσης.



Τέτοια δεδομένα είναι, για παράδειγμα, αυτά του Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIOP), τα οποία ωστόσο δεν παρέχουν την ίδια υψηλή χρονική ανάλυση (Gui et al., 2022).



# **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- 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, pp. 1042-1047, 2000.
- Adler, R. F., Huffman, G. J., Chang, A., Ferraro, R., Xie, P. P., Janowiak, J., Bruno Rudolf, Schneider U., Curtis S., Bolvin D., Gruber A., Susskind J., Arkin P., Nelkin, E.: The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979–present). *Journal of hydrometeorology*, 4(6), pp. 1147-1167, 2003.
- Albrecht, B.A.: Aerosols, Cloud Microphysics, and Fractional Cloudiness. *Science*, 245, pp. 1227-1230, 1989.
- An, L., Che, H., Xue, M., Zhang, T., Wang, H., Wang, Y., Zhou, C., Zhao, H., Gui, K., Zhenga, 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, *Science of the Total Environment*, 633, pp. 452–462, 2018.
- Banerjee, P., Satheesh, S. K., Moorthy, K. K.: The unusual severe dust storm of May 2018 over Northern India: Genesis, propagation, and associated conditions, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126, e2020JD032369, 2021.
- Bao, T., Gao, T., Nandintsetseg, B., Yong, M., Jin, E.: Variations in Frequency and Intensity of Dust Events Crossing the Mongolia–China Border, *SOLA*, Vol. 17, pp. 145–150, 2021.
- Boucher, O.: Atmospheric aerosols, in: *Atmospheric Aerosols*. Springer, pp. 9–24, 2015.
- Bougiatioti, A., Bezantakos, S., Stavroulas, I., Kalivitis, N., Kokkalis, P., Biskos, G., Mihalopoulos, N., Papayannis, A., 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.
- Breckle, S. W., Wucherer, W.: *The Aralkum, a man-made desert on the desiccated floor of the Aral Sea (Central Asia): general introduction and aims of the book* (pp. 1-9). Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- Chen, Y.C., Li, J.L.F., Lee, W.L., Diner, D.J., Garay, M.J., Jiang, J.H., Wang, Y.H., Yu, J.Y., Kalashnikova, O.V.: Evaluation of sea salt aerosols in climate systems: global climate modeling and observation-based analyses, *Environmental Research Letters*, Volume 15, Number 3, 2020.
- Chu, D.A., Kaufman, Y.J., Ichoku, C., Remer, L.A., Tanré, D., Holben, B.N.: Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 8007, 2002.
- Colbeck, I.: *Physical and chemical properties of aerosols*, Blackie Academic & Professional, First edition, 1998.
- Darmenova, K., Sokolik, I.N., Darmenov, A.: Characterization of East Asian dust outbreaks in the spring of 2001 using ground-based and satellite data, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 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. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(25), 11217-11222, 2010.
- Dey, S., Tripathi, S.N., Singh, R.P.: Influence of dust storms on the aerosol optical properties over the Indo-Gangetic basin, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109, D20211, 2004.
- Dey, S., Girolamo, L.D.: A climatology of aerosol optical and microphysical properties over the Indian subcontinent from 9 years (2000–2008) of Multiangle Imaging Spectroradiometer (MISR) data, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115, D15204, 2010.
- Doede, A. L., DeGuzman, P. B.: The disappearing lake: A historical analysis of drought and the Salton Sea in the context of the GeoHealth Framework. *GeoHealth*, 4(9), e2020GH000271, 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, 20 673-20 696, 2000.
- European State of The Climate, Summary, 2019.
- Fan, J., Shao, L., Hu, Y., Wang, J., Wang, J., Ma, J.: Classification and chemical compositions of individual particles at an eastern marginal site of Tibetan Plateau, *Atmospheric Pollution Research*, 2016.
- Floutsi, A.A., Korras-Carraca, M.B., Matsoukas, C., Hatzianastassiou, N., Biskos, G.: The regime of Aerosol Optical Depth and Ångström exponent over Central and South Asia, *E3S Web of Conferences* 99, 01003, 2019.
- Fussel, J.C., Kelly, F.J.: *Mechanisms underlying the health effects of desert sand dust*, Environment International, Elsevier, 2021.
- Filonchyk, M.: Characteristics of the severe March 2021 Gobi Desert dust storm and its impact on air pollution in China, *Chemosphere*, 287, 132219, 2022.
- Gavrouzou, M., Hatzianastassiou, N., Gkikas, A., Korras-Carraca, M.B., Mihalopoulos, N.: A Global Climatology of Dust Aerosols Based on Satellite Data: Spatial, Seasonal and Inter-Annual Patterns over the Period 2005–2019, *Remote Sensing*, 2021.
- Gavrouzou, M., Hatzianastassiou, N., Gkikas, A., Lolis, C.J., Mihalopoulos, N.: A Climatological Assessment of Intense Desert Dust Episodes over the Broader Mediterranean Basin Based on Satellite Data, *Remote Sens.*, 13, 2895, 2021.
- Ginoux P., Prospero J. M., Gill T. E., Hsu N. C., Zhao M.: Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products, *Reviews of Geophysics*, vol. 50, Issue 3, 2012.
- Gkikas, A., Hatzianastassiou, N., Mihalopoulos, N., Katsoulis, V., Kazadzis, S., Pey, J., Querol, X., Torres, O.: The regime of intense desert dust episodes in the Mediterranean based on contemporary satellite observations and ground measurements *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 12135–12154, 2013.

- Gkikas A., Houssos, E.E., Lolis, C.J., Bartzokas, A., Mihalopoulos, N., Hatzianastassiou, N.: Atmospheric circulation evolution related to desert-dust episodes over the Mediterranean, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141: 1634–1645, 2015.
- Gkikas, A., Basart, S., Hatzianastassiou, N., Marinou, E., Amiridis, V., Kazadzis, S., Pey, J., Querol, X., Jorba, O., Gassó, S., Baldasano, J.M.: Mediterranean intense desert dust outbreaks and their vertical structure based on remote sensing data, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 8609–8642, 2016.
- 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. *International Journal of Climatology*, 42(11), pp. 6042–6054, 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, *Remote Sens.*, 14, 1416, 2022.
- Hatzianastassiou, N., Wobrock, W., Flossmann, A. I.: The effect of cloud-processing of aerosol particles on clouds and radiation, *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 50:5, 478-490 1998.
- Hatzianastassiou, N., Gkikas, A., Mihalopoulos, N., Torres, O., Katsoulis, B. D.: Natural versus anthropogenic aerosols in the eastern Mediterranean basin derived from multi-year TOMS and MODIS satellite data, *J. Geophys. Res.*, 114, D24202, 2009.
- Hatzianastassiou, N., Kalaitzi, N., Gavrouzou, M., Gkikas, A., Korras-Carraca, M.B., Mihalopoulos, N.: A climatological satellite assessment of absorbing carbonaceous aerosols on a global scale, *Atmosphere (Basel)*, 2019.
- 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, *Atmospheric Environment*, 285, 119238, 2022.
- 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, 12,067-12,097, 2001.
- Hsu, N. C., Jeong, M. J., Bettenhausen, C., Sayer, A. M., Hansell, R., Seftor, C. S., Tsay, S. C.: Enhanced Deep Blue aerosol retrieval algorithm: The second generation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(16), 9296-9315, 2013.
- 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, *Aerosol and Air Quality Research*, 13, pp.179–193, 2013.
- Indoitu, R., Orlovsky, L., Orlovsky, N.: Dust storms in Central Asia: Spatial and temporal variations, *Journal of Arid Environments*, 85, 62e70, 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.
- Jin, Q., Wang, C.: The greening of Northwest Indian subcontinent and reduction of dust abundance resulting from Indian summer monsoon revival. *Scientific reports*, 8(1), 4573, 2018.
- Jin, Q., Wei, J., Pu, B., Yang, Z. L., Parajuli, S. P.: High summertime aerosol loadings over the Arabian Sea and their transport pathways. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(18), 10-568, 2018.
- Jin, Q., Wei, J., Lau, W. K., Pu, B., Wang, C.: Interactions of Asian mineral dust with Indian summer monsoon: Recent advances and challenges. *Earth-Science Reviews*, 215, 2021.
- Johnson, B.T., Shine, K.P. and Forster, P.M.: The semi-direct aerosol effect: Impact of absorbing aerosols on marine stratocumulus, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 130, pp. 1407–1422, 2004.
- Kang, L., Huang, J., Chen, S., Wang, X.: Long-term trends of dust events over Tibetan Plateau during 1961–2010, *Atmospheric Environment*, 125, pp. 188–198, 2016.
- Karami, K., Hamzeh, N.H., Kaskaoutis, D.G., Rashki, A., Alam, K., 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 Research*, 50, 100679, 2021.
- Kaufman, Y.J., Tanré, D., Remer, L.A., Vermote, E.F., Chu, A., Holben, B.N.: Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, *J. Geophys. Res.*, 102, 17051–17065, 1997.
- Kendall, M.G.: *Rank Correlation Methods*, 4th edition, Charles Griffin, London, 1975.
- Kennedy, M.I.: *The health effects of combustion-generated aerosols*, Proceedings of the Combustion Institute, Elsevier, 2007.
- Kinne, S., Schulz, M., Textor, C., Guibert, S., Balkanski, Y., Bauer, S. E., Tie, X.: An AeroCom initial assessment—optical properties in aerosol component modules of global models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(7), 1815-1834, 2006.
- Kohler, A., Böcker, U., Warringer, J., Blomberg, A., Omholt, S.W., Stark, E., Martens, H.: Reducing Inter-Replicate Variation in Fourier Transform Infrared Spectroscopy by Extended Multiplicative Signal Correction, *Applied Spectroscopy*, vol. 63(3), 296–305, 2009.
- Kok, J. F., Storelvmo, T., Karydis, V. A., Adebisi, A. A., Mahowald, N. M., Evan, A. T., He, C., Leung, D. M.: Mineral dust aerosol impacts on global climate and climate change. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1-16, 2023.
- Koriche, S.A., Nandini-Weiss, S.D., Prange, M., Singarayer, J. S., Arpe, K., Cloke, H.L., Schulz, M., Bakker, P., Leroy, S.A.G., Coe, M.: Impacts of Variations in Caspian Sea Surface Area on Catchment-Scale and Large-Scale Climate, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(18), 2021.

- Kumar, A., Suresh, K., Rahaman, W.: Geochemical characterization of modern aeolian dust over the Northeastern Arabian Sea: Implication for dust transport in the Arabian Sea. *Science of The Total Environment*, 729, 138576, 2020.
- Lee, W.S., Kim, M.K.: Effects of radiative forcing by black carbon aerosol on spring rainfall decrease over Southeast Asia, *Atm. Environ.*, 44, 3739-3744, 2010.
- Levy, R. C., Remer, L. A., Kleidman, R. G., Mattoo, S., Ichoku, C., Kahn, R., Eck, T. F.: Global evaluation of the Collection 5 MODIS dark-target aerosol products over land. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(21), 10399-10420, 2010.
- Lewis, E.R., Schwartz, S.E.: Sea salt aerosol production: mechanisms, methods, measurements, and models. American geophysical union, 2004.
- Lim, J.Y., Chun, Y.: The characteristics of Asian dust events in Northeast Asia during the springtime from 1993 to 2004, *Global and Planetary Change*, 52, pp. 231–247, 2006.
- 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, C., Chung, C.H., Yin, Y., Schnaiter, M.: The absorption Ångström exponent of black carbon: from numerical aspects, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 6259–6273, 2018.
- 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.
- Liu, X., Chen, S., Guo, Z., Zhou, H., Chena, Y., Kanga, Y., Liua, Q., Huang, G., Liu, T., Chen, C., Hee, Q.: The influence of dusts on radiation and temperature over the eastern Asia with a regional climate model, *Science of the Total Environment*, 792, 148351, 2021.
- Lohmann, U., Feichter, J.: Global indirect aerosol effects: a review, *EGU, Atmos. Chem. Phys.*, 5, 715–737, 2005.
- Loodin, N.: Aral Sea: an environmental disaster in twentieth century in Central Asia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(4), 2495-2503, 2020.
- Mann, H.B.: Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13, pp. 245–259. 1945.
- Mauderly, J.L, Chow, J.C.: Health Effects of Organic Aerosols, *Inhalation Toxicology, International Forum for Respiratory Research*, 2008.
- McCall, D.S., Ulanowski, Z., Hesse, E., Stopford, C., Kandler, K., Kaye, P.H.: Investigation into Single Scattering Properties of Airborne Saharan Dust Particles, 11<sup>th</sup> Conference on Electromagnetic & Light Scattering, 2015.
- Merikanto, J., Spracklen, D. V., Mann, G. W., Pickering, S. J., Carslaw, K. S.: Impact of nucleation on global CCN. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(21), 8601-8616, 2009.
- 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, *Atmospheric Pollution Research*, 13, 101395, 2022.

- Nan, Y., Wang, Y.: De-coupling interannual variations of vertical dust extinction over the Taklimakan Desert during 2007–2016 using CALIOP, *Science of the Total Environment*, 633, pp. 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. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126, e2020JD033382, 2021.
- Pandey, S.K., Vinoj, V., Landu, K., Babu, S.S.: Declining pre-monsoon dust loading over South Asia: Signature of a changing regional climate, *Scientific Report*, 2017.
- Papadimas, C.D., Hatzianastassiou, N., Mihalopoulos, N., Querol, X., 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, D11205, 2008.
- Prijith, S.S., Rajeev, K., Thampi, B.V., Nair, S.K., Mohan, M.: Multi-year observations of the spatial and vertical distribution of aerosols and the genesis of abnormal variations in aerosol loading over the Arabian Sea during Asian summer monsoon season, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 105-106, pp. 142–151, 2013.
- Proestakis, E., Amiridis, V., Marinou, E., Georgoulias, 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, pp. 1337–1362, 2018.
- 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.
- Ramaswamy, V., Muraleedharan, P.M., 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, *Scientific Report*, 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.
- Rashki, A., Kaskaoutis, D. G., Mofidi, A., Minvielle, F., Chiapello, I., Legrand, M., Dumka, U., C., Francois, P.: Effects of Monsoon, Shamal and Levar winds on dust accumulation over the Arabian Sea during summer–The July 2016 case. *Aeolian Research*, 36, 27-44, 2019.
- Rashki, A., Kaskaoutis, D.: Assessment of the dust sources over Central and Southwest Asia with emphasis on the Sistan dust storms, *E3S Web of Conferences* 99, 01002, 2019.
- Remer, L.A., Kaufman, Y.J., Tanré, D., Mattoo, S., Chu, D.A., Martins, J.V., Li, R.R., Ichoku, C., Levy, R.C., Kleidman, R.G., Eck, T.F., Vermote, E., Holben, B.N.: The MODIS aerosol algorithm, products and validation, *J. Atmos. Sci.*, 62(4), 947–973, 2005.
- Remer, L.A., et al.: Global aerosol climatology from the MODIS satellite sensors, *J. Geophys. Res.*, 113, D14S07, 2008.
- 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., Ahman, Z.: Validation of MODIS aerosol retrieval over ocean, *Geophys. Res. Lett.*, 29(12), 8008, 2002.

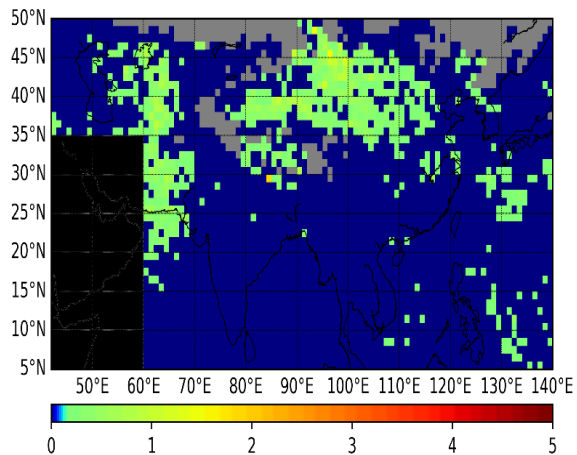


- Remer, L. A., Levy, R. C., Mattoo, S., Tanré, D., Gupta, P., Shi, Y., Holben, B. N.: The dark target algorithm for observing the global aerosol system: Past, present, and future. *Remote sensing*, 12(18), 2900, 2020.
- Sanchez, P. A., Bandy, D. E., Villachica, J. H., Nicholaidis, J. J.: Amazon Basin soils: management for continuous crop production. *Science*, 216(4548), pp. 821-827, 1989.
- Schepanski, K.: Transport of mineral dust and its impact on climate. *Geosciences*, 8(5), 151, 2018.
- Seinfeld, J., Pandis, S.: *Atmospheric Chemistry and Physics*, New York, 2006.
- Sokolik, I.N.: AEROSOLS – Dust, *Encyclopedia of Atmospheric Sciences (Second Edition)*, Elsevier, pp. 48-52, 2015.
- Sternberg, T., Rueff, H., Middleton, N.: Contraction of the Gobi Desert, 2000–2012, *Remote Sens.*, 7, pp. 1346-1358, 2015.
- Tanré, D., Kaufman, Y.J., Herman, M., 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, *Atmospheric Research*, 265, 105886, 2022.
- Torres, O., Tanskanen, A., Veihelmann, B., Ahn, C., Braak, R., Bhartia, P.K., Veefkind, P., Levelt, P.: Aerosols and surface UV products from Ozone Monitoring Instrument observations: An overview, *Journal of Geophysical Research*, vol. 112, 2007.
- Trenberth, K. E., Smith, L.: The mass of the atmosphere: A constraint on global analyses. *Journal of Climate*, 18(6), 864-875, 2005.
- Varlas, G., Marinou, E., Gialitaki, A., Siomos, N., Tsarpalis, K., Kalivitis, N., Solomos, S., Tsekeri, A., Spyrou, C., Tsihla, M.: Assessing Sea-State Effects on Sea-Salt Aerosol Modeling in the Lower Atmosphere Using Lidar and In-Situ Measurements, *Remote Sensing*, 13, 614, 2021.
- Wanga, X., Huanga, J., Jia, M., Higuchi, K.: Variability of East Asia dust events and their long-term trend, *Atmospheric Environment*, 42, 3156–3165, 2008.
- Wang, X., Liu, J., Che, H., Ji, F., Liu, J.: Spatial and temporal evolution of natural and anthropogenic dust events over northern China, *Scientific Reports*, 2018.
- 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, *Environmental Research Letters*, Volume 16, Number 12, 2021.
- Whitby, K.T.: The physical characteristics of sulfur aerosols, in: *Sulfur in the Atmosphere*, Elsevier, pp. 135–159, 1978.
- White, K. D.: Nature-society linkages in the Aral Sea region. *Journal of Eurasian Studies*, 4(1), 18–33, 2013.
- Xiong, X., Chiang, K., Sun, J., Barnes, W.L., Guenther, B., Salomonson, V.V.: NASA EOS Terra and Aqua MODIS on-orbit performance, *Science Direct, Advances in Space Research* 43, pp. 413–422, 2008.

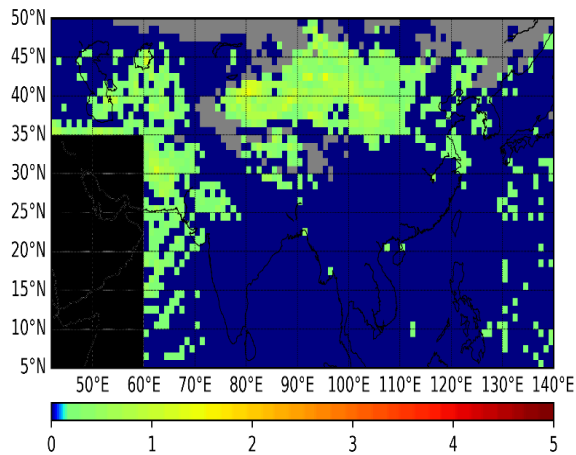
- Xi, X., Sokolik, I.N.: Dust interannual variability and trend in Central Asia from 2000 to 2014 and their climatic linkages, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 12,175–12,197, 2016.
- Yang, L., Zhang, S., Huang, Z., Yang, Y., Wang, L., Han, W., Li, X.: Characteristics of Dust Events in China from 2015 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, *Science of the Total Environment* 777, 146064, 2021.
- Yoon, J.E., Lim, J.H., Shim, J.M., Kwon, J.I., Kim, I.N.: Spring 2018 Asian Dust Events: Sources, transportation, and potential biogeochemical implications. *Atmosphere*, 10(5), 276, 2019.
- Yu, H., Chin, M., Yuan, T., Bian, H., Remer, L. A., Prospero, J. M., Omar, A. , Winker, D., Yang, Y., Zhang, Y., Zhang, Z., Zhao, C.: The fertilizing role of African dust in the Amazon rainforest: A first multiyear assessment based on data from Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 2015.
- Yu, Y., Kalashnikova, O.V., Garay, M.J., Notaro, M.: Climatology of Asian dust activation and transport potential based on MISR satellite observations and trajectory analysis, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, pp. 363–378, 2019.
- 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, pp. 8353–8371, 2018.
- Zhang, X.X., Claiborn, C., Lei, J.Q., Vaughan, J., Shi-Xin Wu, S.X., Li, S.Y., Liu, L.Y., Wang, Z.F., Wang, Y.D., Huang, S.Y., Zhou, J.: Aeolian dust in Central Asia: Spatial distribution and temporal variability, *Atmospheric Environment*, 238, 117734, 2020.
- 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, *Aerosol and Air Quality Research*, Volume 21, Issue 5, 200443, 2020.
- Zhao, T.L., Gong, S.L., Zhang, X.Y., Blanchet, J.P., McKendry, I.G., Zhou, Z.J.: A Simulated Climatology of Asian Dust Aerosol and Its Trans-Pacific Transport. Part I: Mean Climate and Validation, *Journal of Climate*, Vol. 19, pp. 88-103, 2006.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

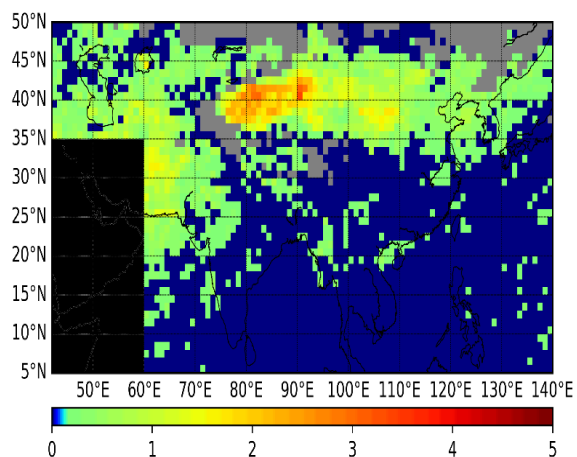
## JANUARY



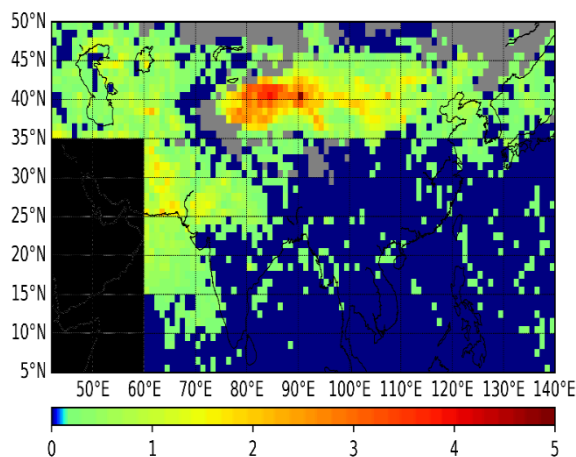
## FEBRUARY



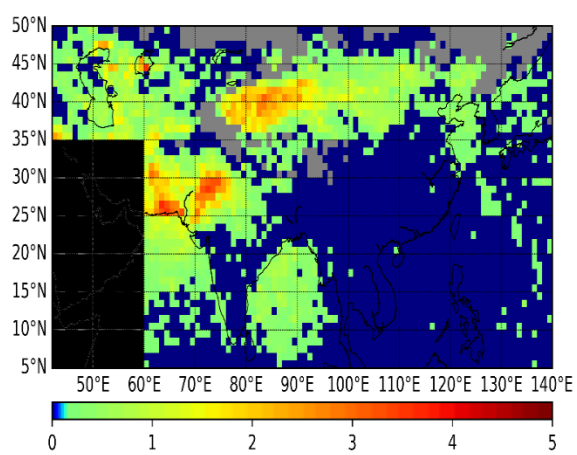
## MARCH



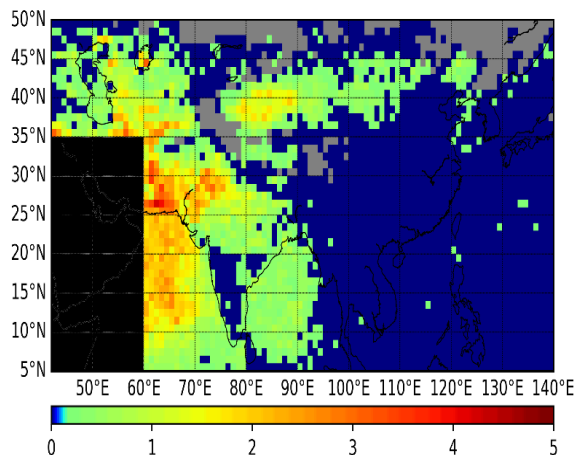
## APRIL

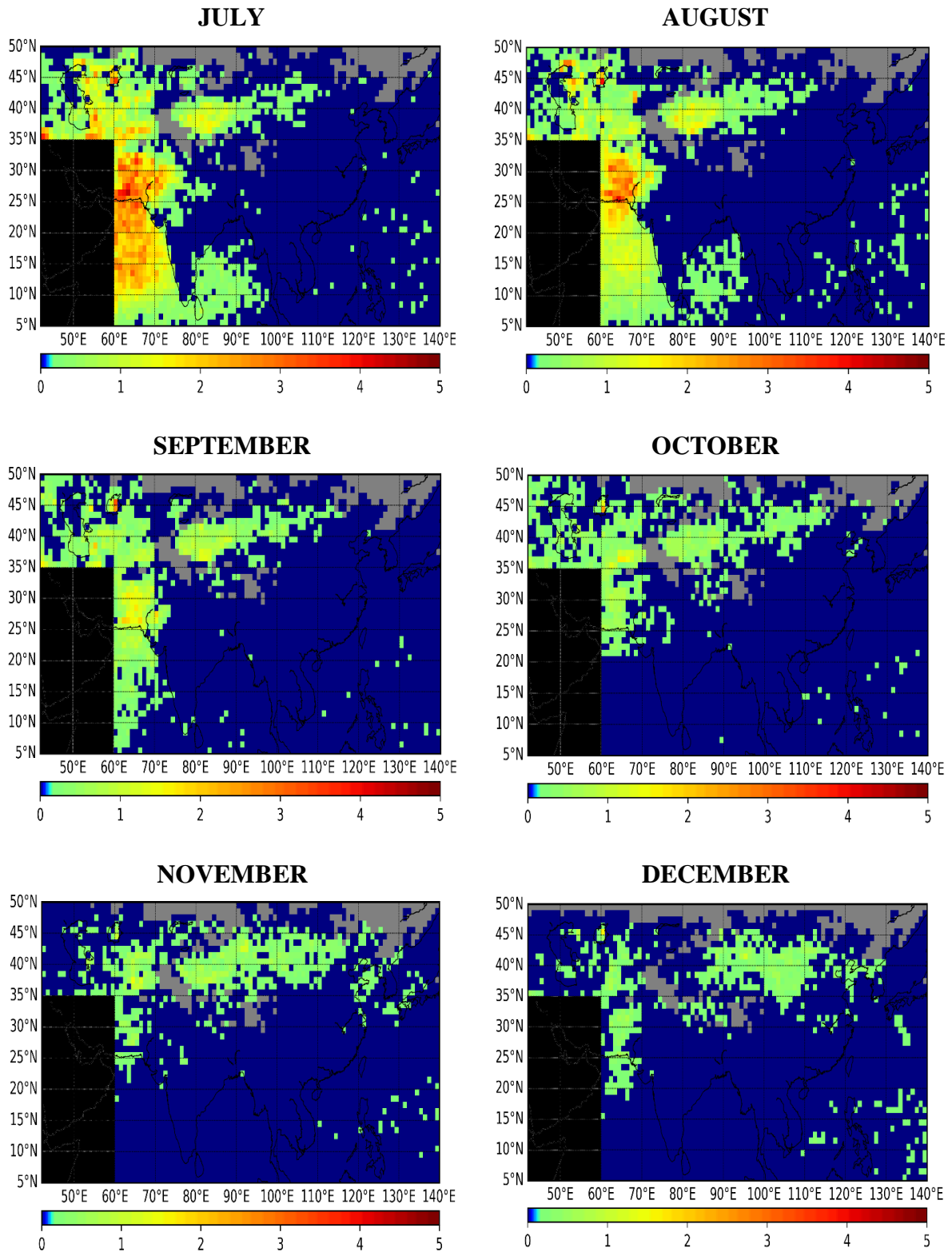


## MAY



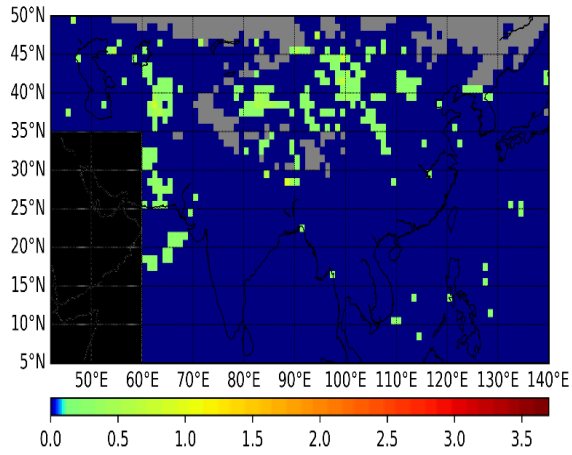
## JUNE



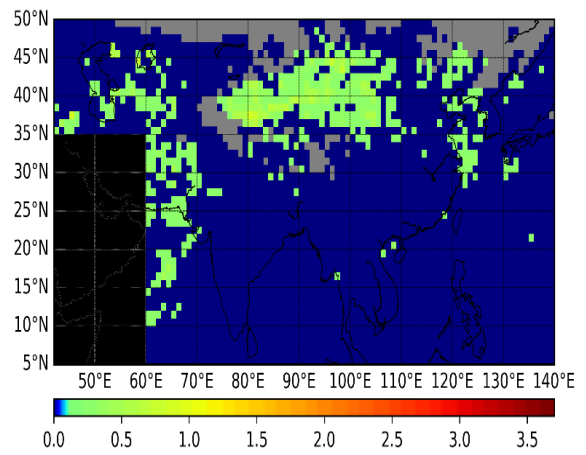


**Σχήμα Π.1.** Γεωγραφική κατανομή της τυπικής απόκλισης (STDV) της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των μέσων μηνιαίων ισχυρών επεισοδίων ερημικής σκόνης (SDAEs) (επεισόδια/μήνα) για την περίοδο 2005-2021. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

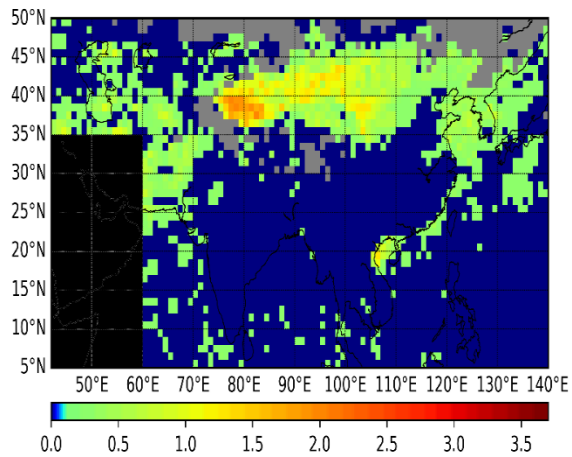
**JANUARY**



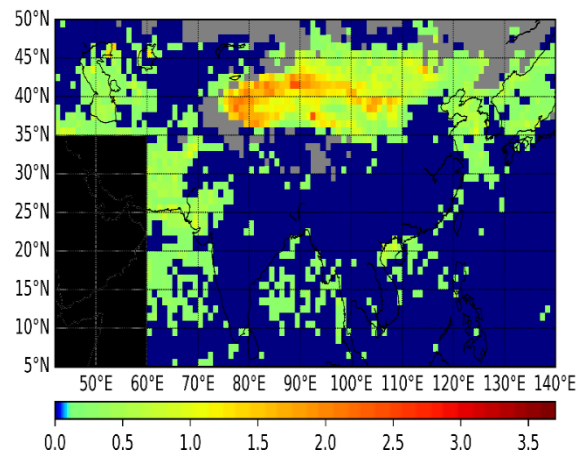
**FEBRUARY**



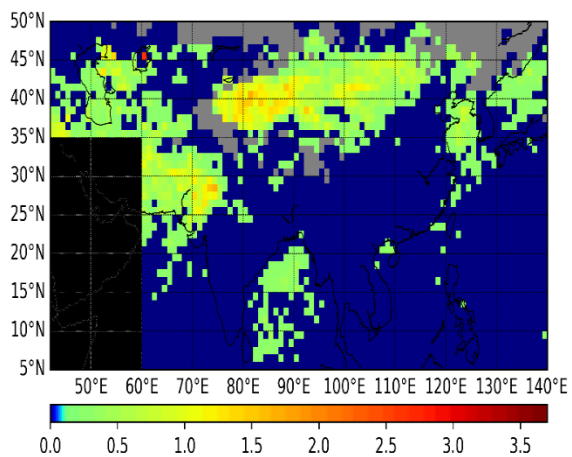
**MARCH**



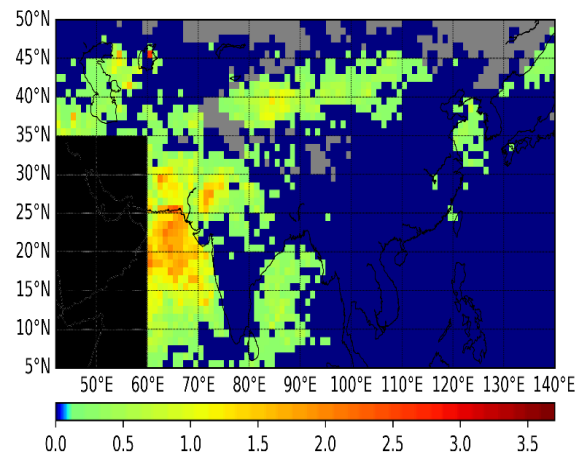
**APRIL**

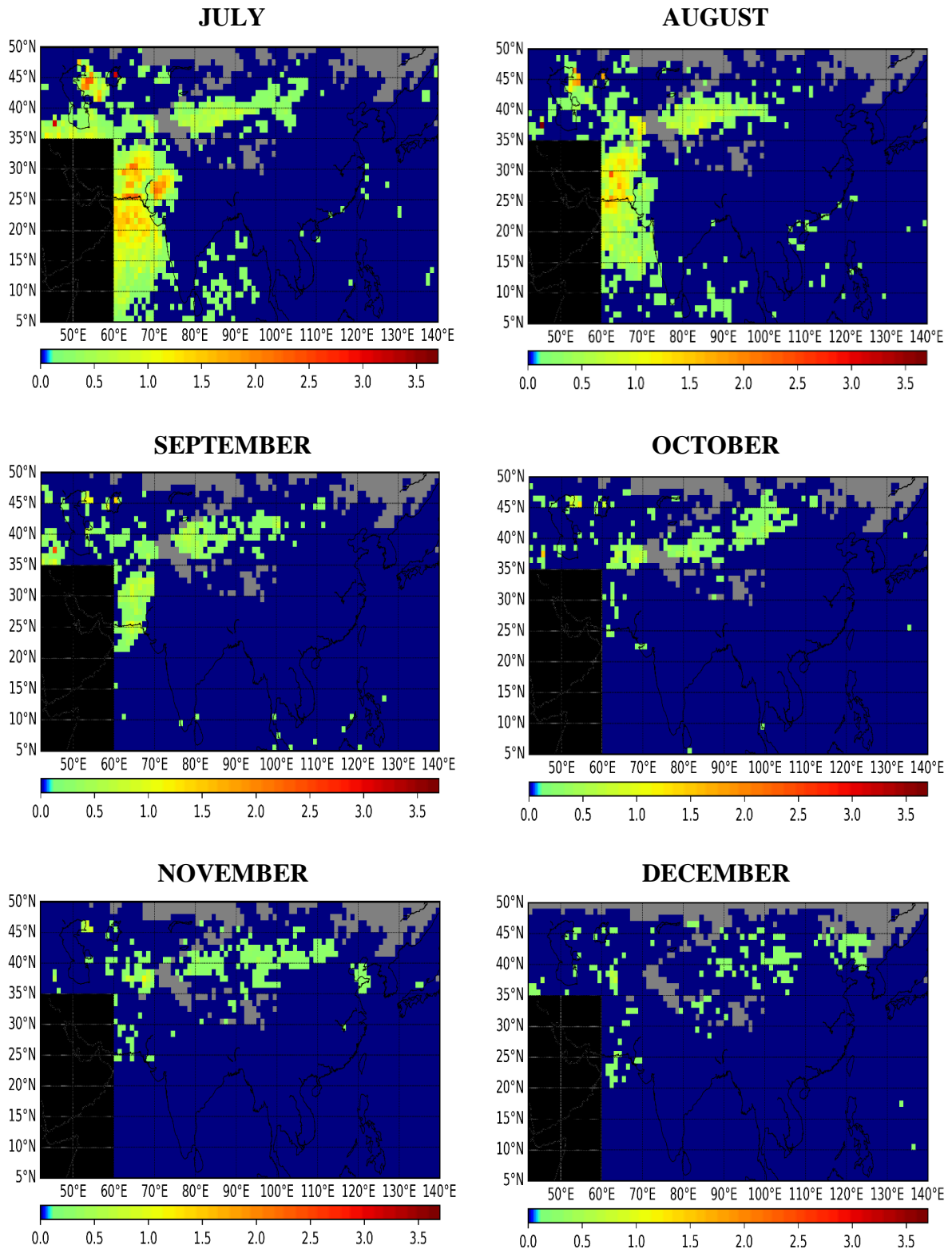


**MAY**



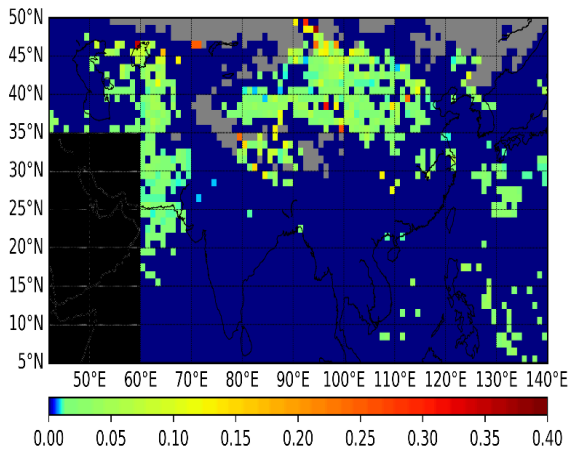
**JUNE**



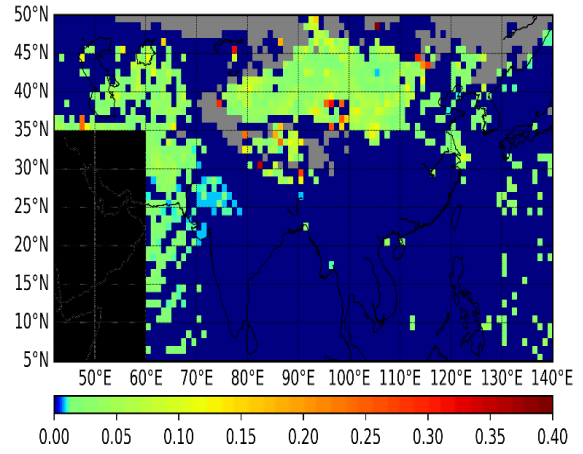


**Σχήμα Π.2.** Γεωγραφική κατανομή της τυπικής απόκλισης (STDV) της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των μέσων μηνιαίων ακραίων επεισοδίων ερημικής σκόνης (EDAEs) (επεισόδια/μήνα) για την περίοδο 2005-2021. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

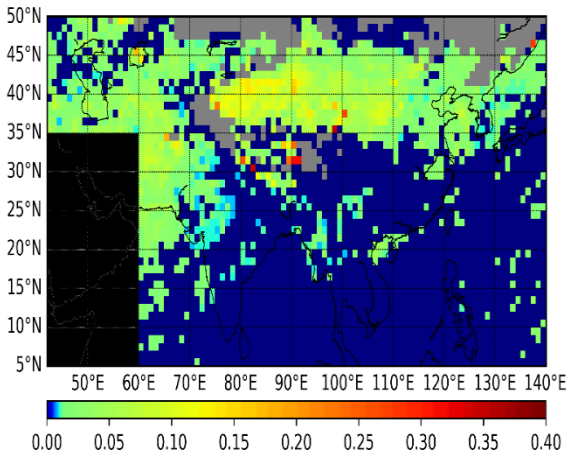
**JANUARY**



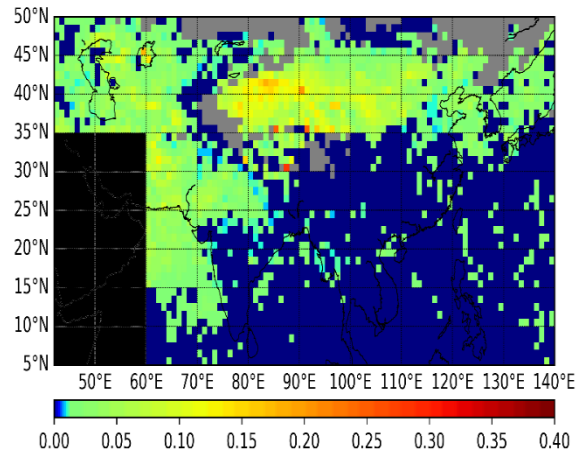
**FEBRUARY**



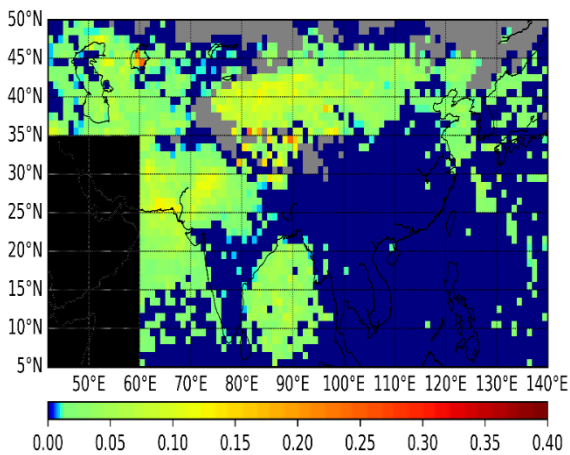
**MARCH**



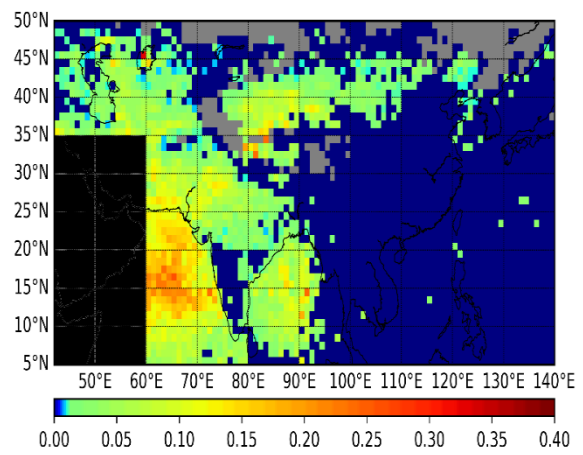
**APRIL**

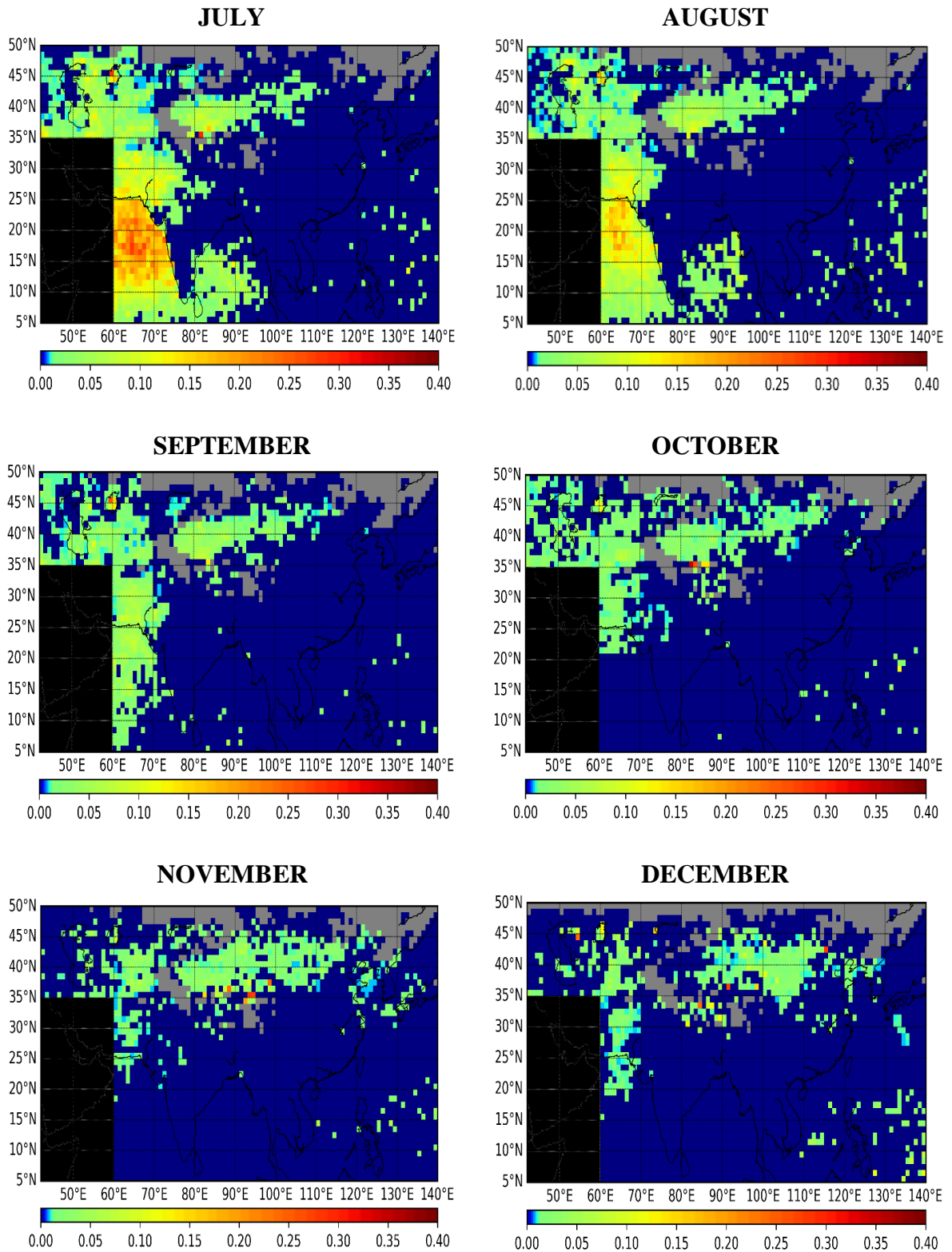


**MAY**



**JUNE**

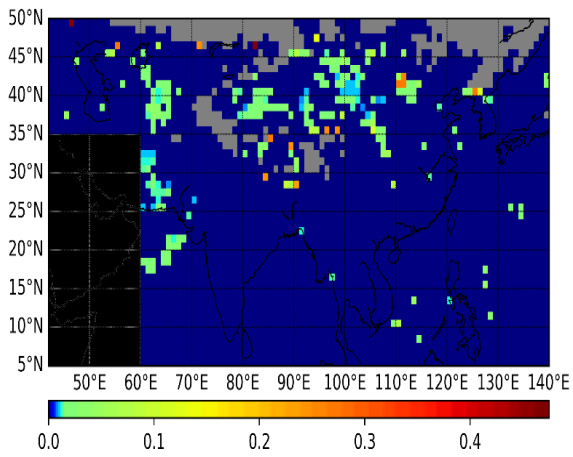




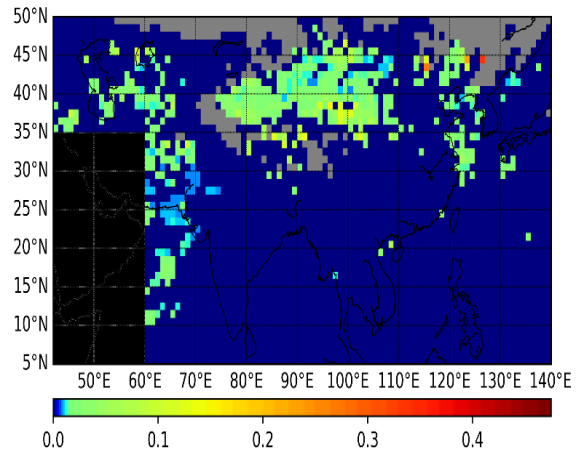
**Σχήμα Π.3.** Γεωγραφική κατανομή της τυπικής απόκλισης (STDV) της σχετικής συχνότητας εμφάνισης των μέσων μηνιαίων ισχυρών επεισοδίων ερημικής σκόνης (SDAEs) (επεισόδια/μήνα) για την περίοδο 2005-2021. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.



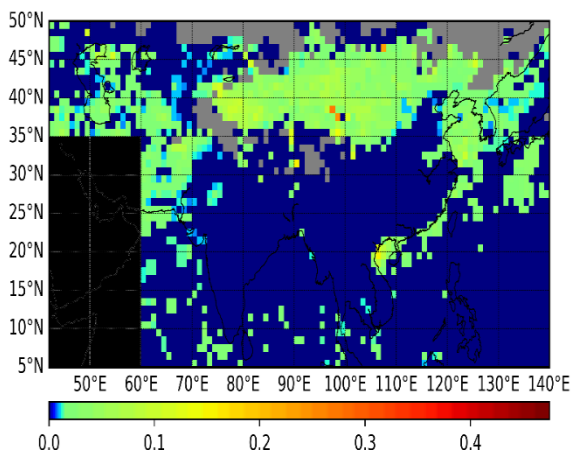
**JANUARY**



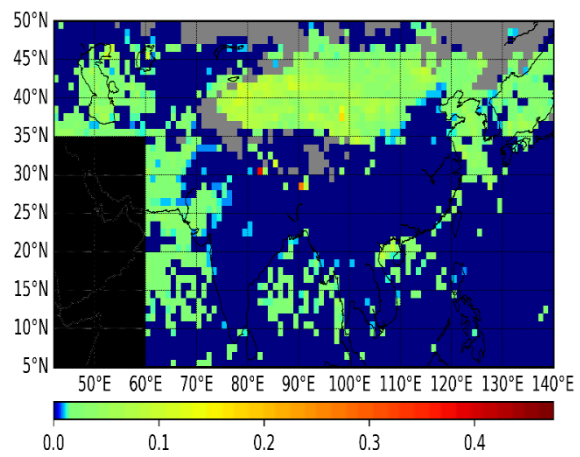
**FEBRUARY**



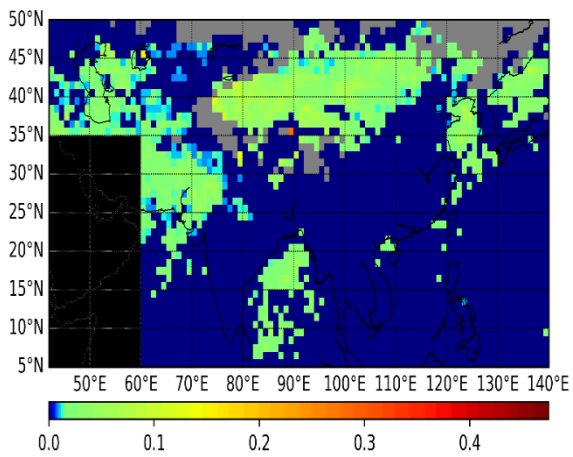
**MARCH**



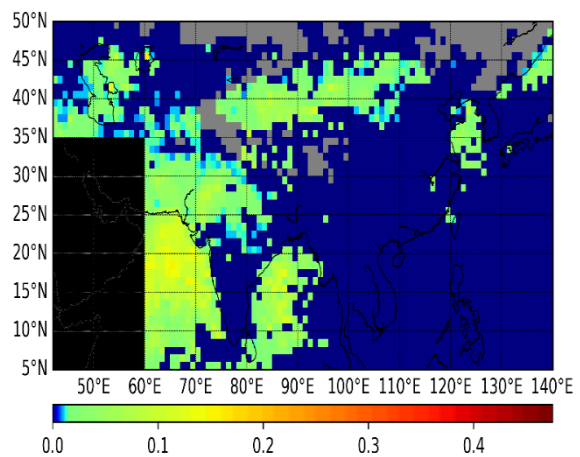
**APRIL**

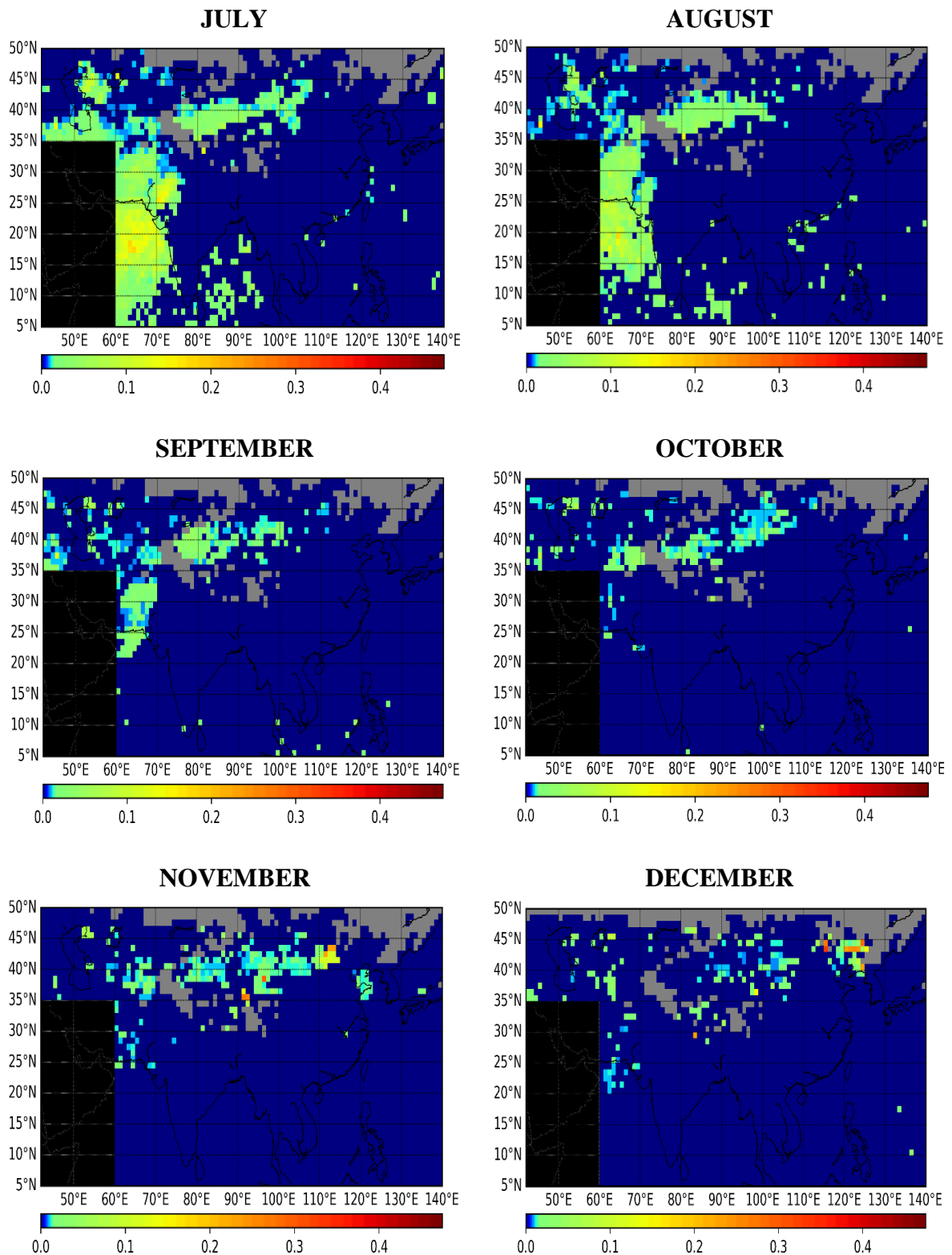


**MAY**



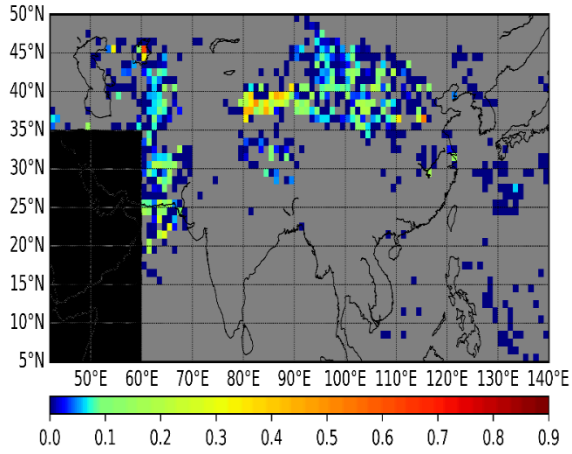
**JUNE**



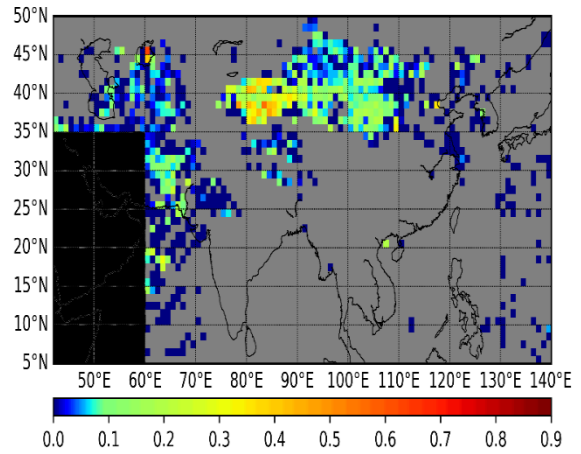


**Σχήμα Π.4.** Γεωγραφική κατανομή της τυπικής απόκλισης (STDV) της σχετικής συχνότητας εμφάνισης των μέσων μηνιαίων ακραίων επεισοδίων ερημικής σκόνης (EDAEs) (επεισόδια/μήνα) για την περίοδο 2005-2021. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

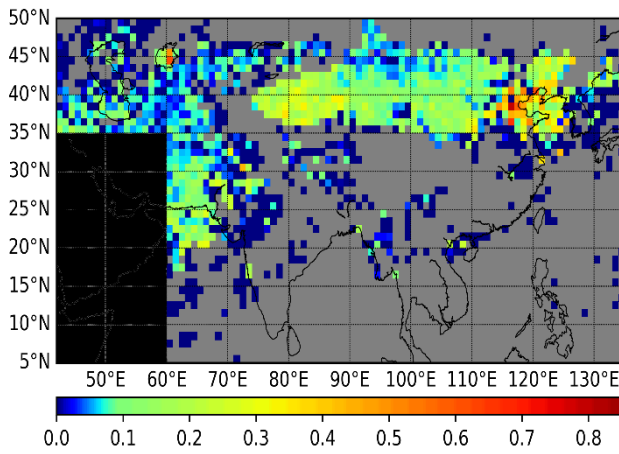
**JANUARY**



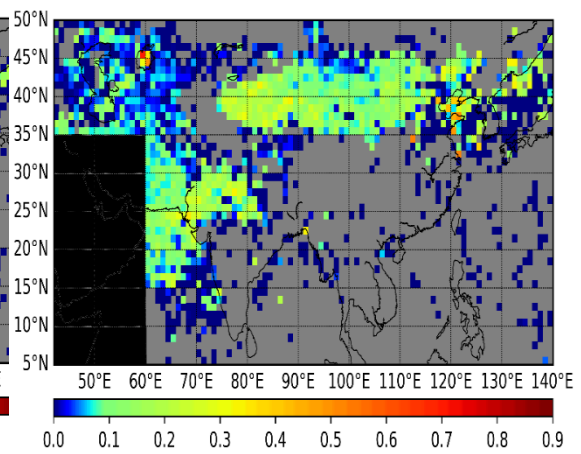
**FEBRUARY**



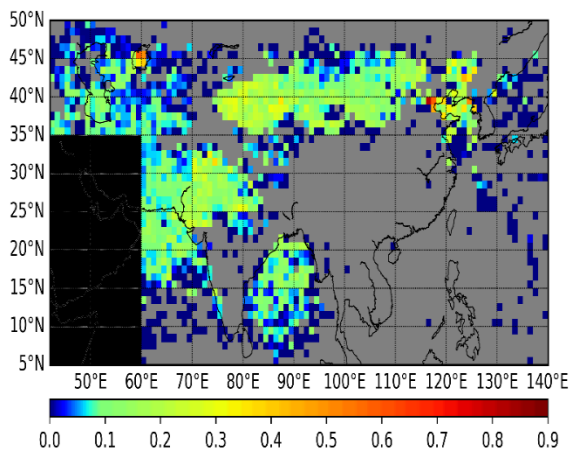
**MARCH**



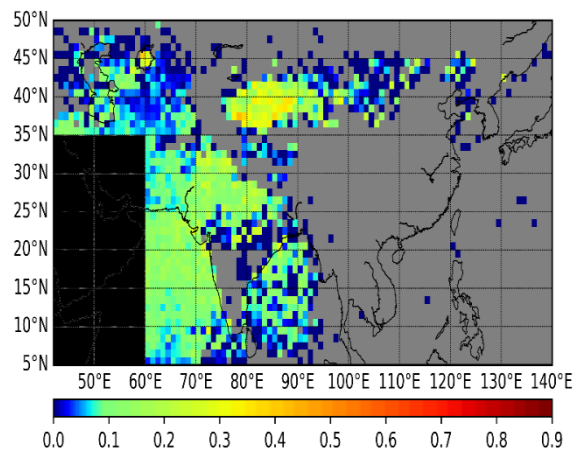
**APRIL**

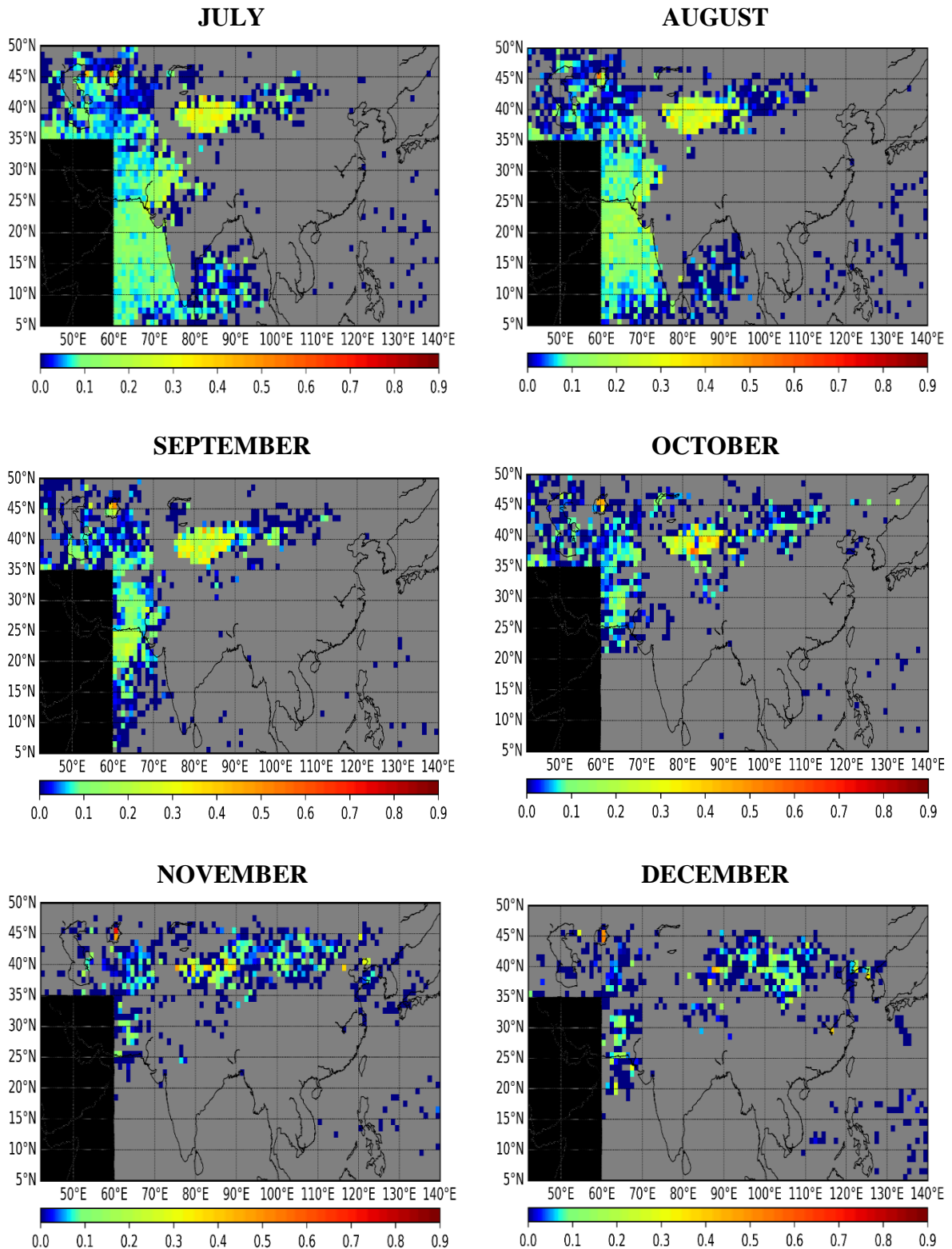


**MAY**



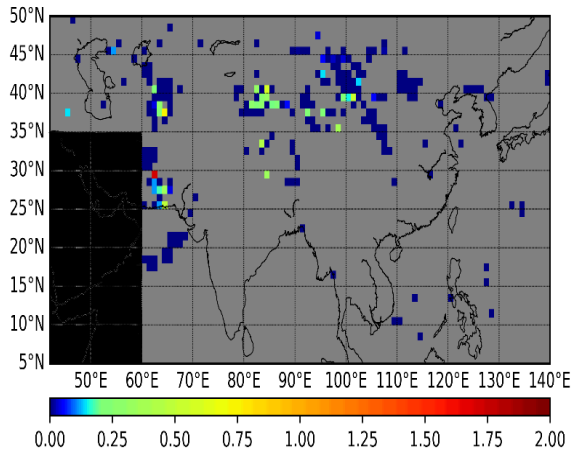
**JUNE**



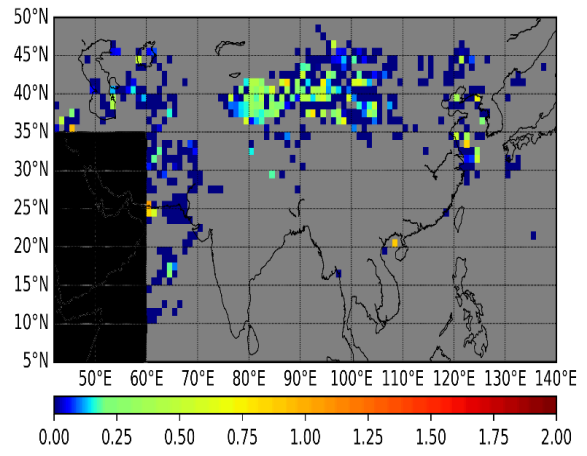


**Σχήμα Π.5.** Γεωγραφική κατανομή της τυπικής απόκλισης (STDV) του οπτικού βάθους των μέσων μηνιαίων ισχυρών επεισοδίων ερημικής σκόνης (SDAEs) (επεισόδια/μήνα) για την περίοδο 2005-2021. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες είτε ο αλγόριθμος δε λειτούργησε, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων, είτε λειτούργησε αλλά δε συνέβησαν επεισόδια. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

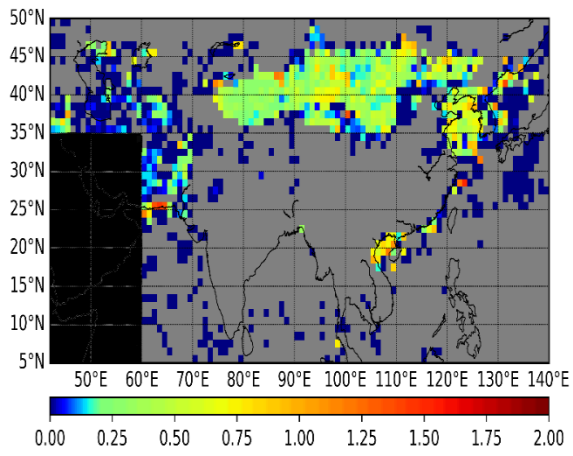
**JANUARY**



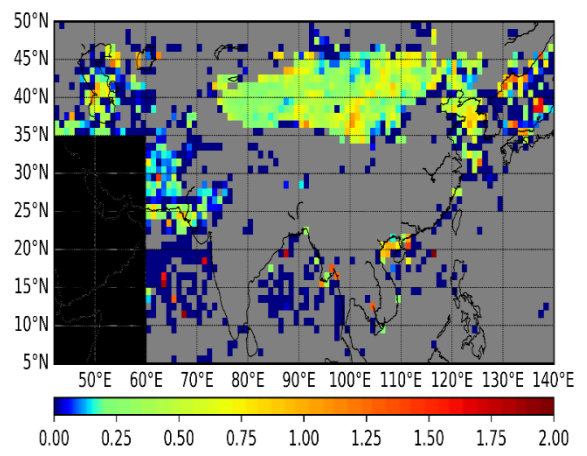
**FEBRUARY**



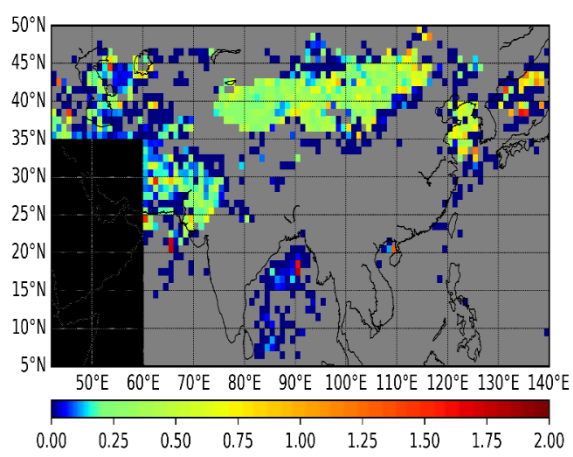
**MARCH**



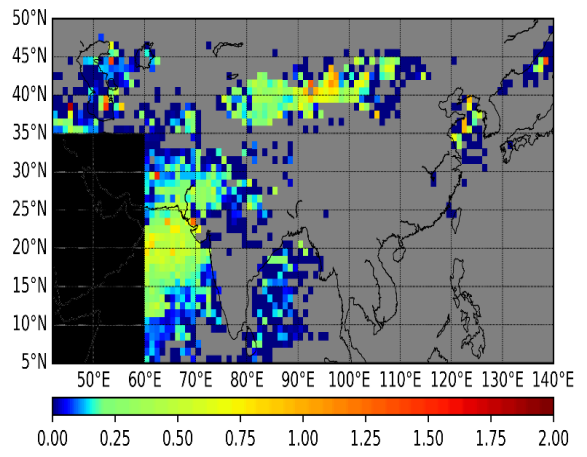
**APRIL**

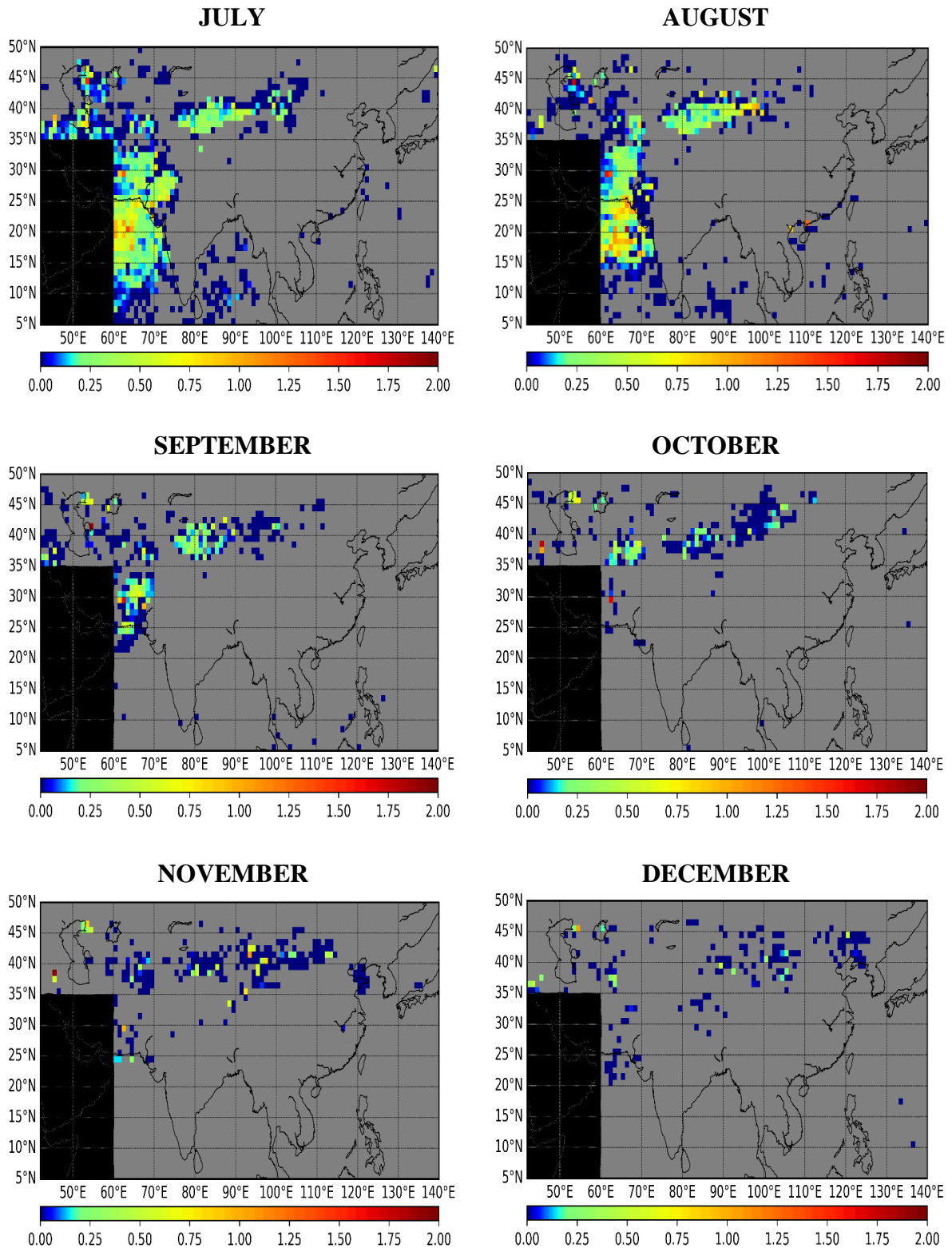


**MAY**



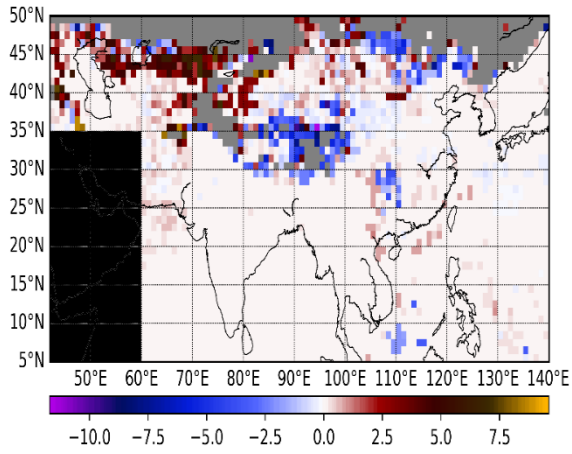
**JUNE**



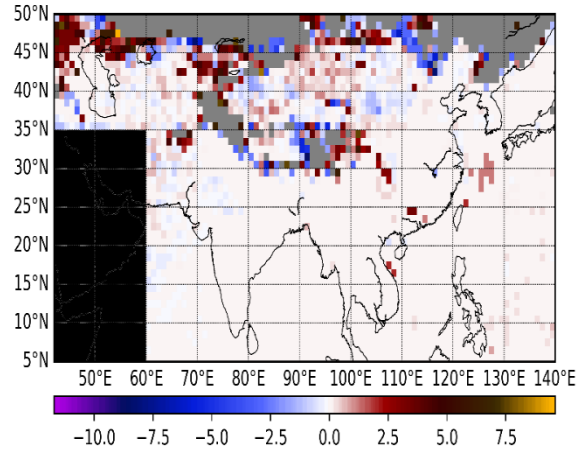


**Σχήμα Π.6.** Γεωγραφική κατανομή της τυπικής απόκλισης (STDV) του οπτικού βάθους των μέσων μηνιαίων ακραίων επεισοδίων ερημικής σκόνης (EDAEs) (επεισόδια/μήνα) για την περίοδο 2005-2021. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες είτε ο αλγόριθμος δε λειτουργήσει, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων, είτε λειτουργήσει αλλά δε συνέβησαν επεισόδια. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

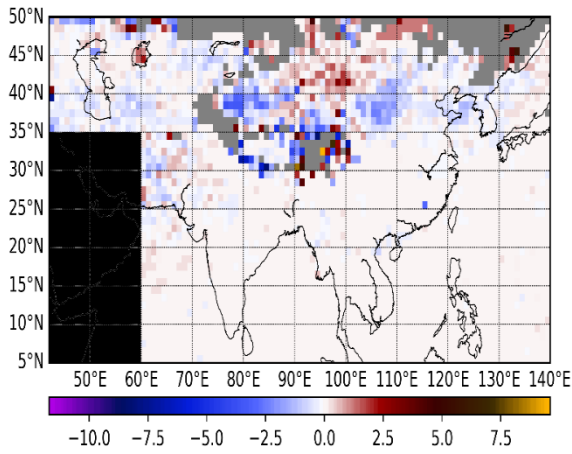
**JANUARY**



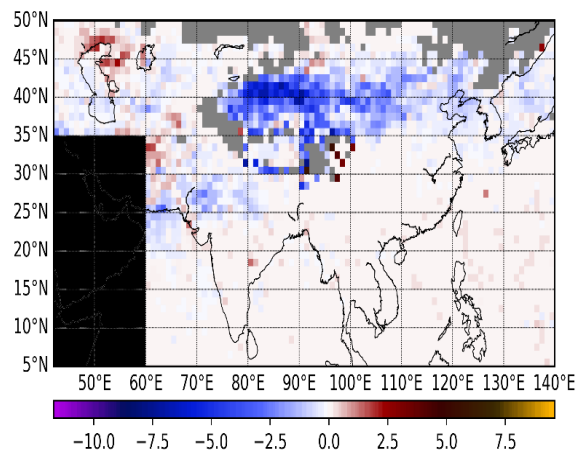
**FEBRUARY**



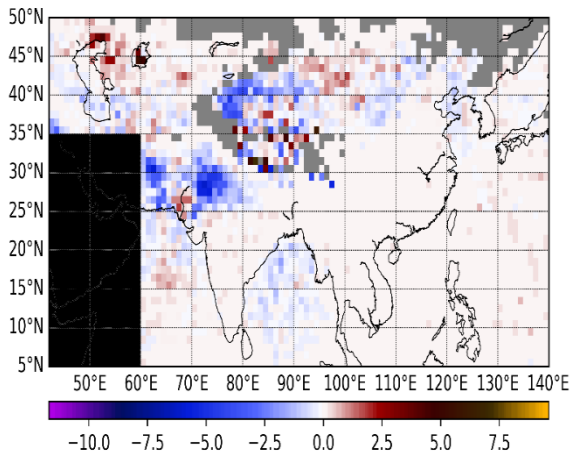
**MARCH**



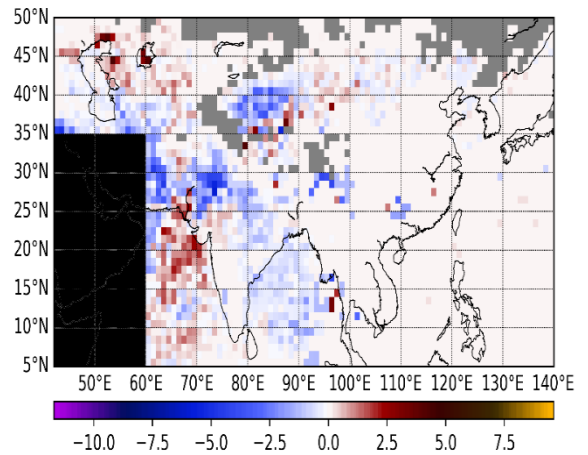
**APRIL**

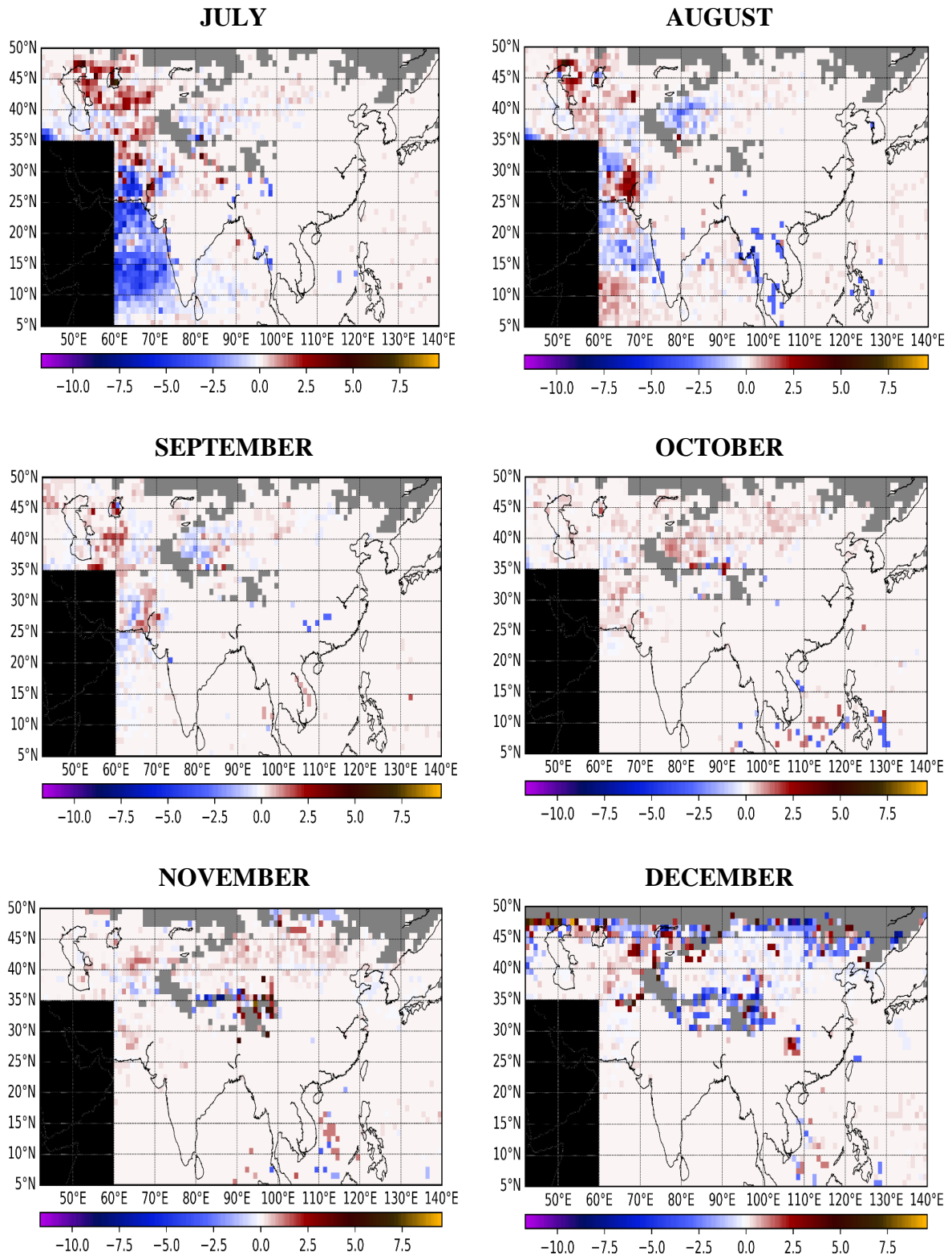


**MAY**



**JUNE**

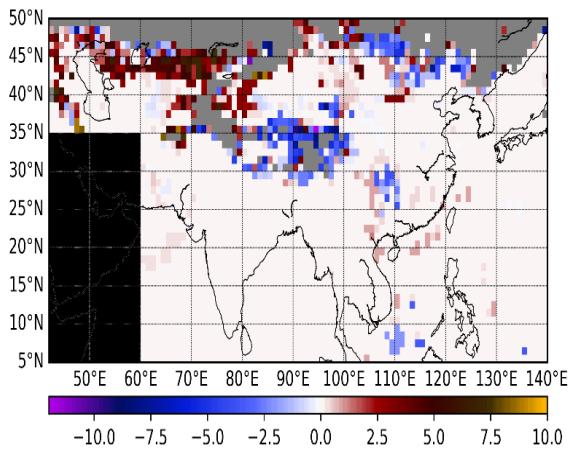




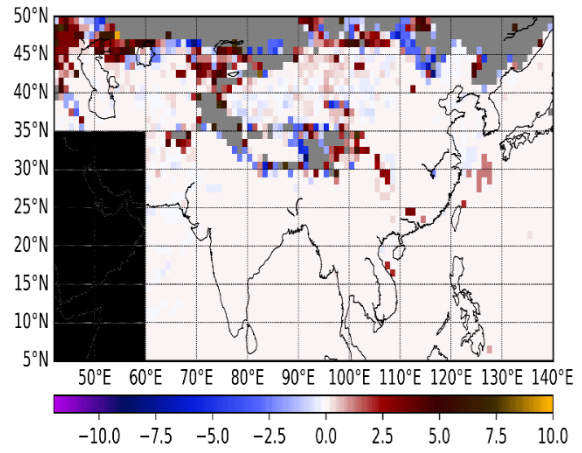
**Σχήμα Π.7.** Γεωγραφική κατανομή της διαχρονικής μεταβολής της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των ανά μήνα ισχυρών επεισοδίων ερημικής σκόνης (SDAEs) στην Ασία κατά την περίοδο 2005-2021. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.



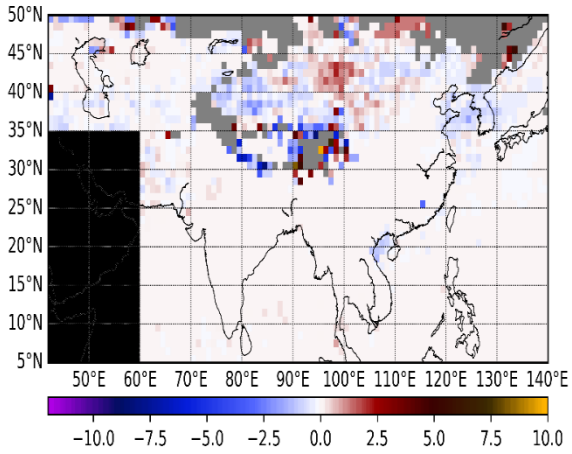
**JANUARY**



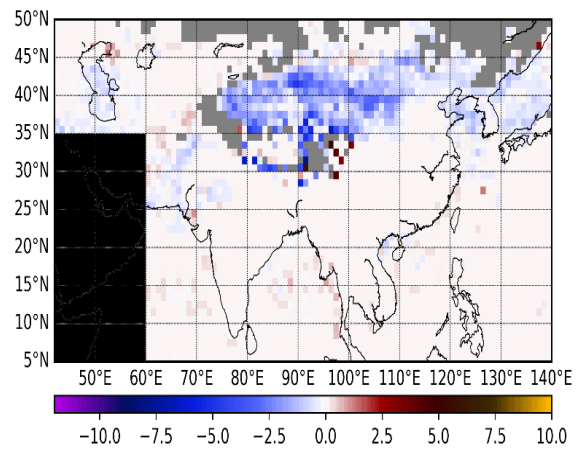
**FEBRUARY**



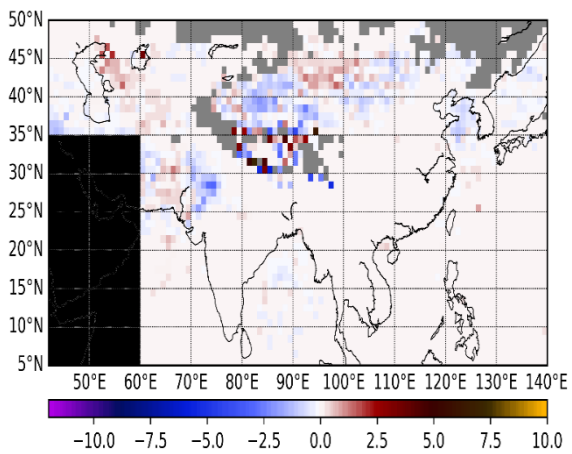
**MARCH**



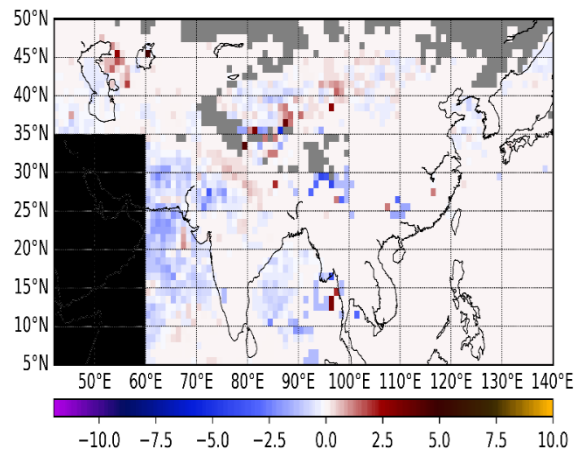
**APRIL**

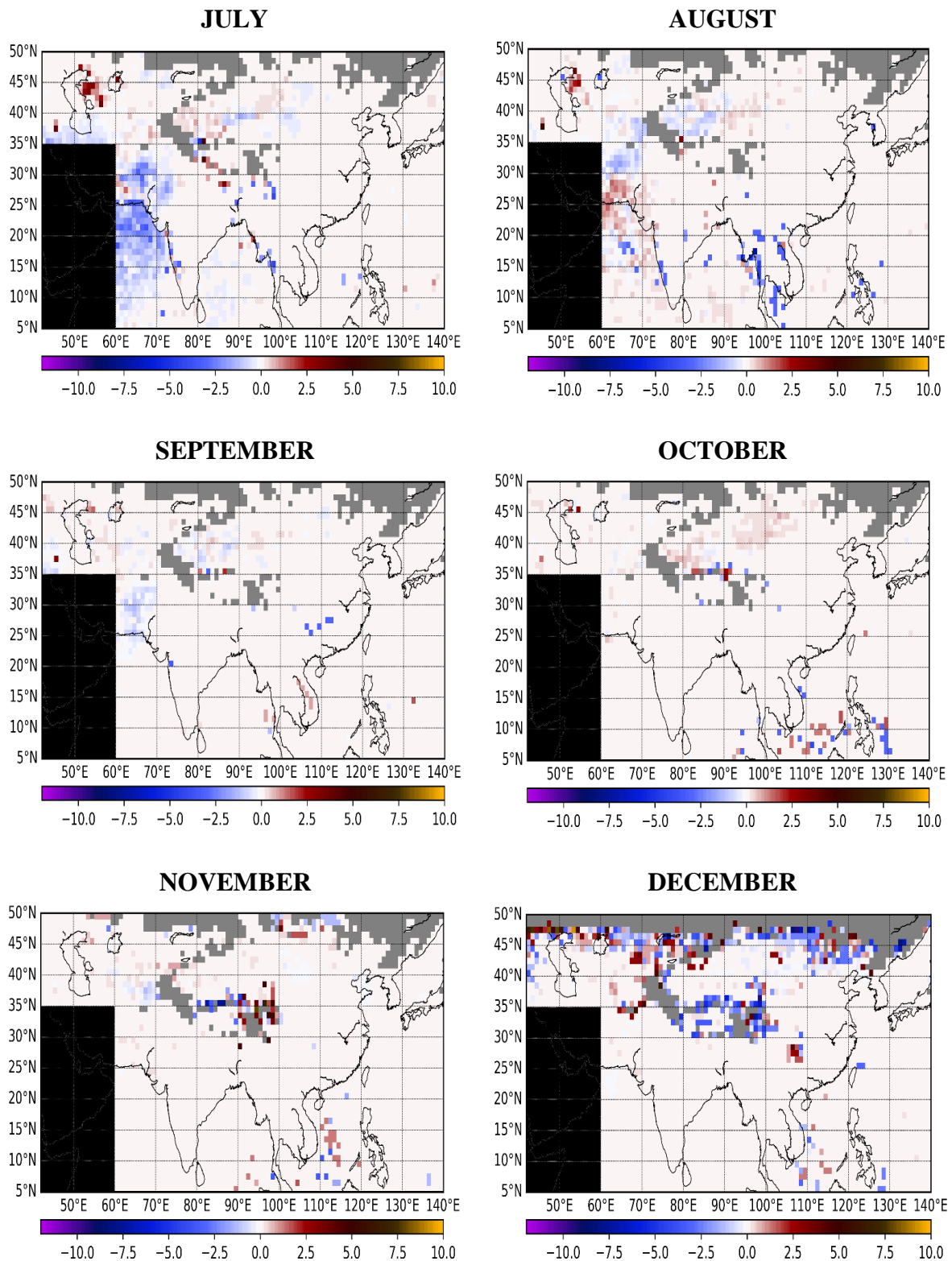


**MAY**



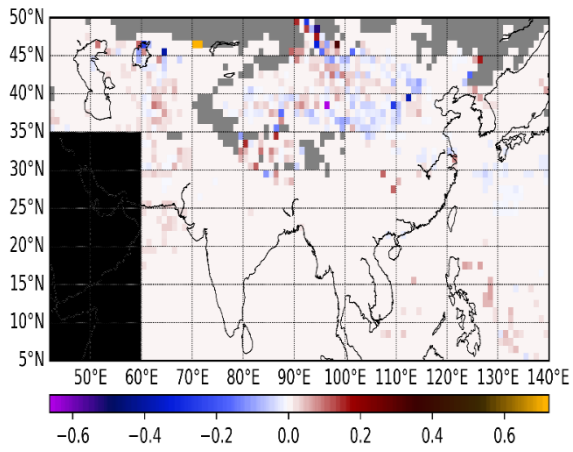
**JUNE**



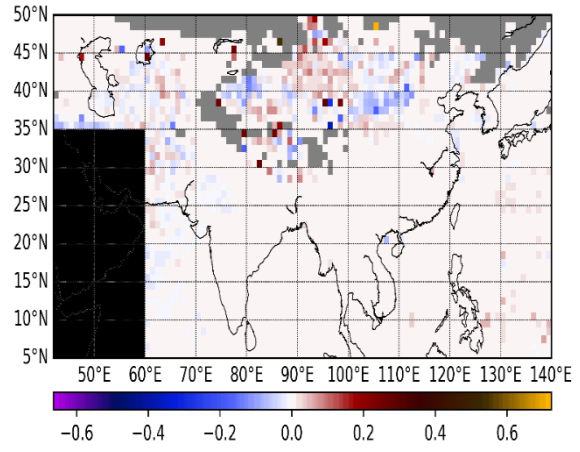


**Σχήμα Π.8.** Γεωγραφική κατανομή της διαχρονικής μεταβολής της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των ανά μήνα ακραίων επεισοδίων ερημικής σκόνης (EDAEs) στην Ασία κατά την περίοδο 2005-2021. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

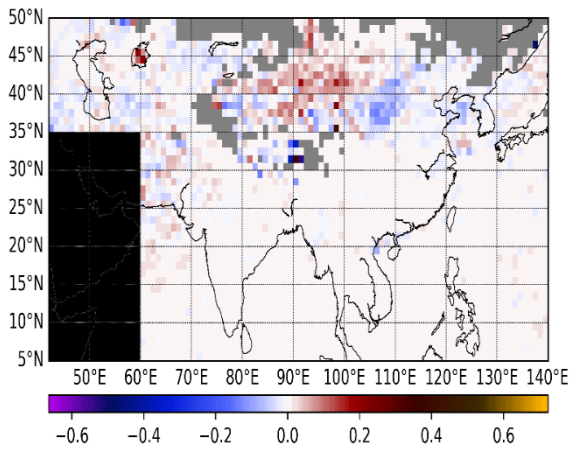
**JANUARY**



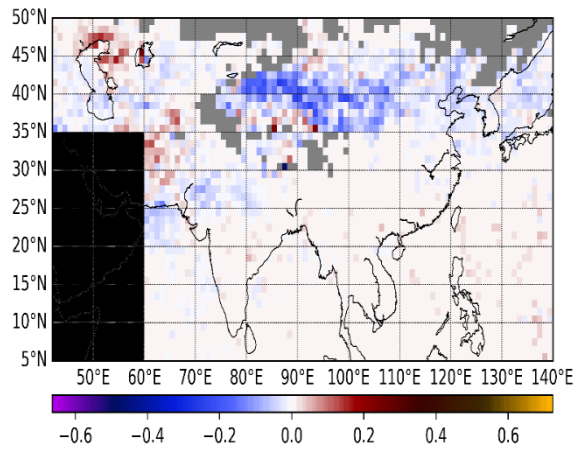
**FEBRUARY**



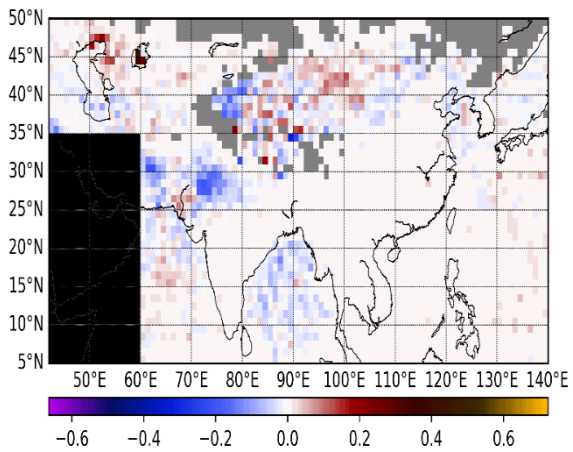
**MARCH**



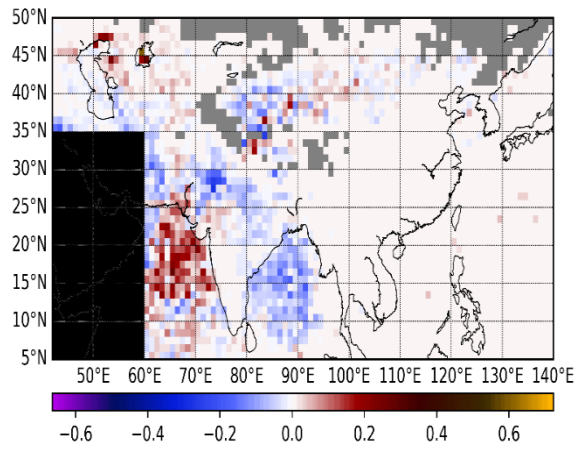
**APRIL**

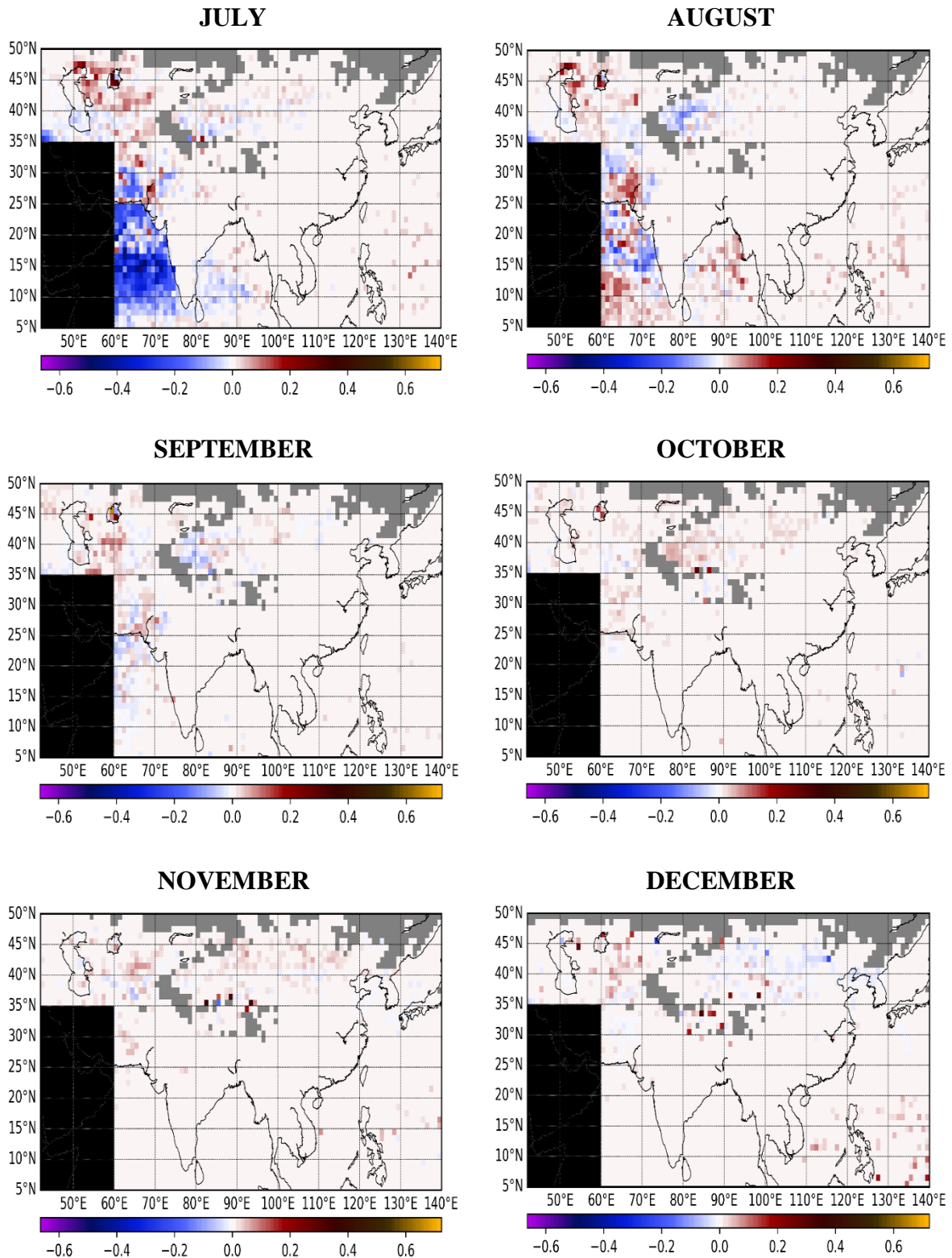


**MAY**



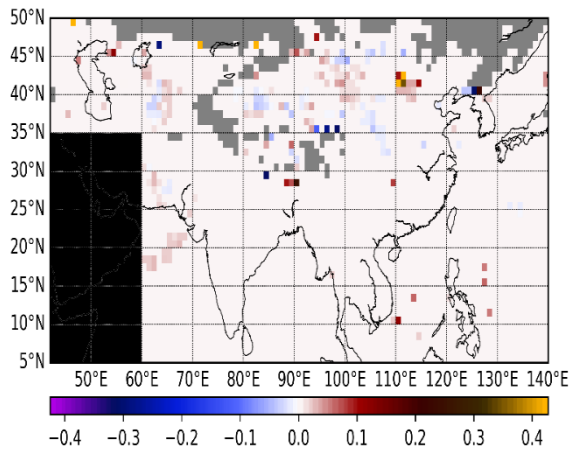
**JUNE**



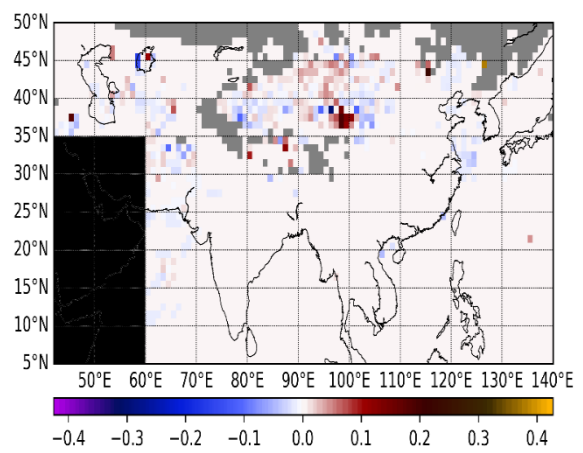


**Σχήμα Π.9.** Γεωγραφική κατανομή της διαχρονικής μεταβολής της σχετικής συχνότητας εμφάνισης των ανά μήνα ισχυρών επεισοδίων ερημικής σκόνης (SDAEs) στην Ασία κατά την περίοδο 2005-2021. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

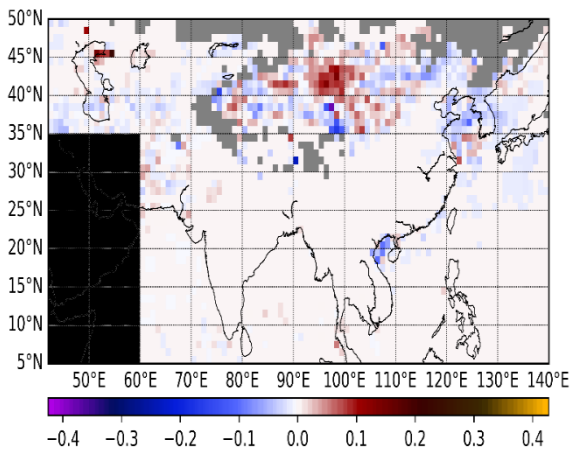
**JANUARY**



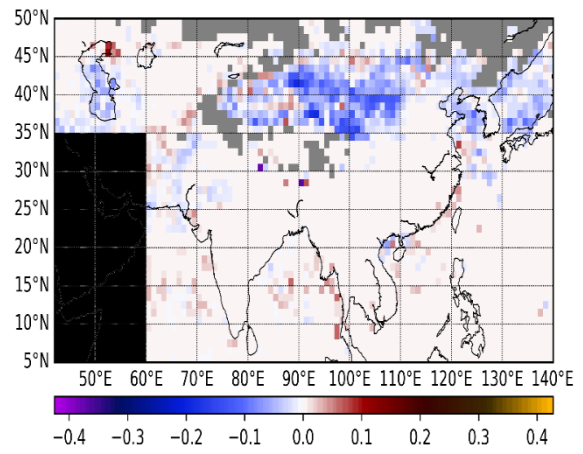
**FEBRUARY**



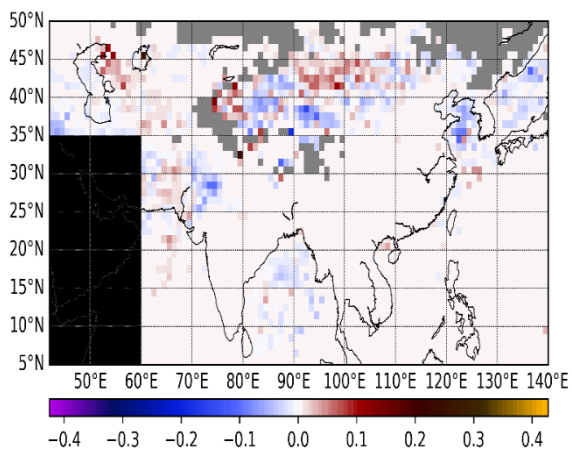
**MARCH**



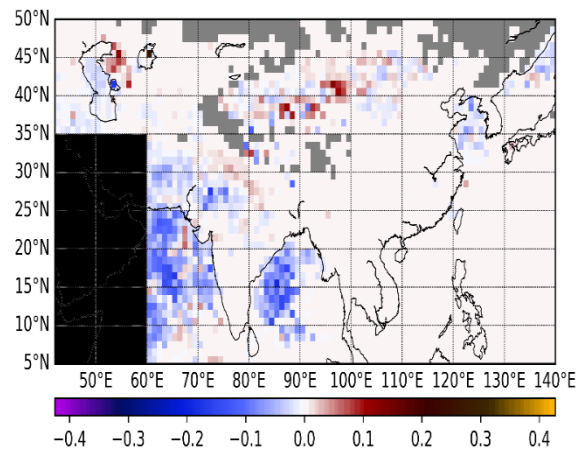
**APRIL**

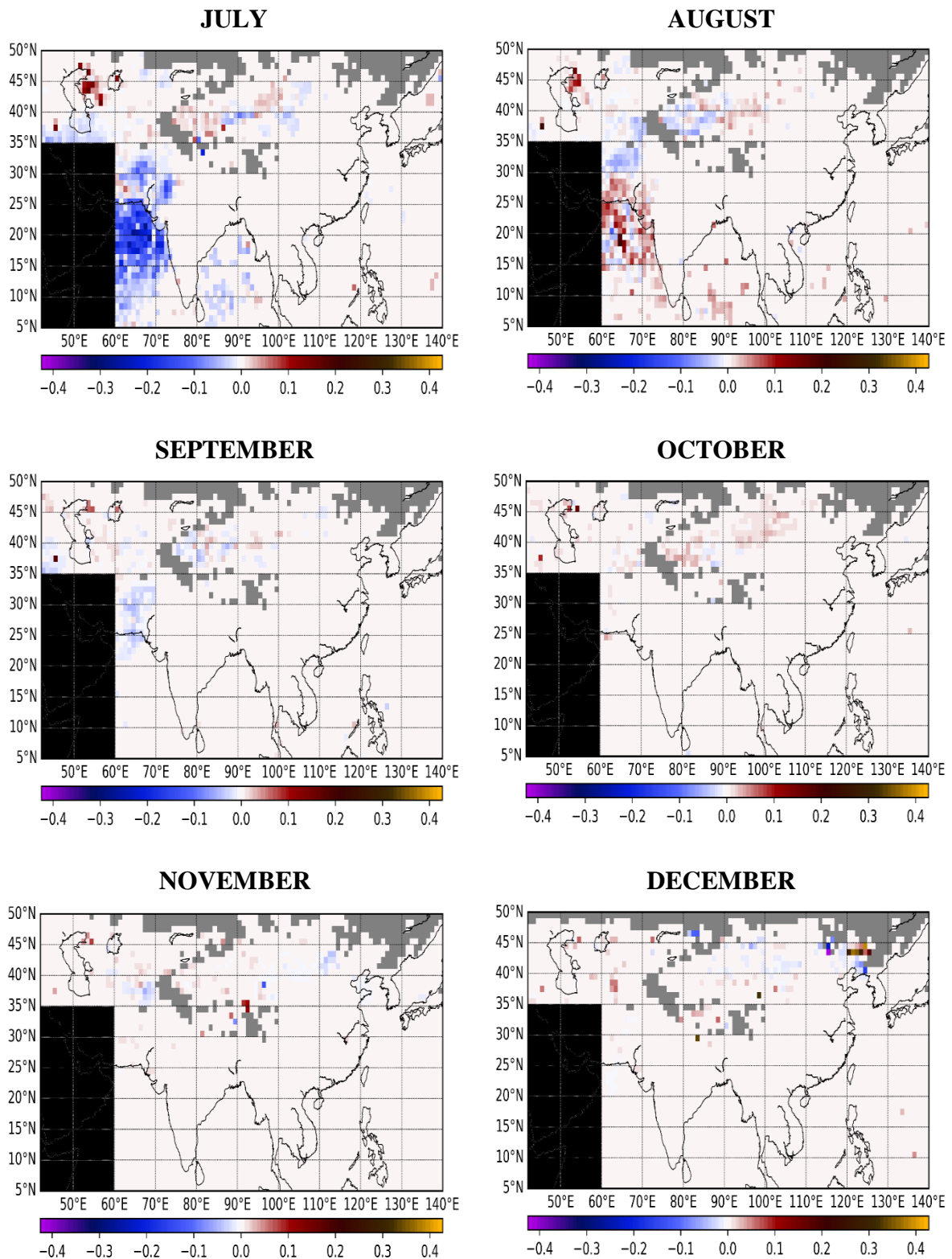


**MAY**



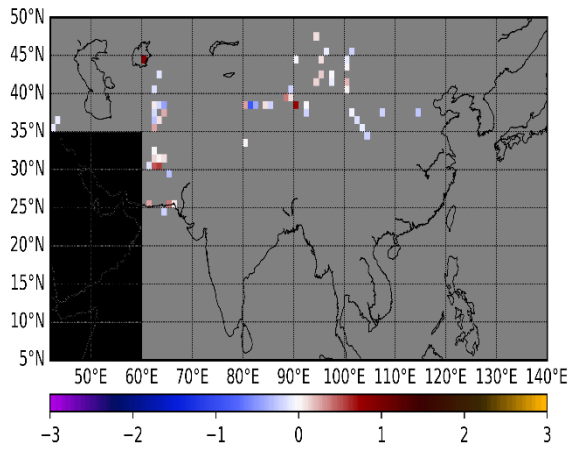
**JUNE**



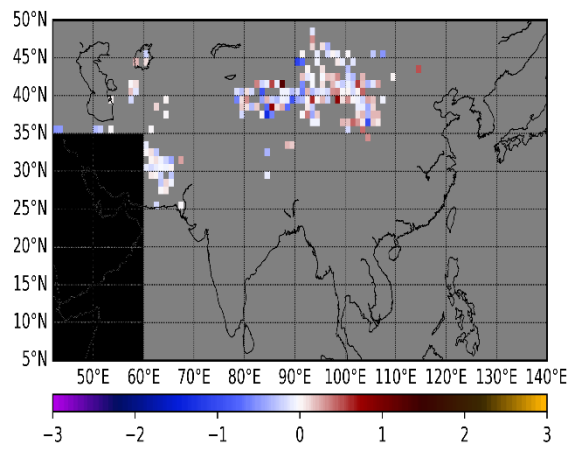


**Σχήμα Π.10.** Γεωγραφική κατανομή της διαχρονικής μεταβολής της σχετικής συχνότητας εμφάνισης των ανά μήνα ακραίων επεισοδίων ερημικής σκόνης (EDAEs) στην Ασία κατά την περίοδο 2005-2021. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

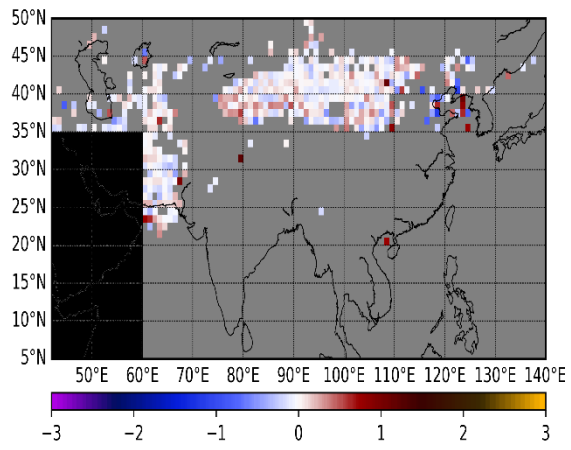
**JANUARY**



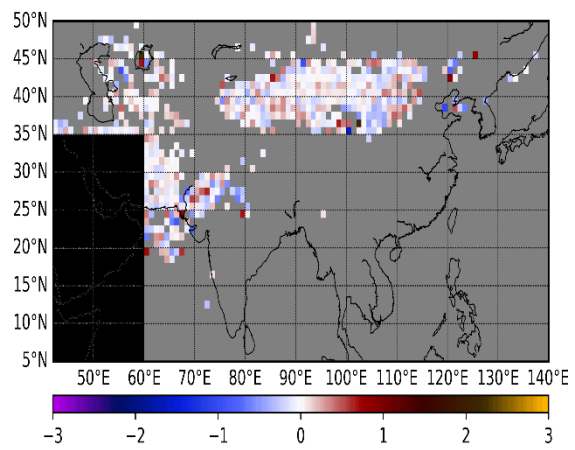
**FEBRUARY**



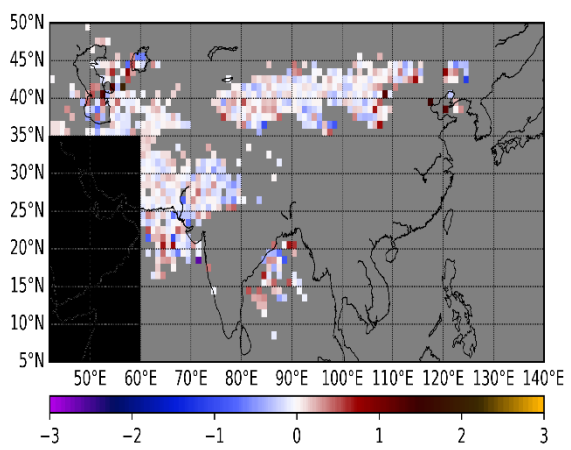
**MARCH**



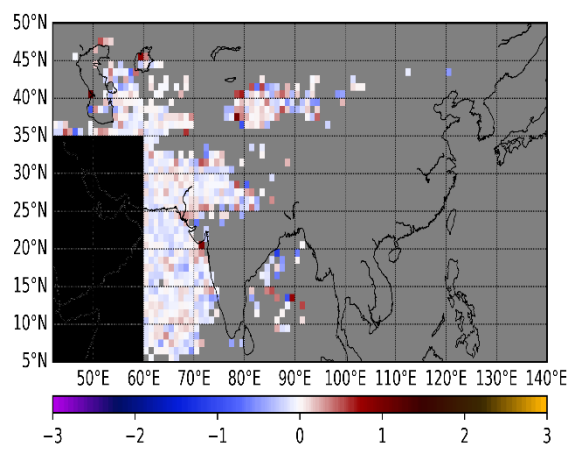
**APRIL**

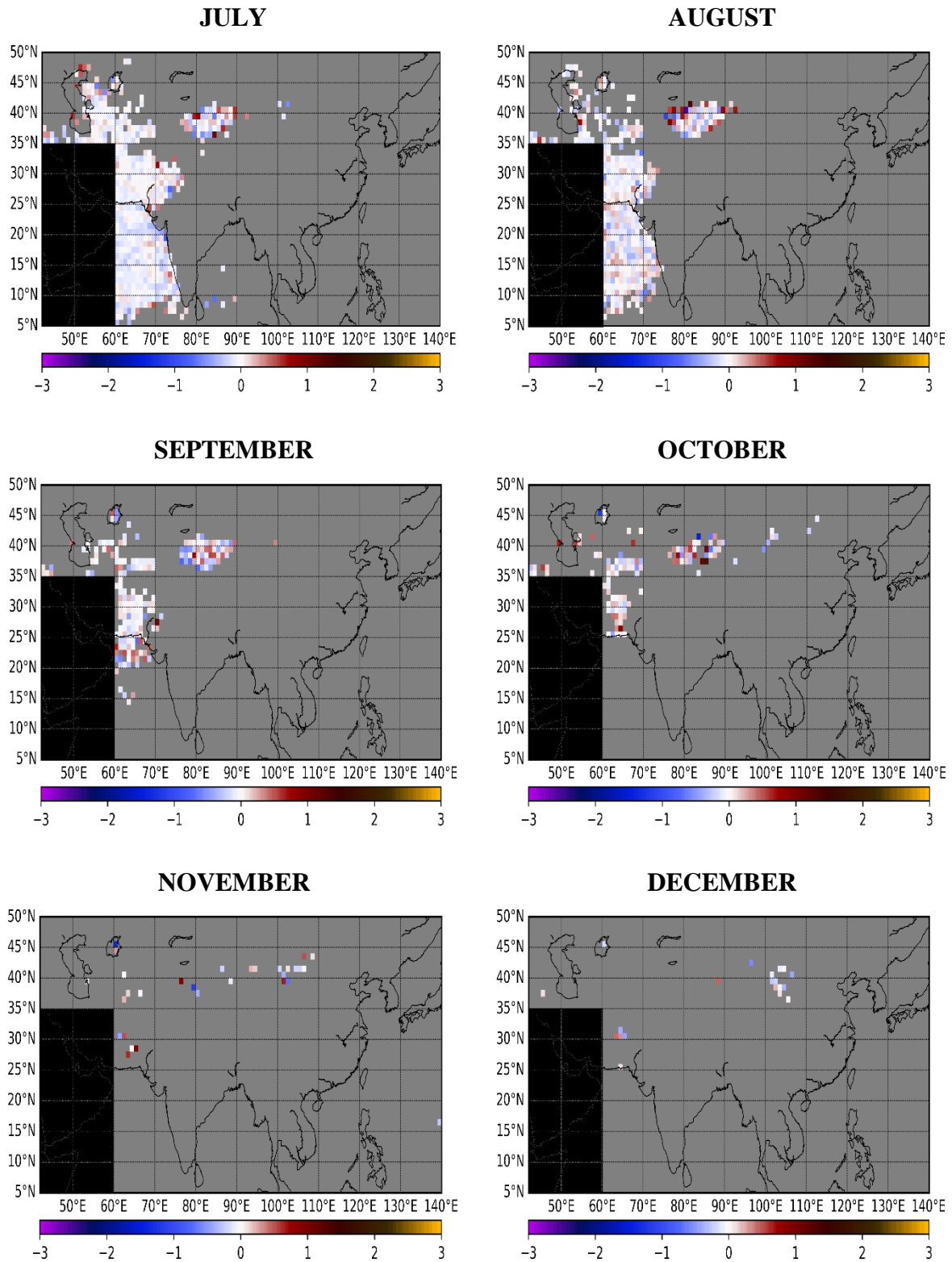


**MAY**



**JUNE**

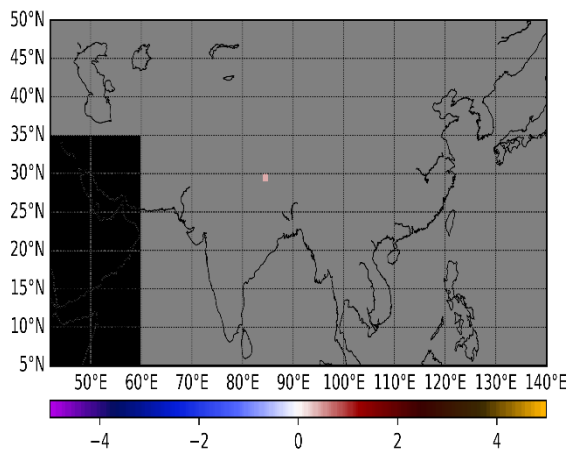




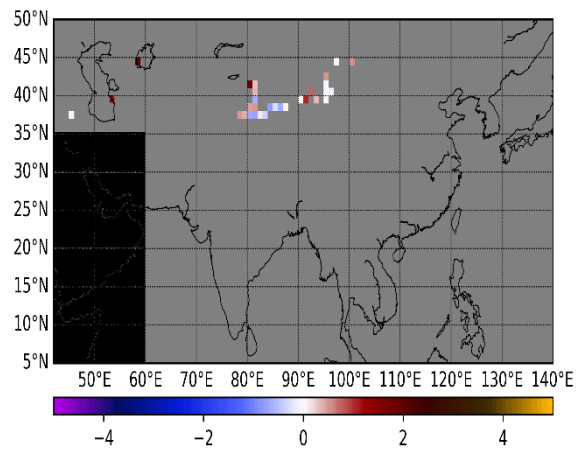
**Σχήμα Π.11.** Γεωγραφική κατανομή της διαχρονικής μεταβολής του οπτικού βάθους των ανά μήνα ισχυρών επεισοδίων ερημικής σκόνης (SDAEs) στην Ασία κατά την περίοδο 2005-2021. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων ή δε συμβαίνουν επεισόδια. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.



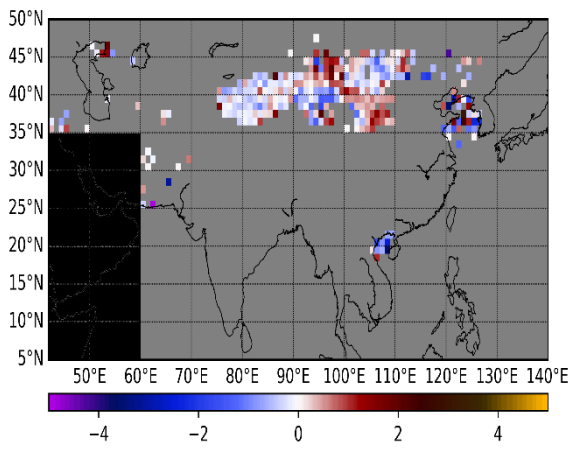
### JANUARY



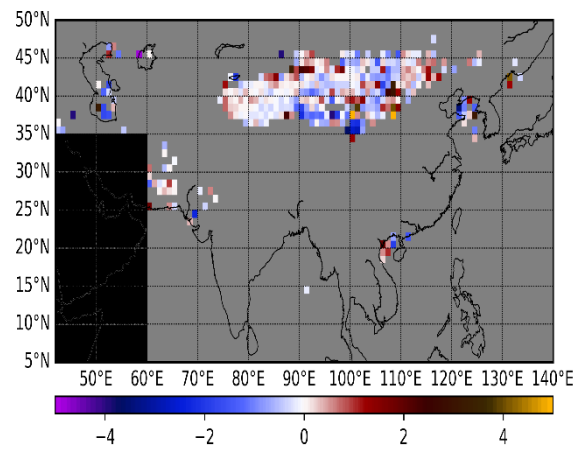
### FEBRUARY



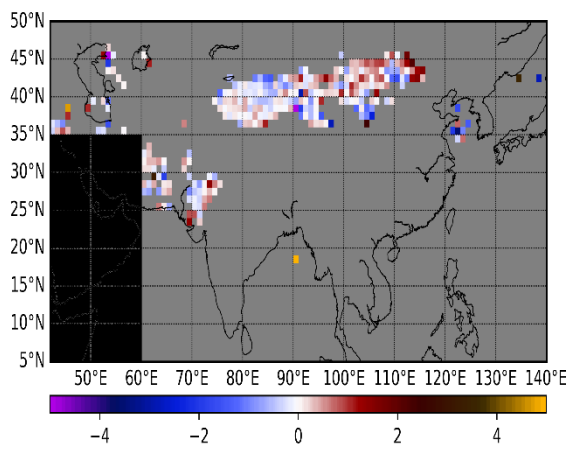
### MARCH



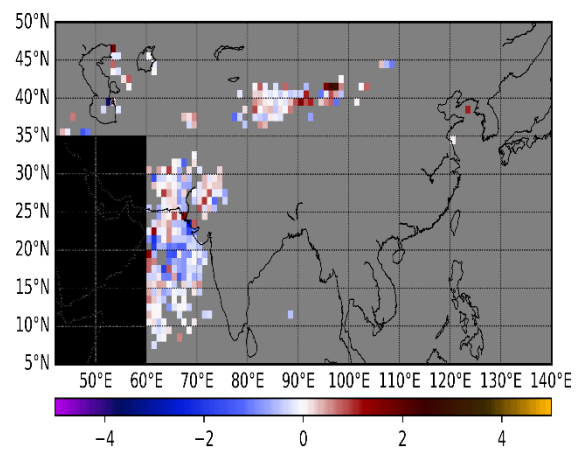
### APRIL

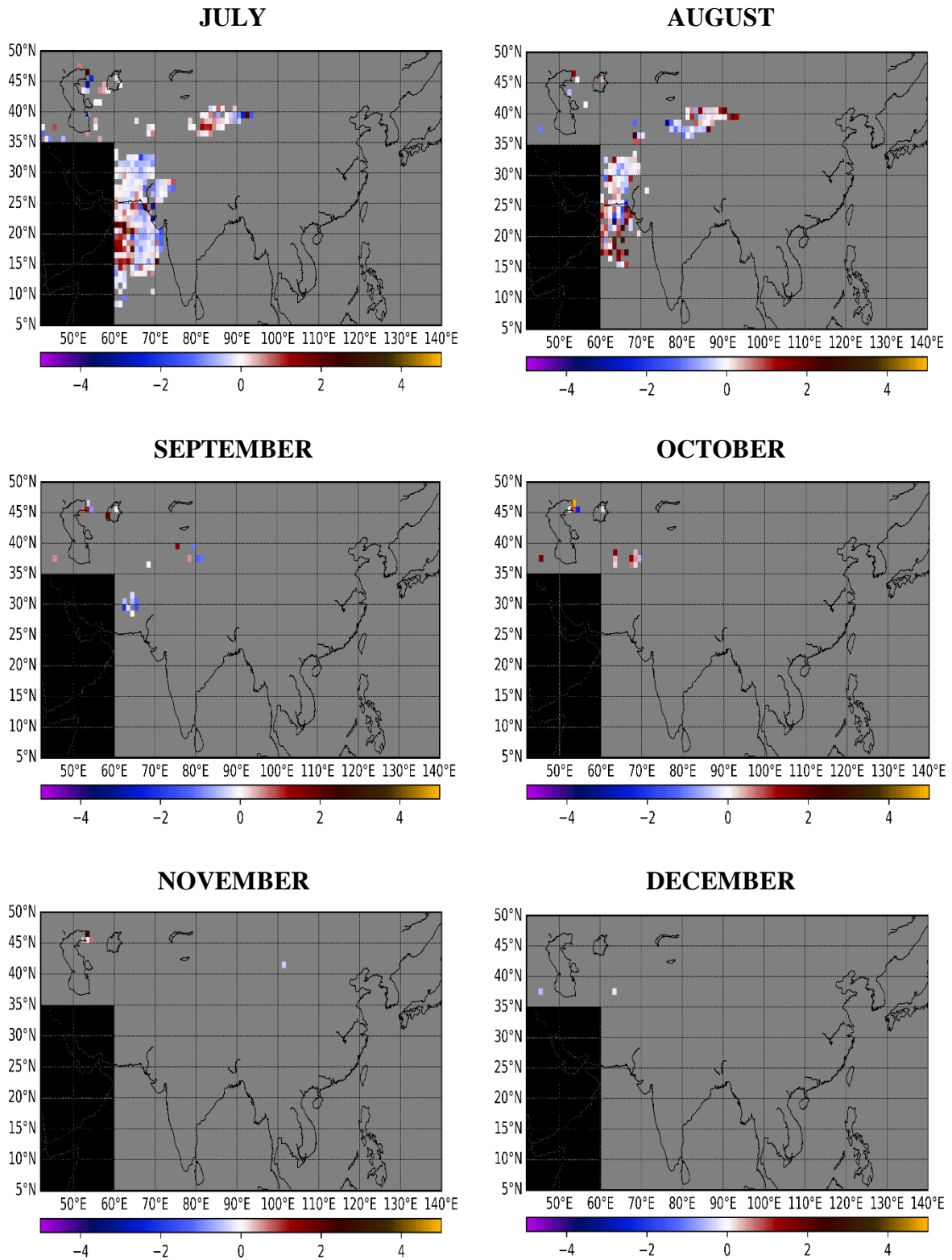


### MAY



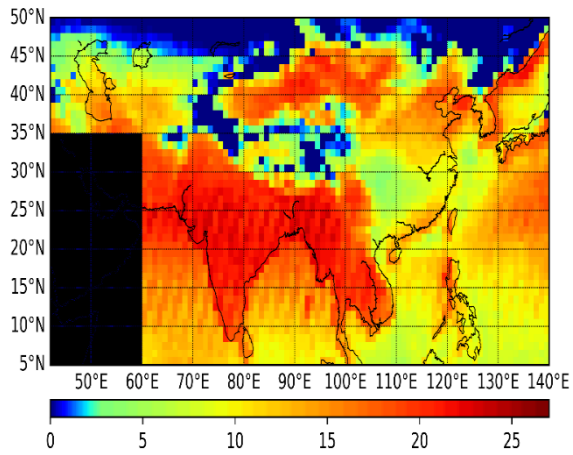
### JUNE



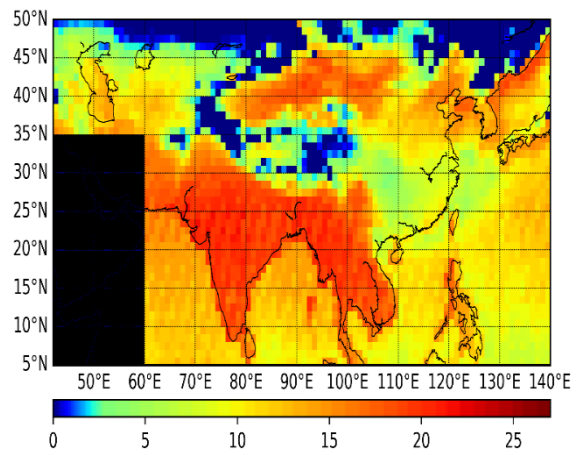


**Σχήμα Π.12.** Γεωγραφική κατανομή της διαχρονικής μεταβολής του οπτικού βάθους των ανά μήνα ακραίων επεισοδίων ερημικής σκόνης (EDAEs) στην Ασία κατά την περίοδο 2005-2021. Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων ή δε συμβαίνουν επεισόδια. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

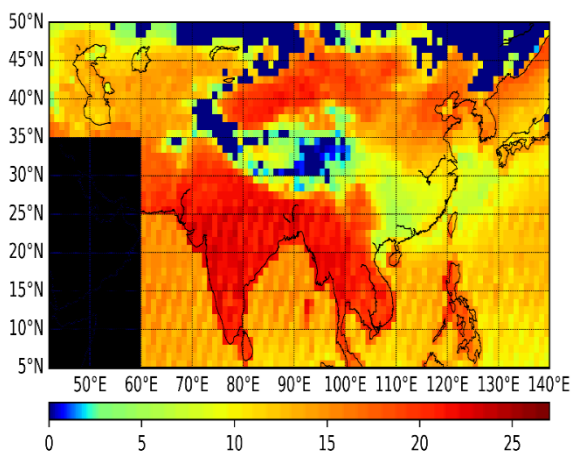
**JANUARY**



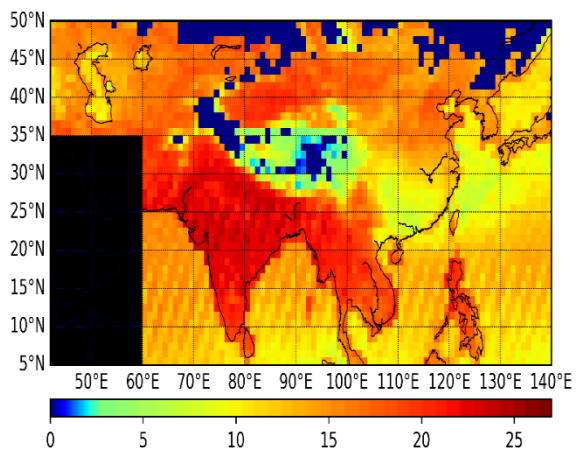
**FEBRUARY**



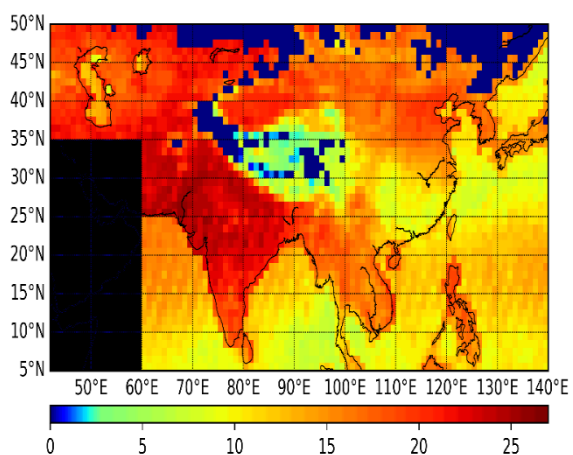
**MARCH**



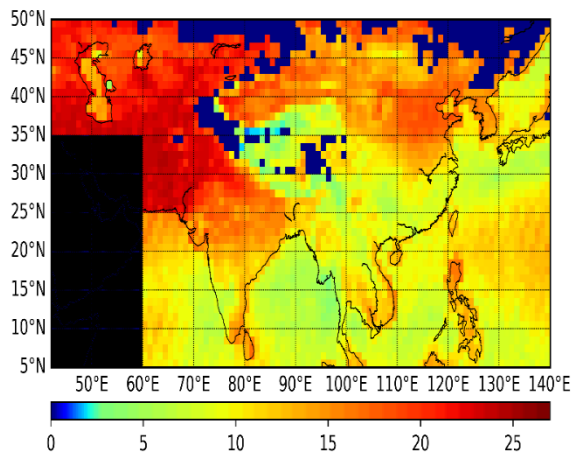
**APRIL**

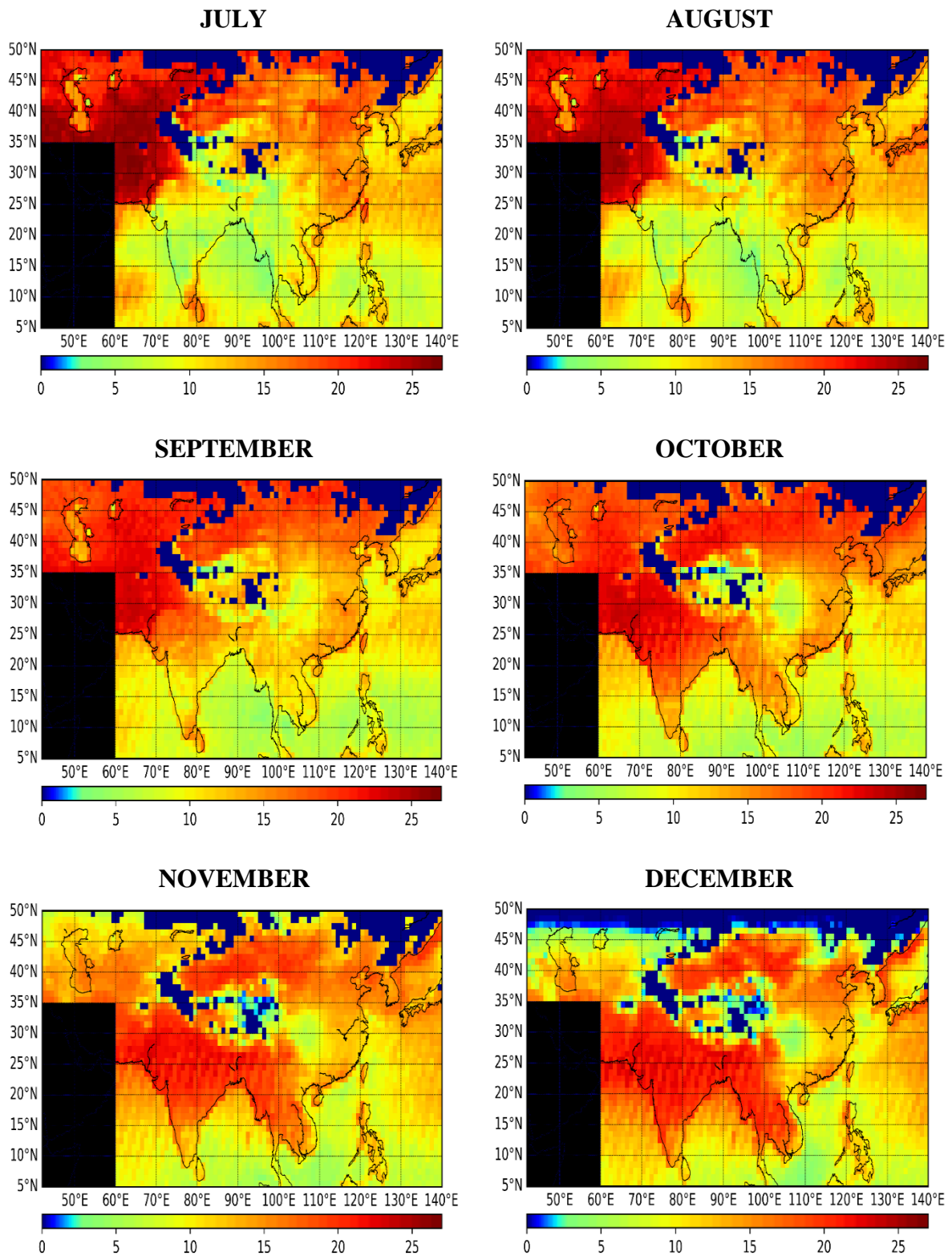


**MAY**

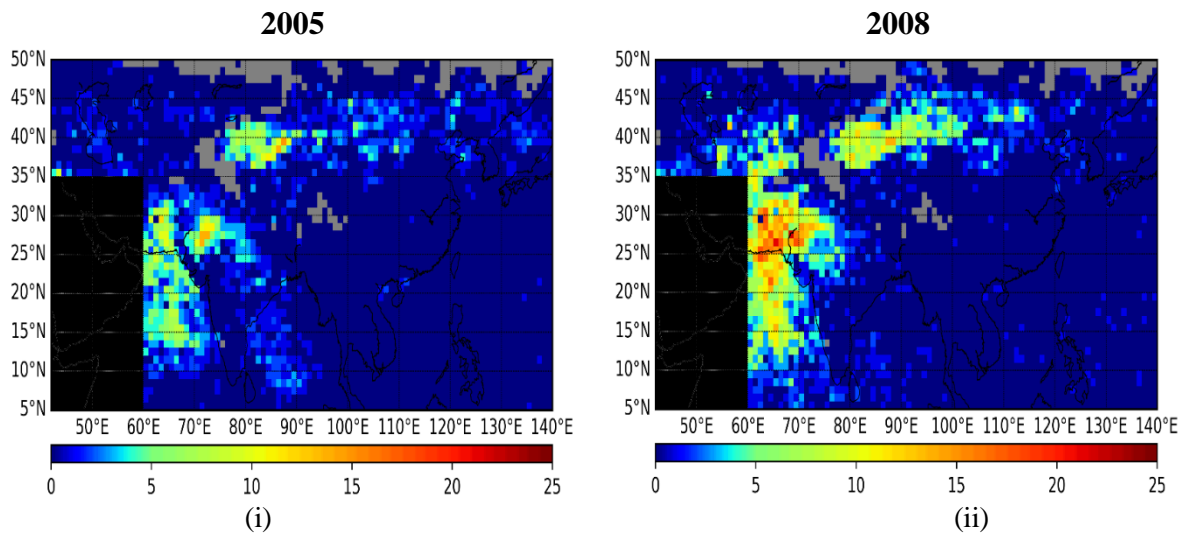


**JUNE**

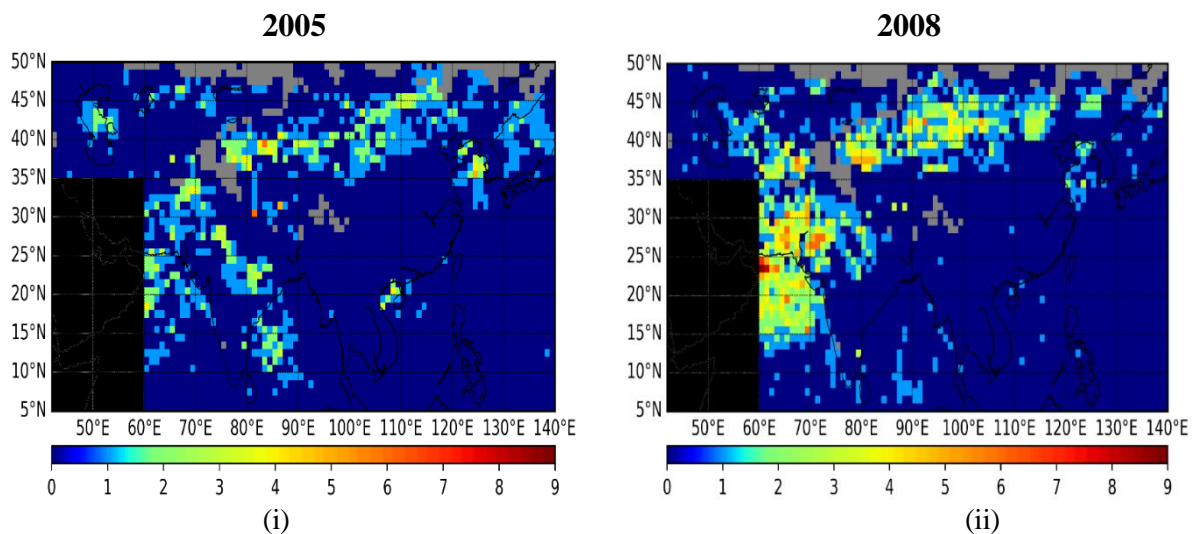




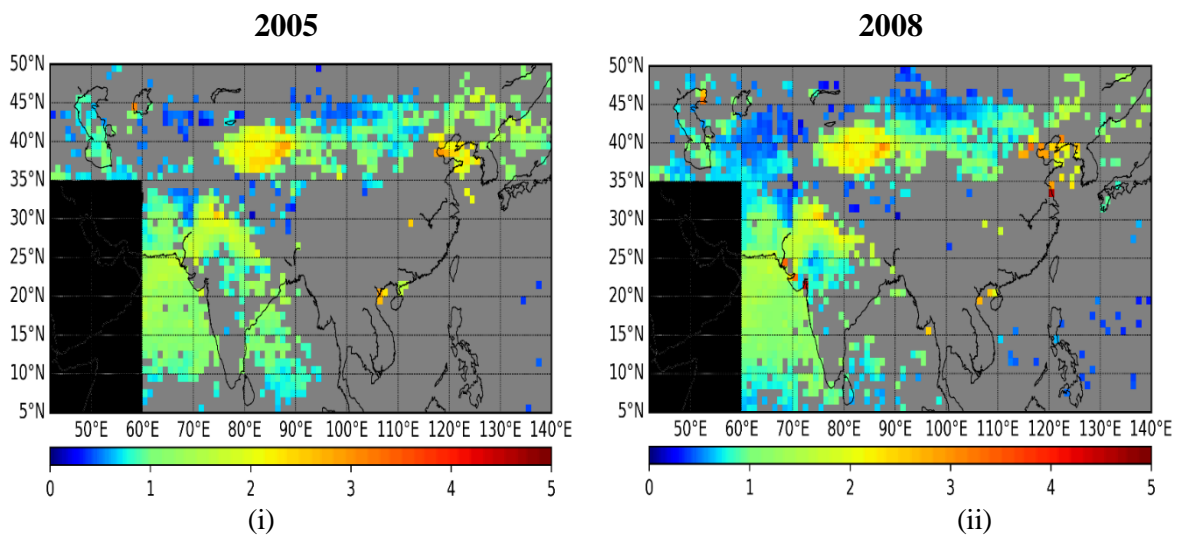
**Σχήμα Π.13.** Μέσος μηνιαίος αριθμός ημερών στις οποίες υπήρχε διαθεσιμότητα δεδομένων για την περίοδο 2005-2021. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.



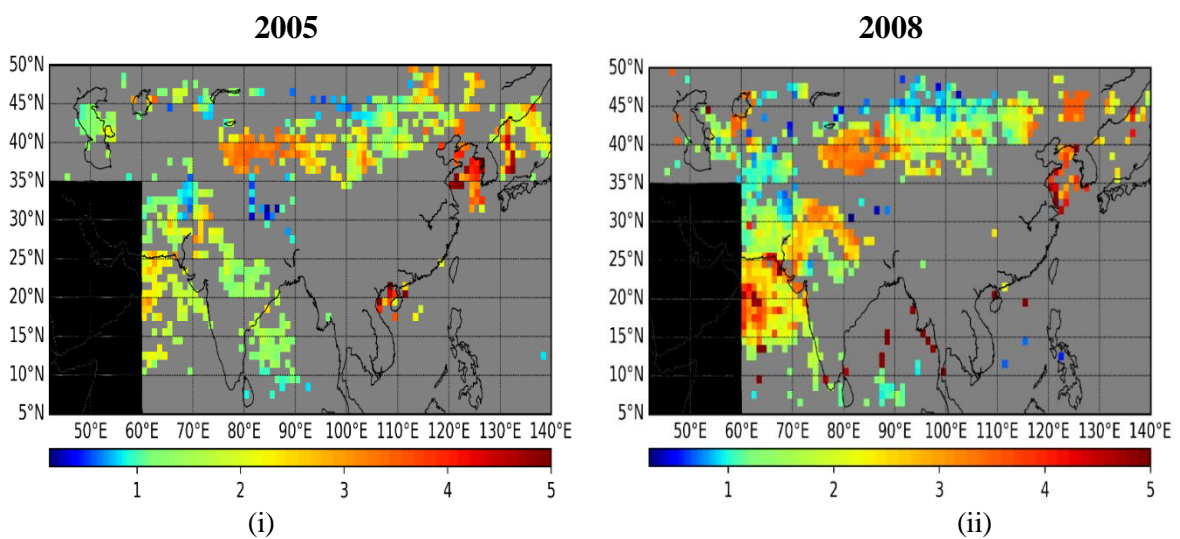
**Σχήμα Π.14.** Γεωγραφική κατανομή της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των συνολικών ισχυρών επεισοδίων ερημικής σκόνης (SDAEs) για τα έτη 2005 (i) και 2008 (ii). Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.



**Σχήμα Π.15.** Γεωγραφική κατανομή της απόλυτης συχνότητας εμφάνισης των συνολικών ακραίων επεισοδίων ερημικής σκόνης (EDAAs) για τα έτη 2005 (i) και 2008 (ii). Με γκρι χρώμα υποδηλώνονται οι περιοχές για τις οποίες ο αλγόριθμος δεν έτρεξε καθόλου, λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας δεδομένων. Η περιοχή με μαύρο χρώμα δε συμπεριλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.



**Σχήμα Π.16.** Γεωγραφική κατανομή του οπτικού βάθους των συνολικών ισχυρών επεισοδίων ερημικής σκόνης (SDAEs) για τα έτη 2005 (i) και 2008 (ii). Με γκρι 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.



**Σχήμα Π.17.** Γεωγραφική κατανομή του οπτικού βάθους των συνολικών ακραίων επεισοδίων ερημικής σκόνης (EDAEs) για τα έτη 2005 (i) και 2008 (ii). Με γκρι 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.