



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ & ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΕΥΣΤΑΘΙΟΣ Α. ΣΙΣΜΑΝΗΣ

Πτυχιούχος Γεωλόγος

## ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΣΚΟΝΗΣ



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

‘ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ, ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ’

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, 2024





ΕΥΣΤΑΘΙΟΣ Α. ΣΙΣΜΑΝΗΣ

Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΣΚΟΝΗΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών  
‘Μετεωρολογία, Κλιματολογία και Ατμοσφαιρικό Περιβάλλον’

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 11/01/2024

**Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή**

Καθηγητής Ζάνης Πρόδρομος, Επιβλέπων

Καθηγητής Μαυρομμάτης Θεόδωρος, Μέλος Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής

Αν. Καθηγήτρια Τολίκα Κωνσταντία, Μέλος Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής

© Ευστάθιος Α. Σισμάνης, Γεωλόγος, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΣΚΟΝΗΣ –  
*Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία*

© Efstathios A. Sismanis, Geologist, 2024

All rights reserved.

FUTURE PROJECTIONS OF CLIMATE CHANGE IMPACT ON DUST LEVELS – *Master Thesis*



Citation:

Σισμάνης Ε., 2024. – Μελλοντικές εκτιμήσεις της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στα επίπεδα σκόνης. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., 111 σελ.

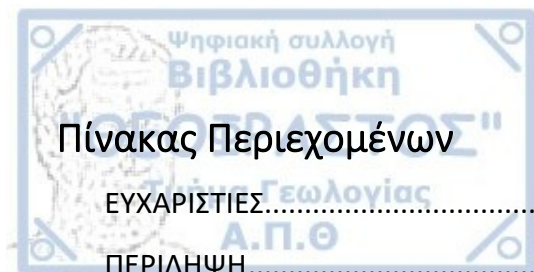
Sismanis E., 2024. – Future projections of climate change impact on dust levels. Master Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 111 pp.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

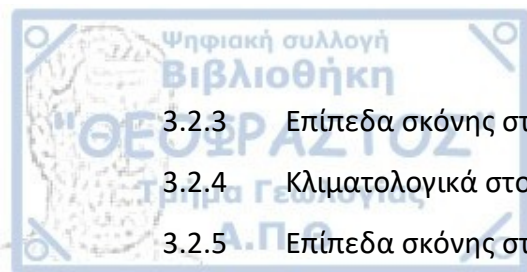
Εικόνα Εξωφύλλου: EUMETSAT, "Long-range dust outbreak over Africa and Greece", 20 March 2018, <https://www.eumetsat.int/long-range-dust-outbreak-over-africa-and-greece>.





## Πίνακας Περιεχομένων

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....                                                                                   | 11 |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....                                                                                      | 12 |
| ABSTRACT.....                                                                                      | 13 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....                                                                          | 14 |
| 1.1 Ερημικές περιοχές .....                                                                        | 14 |
| 1.1.1 Γενικά χαρακτηριστικά .....                                                                  | 14 |
| 1.1.2 Γεωγραφική θέση .....                                                                        | 18 |
| 1.1.3 Κλιματολογικά στοιχεία .....                                                                 | 19 |
| 1.1.4 Κλιματική αλλαγή στις ερημικές περιοχές.....                                                 | 19 |
| 1.2 Ατμοσφαιρική ρύπανση και ερημική σκόνη .....                                                   | 23 |
| 1.2.1 Ατμοσφαιρική ρύπανση .....                                                                   | 23 |
| 1.2.2 Ερημική σκόνη.....                                                                           | 27 |
| 1.3 Στόχος εργασίας.....                                                                           | 33 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΜΟΝΤΕΛΑ, ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ .....                                                | 35 |
| 2.1 Μοντέλα.....                                                                                   | 35 |
| 2.2 Δεδομένα .....                                                                                 | 37 |
| 2.3 Μεθοδολογία.....                                                                               | 38 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....                                                                      | 40 |
| 3.1 Μελλοντικές προβολές κλιματικών παραμέτρων και σκόνης σε παγκόσμιο επίπεδο.....                | 40 |
| 3.1.1 Θερμοκρασία του αέρα.....                                                                    | 41 |
| 3.1.2 Βροχόπτωση .....                                                                             | 46 |
| 3.1.3 Επιφανειακή ταχύτητα του ανέμου .....                                                        | 53 |
| 3.1.4 Φορτίο σκόνης.....                                                                           | 58 |
| 3.1.5 Εκπομπές σκόνης.....                                                                         | 64 |
| 3.1.6 Ξηρή εναπόθεση σκόνης.....                                                                   | 70 |
| 3.1.7 Υγρή εναπόθεση σκόνης .....                                                                  | 76 |
| 3.2 Μελλοντικές προβολές κλιματικών παραμέτρων και σκόνης στις ερήμους της Αφρικής και Ασίας ..... | 82 |
| 3.2.1 Κλιματολογικά στοιχεία και επίπεδα σκόνης στην Αφρικανική ήπειρο.....                        | 82 |
| 3.2.2 Επίπεδα σκόνης στην έρημο Σαχάρα.....                                                        | 85 |



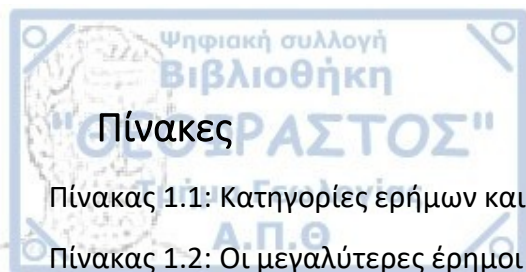
|                                |                                                                      |     |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2.3                          | Επίπεδα σκόνης στην ερημική περιοχή Σάχελ.....                       | 86  |
| 3.2.4                          | Κλιματολογικά στοιχεία και επίπεδα σκόνης στην Ασιατική ήπειρο ..... | 87  |
| 3.2.5                          | Επίπεδα σκόνης στην έρημο Τάκλα Μακάν.....                           | 91  |
| 3.2.6                          | Επίπεδα σκόνης στην έρημο Γκόμπι .....                               | 92  |
| 3.2.7                          | Επίπεδα σκόνης στην έρημο Καρακούμ .....                             | 93  |
| 3.2.8                          | Επίπεδα σκόνης στην έρημο Ταρ .....                                  | 94  |
| 3.2.9                          | Επίπεδα σκόνης στην έρημο Λουτ .....                                 | 95  |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Συμπεράσματα ..... |                                                                      | 97  |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....              |                                                                      | 100 |

## Σχήματα

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Σχήμα 1.1: Κύτταρα ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας (πηγή: Encounter Edu Ltd, 2022).....                                                                                                                                                                                                                                                        | 14 |
| Σχήμα 1.2: Χαρακτηριστικά παραδείγματα ερήμων (α) Σαχάρα (υποτροπική έρημος), (β) Ατακάμα (παράκτια έρημος), (γ) Death Valley (έρημος με βροχοσκιά), (δ) Γκόμπι (ηπειρωτική έρημος), (ε) Ανταρκτική (πολική έρημος) (πηγές: WorldAtlas, 2017; Abercrombie and Kent, 2023; TravelNevada, 2023; Petrov, 2019; QuarkExpeditions, 2023)..... | 17 |
| Σχήμα 1.3: Οι ερημικές περιοχές του πλανήτη (πηγή: USGS, 1997).....                                                                                                                                                                                                                                                                      | 18 |
| Σχήμα 1.4: Τα κυριότερα αίτια ερημοποίησης (πηγή: Dasarxeio.com, 2015).....                                                                                                                                                                                                                                                              | 22 |
| Σχήμα 1.5: Πηγές προέλευσης κύριων ατμοσφαιρικών ρύπων (πηγή: Global Weather and Climate Center, 2020). ....                                                                                                                                                                                                                             | 24 |
| Σχήμα 1.6 Μηχανισμοί εκπομπής σκόνης (πηγή: Shao et al., 2011) .....                                                                                                                                                                                                                                                                     | 30 |
| Σχήμα 1.7: Σχηματική αναπαράσταση των διεργασιών μεταφοράς και εναπόθεσης σκόνης (πηγή: Knippertz, 2014).....                                                                                                                                                                                                                            | 32 |
| Σχήμα 3.1 Κυριότερες έρημοι παρούσας εργασίας .....                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 41 |
| Σχήμα 3.2: Παγκόσμια μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα για κάθε ένα από τα μοντέλα για την περίοδο 2015-2100 (σενάριο SSP3.7). ....                                                                                                                                                                                                       | 41 |
| Σχήμα 3.3 Παγκόσμιες μέσες ετήσιες ανωμαλίες της θερμοκρασίας του αέρα για κάθε ένα από τα μοντέλα για την περίοδο 1991-2100 (σενάριο SSP3.7). ....                                                                                                                                                                                      | 42 |
| Σχήμα 3.4: Εκτιμώμενη μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα από τα μοντέλα UKESM1-0-LL, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 (γραμμές) για τις τέσσερις μελετούμενες περιόδους (στήλες). ....                                                                                                                                                   | 43 |
| Σχήμα 3.5: Εκτιμώμενη μεταβολή της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας από τα μοντέλα UKESM1-0-LL, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 (γραμμές) σε σχέση με την περίοδο αναφοράς για το εγγύς μέλλον (1 <sup>η</sup> στήλη) , τη μεσοπρόθεσμη περίοδο (2 <sup>η</sup> στήλη), τη μακροπρόθεσμη περίοδο (3 <sup>η</sup> στήλη). .                  | 45 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Σχήμα 3.6: Παγκόσμια μέση ετήσια βροχόπτωση για κάθε ένα από τα μοντέλα για την περίοδο 2015-2100 (σενάριο SSP3.7). .....                                                                                                                                                                                                                             | 46 |
| Σχήμα 3.7 Παγκόσμιες μέσες ετήσιες ανωμαλίες της βροχόπτωσης για κάθε ένα από τα μοντέλα για την περίοδο 1991-2100 (σενάριο SSP3.7). .....                                                                                                                                                                                                            | 47 |
| Σχήμα 3.8: Εκτιμώμενη μέση ετήσια βροχόπτωση για τα μοντέλα UKESM1-0-LL, GISS-E2-1-G, MRI-ESM2.0, GFDL-ESM4 (γραμμές) για τις τέσσερις μελετούμενες περιόδους (στήλες). .....                                                                                                                                                                         | 48 |
| Σχήμα 3.9: Εκτιμώμενη μεταβολή της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης από τα μοντέλα UKESM1-0-LL, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 (γραμμές) σε σχέση με την περίοδο αναφοράς (1991-2010) για το εγγύς μέλλον (1 <sup>η</sup> στήλη) , τη μεσοπρόθεσμη περίοδο (2 <sup>η</sup> στήλη), τη μακροπρόθεσμη περίοδο (3 <sup>η</sup> στήλη). .....                | 51 |
| Σχήμα 3.10 Εκτιμώμενη ποσοστιαία μεταβολή της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης από τα μοντέλα UKESM1-0-LL, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 (γραμμές) σε σχέση με την περίοδο αναφοράς (1991-2010) για το εγγύς μέλλον (1 <sup>η</sup> στήλη) , τη μεσοπρόθεσμη περίοδο (2 <sup>η</sup> στήλη), τη μακροπρόθεσμη περίοδο (3 <sup>η</sup> στήλη). .....     | 52 |
| Σχήμα 3.11: Παγκόσμια μέση ετήσια επιφανειακή ταχύτητα του ανέμου για κάθε ένα από τα μοντέλα για την περίοδο 2015-2100 (σενάριο SSP3.7). .....                                                                                                                                                                                                       | 53 |
| Σχήμα 3.12 Παγκόσμιες μέσες ετήσιες ανωμαλίες της ταχύτητας του αέρα για κάθε ένα από τα μοντέλα για την περίοδο 1991-2100 (σενάριο SSP3.7). .....                                                                                                                                                                                                    | 54 |
| Σχήμα 3.13: Μέση ετήσια κατανομή του ανέμου για τα μοντέλα UKESM1-0-LL, GISS-E2-1-G-E2-1-G, MRI-ESM2.0, GFDL-ESM4 (γραμμές) για τις τέσσερις μελετούμενες περιόδους (στήλες). .....                                                                                                                                                                   | 55 |
| Σχήμα 3.14: Εκτιμώμενη μεταβολή της μέσης επιφανειακής ταχύτητας του ανέμου από τα μοντέλα UKESM1-0-LL, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 (γραμμές) σε σχέση με την περίοδο αναφοράς (1991-2010) για το εγγύς μέλλον (1 <sup>η</sup> στήλη) , τη μεσοπρόθεσμη περίοδο (2 <sup>η</sup> στήλη), τη μακροπρόθεσμη περίοδο (3 <sup>η</sup> στήλη). ..... | 57 |
| Σχήμα 3.15: Παγκόσμιο μέσο ετήσιο φορτίο σκόνης για κάθε ένα από τα μοντέλα για την περίοδο 2015-2100 (σενάριο SSP3.7). .....                                                                                                                                                                                                                         | 58 |
| Σχήμα 3.16 Παγκόσμιες μέσες ετήσιες ανωμαλίες του φορτίου σκόνης για κάθε ένα από τα μοντέλα για την περίοδο 1991-2100 (σενάριο SSP3.7). .....                                                                                                                                                                                                        | 59 |
| Σχήμα 3.17: Εκτιμώμενο φορτίο σκόνης από τα μοντέλα UKESM1-0-LL, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 (γραμμές) για τις τέσσερις μελετούμενες περιόδους (στήλες). .....                                                                                                                                                                                 | 60 |
| Σχήμα 3.18: Εκτιμώμενη μεταβολή του μέσου φορτίου σκόνης από τα μοντέλα UKESM1-0-LL, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 (γραμμές) σε σχέση με την περίοδο αναφοράς (1991-2010) για το εγγύς μέλλον (1 <sup>η</sup> στήλη) , τη μεσοπρόθεσμη περίοδο (2 <sup>η</sup> στήλη), τη μακροπρόθεσμη περίοδο (3 <sup>η</sup> στήλη). .....                    | 63 |
| Σχήμα 3.19: Παγκόσμιες μέσες ετήσιες εκπομπές σκόνης για κάθε ένα από τα μοντέλα για την περίοδο 2015-2100 (σενάριο SSP3.7). .....                                                                                                                                                                                                                    | 64 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Σχήμα 3.20: Παγκόσμιες μέσες ετήσιες ανωμαλίες των εκπομπών σκόνης για κάθε ένα από τα μοντέλα για την περίοδο 1991-2100 (σενάριο SSP3.7). .....                                                                                                                                                                                     | 65 |
| Σχήμα 3.21: Εκτιμώμενες εκπομπές σκόνης από τα μοντέλα UKESM1-0-LL, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 (γραμμές) για τις τέσσερις μελετούμενες περιόδους (στήλες). .....                                                                                                                                                             | 66 |
| Σχήμα 3.22: Εκτιμώμενη μεταβολή των μέσων εκπομπών σκόνης από τα μοντέλα UKESM1-0-LL, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 (γραμμές) σε σχέση με την περίοδο αναφοράς (1991-2010) για το εγγύς μέλλον (1 <sup>η</sup> στήλη), τη μεσοπρόθεσμη περίοδο (2 <sup>η</sup> στήλη), τη μακροπρόθεσμη περίοδο (3 <sup>η</sup> στήλη). .....   | 69 |
| Σχήμα 3.23: Παγκόσμια μέση ετήσια ξηρή εναπόθεση σκόνης για κάθε ένα από τα μοντέλα για την περίοδο 2015-2100 (σενάριο SSP3.7). .....                                                                                                                                                                                                | 70 |
| Σχήμα 3.24: Παγκόσμιες μέσες ετήσιες ανωμαλίες της ξηρής εναπόθεσης σκόνης για κάθε ένα από τα μοντέλα για την περίοδο 1991-2100 (σενάριο SSP3.7). .....                                                                                                                                                                             | 71 |
| Σχήμα 3.25: Εκτιμώμενη κατανομή ξηρής εναπόθεσης σκόνης από τα μοντέλα UKESM1-0-LL, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 (γραμμές) για τις τέσσερις μελετούμενες περιόδους (στήλες). .....                                                                                                                                             | 72 |
| Σχήμα 3.26: Εκτιμώμενη μεταβολή της ξηρής εναπόθεσης σκόνης από τα μοντέλα UKESM1-0-LL, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 (γραμμές) σε σχέση με την περίοδο αναφοράς (1991-2010) για το εγγύς μέλλον (1 <sup>η</sup> στήλη), τη μεσοπρόθεσμη περίοδο (2 <sup>η</sup> στήλη), τη μακροπρόθεσμη περίοδο (3 <sup>η</sup> στήλη). ..... | 75 |
| Σχήμα 3.27: Παγκόσμια μέση ετήσια υγρή εναπόθεση σκόνης για κάθε ένα από τα μοντέλα για την περίοδο 2015-2100 (σενάριο SSP3.7). .....                                                                                                                                                                                                | 76 |
| Σχήμα 3.28: Παγκόσμιες μέσες ετήσιες ανωμαλίες της υγρής εναπόθεσης σκόνης για κάθε ένα από τα μοντέλα για την περίοδο 1991-2100 (σενάριο SSP3.7). .....                                                                                                                                                                             | 77 |
| Σχήμα 3.29: Εκτιμώμενη κατανομή υγρής εναπόθεσης σκόνης από τα μοντέλα UKESM1-0-LL, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 (γραμμές) για τις τέσσερις μελετούμενες περιόδους (στήλες). .....                                                                                                                                             | 78 |
| Σχήμα 3.30: Εκτιμώμενη μεταβολή της υγρής εναπόθεσης σκόνης από τα μοντέλα UKESM1-0-LL, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 (γραμμές) σε σχέση με την περίοδο αναφοράς (1001-2010) για το εγγύς μέλλον (1 <sup>η</sup> στήλη), τη μεσοπρόθεσμη περίοδο (2 <sup>η</sup> στήλη), τη μακροπρόθεσμη περίοδο (3 <sup>η</sup> στήλη). ..... | 81 |



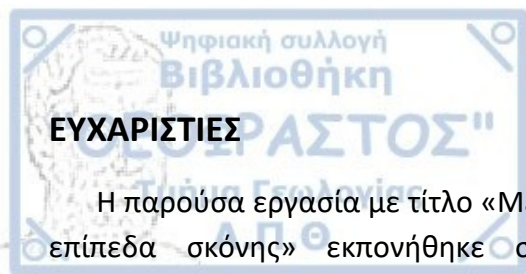
## Πίνακες

|                                                                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Πίνακας 1.1: Κατηγορίες ερήμων και γενικά χαρακτηριστικά τους (πηγή: Boudreau et al., 2023).....                                                                               | 17 |
| Πίνακας 1.2: Οι μεγαλύτερες έρημοι παγκοσμίως (πηγή: Geology.com, 2023). ....                                                                                                  | 18 |
| Πίνακας 1.3: Πηγές προέλευσης και επιπτώσεις κύριων ατμοσφαιρικών ρύπων (πηγή: Nathanson, 2018). ....                                                                          | 23 |
| Πίνακας 1.4: Οι πιο κοινές μορφές PM <sub>x</sub> (πηγή: Smith, 2020). ....                                                                                                    | 25 |
| Πίνακας 1.5: Κύρια συστατικά σωματιδίων σκόνης (πηγή: Falkovich et al., 2001) ....                                                                                             | 28 |
| Πίνακας 2.1: Κύρια χαρακτηριστικά μοντέλων UKESM1-0-LL, MRI-ESM2-0, GISS-E2-1-G και GFDL-ESM4. ....                                                                            | 35 |
| Πίνακας 3.1 Μέσες εκτιμώμενες ανωμαλίες των παραμέτρων από τα μοντέλα UKESM1-0-LL1, MRI-ESM2.0 , GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 για το εγγύς μέλλον στην Αφρική. ....                  | 83 |
| Πίνακας 3.2: Μέσες εκτιμώμενες τιμές των παραμέτρων από τα μοντέλα UKESM1-0-LL1, MRI-ESM2.0 , GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 για τη μεσοπρόθεσμη μελλοντική περίοδο στην Αφρική.....   | 83 |
| Πίνακας 3.3: Μέσες εκτιμώμενες τιμές των παραμέτρων από τα μοντέλα UKESM1-0-LL1, MRI-ESM2.0 , GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 για τη μακροπρόθεσμη μελλοντική περίοδο στην Αφρική. .... | 84 |
| Πίνακας 3.4: Μέσες εκτιμώμενες τιμές των παραμέτρων από τα μοντέλα UKESM1-0-LL1, MRI-ESM2.0 , GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 για το εγγύς μέλλον στην Ασία.....                        | 88 |
| Πίνακας 3.5: Μέσες εκτιμώμενες τιμές των παραμέτρων από τα μοντέλα UKESM1-0-LL1, MRI-ESM2.0 , GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 για τη μεσοπρόθεσμη μελλοντική περίοδο στην Ασία.....     | 89 |
| Πίνακας 3.6: Μέσες εκτιμώμενες τιμές των παραμέτρων από τα μοντέλα UKESM1-0-LL1, MRI-ESM2.0 , GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 για τη μακροπρόθεσμη μελλοντική περίοδο στην Ασία.....    | 90 |

## Ακρωνύμια

| Ακρωνύμιο                                                 | Σημασία                                                                                                                                                                                              |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>CCM</b>                                                | Χημικό Κλιματικό Μοντέλο (Chemistry Climate Model)                                                                                                                                                   |
| <b>CMIP6</b>                                              | Η έκτη φάση του Coupled Model Intercomparison Project                                                                                                                                                |
| <b>CO</b>                                                 | Μονοξείδιο του άνθρακα                                                                                                                                                                               |
| <b>ESMs</b>                                               | Μοντέλα Γήινων Συστημάτων (Earth System Models)                                                                                                                                                      |
| <b>GCM</b>                                                | Παγκόσμια Κλιματικά Μοντέλα (Global Climate Models)                                                                                                                                                  |
| <b>JULES</b>                                              | Κοινός προσομοιωτής χερσαίου περιβάλλοντος του Ηνωμένου Βασιλείου (Joint UK Land Environment Simulator)                                                                                              |
| <b>IPCC</b>                                               | Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (Intergovernmental Panel on Climate Change)                                                                                                      |
| <b>MEDUSA</b>                                             | Μοντέλο της δυναμικής των οικοσυστημάτων, της αξιοποίησης της δέσμευσης και της όξυνσης των θρεπτικών στοιχείων (Model of Ecosystem Dynamics, nutrient Utilisation, Sequestration and Acidification) |
| <b>NO<sub>x</sub></b>                                     | Οξείδια του αζώτου                                                                                                                                                                                   |
| <b>O<sub>3</sub></b>                                      | Όζον                                                                                                                                                                                                 |
| <b>OMA</b>                                                | Αεροζόλ στιγμής (One-Moment Aerosol)                                                                                                                                                                 |
| <b>Pb</b>                                                 | Μόλυβδος                                                                                                                                                                                             |
| <b>PM<sub>x</sub> (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>)</b> | Αιωρούμενα σωματίδια                                                                                                                                                                                 |
| <b>SSPs</b>                                               | Σενάρια παγκόσμιων κοινωνικοοικονομικών αλλαγών (Shared Socioeconomic Pathways)                                                                                                                      |
| <b>SO<sub>2</sub></b>                                     | Διοξείδιο του θείου                                                                                                                                                                                  |
| <b>UKCA</b>                                               | Μοντέλο χημείας και αεροζόλ του Ηνωμένου Βασιλείου (United Kingdom Chemistry and Aerosol model)                                                                                                      |





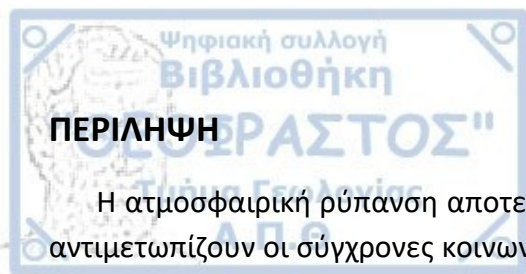
Η παρούσα εργασία με τίτλο «Μελλοντικές εκτιμήσεις της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στα επίπεδα σκόνης» εκπονήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών «Μετεωρολογία, Κλιματολογία και Ατμοσφαιρικό Περιβάλλον» του Τμήματος Γεωλογίας, του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (Α.Π.Θ.).

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Κο Πρόδρομο Ζάνη, Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας της Σχολής Θετικών Επιστημών, ο οποίος επέβλεπε την εργασία και παρείχε συνεχή καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια συγγραφής της. Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω τον Κο Αλκιβιάδη Καλησώρα, διδακτορικός του Τμήματος Γεωλογίας, για την πολύτιμη βοήθειά του κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Ιδιαίτέρως να ευχαριστήσω τα μέλη της Τριμελούς Επιτροπής, την Κα Κωνσταντία Τολίκα, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ. και τον Κο Θεόδωρο Μαυρομμάτη, Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ., οι οποίοι δέχτηκαν να αξιολογήσουν την εργασία μου. Οφείλω ακόμα να ευχαριστήσω και όλους τους καθηγητές του τομέα Μετεωρολογίας-Κλιματολογίας για τις γνώσεις που μου μετέδωσαν καθ' όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Τέλος, ένα τεράστιο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και τους φίλους μου για τη συνεχή τους στήριξη.

Ευστάθιος Σισμάνης, 2024



Η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι σύγχρονες κοινωνίες, με αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία του πληθυσμού και των οικοσυστημάτων. Ένας ατμοσφαιρικός ρύπος που έχει αρνητική επίδραση έμμεσα και άμεσα στο περιβάλλον είναι η σκόνη.

Η κλιματική αλλαγή που παρατηρείται όλο και περισσότερο τα τελευταία χρόνια ενδέχεται να επηρεάσει σε σημαντικό βαθμό τα επίπεδα σκόνης τόσο σε τοπικό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο. Το γεγονός αυτό θα οδηγήσει σε μεταβολές της σκόνης σε ορισμένες περιοχές του πλανήτη, με τις αντίστοιχες επακόλουθες επιπτώσεις τους σε αυτές.

Στην παρούσα εργασία μελετάται η μεταβολή των επιπέδων σκόνης κατά την χρονική περίοδο 2021-2100 σε συνάρτηση με τις κλιματολογικές αλλαγές που αναμένεται να λάβουν χώρα σύμφωνα με το σενάριο SSP3-7.0 των σεναρίων παγκόσμιων κοινωνικοοικονομικών αλλαγών (Shared Socioeconomic Pathways, SSPs). Στο επίκεντρο της εργασίας βρίσκονται ερημικές περιοχές της Αφρικής (έρημος Σαχάρα και Σάχελ) και της Ασίας (έρημος Τάκλα Μακάν, Γκόμπι, Καρακούμ, Ταρ και Λουτ), για τις οποίες αναλύεται η σχέση της θερμοκρασίας του αέρα, της βροχόπτωσης και της επιφανειακής ταχύτητας του αέρα με το φορτίο σκόνης, τις εκπομπές σκόνης, καθώς και την ξηρή και υγρή εναπόθεση σκόνης. Για την καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων χρησιμοποιούνται οι προσομοιώσεις τεσσάρων κλιματικών μοντέλων της 6ης φάσης του Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6). Συγκεκριμένα, μελετώνται τα UKESM1-0-LL, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G και GFDL-ESM4 με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων τους. Στη συζήτηση στο τέλος της εργασίας παρουσιάζεται η ομοιογένεια ή η ποικιλομορφία στις προσομοιώσεις των κλιματικών μοντέλων και παρουσιάζεται κατά πόσο αυτά είναι ικανά να εκτιμήσουν με σαφήνεια τις μελλοντικές μεταβολές στα επίπεδα σκόνης εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής.





## ABSTRACT

Air pollution constitutes one of the most significant environmental challenges faced by modern societies, with adverse effects on the health of the population and ecosystems in general. One of the air pollutants that has a direct and indirect negative impact on the environment is dust. Climate change is likely to significantly affect dust levels both on local and global scale, with some areas affected more than others.

The current thesis investigates the changes in dust levels during the period 2021-2100 in relation to the climate changes that are expected to take place under the SSP3-7.0 scenario of the Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) scenarios. The focus lies on deserted regions in Africa (Sahara Desert and Sahel) and Asia (Takla Makan, Gobi, Karakum, Thar and Lut deserts), for which the relationships between the air temperature, precipitation and surface air velocity and the dust load, dust emissions, and dry and wet deposition of dust are analysed. For the better interpretation of the results, simulations of four climate models of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) are compared, namely UKESM1-0-LL, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G and GFDL-ESM4. The discussion at the end of the paper explores the degree of agreement of the climate models and indicates whether they can robustly estimate future changes in dust levels due to climate change.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

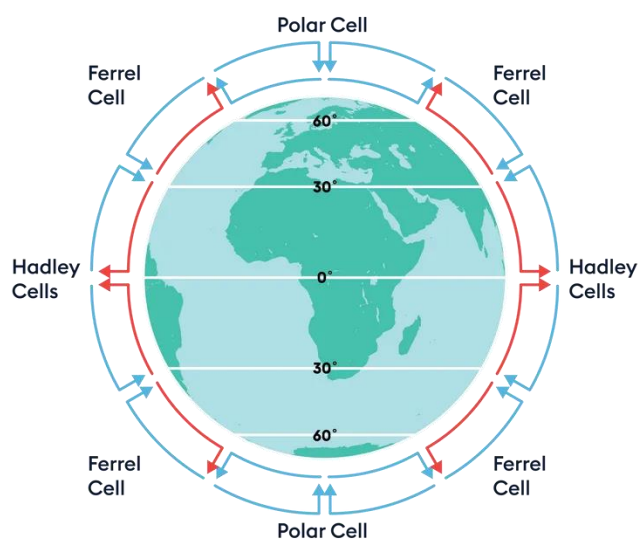
### 1.1 Ερημικές περιοχές

#### 1.1.1 Γενικά χαρακτηριστικά

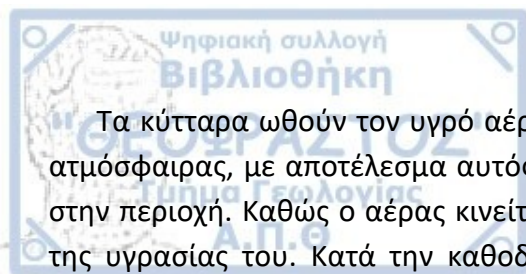
Οι έρημοι αποτελούν περιοχές του πλανήτη οι οποίες δέχονται μικρά ποσά βροχής ετησίως (Boudreau et al., 2023). Αν και ένα κοινό χαρακτηριστικό τους είναι η ανυδρία ή ξηρασία που σημειώνεται σε αυτές, ένας ακριβής ορισμός για τον όρο 'έρημος' δεν είναι δυνατό να αποδοθεί, καθώς εξαρτάται από τον παράγοντα που μελετάται σε κάθε περίπτωση, όπως για παράδειγμα είναι η βλάστηση, το έδαφος, ο πολιτισμός, το κλίμα, κλπ. (Nicholson, 1998). Κατά την βιβλιογραφία, ως έρημοι ορίζονται οι περιοχές που δέχονται έως 25 cm βροχής ετησίως, με την εξατμισοδιαπνοή να υπερβαίνει κατά σημαντικό βαθμό την ετήσια βροχόπτωση (Noy-Meir, 1973; Boudreau et al., 2023).

Η ανισορροπία μεταξύ της βροχόπτωσης και της εξατμισοδιαπνοής, σε συνδυασμό με την χαμηλή ατμοσφαιρική υγρασία, τις υψηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της ημέρας και τους ανέμους που επικρατούν, έχει ως αποτέλεσμα την έλλειψη της διαθέσιμης υγρασίας που είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη φυτών (Smith, 2019). Εντούτοις, ορισμένες ποικιλίες φυτών που δε χρειάζονται μεγάλα ποσά νερού για να αναπτυχθούν εντοπίζονται στις ερημικές περιοχές.

Η πλειοψηφία των ερήμων εντοπίζεται στις δυτικές πλευρές των ηπείρων, με εξαίρεση τις ερήμους Σαχάρα, Αραβίας και Γκόμπι και των μικρότερων ερήμων της Ασίας οι οποίες παρατηρούνται στο εσωτερικό της Ευρασίας απομακρυσμένες από την θάλασσα. Η ύπαρξη τους φαίνεται να επηρεάζεται από την ατμοσφαιρική κυκλοφορία, καθώς τείνουν να εμφανίζονται κάτω από τις ανατολικές πλευρές των μεγάλων υποτροπικών κυττάρων υψηλής πίεσης (Rafferty, 2020). Πρόκειται για τα δύο κύτταρα Hadley, που εντοπίζονται στο Βόρειο και Νότιο Ημισφαίριο και κινούνται δεξιόστροφα και αριστερόστροφα, αντίστοιχα (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1: Κύτταρα ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας (πηγή: Encounter Edu Ltd, 2022).



Τα κύτταρα ωθούν τον υγρό αέρα στον Ισημερινό να κινηθεί προς τα υψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας, με αποτέλεσμα αυτός να ψύχεται, να συμπυκνώνεται και να προκαλεί βροχοπτώσεις στην περιοχή. Καθώς ο αέρας κινείται προς τα μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη, χάνει μεγάλο μέρος της υγρασίας του. Κατά την καθοδική κίνηση των κυττάρων, δημιουργείται η υποτροπική ζώνη υψηλών πιέσεων και ο αέρας συμπιέζεται ξανά και θερμαίνεται, χάνοντας περαιτέρω την υγρασία του. Αυτή η διαδικασία εμποδίζει τον σχηματισμό νεφών, και συνεπώς της βροχής. Σε συνδυασμό με την παρουσία αέρα που επιταχύνει την εξάτμιση στην επιφάνεια, η περιοχή στερεύει από υγρασία και ξηραίνεται (Encyclopedia Britannica, 2023).

Η επικρατούσα σταδιακή και συνεχής μετάβαση μεταξύ ξηρών και ημιάνυδρων περιβαλλόντων δυσκολεύει την οριοθέτηση μίας τέτοιου είδους περιοχής (Nicholson, 1998). Οι έρημοι δεν σχηματίζονται μόνο σε ζεστές περιοχές, αλλά και σε ψυχρότερες. Οι κύριες κατηγορίες στις οποίες μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τα αίτια δημιουργίας τους και την ξηρότητά τους είναι πέντε και παρουσιάζονται παρακάτω (Boudreau et al., 2023).

### Υποτροπικές έρημοι (έρημοι χαμηλού γεωγραφικού πλάτους)

Οι υποτροπικές έρημοι εντοπίζονται κατά μήκος του Τροπικού του Καρκίνου (15° - 30° βόρεια του Ισημερινού) ή κατά μήκος του Τροπικού του Αιγόκερου (15° - 30° νότια του Ισημερινού). Το αίτιο δημιουργίας τους είναι η ανοδική κίνηση του θερμού υγρού αέρα στην ατμόσφαιρα κοντά στη ζώνη του Ισημερινού, ο οποίος κατά την άνοδό του ψύχεται και ξηραίνεται, προκαλώντας παράλληλα έντονες τροπικές βροχές, και στη συνέχεια απομακρύνεται από τον Ισημερινό. Όσο πλησιάζει τις τροπικές περιοχές, εκτελεί καθοδική κίνηση και θερμαίνεται, εμποδίζοντας το σχηματισμό νεφών, και κατ' επέκταση της βροχής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της συγκεκριμένης κατηγορίας ερήμου είναι η έρημος Σαχάρα στη Β. Αφρική.

### Παράκτιες έρημοι

Οι παράκτιες έρημοι οφείλονται κυρίως στην ύπαρξη ψυχρών ωκεάνιων ρευμάτων. Ο αέρας που πνέει προς την ακτή, ψύχεται από την υποκείμενη ψυχρότερη υδάτινη επιφάνεια, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα στρώμα ομίχλης, γνωστό ως «ομίχλη καπνού». Η ομίχλη καπνού παρασύρεται στη στεριά και παρά την υψηλή υγρασία, δε σημειώνονται οι ατμοσφαιρικές αλλαγές που συνήθως προκαλούν βροχοπτώσεις. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως μία παράκτια έρημος μπορεί να είναι υγρή και ομιχλώδης, αλλά να μη παρουσιάζεται καθόλου βροχή σε αυτή. Η έρημος Ατακάμα, στην Χιλή αποτελεί μία έρημο της συγκεκριμένης κατηγορίας, στην οποία μάλιστα το διάστημα με έλλειψη βροχόπτωσης μπορεί να φτάσει τις πολλές δεκαετίες, συνιστώντας την ως την ξηρότερη περιοχή του πλανήτη.

### Έρημοι με βροχοσκία

Οι έρημοι με βροχοσκία εντοπίζονται κοντά στις υπήνεμες πλαγιές ορισμένων οροσειρών, οι οποίες καλύπτονται από τους επικρατούντες ανέμους της εκάστοτε περιοχής. Η δημιουργία τους οφείλεται στον υγρό αέρα που πνέει στην προσήνεμη πλευρά μιας οροσειράς που τον αναγκάζει σε ανοδική κίνηση, με αποτέλεσμα την ψύξη του και τη μείωση της υγρασίας του. Όταν ο αέρας υπερπηδήσει την οροσειρά και αρχίσει την καθοδική του κίνηση στην υπήνεμη πλευρά δεν διαθέτει αρκετή ποσότητα υγρασίας για να σχηματίσει νέφη κι επομένως δε σχηματίζεται βροχή. Η Κοιλάδα

του Θανάτου στη Β. Αμερική συνιστά αντιπροσωπευτικό παράδειγμα της συγκεκριμένης κατηγορίας ερήμου.

### Ηπειρωτικοί έρημοι

Οι ηπειρωτικές έρημοι βρίσκονται μακριά από τη θάλασσα και την αιτία δημιουργίας τους αποτελούν οι άνεμοι οι οποίοι όταν φτάνουν στην περιοχή δεν φέρουν σημαντική ποσότητα υγρασίας. Η έρημος Γκόμπι στην Ασία συνιστά μία ηπειρωτική έρημο, στην οποία οι άνεμοι φθάνουν έχοντας χάσει όλη τους την υγρασία.

### Πολικές έρημοι

Οι πολικές έρημοι αποτελούν τμήματα της Αρκτικής (στο Β. Ημισφαίριο) και της Ανταρκτικής (στο Ν. Ημισφαίριο) και περιέχουν σημαντικές ποσότητες νερού, οι οποίες όμως ως επί το πλείστον είναι εγκλωβισμένες σε παγετώνες και στρώματα πάγου καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Ως αποτέλεσμα, ελάχιστο νερό είναι διαθέσιμο για τη πανίδα και χλωρίδα της περιοχής. Σχεδόν το μεγαλύτερο τμήμα της Ανταρκτικής θεωρείται πολική έρημος, καθιστώντας την ως την μεγαλύτερη έρημο στον πλανήτη.



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Σχήμα 1.2: Χαρακτηριστικά παραδείγματα ερήμων (α) Σαχάρα (υποτροπική έρημος), (β) Ατακάμα (παράκτια έρημος), (γ) Death Valley (έρημος με βροχοσκιά), (δ) Γκόμπι (ηπειρωτική έρημος), (ε) Ανταρκτική (πολική έρημος) (πηγές: WorldAtlas, 2017; Abercrombie and Kent, 2023; TravelNevada, 2023; Petrov, 2019; QuarkExpeditions, 2023).

Ο Πίνακας 1.1 παρουσιάζει τις κατηγορίες ερήμων και τα γενικά χαρακτηριστικά τους.

Πίνακας 1.1: Κατηγορίες ερήμων και γενικά χαρακτηριστικά τους (πηγή: Boudreau et al., 2023).

| Κατηγορία ερήμου    | Τοποθεσία                                                                                                  | Χαρακτηριστικά                                                                  | Παραδείγματα                                                                                                                          |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Υποτροπική έρημος   | Υποτροπική ζώνη<br>(Τροπικός του Καρκίνου<br>(15°B - 30°B) και<br>Τροπικός του Αιγόκερου<br>(15°N - 30°N)) | Υψηλή ξηρασία,<br>ελάχιστη βροχή (<30cm)                                        | Έρημοι της Αυστραλίας,<br>Σαχάρας και Νότιας<br>Αφρικής                                                                               |
| Παράκτια έρημος     | Δυτικές ακτές ηπείρων<br>σε γεωγραφικά πλάτη<br>μεταξύ 20°-30° (B. & N.<br>Ημισφαίριο)                     | Πολύ υψηλή ξηρασία,<br>ελάχιστη βροχή (~13<br>cm), έντονη ομίχλη τον<br>χειμώνα | Έρημοι Atacama (Χιλή),<br>Namib (Δ. Αφρική), Baja<br>Καλιφόρνια (ΗΠΑ), η<br>έρημος στο Μαρόκο                                         |
| Έρημος με βροχοσκιά | Ηπειρωτικές περιοχές<br>με οροσειρές                                                                       | Ελάχιστη βροχή, υψηλή<br>εξάτμιση                                               | Sierra Nevada,<br>Cascades, Ιμαλάια, οι<br>όροι Andes                                                                                 |
| Ηπειρωτική έρημος   | Ηπειρωτικές περιοχές<br>μακριά από τη θάλασσα                                                              | Ελάχιστη βροχή (<10<br>cm), σημαντική<br>μεταβολή της<br>θερμοκρασίας ετησίως   | Έρημοι Γκόμπι και<br>Τάκλα Μακάν (Α. Ασία),<br>έρημοι Κεντρικής<br>Αυστραλίας, Great<br>Basin (B. Αμερική), και<br>Μόντε (N. Αμερική) |
| Πολική έρημος       | Αρκτική και Ανταρκτική                                                                                     | Ελάχιστη βροχή,<br>εξαιρετικά χαμηλή<br>θερμοκρασία και<br>ξηρασία              | Αρκτική και Ανταρκτική                                                                                                                |

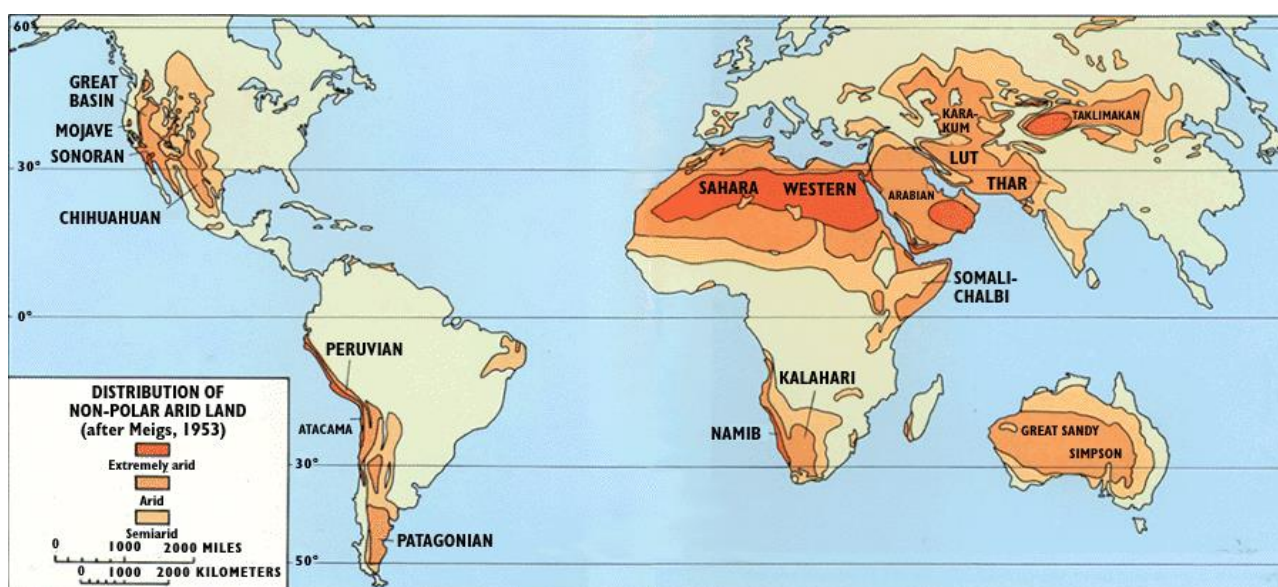


### 1.1.2 Γεωγραφική θέση

Οι έρημοι καλύπτουν περίπου το 20% της συνολικής χέρσου του πλανήτη, εντοπίζονται σε όλες τις ηπείρους και κατοικούνται από το ένα έκτο του παγκόσμιου πληθυσμού (Boudreau et al., 2023).

Οι έρημοι δεν αποτελούν σταθερές περιοχές, αλλά επηρεάζονται από το κλίμα (υποκεφάλαιο 1.1.4). Η θέση των σύγχρονων ερήμων οφείλεται στις μεταβολές του κλίματος κατά τον Καινοζωικό αιώνα (ξεκίνησε πριν από 65,5 εκατομμύρια χρόνια) και οφείλεται σε προοδευτική ψύξη και επακόλουθη αποξήρανση (Smith, 2019).

Στο Σχήμα 1.3 απεικονίζονται οι σύγχρονες ερημικές περιοχές της Γης. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι οι περισσότερες βρίσκονται στη Β. Αφρική, την ηπειρωτική Ασία, και τις δυτικές ακτές των ηπείρων. Οι σημαντικότερες σε έκταση έρημοι παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 1.2).



Σχήμα 1.3: Οι ερημικές περιοχές του πλανήτη (πηγή: USGS, 1997).

Πίνακας 1.2: Οι μεγαλύτερες έρημοι παγκοσμίως (πηγή: Geology.com, 2023).

| Όνομα           | Κατηγορία έρημου  | Έκταση (km <sup>2</sup> ) | Τοποθεσία                                                 |
|-----------------|-------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Ανταρκτική      | Πολική έρημος     | 14,2 εκατ.                | Ανταρκτική                                                |
| Αρκτική         | Πολική έρημος     | 13,9 εκατ.                | Αλάσκα, Καναδάς, Γροιλανδία, Ισλανδία, Σκανδιναβία, Ρωσία |
| Σαχάρα          | Υποτροπική έρημος | 9 εκατ.                   | Β. Αφρική                                                 |
| Αραβική         | Υποτροπική έρημος | 2,6 εκατ.                 | Αραβική χερσόνησος                                        |
| Γκόμπι          | Ηπειρωτική έρημος | 1,2 εκατ.                 | Κίνα και Μογγολία                                         |
| Παταγονίας      | Ηπειρωτική έρημος | 670.000                   | Αργεντινή                                                 |
| Μεγάλη Βικτώρια | Υποτροπική έρημος | 650.000                   | Αυστραλία                                                 |
| Καλαχάρι        | Υποτροπική έρημος | 570.000                   | Νότια Αφρική,                                             |

|             |                   |         |                                           |
|-------------|-------------------|---------|-------------------------------------------|
|             |                   |         | Μποτσουάνα, Ναμίμπια                      |
| Great Basin | Ηπειρωτική έρημος | 490.000 | ΗΠΑ                                       |
| Συρίας      | Υποτροπική έρημος | 490.000 | Συρία, Ιορδανία, Ιράκ,<br>Σαουδική Αραβία |

### 1.1.3 Κλιματολογικά στοιχεία

Τα κλιματολογικά στοιχεία των ερήμων διαφέρουν ανάλογα με την κατηγορία στην οποία ανήκουν. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένα γενικά χαρακτηριστικά τα οποία συναντώνται σε όλες ή στην πλειοψηφία τους.

Η ανυδρία ή η πλήρης ξηρασία αποτελεί το κοινό χαρακτηριστικό όλων των ερημικών περιοχών (Boudreau et al., 2023). Η έλλειψη υγρασίας στον αέρα έχει ως αποτέλεσμα την εξαφάνιση ενδεχόμενων ελαφριών βροχοπτώσεων που μπορεί να εμφανιστούν προτού οι βροχοσταγόνες φτάσουν την επιφάνεια του εδάφους. Ορισμένες φορές, όταν υπάρχει επαρκής υγρασία, οι βροχοπτώσεις παρουσιάζονται υπό μορφή νεφώσεων που φέρουν έως και 25 εκατοστά βροχής σε μία μόνο ώρα. Πρόκειται για τη μοναδική βροχή που δέχεται η έρημος όλο τον χρόνο.

Όταν δεν μπορεί να σχηματιστεί νέφωση, η ακτινοβολία του ηλίου φτάνει ανεμπόδιστα στην επιφάνεια του εδάφους, με αποτέλεσμα να το θερμαίνει. Με τη σειρά του, το έδαφος συμβάλλει στη θέρμανση του υπερκείμενου αέρα. Σε ορισμένες ερημικές περιοχές σημειώνονται θερμοκρασιακές τιμές έως και +54°C κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ άλλες έχουν ιδιαίτερα ψυχρούς χειμώνες ή οι συνθήκες είναι ψυχρές καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Το μεγάλο ημερήσιο θερμομετρικό εύρος είναι συνηθισμένο στις περισσότερες ερήμους. Κατά μέσο όρο, κατά τη διάρκεια της ημέρας σημειώνονται τιμές θερμοκρασίας έως +38°C, ενώ τη νύχτα η θερμοκρασία πέφτει στους -4°C (NASA Earth Observatory, 2020). Το γεγονός αυτό οφείλεται στην παρουσία και απουσία της γήινης ακτινοβολίας τη μέρα και τη νύχτα, αντίστοιχα.

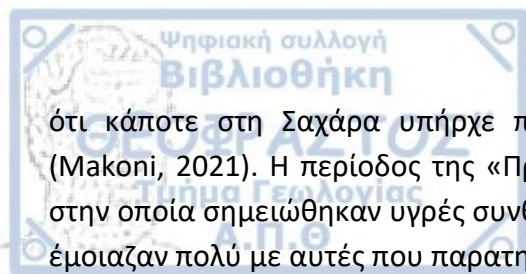
Όσον αφορά στην ατμοσφαιρική κυκλοφορία, σφοδροί άνεμοι με ταχύτητα περίπου 100 χιλιομέτρων την ώρα σημειώνονται σε ορισμένες ερήμους. Λόγω της έλλειψης φυτών ή της παρουσίας χαμηλής βλάστησης, ο άνεμος μπορεί να μεταφέρει άμμο και σκόνη σε μεγάλες αποστάσεις (υποκεφάλαιο 1.2.2.2).

Η παρουσία νερού στις ερήμους παίζει σημαντικό ρόλο στην εμφάνιση ακραίων κλιματικών φαινομένων. Σε περιπτώσεις καταιγίδων, το νερό ρέει μεταφέροντας άμμο, πέτρες και οποιοδήποτε άλλο χαλαρό υλικό, και μπορεί να προκαλέσει μία στιγμιαία πλημμύρα. Οι πλημμύρες στις ερημικές περιοχές ενδέχεται να είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες για τους πληθυσμούς που διανέμουν σε αυτές (Boudreau et al., 2023).

### 1.1.4 Κλιματική αλλαγή στις ερημικές περιοχές

Όπως αναφέρεται παραπάνω, οι περιοχές που σήμερα είναι έρημοι δεν ήταν πάντα τόσο ξηρές. Περίπου πριν από 8.000-11.000 χρόνια, για παράδειγμα, η Σαχάρα είχε πολύ πιο ήπιο και υγρό κλίμα (deMenocal and Tierney, 2012). Οι κλιματολόγοι χαρακτηρίζουν αυτή την περίοδο ως την «Πράσινη Σαχάρα». Τα αρχαιολογικά στοιχεία των οικισμών του παρελθόντος είναι άφθονα στη μέση των άγονων, μη παραγωγικών περιοχών της Σαχάρας σήμερα. Απολιθώματα και τεχνουργήματα δείχνουν





ότι κάποτε στη Σαχάρα υπήρχε πλούσια βιοποικιλότητα και κατοικούσαν νομάδες ανθρώπων (Makoni, 2021). Η περίοδος της «Πράσινης Σαχάρα» δεν ήταν η μοναδική στιγμή στην ιστορία της στην οποία σημειώθηκαν υγρές συνθήκες. Οι συγκεκριμένες περιόδους εναλλάσσονταν από ξηρές που έμοιαζαν πολύ με αυτές που παρατηρούνται σήμερα (Skonieczny et al., 2019).

Η Σαχάρα δεν είναι η μόνη έρημος με δραματικές κλιματικές αλλαγές. Ο ποταμός Ghaggar, στη σημερινή Ινδία και το Πακιστάν, ήταν μια σημαντική πηγή νερού και μια αστική περιοχή του αρχαίου πολιτισμού της κοιλάδας του Ινδού. Με την πάροδο του χρόνου, ο Ghaggar άλλαξε πορεία και τώρα ρέει μόνο κατά την περίοδο των βροχερών μουσώνων. Η περιοχή αυτή αποτελεί σήμερα μέρος των αχανών ερήμων Ταρ και Χολιστάν (Durcan et al., 2019).

Η άνοδος της θερμοκρασίας λόγω της κλιματικής αλλαγής μπορεί να έχει τεράστιες επιπτώσεις στα εύθραυστα οικοσυστήματα της ερήμου (Bombi et al., 2021). Η κλιματική αλλαγή είναι ένα φαινόμενο το οποίο επιταχύνουν ιδιαίτερα οι ανθρώπινες δραστηριότητες σε όλον τον πλανήτη (NASA Earth Observatory, 2019). Η άνοδος της θερμοκρασίας μεταβάλλει τις ερήμους σε ευάλωτα οικοσυστήματα (Broom, 2022) συμβάλλοντας στην απώλεια αζώτου, ενός σημαντικού θρεπτικού συστατικού, από το έδαφος. Η θερμότητα εμποδίζει τους μικροοργανισμούς να μετατρέψουν τα υπάρχοντα θρεπτικά συστατικά σε νιτρικά άλατα, τα οποία είναι απαραίτητα για όλα σχεδόν τα έμβια όντα. Ως αποτέλεσμα, ενδέχεται να μειωθεί η ήδη περιορισμένη βιοποικιλότητα των ερήμων (NSF, 2009).

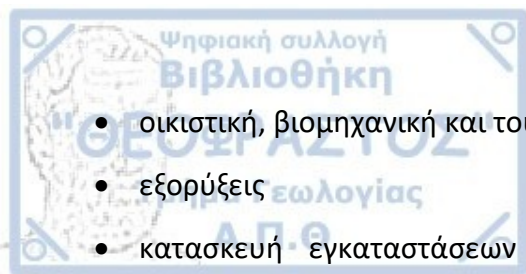
Επιπλέον, η κλιματική αλλαγή επηρεάζει τη συχνότητα εμφάνισης των βροχοπτώσεων. Η υπερθέρμανση του πλανήτη θα οδηγήσει σε περισσότερες βροχοπτώσεις σε ορισμένες περιοχές του πλανήτη και σε λιγότερες βροχοπτώσεις σε άλλες (Hausfather, 2018a). Οι περιοχές που αντιμετωπίζουν μειωμένες βροχοπτώσεις περιλαμβάνουν τις μεγαλύτερες ερήμους στον κόσμο: Β. Αφρική (Σαχάρα), ΝΔ Αμερική (Sonoran και Chihuahuan), Ν. Άνδεις (Παταγονία) και Δ. Αυστραλία (Μεγάλη Βικτώρια).

Ως αποτέλεσμα των μεταβαλλόμενων κλιματικών συνθηκών, οι περιοχές που τείνουν να γίνουν έρημοι αυξάνονται (Broom, 2022). Η ερημοποίηση μπορεί να αποδοθεί σε ένα συνδυασμό φυσικών και ανθρωπογενών παραγόντων, άμεσων ή έμμεσων.

**Φυσικά και ανθρωπογενή έμμεσα γενεσιουργά αίτια (drivers, driving forces)** ορίζονται ως εκείνοι οι παράγοντες που προκαλούν και οδηγούν στα άμεσα αίτια (direct causes) της ερημοποίησης.

Τα **άμεσα αίτια (direct causes)** της ερημοποίησης αφορούν ανθρώπινες δραστηριότητες που συνδέονται με κοινωνικο-οικονομικές διεργασίες που, ενεργοποιώντας φυσικές διεργασίες, οδηγούν σε ερημοποίηση. Αυτές οι δραστηριότητες περιλαμβάνουν:

- εντατικοποιημένη/βιομηχανοποιημένη γεωργία και κτηνοτροφία υπερεκμετάλλευση υδατικών πόρων
  - αποψίλωση δασών
  - δασικές πυρκαγιές
- στράγγιση/πλήρωση υδροβιοτόπων



- οικιστική, βιομηχανική και τουριστική ανάπτυξη
- εξορύξεις γεωλογίας
- κατασκευή εγκαταστάσεων και δικτύων υποδομών (χερσαίων, θαλάσσιων, εναέριων μεταφορών, ενέργειας, τουρισμού/αναψυχής, κ.λπ.)

Τα **έμμεσα ή γενεσιουργά αίτια (drivers, indirect/driving forces)** αφορούν αλληλένδετους φυσικούς, οικονομικούς, κοινωνικο-πολιτιστικούς και θεσμικούς παράγοντες που επηρεάζουν τις επιλογές των ανθρώπινων δραστηριοτήτων και των πρακτικών διαχείρισης πόρων που μπορεί να οδηγήσουν σε ερημοποίηση (Σχήμα 1.4). Σημαντικά ανάμεσα τους είναι:

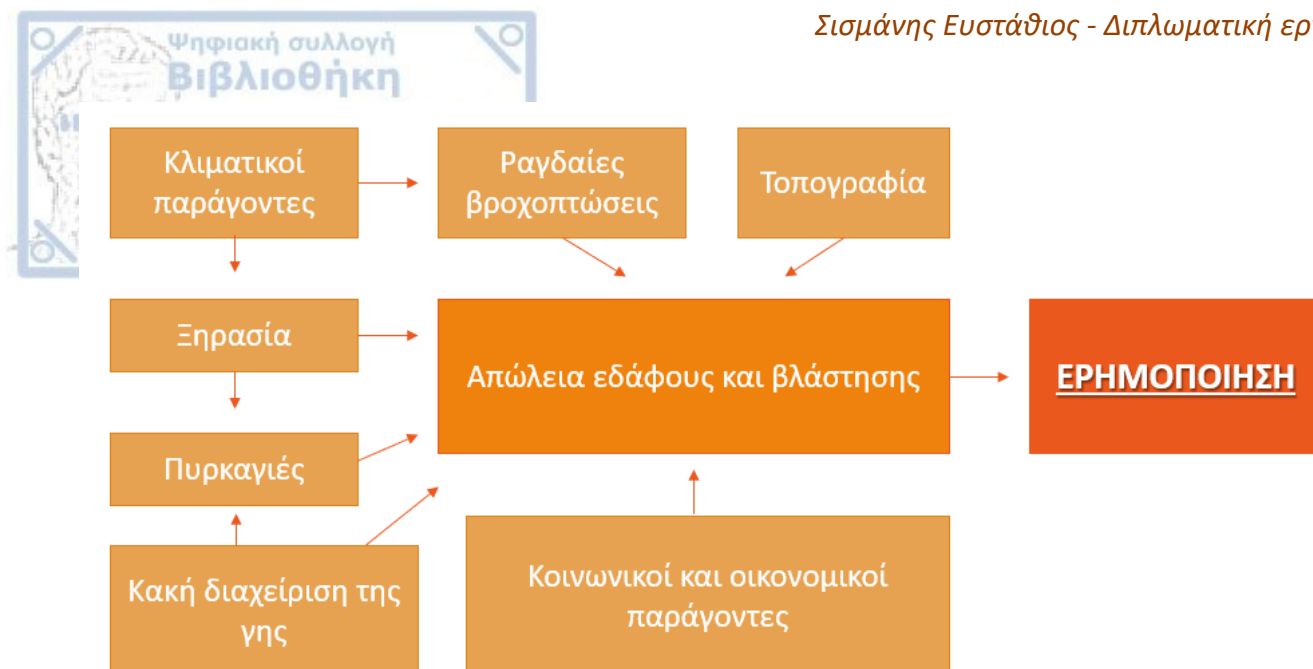
#### Φυσικά αίτια

- Κλιματικές συνθήκες και μεταβολές (διακυμάνσεις θερμοκρασίας και βροχόπτωσης, ακραία καιρικά φαινόμενα, εποχιακές ξηρασίες)
- Γεωλογική δομή
- Τύπος εδάφους (φυσικο-χημικά, βιολογικά χαρακτηριστικά, βάθος)
- Ανάγλυφο εδάφους (κλίσεις)
- Υδατικοί πόροι (διαθεσιμότητα και ποιότητα)
- Φυτοκάλυψη (είδος, πυκνότητα, κατανομή)
- Γεωγραφική θέση (νησιωτικές περιοχές, ορεινές περιοχές, ...)

#### Ανθρωπογενή αίτια

- Πληθυσμιακά χαρακτηριστικά
- Οικονομική δομή
- Κοινωνική δομή
- Ιδιοκτησιακό καθεστώς γης και πόρων
- Τεχνολογικές συνθήκες
- Νομοθετικό πλαίσιο προστασίας έγγειων πόρων και διοικητική διάρθρωση.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα ερημοποίησης αποτελεί η περιοχή όπου εντοπίζεται η λίμνη Τσαντ στην Αφρική. Η έκταση της λίμνης έφτανε το 1963 τα 25.000 km<sup>3</sup> ενώ σήμερα καλύπτει μόνο το 1/10 της έκτασης αυτής στα 500 km<sup>3</sup> (Sally Ride EarthKAM, 2023). Από την κοιλότητα της λίμνης που αποξηράθηκε απελευθερώνονται πλέον σημαντικά ποσά σκόνης (Pan et al., 2021).



Σχήμα 1.4: Τα κυριότερα αίτια ερημοποίησης (πηγή: Dasarxeio.com, 2015).

Οι ξηρότερες συνθήκες, η μειωμένη φυτοκάλυψη και οι αυξημένες ταχύτητες ανέμου μπορούν να ενισχύσουν την κινητοποίηση των σωματιδίων σκόνης, οδηγώντας σε συχνότερες και σοβαρότερες καταιγίδες σκόνης. Η κλιματική αλλαγή μπορεί να συμβάλει στην εντατικοποίηση των καταιγίδων σκόνης στις ερήμους (Corpernicus, 2022).

Παρόλα αυτά, και η ίδια η σκόνη μπορεί να αλληλοεπιδράσει με τις κλιματικές διεργασίες και να συμβάλει στους μηχανισμούς ανατροφοδότησης της κλιματικής αλλαγής. Η εναπόθεση σκόνης στις επιφάνειες της γης, του πάγου και του χιονιού μπορεί να μεταβάλει την λευκαύγεια τους. Η σκόνη μειώνει την λευκαύγεια του χιονιού και πάγου με αποτέλεσμα την αύξηση της απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας, την αύξηση της θερμοκρασίας και το περαιτέρω λιώσιμο των πάγων (Goelles and Bøggild, 2015).

## 1.2 Ατμοσφαιρική ρύπανση και ερημική σκόνη

### 1.2.1 Ατμοσφαιρική ρύπανση

Ατμοσφαιρική ρύπανση καλείται η παρουσία στην ατμόσφαιρα στοιχείων, ακτινοβολίας ή άλλων μορφών ενέργειας σε ποσότητα, συγκέντρωση ή διάρκεια μεγαλύτερη από τη φυσιολογική, η οποία μπορεί να φέρει αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία του πληθυσμού αλλά και ολόκληρων οικοσυστημάτων βραχυπρόθεσμα ή και μακροπρόθεσμα (National Geographic, 2022). Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι οφείλονται σε φυσικά ή ανθρωπογενή αίτια και προέρχονται από ποικίλες πηγές. Οι παράγοντες που συμβάλλουν περισσότερο στην ατμοσφαιρική ρύπανση είναι οι βιομηχανικές δραστηριότητες, οι μεταφορές, η γεωργία, η παραγωγή ενέργειας και η διάθεση αποβλήτων.

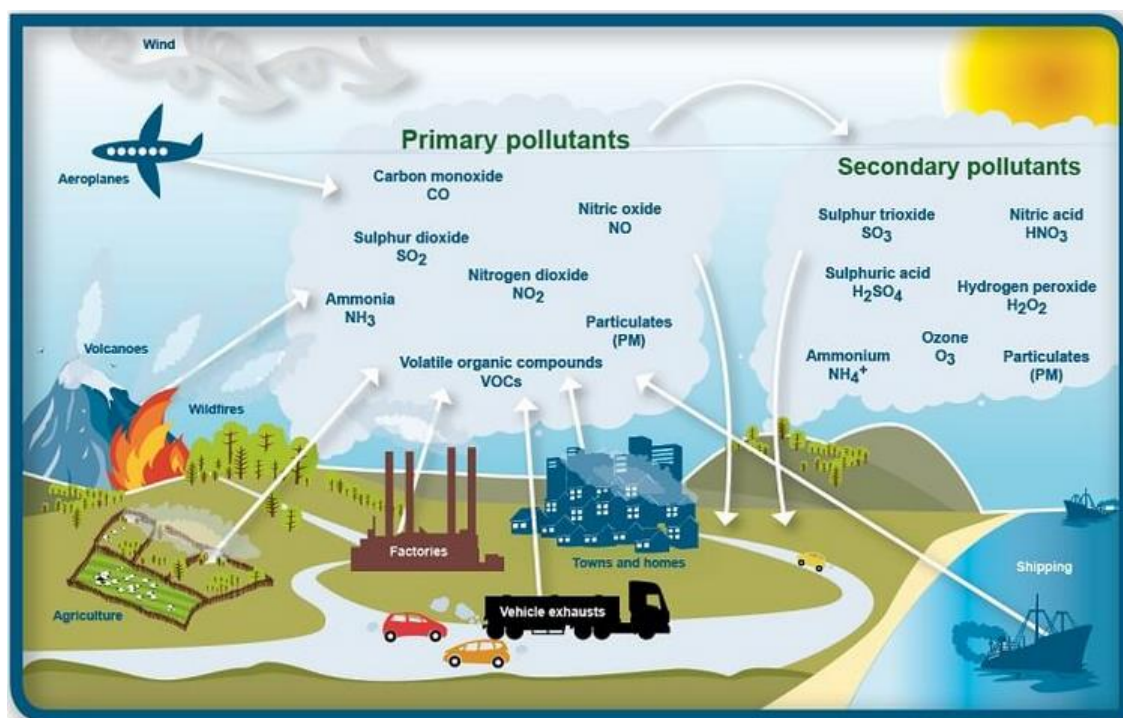
Οι κύριοι ατμοσφαιρικοί ρύποι οι οποίοι χαρακτηρίζουν την ποιότητα του αέρα είναι το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), τα οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>), το διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>), το όζον (O<sub>3</sub>), τα αιωρούμενα σωματίδια (PM<sub>x</sub>) και ο μόλυβδος (Pb) (Nathanson, 2018). Κάθε ένας από αυτούς θεωρείται ιδιαίτερα επικίνδυνος για την υγεία σε περίπτωση που η συγκέντρωσή του ξεπεράσει κάποια θεσμοθετημένα από εθνικούς και παγκόσμιους οργανισμούς όρια.

Ο Πίνακας 1.3 παρουσιάζει τις πηγές προέλευσης και τις σημαντικότερες επιπτώσεις των κύριων ατμοσφαιρικών ρύπων στην υγεία του πληθυσμού και στο περιβάλλον.

Πίνακας 1.3: Πηγές προέλευσης και επιπτώσεις κύριων ατμοσφαιρικών ρύπων (πηγή: Nathanson, 2018).

| Ατμοσφαιρικός ρύπος | Κύριες πηγές προέλευσης                                                        | Επιπτώσεις στην υγεία                                                               | Επιπτώσεις στο περιβάλλον                                                   |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| CO                  | Οχήματα, πυρκαγιές, βιομηχανική δραστηριότητα                                  | Επιδείνωση συμπτωμάτων που σχετίζονται με καρδιακές παθήσεις, προβλήματα στην όραση | Συμβολή στο σχηματισμό αιθαλομίχλης                                         |
| NO <sub>x</sub>     | Οχήματα, παραγωγή ενέργειας, βιομηχανική δραστηριότητα                         | Προβλήματα του αναπνευστικού συστήματος                                             | Καταστροφή φυλλωμάτων, συμβολή στο σχηματισμό αιθαλομίχλης                  |
| SO <sub>2</sub>     | Παραγωγή ενέργειας, καύση ορυκτών καυσίμων, βιομηχανική δραστηριότητα, οχήματα | Προβλήματα του αναπνευστικού συστήματος                                             | Συμβολή στο σχηματισμό χαλαζιού, όξινης βροχής και ατμοσφαιρικών σωματιδίων |
| O <sub>3</sub>      | Αντιδράσεις άλλων ρύπων                                                        | Προβλήματα του αναπνευστικού συστήματος                                             | Προβλήματα στις φυσικές διεργασίες των φυτών                                |

| PM <sub>x</sub> | Πυρκαγιές,<br>κατασκευές,<br>αντιδράσεις άλλων<br>ρύπων                   | Προβλήματα του<br>αναπνευστικού και<br>του καρδιακού<br>συστήματος | Συμβολή στο σχηματισμό<br>χαλαζιού και όξινης<br>βροχής |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Pb              | Καύση απορριμμάτων,<br>καύση ορυκτών<br>καυσίμων,<br>επεξεργασία μετάλλων | Προβλήματα σε<br>ποικίλα συστήματα<br>του οργανισμού               | Καταστροφή της<br>βιοποικιλότητας                       |



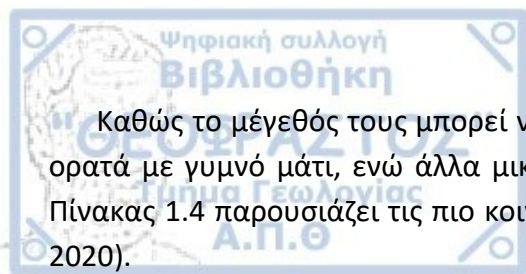
Σχήμα 1.5: Πηγές προέλευσης κύριων ατμοσφαιρικών ρύπων (πηγή: Global Weather and Climate Center, 2020).

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, το ενδιαφέρον στρέφεται στα αιωρούμενα σωματίδια και πιο συγκεκριμένα στη σκόνη που προέρχεται από τις ερημικές περιοχές και μεταφέρεται σε όλο τον πλανήτη. Λεπτομερής περιγραφή για τα χαρακτηριστικά, τις πηγές και τις επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων δίνεται στις επόμενες ενότητες.

#### 1.2.1.1 Αιωρούμενα σωματίδια

Τα αιωρούμενα σωματίδια είναι στερεά ή υγρά αιωρήματα που βρίσκονται διασκορπισμένα στην ατμόσφαιρα και έχουν διάμετρο μεγαλύτερη από 2 nm και μικρότερη από 200 μm (Λαζαρίδης, 2010). Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες αιωρούμενων σωματιδίων με βάση το μέγεθος τους, τα λεπτόκοκκα και τα χονδρόκοκκα. Τα λεπτόκοκκα σωματίδια (PM<sub>2.5</sub>, fine particles) έχουν διάμετρο μικρότερη από 2.5 μm και μπορούν εύκολα να εισβάλουν στον ανθρώπινο οργανισμό μέσω της αναπνοής, ενώ τα χονδρόκοκκα (PM<sub>10</sub>, coarse particles) έχουν διάμετρο μεγαλύτερη από 2.5 μm και μικρότερη από 10 μm (EPA, 2018a).





Καθώς το μέγεθός τους μπορεί να διαφέρει, ορισμένα μεγαλύτερα αιωρούμενα σωματίδια είναι ορατά με γυμνό μάτι, ενώ άλλα μικρότερα γίνονται αντιληπτά μόνο με τη χρήση μικροσκοπίου. Ο Πίνακας 1.4 παρουσιάζει τις πιο κοινές μορφές αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα (Smith, 2020).

Πίνακας 1.4: Οι πιο κοινές μορφές  $PM_x$  (πηγή: Smith, 2020).

| Μορφές $PM_x$  | Σύντομη περιγραφή                                                                                                                                                 |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Σκόνη          | Μικροσκοπικά σωματίδια που αποτελούνται από γύρη, βακτήρια, καπνό, θαλάσσιους κρυστάλλους, χώμα, άμμο, και είναι ορατά με γυμνό μάτι (National Geographic, 2023). |
| Βακτήρια       | Μικροσκοπικοί μονοκύτταροι οργανισμοί που ζουν στα περισσότερα οικοσυστήματα της Γης κι έχουν διάμετρο περίπου 0,5 $\mu m$ (Rogers and Kadner, 2018).             |
| Καπνός         | Σωματίδια που προέρχονται από ατελή καύση κυρίως άνθρακα ή άλλων καυσίμων, σε ικανή συγκέντρωση ώστε να είναι ορατά (Science Learning Hub, 2009).                 |
| Σπόροι μούχλας | Μικροσκοπικοί σπόροι που δεν είναι ορατοί με γυμνό μάτι, δημιουργούνται από μούχλα και μεταφέρονται στην ατμόσφαιρα (EPA, 2019).                                  |

Τα αιωρούμενα σωματίδια κατατάσσονται σε πρωτογενή, τα οποία εκπέμπονται απ' ευθείας στην ατμόσφαιρα και σε δευτερογενή τα οποία δημιουργούνται στην ατμόσφαιρα με διαδικασίες μετατροπής αερίων σε σωματίδια όπως είναι για παράδειγμα η συμπύκνωση υδρατμών, η εξάτμιση ατμών, η συσσωμάτωση με άλλα σωματίδια, χημικές αντιδράσεις και η δημιουργία ομίχλης ή νεφοσταγονιδίων (Myhre et al., 2013).

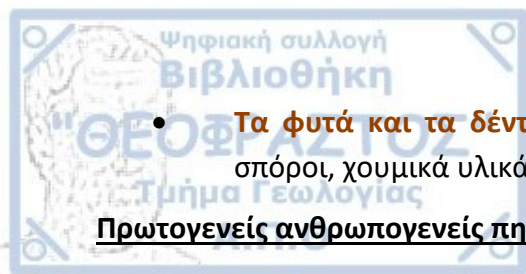
#### 1.2.1.1.1 Πηγές αιωρούμενων σωματιδίων

Οι πρωτογενείς πηγές μπορούν, επίσης, να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες, τις φυσικές και τις ανθρωπογενείς (Meersens, 2022; ΕΕΑ, 2012).

##### Πρωτογενείς φυσικές πηγές

- **Έδαφος:** σκόνη από το έδαφος μεταφέρεται με της τυρβώδους ροής του ανέμου από ερημικές περιοχές του πλανήτη, ημίξηρα όρια ερήμων, αποξηραμένες λίμνες, περιοχές με ελάχιστη βλάστηση και από διαταραγμένες από την ανθρώπινη δραστηριότητα περιοχές.
- **Ηφαίστεια:** τα ηφαιστειακά αιωρούμενα σωματίδια εκπέμπονται σε τεράστιες ποσότητες στην τροπόσφαιρα σε παγκόσμια κλίμακα.
- **Πυρκαγιές:** οι ανεξέλεγκτες φωτιές στα δάση και σε μεγάλες εκτάσεις εκλύουν μεγάλες ποσότητες ρύπων με μορφή καπνού, άκαυστων υδρογονανθράκων και ιπτάμενης τέφρας.
- **Οι ωκεανοί και οι θάλασσες:** τα θαλάσσια άλατα τα οποία εκλύονται στην ατμόσφαιρα λόγω της αλληλεπίδρασης του ανέμου με την επιφάνεια της θάλασσας.





- **Τα φυτά και τα δέντρα:** σωματίδια οργανικής ύλης όπως τα βακτήρια, η γύρη, οι σπόροι, χουμικά υλικά.

#### Πρωτογενείς ανθρωπογενείς πηγές

- **Βιομηχανική δραστηριότητα:** Οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις, όπως εργοστάσια, κατασκευαστικά έργα και εκμεταλλεύσεις ορυκτών πόρων, μπορούν να εκπέμπουν αιωρούμενα σωματίδια στην ατμόσφαιρα. Αυτά τα σωματίδια προέρχονται από την καύση καυσίμων, την επεξεργασία υλικών και άλλες βιομηχανικές διεργασίες.
- **Αγροτικές δραστηριότητες:** Οι αγροτικές δραστηριότητες, όπως η καλλιέργεια εδαφών και οι εκτροφές ζώων, όταν συνδέονται με τη χρήση αγροχημικών προϊόντων και την καύση βιομάζας έχουν σαν αποτέλεσμα την εκπομπή σωματιδίων στην ατμόσφαιρα.
- **Οικιακή καύση και μεταφορές:** Οι μεταφορές, η καύση γαιανθράκων από οικιακές συσκευές (τζάκια, σόμπες, ψησταριές, καυστήρες) και η καύση στερεών αποβλήτων αποτελούν δραστηριότητες που παράγουν πρωτογενή αιωρούμενα σωματίδια

#### Δευτερογενείς φυσικές πηγές

Σημαντικές δευτερογενείς φυσικές πηγές είναι τα θειικά άλατα από βιογενή αέρια, τα θειικά άλατα από ηφαιστειακό SO<sub>2</sub>, οργανική ύλη από βιογενή VOC και νιτρικά άλατα από NO<sub>x</sub>.

#### Δευτερογενείς ανθρωπογενείς πηγές

Δευτερογενή ανθρωπογενή είναι η δημιουργία στην ατμόσφαιρα θεικών αλάτων από το εκπεμπόμενο SO<sub>2</sub>, καύσεις βιομάζας, δημιουργία νιτρικών αλάτων από NO<sub>x</sub> και οργανικών ενώσεων VOC.

##### 1.2.1.1.2 Συμβολή αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμοσφαιρική ρύπανση

Τα αιωρούμενα σωματίδια συμβάλλουν σε σημαντικό βαθμό στην ατμοσφαιρική ρύπανση, φέροντας ποικίλες αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία αλλά και το περιβάλλον (Πίνακας 1.3). Ορισμένα παραδείγματα των μη θεμιτών επιπτώσεων τους αναφέρονται παρακάτω.

- **Ανθρώπινη υγεία:** Λόγω του μεγέθους τους, ένα μεγάλο ποσοστό αιωρούμενων σωματιδίων μπορεί εύκολα να εισχωρήσει στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα μέσω της αναπνοής και να προκαλέσει ή να επιδεινώσει αναπνευστικά προβλήματα και αλλεργίες (Kyung and Jeong, 2020). Ακόμα, ενισχύουν την πιθανότητα εμφάνισης καρδιαγγειακών ασθενειών (Hamanaka and Mutlu, 2018).
- **Περιβαλλοντικές επιπτώσεις:** Τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να επηρεάσουν την ποιότητα του εδάφους, των υδάτων και των οικοσυστημάτων. Επιπλέον, συμβάλλουν στην ακόμα μεγαλύτερη όξυνση των υδάτων και των εδαφών, επηρεάζοντας την αγροτική παραγωγή και τη βιοποικιλότητα (Das et al., 2021).
- **Ορατότητα:** Η υψηλή συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα μπορεί να μειώσει την ορατότητα και να προκαλέσει θολότητα (CA.gov, 2023).
- **Κλίμα:** Ορισμένα αιωρούμενα σωματίδια, όπως ο μαύρος άνθρακας, μπορούν να επηρεάσουν το κλίμα απορροφώντας την ηλιακή ακτινοβολία και αυξάνοντας την θερμοκρασία της ατμόσφαιρας (EPA, 2018b).

### 1.2.2 Ερημική σκόνη

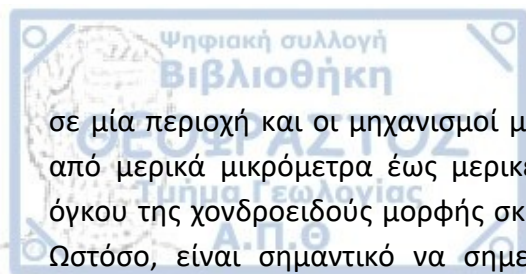
Τις κυριότερες πηγές αιωρούμενων σωματιδίων συνιστούν οι έρημοι του εντοπίζονται σε όλο τον πλανήτη, στις οποίες αποδίδεται το 35% των πρωτογενών εκπομπών σωματιδίων (ΤΕΕ, 2008). Η σκόνη είναι ο πιο άφθονος τύπος ατμοσφαιρικών σωματιδίων στην ατμόσφαιρα και παράγεται κυρίως με φυσικό τρόπο πάνω από ερημικά και ημίξηρα περιβάλλοντα (Cakmur et al., 2006). Η σκόνη της ερήμου, επίσης γνωστή ως άμμος της ερήμου ή ορυκτή σκόνη, αναφέρεται σε λεπτά σωματίδια άμμου και άλλων ορυκτών (διάμετρος μικρότερη από 20  $\mu\text{m}$ ) που ανυψώνονται στην ατμόσφαιρα από ερημικές περιοχές μέσω της διάβρωσης από τον άνεμο. Η ορυκτή σκόνη αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα αιωρήματα της ατμόσφαιρας, με εκπομπές περίπου 2150 Tg (Tg: 1 εκατομμύρια τόνοι) ετησίως (Chen et al., 2011).

Η έρημος της Σαχάρα στην Αφρική και η έρημος Γκόμπι στην Α. Ασία είναι οι δύο κύριες παγκόσμιες πηγές που τροφοδοτούν με σκόνη την ατμόσφαιρα. Η μεγαλύτερη πηγή σκόνης παγκοσμίως θεωρείται η Έρημος Σαχάρα, με 100 εκατομμύρια τόνους σκόνης να μεταφέρονται από την περιοχή μέσω του ανέμου σε όλον τον πλανήτη (NASA Earth Observatory, 2022). Συγκεκριμένα, το μεγαλύτερο φορτίο σκόνης προέρχεται από την ερημική περιοχή Σάχελ, η οποία γειτνιάζει με την έρημο Σαχάρα και συχνά θεωρείται μεταβατική ζώνη μεταξύ της Σαχάρας και των πιο πράσινων περιοχών της Αφρικής (Cockerton et al., 2014; Encyclopedia Britannica, 2018). Ενώ το Σάχελ μοιάζεται κάποιες ομοιότητες με τη Σαχάρα όσον αφορά στην ξηρότητα και το ημίξηρο κλίμα, δεν αποτελεί μέρος της ίδιας της ερήμου Σαχάρα. Χαρακτηρίζεται από ένα ημίξηρο κλίμα, με ένα μείγμα λιβαδιών, σαβάνες και αραιή βλάστηση, και βιώνει περισσότερες βροχοπτώσεις σε σύγκριση με τη Σαχάρα. Το Σάχελ εκτείνεται σε διάφορες χώρες, όπως η Μαυριτανία, το Μάλι, ο Νίγηρας, η Μπουρκίνα Φάσο, η Σενεγάλη, το Τσαντ, το Σουδάν και η Ερυθραία. Στην περιοχή αυτή εντοπίζεται η μεγαλύτερη πηγή σκόνης στον κόσμο, η κοιλότητα Bodélé στο Τσαντ, η οποία βρίσκεται μεταξύ της λίμνης Τσαντ και της Σαχάρα, των βουνών Tibesti και Ennedi. Από την κοιλότητα απελευθερώνονται 400-700 εκατομμύρια τόνοι σκόνης το χρόνο (BodEx 2005, 2023). Η δεύτερη περιοχή αυξημένης παράγωγης σκόνης βρίσκεται στη Δ. Σαχάρα που περιλαμβάνει τμήματα της Μαυριτανίας, του Μάλι και της Αλγερίας. Αυτές οι δύο περιοχές δέχονται πολύ χαμηλές ετήσιες βροχοπτώσεις (100-200 mm) και η παραγωγή της σκόνης οφείλεται κυρίως σε φυσικά αίτια λόγω της μοναδικής γεωμορφολογίας και του κλίματος (Goudie και Middleton, 2001).

Όταν οι καιρικές συνθήκες ευνοούν την αιώρηση ανόργανων υλικών στην ατμόσφαιρα, η σκόνη ανέρχεται στην ελεύθερη τροπόσφαιρα μέσω της οποίας μπορεί και μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις λόγω της γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας. Άνεμοι με ταχύτητες περίπου 100 χιλιομέτρων την ώρα (60 μίλια την ώρα) σαρώνουν ορισμένες ερήμους. Με ελάχιστη βλάστηση να τον εμποδίζει, ο άνεμος μπορεί να μεταφέρει άμμο και σκόνη πάνω από ολόκληρες ηπείρους, ακόμη και σε ωκεανούς. Οι εκπομπές της Σαχάρα επηρεάζουν το συνολικό φόρτο αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας της Αφρικής, του Ατλαντικού ωκεανού, της νότιας Αμερικής, της ανατολικής ακτής των Η.Π.Α. και της Ευρώπης (Boudreau et al., 2023).

#### 1.2.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Η διάμετρος των σωματιδίων σκόνης της ερήμου μπορεί να ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό με βάση ποικίλους παράγοντες, όπως η πηγή προέλευσής τους, οι ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν



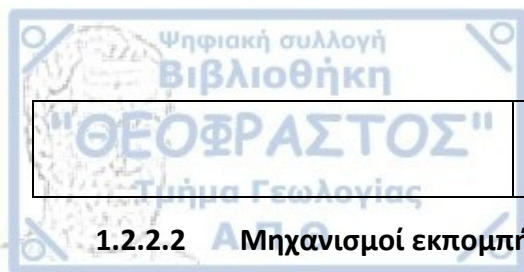
σε μία περιοχή και οι μηχανισμοί μεταφοράς της σκόνης. Η διάμετρος των σωματιδίων κυμαίνεται από μερικά μικρόμετρα έως μερικές δεκάδες μικρόμετρα. Ειδικότερα, η διάμεση διάμετρος του όγκου της χονδροειδούς μορφής σκόνης κυμαίνεται μεταξύ 5,8  $\mu\text{m}$  και 45,3  $\mu\text{m}$  (Ryder et al., 2013). Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι υπάρχει ευρεία κατανομή μεγέθους και ορισμένα σωματίδια σκόνης μπορεί να αποκλίνουν από το τυπικό εύρος που αναφέρεται παραπάνω. Καθώς τα σωματίδια σκόνης απομακρύνονται από την περιοχή προέλευσης τους, το μέσο μέγεθος τους μειώνεται δραματικά. Η κατανομή του μεγέθους τους μπορεί να επηρεάσει τη μεταφορά τους και τον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρούν με την ατμόσφαιρα.

Το σχήμα των σωματιδίων σκόνης επηρεάζει το ρυθμό απόθεσης και μπορεί να αυξηθεί ταχύτητα καθώς τα σωματίδια αποκλίνουν από το αρχικό σφαιρικό σχήμα που διέθεταν (Cheng et al., 1988). Τα επίπεδα σωματίδια σκόνης τείνουν να έχουν μεγαλύτερη ατμοσφαιρική διάρκεια ζωής και να ταξιδεύουν σε μεγαλύτερες αποστάσεις σε σύγκριση με σωματίδια σκόνης σφαιρικού σχήματος (Knippertz, 2014). Το μέγεθος των σωματιδίων σκόνης επηρεάζει σημαντικά τη διαδικασία της ξηρής εναπόθεσης σκόνης, η οποία με τη σειρά της, επηρεάζει την κατανομή των μεγεθών των σωματιδίων σκόνης κατά τη μεταφορά. Τα λεπτά σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 2,5  $\mu\text{m}$  μπορούν να ταξιδέψουν σε μεγάλες αποστάσεις, ακόμη και μεταξύ ηπείρων, ενώ τα περισσότερα χονδροειδή σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη από 10  $\mu\text{m}$  εναποτίθενται σχετικά κοντά στην περιοχή προέλευσής τους μέσα σε λίγες ώρες ή λεπτά μετά την αρχική ανύψωση στην ατμόσφαιρα.

Η σκόνη της ερήμου αποτελείται από ένα μείγμα ποικίλων σωματιδίων που ανυψώνονται στον αέρα και μεταφέρονται με τον άνεμο από ξηρές ή ημίξηρες περιοχές. Η σύνθεση της σκόνης μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με τη συγκεκριμένη τοποθεσία και τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής προέλευσης (Falkovich et al., 2001). Ο Πίνακας 1.5 παρουσιάζει τα κύρια συστατικά των σωματιδίων σκόνης.

Πίνακας 1.5: Κύρια συστατικά σωματιδίων σκόνης (πηγή: Falkovich et al., 2001).

| Συστατικά              | Σύντομη περιγραφή                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ορυκτά σωματίδια       | Τα κυρίαρχα συστατικά της ερημικής σκόνης. Αποτελούνται κυρίως από ορυκτά όπως χαλαζίας, άστριοι, αργιλικά ορυκτά και μαρμαρυγίας. Το διοξειδίο του πυριτίου είναι ένα κοινό συστατικό της σκόνης, που υπάρχει με τη μορφή κρυσταλλικού διοξειδίου του πυριτίου (π.χ. χαλαζία), ενώ το κοκκινωπό χρώμα οφείλεται στα σιδηρούχα συστατικά της. |
| Οργανική ύλη           | Η ερημική σκόνη μπορεί να περιέχει οργανική ύλη, η οποία προέρχεται από φυτικά υλικά, μικροβιακές ή ανθρωπογενείς δραστηριότητες.                                                                                                                                                                                                             |
| Άλατα                  | Σωματίδια αλατιού, συμπεριλαμβανομένου χλωριούχου νατρίου και άλλων αλάτων, μπορεί να υπάρχουν στη σκόνη, ιδίως σε περιοχές με αλατούχα εδάφη ή αλυκές.                                                                                                                                                                                       |
| Ιχνοστοιχεία και ρύποι | Η σκόνη της ερήμου μπορεί να μεταφέρει ιχνοστοιχεία και ρύπους που προέρχονται από βιομηχανικές δραστηριότητες και εργασίες εξόρυξης. Τα σωματίδια της σκόνης εμπλουτίζονται με                                                                                                                                                               |



Θεϊκά στοιχεία όταν μεταφέρονται πάνω από περιοχές με σημαντική ατμοσφαιρική ρύπανση.

### 1.2.2.2 Μηχανισμοί εκπομπής σκόνης

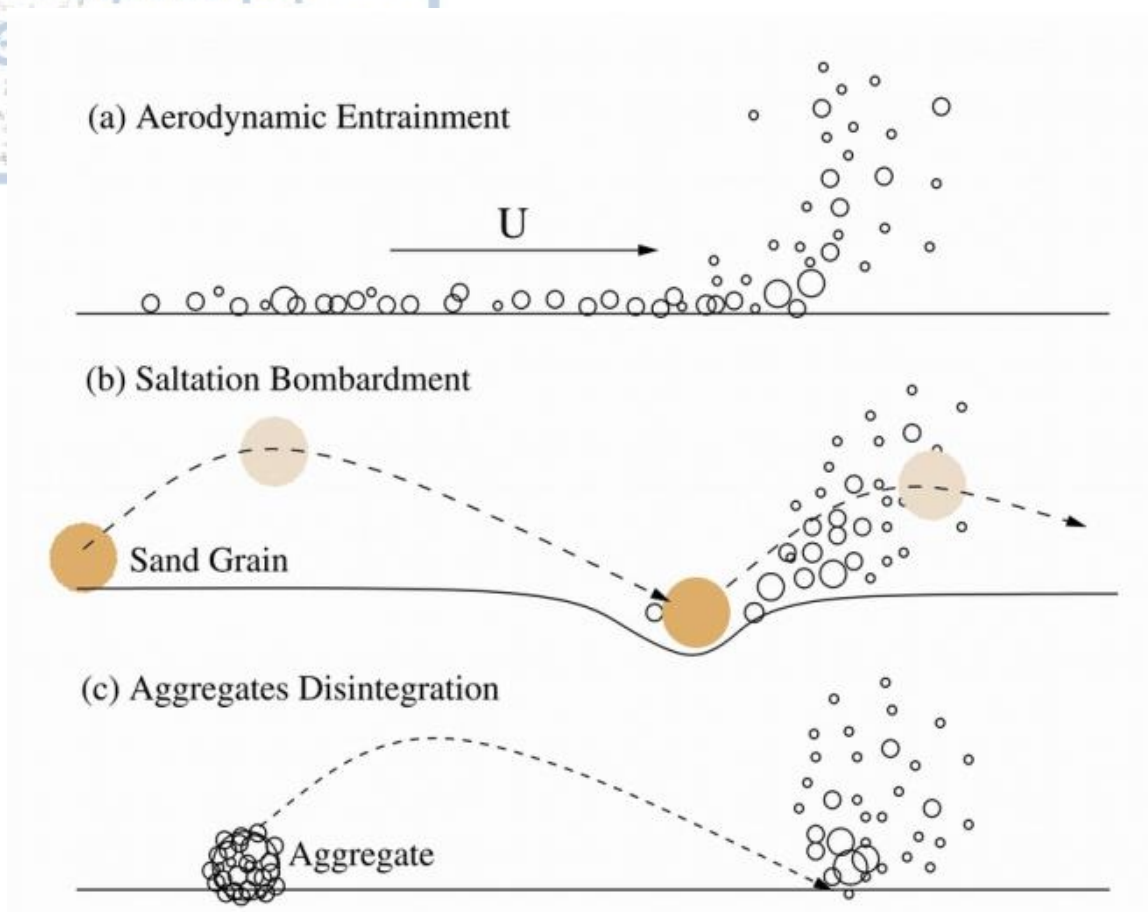
Οι βασικοί μηχανισμοί που μπορούν να σηκώσουν τη σκόνη από το έδαφος μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις διαφορετικές διαδικασίες (Shao et al., 2011): την άμεση παρασύρση των σωματιδίων σκόνης από τον άνεμο, την αναπήδηση και τον διαχωρισμό, με τους δύο τελευταίους να αποτελούν τους κυρίαρχους μηχανισμούς που ξεκινούν και αναπτύσσουν τα μεγάλα έντονα γεγονότα σκόνης που παρατηρούμε στην ατμόσφαιρα.

Θεωρητικά, τα σωματίδια σκόνης όλων των μεγεθών μπορούν να ανασηκωθούν αεροδυναμικά από την επιφάνεια με τη δύναμη της ταχύτητας του ανέμου που τα επηρεάζει, αν και στην πραγματικότητα η διαδικασία αυτή σπάνια συμβαίνει για σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη από 60  $\mu\text{m}$ .

Η αναπήδηση (αμμοβολή), ή αλλιώς βομβαρδισμός χαρακτηρίζεται η αναπηδούσα κίνηση των σωματιδίων σκόνης από το έδαφος με μέγεθος που κυμαίνεται μεταξύ 60  $\mu\text{m}$  και 100  $\mu\text{m}$ , κατά την διάρκεια της διάβρωσης (Shao, 2009). Τα μεγαλύτερα σε μέγεθος σωματίδια ακολουθούν μια έρπουσα κίνηση στο έδαφος, ενώ τα μικρότερα απομακρύνονται με κατακόρυφη κίνηση από το έδαφος και συνεχίζουν μια βαλλιστική τροχιά προς αυτό (Shao, 2009; Kok and Renno, 2009). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, κατά την πρόσκρουση τους να διασπώνται σε μικρότερα σωματίδια (<60 $\mu\text{m}$ ), ενώ σωματίδια που διατηρούν το αρχικό τους μέγεθος (60-100  $\mu\text{m}$ ) επαναλαμβάνουν την ίδια διαδικασία. Οι διεργασίες της αναπήδησης χωρίζονται σε τέσσερα στάδια (Anderson and Haff, 1991; Kok and Renno, 2009; Kok et al., 2012):

1. Η αεροδυναμική ανύψωση των σωματιδίων σκόνης
2. οι τροχιές των σωματιδίων
3. η πρόσκρουση των σωματιδίων στην επιφάνεια
4. η τροποποίηση του πεδίου του ανέμου στο στρώμα αναπήδησης λόγω της αντίστασης των σωματιδίων.

Ένας παρόμοιος μηχανισμός, που ονομάζεται διαχωρισμός, λαμβάνει χώρα με τους μικρότερους κόκκους σκόνης που συσσωρεύονται μετά την διαδικασία της αναπήδησης (Σχήμα 1.6γ). Σε αυτή την περίπτωση τα συσσωρευμένα σωματίδια κατά τη στιγμή της πρόσκρουσης διασπώνται μόνα του σε επιμέρους συσσωρευμένους κόκκους σκόνης ακολουθώντας στην συνέχεια μια πορεία προς την ατμόσφαιρα.



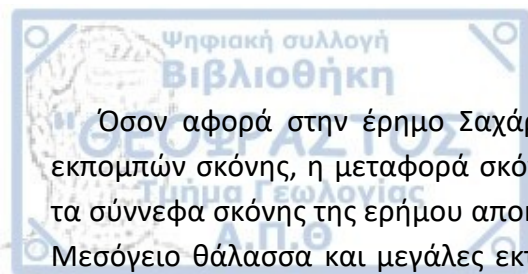
Σχήμα 1.6 Μηχανισμοί εκπομπής σκόνης (πηγή: Shao et al., 2011)

### 1.2.2.3 Μεταφορά σκόνης

Από τον 17<sup>ο</sup> αιώνα και μετά, οι επιστήμονες ασχολήθηκαν με το φαινόμενο της παγκόσμιας μεταφοράς σκόνης στην ατμόσφαιρα. Μετά από εκτεταμένες συζητήσεις, στα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα, κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η εκπομπή σκόνης στην ατμόσφαιρα οφείλεται στους ισχυρούς ανέμους που πνέουν πάνω από ξηρές και αμμώδεις περιοχές. Κατά τις καιρικές συνθήκες που ευνοούν τη μεταφορά σκόνης στην ατμόσφαιρα, αυτή ανεβαίνει στην ελεύθερη τροπόσφαιρα και μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις με τη βοήθεια της γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας (Griffin et al., 2001).

Σύνηθες φαινόμενο κατά τη μεταφορά σκόνης σε μεγάλη κλίμακα αποτελεί το γεγονός πως τα μεγαλύτερα σωματίδια δεν καταφέρνουν να ταξιδέψουν μακρινές αποστάσεις λόγω της βαρύτητας. Μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό σκόνης είναι τόσο έχει τόσο μικρό μέγεθος ώστε να παραμένει σχεδόν πάντα αιωρούμενο στον αέρα. Τα σωματίδια με τόσο μικρό μέγεθος μπορούν να καλύψουν σημαντικές αποστάσεις λόγω του ανέμου, καθιστώντας τον εντοπισμό της πηγής προέλευσής τους ιδιαίτερα δύσκολη. Η χρονική διάρκεια της εναίωρής της σκόνης, καθώς και η απόσταση την οποία διανύει εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την υγρασία της ατμόσφαιρας και τη διαθεσιμότητα της σε βροχή. Αναγνωρίζεται πως η κίνηση της αιωρούμενης σκόνης συνδέεται στενά με τον κύκλο του νερού. Ο χρόνος παραμονής του νερού στην ατμόσφαιρα επηρεάζει την συγκέντρωση της σκόνης. Σε περιοχές με μικρό χρόνο παραμονής του νερού, παρατηρούνται αντίστοιχα μικρές τιμές συγκέντρωσης σκόνης λόγω της υγρής εναπόθεσης (υποκεφάλαιο 1.2.2.4).





Όσον αφορά στην έρημο Σαχάρα, που όπως αναφέρεται παραπάνω είναι και η κύρια πηγή εκπομπών σκόνης, η μεταφορά σκόνης λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια ισχυρών καταιγίδων, όταν τα σύννεφα σκόνης της ερήμου αποκτούν σχήμα γιγαντιαίων «φτερών» που καλύπτουν σε έκταση τη Μεσόγειο θάλασσα και μεγάλες εκτάσεις δυτικά της Αφρικής. Τα σύννεφα αυτά είναι δυνατόν να εντοπιστούν σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 1000 km από την πηγή προέλευσής τους. Η σκόνη της Σαχάρα μεταφέρεται συνήθως κατά μήκος τριών διευθύνσεων:

1. **Προς τα δυτικά πάνω από τον Β. Ατλαντικό Ωκεανό:** Εμφανίζεται κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού όταν ξεσπούν θερμικές καταιγίδες με έντονα ανοδικά ρεύματα στη Δ. Αφρική, και του εκτεταμένου αντικυκλώνα των Αζορών (Carlson and Prospero, 1972).
2. **Προς τα βόρεια πάνω από τη Μεσόγειο Θάλασσα:** Τα σωματίδια σκόνης μεταφέρονται από τη Ν. Αλγερία και τη Δ. Σαχάρα-Ν. Μαρόκο προς τη Δ. Ευρώπη μέσω υγρής εναπόθεσης (Molinarioli, 1996). Η σκόνη που φθάνει στη Δ. Ευρώπη ακολουθεί μία μεγάλη διαδρομή κατά την οποία τα σωματίδια μεταφέρονται δυτικά προς τον Ατλαντικό, ακολουθούμενα από μία βόρεια και μία ανατολική ροή ανέμου. Η μεταφορά της σκόνης στην περίπτωση αυτή είναι αποτέλεσμα των χαμηλών πιέσεων στις Βαlearίδες νήσους.
3. **Των ανατολικών τροχιών πάνω από την Κ.-Α. Μεσόγειο:** Μεταφορά της σκόνης την άνοιξη εξαιτίας των κυκλώνων Sharav που κινούνται προς τα ανατολικά κατά μήκος της Β. Αφρικής, και το καλοκαίρι όταν οι υψηλές πιέσεις πάνω από τη Λιβύη εμποδίζουν την ανατολική διάδοση των κυκλώνων και η μεταφορά εντοπίζεται στην Κ. Μεσόγειο (Kubilay et al., 2003).

Ομοίως, και η έρημος Γκόμπι, η οποία βρίσκεται στη Β. Κίνα και τη Ν. Μογγολία, είναι γνωστή για τη σημαντική συμβολή της στις εκπομπές σκόνης. Οι επικρατούντες άνεμοι στην περιοχή της ερήμου Γκόμπι, όπως οι δυτικοί άνεμοι και οι άνεμοι των μουσώνων, παίζουν καθοριστικό ρόλο στη μεταφορά της σκόνης. Η μεταφορά της σκόνης από την έρημο Γκόμπι μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο σε μικρές (Β. Κίνα, Μογγολία και τμήματα της Α. Ρωσίας) όσο και σε μεγάλες αποστάσεις. Η μεταφορά της ερημικής σκόνης από την έρημο Γκόμπι παρουσιάζει εποχιακή μεταβλητότητα. Κατά τη διάρκεια της άνοιξης, ισχυροί άνεμοι που συνδέονται με καταιγίδες σκόνης, γνωστές ως «καταιγίδες σκόνης» ή «κίτρινες καταιγίδες σκόνης», μπορούν να μεταφέρουν τεράστιες ποσότητες σωματιδίων σκόνης από την έρημο Γκόμπι προς την Α. Ασία, συμπεριλαμβανομένης της Κορέας και της Ιαπωνίας (BBC, 2023).

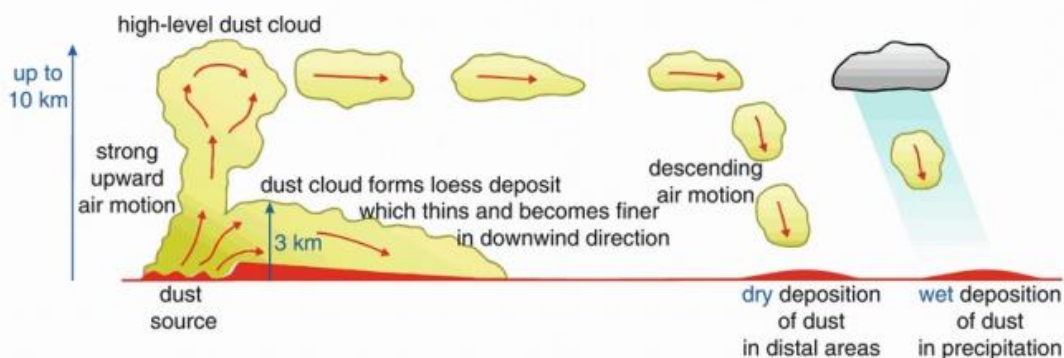
#### 1.2.2.4 Ξηρή και υγρή εναπόθεση σκόνης

Η εναπόθεση των σωματιδίων της σκόνης πραγματοποιείται με δύο μηχανισμούς: εναπόθεση τους απευθείας στην επιφάνεια του εδάφους (ξηρή εναπόθεση) ή ενσωμάτωσή τους σε σταγονίδια νεφών κατά τη δημιουργία κατακρημνίσεων (υγρή εναπόθεση).

Η **ξηρή εναπόθεση** είναι η μεταφορά αέριων και σωματιδιακών στοιχείων από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια του εδάφους χωρίς να υπάρχει κατακρήμνιση. Η ξηρή εναπόθεση, συνδέεται κυρίως με το βάρος των σωματιδίων σκόνης και τις διαδικασίες βαρυτικής καθίζησης, της τυρβώδους ανάμιξης και της διάχυσης κατά Brown (Foret et al., 2006). Η ξηρή εναπόθεση κυριαρχεί κυρίως στα χονδρόκοκκα σωματίδια και λαμβάνει χώρα κοντά στην έρημο. Καθώς τα σωματίδια μεταφέρονται, χάνουν την ανοδική τους ορμή και κατακάθονται σε ποικίλες επιφάνειες. Η ξηρή εναπόθεση

επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως το μέγεθος και η πυκνότητα των σωματιδίων σκόνης, η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου και τα χαρακτηριστικά των επιφανειών υποδοχής (Seinfeld and Pandis, 1998). Τα μεγαλύτερα και πυκνότερα σωματίδια καθιζάνουν ταχύτερα σε σύγκριση με τα μικρότερα και ελαφρύτερα σωματίδια. Οι επιφάνειες με τραχιά υφή ή ηλεκτροστατικά φορτία μπορούν να ενισχύσουν την απόθεση σωματιδίων σκόνης, ενώ οι φυσικές επιφάνειες, όπως επιφάνειες με βλάστηση συνήθως ευνοούν την ξηρή εναπόθεση (Seinfeld and Pandis, 1998). Η ξηρή εναπόθεση σκόνης μπορεί να συμβάλει στη συσσώρευση σκόνης στις επιφάνειες, οδηγώντας σε μείωση της ορατότητας, ρύπανση των υποδομών και υποβάθμιση της ποιότητας του αέρα. Έχει την ικανότητα, επίσης, να επηρεάσει τα οικοσυστήματα με την εναπόθεση θρεπτικών ουσιών ή ατμοσφαιρικών ρύπων στη βλάστηση και το έδαφος, επηρεάζοντας τον κύκλο των θρεπτικών ουσιών και την παραγωγικότητα των φυτών.

Η **υγρή εναπόθεση** είναι η φυσική διαδικασία κατά την οποία ύλη αφαιρείται με τον υετό (βροχή, χιόνι, σταγόνες ομίχλης) από την ατμόσφαιρα και μεταφέρεται στην επιφάνεια της γης. Η υγρή εναπόθεση σχετίζεται είτε με τις διεργασίες εντός του νέφους, όπου τα σωματίδια σκόνης δρουν ως πυρήνες συμπύκνωσης (βροχόπτωση) είτε με διεργασίες όπου τα σωματίδια σκόνης βρίσκονται κάτω από ένα κατακρημνισμένο σύννεφο, όπως οι συγκρούσεις των σωματιδίων με τα σταγονίδια (Chate and Pranisha, 2004). Η ένταση της υγρής εναπόθεσης εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες, όπως το μέγεθος και η πυκνότητα των σωματιδίων, η ένταση και η διάρκεια της βροχόπτωσης και η αποτελεσματικότητα της δέσμευσης των σωματιδίων από τις σταγόνες ή τους παγοκρυστάλλους που πέφτουν. Η υγρή εναπόθεση της σκόνης κυριαρχεί κυρίως σε λεπτόκοκκα σωματίδια τα οποία μπορούν να μεταφερθούν σε μεγάλες αποστάσεις από την πηγή προέλευσης τους (Seinfeld and Pandis, 1998). Τα σωματίδια σκόνης που έχουν διανύσει μεγαλύτερες αποστάσεις είναι πιθανότερο να υποστούν υγρή εναπόθεση καθώς συναντούν συστήματα βροχόπτωσης. Ο τύπος του κατακρημνίσματος (βροχή, χιόνι, χαλάζι) και η έντασή του παίζουν ρόλο στην αποτελεσματικότητα της δέσμευσης και απομάκρυνσης των σωματιδίων σκόνης από την ατμόσφαιρα. Τα βαρύτερα ή πιο έντονα γεγονότα κατακρήμνισης είναι γενικά πιο αποτελεσματικά στην υγρή απόθεση σε σύγκριση με τα ελαφρύτερα κατακρημνίσματα. Συνεπώς, στην προσομοίωση της εναπόθεσης σκόνης που περιλαμβάνει τη μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις είναι σημαντικός ο ακριβής προσδιορισμός του χωροχρονικού πεδίου του κατακρημνίσματος. Η υγρή εναπόθεση παίζει καθοριστικό ρόλο στην ποιότητα της ατμόσφαιρας, απομακρύνοντας τα σωματίδια και τους ατμοσφαιρικούς ρύπους.



Σχήμα 1.7: Σχηματική αναπαράσταση των διεργασιών μεταφοράς και εναπόθεσης σκόνης (πηγή: Knippertz, 2014).

### 1.2.2.5 Επιδράσεις σκόνης στο κλίμα και το περιβάλλον

Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως η εκπομπή, η μεταφορά και η εναπόθεση της ερημικής σκόνης αποτελούν πολύπλοκες διεργασίες οι οποίες επηρεάζονται από ποικίλους παράγοντες. Η παρακολούθηση και η κατανόηση των συγκεκριμένων διεργασιών είναι απαραίτητες για την αξιολόγηση των επιπτώσεων της σκόνης σε τοπικό και παγκόσμιο επίπεδο. Η σκόνη στην ατμόσφαιρα έχει πολλαπλό ρόλο, επηρεάζοντας σημαντικά τον ενεργειακό προϋπολογισμό του πλανήτη και τη μεταφορά οργανικών υλικών στα ωκεάνια και χερσαία οικοσυστήματα, και συμβάλλοντας στον κύκλο του άνθρακα επηρεάζοντας την παραγωγικότητα του ωκεανού και της ατμόσφαιρας.

Τα σωματίδια σκόνης έχουν την δυνατότητα να σκεδάζουν/ανακλούν την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία και να απορροφούν/εκπέμπουν τη γήινη ακτινοβολία (Liao and Seinfeld, 1998). Η ψυκτική επίδραση της σκόνης μπορεί να είναι ίση με τη θερμαντική επίδραση των αερίων του θερμοκηπίου σε ορισμένες περιπτώσεις (Forster et al., 2007). Σε αντίθεση με τα αέρια του θερμοκηπίου τα οποία προκαλούν μόνο θέρμανση στον πλανήτη, τα ατμοσφαιρικά αιωρούμενα σωματίδια ανάλογα με τις ιδιότητες τους μπορούν να προκαλέσουν τόσο θέρμανση όσο και ψύξη της ατμόσφαιρας της Γης (Koren et al., 2005). Αυτή η σκέδαση και η απορρόφηση μπορούν να οδηγήσουν σε αλλαγές στο ενεργειακό ισοζύγιο της Γης.

Η παρουσία σκόνης επηρεάζει, ακόμα, έμμεσα το κλίμα όσον αφορά στην ατμοσφαιρική σταθερότητα, τα καιρικά πρότυπα και τον σχηματισμό νεφών. Τα σωματίδια σκόνης χρησιμεύουν ως πυρήνες συμπύκνωσης νεφών ή πυρήνες πάγου, παρέχοντας στους υδρατμούς επιφάνειες για να συμπυκνωθούν ή να παγώσουν. Η συγκεκριμένη αλληλεπίδραση ενδέχεται να επηρεάσει τις ιδιότητες των νεφών, όπως το μέγεθος των σταγονιδίων των νεφών, τη νεφοκάλυψη και τα πρότυπα βροχόπτωσης (Field et al., 2006).

Επιπλέον, τα σωματίδια σκόνης περιέχουν θρεπτικά συστατικά, όπως σίδηρο και φώσφορο, τα οποία μπορούν να μεταφερθούν σε μεγάλες αποστάσεις. Αυτή η συμπεριφορά οδηγεί σε αυξημένη εναπόθεση σκόνης στους ωκεανούς, γνωστή ως «ωκεάνια λίπανση», η οποία επιπλέον ενισχύει στην παραγωγή φυτοπλαγκτόν και την απορρόφηση του CO<sub>2</sub>. (Martin and Fitzwater, 1988).

Η παρουσία σκόνης στην ατμόσφαιρα μπορεί να έχει επιπτώσεις στην ποιότητα του αέρα και την ορατότητα σε πολλές περιοχές που επηρεάζονται. Τα σωματίδια αυτά μπορούν να μειώσουν την ορατότητα, κάτι που γίνεται εύκολα αντιληπτό από το ανθρώπινο μάτι και αποτελεί τον απλούστερο τρόπο να ανιχνευτεί η παρουσία αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα (Horváth et al., 2006).

## 1.3 Στόχος εργασίας

Στόχο της παρούσας εργασίας αποτελεί η μελέτη της μεταβολής των επιπέδων σκόνης κατά την χρονική περίοδο 2021-2100 σε συνάρτηση με τις κλιματολογικές αλλαγές που αναμένεται να λάβουν χώρα σύμφωνα με το σενάριο SSP3-7.0 των σεναρίων παγκόσμιων κοινωνικοοικονομικών αλλαγών (Shared Socioeconomic Pathways, SSPs). Στο επίκεντρο της εργασίας βρίσκονται ερημικές περιοχές της Αφρικής (έρημος Σαχάρα και Σάχελ) και της Ασίας (έρημος Τάκλα Μακάν, Γκόμπι, Καρακούμ, Ταρ και Λουτ), για τις οποίες αναλύεται η σχέση της θερμοκρασίας του αέρα, της βροχόπτωσης και της επιφανειακής ταχύτητας του αέρα με το φορτίο σκόνης, τις εκπομπές σκόνης, καθώς και την ξηρή

και υγρή εναπόθεση σκόνης. Για την καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων χρησιμοποιούνται οι προσομοιώσεις τεσσάρων κλιματικών μοντέλων του CMIP6. Συγκεκριμένα, μελετώνται τα UKESM1-0-LL, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G και GFDL-ESM4 με σκοπό την σύγκριση των αποτελεσμάτων τους. Στη συζήτηση στο τέλος της εργασίας παρουσιάζεται ο βαθμός συμφωνίας των κλιματικών μοντέλων και παρουσιάζεται κατά πόσο αυτά είναι ικανά να εκτιμήσουν με σαφήνεια τις μελλοντικές μεταβολές στα επίπεδα σκόνης εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΜΟΝΤΕΛΑ, ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

### 2.1 Μοντέλα

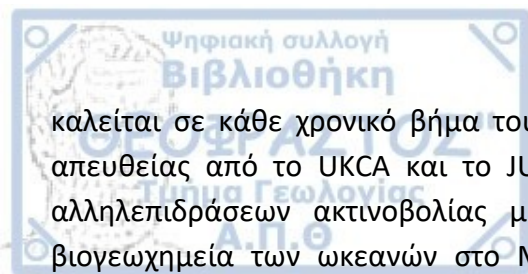
Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν προσομοιώσεις από τέσσερα Παγκόσμια Κλιματικά Μοντέλα (Global Climate Models - GCM) και, ειδικότερα, από τρία Μοντέλα Γήινων Συστημάτων (Earth System Models - ESMs) και ένα Χημικό Κλιματικό Μοντέλο (Chemistry Climate Model - CCM) που πραγματοποιήθηκαν στην έκτη φάση του CMIP6 της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Αλλαγή του Κλίματος (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) (Eyring et al., 2016). Τα κύρια χαρακτηριστικά των μοντέλων, τα οποία είναι τα UKESM1-0-LL, GFDL-ESM4, MRI-ESM2.0 και GISS-E2-1-G, συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.1), ενώ μία αναλυτική περιγραφή του καθενός παρέχεται στη συνέχεια (Zanis et al., 2022).

Πίνακας 2.1: Κύρια χαρακτηριστικά μοντέλων UKESM1-0-LL, MRI-ESM2-0, GISS-E2-1-G και GFDL-ESM4.

| Μοντέλο     | Ανάλυση (°)   | Τύπος Μοντέλου            | ID προσομοίωσης | Αναφορά Προσομοίωσης                                |
|-------------|---------------|---------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------|
| UKESM1-0-LL | 1,25 × 1,875  | ESM interactive chemistry | r1i1p1f2        | O'Connor 2020a, 2020b                               |
| MRI-ESM2.0  | 1,125 × 1,125 | ESM interactive chemistry | r1i1p1f1        | Yukimoto et al., 2019, 2020                         |
| GISS-E2-1-G | 2 × 2,5       | CCM interactive chemistry | r1i1p3f1        | NASA, 2020a, 2020b                                  |
| GFDL-ESM4   | 1 × 1,25      | ESM interactive chemistry | r1i1p1f1        | Dunne et al., 2020<br>Horowitz et al., 2018a, 2018b |

Το μοντέλο **UKESM1-0-LL** αποτελεί μία βελτιωμένη έκδοση του μοντέλου HadGEM2-ES που χρησιμοποιούνταν τα προηγούμενα χρόνια (Bellouin et al., 2011), με αναβαθμίσεις σε όλες τις συνιστώσες και τους μηχανισμούς ανάδρασης του. Το μοντέλο αναπτύχθηκε από κοινού από το [MetOffice UK](#) και το [Natural Environment Research Council \(NERC\)](#), και ο στόχος του είναι να παράγει κλιματικές προσομοιώσεις για το CMIP6 (Eyring et al., 2016). Το UKESM1-0-LL χρησιμοποιεί ως βάση το μοντέλο συζευγμένου κλίματος HadGEM3 GC3.1 (Kuhlbrodt et al., 2018; Williams et al., 2018), στο οποίο έχουν ενσωματωθεί τα ακόλουθα μοντέλα: α) **JULES** (Joint UK Land Environment Simulator; Best et al., 2011) για την επίγεια βιογεωχημεία με πληροφορίες για τη φυσιολογία των φυτών και τους λειτουργικούς τους τύπους, τη χρήση γης και την εισαγωγή του κύκλου του άνθρακα (C) και του αζώτου (N), β) **MEDUSA** (Model of Ecosystem Dynamics, nutrient Utilisation, Sequestration and Acidification; Yool et al., 2013) για την ωκεάνια βιογεωχημεία, και γ) **UKCA** (United Kingdom Chemistry and Aerosol model; Archibald et al., 2020), ένα συζευγμένο μοντέλο που δείχνει τη στενή σχέση μεταξύ της χημείας της ατμόσφαιρας και των αεροζόλ. Η μοντελοποίηση των ιδιοτήτων της βλάστησης και της επιφάνειας είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη σκόνη (Woodward et al., 2022). Η ορυκτή σκόνη προσομοιώνεται στο HadGEM 3 με ένα πλήρως διαδραστικό σχήμα σκόνης, το οποίο





καλείται σε κάθε χρονικό βήμα του ατμοσφαιρικού μοντέλου. Τα πεδία οδήγησης υπολογίζονται απευθείας από το UKCA και το JULES, και η σκόνη επηρεάζει το υπόλοιπο μοντέλο μέσω των αλληλεπιδράσεων ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρα του UKCA και μέσω της εισόδου στη βιογεωχημεία των ωκεανών στο MEDUSA. Στην τρέχουσα διαμόρφωση, η σκόνη αναμιγνύεται εξωτερικά με άλλα αερολύματα. Το «1-0» στην ονομασία υποδηλώνει την έκδοση του μοντέλου, ενώ το «LL» σημαίνει «χαμηλής ανάλυσης».

Το μοντέλο **MRI-ESM2.0** (Yukimoto et al., 2019; Oshima et al., 2020) αναπτύχθηκε από το [Ινστιτούτο Μετεωρολογικών Ερευνών \(MRI\)](#) στην Ιαπωνία, με βάση τα παλαιότερα μοντέλα MRI-ESM2.0 -CGCM3 και MRI-ESM2.0 -ESM1 του CMIP5. Περιλαμβάνει το μοντέλο ατμοσφαιρικής χημείας MRI-ESM2.0 Chemistry Climate έκδοση 2.1 (MRI-ESM2.0-CCM2.1), το οποίο υπολογίζει την εξέλιξη και κατανομή του όζοντος, καθώς και άλλων αερίων που βρίσκονται υπό μορφή ιχνοστοιχείων από τα κατώτερα έως τα μέσα επίπεδα της ατμόσφαιρας, και το μοντέλο αερολύματος Aerosol Species in the Global Atmosphere mark-2 revision 4-climate (MASINGAR mk-2r4c), το οποίο υπολογίζει τις φυσικές και χημικές διεργασίες (π.χ. εκπομπή, μεταφορά, διάχυση, χημικές αντιδράσεις και ξηρές και υγρές εναποθέσεις) των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων και λαμβάνει υπόψη τα ακόλουθα είδη: θειικά άλατα μη θαλάσσιου αλάτος, BC, οργανικός άνθρακας (OC), θαλάσσιο αλάτι, ορυκτή σκόνη και πρόδρομα αέρια αερολυμάτων (π.χ. διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>) και διμεθυλοσουλφίδιο (DMS)) (Oshima et al., 2020). Οι κατανομές μεγέθους του θαλασσινού αλάτος και της ορυκτής σκόνης χωρίζονται σε 10 διακριτές θέσεις. Το νέο μοντέλο έχει οριζόντια ανάλυση 100 km για τα ατμοσφαιρικά στοιχεία, ενώ τα ωκεάνια στοιχεία χαρακτηρίζονται από παρόμοια ανάλυση με τα προηγούμενα μοντέλα. Η κατακόρυφη ανάλυση του μοντέλου αποτελείται από 80 επίπεδα, και συνεπώς καθίσταται σαφώς βελτιωμένη συγκριτικά με τα 48 επίπεδα που διέθετε ο προκατόχος του.

Το μοντέλο **GISS-E2-1-G** είναι ένα σύγχρονο συζευγμένο κλιματικό μοντέλο που προσομοιώνει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ της ατμόσφαιρας, των ωκεανών, της επιφάνειας της ξηράς και των θαλάσσιων πάγων. Δημιουργήθηκε από το [Goddard Institute for Space Studies \(GISS-E2-1-G\)](#) για το CMIP6. Η ανάπτυξη της συγκεκριμένης έκδοσης του μοντέλου βασίστηκε στα μοντέλα GISS-E2-1-G-E2 του CMIP5 και χρησιμοποιεί τη φυσική έκδοση 3 (physics-version=3), σύμφωνα με την οποία η ατμοσφαιρική σύνθεση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το One-Moment Aerosol (OMA), ένα σχήμα αεροζόλ βασιζόμενο στη μάζα, και το ωκεάνιο μοντέλο GISS-E2-1-G Ocean. Στην έκδοση E2.1 της μονάδας αερολυμάτων OMA, η οποία ονομάζεται TCAD1, επεξεργάζεται η σκόνη, το θαλάσσιο αλάτι, τα θειικά, τα νιτρικά, το αμμώνιο και το ανθρακούχο αερόλυμα (μαύρος και οργανικός άνθρακας) (Kelley et al., 2020). Μία από τις ενημερώσεις της έκδοσης αυτής πραγματοποιήθηκε στην αναπαράσταση της σκόνης. Οι ιδιότητες της σκόνης ανακτώνται τώρα από την ενότητα σκόνης, αντί να ορίζονται ξεχωριστά στην ενότητα ετερογενούς χημείας. Αυτό αφορά τα όρια των έξι διακριτών ορίων της σκόνης (διάμετρος σωματιδίων 0,1-0,2, 0,2-0,5, 0,5-1, 1-2, 2-4 και 4-8 μm), τα οποία χρησιμοποιούνται για τις επιστρώσεις στα σωματίδια σκόνης, τις πυκνότητες των σωματιδίων σκόνης και τα βάρη που χρησιμοποιούνται για την κατανομή της συνολικής αργίλου. Διορθώθηκε ο υπολογισμός της συγκέντρωσης της σκόνης, ο οποίος σε προηγούμενες εκδόσεις του μοντέλου προκαλούσε υπερεκτίμηση. Οι αλλαγές αυτές έχουν ως αποτέλεσμα της καλύτερης προσομοίωσης των μαζών σκόνης πάνω σε περιοχές όπου οι συγκεντρώσεις είναι αυξημένες όπως η Β. Αφρική, η Μέση

Ανατολή και η Κ. Ασία. Η οριζόντια ανάλυση του μοντέλου είναι  $2^\circ \times 2,5^\circ$  γεωγραφικό πλάτος/μήκος, και η κατακόρυφη αποτελείται από 40 επίπεδα που εκτείνονται από την επιφάνεια της Γης έως το επίπεδο των 0,1 hPa στην Κατώτερη Μεσόσφαιρα.

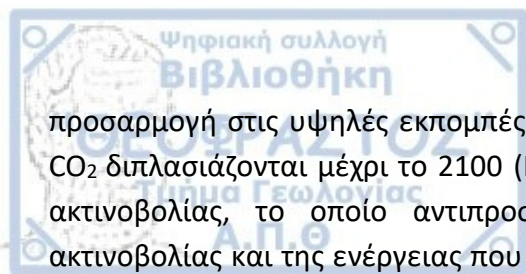
Το μοντέλο **GFDL-ESM4** (Dunne et al., 2020) περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά προσομοίωσης της έκδοσης 4.1 (ESM4.1) του [Geophysical Fluid Dynamics Laboratory \(GFDL-ESM4\)](#), η οποία βασίζεται στις αναβαθμίσεις των συνιστωσών και των συζευγμένων μοντέλων στο GFDL-ESM4 κατά την περίοδο 2013-2018, και αναπτύχθηκε στο CMIP6. Σε αντίθεση με την προσπάθεια ανάπτυξης της έκδοσης CM4.0 της GFDL-ESM4 που επικεντρώνεται στην ανάλυση των ωκεανών για το φυσικό κλίμα, το ESM4.1 εστιάζει στην αλληλεπίδραση των συστημάτων της Γης. Το ESM4.1 παρέχει αναβαθμίσεις στη δυναμική και φυσική της έκδοσης CM4.0, καθώς και στα αερολύματα και τις πρόδρομες εκπομπές τους, τη βλάστηση του χερσαίου οικοσυστήματος και τον ανταγωνισμό του, τις ωκεάνιες οικολογικές και βιογεωχημικές αλληλεπιδράσεις και την αξιοπιστία των συγκεντρώσεων CO<sub>2</sub>, της σκόνης και του διαδραστικού κύκλου αζώτου (N). Σε αντίθεση με την προηγούμενη έκδοση του μοντέλου κατά το οποίο οι εκπομπές σκόνης βασιζόταν στον επιφανειακό άνεμο πάνω από καθορισμένες πηγές, λαμβάνει πλέον υπόψη και το κλάσμα χιονιού, τον εδαφικό πάγο, την επιφανειακή απογύμνωση και την χρήση γης σε παγκόσμιο επίπεδο (Dunne et al., 2020). Η εκπεμπόμενη σκόνη κατανέμεται σε πέντε ατμοσφαιρικές κατηγορίες με βάση το μέγεθός τους, με κάθε κατηγορία να λαμβάνει ένα σταθερό ποσοστό (0,1-1 μm, 5%, 1-2 μm, 15%, 2-3 μm, 30%, 3-6 μm, 27% και 6-10 μm, 23%). Σε κάθε όριο ατμοσφαιρικής σκόνης υπολογίζεται η μεταφορά, η κατακόρυφη διάχυση και η βαρυτική καθίζηση. Το ESM4.1 διαθέτει διπλάσια οριζόντια ανάλυση τόσο στην ατμόσφαιρα ( $2^\circ$  έως  $1^\circ$ ) όσο και στον ωκεανό ( $1^\circ$  έως  $0,5^\circ$ ) συγκριτικά με τα μοντέλα χημείας ESM2 και CM3 της προηγούμενης γενιάς του GFDL-ESM4.

## 2.2 Δεδομένα

Για την αποτύπωση της γενικής παγκόσμιας κλιματολογίας, στα πλαίσια της εργασίας χρησιμοποιούνται μηνιαία δεδομένα α) **θερμοκρασίας** (σε βαθμούς Κελσίου ( $^\circ\text{C}$ )), β) **βροχόπτωσης** (σε χιλιοστά ανά χρόνο (mm/year)) και γ) **επιφανειακής έντασης του ανέμου** (σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m/s)).

Για την ανάλυση των επιπέδων σκόνης μελετώνται συνολικά τέσσερις παράμετροι: α) το **φορτίο σκόνης** (σε  $\text{g m}^{-2}$ ), β) οι **εκπομπές σκόνης** (σε  $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), γ) η **ξηρή εναπόθεση σκόνης** (σε  $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), και δ) η **υγρή εναπόθεση σκόνης** ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ).

Οι προσομοιώσεις κάθε μεταβλητής που παρουσιάζονται παρακάτω συνιστούν προϊόν των τεσσάρων GCM που χρησιμοποιούνται στην εργασία. Τέσσερις διαφορετικές προσομοιώσεις προβάλλονται για κάθε μεταβλητή, οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορετικές χρονικές περιόδους και αναφέρονται στις εκτιμήσεις που γίνονται για το σενάριο SSP3.7 του CMIP6. Το SSP3.7 αποτελεί ένα από τα SSPs, δηλαδή τα σενάρια των παγκόσμιων κοινωνικοοικονομικών αλλαγών που προβλέπονται έως το 2100, και χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή εκτιμήσεων για τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου που βασίζονται σε διαφορετικές κλιματικές πολιτικές (Riahi et al., 2017). Το SSP3 αντιπροσωπεύει μια μελλοντική πορεία που χαρακτηρίζεται από περιφερειακή αντιπαλότητα, μεγάλη αύξηση του πληθυσμού, άνιση ανάπτυξη και σχετικά αργή πρόοδο στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Αποτελεί ένα σενάριο υψηλής πρόκλησης για τον μετριασμό και την



προσαρμογή στις υψηλές εκπομπές θερμοκηπικών αερίων, σύμφωνα με το οποίο οι εκπομπές του CO<sub>2</sub> διπλασιάζονται μέχρι το 2100 (Hausfather, 2018b). Το «7» στο SSP3.7 αναφέρεται στο επίπεδο ακτινοβολίας, το οποίο αντιπροσωπεύει την ισορροπία μεταξύ της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας και της ενέργειας που παγιδεύεται στην ατμόσφαιρα της Γης. Σύμφωνα με το SSP3.70, η εξαναγκασμένη ακτινοβολία το έτος 2100 εκτιμάται στα περίπου 7 W m<sup>-2</sup>, είναι δηλαδή αρκετά υψηλότερη από την αντίστοιχη τιμή της κατά την προβιομηχανική εποχή (DKRZ, 2023). Το συγκεκριμένο σενάριο κατατάσσεται μεταξύ των χειρότερων σεναρίων του CMIP5, RCP6.0 και RCP8.5.

### 2.3 Μεθοδολογία

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται οι αλλαγές που αναμένεται να σημειωθούν με βάση τα τέσσερα προαναφερθέντα μοντέλα στις μελετώμενες παραμέτρους που σχετίζονται με το κλίμα και τα επίπεδα σκόνης σε παγκόσμια κλίμακα. Ειδικότερα, εξετάζονται οι επτά παράμετροι στις ακόλουθες τέσσερις περιόδους:

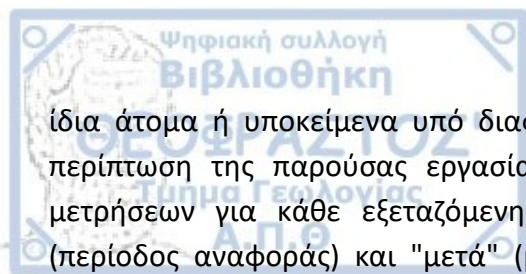
- Ιστορική περίοδος / περίοδος αναφοράς (1991-2010)
- Εγγύς μέλλον (2021-2040)
- Μεσοπρόθεσμη μελλοντική περίοδος (2041-2060)
- Μακροπρόθεσμη μελλοντική περίοδος (2081-2100)

Σε ένα πρώτο στάδιο της μελέτης πραγματοποιείται ο υπολογισμός των παγκόσμιων μέσων ετήσιων τιμών των παραμέτρων που σχετίζονται με το κλίμα και την σκόνη για την περίοδο 2015-2100. Στα σχήματα που προκύπτουν παρουσιάζονται οι πραγματικές τιμές από τις προσομοιώσεις των μοντέλων, καθώς και οι ομαλοποιημένες τάσεις μετά από την κανονικοποίηση των δεδομένων αυτών. Η διαδικασία αυτή επιλέχθηκε με σκοπό να αποφευχθεί ο θόρυβος μεταξύ των δεδομένων, χρησιμοποιώντας τις μέσες τιμές για την ελαχιστοποίηση των ακραίων.

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται οι μέσες ετήσιες παγκόσμιες ανωμαλίες για κάθε μια από τις επτά μελετούμενες παραμέτρους για την περίοδο 1991-2100. Για τον υπολογισμό των ανωμαλιών βρέθηκε η κλιματική τιμή κάθε παραμέτρου, ορίζοντας ως περίοδο αναφοράς την εικοσαετία 1991-2010, η οποία κατόπιν αφαιρέθηκε από κάθε μέση ετήσια παγκόσμια τιμή της περιόδου 2011-2100 αντίστοιχα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ραβδογραμμάτων που απεικονίζουν την χρονοσειρά των ανωμαλιών των τεσσάρων κλιματικών μοντέλων για το διάστημα 1991-2100..

Έπειτα, προβάλλονται οι μεταβολές για κάθε παράμετρο και για κάθε περίοδο ξεχωριστά και εξετάζονται οι διαφορές μεταξύ των τριών μελλοντικών περιόδων και της περιόδου αναφοράς. Οι αλλαγές υπολογίζονται σε ετήσια βάση για κάθε κελί πλέγματος για το σενάριο SSP3.70 και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με τη μορφή χαρτών.

Η στατιστική σημαντικότητα των διαφορών ελέγχεται, επίσης, λαμβάνοντας υπόψη το Paired sample two-sided t-test, σύμφωνα με το οποίο μία διαφορά θεωρείται στατιστικά σημαντική στο επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Το Paired sample two-sided t-test είναι ένα στατιστικό τεστ που χρησιμοποιείται για τη σύγκριση των μέσων όρων δύο συναφών συνόλων παρατηρήσεων ή μετρήσεων (JMP, 2023). Συνήθως εφαρμόζεται όταν οι δύο σειρές δεδομένων λαμβάνονται από τα



ίδια άτομα ή υποκείμενα υπό διαφορετικές συνθήκες ή σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας τα συζευγμένα δεδομένα αποτελούνται από δύο σύνολα μετρήσεων για κάθε εξεταζόμενη παράμετρο, που συχνά αναφέρονται ως μετρήσεις "πριν" (περίοδος αναφοράς) και "μετά" (μελλοντική περίοδος). Αφαιρέθηκε η μέτρηση "πριν" από την αντίστοιχη μέτρηση "μετά" για να βγει η τιμή της διαφοράς και πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης των διαφορών. Στην συνέχεια υπολογίστηκε το στατιστικό  $t$  που προκύπτει ως η μέση διαφορά διαιρούμενη με την τυπική απόκλιση των διαφορών, προσαρμοσμένη για το μέγεθος του δείγματος. Έπειτα πραγματοποιήθηκε η σύγκριση μεταξύ του στατιστικού  $t$  με την κρίσιμη τιμή με βάση το επιθυμητό επίπεδο σημαντικότητας. Τέλος υπολογίστηκε η τιμή  $p$ -value: Η τιμή  $p$  αντιπροσωπεύει την πιθανότητα να προκύψει μια στατιστική  $t$  τόσο ακραία όσο η παρατηρούμενη τιμή, υποθέτοντας ότι η μηδενική υπόθεση είναι αληθής. Εάν η τιμή  $p$  είναι μικρότερη από το επιλεγμένο επίπεδο σημαντικότητας ( $\alpha$ ), στο 95% (0.05), η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται, υποδεικνύοντας σημαντική διαφορά μεταξύ των μέσων όρων. Αντίθετα, εάν η τιμή  $p$  είναι μεγαλύτερη από  $\alpha$ , η μηδενική υπόθεση δεν απορρίπτεται, υποδηλώνοντας ότι δεν υπάρχει σημαντική διαφορά.

Στο υποκεφάλαιο 3.2 παρουσιάζονται οι πινάκες για τις μέσες εκτιμώμενες τιμές των παραμέτρων από τα μοντέλα UKESM1-0-LL1, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 στις ερήμους της Αφρικής (Δ. Σαχάρα, Α. Σαχάρα και Σάχελ) και της Ασίας (Τακλά Μακάν, Γκόμπι, Καρακούμ, Ταρ και Λουτ), για τις τρεις περιόδους μελέτης. Κάθε τιμή αντικατοπτρίζει τη μέση τιμή όλων των σημείων του πλέγματος της ερημικής περιοχής για μία ολόκληρη εικοσαετία. Η συγκεκριμένη διαδικασία πραγματοποιείται για να δοθεί μια γενική εικόνα ολόκληρης της ερήμου και όχι τα μέγιστα ή τα ελάχιστα που μπορεί να προκύπτουν σε να μικρό μέρος της περιοχής. Επίσης, με αυτόν τον τρόπο φαίνεται η συμπεριφορά της ερημικής περιοχής από την μια περίοδο στην άλλη και σε σχέση με την περίοδο αναφοράς.



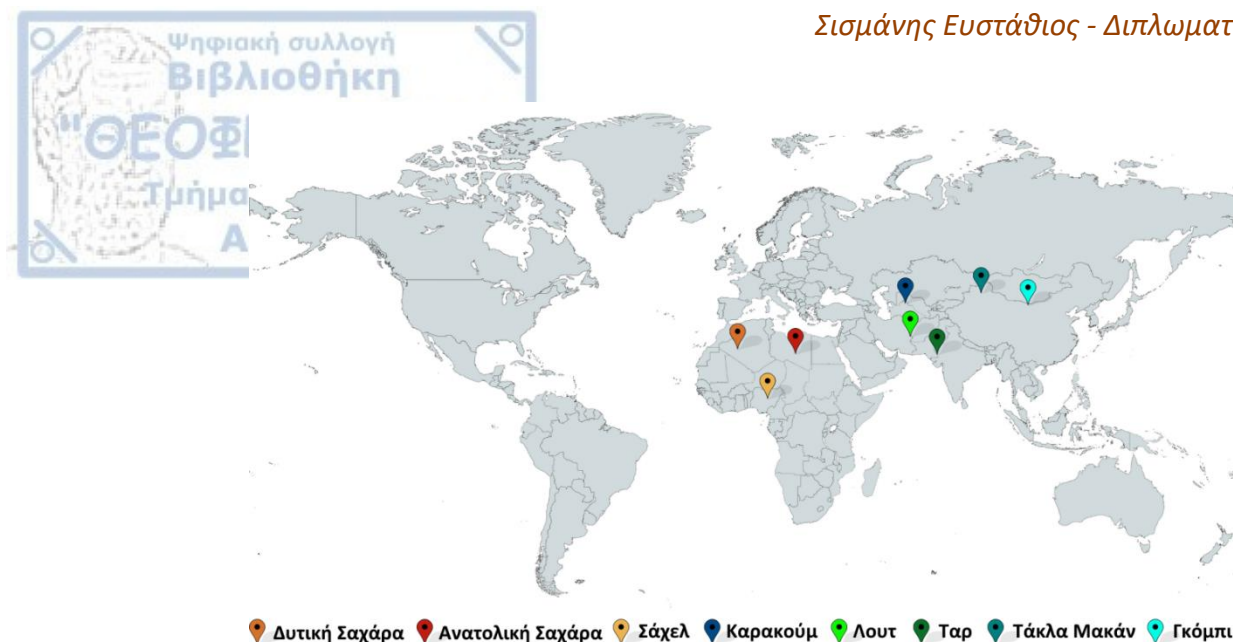
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 3.1 Μελλοντικές προβολές κλιματικών παραμέτρων και σκόνης σε παγκόσμιο επίπεδο

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εργασίας, και ειδικότερα τα αποτελέσματα που εξάγουν τα τέσσερα GCM μοντέλα για τις περιόδους μελέτης για τη θερμοκρασία του αέρα, τη βροχόπτωση, την ταχύτητα του επιφανειακού ανέμου, το φορτίο σκόνης, τις εκπομπές σκόνης, και την ξηρή και υγρή εναπόθεση σκόνης. Οι κυριότερες έρημοι πάνω στις οποίες επικεντρώνεται η εργασία είναι οι εξής (Σχήμα 3.1):

- **Δυτική Σαχάρα:** Περιλαμβάνει τις χώρες της Δυτικής Σαχάρας, του Μαρόκο, της Τυνησίας και το βόρειο τμήμα της Μαυριτανίας και του Μαλί. Εκτείνεται από 19,2 B έως 37 B και από 16,5 Δ έως 10,7 A.
- **Ανατολική Σαχάρα:** Περιλαμβάνει τις χώρες της Αιγύπτου, της Λιβύης, του Νίγηρα και του Σουδάν. Εκτείνεται από 19,2 B έως 32,6 B και από 10,7 A έως 36,5 A.
- **Σάχελ:** Περιλαμβάνει την βόρεια Σενεγάλη, τη νότια Μαυριτανία, το κεντρικό Μάλι, την βόρεια Μπουρκίνα Φάσο, τον κεντρικό Νίγηρα, την βόρεια Νιγηρία, το κεντρικό Τσαντ, το κεντρικό Σουδάν, μια μικρή έκταση στα βόρεια του Νότιου Σουδάν και καταλήγει στην βόρεια Ερυθραία στα παράλια της Ερυθράς Θάλασσας. Εκτείνεται από 11,8 B έως 19,2 B και από 15,9 Δ έως 40,7 A.
- **Έρημος Γκόμπι:** Καλύπτει τμήματα της βόρειας και βορειοδυτικής Κίνας και της νότιας Μογγολίας. Εκτείνεται από 38,8 B έως 46,6 B και από 95,5 A έως 116,1 A.
- **Έρημος Τάκλα Μακάν:** Είναι έρημος της Κεντρικής Ασίας, στην αυτόνομη Κινεζική επαρχία Σιντσιάνγκ. Εκτείνεται από 36,8 B έως 42,1 B και από 74,1 A έως 91,7A.
- **Έρημος Καρακούμ:** Είναι έρημος της κεντρική Ασίας και χωρίζεται μεταξύ του Καζακστάν, του Ουζμπεκιστάν και του Τουρκμενιστάν.. Εκτείνεται από 38,2 B έως 48,1 B και από 51,6 A έως 70,3 A.
- **Έρημος Λουτ:** Είναι μια μεγάλη έρημος αλατιού στην επαρχία του Κερμάν και Σιστάν Μπαλουχιστάν, στο Ιράν. Εκτείνεται από 26,7 B έως 31,8 B και από 53,4 A έως 59 A.
- **Έρημος Ταρ:** Είναι μία μεγάλη, άγονη περιοχή στο βορειοδυτικό τμήμα της ινδικής χερσονήσου και διατρέχει κατά μήκος των συνόρων μεταξύ Ινδίας και Πακιστάν. Εκτείνεται από 24,3 B έως 29,5 B και από 64,6 A έως 70 A.

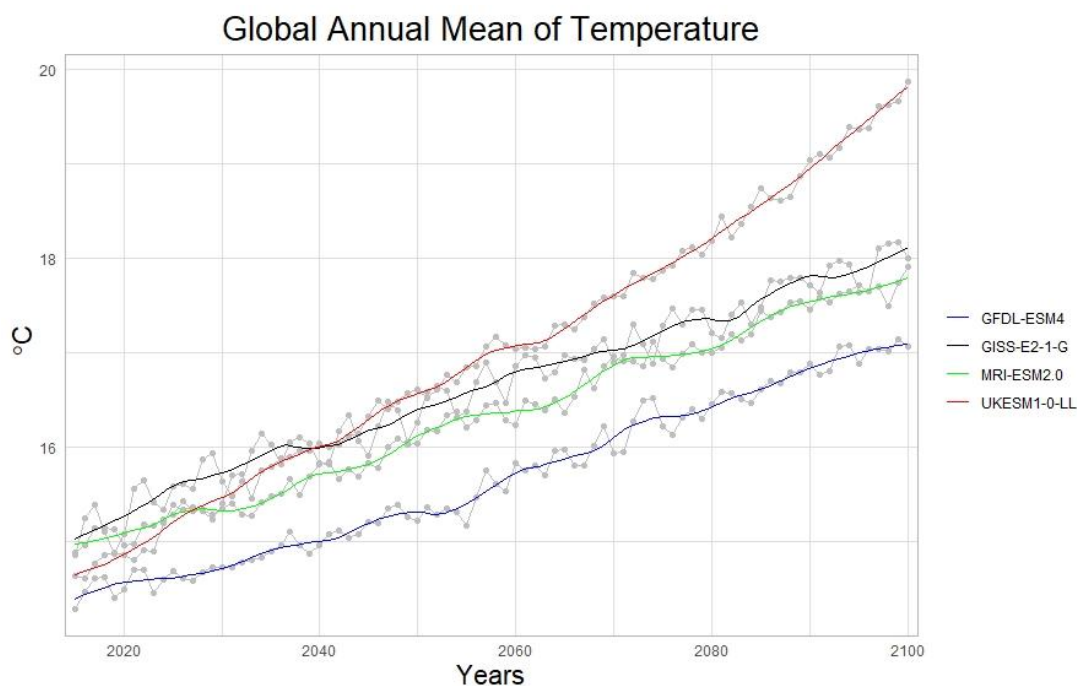




Σχήμα 3.1 Κυριότερες έρημοι παρούσας εργασίας

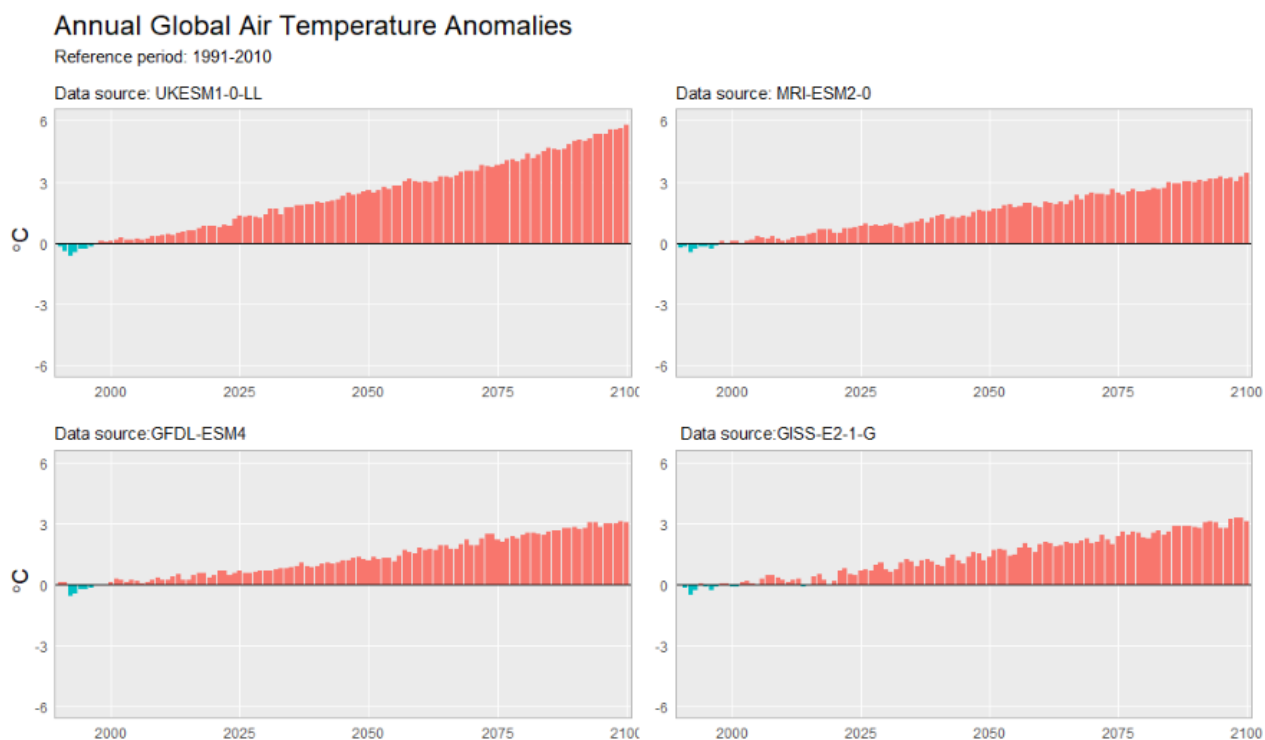
### 3.1.1 Θερμοκρασία του αέρα

Στο Σχήμα 3.2 καταγράφεται η παγκόσμια μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα για κάθε ένα από τα τέσσερα κλιματικά μοντέλα για την περίοδο 2015-2100 με βάση το σενάριο SSP3.7. Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, τα δεδομένα επεξεργάστηκαν με ομαλοποίηση έχοντας ως βάση τη μέση τιμή της χρονοσειράς κάθε μοντέλου. Σε γενικά πλαίσια, το θερμοκρασιακό εύρος κυμαίνεται μεταξύ των 14,8°C και των 19,9°C, με διαφορές μεταξύ των μοντέλων. Το **UKESM1-0-LL** εκτιμάει μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα, ενώ το **GFDL-ESM4** μικρότερη. Τα μοντέλα **GISS-E2-1-G** και **MRI-ESM2.0** παρουσιάζουν παρόμοιες ανοδικές τάσεις, με ελάχιστες διαφορές κατά την διάρκεια των ετών μεταξύ τους.



Σχήμα 3.2: Παγκόσμια μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα για κάθε ένα από τα μοντέλα για την περίοδο 2015-2100 (σενάριο SSP3.7).

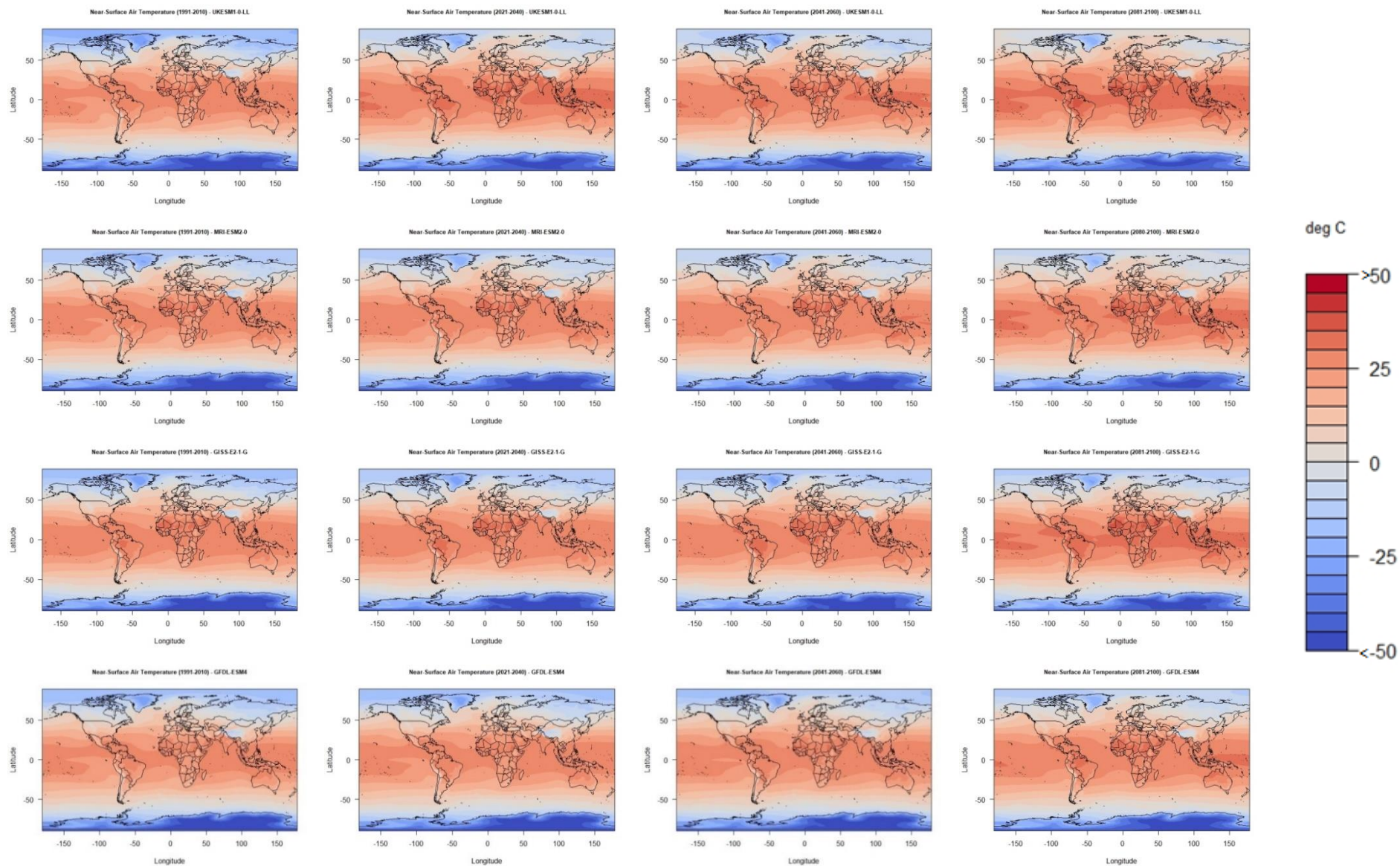
Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζονται οι ετήσιες παγκόσμιες ανωμαλίες της θερμοκρασίας του αέρα σε σχέση με την περίοδο αναφοράς (1991-2010) για τα τέσσερα μοντέλα μελέτης για την περίοδο 1991-2100. Σε παγκόσμιο επίπεδο παρατηρείται μια σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας ήδη από τα τέλη της χιλιετίας, η οποία είναι φανερή σε όλα τα μοντέλα. Σε συμφωνία έρχονται τα μοντέλα MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G και GFDL-ESM4 κατά τα οποία η θερμοκρασία του αέρα αναμένεται να αυξηθεί έως τους 3°C στα τέλη του αιώνα σε σχέση με την περίοδο αναφοράς. Ισχυρότερη αύξηση καταγράφεται στο UKESM1-0-LL, όπου οι τιμές αγγίζουν τα διπλάσια επίπεδα (6°C) σε σχέση με τα υπόλοιπα μοντέλα.



Σχήμα 3.3 Παγκόσμιες μέσες ετήσιες ανωμαλίες της θερμοκρασίας του αέρα για κάθε ένα από τα μοντέλα για την περίοδο 1991-2100 (σενάριο SSP3.7).

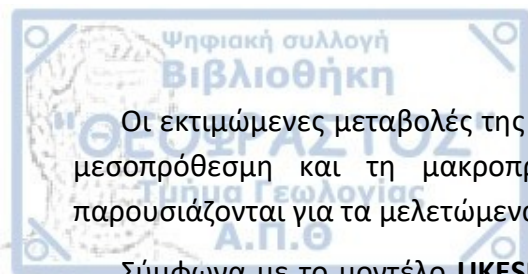
Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα που προκύπτει από τα τέσσερα GCM που λαμβάνονται υπόψη στην παρούσα εργασία για τις τέσσερις μελετώμενες περιόδους. Ειδικότερα, οι γραμμές αντικατοπτρίζουν τα αποτελέσματα των μοντέλων UKESM1-0-LL (1<sup>η</sup> γραμμή), MRI-ESM2.0 (2<sup>η</sup> γραμμή), GISS-E2-1-G (3<sup>η</sup> γραμμή), GFDL-ESM4 (4<sup>η</sup> γραμμή), και οι στήλες την ιστορική περίοδο (1<sup>η</sup> στήλη) και τις τρεις μελλοντικές περιόδους (εγγύς μέλλον - 2<sup>η</sup> στήλη), μεσοπρόθεσμη περίοδος - 3<sup>η</sup> στήλη, μακροπρόθεσμη περίοδος - 4<sup>η</sup> στήλη).

Οι τιμές της ετήσιας θερμοκρασίας του αέρα σε όλα τα μοντέλα κυμαίνονται από -50°C έως +50°C, με τις χαμηλότερες θερμοκρασίες να σημειώνονται στα μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη και τις υψηλότερες στα μικρότερα, κυρίως στη ζώνη του Ισημερινού. Οι μεγαλύτερες τιμές της θερμοκρασίας του αέρα εντοπίζονται στην αφρικανική ήπειρο (>40°C), ενώ οι χαμηλότερες πάνω από την Ανταρκτική. Στο εξεταζόμενο κλιματικό σενάριο, SSP3.70, υποδεικνύεται μία ισχυρή αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα σε ολόκληρο τον πλανήτη σε όλες τις εξεταζόμενες περιόδους.



Σχήμα 3.4: Εκτιμώμενη μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα από τα μοντέλα UKESM1-0-LL, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 (γραμμές) για τις τέσσερις μελετούμενες περιόδους (στήλες).





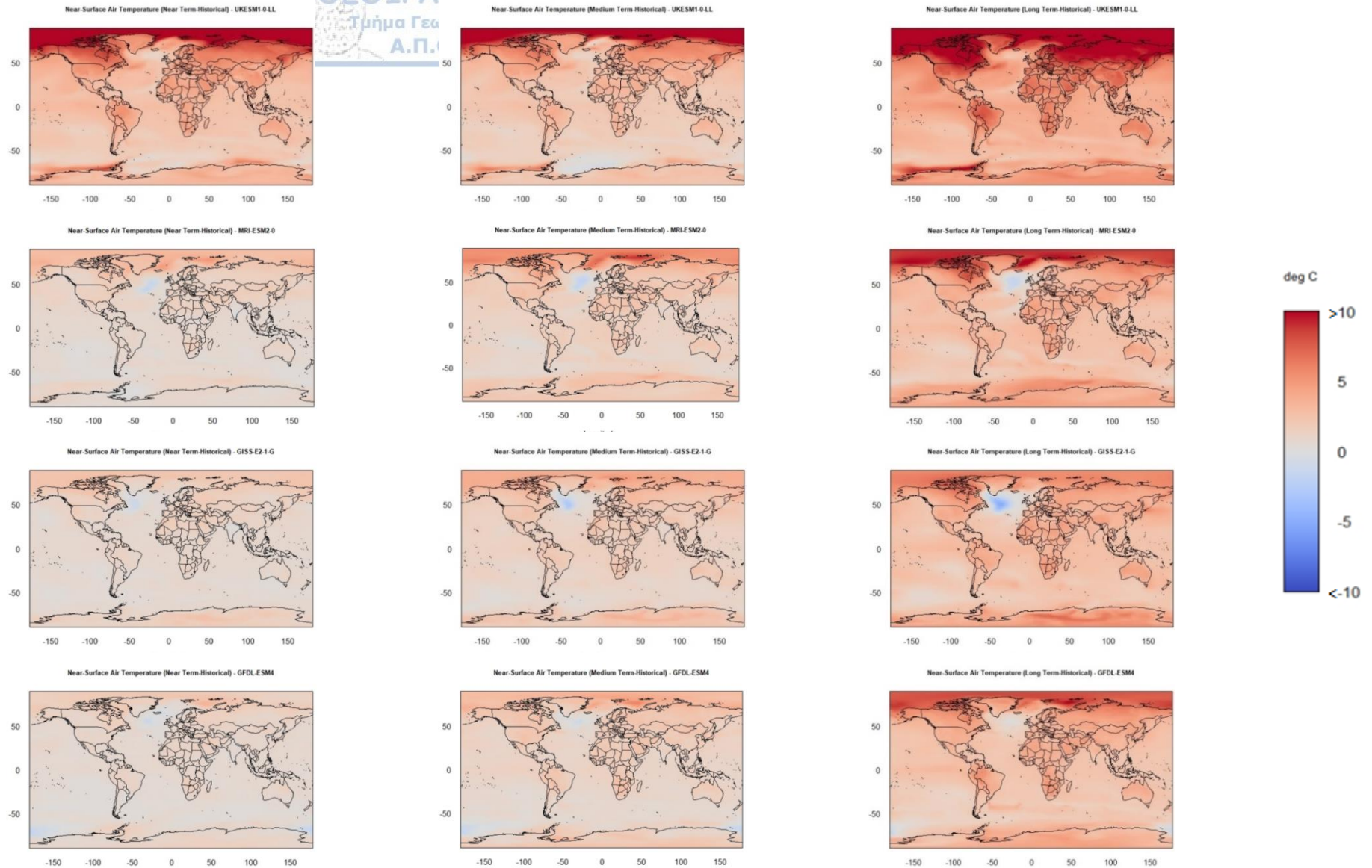
Οι εκτιμώμενες μεταβολές της θερμοκρασίας του αέρα σε ετήσια βάση στο εγγύς μέλλον, τη μεσοπρόθεσμη και τη μακροπρόθεσμη περίοδο σε σχέση με την περίοδο αναφοράς παρουσιάζονται για τα μελετώμενα μοντέλα στο Σχήμα 3.5.

Σύμφωνα με το μοντέλο **UKESM1-0-LL** (1<sup>η</sup> γραμμή σχήματος) στο εγγύς μέλλον (2021-2040), αναμένεται αύξηση της θερμοκρασίας της τάξεως των 4°C στην αφρικανική και 5°C ασιατική ήπειρο. Αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια της μεσοπρόθεσμης περιόδου (2041-2060), η θερμοκρασία του αέρα πρόκειται να αυξηθεί, σε μικρότερα επίπεδα από την προηγούμενη εικοσαετία, κατά 3,5°C στην κεντρική και Ν. Αφρική και 4°C στη Β. Αφρική και Ασία. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το συγκεκριμένο μοντέλο κατά τη μακροπρόθεσμη περίοδο (2081-2100), καθώς εκτιμάται μία ισχυρή αύξηση της ετήσιας θερμοκρασίας του αέρα. Συγκεκριμένα, αναμένεται αύξηση κατά 6,5°C στην Αφρική, 5°C στην Ευρώπη και τουλάχιστον 7,5°C στην Ασία. Μεγαλύτερη άνοδος της θερμοκρασίας αναμένεται στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη όπως στην Αρκτική, την Σιβηρία και τον Καναδά.

Στην δεύτερη γραμμή του σχήματος παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα που προκύπτει από τις προσομοιώσεις του μοντέλου **MRI-ESM2.0**. Στο εγγύς μέλλον (2021-2040) εκτιμάται αύξηση 1,5°C σε ολόκληρη την Αφρική και την Ασία. Κατά τη διάρκεια της μεσοπρόθεσμης περιόδου (2041-2060) σημειώνεται μία αύξηση της τάξεως των 2,4°C στην Κ.-Ν. Αφρική και 2,5°C στη Β. Αφρική και την Ασία. Τέλος, για τη μακροπρόθεσμη περίοδο (2081-2100), η αύξηση της ετήσιας θερμοκρασίας του αέρα κυμαίνεται στους 4,5°C στην Αφρική και την Ασία. Η Αρκτική και ο Β. Καναδάς αποτελούν πάλι τις περιοχές με τις μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις. Αντίθετα, μείωση της θερμοκρασίας, η οποία δε θα ξεπερνάει τους 5°C, καταγράφεται στον Β. Ατλαντικό.

Παρόμοια μεταβολή της ετήσιας θερμοκρασίας του αέρα με το μοντέλο MRI-ESM2.0 εμφανίζουν και τα μοντέλα **GISS-E2-1-G** και **GFDL-ESM4** (3<sup>η</sup> και 4<sup>η</sup> γραμμή σχήματος, αντίστοιχα). Στην αρχή του αιώνα (2021-2040) εκτιμάται αύξηση 1,5°C σε ολόκληρη την ήπειρο της Αφρικής και της Ασίας και στη μεσοπρόθεσμη περίοδο (2041-2060) αύξηση 2°C στην Κ.-Ν. Αφρική και 2,5°C, στη Β. Αφρική και την Ασία. Κατά τη μακροπρόθεσμη περίοδο (2081-2100), η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα εκτιμάται γύρω στους 4°C στις ηπείρους της Αφρικής και της Ασίας.

Μεταξύ των μοντέλων, το UKESM1-0-LL παρουσιάζει την υψηλότερη αύξηση της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του 21<sup>ου</sup> αιώνα, λόγω της υψηλής κλιματικής ευαισθησίας του, ενώ η μικρότερη τάση θέρμανσης προσομοιώνεται από το GFDL-ESM4 λόγω μικρότερης κλιματικής ευαισθησίας.

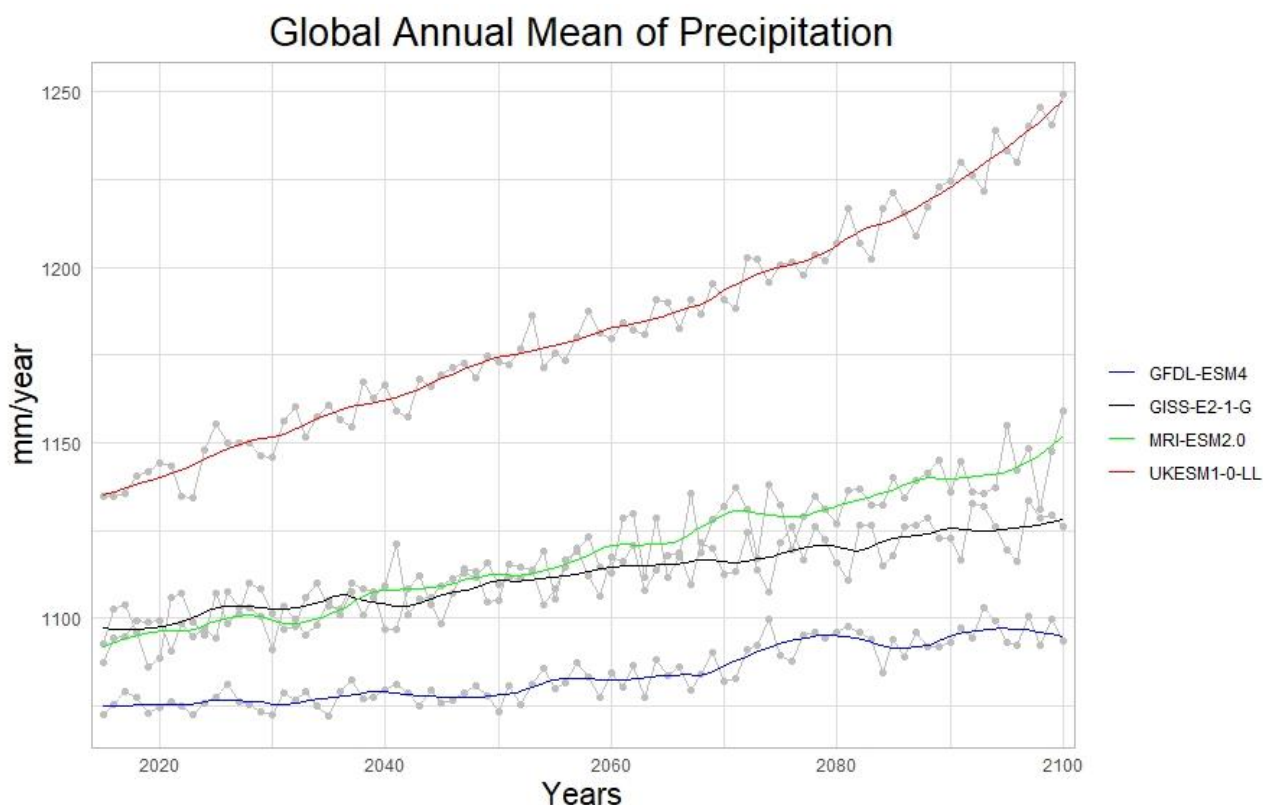


Σχήμα 3.5: Εκτιμώμενη μεταβολή της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας από τα μοντέλα UKESM1-0-LL, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 (γραμμές) σε σχέση με την περίοδο αναφοράς για το εγγύς μέλλον (1<sup>η</sup> στήλη), τη μεσοπρόθεσμη περίοδο (2<sup>η</sup> στήλη), τη μακροπρόθεσμη περίοδο (3<sup>η</sup> στήλη).



### 3.1.2 Βροχόπτωση

Στο Σχήμα 3.6 εμφανίζεται αναμενόμενη παγκόσμια μέση ετήσια βροχόπτωση από τα τέσσερα GCM μελέτης για την περίοδο 2015-2100. Με γκρι χρώμα παρουσιάζονται οι πραγματικές τιμές που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις των μοντέλων, ενώ με τα χρώματα (UKESM1-0-LL -κόκκινο, GISS-E2-1-G -μαύρο, MRI-ESM2.0 -πράσινο, GFDL-ESM4 -μπλε) καταγράφονται οι κανονικοποιημένες τάσεις. Όπως και στην περίπτωση της θερμοκρασίας του αέρα, παρόμοια κατάσταση παρατηρείται και με την βροχόπτωση, όπου στο μοντέλο με την μεγαλύτερη κλιματική ευαισθησία, UKESM1-0-LL, καταγράφεται η μεγαλύτερη τάση των υψών βροχής ( $P_{\min}=1134$  mm/year (1%) το 2023 και  $P_{\max}=1249$  mm/year (11,3%) το 2100) και στο GFDL-ESM4 προσομοιώνονται τα μικρότερα ύψη ( $P_{\min}=1072$  mm/year το 2035 και  $P_{\max}=1100$  mm/year (2.5%) το 2097). Τα υπόλοιπα δυο μοντέλα παρουσιάζουν παρόμοια τάση, με τη διαφορά να εντοπίζεται στο δεύτερο μισό του αιώνα, όταν το MRI-ESM2.0 εμφανίζει περίπου 50 mm/year παραπάνω από το GISS-E2-1-G.



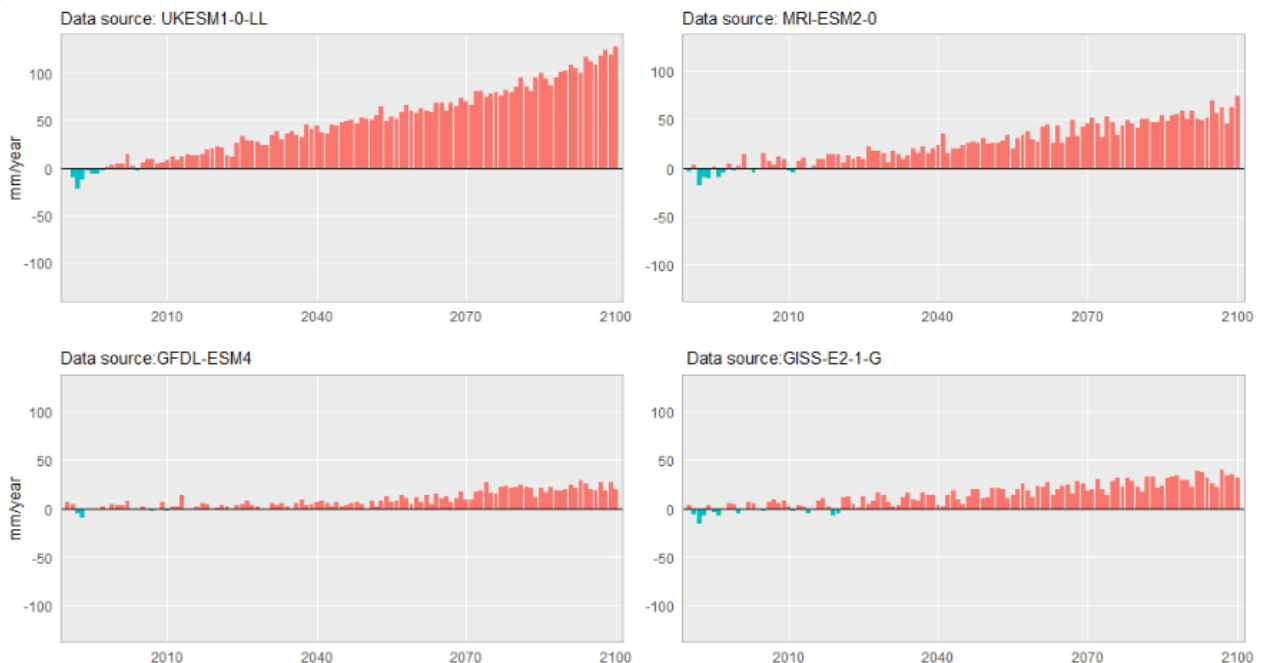
Σχήμα 3.6: Παγκόσμια μέση ετήσια βροχόπτωση για κάθε ένα από τα μοντέλα για την περίοδο 2015-2100 (σενάριο SSP3.7).

Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζονται οι ετήσιες παγκόσμιες ανωμαλίες της βροχόπτωσης για κάθε ένα μοντέλο μελέτης για την περίοδο 1991-2100. Όπως και στην περίπτωση της θερμοκρασίας του αέρα, παρόμοια εικόνα εντοπίζεται και στην βροχόπτωση με την αυξητική τάση να καταγράφεται από τις αρχές του αιώνα και να κορυφώνεται στα τέλη αυτού. Η μεγαλύτερη διαφοροποίηση εκδηλώνεται στο UKESM1-0-LL στο οποίο το ύψος βροχής θα ξεπεράσει τα 120 mm/year το 2100. Σημαντική αναμένεται να είναι η αύξηση του υετού και στο MRI-ESM2.0, όπου

οι τιμές θα φτάσουν τα 80 mm/year, ενώ σε χαμηλά επίπεδα κυμαίνεται η μεταβολή στα άλλα δυο μοντέλα, με την βροχόπτωση να μην ξεπερνά τα 40 mm/year.

#### Annual Global Precipitation Anomalies

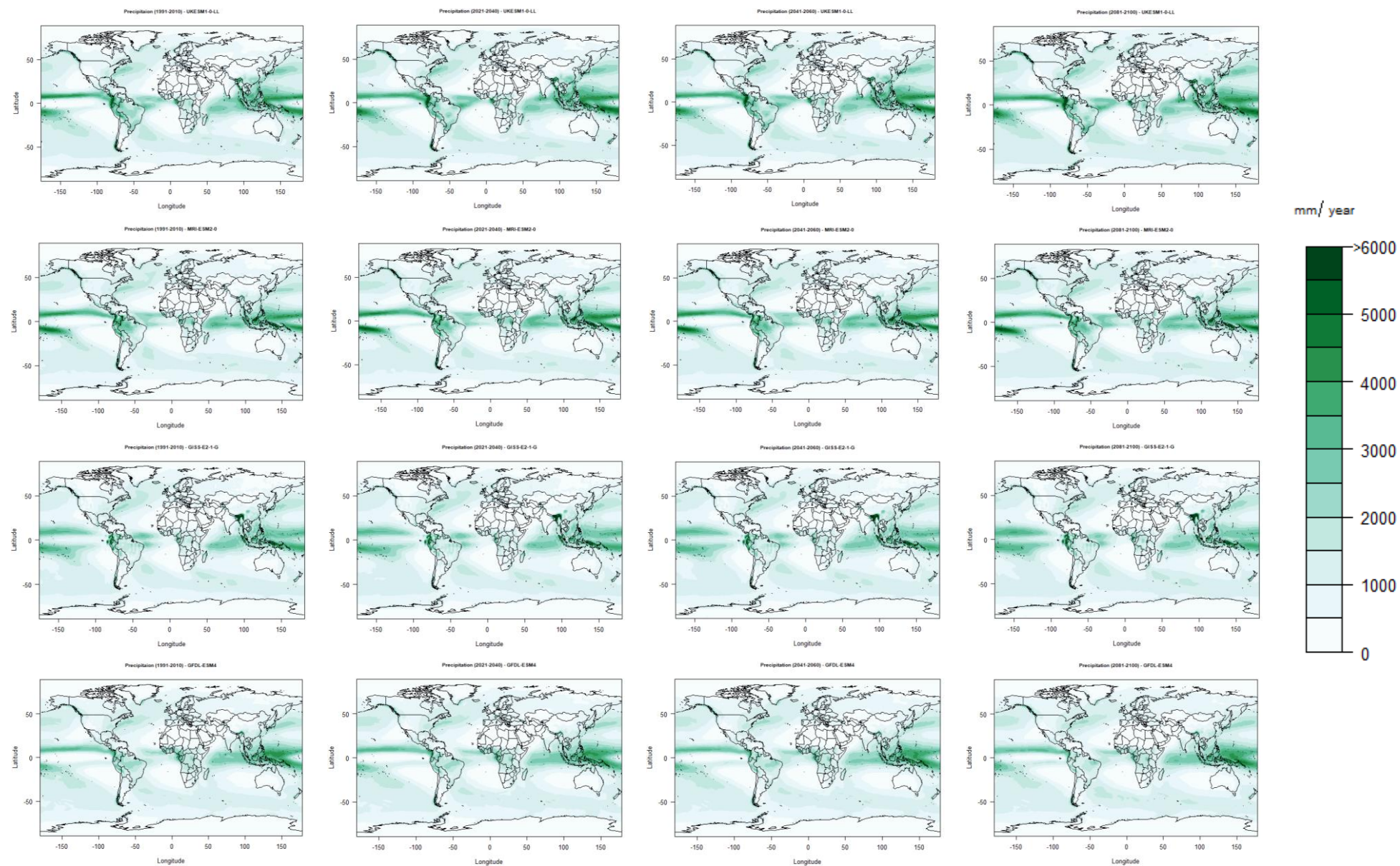
Reference period: 1991-2010



Σχήμα 3.7 Παγκόσμιες μέσες ετήσιες ανωμαλίες της βροχόπτωσης για κάθε ένα από τα μοντέλα για την περίοδο 1991-2100 (σενάριο SSP3.7).

Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζεται η μέση ετήσια βροχόπτωση για την περίοδο αναφοράς και τις τρεις μελλοντικές περιόδους για κάθε ένα από τα τέσσερα παγκόσμια κλιματικά μοντέλα. Οι γραμμές αντικατοπτρίζουν τα αποτελέσματα των μοντέλων UKESM1-0-LL (1<sup>η</sup> γραμμή), MRI-ESM2.0 (2<sup>η</sup> γραμμή), GISS-E2-1-G (3<sup>η</sup> γραμμή), GFDL-ESM4 (4<sup>η</sup> γραμμή), και οι στήλες την ιστορική περίοδο (1<sup>η</sup> στήλη) και τις τρεις μελλοντικές περιόδους (εγγύς μέλλον - 2<sup>η</sup> στήλη), μεσοπρόθεσμη περίοδος - 3<sup>η</sup> στήλη, μακροπρόθεσμη περίοδος - 4<sup>η</sup> στήλη).

Τα μεγαλύτερα ύψη βροχής εντοπίζονται στην Ισημερινή ζώνη και κυρίως στα χαμηλά γεωγραφικά πλάτη του Ειρηνικού ωκεανού. Ειδικότερα, στην περιοχή της Ινδονησίας, των Φιλιππίνων και στα δυτικά παράλια της Κ. Αμερικής τα ύψη κυμαίνονται μεταξύ 5000-6000 mm/year. Αντίθετη εικόνα εμφανίζεται στη Β. Αφρική, όπου αναμένονται ξηρότερες συνθήκες (>200 mm/year) στις μελλοντικές περιόδους.



Σχήμα 3.8: Εκτιμώμενη μέση ετήσια βροχόπτωση για τα μοντέλα UKESM1-0-LL, GISS-E2-1-G, MRI-ESM2.0, GFDL-ESM4 (γραμμές) για τις τέσσερις μελετούμενες περιόδους (στήλες).

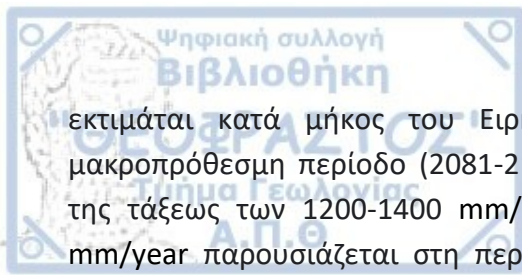


Στο Σχήμα 3.9 παρουσιάζεται η εκτιμώμενη από τα τέσσερα μοντέλα μεταβολή που εμφανίζει η βροχόπτωση στις μελλοντικές περιόδους συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς.

Ειδικότερα, στο μοντέλο **UKESM1-0-LL** (1<sup>η</sup> γραμμή), η σημαντικότερη μεταβολή στα ύψη βροχόπτωσης παρουσιάζεται κατά μήκος της ζώνης του Ισημερινού, την περιοχή με τις μέγιστες τιμές βροχόπτωσης. Στο εγγύς μέλλον (2021-2040), αναμένεται αύξηση κατά 1300 mm/year κατά μήκος του Ειρηνικού ωκεανού και μείωση κατά 1000 mm/year στο δυτικό τμήμα αυτού, στην περιοχή της Παπούα-Νέας Γουινέας. Σημαντική αύξηση των 600 mm/year θα παρουσιαστεί στο Δ. Ινδικό ωκεανό και κατά μήκος του Ατλαντικού ωκεανού, στο ύψος του Ισημερινού, ενώ μείωση 400-600 mm/year εκτιμάται στον Α. Ινδικό ωκεανό, στην περιοχή της Ινδονησίας. Μικρή μείωση 150-300 mm/year σημειώνεται στην Κ.Β. Λατινική Αμερική. Η μεταβολή αυτή είναι ιδιαίτερα έντονη σύμφωνα με το συγκεκριμένο μοντέλο πλησιάζοντας τα 800 mm/year στο μεγαλύτερο μέρος του ηπειρωτικού τμήματος. Στη μακροπρόθεσμη περίοδο (2081-2100) παρατηρείται μία σημαντική αύξηση που ξεπερνάει τα 1500 mm/year κατά μήκος του Ειρηνικού ωκεανού στο ύψος του Ισημερινού. Περαιτέρω μείωση εμφανίζεται στη περιοχή της Ινδονησίας και του Δ. Ινδικού ωκεανού και αύξηση που φτάνει τα 1000 mm/year στον Α. Ινδικό ωκεανό, στην περιοχή της Αραβικής Θάλασσας. Στην Κ.-Β. Λατινική Αμερική αναμένεται μείωση κατά 800-1000 mm/year. Επιπλέον, στο τέλος του αιώνα σημειώνεται μεταβολή και στην Αφρικανική ήπειρο. Αναλυτικά, παρουσιάζεται ελάττωση 400-600 mm/year στο δυτικό τμήμα της ηπείρου και στην περιοχή του Κόλπου της Γουινέας, ενώ ενίσχυση εντοπίζεται στην Κ. Αφρική, της τάξεως των 600 mm/year. Τέλος, σημάδια ξηρασίας σημειώνονται στην Μεσόγειο με την βροχόπτωση να ελαττώνεται κατά 200 mm/year.

Στη δεύτερη γραμμή του σχήματος απεικονίζεται η μεταβολή στη μέση βροχόπτωση που αναμένεται κατά τις μελλοντικές περιόδους από το μοντέλο **MRI-ESM2.0**. Κατά το εγγύς μέλλον (2021-2040), εκτιμάται αύξηση 800-1000 mm/year στο δυτικό τμήμα του Ειρηνικού ωκεανού και μείωση 400-600 mm/year στο κεντρικό του τμήμα. Το γεγονός αυτό έρχεται σε αντιδιαστολή με τις προσομοιώσεις του προηγούμενου μοντέλου. Επιπλέον, αύξηση της τάξεως των 600 mm/year θα παρουσιαστεί στο Δ. Ινδικό ωκεανό και στον Ατλαντικό ωκεανό στο ύψος του Ισημερινού, ενώ μείωση 400-600 mm/year αναμένεται στον Α. Ινδικό ωκεανό στην περιοχή της Ινδονησίας. Μικρή μείωση 200-300 mm/year θα σημειωθεί στην Κ.-Β. Λατινική Αμερική. Κατά τη μεσοπρόθεσμη περίοδο (2041-2060) παρουσιάζονται μεταβολές μικρότερης έντασης στη βροχόπτωση σε σχέση με εκείνες της προηγούμενης περιόδου, οι οποίες είναι της τάξεως των 200 mm/year. Στη μακροπρόθεσμη περίοδο (2081-2100) σημειώνεται μια αύξηση της βροχόπτωσης της τάξεως των 1200-1400 mm/year κατά μήκος του Ειρηνικού ωκεανού στο ύψος του Ισημερινού. Μείωση 600-800 mm/year παρατηρείται στη περιοχή της Ινδονησίας και του Δ. Ινδικού ωκεανού, παράλληλα με μία αύξηση 800 mm/year στον Α. Ινδικό ωκεανό, και συγκεκριμένα στην περιοχή της Αραβικής Θάλασσας. Στην Κ.-Β. Λατινική Αμερική αναμένεται μείωση κατά 800-1000 mm/year.

Η αναμενόμενη μεταβολή στα ύψη βροχής κατά τις μελλοντικές περιόδους σύμφωνα με το μοντέλο **GISS-E2-1-G** παρουσιάζεται στη τρίτη γραμμή του σχήματος. Στην αρχή του αιώνα (2021-2040), αναμένεται αύξηση 400-500 mm/year κατά μήκος του Ειρηνικού ωκεανού και μείωση της τάξεως των 350 mm/year στο δυτικό του τμήμα και ειδικότερα στην περιοχή της Παπούα-Νέας Γουινέας. Στην επομένη περίοδο (2041-2060), η σημαντικότερη αύξηση της βροχόπτωσης



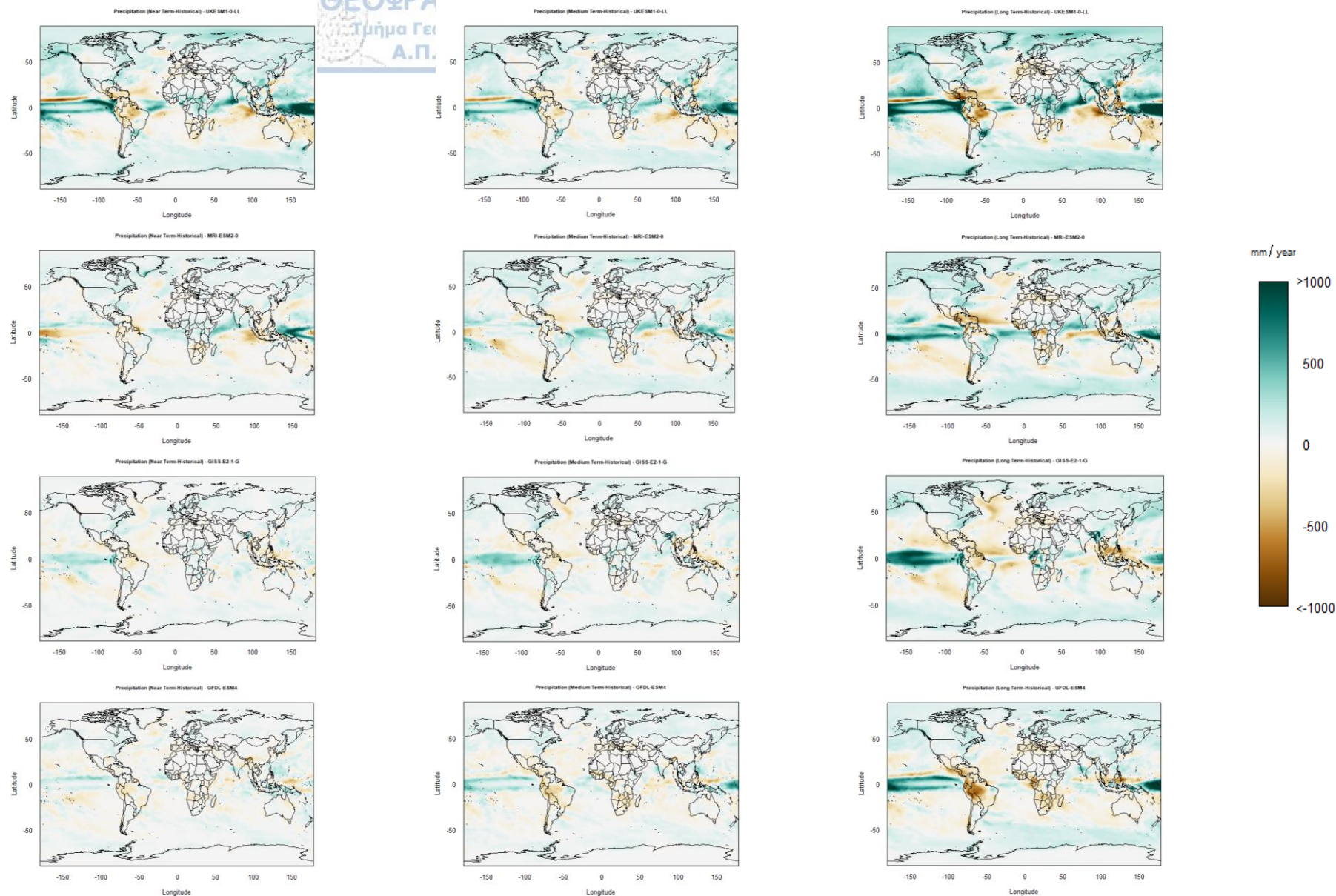
εκτιμάται κατά μήκος του Ειρηνικού ωκεανού και φτάνει τα 600 mm/year. Κατά τη μακροπρόθεσμη περίοδο (2081-2100) αναμένεται να σημειωθεί μια αύξηση της βροχόπτωσης της τάξεως των 1200-1400 mm/year κατά μήκος του Ειρηνικού ωκεανού. Μείωση 600-800 mm/year παρουσιάζεται στη περιοχή της Ινδονησίας και του Δ. Ινδικού ωκεανού. Στην Κ.-Β. Λατινική Αμερική σημειώνεται αύξηση της βροχόπτωσης που φτάνει έως τα 1400 mm/year. Στην Κ.-Β. Λατινική Αμερική αναμένεται μείωση κατά 800-1000 mm/year. Στο τέλος του αιώνα καταγράφεται, επίσης, μεταβολή και στην Αφρικανική ήπειρο. Αναλυτικά, παρουσιάζεται μείωση 400-500 mm/year στο δυτικό τμήμα της ηπείρου και στην περιοχή του Κόλπου της Γουινέας. Αύξηση εντοπίζεται στην Κ. Αφρική της τάξεως των 600 mm/year. Τέλος, σημάδια ξηρασίας σημειώνονται στη Μεσόγειο με την βροχόπτωση να ελαττώνεται κατά 200 mm/year.

Στο μοντέλο **GFDL-ESM4** κατά το εγγύς μέλλον (2021-2040), όπως και στο μοντέλο GISS-E2-1-G, εκτιμάται αύξηση και μείωση κατά μήκος του Ειρηνικού ωκεανού και του δυτικού του τμήματος, στην περιοχή της Παπούα-Νέας Γουινέας, αντίστοιχα. Στη μεσοπρόθεσμη περίοδο (2041-2060), το συγκεκριμένο μοντέλο εμφανίζει τη μεγαλύτερη διαφοροποίηση σε σχέση με το εγγύς μέλλον συγκριτικά με τα υπόλοιπα μοντέλα. Ειδικότερα, σύμφωνα με το μοντέλο παρατηρείται σημαντική αύξηση κατά μήκος του Ειρηνικού ωκεανού, η θα φτάνει έως τα 600-700 mm/year, και σημαντική μείωση στην ηπειρωτική Λατινική Αμερική (600 mm/year). Στο τέλος του αιώνα (2081-2100), αναμένεται να σημειωθεί μια αύξηση της βροχόπτωσης της τάξεως των 1200-1400 mm/year στον Ειρηνικό ωκεανό στο ύψος του Ισημερινού. Μείωση 400-600 mm/year σημειώνεται στην περιοχή της Ινδονησίας και του Δ. Ινδικού ωκεανού. Στην Κ.-Β. Λατινική Αμερική αναμένεται μείωση κατά 800-1000 mm/year.

Για την καλύτερη αποτύπωση της μεταβολής βροχόπτωσης προβάλλεται στο Σχήμα 3.10 η ποσοστιαία εκτιμώμενη μεταβολή της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης. Συγκεκριμένα, στην Αφρική αναμένεται μια ισχυρή αύξηση στην έρημο Σαχάρα και το Σάχελ, η οποία σύμφωνα με τα μοντέλα **UKESM1-0-LL** και **MRI-ESM2.0**, θα φτάσει στο τέλος του αιώνα στα 240% και 160% αντίστοιχα. Αυξητική τάση σε μικρότερα επίπεδα (60-70%) εκτιμάται και από τα άλλα δυο μοντέλα, **GISS-E2-1-G** και **GFDL-ESM4**, στην Α. Σαχάρα, με την διαφορά να εντοπίζεται στο δυτικό τμήμα αυτής, καθώς στη μακροπρόθεσμη περίοδο εμφανίζεται μείωση 50-60%.

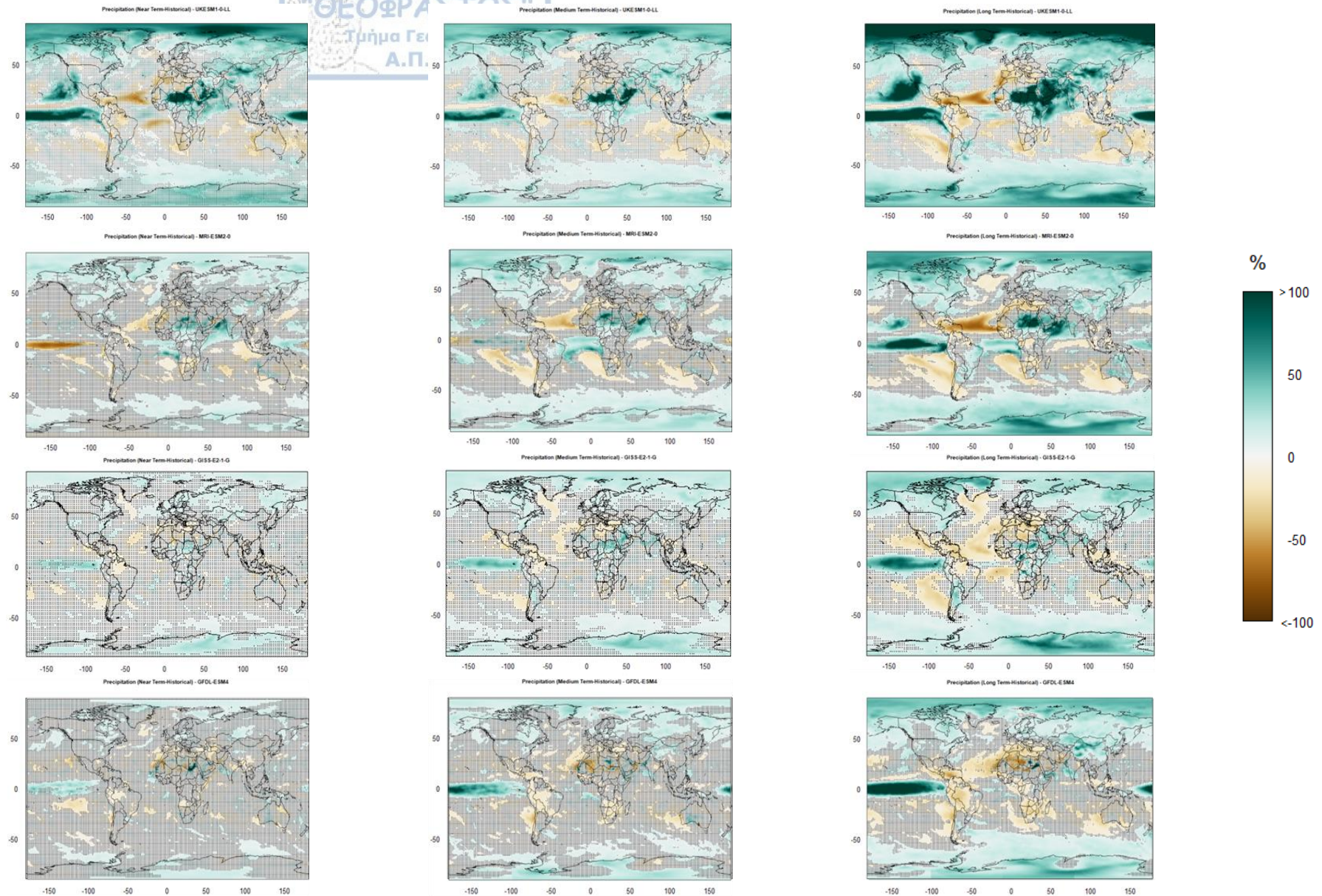
Όσον αφορά την ποσοστιαία μεταβολή της βροχόπτωσης στην Ασία, αναμένεται αύξηση στο μεγαλύτερο τμήμα της ερήμου. Αναλυτικά, εκτιμάται αύξηση που κυμαίνεται από το 40-60 % για τα μοντέλα **MRI-ESM2.0**, **GISS-E2-1-G** και **GFDL-ESM4**, με την μεγαλύτερη μεταβολή να εντοπίζεται στην έρημο Γκόμπι. Σε μεγαλύτερα επίπεδα παρουσιάζεται η αύξηση στο μοντέλο **UKESM1-0-LL**, καθώς η αύξηση που καταγράφεται, αγγίζει το 200% στην έρημο Γκόμπι και το 150% στην έρημο Τάκλα Μακάν κατά την μακροπρόθεσμη μελλοντική περίοδο.





Σχήμα 3.9: Εκτιμώμενη μεταβολή της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης από τα μοντέλα UKESM1-0-LL, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 (γραμμές) σε σχέση με την περίοδο αναφοράς (1991-2010) για το εγγύς μέλλον (1<sup>η</sup> στήλη) , τη μεσοπρόθεσμη περίοδο (2<sup>η</sup> στήλη), τη μακροπρόθεσμη περίοδο (3<sup>η</sup> στήλη).

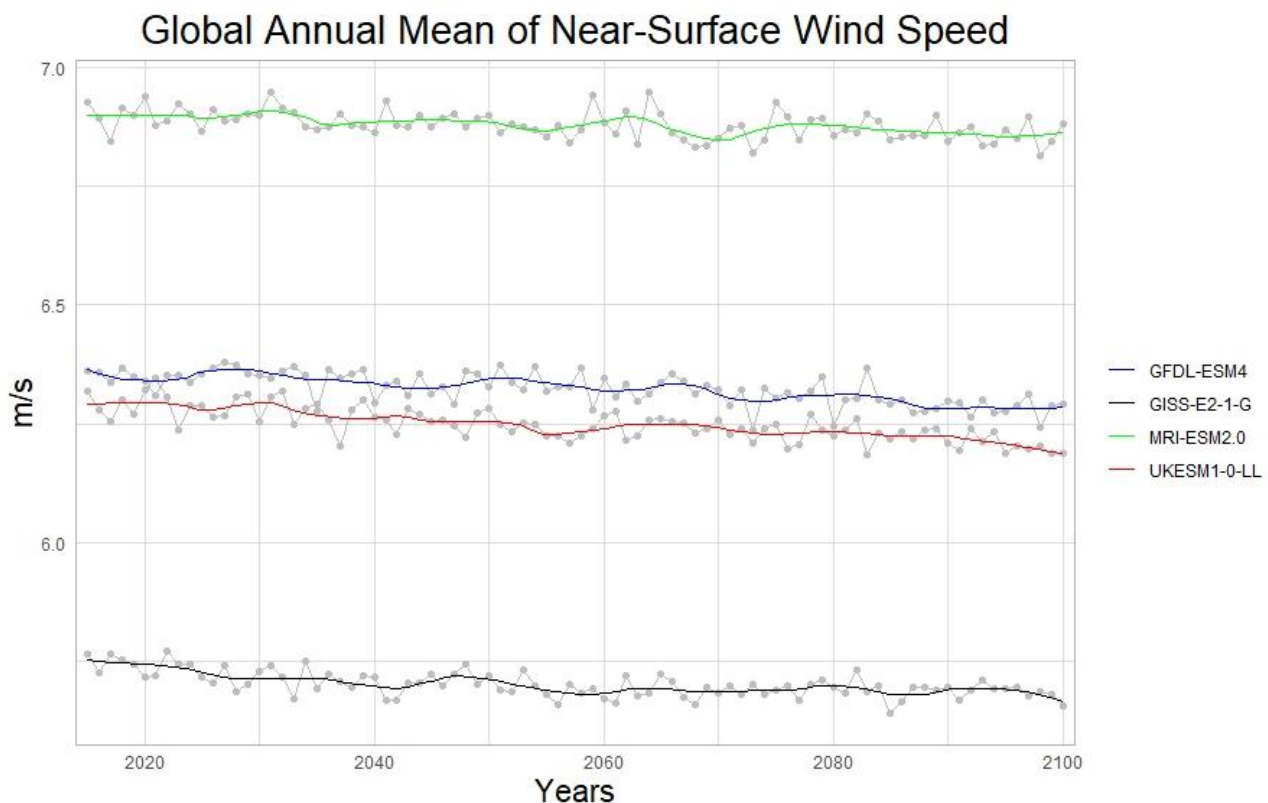




Σχήμα 3.10 Εκτιμώμενη ποσοστιαία μεταβολή της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης από τα μοντέλα UKESM1-0-LL, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 (γραμμές) σε σχέση με την περίοδο αναφοράς (1991-2010) για το εγγύς μέλλον (1η στήλη) , τη μεσοπρόθεσμη περίοδο (2η στήλη), τη μακροπρόθεσμη περίοδο (3<sup>η</sup> στήλη).

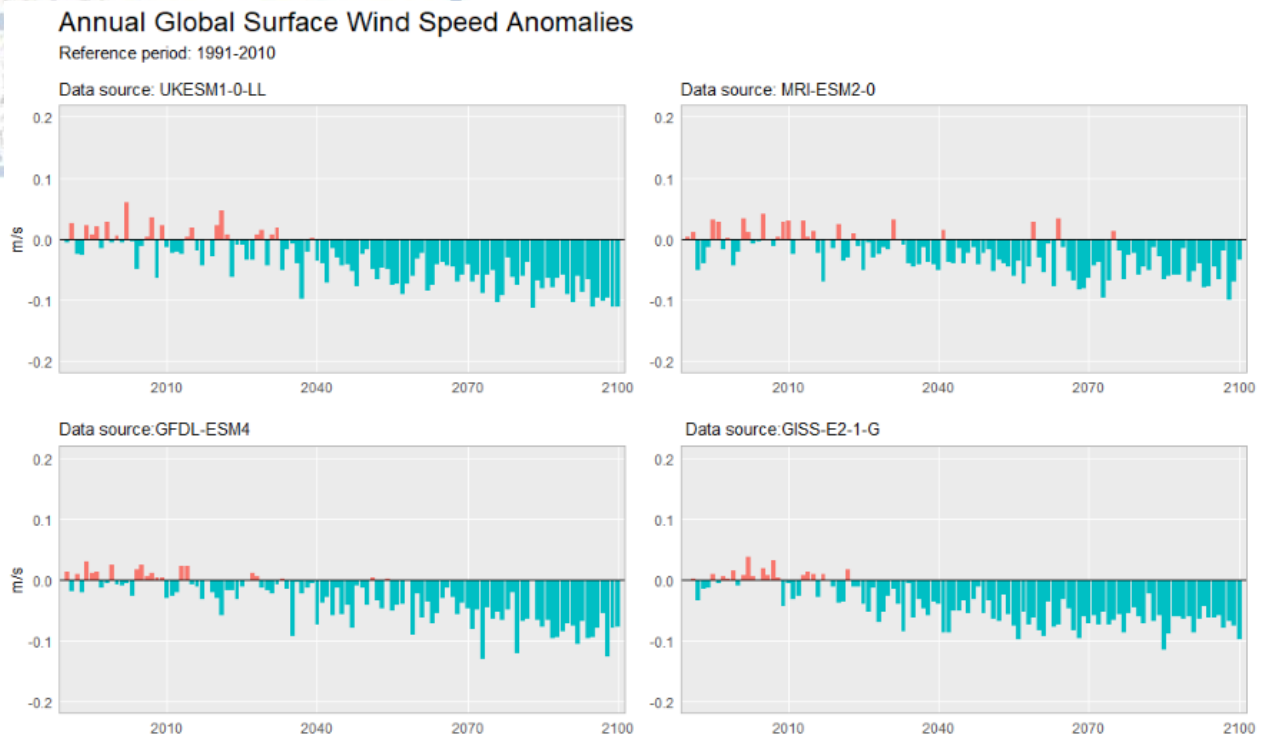
### 3.1.3 Επιφανειακή ταχύτητα του ανέμου

Παρότι η επιφανειακή ταχύτητα του ανέμου έχει σημασία να μελετάται περισσότερο σε τοπικό επίπεδο και όχι τόσο σε παγκόσμια κλίμακα, στο Σχήμα 3.11 παρουσιάζεται η παγκόσμια μέση ετήσια ταχύτητα του επιφανειακού ανέμου για το διάστημα 2015-2100, με σκοπό να παρουσιαστούν τα επίπεδα στα οποία κυμαίνονται οι τιμές της για κάθε ένα από τα μελετώμενα GCM. Η γενική εντύπωση που διαμορφώνεται είναι πως η ταχύτητα του ανέμου παραμένει σε σταθερά επίπεδα με μία ελάχιστη πτώση στα τέλη του αιώνα. Συγκεκριμένα στο MRI-ESM2.0 καταγράφεται η μεγαλύτερη ένταση του ανέμου με τιμές να βρίσκονται στα 6,8 m/s. Σε ένα μικρότερο εύρος (6,2-6,4 m/s) κυμαίνονται τα μοντέλα UKESM1-0-LL και GFDL-ESM4, ενώ οι χαμηλότερες τιμές (5,7 m/s) εντοπίζονται στο GISS-E2-1-G.



Σχήμα 3.11: Παγκόσμια μέση ετήσια επιφανειακή ταχύτητα του ανέμου για κάθε ένα από τα μοντέλα για την περίοδο 2015-2100 (σενάριο SSP3.7).

Στο Σχήμα 3.12 παρουσιάζονται οι ετήσιες παγκόσμιες ανωμαλίες της ταχύτητας του αέρα των μοντέλων μελέτης για την περίοδο 1991-2100. Παρόλο που οι μεταβολές του αέρα που καταγράφονται από τις προσομοιώσεις των μοντέλων είναι μικρές, παρατηρείται μια συμφωνία και των τεσσάρων μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, αναμένεται μια σαφή μείωση της ταχύτητας του ανέμου, η οποία μεγαλώνει με την πάροδο των ετών φτάνοντας τα 0,1 m/sec την τελευταία δεκαετία του αιώνα.

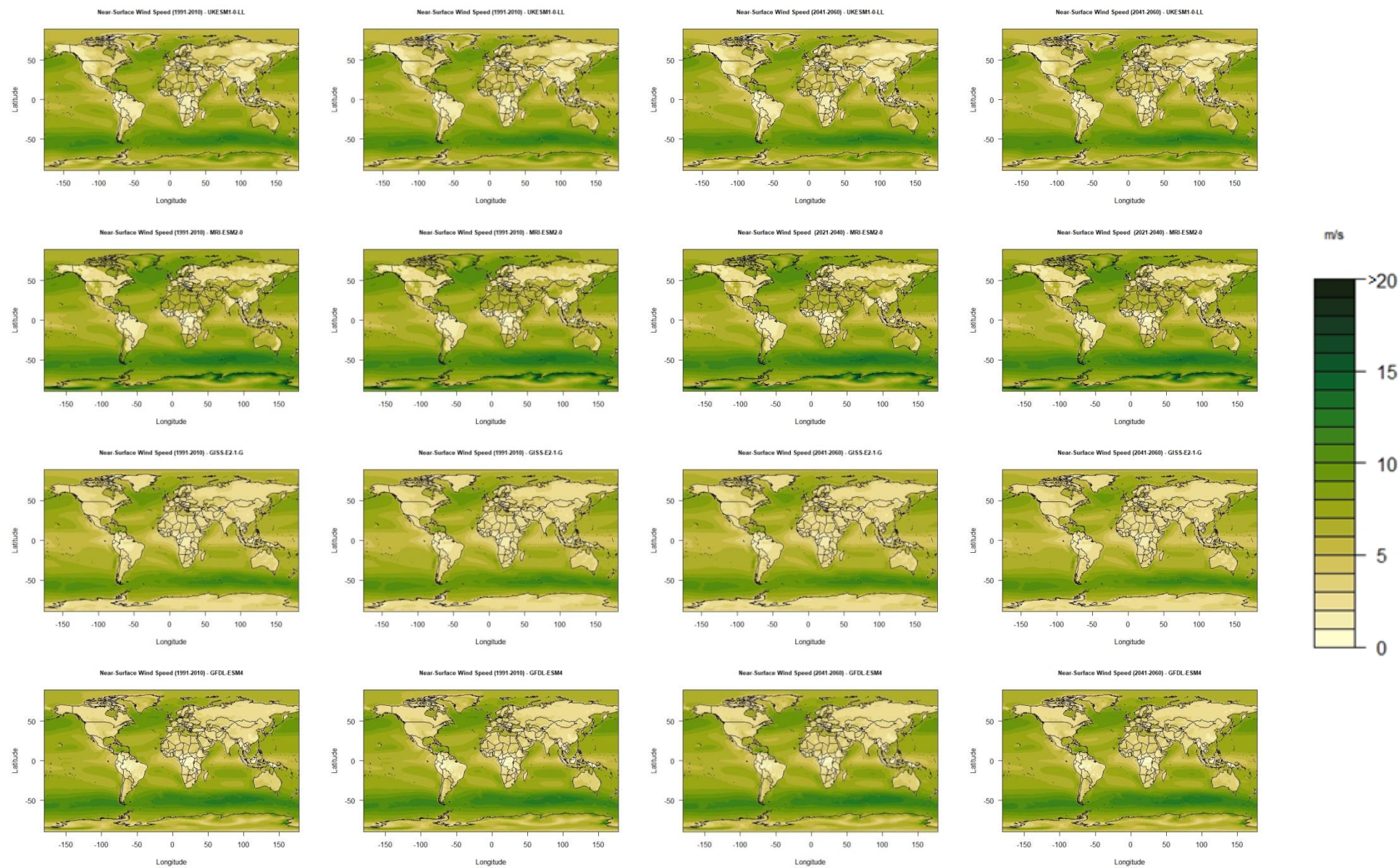


**Σχήμα 3.12** Παγκόσμιες μέσες ετήσιες ανωμαλίες της ταχύτητας του αέρα για κάθε ένα από τα μοντέλα για την περίοδο 1991-2100 (σενάριο SSP3.7).

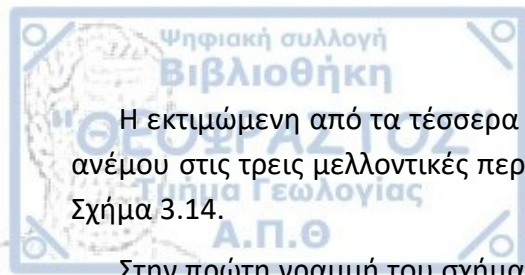
Για την καλύτερη ερμηνεία της επιφανειακής ταχύτητας του αέρα γίνεται ανάλυση σε τοπικό επίπεδο. Στο Σχήμα 3.13 παρουσιάζεται η μέση επιφανειακή ταχύτητα του ανέμου έτσι όπως προσομοιώνεται από τα τέσσερα GCM μοντέλα για κάθε μία από τις τέσσερις περιόδους μελέτης. Ειδικότερα, οι γραμμές αντικατοπτρίζουν τα αποτελέσματα των μοντέλων UKESM1-0-LL (1<sup>η</sup> γραμμή), MRI-ESM2.0 (2<sup>η</sup> γραμμή), GISS-E2-1-G (3<sup>η</sup> γραμμή), GFDL-ESM4 (4<sup>η</sup> γραμμή), και οι στήλες την ιστορική περίοδο (1<sup>η</sup> στήλη) και τις τρεις μελλοντικές περιόδους (εγγύς μέλλον - 2<sup>η</sup> στήλη), μεσοπρόθεσμη περίοδος - 3<sup>η</sup> στήλη, μακροπρόθεσμη περίοδος - 4<sup>η</sup> στήλη).

Στα μοντέλα **UKESM1-0-LL** και **MRI-ESM2.0** σημειώνεται μεγαλύτερη ένταση του ανέμου στις περιοχές ενδιαφέροντος, δηλαδή στις ερημικές περιοχές του πλανήτη, σε σχέση με την ένταση του ανέμου που αναμένονται από τα μοντέλα **GISS-E2-1-G** και **GFDL-ESM4**. Ο άνεμος εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές του, περίπου 10 m/s, στο βόρειο τμήμα της Αφρικανικής ηπείρου, εκεί όπου εντοπίζεται η έρημος Σαχάρα. Επιπλέον, στο μοντέλο MRI-ESM2.0, σημαντική ένταση του ανέμου σημειώνεται και στην Ασιατική ήπειρο. Τα μοντέλα GISS-E2-1-G και GFDL-ESM4 δε δείχνουν σημαντικές εντάσεις του ανέμου και θεωρούνται στατιστικά μη σημαντικά.





Σχήμα 3.13: Μέση ετήσια κατανομή του ανέμου για τα μοντέλα UKESM1-0-LL, GISS-E2-1-G-E2-1-G, MRI-ESM2.0, GFDL-ESM4 (γραμμές) για τις τέσσερις μελετούμενες περιόδους (στήλες).



Η εκτιμώμενη από τα τέσσερα μοντέλα μεταβολή που εμφανίζει η επιφανειακή ταχύτητα του ανέμου στις τρεις μελλοντικές περιόδους σε σχέση με την περίοδο αναφοράς παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.14.

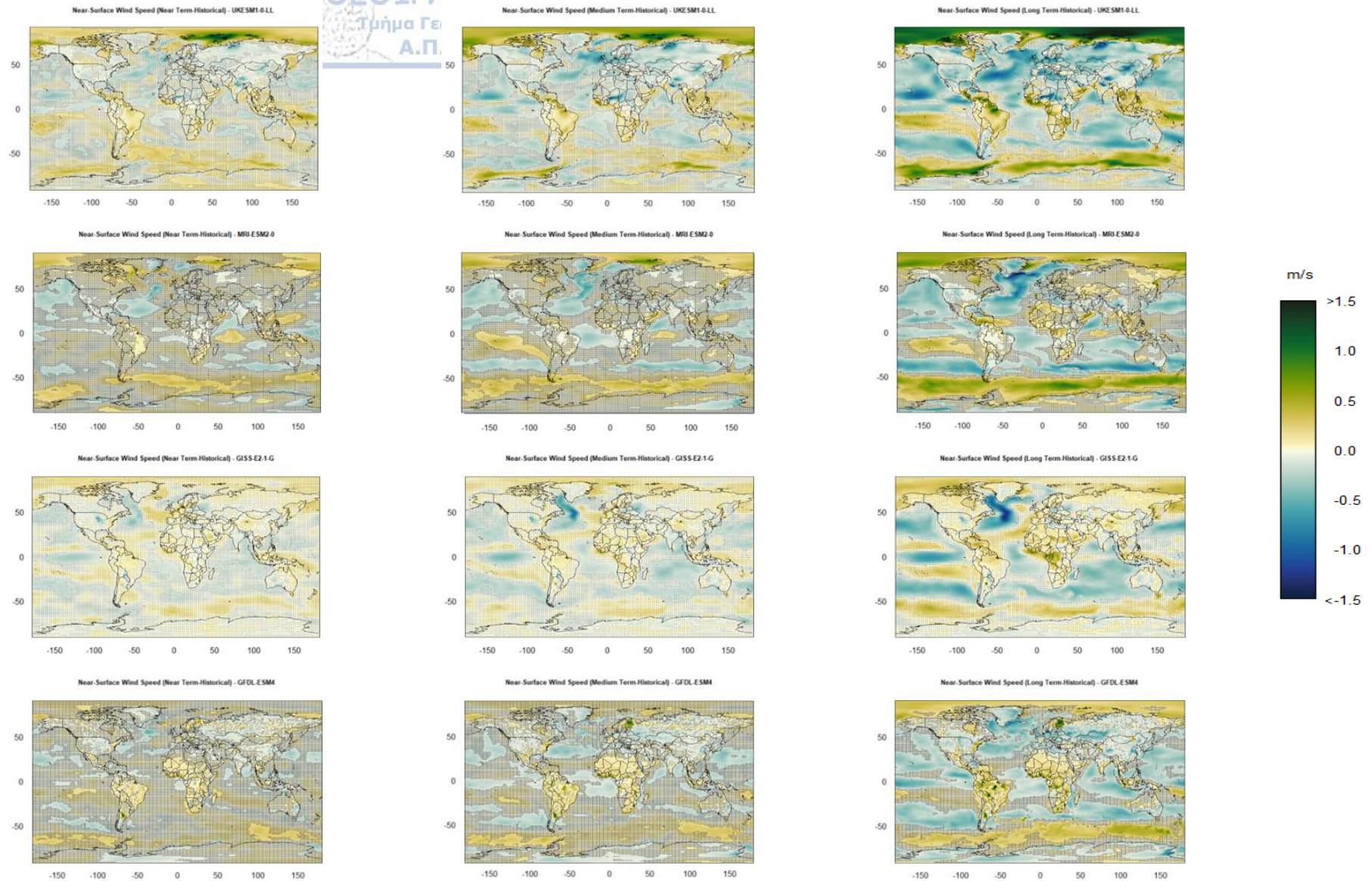
Στην πρώτη γραμμή του σχήματος παρουσιάζεται η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου κατά τις τρεις μελλοντικές περιόδους μελέτης σε σχέση με την περίοδο αναφοράς για το μοντέλο **UKESM1-0-LL**. Κατά το εγγύς μέλλον (2021-2040), η μεταβολή της έντασης του ανέμου αναμένεται να κυμανθεί σε χαμηλά επίπεδα σε σχέση με την ένταση της περιόδου αναφοράς. Συγκεκριμένα, η μείωση δε φαίνεται να ξεπερνά τα 0,2 m/s στο Σάχελ (Νίγηρας) και στη Β. Ινδία (έρημος Ταρ). Μικρή αύξηση της έντασης του ανέμου σημειώνεται στα παράλια της Δ. Αφρικής (Σιέρα Λεόνε), η οποία ισχυροποιείται κατά τη μεσοπρόθεσμη περίοδο (2041-2060). Στη μακροπρόθεσμη περίοδο (2081-2100), η μεταβολή στην ένταση του ανέμου αυξάνεται περαιτέρω. Ειδικότερα, στις ερήμους Σαχάρα και Ταρ εκτιμάται μείωση που ξεπερνά τα 0,6 m/s, ενώ στη Δ. Αφρική η αύξηση πλησιάζει τα 0,5 m/s. Σημαντική είναι και η αύξηση στο βόρειο τμήμα της Ν. Αμερικής, στη Βραζιλία, όπου ο άνεμος αυξάνεται σε ένταση κατά 0,8 m/s.

Στο μοντέλο **MRI-ESM2.0**, η μεταβολή κατά τη διάρκεια των δύο πρώτων μελλοντικών περιόδων (εγγύς μέλλον (2021-2040) και μεσοπρόθεσμη περίοδος (2041-2060)) αναμένεται να είναι πολύ μικρή σε σχέση με την περίοδο αναφοράς και στατιστικά μη σημαντική. Στην τρίτη περίοδο μελέτης (2081-2100), η ένταση του ανέμου παρουσιάζει αύξηση έως 0,4 m/s στην Κ. Αφρική και στη Ν. Αραβική έρημο, ενώ μείωση που δεν ξεπερνά τα 0,3 m/s εκτιμάται να σημειωθεί στην Α. Μεσόγειο.

Σε παρόμοια επίπεδα υπολογίζεται ο άνεμος στο μοντέλο **GISS-E2-1-G**. Ειδικότερα, η ένταση του ανέμου δεν αναμένεται να σημειώσει σημαντική μεταβολή κατά τις πρώτες δύο μελλοντικές περιόδους μελέτης (εγγύς μέλλον (2021-2040) και μεσοπρόθεσμη περίοδος (2041-2060)). Μικρή αύξηση της τάξεως των 0,4 m/s παρουσιάζεται στη Ν. Σαχάρα, στο δυτικό τμήμα της Κ. Αφρικής και στην έρημο Τάκλα Μακάν. Η αύξηση της έντασης του ανέμου στις συγκεκριμένες περιοχές εκτιμάται να ενισχυθεί κατά το τέλος του αιώνα (2081-2100) όταν φτάνει τα 0,7 m/s.

Σύμφωνα με το μοντέλο **GFDL-ESM4**, η μεταβολή της έντασης του ανέμου κατά τις μελλοντικές περιόδους μελέτης σε σχέση με την περίοδο αναφοράς επικεντρώνεται στην Αφρική και τη Ν. Αμερική. Κατά το εγγύς μέλλον (2021-2040), αναμένεται να εμφανιστεί αύξηση της τάξεως 0,15 m/s και 0,5 m/s στις χώρες του Κόλπου της Γουινέας και την Παταγονία, αντίστοιχα. Η συγκεκριμένη αύξηση μεγαλώνει και εξαπλώνεται στην ευρύτερη περιοχή της ΚΔ Αφρικής, αλλά και σε μεγάλο τμήμα της Ν. Αμερικής κατά τη διάρκεια της επόμενης εικοσαετίας (2041-2060). Στο τέλος του αιώνα (2081-2100), εκτιμάται η ένταση του ανέμου να αυξηθεί στο Σάχελ, στη Ν. Αφρική και στην Ν. Αμερική πλησιάζοντας τα 0,4 m/s, ενώ αναμένεται να παρατηρηθεί μείωση της τάξεως των 0,3 m/s στην Ευρώπη.

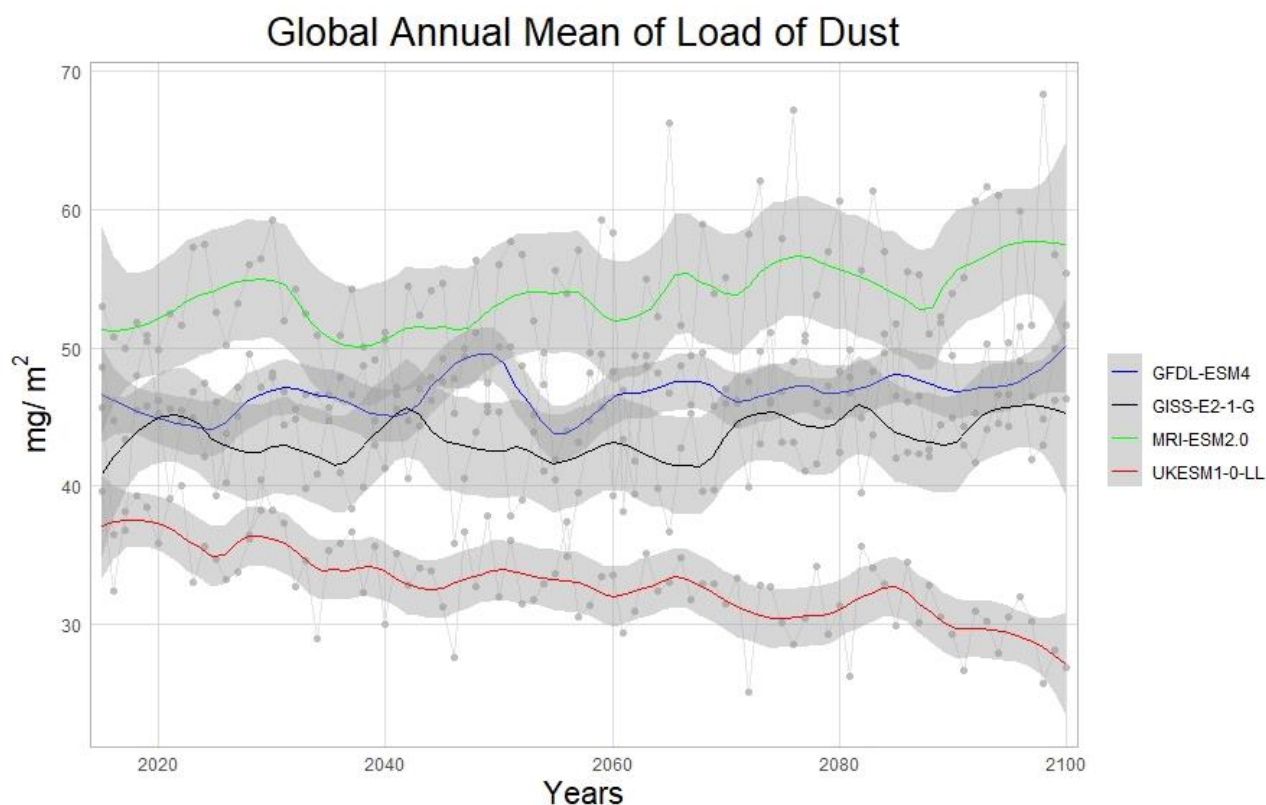




Σχήμα 3.14: Εκτιμώμενη μεταβολή της μέσης επιφανειακής ταχύτητας του ανέμου από τα μοντέλα UKESM1-0-LL, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 (γραμμές) σε σχέση με την περίοδο αναφοράς (1991-2010) για το εγγύς μέλλον (1<sup>η</sup> στήλη) , τη μεσοπρόθεσμη περίοδο (2<sup>η</sup> στήλη), τη μακροπρόθεσμη περίοδο (3<sup>η</sup> στήλη).

### 3.1.4 Φορτίο σκόνης

Στο Σχήμα 3.15 παρουσιάζονται οι παγκόσμιες μέσες ετήσιες τιμές του φορτίου σκόνης για κάθε ένα από τα τέσσερα μοντέλα μελέτης. Οι τάσεις που εμφανίζονται αντιπροσωπεύουν τις ομαλοποιήσεις των προσομοιωμένων τιμών, ενώ στο σκιασμένο τμήμα απεικονίζεται το εύρος των ποσοτήτων για το κάθε μοντέλο. Οι τιμές του φορτίου σκόνης μετρούνται στο συγκεκριμένο σχήμα σε  $\text{mg}/\text{m}^2$  για να γίνονται αντιληπτές οι μεταβολές κατά την διάρκεια του αιώνα. Η μεγαλύτερη μεταβολή εμφανίζεται στο μοντέλο UKESM1-0-LL. Το 2015 μετρήθηκαν  $39,6 \text{ mg}/\text{m}^2$  και κάθε χρόνο παρουσιάζεται πτώση των ποσοτήτων, φτάνοντας το 2100 τα  $26,8 \text{ mg}/\text{m}^2$ . Παρόμοια τάση μεταξύ τους καταγράφεται στα μοντέλα GISS-E2-1-G και GFDL-ESM4, με το GFDL-ESM4 να προσομοιώνει το φορτίο της σκόνης σε αισθητά υψηλότερα επίπεδα από το GISS-E2-1-G. Συγκεκριμένα, το φορτίο της σκόνης κυμαίνεται στα  $44\text{-}48 \text{ mg}/\text{m}^2$  και  $42\text{-}46 \text{ mg}/\text{m}^2$ , αντίστοιχα. Τέλος, οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται στο MRI-ESM2.0. Αναλυτικά, το 2046 αναμένεται φορτίο σκόνης  $45,2 \text{ mg}/\text{m}^2$  (μικρότερη τιμή της χρονοσειράς) και το 2098 το ποσό αυτό ανέρχεται στα  $68,3 \text{ g}/\text{m}^2$  (μεγαλύτερη τιμή).

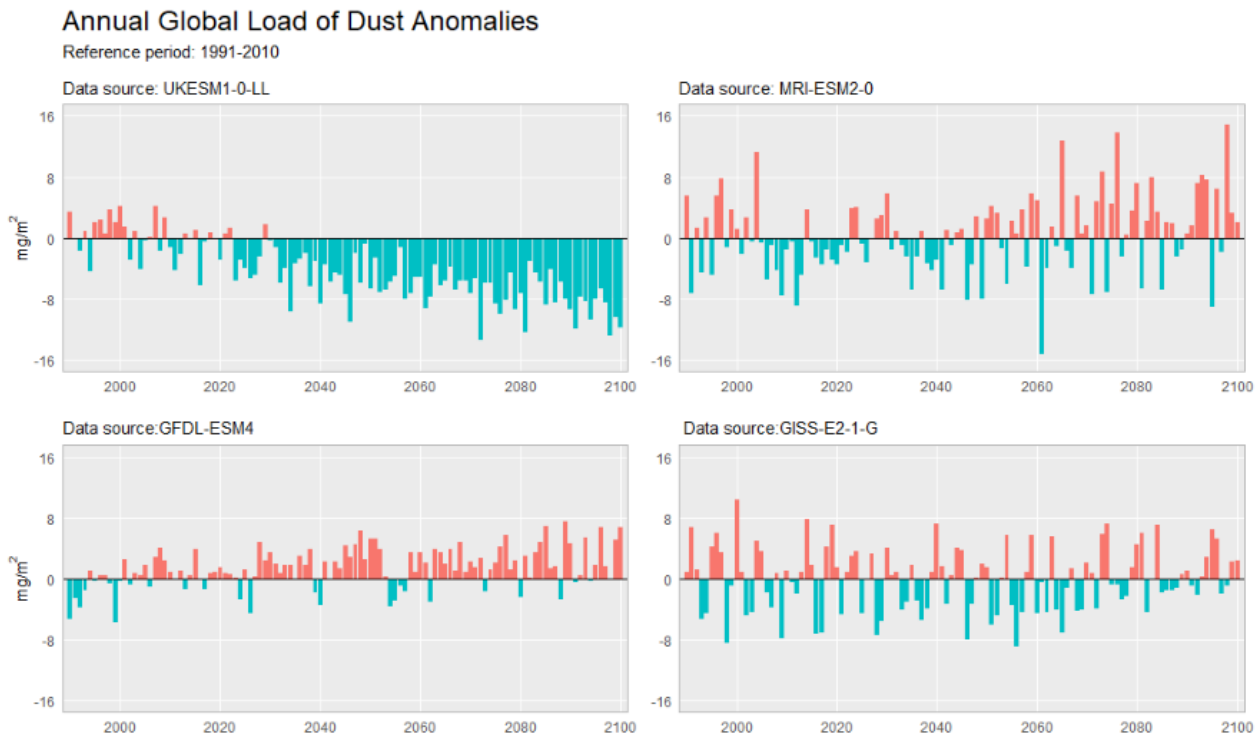


Σχήμα 3.15: Παγκόσμιο μέσο ετήσιο φορτίο σκόνης για κάθε ένα από τα μοντέλα για την περίοδο 2015-2100 (σενάριο SSP3.7).

Στο Σχήμα 3.16 καταγράφονται οι ετήσιες παγκόσμιες ανωμαλίες του φορτίου σκόνης για τα μοντέλα μελέτης για την περίοδο 1991-2100. Από την επεικόνιση των ανωμαλιών σκόνης παρατηρείται πως κάθε μοντέλο παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με τα υπόλοιπα. Συγκεκριμένα, στο UKESM1-0-LL αναμένεται μείωση του φορτίου από το εγγύς μέλλον, η οποία μεγαλώνει με το πέρασμα του χρόνου φτάνοντας τα  $-12 \text{ mg}/\text{m}^2$  το 2100. Αντίθετη εικόνα καταγράφεται στο GFDL-ESM4, κατά το οποίο το φορτίο της σκόνης πρόκειται να παρουσιάσει αυξητική τάση σε όλη την διάρκεια της περιόδου μελέτης, φτάνοντας τα  $8 \text{ mg}/\text{m}^2$



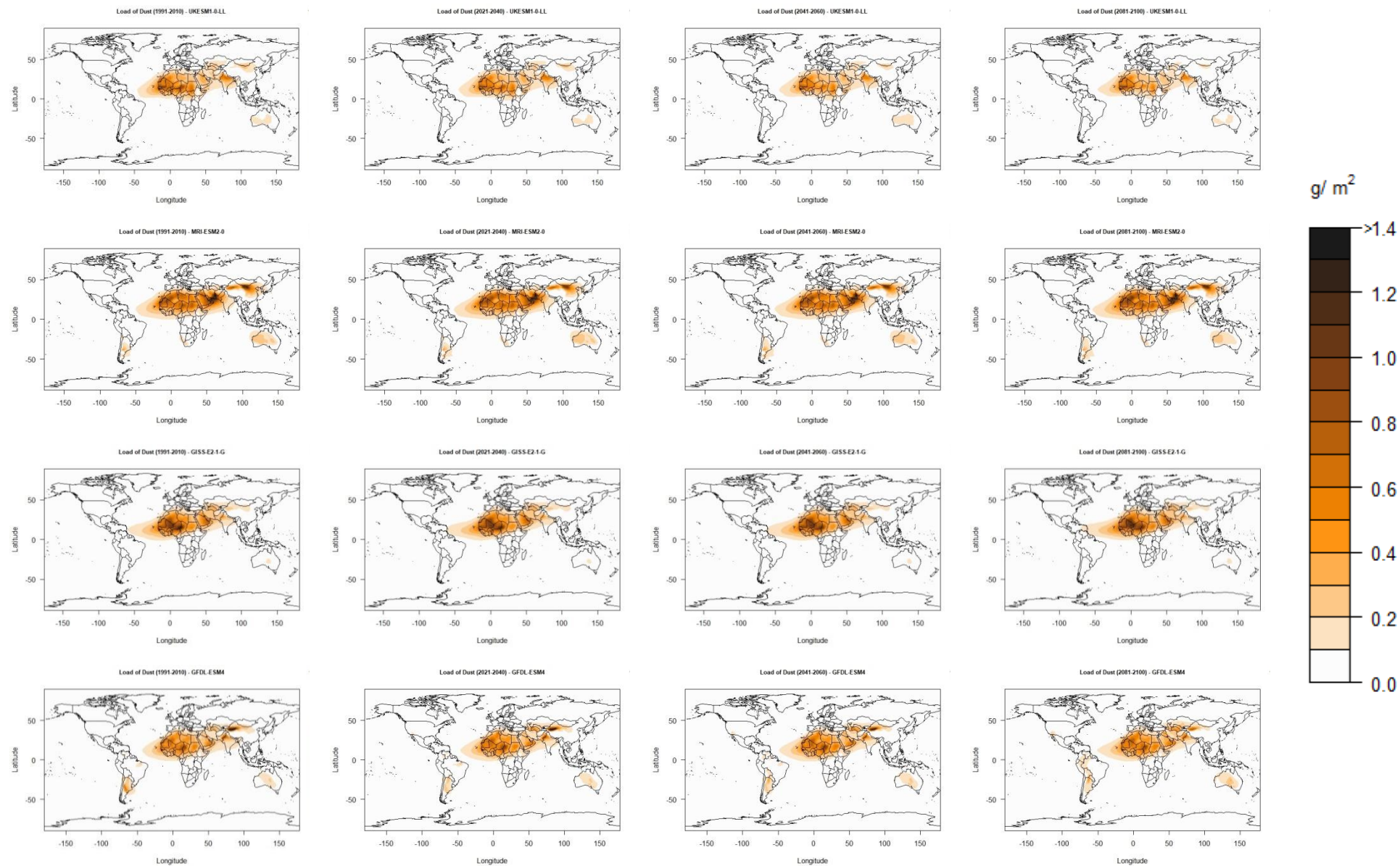
στο τέλος αυτής. Τα άλλα δυο μοντέλα δεν καταγράφουν σαφή τάση των μεταβολών, αλλά παρουσιάζουν μια εικόνα αυξομειώσεων ανά έτη. Αξιοσημείωτη είναι η ύπαρξη των ακραίων στο MRI-ESM2.0, όπου εντοπίζεται η μεγαλύτερη αύξηση το 2098 (+14,9 mg/m<sup>2</sup>) και η μεγαλύτερη μείωση το 2061 (-15,3 mg/m<sup>2</sup>).



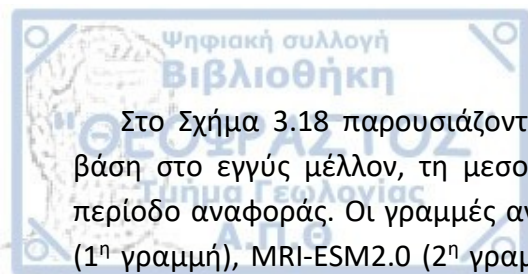
Σχήμα 3.16 Παγκόσμιες μέσες ετήσιες ανωμαλίες του φορτίου σκόνης για κάθε ένα από τα μοντέλα για την περίοδο 1991-2100 (σενάριο SSP3.7).

Στο Σχήμα 3.17 παρουσιάζεται το φορτίο σκόνης που εκτιμάται από κάθε μοντέλο για τις τέσσερις περιόδους μελέτης. Οι γραμμές αντικατοπτρίζουν τα αποτελέσματα των μοντέλων UKESM1-0-LL (1<sup>η</sup> γραμμή), MRI-ESM2.0 (2<sup>η</sup> γραμμή), GISS-E2-1-G (3<sup>η</sup> γραμμή), GFDL-ESM4 (4<sup>η</sup> γραμμή), και οι στήλες την ιστορική περίοδο (1<sup>η</sup> στήλη) και τις τρεις μελλοντικές περιόδους (εγγύς μέλλον - 2<sup>η</sup> στήλη), μεσοπρόθεσμη περίοδος - 3<sup>η</sup> στήλη, μακροπρόθεσμη περίοδος - 4<sup>η</sup> στήλη).

Στο μοντέλο **UKESM1-0-LL** το μεγαλύτερο φορτίο σημειώνεται στην Κ. Αφρική και στην έρημο Ταρ (ΒΔ Ινδία), το οποίο με την πάροδο του χρόνου ελαττώνεται αισθητά. Η μέγιστη τιμή του εμφανίζεται κατά την περίοδο αναφοράς φτάνοντας τα 0,9 g/m<sup>2</sup>. Παρόμοια εικόνα παρουσιάζει και το μοντέλο **GISS-E2-1-G**, με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση σκόνης να πλησιάζει τα 1,2 g/m<sup>2</sup>. Στο μοντέλο **MRI-ESM2.0**, σημαντικά φορτία σκόνης εντοπίζονται σε τρεις ερημικές περιοχές, και ειδικότερα στην έρημο Σαχάρα, την έρημο Γκόμπι και την έρημο Λουτ, στις οποίες οι τιμές ξεπερνούν τα 1,4 g/m<sup>2</sup>. Τέλος, στο μοντέλο **GFDL-ESM4**, εκτός από την έρημο Σαχάρα που αποτελεί την κύρια πηγή σκόνης, παρουσιάζονται ακόμα δύο σημαντικές περιοχές. Πρόκειται συγκεκριμένα για την έρημο Τάκλα Μακάν στο βορειοδυτικό άκρο της Κίνας, όπου κατά την περίοδο αναφοράς οι τιμές ξεπερνούν τα 1,5 g/m<sup>2</sup>, και για την έρημο Ταρ στη ΒΔ Ινδία.



Σχήμα 3.17: Εκτιμώμενο φορτίο σκόνης από τα μοντέλα UKESM1-0-LL, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 (γραμμές) για τις τέσσερις μελετούμενες περιόδους (στήλες).

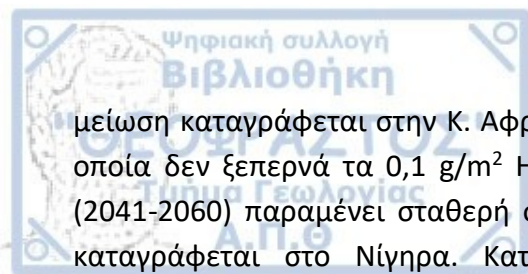


Στο Σχήμα 3.18 παρουσιάζονται οι εκτιμώμενες μεταβολές του φορτίου σκόνης σε ετήσια βάση στο εγγύς μέλλον, τη μεσοπρόθεσμη και τη μακροπρόθεσμη περίοδο σε σχέση με την περίοδο αναφοράς. Οι γραμμές αντικατοπτρίζουν τα αποτελέσματα των μοντέλων UKESM1-0-LL (1<sup>η</sup> γραμμή), MRI-ESM2.0 (2<sup>η</sup> γραμμή), GISS-E2-1-G (3<sup>η</sup> γραμμή), GFDL-ESM4 (4<sup>η</sup> γραμμή), και οι στήλες τις διαφορές του εγγύς μέλλοντος (1<sup>η</sup> στήλη), της μεσοπρόθεσμης περιόδου (2<sup>η</sup> στήλη) και της μακροπρόθεσμης περιόδου (4<sup>η</sup> στήλη).

Το μοντέλο **UKESM1-0-LL** (1<sup>η</sup> γραμμή σχήματος) επικεντρώνεται κυρίως στη μεταβολή του φορτίου σκόνης στην Αφρικανική ήπειρο και σε τρεις ερημικές περιοχές στην Ασία. Κατά το εγγύς μέλλον (2021-2040) αναμένεται μείωση κατά 0,2 g/m<sup>2</sup> στο κεντρικό τμήμα της ηπείρου, νότια της ερήμου Σαχάρα όπου εντοπίζεται η ερημική περιοχή Σάχελ. Επιπλέον, το συγκεκριμένο μοντέλο δείχνει μία μικρή μείωση της τάξεως των 0,1 g/m<sup>2</sup> στη ΒΑ Ινδία, την περιοχή που επηρεάζεται από την έρημο Ταρ. Στη μεσοπρόθεσμη περίοδο (2041-2060), η μείωση του φορτίου σκόνης στο Σάχελ είναι ακόμα μεγαλύτερη, φτάνοντας τα 0,35 g/m<sup>2</sup>, ενώ η αντίστοιχη μείωση στη Ινδία πλησιάζει τα 0,3 g/m<sup>2</sup>. Μεταβολές εμφανίζονται και σε δυο ακόμα ερημικές περιοχές της Ασίας. Συγκεκριμένα, στην έρημο Καρακούμ και στα σύνορα Κίνας-Μογγολίας, περιοχή που επηρεάζεται από την έρημο Γκόμπι, παρουσιάζεται μείωση της τάξεως των 0,15 g/m<sup>2</sup>. Στο τέλος του αιώνα (2081-2100) αναμένεται σημαντικότερη ελάττωση που ξεπερνά τα 0,5 g/m<sup>2</sup> στην Κ. Αφρική και τα 0,3 g/m<sup>2</sup> στην έρημο Ταρ. Οι μεταβολές στις ερήμους Καρακούμ και Γκόμπι παραμένουν στα ίδια επίπεδα με αυτές που κυμαίνονταν κατά την μεσοπρόθεσμη περίοδο.

Στην δεύτερη γραμμή του σχήματος παρουσιάζονται οι εκτιμήσεις του μοντέλου **MRI-ESM2.0** για τη μεταβολή του φορτίου σκόνης κατά τις τρεις μελλοντικές περιόδους σε σχέση με τις τιμές που σημειώνονται στην περίοδο αναφοράς. Η εικόνα που προβάλλεται είναι διαφορετική σε σχέση με αυτή του μοντέλου UKESM1-0-LL. Κατά το εγγύς μέλλον (2021-2040), το φορτίο σκόνης αναμένεται να παρουσιάσει μικρή αύξηση 0,03 g/m<sup>2</sup> στο Σουδάν (Α. Σαχάρα) και στη Δ. Σαχάρα, ενώ μικρή μείωση αναμένεται στη Σάχελ. Μείωση 0,2 g/m<sup>2</sup> σημειώνεται στην έρημο Γκόμπι, ενώ η ελάχιστη μείωση που απεικονίζεται στην έρημο Λουτ δεν είναι στατιστικά σημαντική. Στη μεσοπρόθεσμη περίοδο (2041-2060), οι μεταβολές που σημειώθηκαν στην Α. Σαχάρα και την έρημο Γκόμπι παραμένουν σταθερές. Η ελάττωση της τάξεως 0,15 g/m<sup>2</sup> του φορτίου σκόνης στην Αραβία και στην έρημο Λουτ είναι πλέον στατιστικά σημαντική. Στο βόρειο τμήμα της Σαχάρα φαίνεται να δημιουργείται ένα δίπολο, με μία στατιστικά μη σημαντική αύξηση στη Δ. Σαχάρα και μια μικρή μείωση στο μεσογειακό τμήμα της ερήμου, στην Αίγυπτο και Λιβύη. Στην τελευταία εικοσαετία του αιώνα (2081-2100), η αύξηση στο βορειοδυτικό τμήμα της Σαχάρα μεγαλώνει φτάνοντας τα 0,18 g/m<sup>2</sup>, ενώ η μείωση στη ΒΑ Αφρική αυξάνεται στα 0,14 g/m<sup>2</sup>. Αξιοσημείωτη είναι η αύξηση του φορτίου σκόνης στην έρημο Τάκλα Μακάν και η εξισορρόπηση της μείωσης στην έρημο Γκόμπι, σε σχέση με τις προηγούμενες περιόδους, κατά το τέλος του αιώνα. Καθίσταται ξεκάθαρο το γεγονός πως η προσέγγιση που ακολουθείται στο μοντέλο **MRI-ESM2.0** άφορα σε μία σημαντική αύξηση του φορτίου της σκόνης στη Δ. Αφρική και μια μείωση στο βορειοανατολικό τμήμα της ερήμου Σαχάρα.

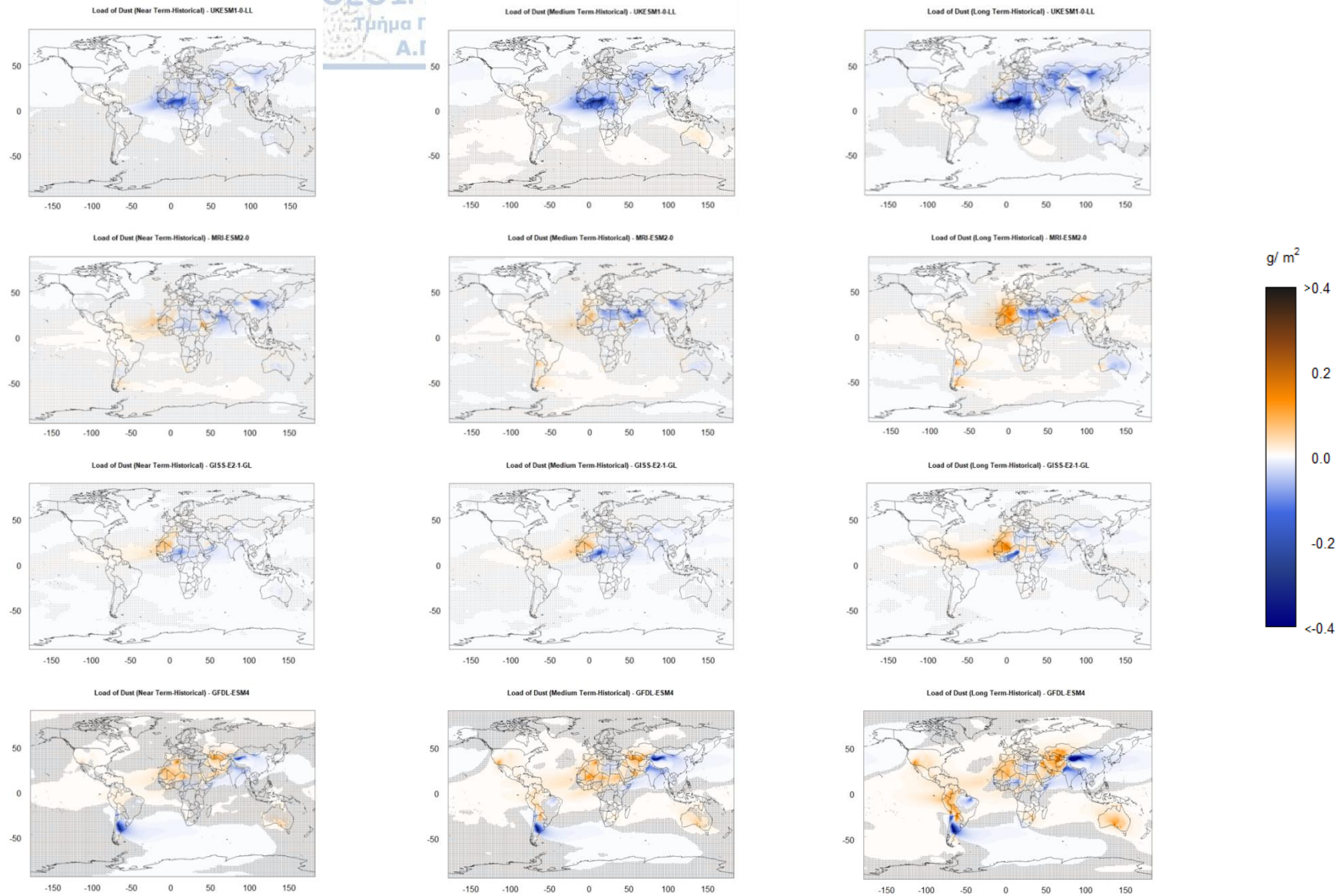
Ελάχιστες μεταβολές στο φορτίο σκόνης παρουσιάζονται στο **μοντέλο GISS-E2-1-G** για τις τρεις μελλοντικές περιόδους (3<sup>η</sup> γραμμή σχήματος). Στο εγγύς μέλλον (2021-2040) παρατηρείται μία αύξηση στο φορτίο της σκόνης στο δυτικό τμήμα της Σαχάρα της τάξεως των 0,15 g/m<sup>2</sup>, ενώ



μείωση καταγράφεται στην Κ. Αφρική, και ειδικότερα στις περιοχές του Νίγηρα και του Τσαντ, η οποία δεν ξεπερνά τα  $0,1 \text{ g/m}^2$ . Η κατάσταση κατά τη διάρκεια της μεσοπρόθεσμης περιόδου (2041-2060) παραμένει σταθερή στο μεγαλύτερο τμήμα της Σαχάρας με μια μικρή αύξηση να καταγράφεται στο Νίγηρα. Κατά τη μακροπρόθεσμη περίοδο (2081-2100) φαίνεται να δημιουργείται ένα δίπολο ανάμεσα σε αυτές τις προαναφερθέντες δυο περιοχές, Δ. Σαχάρα και Νίγηρας, με την αύξηση και μείωση να κυμαίνονται στα  $0,2 \text{ g/m}^2$ , αντίστοιχα.

Τέλος, στην τέταρτη γραμμή του σχήματος παρουσιάζονται οι εκτιμήσεις του μοντέλου **GFDL-ESM4** για τη μεταβολή του φορτίου σκόνης κατά τις τρεις μελλοντικές περιόδους σε σχέση με τις τιμές που σημειώνονται στην περίοδο αναφοράς. Ειδικότερα, σημαντικές μεταβολές εμφανίζονται στην Αφρική, την Ασία και την Αμερική. Συγκεκριμένα, στις αρχές του αιώνα (2021-2040) αναμένεται αύξηση  $0,2 \text{ g/m}^2$  στη Δ. Αφρική, η οποία φτάνει έως τα  $0,27 \text{ g/m}^2$  στην Αλγερία. Παρόμοια αύξηση εντοπίζεται και στην έρημο Καρακούμ. Σημαντική μείωση της τάξεως των  $0,33 \text{ g/m}^2$  εμφανίζεται στην έρημο Τάκλα Μακάν, καθώς και στην έρημο της Παταγονίας στη Ν. Αμερική. Κατά τη μεσοπρόθεσμη περίοδο (2041-2060), η κατάσταση στη περιοχή της Σαχάρα παραμένει σταθερή με τις τιμές να κυμαίνονται στα  $0,2 \text{ g/m}^2$ . Σημαντική ελάττωση του φορτίου σκόνης παρουσιάζεται στην έρημο Τάκλα Μακάν και στην Παταγονία, ενώ στην έρημο Καρακούμ το φορτίο μειώνεται κατά  $0,25 \text{ g/m}^2$ . Στην μακροπρόθεσμη περίοδο (2081-2100), η κύρια μεταβολή αναμένεται να παρουσιαστεί στην Ασιατική ήπειρο. Αναλυτικά, πρόκειται για μία αύξηση του φορτίου σκόνης στα ίδια επίπεδα με εκείνη των προηγούμενων ετών ( $0,3 \text{ g/m}^2$ ). Η μείωση στην έρημο Τάκλα Μακάν στην Κίνα αγγίζει πλέον τα  $1,1 \text{ g/m}^2$ , ενώ αρχίζει να εμφανίζεται ελάττωση και στην έρημο Ταρ κατά  $0,2 \text{ g/m}^2$ . Στην Αφρική και τη Ν. Αμερική παρατηρείται η ίδια εικόνα με εκείνη της μεσοπρόθεσμης περιόδου.



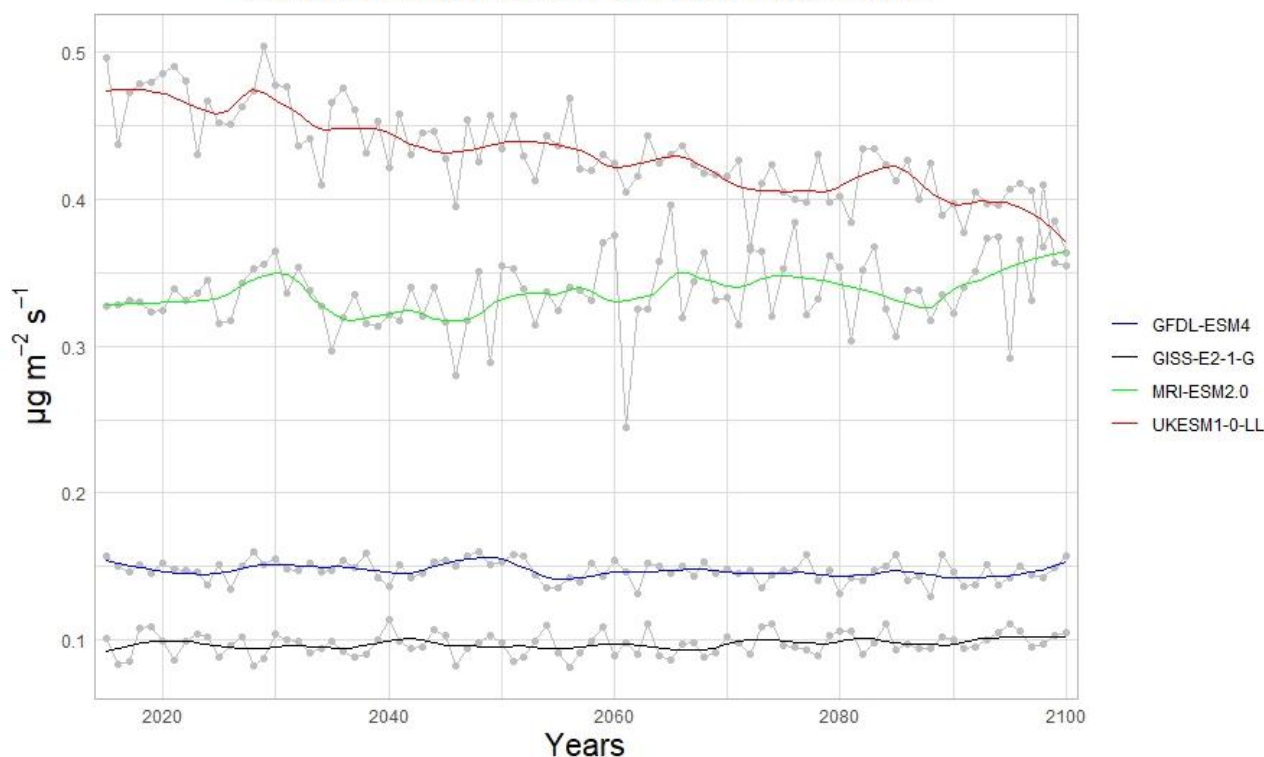


Σχήμα 3.18: Εκτιμώμενη μεταβολή του μέσου φορτίου σκόνης από τα μοντέλα UKESM1-0-LL, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 (γραμμές) σε σχέση με την περίοδο αναφοράς (1991-2010) για το εγγύς μέλλον (1<sup>η</sup> στήλη) , τη μεσοπρόθεσμη περίοδο (2<sup>η</sup> στήλη), τη μακροπρόθεσμη περίοδο (3<sup>η</sup> στήλη).

### 3.1.5 Εκπομπές σκόνης

Στο Σχήμα 3.19 παρουσιάζονται οι παγκόσμιες μέσες ετήσιες τιμές των εκπομπών σκόνης από το 2015 μέχρι το 2100 για τα τέσσερα μοντέλα μελέτης. Με τις γκρι καμπύλες παρουσιάζονται οι πραγματικές τιμές που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις των μοντέλων, ενώ με τα χρώματα οι ομαλοποιημένες τάσεις (UKESM1-0-LL -κόκκινο, GISS-E2-1-G -μαύρο, MRI-ESM2.0 -πράσινο, GFDL-ESM4 -μπλε). Σύμφωνα με τα μοντέλα GISS-E2-1-G και GFDL-ESM4, οι εκπομπές της σκόνης κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα που δεν ξεπερνούν τα  $0,10$  και τα  $0,15 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  αντίστοιχα, με τις τάσεις να μην εμφανίζουν σημαντικές διακυμάνσεις με την πάροδο του χρόνου. Σε σταθερά και κατά περιόδους αυξητικά επίπεδα παρουσιάζονται οι εκπομπές σύμφωνα με το μοντέλο MRI-ESM2.0, όπου κατά το εγγύς μέλλον καταγράφονται τιμές περίπου  $0,32 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , οι οποίες στο τέλος του αιώνα πλησιάζουν τα  $0,36 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Έκδηλη είναι και η πτωτική τάση των παγκόσμιων ετησίων εκπομπών σκόνης με βάση το μοντέλο UKESM1-0-LL. Αναλυτικά, το 2015 οι τιμές είναι στα  $0,48 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  και καταλήγουν στα  $0,36 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  κατά την μακροπρόθεσμη περίοδο.

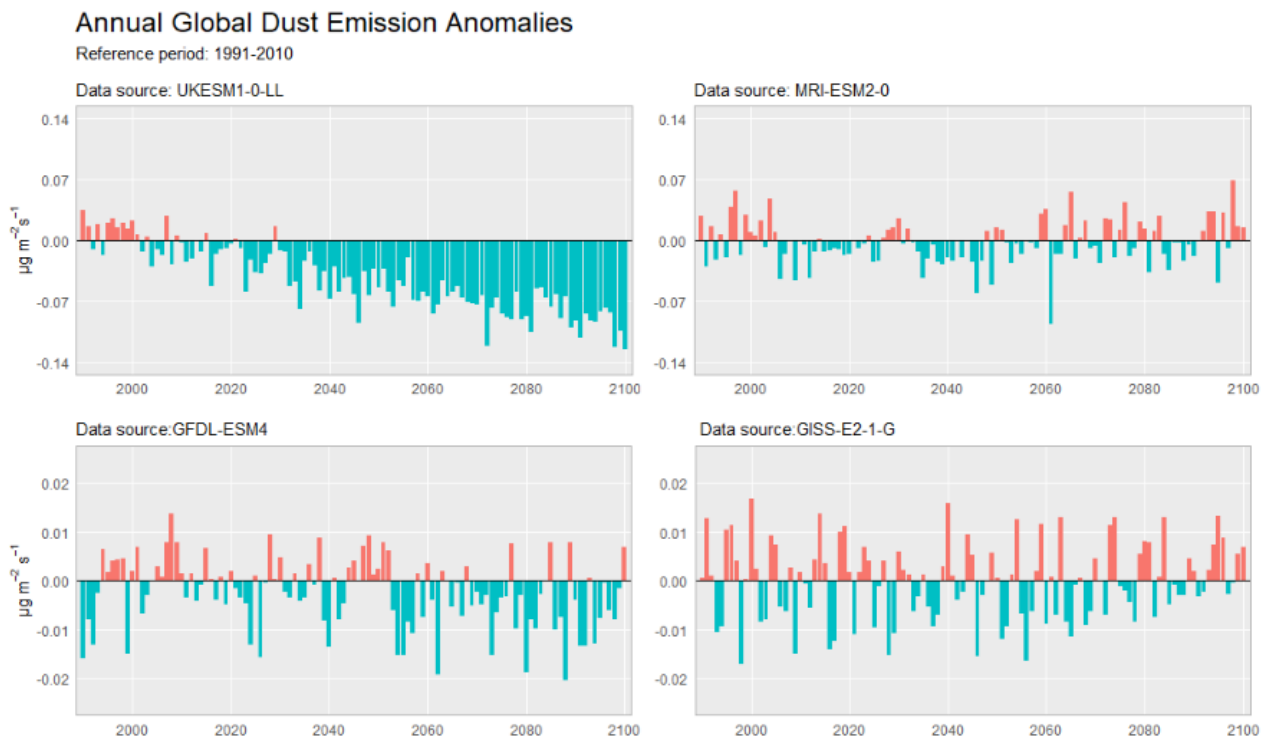
Global Annual Mean of Dust Emissions



Σχήμα 3.19: Παγκόσμιες μέσες ετήσιες εκπομπές σκόνης για κάθε ένα από τα μοντέλα για την περίοδο 2015-2100 (σενάριο SSP3.7).

Στο Σχήμα 3.20 παρουσιάζονται οι ετήσιες παγκόσμιες ανωμαλίες των εκπομπών σκόνης για τα μοντέλα μελέτης την περίοδο 1991-2100. Οι τάσεις των ανωμαλιών των εκπομπών σκόνης εμφανίζουν παρόμοια πορεία με αυτών του φορτίου σκόνης για το εκάστοτε μοντέλο αντίστοιχα. Αναλυτικά, καταγράφεται μία σημαντική μείωση των εκπομπών από την αρχή του αιώνα στο μοντέλο UKESM1-0-LL, που κορυφώνεται το 2100, φτάνοντας τα  $-13 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Παρόμοια πτωτική τάση, ανάλογη με αυτή του φορτίου σκόνης, αλλά σε σαφώς μικρότερα επίπεδα – δεν ξεπερνά τα  $0,02 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  – συμβαίνει στο GFDL-ESM4. Στο μοντέλο αυτό η μείωση καταγράφεται στο δεύτερο μισό του αιώνα, σε αντίθεση με την πρώτη πενήνταετία κατά την οποία εμφανίζονται

περίοδοι με μικρή αύξηση. Αυξομειώσεις κατά την διάρκεια των ετών παρουσιάζονται στα μοντέλα MRI-ESM2.0 και GISS-E2-1-G με την διάφορα να εντοπίζονται στην τάξη μεγέθους των μεταβολών. Συγκεκριμένα το πρώτο κυμαίνεται στα επίπεδα του UKESM1-0-LL, ενώ το δεύτερο σε αυτά του GFDL-ESM4.

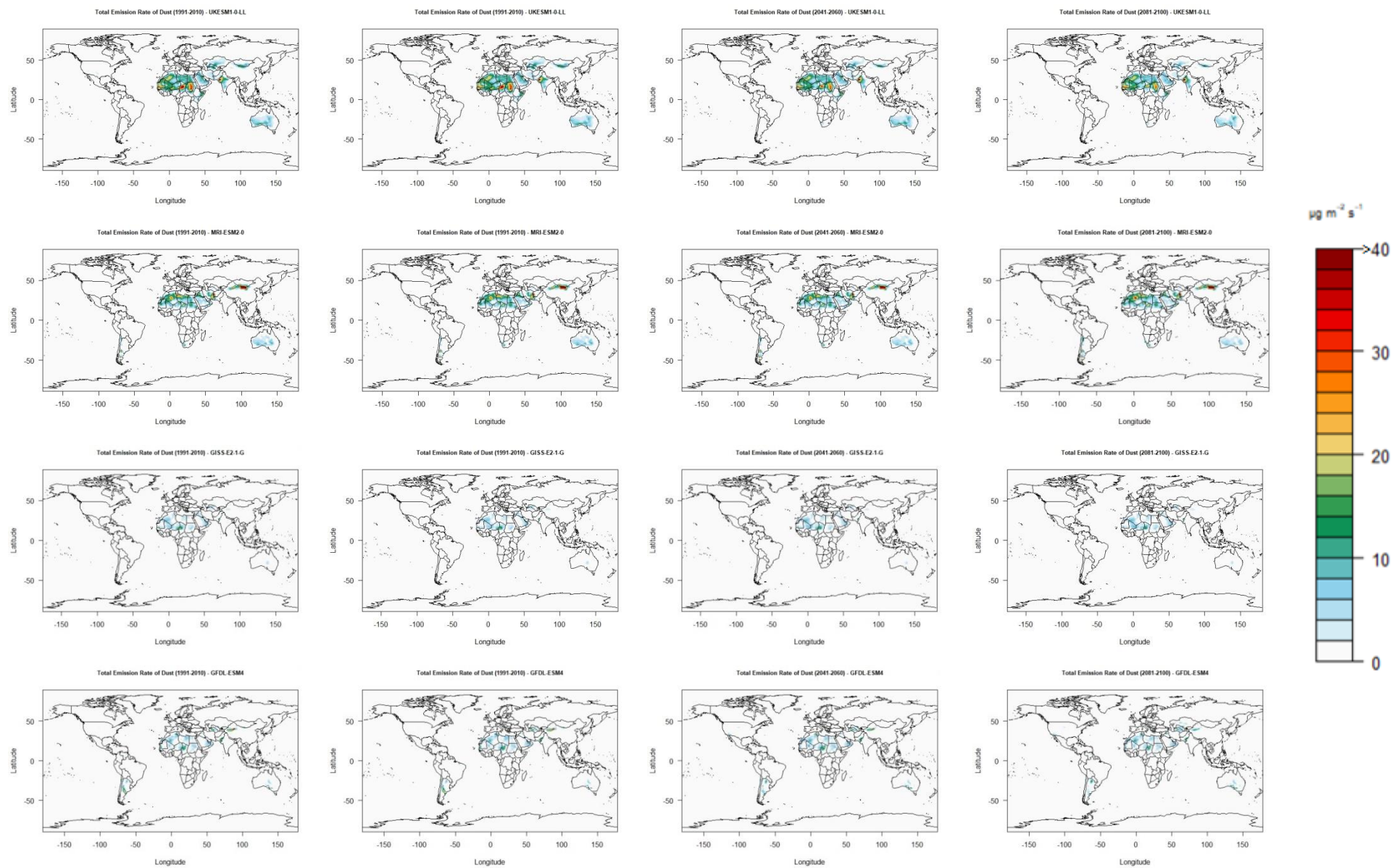


Σχήμα 3.20 Παγκόσμιες μέσες ετήσιες ανωμαλίες των εκπομπών σκόνης για κάθε ένα από τα μοντέλα για την περίοδο 1991-2100 (σενάριο SSP3.7).

Στο Σχήμα 3.21 παρουσιάζεται η κατανομή των εκπομπών σκόνης που εκτιμάται από κάθε μοντέλο που λαμβάνεται υπόψη στην παρούσα εργασία για τις μελετώμενες μελλοντικές περιόδους. Ειδικότερα, οι γραμμές αντικατοπτρίζουν τα αποτελέσματα των μοντέλων UKESM1-0-LL (1<sup>η</sup> γραμμή), MRI-ESM2.0 (2<sup>η</sup> γραμμή), GISS-E2-1-G (3<sup>η</sup> γραμμή), GFDL-ESM4 (4<sup>η</sup> γραμμή), και οι στήλες την ιστορική περίοδο (1<sup>η</sup> στήλη) και τις τρεις μελλοντικές περιόδους (εγγύς μέλλον - 2<sup>η</sup> στήλη), μεσοπρόθεσμη περίοδος - 3<sup>η</sup> στήλη, μακροπρόθεσμη περίοδος - 4<sup>η</sup> στήλη).

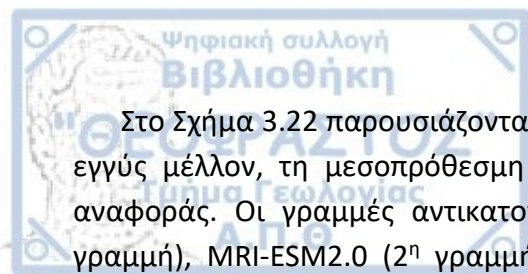
Οι σημαντικότερες εκπομπές σκόνης εμφανίζονται στα μοντέλα **UKESM1-0-LL** και **MRI-ESM2.0**. Στο UKESM1-0-LL, οι εκπομπές της σκόνης σημειώνονται στο κεντρικό και δυτικό τμήμα Σαχάρα και την έρημο Ταρ, αγγίζοντας τα  $35 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Στο MRI-ESM2.0, εντοπίζονται τρεις ερημικές περιοχές με αυξημένες εκπομπές σκόνης. Πρόκειται για τη ΒΔ Σαχάρα, την έρημο Λουτ και την έρημο Γκόμπι, στις οποίες οι τιμές ξεπερνούν τα  $50 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Παρόμοια εικόνα προσομοιώνουν τα μοντέλα **GISS-E2-1-G** και **GFDL-ESM4**, με τις εκπομπές σκόνης να είναι ελαφρώς ανεβασμένες στην Κ. Αφρική, στην περιοχή της Ν. Σαχάρας, και στην έρημο Τάκλα Μακάν. Οι τιμές στις συγκεκριμένες περιοχές κυμαίνονται στα  $10\text{-}20 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .





Σχήμα 3.21: Εκτιμώμενες εκπομπές σκόνης από τα μοντέλα UKESM1-0-LL, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 (γραμμές) για τις τέσσερις μελετούμενες περιόδους (στήλες).

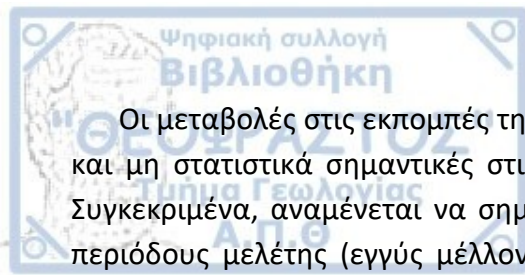




Στο Σχήμα 3.22 παρουσιάζονται οι εκτιμώμενες μεταβολές των ετήσιων εκπομπών σκόνης στο εγγύς μέλλον, τη μεσοπρόθεσμη και τη μακροπρόθεσμη περίοδο σε σχέση με την περίοδο αναφοράς. Οι γραμμές αντικατοπτρίζουν τα αποτελέσματα των μοντέλων UKESM1-0-LL (1<sup>η</sup> γραμμή), MRI-ESM2.0 (2<sup>η</sup> γραμμή), GISS-E2-1-G (3<sup>η</sup> γραμμή), GFDL-ESM4 (4<sup>η</sup> γραμμή), και οι στήλες τις διαφορές του εγγύς μέλλοντος (1<sup>η</sup> στήλη), της μεσοπρόθεσμης περιόδου (2<sup>η</sup> στήλη) και της μακροπρόθεσμης περιόδου (3<sup>η</sup> στήλη).

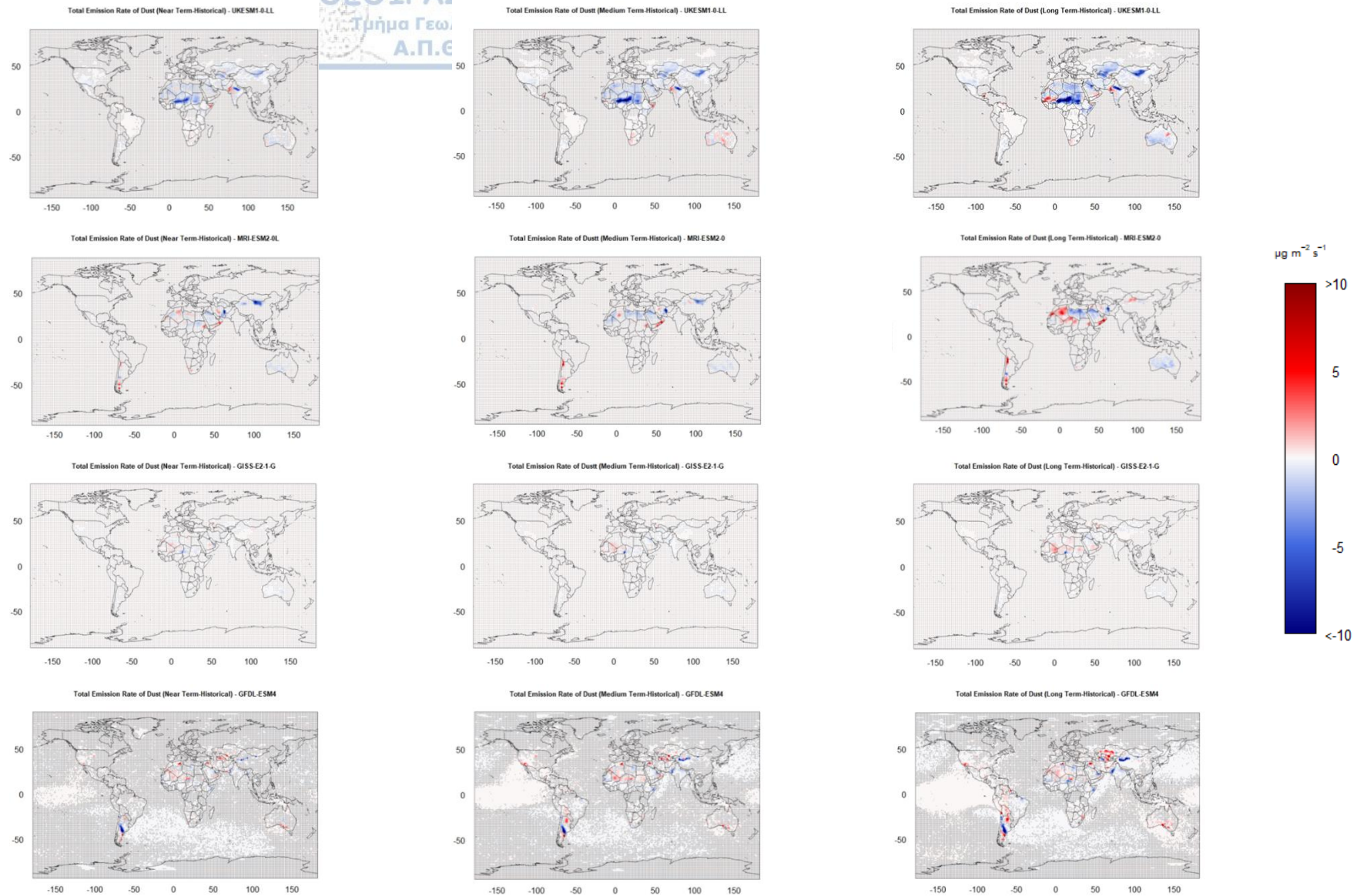
Κατά το εγγύς μέλλον (2021-2040), στο **UKESM1-0-LL** οι μεταβολές στις εκπομπές της σκόνης αναμένεται να επικεντρωθούν σε τρεις ερημικές περιοχές. Η πρώτη και κύρια μεταβολή αποτελεί μείωση και εντοπίζεται στο Σάχελ, πλησιάζοντας τα  $-10 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  σε σχέση με την περίοδο αναφοράς. Η δεύτερη σημαντική μεταβολή των εκπομπών εκδηλώνεται στην περιοχή της Β. Ινδίας, όπου στο δυτικό τμήμα της ερήμου Ταρ παρουσιάζεται αύξηση κατά  $2,4 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  και στο ανατολικό τμήμα μείωση κατά  $3 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Τέλος, μικρή μείωση κατά  $3,2 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  καταγράφεται στις ερήμους Καρακούμ και Γκόμπι. Στη μεσοπρόθεσμη περίοδο (2041-2060), η μείωση ισχυροποιείται φτάνοντας τα  $21 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  στο Σάχελ και την Ινδία, ενώ στις ερήμους Καρακούμ και Γκόμπι η αύξηση εκτιμάται να μεγαλώσει στα  $4,2$  και  $5 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , αντίστοιχα. Σημαντικές αλλαγές παρουσιάζονται στο τέλος του αιώνα (2081-2100). Συγκεκριμένα, στη ερημική περιοχή της Κ. Αφρικής δημιουργείται ένα δίπολο, καθώς στη δυτικό τμήμα της ερήμου σημειώνεται αύξηση της τάξεως των  $5 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , ενώ στο κεντρικό και ανατολικό τμήμα παρατηρείται μείωση που ξεπερνά σε ορισμένες περιοχές τα  $30 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Παρόμοια εικόνα αναμένεται να εκδηλωθεί και στην έρημο Ταρ, στην Ινδία, όπου στο δυτικότερο τμήμα η αύξηση φτάνει τα  $4,8 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  και στο ανατολικότερο η μείωση τα  $8 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Στην έρημο Καρακούμ, η μεταβολή πλησιάζει τα  $6,2 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  και στην έρημο Γκόμπι οι εκπομπές σκόνης ελαττώνονται κατά  $9,8 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

Οι μεταβολές εκπομπών σκόνης που αναμένονται από το μοντέλο **MRI-ESM2.0** παρουσιάζονται στη δεύτερη γραμμή του σχήματος. Όσον αφορά στο εγγύς μέλλον (2021-2040), οι μεταβολές εκτιμάται να επικεντρωθούν στην Ασιατική ήπειρο. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται ισχυρή μείωση των εκπομπών η οποία φτάνει τα  $-10 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  στην έρημο Γκόμπι και τα  $-12 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  στην έρημο Λουτ. Αυξητική τάση που κυμαίνεται σε μικρά επίπεδα ( $2-3 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) αναμένεται να σημειωθεί στη Ν. Αραβική έρημο και το Σουδάν. Μεταβολή στην εικόνα των εκπομπών σκόνης εκτιμάται και στις επόμενες δύο περιόδους μελέτης. Η σημαντική μείωση που λαμβάνει χώρα στην έρημο Γκόμπι σταδιακά μειώνεται, φτάνοντας στα  $5,7 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  στη μεσοπρόθεσμη περίοδο, και καταλήγοντας σε εξισορρόπηση με μία μικρή αύξηση  $+1 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  στο τέλος του αιώνα. Στην έρημο Λουτ, η μείωση φτάνει τις μέγιστες τιμές της στα  $16 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  στη μεσοπρόθεσμη περίοδο, την οποία την επαναφέρει στα προηγούμενα επίπεδα ( $-11 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) έως τη μακροπρόθεσμη. Στο βόρειο τμήμα της Αραβικής ερήμου, η μείωση παραμένει σταθερή στα  $-4 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  σε αντίθεση με το νότιο τμήμα της όπου η αύξηση πλησιάζει τα  $+8 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  κατά την τελευταία μελλοντική περίοδο μελέτης. Η μεγαλύτερη διαφοροποίηση σημειώνεται στην Αφρικανική ήπειρο. Αναλυτικά, κατά τη μεσοπρόθεσμη περίοδο αναμένεται μείωση στις εκπομπές σκόνης στο ευρύτερο κομμάτι της Β. Σαχάρα και Δ. Αφρικής. Στη μακροπρόθεσμη περίοδο, οι εκπομπές σκόνης στη ΒΔ και Κ. Σαχάρα εκτιμάται ότι θα αυξηθούν και θα ξεπεράσουν τα  $5,5 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , ενώ στο βορειοανατολικό τμήμα της Αφρικής θα εξακολουθεί να σημειώνεται σταθερή μείωση των εκπομπών στα  $5 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .



Οι μεταβολές στις εκπομπές της σκόνης, σύμφωνα με το μοντέλο **GISS-E2-1-G**, είναι ελάχιστες και μη στατιστικά σημαντικές στις περισσότερες περιοχές ενδιαφέροντος (ερημικές περιοχές). Συγκεκριμένα, αναμένεται να σημειωθεί μία μικρή μείωση στο Νίγηρα, όπου στις δύο πρώτες περιόδους μελέτης (εγγύς μέλλον και μεσοπρόθεσμη περίοδος) δεν ξεπερνά τα  $-3 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Μικρή διαφοροποίηση εκτιμάται να σημειωθεί κατά τη μακροπρόθεσμη περίοδο (2081-2100), όπου παρατηρείται μία αύξηση  $+3 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  στο δυτικό τμήμα του Σαχέλ, στην περιοχή του Μάλι, και μία ενίσχυση της μείωσης στο Νίγηρα που αγγίζει τα  $7 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

Αντίθετη εικόνα παρουσιάζεται στο μοντέλο **GFDL-ESM4**, κατά το οποίο οι μεταβολές στις εκπομπές σκόνης σημειώνονται σε πολλές ερημικές περιοχές του πλανήτη. Συγκεκριμένα, κατά το εγγύς μέλλον (2021-2040) αναμένεται να παρατηρηθεί μείωση των εκπομπών σκόνης στην έρημο Τάκλα Μακάν κατά  $10,2 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Παρόμοια κατάσταση εκτιμάται να παρουσιαστεί στις ερημικές περιοχές της Αραβίας και της Δ. Ινδίας, όπου η μείωση κυμαίνεται στα  $2-3 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Αντιθέτως, μεγάλη αύξηση στις εκπομπές σκόνης καταγράφονται από τις αρχές του αιώνα στην έρημο Καρακούμ ( $+6 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Όσον αφορά στην Αφρικανική έρημο, αναμένεται μείωση των εκπομπών κατά  $3 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  στη Β. Αλγερία και στη ΝΔ Σαχάρα. Οι μειώσεις και αυξήσεις που ξεκίνησαν κατά το εγγύς μέλλον εκτιμάται πως θα συνεχιστούν την επομένη εικοσαετία (μεσοπρόθεσμη περίοδος) και θα φτάσουν έως το τέλος του αιώνα. Στην μακροπρόθεσμη περίοδο (2081-2100), η μείωση των εκπομπών στην έρημο Τάκλα Μακάν αγγίζει τα  $-29,3 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Στις ερήμους της Αραβίας και της Δ. Ινδίας, η μείωση πλησιάζει τα  $6 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Η αύξηση που παρατηρείται από τις προηγούμενες περιόδους στην έρημο Καρακούμ διατηρείται και μάλιστα ενισχύεται, φτάνοντας τα  $+14,6 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Στην Αφρικανική η μείωση των εκπομπών συνεχίζεται μέχρι το τέλος του αιώνα.

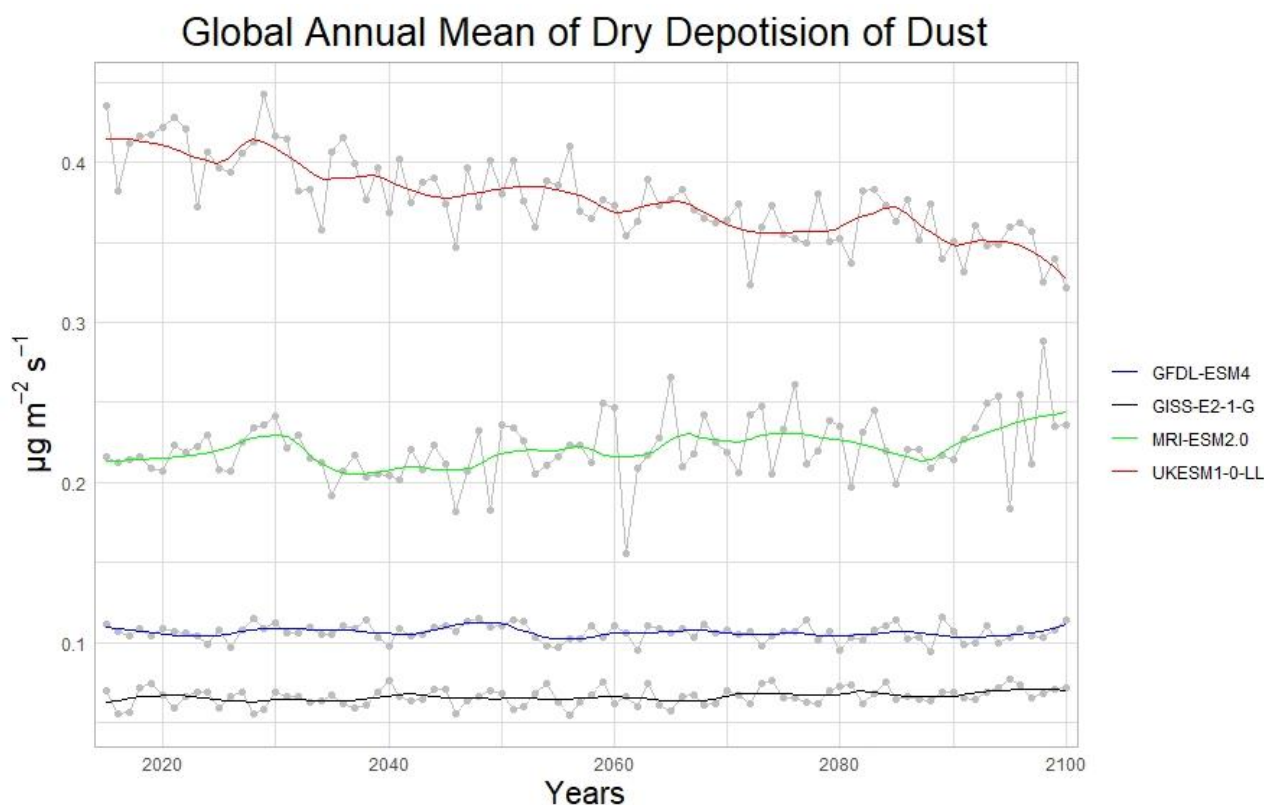


Σχήμα 3.22: Εκτιμώμενη μεταβολή των μέσων εκπομπών σκόνης από τα μοντέλα UKESM1-0-LL, MRI-ESM2-0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 (γραμμές) σε σχέση με την περίοδο αναφοράς (1991-2010) για το εγγύς μέλλον (1<sup>η</sup> στήλη) , τη μεσοπρόθεσμη περίοδο (2<sup>η</sup> στήλη), τη μακροπρόθεσμη περίοδο (3<sup>η</sup> στήλη).



### 3.1.6 Ξηρή εναπόθεση σκόνης

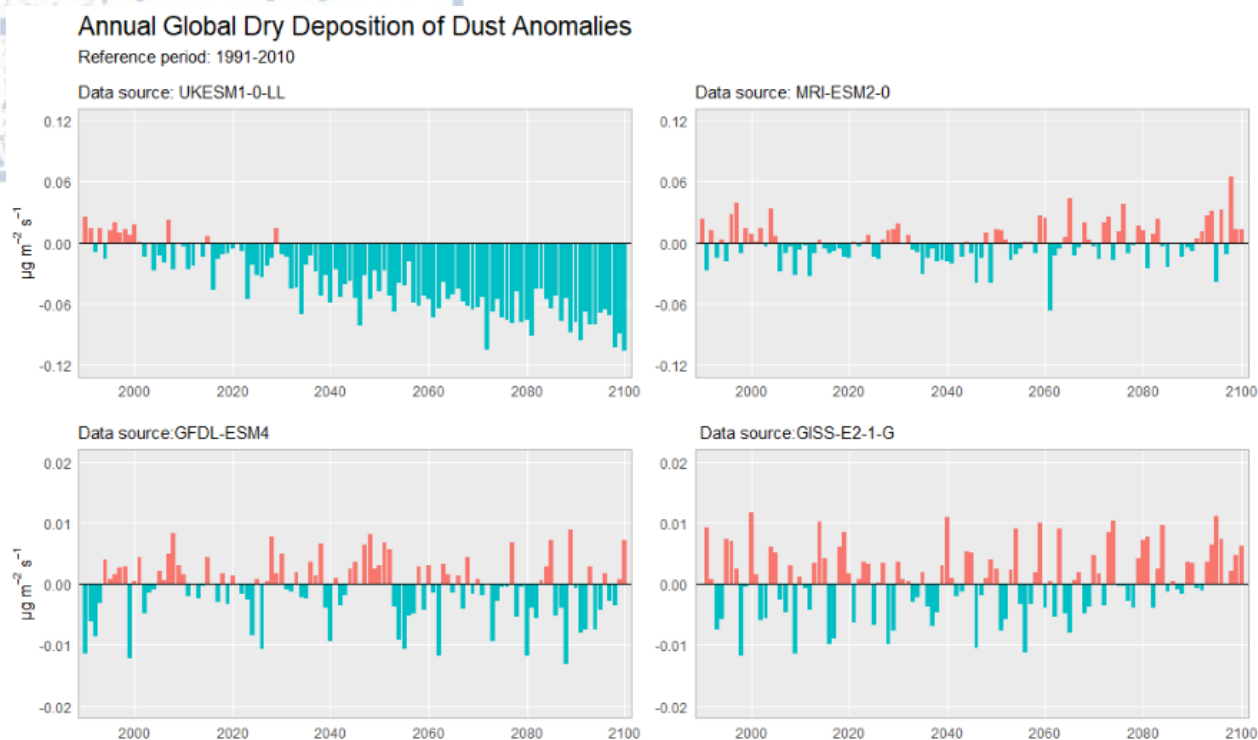
Ίδια εικόνα με εκείνη των εκπομπών εκδηλώνεται στην ξηρή εναπόθεση της σκόνης. Στο Σχήμα 3.23 παρατηρείται η παγκόσμια μέση ετήσια ξηρή εναπόθεση σκόνης για την περίοδο 2015-2100 από τα μελετώμενα GCM. Ακολουθώντας τα πρότυπα των εκπομπών, η ξηρή εναπόθεση σκόνης καταγράφεται με πτωτική τάση στο UKESM1-0-LL, όπου το 2015 έχει τιμή τα  $0,44 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  και στο τέλος του αιώνα τα  $0,32 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Με διάφορες αυξομειώσεις, αλλά καταλήγοντας σε υψηλότερα επίπεδα στη μακροπρόθεσμη περίοδο παρουσιάζεται η τάση από το μοντέλο MRI-ESM2.0, ενώ στα σταθερά αλλά πολύ χαμηλά επίπεδα κυμαίνονται τα μοντέλα GISS-E2-1-G και GFDL-ESM4. Συγκεκριμένα, οι τιμές της ξηρής εναπόθεσης σκόνης από τα προαναφερθέντα μοντέλα είναι: MRI-ESM2.0:  $0,21-0,24 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , GFDL-ESM4:  $0,11 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  και GISS-E2-1-G:  $0,04 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .



Σχήμα 3.23: Παγκόσμια μέση ετήσια ξηρή εναπόθεση σκόνης για κάθε ένα από τα μοντέλα για την περίοδο 2015-2100 (σενάριο SSP3.7).

Στο Σχήμα 3.24 καταγράφονται οι ετήσιες παγκόσμιες ανωμαλίες της ξηρής εναπόθεσης σκόνης για τα μελετούμενα μοντέλα την περίοδο 1991-2100. Στο μοντέλο UKESM1-0-LL σημειώνεται η μεγαλύτερη μείωση των τιμών, με την πτωτική τάση να ξεκάνει στις αρχές του αιώνα και να κορυφώνεται στο τέλος αυτού αγγίζοντας τα  $-0,11 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Η εικόνα στο μοντέλο MRI-ESM2.0 παρουσιάζει εναλλαγές με την μείωση να εμφανίζεται στη μεσοπρόθεσμη μελλοντική περίοδο και την αύξηση στην μακροπρόθεσμη μελλοντική περίοδο. Οι μεταβολές που εκδηλώνονται στα μοντέλα GISS-E2-1-G και GFDL-ESM4 είναι μικρότερης κλίμακας και κυμαίνεται από  $-0,01$  έως  $0,01 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

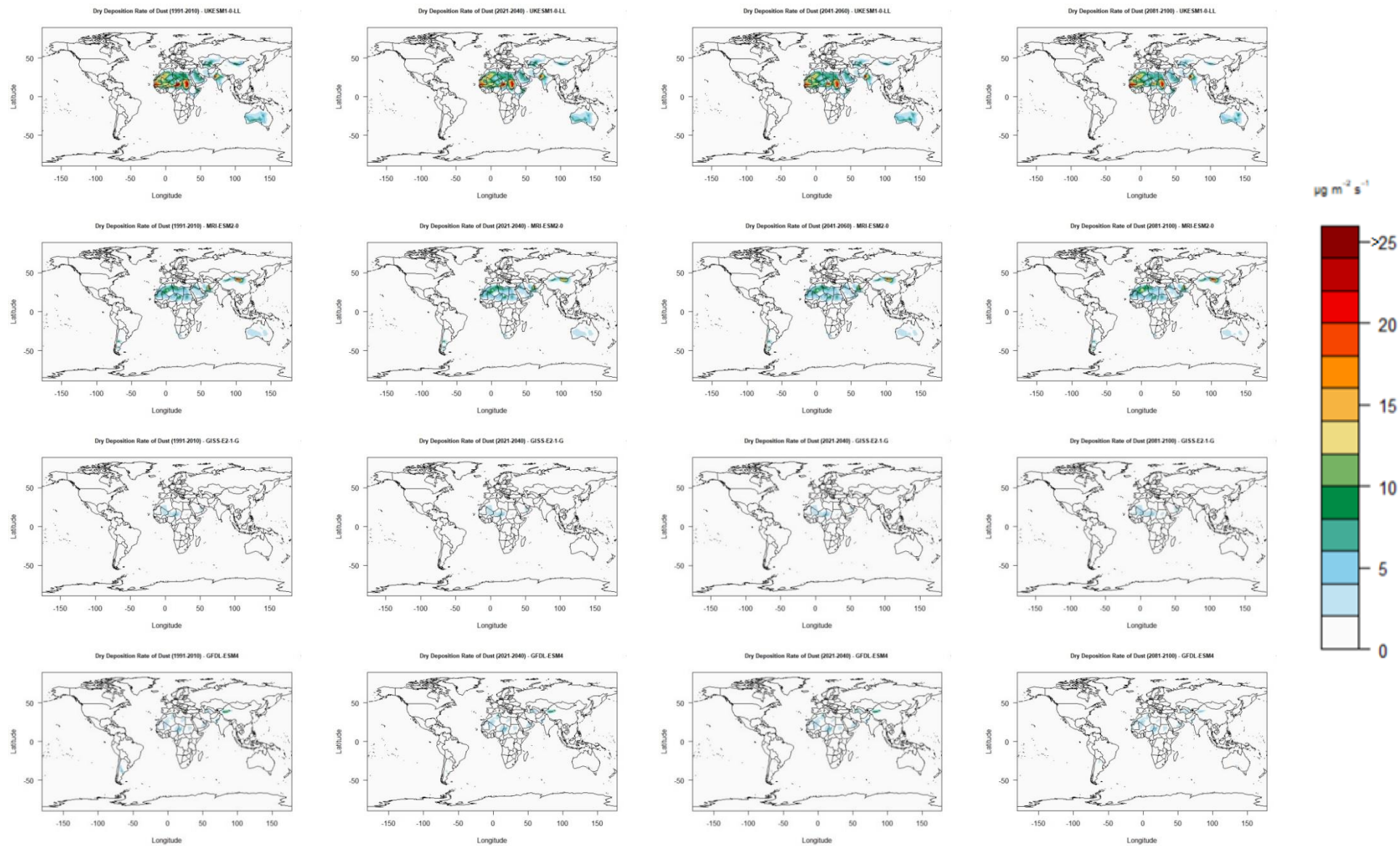




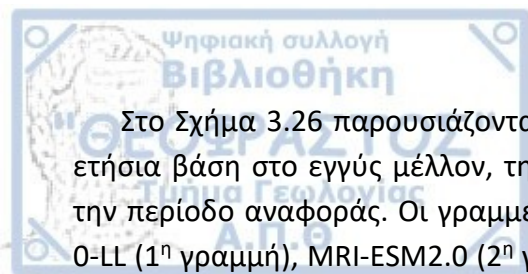
Σχήμα 3.24 Παγκόσμιες μέσες ετήσιες ανωμαλίες της ξηρής εναπόθεσης σκόνης για κάθε ένα από τα μοντέλα για την περίοδο 1991-2100 (σενάριο SSP3.7).

Στο Σχήμα 3.25 παρουσιάζεται η κατανομή της ξηρής εναπόθεσης σκόνης έτσι όπως εκτιμάται από κάθε μοντέλο για τις μελετώμενες μελλοντικές περιόδους. Οι γραμμές αντικατοπτρίζουν τα αποτελέσματα των μοντέλων UKESM1-0-LL (1<sup>η</sup> γραμμή), MRI-ESM2.0 (2<sup>η</sup> γραμμή), GISS-E2-1-G (3<sup>η</sup> γραμμή), GFDL-ESM4 (4<sup>η</sup> γραμμή), και οι στήλες την ιστορική περίοδο (1<sup>η</sup> στήλη) και τις τρεις μελλοντικές περιόδους (εγγύς μέλλον - 2<sup>η</sup> στήλη), μεσοπρόθεσμη περίοδος - 3<sup>η</sup> στήλη, μακροπρόθεσμη περίοδος - 4<sup>η</sup> στήλη).

Η κύρια ξηρή εναπόθεση σκόνης εντοπίζεται στην έρημο Σαχάρα στο μοντέλο **UKESM1-0-LL** κατά την περίοδο αναφοράς (1991-2010) και πλησιάζει τα  $25 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Εξίσου σημαντική, αλλά σε χαμηλότερα επίπεδα καταγράφεται στην έρημο Ταρ. Το δεύτερο μοντέλο στο οποίο εμφανίζεται να υπάρχει μεγάλη ξηρή εναπόθεση σκόνης είναι το μοντέλο **MRI-ESM2.0**, κατά το οποίο το μεγαλύτερο τμήμα της Β. Σαχάρα, καθώς και η έρημος Γκόμπι, υφίστανται ποσά σκόνης που σε ορισμένες περιοχές φτάνουν τα  $20 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Η εικόνα στα μοντέλα **GISS-E2-1-G** και **GFDL-ESM4** είναι παρόμοια. Συγκεκριμένα, παρατηρούνται μικρές τιμές ξηρής εναπόθεσης έως  $8 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , κυρίως στις ερήμους Σαχάρα και Τάκλα Μακάν.



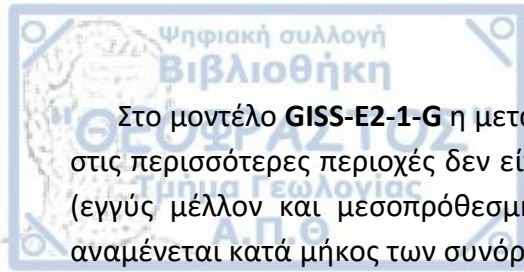
Σχήμα 3.25: Εκτιμώμενη κατανομή ξηρής εναπόθεσης σκόνης από τα μοντέλα UKESM1-0-LL, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 (γραμμές) για τις τέσσερις μελετούμενες περιόδους (στήλες).



Στο Σχήμα 3.26 παρουσιάζονται οι εκτιμώμενες μεταβολές της ξηρής εναπόθεσης σκόνης σε ετήσια βάση στο εγγύς μέλλον, τη μεσοπρόθεσμη και τη μακροπρόθεσμη περίοδο σε σχέση με την περίοδο αναφοράς. Οι γραμμές αντικατοπτρίζουν τα αποτελέσματα των μοντέλων UKESM1-0-LL (1<sup>η</sup> γραμμή), MRI-ESM2.0 (2<sup>η</sup> γραμμή), GISS-E2-1-G (3<sup>η</sup> γραμμή), GFDL-ESM4 (4<sup>η</sup> γραμμή), και οι στήλες τις διαφορές του εγγύς μέλλοντος (1<sup>η</sup> στήλη), της μεσοπρόθεσμης περιόδου (2<sup>η</sup> στήλη) και της μακροπρόθεσμης περιόδου (3<sup>η</sup> στήλη).

Όπως και στις δυο προηγούμενες παραμέτρους, έτσι και στην περίπτωση της ξηρής εναπόθεσης σκόνης, σύμφωνα με μοντέλο **UKESM1-0-LL**, η περιοχή στην οποία παρουσιάζεται η σημαντικότερη μεταβολή αποτελεί το Σάχελ. Στην περιοχή αυτή, κατά την πρώτη περίοδο μελέτης (2021-2040) αναμένεται μείωση της ξηρής εναπόθεσης της σκόνης, η οποία πλησιάζει τα  $6 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  και φτάνει τα  $14,5 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  το 2060. Σημαντική μείωση της τάξεως των  $3 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  σημειώνεται στο ανατολικό τμήμα της ερήμου Ταρ στη Β. Ινδία, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με τις τιμές που αναμένονται στο δυτικό μέρος της ερήμου ( $2 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Μικρή ελάττωση της ξηρής εναπόθεσης της σκόνης, της τάξεως  $2 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , καταγράφονται στην έρημο Καρακούμ και έρημο Γκόμπι. Η κατάσταση στις περιοχές αυτές κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα κατά τη μεσοπρόθεσμη περίοδο. Σημαντική μεταβολή εκδηλώνεται κατά τη μακροπρόθεσμη περίοδο (2081-2100). Η μείωση στην Κ. Αφρική (σύνορα Νίγηρα-Νιγηρίας-Τσαντ) ξεπερνάει τα  $20,3 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Το μεγαλύτερο μέρος της ερήμου Καρακούμ αναμένεται να υποστεί σημαντικές μειώσεις στην ξηρή εναπόθεση της σκόνης, αγγίζοντας μέχρι και τα  $4,2 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Το δίπολο που δημιουργείται στην έρημο Ταρ γίνεται εντονότερο σημειώνοντας αύξηση στα δυτικά και μείωση στα ανατολικά, 3 και  $4 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  αντίστοιχα.

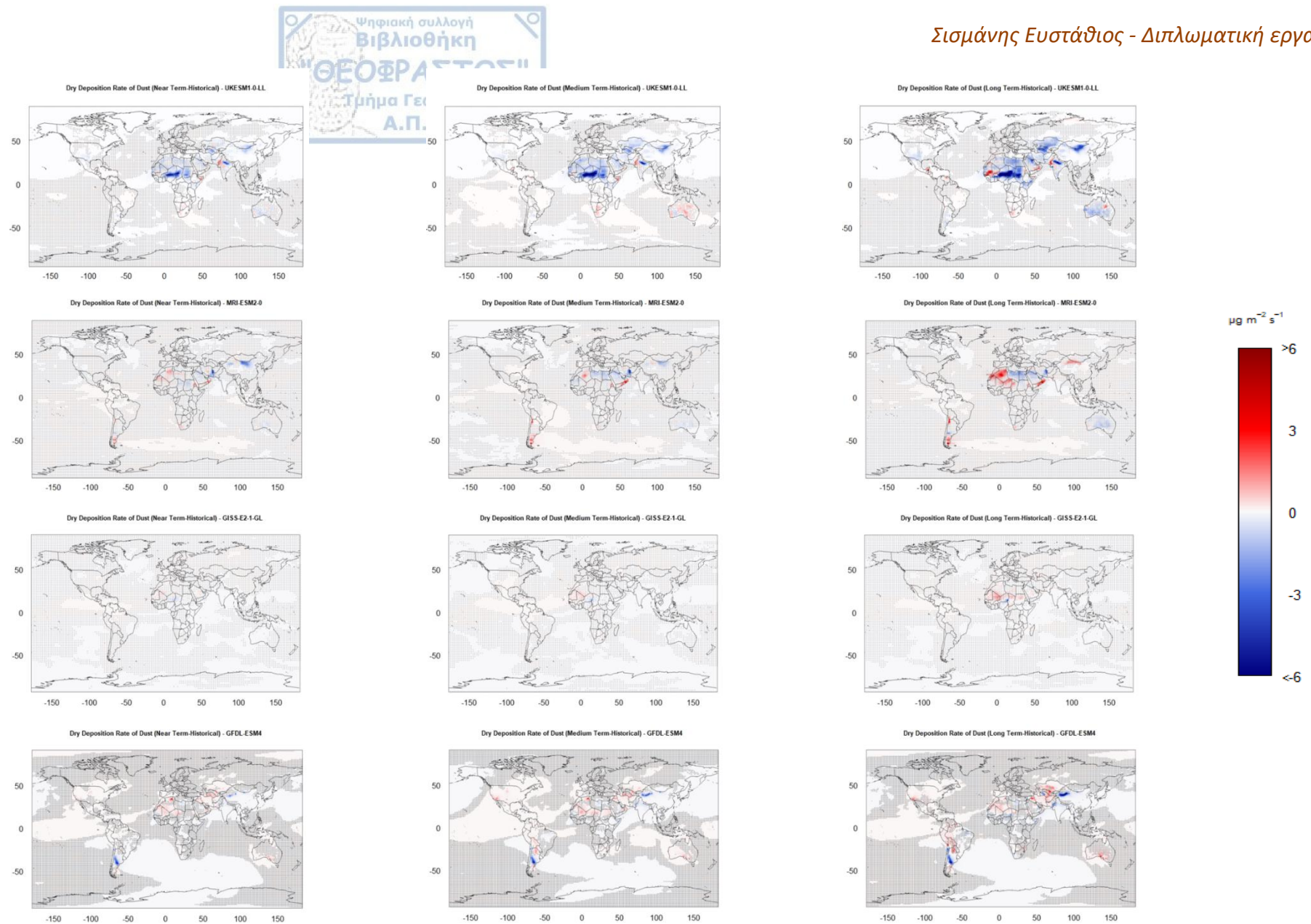
Οι διαφορές που προκύπτουν μεταξύ των τριών μελλοντικών περιόδων σε σχέση με την περίοδο αναφοράς (1991-2010) στο μοντέλο **MRI-ESM2.0** δεν είναι στατιστικά σημαντικές για το μεγαλύτερο κομμάτι της υφελίου. Παρατηρούνται δύο ερημικές περιοχές, η έρημος Γκόμπι και η έρημος Λουτ, όπου το ποσό της ξηρής εναπόθεσης σκόνης μειώνονται κατά  $3,2$  και  $4,9 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , αντίστοιχα, στο τέλος της πρώτης μελλοντικής περιόδου (2021-2040). Αισθητή μείωση της τάξεως των  $2 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  εντοπίζεται στο νότιο τμήμα της Αραβικής ερήμου (Σουδάν). Στο βόρειο τμήμα της Σαχάρα εκδηλώνεται αύξηση στα δυτικά τμήμα της ερήμου και μείωση στο βορειοανατολικό, χωρίς να είναι στατιστικά σημαντικές οι μεταβολές αυτές. Κατά τη μεσοπρόθεσμη περίοδο ενισχύονται ασθενώς οι μεταβολές στη Β. Αφρική και στο Σουδάν, ενώ στην έρημο Γκόμπι εξασθενεί η μείωση που είχε παρατηρηθεί. Στο τέλος του αιώνα (2081-2100) αναμένονται μερικές διαφοροποιήσεις σε αυτές τις ερημικές περιοχές σε σχέση με τα προηγούμενα χρόνια. Συγκεκριμένα, παρατηρείται μία ισχυρή αύξηση στην περιοχή του Σουδάν η οποία φτάνει τα  $4 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , και μία σταθερή κατάσταση στην έρημο Λουτ. Διαφορετική εικόνα παρουσιάζεται στην έρημο Γκόμπι της Β. Κίνας όπου η ξηρή εναπόθεση της σκόνης πλέον αναμένεται να αυξηθεί κατά  $1,4 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Ωστόσο, η συγκεκριμένη μεταβολή χαρακτηρίζεται στατιστικά μη σημαντική. Τέλος παρουσιάζεται μία μεγάλη αντίθεση στην έρημο Σαχάρα. Συγκεκριμένα, στο δυτικό της άκρο, η ξηρή εναπόθεση εκτιμάται να αυξηθεί κατά  $3 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , σε αντίθεση με το κεντρικό και ανατολικό τμήμα της ερήμου όπου φαίνεται να σημειώνεται μείωση  $1-2 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Παρόλα αυτά, η μεταβολή που θεωρείται στατιστικά σημαντική είναι αυτή μόνο στην Δ. Σαχάρα.



Στο μοντέλο **GISS-E2-1-G** η μεταβολή της ξηρής εναπόθεσης σκόνης είναι εξαιρετικά μικρή και στις περισσότερες περιοχές δεν είναι στατιστικά σημαντική. Στις δύο πρώτες περιόδους μελέτης (εγγύς μέλλον και μεσοπρόθεσμη περίοδος) μικρή μείωση  $1$  και  $2,5 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  αντίστοιχα, αναμένεται κατά μήκος των συνόρων του Νίγηρα και του Τσαντ, στο κεντρικό τμήμα του Σάχελ. Η παραπάνω μείωση μεγαλώνει κατά τη μακροπρόθεσμη περίοδο (2081-2100) πλησιάζοντας τα  $4,5 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Στο δυτικό τμήμα της περιοχής, στη Μαυριτανία, εκτιμάται αύξηση  $1 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , η οποία όμως δεν είναι στατιστικά σημαντική.

Οι περιοχές με τη σημαντικότερη μεταβολή στην ξηρή εναπόθεση της σκόνης, σύμφωνα με τις προσομοιώσεις του μοντέλου **GFDL-ESM4**, εντοπίζονται στη ΒΔ Κίνα (έρημος Τάκλα Μακάν) και στη Ν. Αμερική (Παταγονία). Στο εγγύς μέλλον (2021-2040), οι τιμές της ξηρής εναπόθεσης της σκόνης αναμένεται να μειωθούν κατά  $3,6 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  στην έρημο Τάκλα Μακάν και  $3 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  στην Παταγονία, ενώ αύξηση της τάξεως των  $6,4 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  σημειώνεται στη ΒΔ Σαχάρα, Αλγερία. Η κατάσταση στην Αφρική και τη Ν. Αμερική κυμαίνεται σε παρόμοια επίπεδα και στην επόμενη περίοδο μελέτης (2041-2060). Μεταβολή μεγαλύτερης έντασης ( $5,7 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) και έκτασης αναμένεται στην έρημο Τάκλα Μακάν, καλύπτοντας πλέον ένα ευρύτερο κομμάτι της ερήμου σε σχέση με εκείνο των προηγούμενων ετών. Κατά τη μακροπρόθεσμη περίοδο (2081-2100), στην έρημο Τάκλα Μακάν η μείωση της ξηρής εναπόθεσης μεγαλώνει αισθητά, αγγίζοντας τιμές που ξεπερνούν τα  $10,8 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Σημαντική ελάττωση που φτάνει τα  $5-6 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  παρουσιάζεται και στη δεύτερη περιοχή ενδιαφέροντος, την Παταγονία. Τέλος, αυξητική τάση της τάξεως των  $3,2 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  παρατηρείται στην έρημο Καρακούμ.

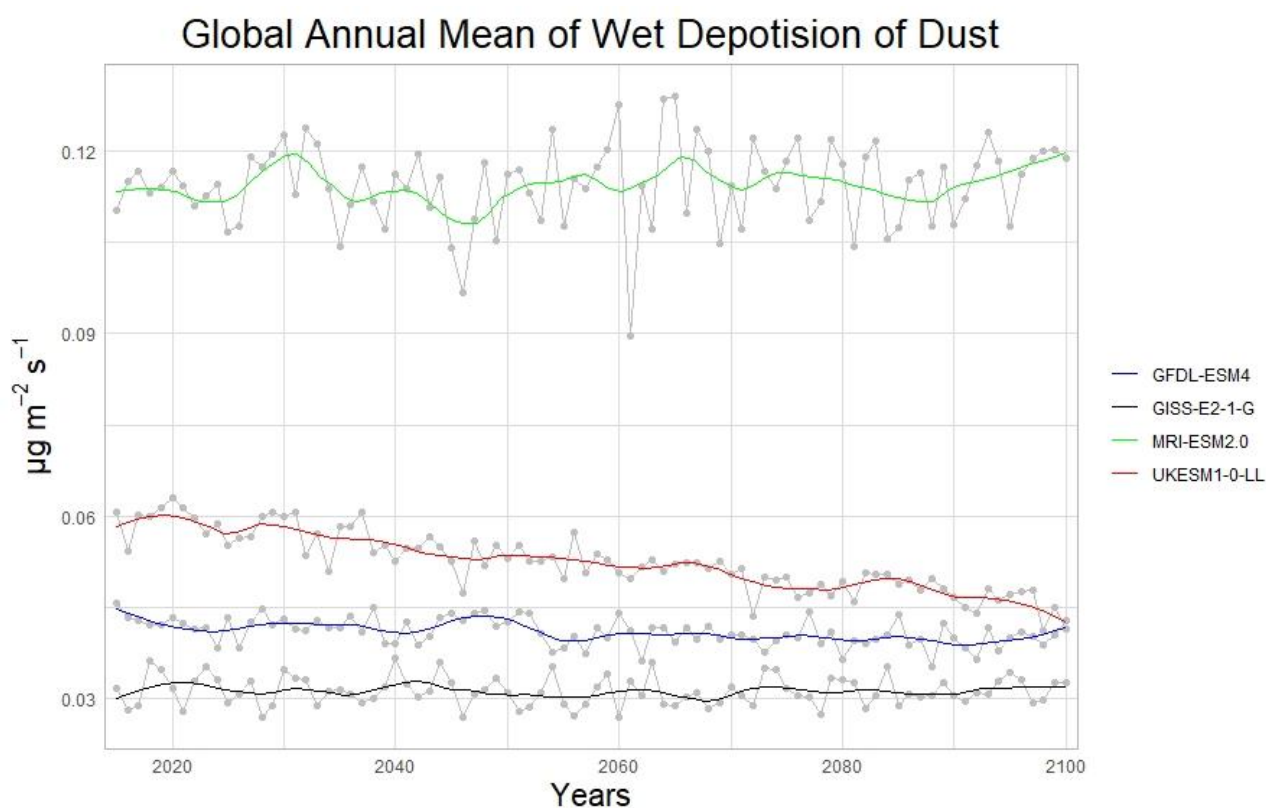




Σχήμα 3.26: Εκτιμώμενη μεταβολή της ξηρής εναπόθεσης σκόνης από τα μοντέλα UKESM1-0-LL, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 (γραμμές) σε σχέση με την περίοδο αναφοράς (1991-2010) για το εγγύς μέλλον (1<sup>η</sup> στήλη) , τη μεσοπρόθεσμη περίοδο (2<sup>η</sup> στήλη), τη μακροπρόθεσμη περίοδο (3<sup>η</sup> στήλη).

### 3.1.7 Υγρή εναπόθεση σκόνης

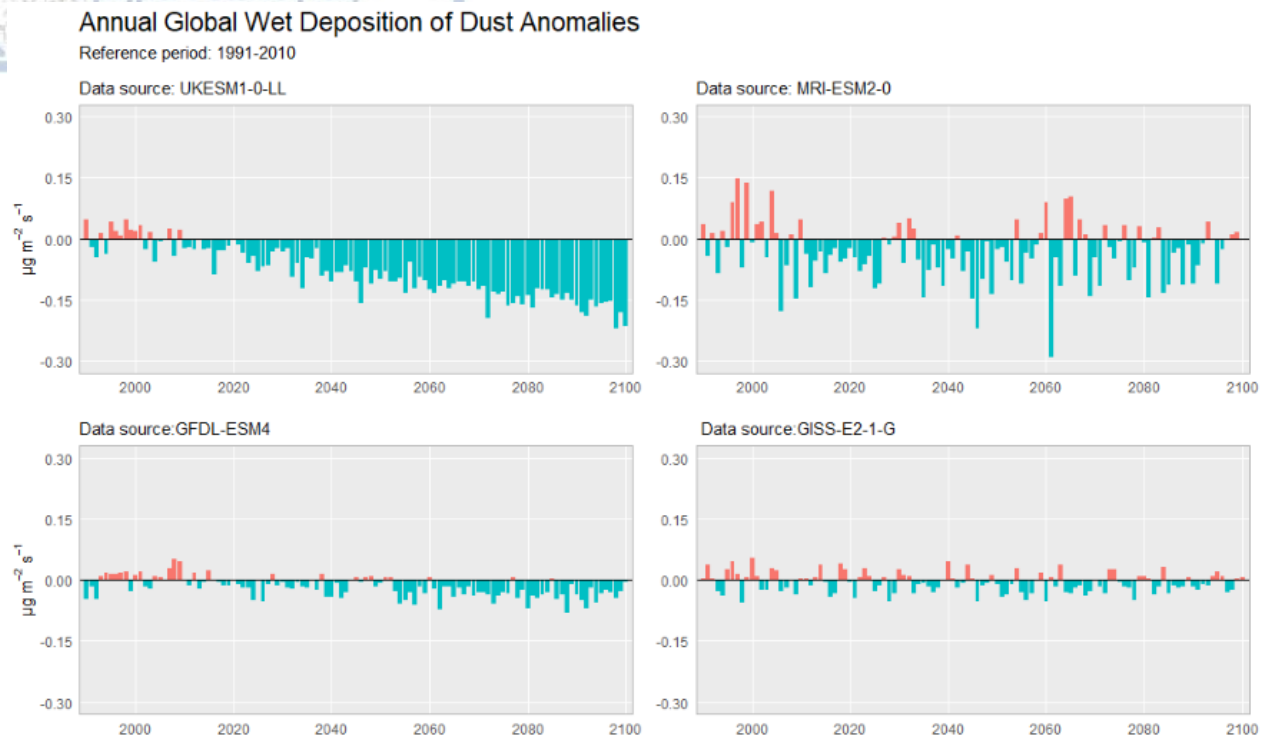
Στο Σχήμα 3.27 απεικονίζονται οι μέσες ετήσιες τιμές της υγρής εναπόθεσης της σκόνης σε παγκόσμιο επίπεδο από τα κλιματικά μοντέλα προσομοίωσης για την περίοδο 2015-2100. Τα πόσα της συγκεκριμένης παραμέτρου εκτιμάται πως θα κυμανθούν σε χαμηλά επίπεδα σε σχέση με την ξηρή εναπόθεση και από τα τέσσερα μοντέλα ( $<0,13 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Αναλυτικά, η μεγαλύτερη διακύμανση της τάσης εντοπίζεται στο MRI-ESM2.0, σύμφωνα με το οποίο, η υγρή εναπόθεση αυξάνεται ελάχιστα, φτάνοντας τα  $0,12 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  στην τελευταία δεκαετία του αιώνα. Η πορεία της υγρής εναπόθεσης στα μοντέλα GISS-E2-1-G και GFDL-ESM4 ακολουθεί τα πρότυπα και των υπολοίπων παραμέτρων, με μια σταθερή κατάσταση να επικρατεί καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου μελέτης. Μείωση της τάξεως των  $0,2 \text{ g m}^{-2} \text{ year}^{-1}$  καταγράφεται στο μοντέλο UKESM1-0-LL, καθώς το 2015 η παγκόσμια μέση τιμή της υγρής εναπόθεσης είναι  $0,06 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  και το 2100 αγγίζει τα  $0,4 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .



Σχήμα 3.27: Παγκόσμια μέση ετήσια υγρή εναπόθεση σκόνης για κάθε ένα από τα μοντέλα για την περίοδο 2015-2100 (σενάριο SSP3.7).

Στο Σχήμα 3.28 καταγράφονται οι ετήσιες παγκόσμιες ανωμαλίες της υγρής εναπόθεσης σκόνης για τα μελετούμενα μοντέλα την περίοδο 1991-2100. Στο μοντέλο UKESM1-0-LL ακολουθητέοι η πτωτική τάση που παρουσιάζεται και στις υπόλοιπες παραμέτρους καθώς σημειώνεται η μεγαλύτερη μείωση των τιμών, φτάνοντας τα  $-0,22 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Μειωτική τάση αναμένεται και στο μοντέλο MRI-ESM2.0, με την πλειοψηφία των ετών μετά το 2000 να καταγράφει ελάττωση με εξαίρεση στην αρχή της μεσοπρόθεσμης μελλοντικής περιόδου. Αντίστοιχη εικόνα με αυτή του UKESM1-0-LL αλλά σε μικρότερη κλίμακα, παρουσιάζεται και στο GFDL-ESM4 με τις τιμές να μην ξεπερνάνε τα  $-0,05 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Στα ίδια και μικρότερα επίπεδα με

αυτά του GFDL-ESM4 εντοπίζονται οι μεταβολές στο GISS-E2-1-G, κατά το οποίο οι αυξομειώσεις κυμαίνονται από -0,02 έως 0,02  $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

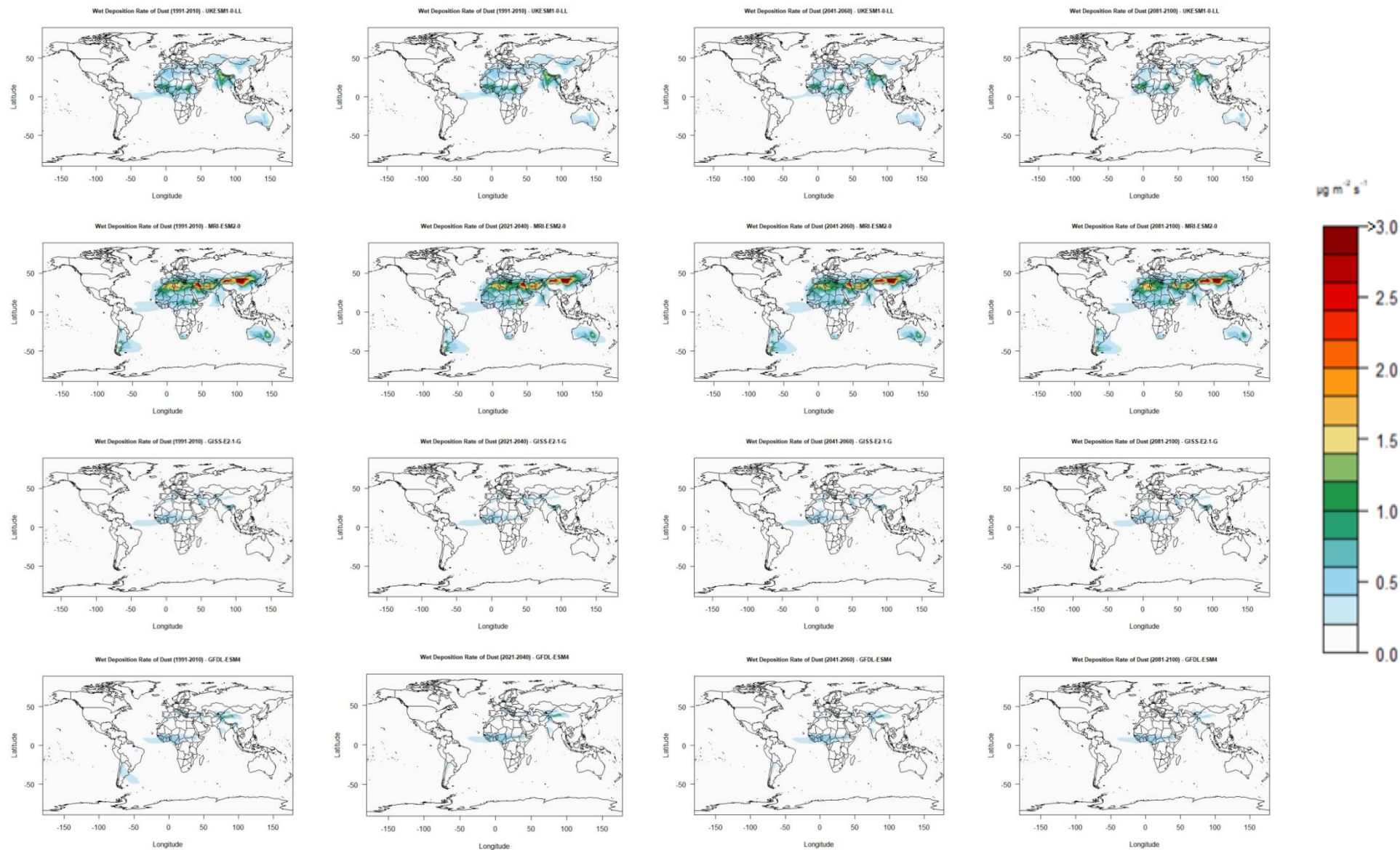


Σχήμα 3.28 Παγκόσμιες μέσες ετήσιες ανωμαλίες της υγρής εναπόθεσης σκόνης για κάθε ένα από τα μοντέλα για την περίοδο 1991-2100 (σενάριο SSP3.7).

Στο Σχήμα 3.29 παρουσιάζονται οι τιμές της υγρής εναπόθεσης της σκόνης για τα τέσσερα GCM για τις τέσσερις περιόδους μελέτης. Ειδικότερα, οι γραμμές αντικατοπτρίζουν τα αποτελέσματα των μοντέλων UKESM1-0-LL (1<sup>η</sup> γραμμή), MRI-ESM2.0 (2<sup>η</sup> γραμμή), GISS-E2-1-G (3<sup>η</sup> γραμμή), GFDL-ESM4 (4<sup>η</sup> γραμμή), και οι στήλες την ιστορική περίοδο (1<sup>η</sup> στήλη) και τις τρεις μελλοντικές περιόδους (εγγύς μέλλον - 2<sup>η</sup> στήλη), μεσοπρόθεσμη περίοδος - 3<sup>η</sup> στήλη, μακροπρόθεσμη περίοδος - 4<sup>η</sup> στήλη).

Σύμφωνα με το μοντέλο **UKESM1-0-LL**, ο μεγαλύτερος όγκος της υγρής εναπόθεσης σκόνης εντοπίζεται στην περιοχή της Ινδίας και την έρημο Σαχάρα. Το μοντέλο **MRI-ESM2.0** θεωρεί τη συγκεκριμένη παράμετρο ιδιαίτερα σημαντική, καθώς καταγράφονται πολύ μεγάλες τιμές σε σχέση με τα υπόλοιπα μοντέλα. Αναλυτικά, στο μοντέλο αυτό εντοπίζεται αυξημένη υγρή εναπόθεση στις περισσότερες ερήμους του πλανήτη και κυρίως στις ερήμους Σαχάρα, Αραβική έρημο, Λουτ, Τάκλα Μακάν και τέλος, στην έρημο Γκόμπι όπου ξεπερνάει τα 4  $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Η κατάσταση στα μοντέλα **GISS-E2-1-G** και **GFDL-ESM4** κυμαίνεται σε μικρά επίπεδα, με την κατανομή να επικεντρώνεται στα 0,5-0,8  $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  στις ερήμους Σαχάρα και Τάκλα Μακάν.





Σχήμα 3.29: Εκτιμώμενη κατανομή υγρής εναπόθεσης σκόνης από τα μοντέλα UKESM1-0-LL1, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 (γραμμές) για τις τέσσερις μελετούμενες περιόδους (στήλες).



Στο Σχήμα 3.30 παρουσιάζονται οι εκτιμώμενες μεταβολές της υγρής εναπόθεσης σκόνης σε ετήσια βάση στο εγγύς μέλλον, τη μεσοπρόθεσμη και τη μακροπρόθεσμη περίοδο σε σχέση με την περίοδο αναφοράς. Οι γραμμές αντικατοπτρίζουν τα αποτελέσματα των μοντέλων UKESM1-0-LL (1<sup>η</sup> γραμμή), MRI-ESM2.0 (2<sup>η</sup> γραμμή), GISS-E2-1-G (3<sup>η</sup> γραμμή), GFDL-ESM4 (4<sup>η</sup> γραμμή), και οι στήλες τις διαφορές του εγγύς μέλλοντος (1<sup>η</sup> στήλη), της μεσοπρόθεσμης περιόδου (2<sup>η</sup> στήλη) και της μακροπρόθεσμης περιόδου (3<sup>η</sup> στήλη).

Σημαντικές αλλαγές στην υγρή εναπόθεση της σκόνης αναμένονται στο μεγαλύτερο μέρος της Αφρικής και της Ασίας σύμφωνα με το μοντέλο **UKESM1-0-LL** (1<sup>η</sup> γραμμή σχήματος). Στο εγγύς μέλλον (2021-2040), όσον αφορά στην Αφρική, εντοπίζεται μία μείωση που κυμαίνεται στα 0,1-0,2  $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  στο κεντρικό τμήμα της ηπείρου και πιο συγκεκριμένα στις χώρες που βρέχονται από τον Κόλπο της Γουινέας. Αντιθέτως, αύξηση 0,15  $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  παρατηρείται στο Σάχελ, σε δυο διαφορετικές περιοχές (Μάλι και Σουδάν). Μικρή μειωτική τάση της τάξεως των 0,11  $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  αναμένεται στη Β. Σαχάρα και την Α. Μεσόγειο, χωρίζοντας με αυτό τον τρόπο το άνω κομμάτι της ηπείρου σε τρεις ζώνες όπου στην ενδιάμεση αυξάνεται η μεταβολή της υγρής εναπόθεσης σκόνης και εκατέρωθεν αυτής ελαττώνεται. Στην Ασία εντοπίζονται μεταβολές σε δυο σημαντικές ερήμους. Στην έρημο Γκόμπι παρατηρείται μείωση κατά 0,16  $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , ενώ στη ΒΑ Ινδία, στην έρημο Ταρ, αναμένεται μείωση που φτάνει έως τα 0,4  $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , και στο Νεπάλ και στη Δ. Ινδία, εκτιμάται αύξηση έως και 0,2  $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

Κατά τη μεσοπρόθεσμη περίοδο (2041-2060), οι μεταβολές γίνονται εντονότερες σε όλες τις περιοχές που αναφέρθηκαν για το εγγύς μέλλον. Αναλυτικά, η κατάσταση στη Β. Σαχάρα και Μεσόγειο παραμένει σταθερή. Στη δεύτερη και στην Κ. Αφρική, στο Σάχελ, καταγράφονται ακόμα μεγαλύτερες αυξήσεις που πλησιάζουν τα 0,23  $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , ενώ στις χώρες του κόλπου της Γουινέας στην Κ. Αφρική παρατηρείται σημαντική μείωση κατά 0,4  $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Η μείωση των 0,25  $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  στην έρημο Γκόμπι αναμένεται να επεκταθεί γεωγραφικά σε ένα μεγάλο μέρος της ΒΔ Κίνας και Μογγολίας, καθώς και η μείωση στην περιοχή της Ινδίας όπου, εκτός από την εξάπλωσή της, αναμένεται να ξεπεράσει τα 0,5  $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

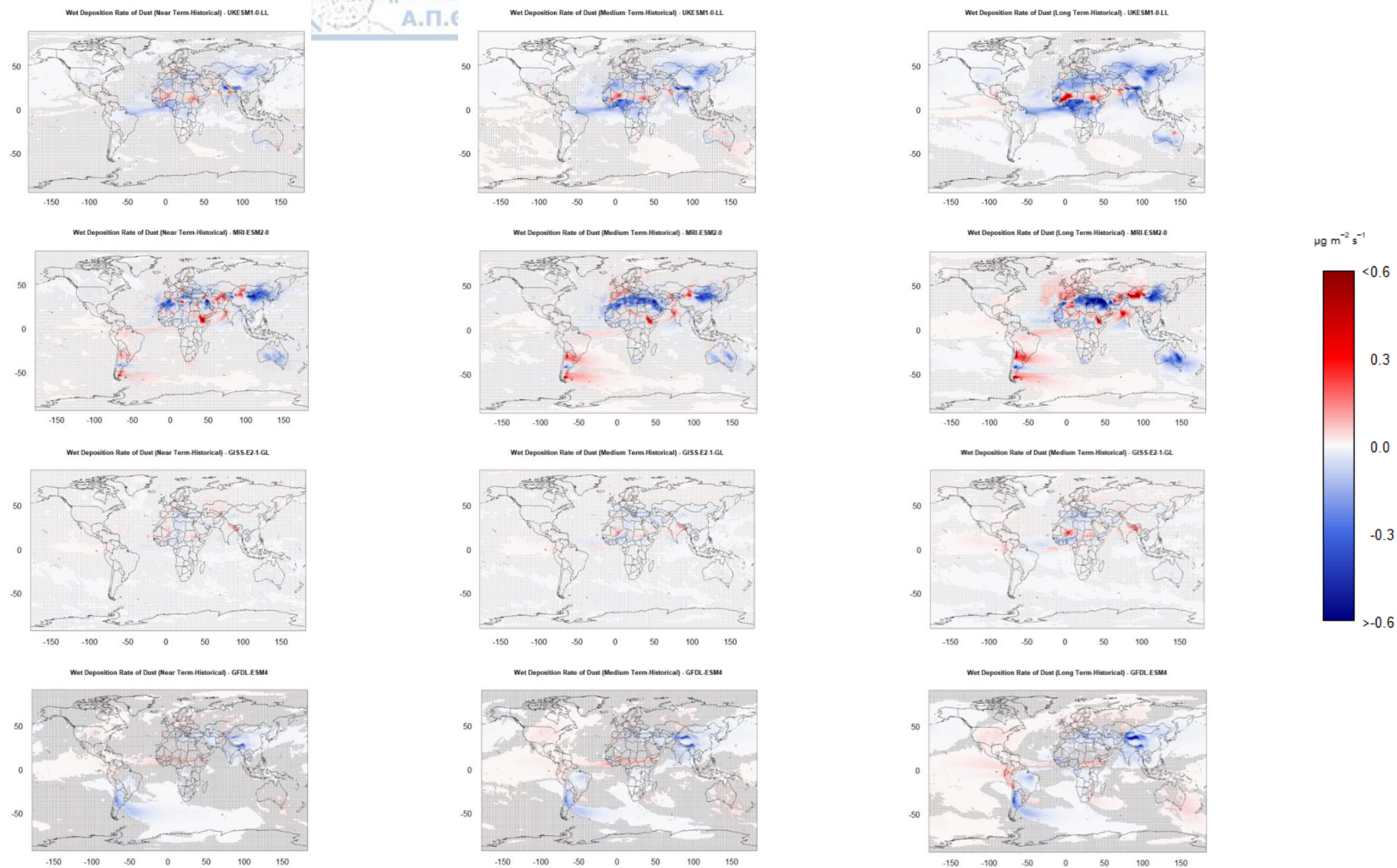
Στο τέλος του αιώνα σημειώνονται μεγάλες μεταβολές σε σχέση με την περίοδο αναφοράς. Μείωση 0,3  $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  αναμένεται σε ολόκληρη τη Β. Αφρική, τη Μεσόγειο, την έρημο Καρακούμ, την έρημο Τάκλα Μακάν και την έρημο Γκόμπι. Σημαντική αύξηση που πλησιάζει τα 0,54  $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  εκδηλώνεται στο Σάχελ, ενώ στις περιοχές στον κόλπο της Γουινέας η υγρή εναπόθεση σκόνης αναμένεται να μειωθεί κατά 0,4  $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Τέλος, αύξηση κατά 0,26  $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  προβλέπεται να λάβει χώρα στην έρημο Ταρ.

Οι μεταβολές της υγρής εναπόθεσης σκόνης στο μοντέλο **MRI-ESM2.0** (2<sup>η</sup> γραμμή σχήματος) είναι εμφανείς σε αρκετές περιοχές ήδη από τις αρχές του αιώνα. Μείωση που κυμαίνεται από 0,27  $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  αναμένεται να καταγραφεί στη Α. Σαχάρα και στη Μεσόγειο. Μεγαλύτερες τιμές της τάξεως των -0,8  $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  παρουσιάζονται στην έρημο Γκόμπι. Αντίθετη εικόνα εκδηλώνεται στο Σουδάν, στην έρημο Καρακούμ, στην έρημο Ταρ και στην έρημο Τάκλα Μακάν, όπου σημειώνονται αυξήσεις της τάξεως των 0,3-0,4  $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Στις δυο τελευταίες περιοχές, οι διαφορές δεν θεωρούνται στατιστικά σημαντικές.

Περαιτέρω μείωση  $0,42 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  αναμένεται να παρουσιαστεί στην κατανομή της υγρής εναπόθεσης σκόνης σε όλη τη Β. Αφρική και Α. Μεσόγειο, η οποία ξεπερνά τα  $0,7 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  στο τέλος του αιώνα. Μείωση, η οποία καλύπτει πλέον μεγάλη έκταση αναμένεται στην έρημο Γκόμπι ( $0,45 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), με την κατάσταση να μεγαλώνει κατά την διάρκεια των ετών. Στις έρημους Ταρ και Τακλά Μακάν η αύξηση φτάνει τα  $0,3 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  ήδη από την δεύτερη περίοδο μελέτης και φτάνει σε υψηλά επίπεδα στη μακροπρόθεσμη περίοδο ( $0,8 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Αξιοσημείωτη είναι η μεταβολή στο βόρειο και νότιο άκρο της Παταγονίας με τη διαφοροποίηση να πλησιάζει τα  $+0,4 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  σε σχέση με τις τιμές της περιόδου αναφοράς, και στην έρημο Simpson της Αυστραλίας όπου η μείωση κυμαίνεται στα  $0,3-0,4 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  στην τελευταία εικοσαετία του αιώνα. Τέλος, αύξηση καταγράφεται στην δυτική Μεσόγειο και Ευρώπη από τα μέσα του αιώνα και ισχυροποιείται σταθερά με την πάροδο του χρόνου.

Όπως και στην περίπτωση της ξηρής εναπόθεσης σκόνης, έτσι και στην κατανομή της υγρής εναπόθεσης σκόνης, οι μεταβολές που αναμένονται σύμφωνα με το μοντέλο **GISS-E2-1-G** δεν είναι στατιστικά σημαντικές (3<sup>η</sup> γραμμή σχήματος). Στην πρώτη μελλοντική περίοδο μελέτης (2021-2040), οι μεταβολές που αναμένεται να καταγραφούν είναι ελάχιστες και στατιστικά μη σημαντικές. Εξάιρεση αποτελούν εκείνες που εντοπίζονται στην Ελλάδα (μείωση κατά  $0,1 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) και στην Α. Ινδία (αύξηση κατά  $0,15 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Στη μεσοπρόθεσμη περίοδο (2041-2060), εκτιμάται να σχηματιστεί το δίπολο που παρουσιάζεται και στο μοντέλο UKESM1-0-LL στην περιοχή της κεντρικής Αφρικής. Συγκεκριμένα, αναμένεται μία αύξηση της τάξεως των  $0,15 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  στο Σαχέλ (Μάλι) και μία μικρή μείωση κατά  $0,14 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  στις χώρες του Κόλπου της Γουινέας. Στη μακροπρόθεσμη περίοδο (2081-2100), οι αυξήσεις αναμένεται να μεγαλώσουν περαιτέρω στο Μάλι, φτάνοντας τα  $2,4$  και  $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Στην κεντρική Αφρική και τη Μεσόγειο η κατάσταση θα παραμείνει στα ίδια επίπεδα.

Όσον αφορά στο μοντέλο **GFDL-ESM4**, δύο είναι οι περιοχές όπου οι μεταβολές της υγρής εναπόθεσης για τις τρεις μελετούμενες μελλοντικές περιόδους προκαλούν ενδιαφέρον. Συγκεκριμένα, στις ερήμους Τάκλα Μακάν και την Παταγονία, η υγρή εναπόθεση της σκόνης αναμένεται να μειωθεί κατά  $0,32 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  από την αρχή του αιώνα (εγγύς μέλλον, 2021-2040), μείωση που κορυφώνεται στο τέλος του αιώνα αγγίζοντας τιμές  $1,1 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Επιπλέον, κατά τη μακροπρόθεσμη περίοδο (2081-2100), σημειώνεται μία αύξηση της τάξεως των  $0,2 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  στην έρημο Ατακάμα, στα σύνορα Χιλής-Περού. Τέλος, μία μικρή μείωση, η οποία δεν ξεπερνά τα  $0,1 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  εντοπίζεται στη Β. Αφρική και τη Μεσόγειο. Μικρή αύξηση σε όλη την διάρκεια του αιώνα σημειώνεται κατά μήκος του Σάχελ της τάξεως των  $0,05 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .



Σχήμα 3.30: Εκτιμώμενη μεταβολή της υγρής εναπόθεσης σκόνης από τα μοντέλα UKESM1-0-LL, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 (γραμμές) σε σχέση με την περίοδο αναφοράς (1001-2010) για το εγγύς μέλλον (1<sup>η</sup> στήλη), τη μεσοπρόθεσμη περίοδο (2<sup>η</sup> στήλη), τη μακροπρόθεσμη περίοδο (3<sup>η</sup> στήλη).

### 3.2 Μελλοντικές προβολές κλιματικών παραμέτρων και σκόνης στις ερήμους της Αφρικής και Ασίας

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας για τις σημαντικότερες ερημικές περιοχές, δηλαδή εκείνες στις οποίες τα μελετώμενα μοντέλα εμφανίζουν ενδιαφέρουσες διαφοροποιήσεις και αναφέρονται παραπάνω. Στη συνέχεια, ακολουθούν οι καταληκτικές παρατηρήσεις του συγγραφέα για τις συγκεκριμένες περιοχές.

#### 3.2.1 Κλιματολογικά στοιχεία και επίπεδα σκόνης στην Αφρικανική ήπειρο

Το φορτίο της σκόνης, η ξηρή και η υγρή εναπόθεση της, καθώς και οι εκπομπές της πάνω από την **έρημο Σαχάρα** μελετώνται για το χρονικό διάστημα 2021-2100 χρησιμοποιώντας τέσσερα κλιματικά μοντέλα. Εξαιρώντας την περίοδο αναφοράς (1991-2010) από τις τρεις μελλοντικές περιόδους (2021-2040, 2041-2060, 2081-2100) προκύπτουν οι παρακάτω ανωμαλίες σε σχέση με την περίοδο αναφοράς στα ποσά των παραμέτρων.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των εξεταζόμενων παραμέτρων για κάθε μια από τις περιόδους μελέτης (εγγύς μέλλον, μεσοπρόθεσμη μελλοντική περίοδο και μακροπρόθεσμη μελλοντική περίοδο) για τη Δ. Σαχάρα, την Α. Σαχάρα και το Σάχελ.



Πίνακας 3.1 Μέσες εκτιμώμενες ανωμαλίες των παραμέτρων από τα μοντέλα UKESM1-0-LL1, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 για το εγγύς μέλλον στην Αφρική.

|                     |             | Θερμοκρασία<br>(°C) | Βροχόπτωση<br>(mm/year) | Επιφανειακή<br>ταχύτητα<br>ανέμου<br>(m/s) | Φορτίο σκόνης<br>(g/m <sup>2</sup> ) | Εκπομπές<br>σκόνης<br>(μg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) | Ξηρή εναπόθεση<br>σκόνης<br>(μg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) | Υγρή εναπόθεση<br>σκόνης<br>(μg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) |
|---------------------|-------------|---------------------|-------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| ΔΥΤΙΚΗ<br>ΣΑΧΑΡΑ    | UKESM1-0-LL | 4,1                 | -21,57                  | -0,06                                      | -0,0146                              | -0,4106                                                     | -0,2630                                                           | -0,1373                                                           |
|                     | MRI-ESM2.0  | 1,3                 | -13,64                  | -0,01                                      | 0,0133                               | 0,1206                                                      | 0,1511                                                            | -0,0941                                                           |
|                     | GISS-E2-1-G | 1,5                 | -12,75                  | 0,02                                       | 0,0287                               | 0,0889                                                      | 0,0644                                                            | 0,0957                                                            |
|                     | GFDL-ESM4   | 1,1                 | -14,32                  | 0,03                                       | 0,0451                               | 0,3038                                                      | 0,1860                                                            | 0,0262                                                            |
| ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ<br>ΣΑΧΑΡΑ | UKESM1-0-LL | 4,0                 | 0,94                    | -0,07                                      | -0,0192                              | -0,5136                                                     | -0,3611                                                           | -0,1377                                                           |
|                     | MRI-ESM2.1  | 1,2                 | 5,67                    | -0,03                                      | -0,0097                              | -0,1632                                                     | -0,0335                                                           | -0,0161                                                           |
|                     | GISS-E2-1-G | 1,3                 | -4,89                   | 0,00                                       | -0,0102                              | 0,0186                                                      | -0,0021                                                           | -0,1675                                                           |
|                     | GFDL-ESM4   | 1,1                 | -0,33                   | 0,01                                       | 0,0114                               | -0,0636                                                     | -0,0123                                                           | 0,0108                                                            |
| ΣΑΧΕΛ               | UKESM1-0-LL | 3,8                 | 77,05                   | -0,09                                      | -0,0558                              | -1,3791                                                     | -1,0900                                                           | 0,1617                                                            |
|                     | MRI-ESM2.0  | 1,0                 | 21,47                   | -0,04                                      | -0,0037                              | -0,0808                                                     | -0,0436                                                           | 0,0130                                                            |
|                     | GISS-E2-1-G | 1,0                 | 37,87                   | 0,01                                       | -0,0209                              | -0,1993                                                     | -0,0691                                                           | -0,0058                                                           |
|                     | GFDL-ESM4   | 0,9                 | 17,69                   | 0,07                                       | 0,0228                               | 0,0067                                                      | 0,0354                                                            | 0,1474                                                            |

Πίνακας 3.2: Μέσες εκτιμώμενες τιμές των παραμέτρων από τα μοντέλα UKESM1-0-LL1, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 για τη μεσοπρόθεσμη μελλοντική περίοδο στην Αφρική.

|                  |             | Θερμοκρασία<br>(°C) | Βροχόπτωση<br>(mm/year) | Επιφανειακή<br>ταχύτητα<br>ανέμου<br>(m/s) | Φορτίο σκόνης<br>(g/m <sup>2</sup> ) | Εκπομπές<br>σκόνης<br>(μg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) | Ξηρή εναπόθεση<br>σκόνης<br>(μg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) | Υγρή εναπόθεση<br>σκόνης<br>(μg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) |
|------------------|-------------|---------------------|-------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| ΔΥΤΙΚΗ<br>ΣΑΧΑΡΑ | UKESM1-0-LL | 3,1                 | -14,07                  | -0,09                                      | -0,0312                              | -0,6712                                                     | -0,4266                                                           | -0,5036                                                           |
|                  | MRI-ESM2.0  | 2,2                 | -18,51                  | 0,01                                       | 0,0244                               | -0,2687                                                     | 0,0289                                                            | -0,1090                                                           |
|                  | GISS-E2-1-G | 2,2                 | -4,76                   | 0,04                                       | 0,0328                               | 0,1776                                                      | 0,1220                                                            | 0,1174                                                            |
|                  | GFDL-ESM4   | 1,8                 | -16,15                  | 0,04                                       | 0,0471                               | 0,2618                                                      | 0,1594                                                            | -0,0319                                                           |

|                     |             |     |         |       |         |         |         |         |
|---------------------|-------------|-----|---------|-------|---------|---------|---------|---------|
| ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ<br>ΣΑΧΑΡΑ | UKESM1-0-LL | 3,1 | 1,65    | -0,14 | -0,0354 | -0,8628 | -0,6096 | -0,3149 |
|                     | MRI-ESM2.1  | 2,1 | 8,82    | -0,02 | -0,0365 | -0,5937 | -0,3310 | -0,0296 |
|                     | GISS-E2-1-G | 1,8 | -2,04   | 0,02  | -0,0120 | 0,0192  | -0,0020 | -0,1267 |
|                     | GFDL-ESM4   | 1,7 | -1,48   | 0,04  | 0,0114  | -0,0398 | -0,0120 | -0,0143 |
| ΣΑΧΕΛ               | UKESM1-0-LL | 2,9 | 64,71   | -0,18 | -0,0960 | -2,5715 | -2,0972 | -0,0456 |
|                     | MRI-ESM2.0  | 1,9 | 20,56   | 0,00  | 0,0039  | 0,0322  | -0,0103 | 0,0073  |
|                     | GISS-E2-1-G | 1,6 | 41,04   | 0,05  | -0,0357 | -0,2050 | -0,0679 | -0,0912 |
|                     | GFDL-ESM4   | 1,7 | -142,84 | 0,11  | 0,0424  | 0,1224  | 0,1045  | 0,0742  |

Πίνακας 3.3: Μέσες εκτιμώμενες τιμές των παραμέτρων από τα μοντέλα UKESM1-0-LL1, MRI-ESM2.0 , GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 για τη μακροπρόθεσμη μελλοντική περίοδο στην Αφρική.

|                     |             | Θερμοκρασία<br>(°C) | Βροχόπτωση<br>(mm/year) | Επιφανειακή<br>ταχύτητα<br>ανέμου<br>(m/s) | Φορτίο σκόνης<br>(g/m <sup>2</sup> ) | Εκπομπές<br>σκόνης<br>(μg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) | Ξηρή εναπόθεση<br>σκόνης<br>(μg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) | Υγρή εναπόθεση<br>σκόνης<br>(μg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) |
|---------------------|-------------|---------------------|-------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| ΔΥΤΙΚΗ<br>ΣΑΧΑΡΑ    | UKESM1-0-LL | 5,9                 | -28,04                  | -0,08                                      | -0,0141                              | -0,4900                                                     | -0,2478                                                           | -0,6131                                                           |
|                     | MRI-ESM2.0  | 3,9                 | -25,20                  | 0,12                                       | 0,0893                               | 1,1393                                                      | 0,7534                                                            | -0,0174                                                           |
|                     | GISS-E2-1-G | 4,2                 | -20,63                  | 0,10                                       | 0,0638                               | 0,2473                                                      | 0,2145                                                            | 0,0588                                                            |
|                     | GFDL-ESM4   | 3,8                 | -33,58                  | 0,06                                       | 0,0585                               | 0,2949                                                      | 0,1897                                                            | -0,1780                                                           |
| ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ<br>ΣΑΧΑΡΑ | UKESM1-0-LL | 5,7                 | 8,90                    | -0,20                                      | -0,0560                              | -1,0433                                                     | -0,9812                                                           | -0,4550                                                           |
|                     | MRI-ESM2.1  | 3,8                 | 15,75                   | 0,03                                       | -0,0440                              | -0,9892                                                     | -0,4759                                                           | -0,0418                                                           |
|                     | GISS-E2-1-G | 3,8                 | -5,97                   | 0,13                                       | -0,0018                              | 0,2221                                                      | 0,1111                                                            | -0,0875                                                           |
|                     | GFDL-ESM4   | 3,6                 | -3,59                   | 0,03                                       | 0,0044                               | -0,1060                                                     | -0,0342                                                           | -0,0741                                                           |
| ΣΑΧΕΛ               | UKESM1-0-LL | 5,5                 | 92,69                   | -0,16                                      | -0,1085                              | -3,0948                                                     | -2,4830                                                           | 0,2892                                                            |
|                     | MRI-ESM2.0  | 3,9                 | 13,90                   | 0,06                                       | 0,0182                               | 0,2972                                                      | 0,1650                                                            | -0,0073                                                           |
|                     | GISS-E2-1-G | 3,9                 | 14,07                   | 0,11                                       | -0,0012                              | -0,1730                                                     | 0,0040                                                            | -0,0193                                                           |
|                     | GFDL-ESM4   | 3,6                 | -255,20                 | 0,15                                       | 0,0082                               | -0,3037                                                     | -0,0989                                                           | -0,1278                                                           |

Η **θερμοκρασία του αέρα** αναμένεται να αυξηθεί έως και 4°C σε σχέση με την περίοδο αναφοράς στο τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα με βάση τα τρία από τα τέσσερα μοντέλα μελέτης. Στο **UKESM1-0-LL**, η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα υπερεκτιμάται, αγγίζοντας την τιμή των 5.9 °C στην τελευταία εικοσαετία του αιώνα στη Δ. Σαχάρα.

Η μεταβολή της **βροχόπτωσης** δεν είναι σημαντική σε κανένα από τα τέσσερα GCM στην περιοχή της Σαχάρα. Συγκεκριμένα μείωση αναμένεται στη Δ. Σαχάρα γεγονός που εκδηλώνεται και από τα τέσσερα μοντέλα. Στην Α. Σαχάρα προβλέπεται μικρή αύξηση σύμφωνα με τα μοντέλα UKESM1-0-LL και MRI-ESM2.0 και μείωση για τα μοντέλα GISS-E2-1-G και GFDL-ESM4. Τέλος στο Σάχελ καταγράφεται αύξηση σε όλα τα μοντέλα με εξαίρεση να αποτελεί το GFDL-ESM4 κατά το οποίο παρουσιάζεται ισχυρή μείωση στη μεσοπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη μελλοντική περίοδο.

Οι μεταβολές στην **επιφανειακή ταχύτητα του ανέμου** κυμαίνονται σε πολύ μικρά επίπεδα και σε αρκετές περιοχές δεν είναι στατιστικά σημαντικές.

### 3.2.2 Επίπεδα σκόνης στην έρημο Σαχάρα

Εξετάζοντας τους χάρτες για τα επίπεδα σκόνης σε κάθε GCM που χρησιμοποιείται, παρατηρούνται δυο διαφορετικές μελλοντικές προβολές ανάμεσα στα τέσσερα μοντέλα για τη Δ. Σαχάρα. Η πρώτη άποψη το μοντέλο **UKESM1-0-LL** κατά το οποίο αναμένεται **μείωση του φορτίου** σκόνης που οδηγεί σε μείωση στις **εκπομπές σκόνης** και συνεπώς μείωση στην **ξηρή και υγρή εναπόθεση** αυτής. Η μεταβολή που συμβαίνει κατά το εγγύς μέλλον ασθενεί κατά την μεσοπρόθεσμη μελλοντική περίοδο και ισχυροποιείται πάλι στο τέλος του αιώνα.

Όσον αφορά τα υπόλοιπα τρία μοντέλα αναμένεται αύξηση της επιφανειακής ταχύτητας του άνεμου σε συνδυασμό με αύξηση **του φορτίου, των εκπομπών και της ξηρής εναπόθεσης σκόνης**. Μείωση παρουσιάζει στο **MRI-ESM2.0** και **GFDL-ESM4** η υγρή εναπόθεση της σκόνης. Όπως και στην περίπτωση του **UKESM1-0-LL** οι ισχυρότερες μεταβολές λαμβάνουν χώρα κατά το εγγύς μέλλον και την μακροπρόθεσμη μελλοντική περίοδο.

Η κατάσταση στην Α. Σαχάρα φαίνεται να είναι πιο ξεκάθαρη σε σχέση με τη Δ. Σαχάρα καθώς τα μοντέλα μεταξύ τους παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες. Χαρακτηριστικά εκδηλώνεται μείωση **του φορτίου της σκόνης, των εκπομπών και της ξηρής και υγρής εναπόθεσης της σκόνης** στα μοντέλα **UKESM1-0-LL, MRI-ESM2.0**. Η μείωση αυτή συνοδεύεται με την μείωση της επιφανειακής ταχύτητας του άνεμου. Στο **GFDL-ESM4** ενώ εκτιμάται αύξηση του φορτίου της σκόνης και της ταχύτητας του άνεμου οι εκπομπές και οι εναποθέσεις σκόνης αναμένεται να μειωθούν. Στο GISS-E2-1-G συμβαίνει το αντίθετο καθώς καταγράφεται μείωση του φορτίου σκόνης αλλά αύξηση των εκπομπών και της ξηρής εναπόθεσης σκόνης. Να ληφθεί υπόψη ότι οι μεταβολές της ξηρής και υγρής εναπόθεσης της σκόνης στην περιοχή της Σαχάρας δεν είναι στατιστικά σημαντικές σε κανένα από τα τέσσερα μοντέλα μελέτης.

Κοινή συνιστώσα των τεσσάρων μοντέλων είναι η σημαντική μείωση που αναμένεται να παρουσιάσει όλη η περιοχή της Μεσογείου.

Η εικόνα που παρουσιάζεται για τα επίπεδα σκόνης σύμφωνα με το μοντέλο **UKESM1-0-LL** ακολουθεί τις εκτιμήσεις των Evan et al. (2016), οι οποίοι έδειξαν ότι η μεταβλητότητα στη σκόνη της Σαχάρα συνδέεται κυρίως με τη μεταβλητότητα των επιφανειακών ανέμων και οι συσχετίσεις μεταξύ της εκπομπής σκόνης και άλλων κλιματικών μεταβλητών προκύπτουν κυρίως από τα μοτίβα των ανέμων που συνοδεύουν αυτές τις κλιματικές μεταβλητές.

Η διαφορετική πρόβλεψη των επιπέδων σκόνης που καταγράφεται από τα τρία αυτά μοντέλα συμβαδίζουν με αυτή των Pu and Ginoux (2018), που συνδέουν την αύξηση αυτή με τις ανάλογες μεταβολές στον επιφανειακό άνεμο και τις βροχοπτώσεις. Συμπερασματικά, η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα σε συνδυασμό με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου στην έρημο Σαχάρα, συνδέονται με τα αυξημένα ποσά του φορτίου και των εκπομπών της σκόνης κατά τη διάρκεια του αιώνα.

### 3.2.3 Επίπεδα σκόνης στην ερημική περιοχή Σάχελ

Εξετάζοντας τους χάρτες και τις μέσες τιμές για την περιοχή του Σάχελ εκδηλώνονται διαφορετικά πρότυπα για τα **επίπεδα της σκόνης** σε κάθε GCM που χρησιμοποιείται. Αναλυτικά, στο μοντέλο **UKESM1-0-LL** παρατηρείται μείωση του **φορτίου και των εκπομπών της σκόνης** στο εγγύς μέλλον στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής. Η μέτριας έντασης ελάττωση συνοδεύεται με μείωση της ταχύτητας του ανέμου. Σημαντική είναι η αύξηση της βροχόπτωσης που κατά μέση τιμή θα φτάσει τα 77 mm/year, γεγονός που μπορεί να συνδέεται με την αύξηση στην υγρή εναπόθεση σκόνης. Οι μεταβολές αυτές ισχυροποιούνται κατά την μεσοπρόθεσμη μελλοντική περίοδο και φτάνουν τις μέγιστες τιμές τους στα τέλη του αιώνα. Οι μειώσεις του ανέμου στο κεντρικό Σάχελ συνάδουν επίσης με τα πρότυπα της μεταβολής του φορτίου και των εκπομπών σκόνης (Pu and Ginoux, 2018).

Παρόμοια τάση των επιπέδων σκόνης εκδηλώνεται και στο μοντέλο **GISS-E2-1-G**. Αναλυτικά στο εγγύς μέλλον παρουσιάζεται μείωση στο **φορτίο**, στις **εκπομπές** καθώς και στις **εναποθέσεις της σκόνης**, η οποία ισχυροποιείται και φτάνει τις μέγιστες τιμές κατά την μεσοπρόθεσμη μελλοντική περίοδο. Στη μακροπρόθεσμη μελλοντική περίοδο, οι μεταβολές αναμένεται να βρίσκονται σε μειωτική τάση, αλλά σε μικρότερα επίπεδα από την προηγούμενη περίοδο, φτάνοντας τα επίπεδα της πρώτης περιόδου μελέτης.

Εντελώς διαφορετική εικόνα παρουσιάζεται στο μοντέλο **GFDL-ESM4**. Χαρακτηριστικά, κατά το εγγύς μέλλον αναμένεται αύξηση του **φορτίου** και των **εκπομπών σκόνης** σε συνδυασμό με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Η βροχόπτωση εκτιμάται να αυξηθεί σε μικρά επίπεδα όπως και η **υγρή εναπόθεση της σκόνης**. Κατά την μεσοπρόθεσμη περίοδο οι μεταβολές στο φορτίο της σκόνης και των εκπομπών μεγαλώνουν σε μικρό βαθμό, καθώς αυξάνεται η ένταση του ανέμου. Η μεγαλύτερη και σημαντικότερη μεταβολή εκδηλώνεται στη βροχόπτωση. Το ύψος βροχής στο Σάχελ σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, πρόκειται να παρουσιάσει ισχυρή μείωση της τάξεως των 142 mm/year. Παρόλο την μεγάλη αυτή διαφοροποίηση στον υετό, η υγρή εναπόθεση της σκόνης εξακολουθεί να βρίσκεται σε ανοδική τάση σε σχέση με την περίοδο αναφοράς, οι συνέπειες της μεταβολής της βροχόπτωσης αρχίζουν να γίνονται εμφανείς σε αυτή την περίοδο. Ξεκάθαρη είναι πλέον η κατάσταση στην μακροπρόθεσμη μελλοντική περίοδο, με



τη μείωση της βροχόπτωσης πλέον να υπερβαίνει τα 255 mm/year. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη ελάττωση των εκπομπών, της υγρής και της ξηρής εναπόθεσης της σκόνης. Το φορτίο της σκόνης εξακολουθεί να βρίσκεται σε μεγαλύτερα επίπεδα από το 1991-2010, αλλά εξισορροπείται σε σχέση με τις προηγούμενες περιόδους μελέτης.

Στο μοντέλο **MRI-ESM2.0** οι μεταβολές της σκόνης ξεκινάμε από μείωση στο εγγύς μέλλον και εξελίσσονται σε αυξήσεις στο τέλος του αιώνα. Συγκεκριμένα, την πρώτη εικοσαετία μελέτης το φορτίο οι εκπομπές και η ξηρή εναπόθεση της σκόνης εκτιμάται να αυξηθούν. Η υγρή εναπόθεση της σκόνης βρίσκεται σε υψηλότερα επίπεδα, συσχετίζοντας τη μεταβολή αυτή με την αύξηση της βροχόπτωσης στην περιοχή του Σάχελ. Στην επομένη περίοδο το φορτίο της σκόνης αυξάνεται σε μικρό βαθμό σε αντίθεση με τις εκπομπές που μεγαλώνουν αισθητά. Η ξηρή και υγρή εναπόθεση της σκόνης, ως απορία του φορτίου και της βροχόπτωσης αντίστοιχα, εκδηλώνουν σε βάθος χρόνου τις επιπτώσεις αυτών. Το ύψος βροχής πρόκειται να μειωθεί σε σχέση με το εγγύς μέλλον επηρεάζοντας έτσι και την υγρή εναπόθεση της σκόνης, η οποία εξακολουθεί να παρουσιάζει αύξηση, αλλά όχι σε σημαντικό βαθμό. Παρομοίως η ξηρή εναπόθεση της σκόνης, παρόλο τις μεταβολές που πρόέκυψαν, συνεχίζει να βρίσκεται σε αρνητικά πρόσημα. Τέλος, κατά την μακροπρόθεσμη μελλοντική περίοδο, οι μεταβολές στα επίπεδα σκόνης, όπως αναμενόταν ακολούθου την τάση που περιγράφεται, με το φορτίο, τις εκπομπές και την ξηρή εναπόθεση να αυξάνονται και η υγρή εναπόθεση της σκόνης να μειώνεται.

### 3.2.4 Κλιματολογικά στοιχεία και επίπεδα σκόνης στην Ασιατική ήπειρο

Η μεγαλύτερη ποικιλομορφία στην απόκριση των μοντέλων CMIP6 εμφανίζεται πάνω από τις ασιατικές περιοχές, μία ήπειρο γνωστή για την κακή ποιότητα του αέρα της (UNEP, 2017), με μεγάλες διαχρονικές διακυμάνσεις κοντά στις περιοχές προέλευσης της σκόνης. Οι διαφωνίες στην πρόβλεψη των μελλοντικών μεταβολών στα επίπεδα σκόνης μεταξύ των επιμέρους μοντέλων CMIP6 μπορούν να αποδοθούν στις διαφορές στην πολυπλοκότητα των συστημάτων αερολυμάτων (αιωρούμενων σωματιδίων) που εφαρμόζονται στα μοντέλα, ιδίως στους μηχανισμούς σχηματισμού των οργανικών αερολυμάτων, καθώς και στην ισχύ του σήματος κλιματικής αλλαγής (θερμοκρασία, βροχόπτωση και ταχύτητα του άνεμου) που προσομοιώνεται από τα μοντέλα, και στον αντίκτυπο που αυτό έχει στις φυσικές εκπομπές αερολυμάτων.

Πίνακας 3.4: Μέσες εκτιμώμενες τιμές των παραμέτρων από τα μοντέλα UKESM1-0-LL1, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 για το εγγύς μέλλον στην Ασία.

|                |             | Θερμοκρασία<br>(°C) | Βροχόπτωση<br>(mm/year) | Επιφανειακή<br>ταχύτητα ανέμου<br>(m/s) | Φορτίο σκόνης<br>(g/m <sup>2</sup> ) | Εκπομπές<br>σκόνης<br>(μg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) | Ξηρή εναπόθεση<br>σκόνης<br>(μg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) | Υγρή εναπόθεση<br>σκόνης<br>(μg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) |
|----------------|-------------|---------------------|-------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| ΤΑΚΛΑ<br>ΜΑΚΑΝ | UKESM1-0-LL | 4,6                 | 38,87                   | -0,04                                   | -0,0090                              | -0,1539                                                     | -0,0904                                                           | -0,2330                                                           |
|                | MRI-ESM2.0  | 1,6                 | 12,92                   | 0,00                                    | -0,0191                              | -0,5345                                                     | -0,2043                                                           | -0,0095                                                           |
|                | GISS-E2-1-G | 1,2                 | -8,88                   | 0,08                                    | -0,0087                              | -0,0582                                                     | -0,0140                                                           | -0,1481                                                           |
|                | GFDL-ESM4   | 0,9                 | 7,11                    | -0,04                                   | -0,0636                              | -1,5614                                                     | -0,4034                                                           | -0,7162                                                           |
| ΓΚΟΜΠΙ         | UKESM1-0-LL | 4,2                 | 70,05                   | -0,15                                   | -0,0277                              | -0,7561                                                     | -0,4730                                                           | -0,8444                                                           |
|                | MRI-ESM2.1  | 1,6                 | 14,25                   | -0,06                                   | -0,0448                              | -1,4096                                                     | -0,6032                                                           | -0,1402                                                           |
|                | GISS-E2-1-G | 1,3                 | 8,97                    | 0,01                                    | -0,0011                              | 0,0570                                                      | 0,0099                                                            | -0,0064                                                           |
|                | GFDL-ESM4   | 1,1                 | -2,69                   | -0,02                                   | -0,0158                              | -0,3117                                                     | -0,0957                                                           | -0,2269                                                           |
| ΚΑΡΑΚΟΥΜ       | UKESM1-0-LL | 4,9                 | 39,21                   | -0,11                                   | -0,0206                              | -0,5235                                                     | -0,3164                                                           | -0,0256                                                           |
|                | MRI-ESM2.0  | 1,4                 | 10,12                   | -0,01                                   | -0,0061                              | -0,0834                                                     | -0,0300                                                           | 0,0209                                                            |
|                | GISS-E2-1-G | 1,3                 | 19,51                   | -0,02                                   | -0,0009                              | -0,0339                                                     | 0,0034                                                            | 0,1685                                                            |
|                | GFDL-ESM4   | 1,0                 | -16,84                  | -0,04                                   | 0,0336                               | 0,5097                                                      | 0,1650                                                            | -0,1631                                                           |
| ΤΑΡ            | UKESM1-0-LL | 3,6                 | 12,85                   | 0,06                                    | 0,0058                               | 0,7655                                                      | 0,3778                                                            | -0,0798                                                           |
|                | MRI-ESM2.0  | 1,2                 | 3,20                    | -0,09                                   | -0,0217                              | -0,0654                                                     | -0,0945                                                           | 0,0078                                                            |
|                | GISS-E2-1-G | 0,8                 | 0,43                    | -0,01                                   | -0,0105                              | -0,1174                                                     | -0,0294                                                           | 0,0354                                                            |
|                | GFDL-ESM4   | 0,7                 | -7,72                   | -0,05                                   | 0,0061                               | -0,8059                                                     | -0,0758                                                           | -0,0432                                                           |
| ΛΟΥΤ           | UKESM1-0-LL | 4,6                 | 14,59                   | -0,03                                   | -0,0133                              | -0,1221                                                     | -0,1106                                                           | 0,1116                                                            |
|                | MRI-ESM2.0  | 1,4                 | 16,30                   | -0,07                                   | -0,0297                              | -1,2892                                                     | -0,7493                                                           | 0,0182                                                            |
|                | GISS-E2-1-G | 1,3                 | -9,82                   | -0,01                                   | -0,0033                              | -0,0006                                                     | -0,0013                                                           | -0,1455                                                           |
|                | GFDL-ESM4   | 1,2                 | -23,67                  | -0,02                                   | 0,0248                               | 0,0303                                                      | 0,0460                                                            | -0,3208                                                           |

Πίνακας 3.5: Μέσες εκτιμώμενες τιμές των παραμέτρων από τα μοντέλα UKESM1-0-LL1, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 για τη μεσοπρόθεσμη μελλοντική περίοδο στην Ασία.

|                |             | Θερμοκρασία<br>(°C) | Βροχόπτωση<br>(mm/year) | Επιφανειακή<br>ταχύτητα ανέμου<br>(m/s) | Φορτίο σκόνης<br>(g/m <sup>2</sup> ) | Εκπομπές<br>σκόνης<br>(μg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) | Ξηρή εναπόθεση<br>σκόνης<br>(μg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) | Υγρή εναπόθεση<br>σκόνης<br>(μg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) |
|----------------|-------------|---------------------|-------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| ΤΑΚΛΑ<br>ΜΑΚΑΝ | UKESM1-0-LL | 3,5                 | 41,75                   | -0,08                                   | -0,0166                              | -0,2471                                                     | -0,1505                                                           | -0,3504                                                           |
|                | MRI-ESM2.0  | 2,1                 | 10,61                   | 0,02                                    | -0,0090                              | -0,0104                                                     | -0,0458                                                           | 0,0028                                                            |
|                | GISS-E2-1-G | 1,6                 | 15,72                   | 0,13                                    | -0,0137                              | -0,1153                                                     | -0,0266                                                           | -0,2142                                                           |
|                | GFDL-ESM4   | 1,7                 | 19,40                   | -0,05                                   | -0,1736                              | -3,4417                                                     | -1,0073                                                           | -1,4557                                                           |
| ΓΚΟΜΠΙ         | UKESM1-0-LL | 3,5                 | 52,21                   | -0,25                                   | -0,0440                              | -1,2436                                                     | -0,7946                                                           | -1,2926                                                           |
|                | MRI-ESM2.1  | 2,2                 | 17,31                   | -0,02                                   | -0,0279                              | -0,8439                                                     | -0,3093                                                           | -0,1187                                                           |
|                | GISS-E2-1-G | 1,8                 | 36,01                   | 0,03                                    | -0,0073                              | 0,0003                                                      | -0,0025                                                           | -0,0688                                                           |
|                | GFDL-ESM4   | 2,1                 | 13,88                   | -0,06                                   | -0,0307                              | -0,3352                                                     | -0,1159                                                           | -0,2790                                                           |
| ΚΑΡΑΚΟΥΜ       | UKESM1-0-LL | 3,9                 | 36,37                   | -0,19                                   | -0,0399                              | -1,1360                                                     | -0,7197                                                           | -0,2917                                                           |
|                | MRI-ESM2.0  | 2,1                 | -7,14                   | 0,03                                    | -0,0037                              | 0,0522                                                      | 0,0168                                                            | 0,0096                                                            |
|                | GISS-E2-1-G | 1,8                 | 4,72                    | -0,02                                   | -0,0057                              | -0,0429                                                     | -0,0029                                                           | -0,0718                                                           |
|                | GFDL-ESM4   | 1,7                 | 5,40                    | -0,09                                   | 0,0378                               | 0,6570                                                      | 0,1709                                                            | -0,1560                                                           |
| ΤΑΡ            | UKESM1-0-LL | 2,7                 | 4,86                    | 0,05                                    | -0,0100                              | 0,6633                                                      | 0,3514                                                            | 0,0810                                                            |
|                | MRI-ESM2.0  | 1,8                 | -4,84                   | -0,02                                   | -0,0346                              | 0,0394                                                      | 0,0104                                                            | 0,0334                                                            |
|                | GISS-E2-1-G | 1,4                 | 5,05                    | -0,02                                   | -0,0157                              | -0,2790                                                     | -0,0619                                                           | 0,0712                                                            |
|                | GFDL-ESM4   | 1,4                 | 11,89                   | -0,03                                   | -0,0362                              | -1,5730                                                     | -0,3059                                                           | -0,1108                                                           |
| ΛΟΥΤ           | UKESM1-0-LL | 3,4                 | 15,41                   | -0,07                                   | -0,0368                              | -0,2696                                                     | -0,2193                                                           | -0,2075                                                           |
|                | MRI-ESM2.0  | 2,3                 | -12,71                  | -0,09                                   | -0,0558                              | -1,9056                                                     | -1,0196                                                           | -0,1076                                                           |
|                | GISS-E2-1-G | 1,9                 | 11,16                   | -0,03                                   | -0,0064                              | -0,0092                                                     | -0,0084                                                           | -0,2333                                                           |
|                | GFDL-ESM4   | 2,1                 | -11,91                  | -0,01                                   | 0,0387                               | 0,0324                                                      | 0,0837                                                            | -0,2918                                                           |

Πίνακας 3.6: Μέσες εκτιμώμενες τιμές των παραμέτρων από τα μοντέλα UKESM1-0-LL1, MRI-ESM2.0, GISS-E2-1-G, GFDL-ESM4 για τη μακροπρόθεσμη μελλοντική περίοδο στην Ασία.

|                |             | Θερμοκρασία<br>(°C) | Βροχόπτωση<br>(mm/year) | Επιφανειακή<br>ταχύτητα ανέμου<br>(m/s) | Φορτίο σκόνης<br>(g/m <sup>2</sup> ) | Εκπομπές<br>σκόνης<br>(μg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) | Ξηρή εναπόθεση<br>σκόνης<br>(μg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) | Υγρή εναπόθεση<br>σκόνης<br>(μg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) |
|----------------|-------------|---------------------|-------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| ΤΑΚΛΑ<br>ΜΑΚΑΝ | UKESM1-0-LL | 6,8                 | 59,21                   | -0,11                                   | -0,0241                              | -0,3581                                                     | -0,2172                                                           | -0,5085                                                           |
|                | MRI-ESM2.0  | 4,2                 | 41,77                   | 0,03                                    | 0,0220                               | 0,4533                                                      | 0,1319                                                            | 0,2470                                                            |
|                | GISS-E2-1-G | 3,5                 | 37,86                   | 0,21                                    | -0,0116                              | -0,0949                                                     | -0,0187                                                           | -0,0691                                                           |
|                | GFDL-ESM4   | 3,7                 | 42,42                   | -0,06                                   | -0,3847                              | -7,5784                                                     | -2,2117                                                           | -3,4436                                                           |
| ΓΚΟΜΠΙ         | UKESM1-0-LL | 6,8                 | 106,44                  | -0,46                                   | -0,0744                              | -2,0851                                                     | -1,3649                                                           | -2,0366                                                           |
|                | MRI-ESM2.1  | 4,1                 | 37,47                   | -0,02                                   | -0,0041                              | 0,0976                                                      | 0,2640                                                            | -0,0516                                                           |
|                | GISS-E2-1-G | 3,5                 | 80,66                   | 0,07                                    | -0,0118                              | -0,0494                                                     | -0,0125                                                           | -0,0248                                                           |
|                | GFDL-ESM4   | 3,8                 | 57,15                   | -0,10                                   | -0,0567                              | -0,3882                                                     | -0,1535                                                           | -0,5793                                                           |
| ΚΑΡΑΚΟΥΜ       | UKESM1-0-LL | 7,3                 | 77,07                   | -0,33                                   | -0,0683                              | -2,1545                                                     | -1,4246                                                           | -0,8615                                                           |
|                | MRI-ESM2.0  | 3,5                 | 28,75                   | 0,07                                    | -0,0060                              | 0,0076                                                      | 0,0062                                                            | 0,0192                                                            |
|                | GISS-E2-1-G | 3,2                 | 17,84                   | -0,01                                   | -0,0032                              | 0,0270                                                      | 0,0258                                                            | 0,0451                                                            |
|                | GFDL-ESM4   | 3,6                 | 36,48                   | -0,12                                   | 0,0984                               | 1,1939                                                      | 0,4498                                                            | -0,1918                                                           |
| ΤΑΡ            | UKESM1-0-LL | 5,4                 | 29,11                   | 0,12                                    | -0,0172                              | 0,4585                                                      | 0,2547                                                            | 0,3868                                                            |
|                | MRI-ESM2.0  | 3,6                 | 7,25                    | 0,01                                    | 0,0087                               | 0,0176                                                      | 0,0878                                                            | 0,0353                                                            |
|                | GISS-E2-1-G | 3,3                 | 18,93                   | 0,03                                    | 0,0025                               | 0,0760                                                      | 0,0321                                                            | 0,0751                                                            |
|                | GFDL-ESM4   | 3,5                 | 3,08                    | -0,02                                   | -0,0433                              | -2,5972                                                     | -0,5355                                                           | -0,2436                                                           |
| ΛΟΥΤ           | UKESM1-0-LL | 6,6                 | 53,84                   | -0,13                                   | -0,0562                              | -0,5034                                                     | -0,3841                                                           | -0,3021                                                           |
|                | MRI-ESM2.0  | 3,9                 | 26,47                   | -0,09                                   | -0,0518                              | -1,4742                                                     | -0,8268                                                           | -0,1190                                                           |
|                | GISS-E2-1-G | 3,7                 | 12,73                   | 0,00                                    | 0,0093                               | -0,0001                                                     | 0,0196                                                            | -0,2335                                                           |
|                | GFDL-ESM4   | 4,2                 | -27,31                  | -0,02                                   | 0,0677                               | 0,0640                                                      | 0,1546                                                            | -0,3602                                                           |



Η **θερμοκρασία του αέρα** αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη της Β. Ασίας. Στο **UKESM1-0-LL** η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα υπερεκτιμάται, ξεπερνώντας τους  $+7^{\circ}\text{C}$  κατά την τελευταία εικοσαετία του αιώνα, στη Β. Κίνα-Μογγολία. Υψηλές θερμοκρασίες αναμένονται και στην Αραβική Έρημο και στη Μικρά Ασία ( $+5^{\circ}\text{C}$ ). Σε ηπιότερες μεταβολές κυμαίνονται οι προσομοιώσεις των υπόλοιπων τριών μοντέλων, με τις σημαντικότερες μεταβολές να εντοπίζονται στις προαναφερθείσες περιοχές.

Η **βροχόπτωση** δεν παρουσιάζει σημαντική μεταβολή σε κανένα από τα τέσσερα GCM στις ερημικές περιοχές της Ασίας. Μικρή αύξηση που δεν ξεπερνά τα 300-500 mm/year καταγράφεται στην ενδοχώρα της Κίνας, και στα βόρεια σύνορα της Ινδίας (**UKESM1-0-LL**).

Η **επιφανειακή ταχύτητα του ανέμου** αποτελεί τον παράγοντα με τη μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στην ασιατική ήπειρο, γεγονός που οδηγεί σε διαφορετικά αποτελέσματα στα επίπεδα σκόνης στον 21<sup>ο</sup> αιώνα. Σύμφωνα με το **UKESM1-0-LL** και το **GFDL-ESM4**, η ταχύτητα του ανέμου παρουσιάζει καθοδική τάση της τάξεως των 1-1,5 m/s στην ευρύτερη περιοχή της Ασίας. Αντίθετη εικόνα καταγράφεται από τα μοντέλα **GISS-E2-1-G** και **MRI-ESM2.0**, όπου η ένταση του ανέμου αναμένεται να αυξηθεί σε ορισμένες περιοχές ξεπερνώντας τα 1,5 m/s. Παρατηρείται πως η ταχύτητα του ανέμου διαδραματίζει ζωτικό ρόλο στα επίπεδα σκόνης στην Ασία, καθώς οι τάσεις που καταγράφονται είναι ανάλογες μεταξύ τους. Επίσης, ο υπερίσχυση της ταχύτητας των ανέμων στη μεταβλητότητα της σκόνης πάνω από τη Μέση Ανατολή αναφέρθηκε από τους Kamal et al. (2019) και Mashat et al. (2020). Η χαμηλή υγρασία και/ή ο ισχυρός επιφανειακός άνεμος ευνοούν τις εκπομπές σκόνης (Csavina et al., 2014).

### 3.2.5 Επίπεδα σκόνης στην έρημο Τάκλα Μακάν

Η προσέγγιση των επιπέδων σκόνης για την έρημο Τάκλα Μακάν παρουσιάζεται με δυο διαφορετικούς τρόπους μεταξύ των εξεταζόμενων μοντέλων για τον 21<sup>ο</sup> αιώνα. Από τα αποτελέσματα, ερμηνεύονται δυο διαφορετικές προοπτικές, κυρίως από τα μοντέλα **MRI-ESM2.0** και **GFDL-ESM4**, καθώς οι μεταβολές στο **UKESM1-0-LL** και **GISS-E2-1-G** είναι μικρές και στις περισσότερες περιπτώσεις στατιστικά ασήμαντες.

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα που σχηματίζονται στην έρημο Τάκλα Μακάν από το μοντέλο **MRI-ESM2.0**, παρατηρείται μείωση των τιμών του **φορτίου της σκόνης** που δεν ξεπερνά κατά μέση τιμή  $0,009 \text{ g/m}^2$  μέχρι τα μέσα του αιώνα, ενώ καταγράφεται αύξηση κατά τη διάρκεια της μακροπρόθεσμης μελλοντικής περιόδου. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις **εκπομπές της σκόνης** δείχνουν μια αισθητή μείωση στο άμεσο μέλλον, η οποία με το πέρασ των ετών εξισορροπείται και αλλάζει σε ισχυρή αύξηση στο τέλος του αιώνα. Οι μεταβολές που προκύπτουν στην **ξηρή και στην υγρή εναπόθεση της σκόνης** στην έρημο Τάκλα Μακάν συμπίπτουν με αυτές των φορτίων. Αναλυτικά, σύμφωνα με το **MRI-ESM2.0**, παρατηρείται μεγάλη μείωση των τιμών της **ξηρής εναπόθεσης** μέχρι τη μεσοπρόθεσμη περίοδο, η οποία φτάνει σε θετικά επίπεδα στο τέλος του αιώνα. Η τάση της **υγρής εναπόθεσης** αυξάνεται σε σημαντικό βαθμό στο τέλος του αιώνα ( $>0,2 \text{ } \mu\text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ).

Η κατάσταση που παρουσιάζεται από το **UKESM1-0-LL**, **GISS-E2-1-G** και κυρίως από το **GFDL-ESM4** είναι εντελώς διαφορετική με την προαναφερθείσα. Συγκεκριμένα, εκδηλώνεται σημαντική μείωση του **φορτίου σκόνης** ήδη από το άμεσο μέλλον, η οποία ισχυροποιείται κατά την πάροδο των ετών και κορυφώνεται στην τελευταία εικοσαετία του αιώνα. Η μεταβολή των **εκπομπών** ακολουθεί το ίδιο μοτίβο με το φορτίο, όπου η μείωση ξεκινά σε χαμηλά επίπεδα και φτάνει στο μέγιστο κατά τη μακροπρόθεσμη περίοδο, φτάνοντας τα  $7,5 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  στο τέλος του αιώνα. Όσον αφορά στην **ξηρή εναπόθεση της σκόνης**, η τάση είναι ίδια με αυτή των προηγούμενων μεταβλητών. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον προκύπτει από τα αποτελέσματα της **υγρής εναπόθεσης** στην ερημική αυτή περιοχή. Αξιοσημείωτη είναι η μεγάλη αντίθεση που παρουσιάζουν τα δυο μοντέλα μεταξύ τους, καθώς στο μοντέλο αυτό οι τιμές μειώνονται κατά  $3,4 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

Ανάλογη εικόνα παρατηρείται από τους Zhao et al. (2023), οι οποίοι αναφέρουν πως οι εκπομπές σκόνης μειώνονται εξαιτίας της αύξησης της βροχόπτωσης και της μείωσης της ταχύτητας του αέρα σε περιοχική κλίμακα, γεγονός που επαληθεύεται με τις τιμές που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις του **GFDL-ESM4**.

### 3.2.6 Επίπεδα σκόνης στην έρημο Γκόμπι

Στην Α. Ασία, αν και τα μοντέλα CMIP6 μπορούν να αναπαράγουν τις εκπομπές σκόνης στις ερήμους της Β. Κίνας και της Ν. Μογγολίας, διαφέρουν πολύ στα όρια των ερήμων. Ήδη από πειράματα των μοντέλων CMIP5, οι Wu et al. (2019) παρατήρησαν μεγάλες αποκλίσεις για τις διακυμάνσεις των εκπομπών σκόνης πάνω από την Α. Ασία και έθεσαν υπό αμφισβήτηση τις επιπτώσεις για τις μακροπρόθεσμες διαφοροποιήσεις των διαδικασιών που σχετίζονται με τη σκόνη. Η μεγάλη ποικιλομορφία των τάσεων από τις προσομοιώσεις των μοντέλων μελέτης είναι ένα από τα συμπεράσματα που προκύπτουν για την Ασία.

Όσον αφορά στα επίπεδα στην έρημο Γκόμπι, φαίνεται πως μόνο δύο από τα μελετώμενα μοντέλα εξάγουν σημαντικά αποτελέσματα. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανομοιογένεια των αποτελεσμάτων που παράγουν τα μοντέλα μεταξύ τους. Στο **UKESM1-0-LL** καταγράφεται μία μείωση των τιμών και στους τέσσερις εξεταζόμενους παράγοντες σκόνης, η οποία ισχυροποιείται κατά την διάρκεια των ετών. Στο **MRI-ESM2.0**, το μοτίβο που ακολουθείται είναι η σημαντική μείωση στο άμεσο μέλλον, η οποία φαίνεται να εξισορροπείται σε μεγάλο βαθμό προς την τελευταία εικοσαετία του αιώνα. Μια αύξηση των ποσοτήτων παρατηρείται κυρίως στο δυτικό τμήμα της ερήμου. Στα υπόλοιπα δυο μοντέλα, **GISS-E2-1-G** και **GFDL-ESM4**, οι μεταβολές είναι μικρές και στατιστικά ασήμαντες για να αντληθούν ικανοποιητικά συμπεράσματα.

Συγκεκριμένα, στο **UKESM1-0-LL** παρατηρείται μείωση των τιμών του **φορτίου της σκόνης**, οι οποίες μεγιστοποιούνται στο τέλος του αιώνα. Το ίδιο μοτίβο ακολουθείται και στα επίπεδα της **ξηρής εναπόθεσης της σκόνης** για την έρημο Γκόμπι. Αναλυτικά, αναμένεται σταδιακή μείωση μέχρι το 2060, ενώ στην μακροπρόθεσμη περίοδο η μείωση εξακολουθεί να ισχυροποιείται φτάνοντας σε διπλάσια μεγέθη. Παρόμοια εικόνα εντοπίζεται και στις υπόλοιπες δυο παραμέτρους (**υγρή εναπόθεση σκόνης** και **εκπομπές σκόνης**), όπου ακολουθείται καθοδική τάση που μεγαλώνει με την πάροδο του χρόνου. Οι μειώσεις στις συγκεντρώσεις και στις εκπομπές της σκόνης σχετίζονται με τις εκτεταμένες μεταβολές στα πρότυπα του ανέμου. Οι Zhao

et al. (2023) δείχνουν την ισχυρή αυτή μείωση των εκπομπών πάνω από την ευρύτερη Ασία και κυρίως στην έρημο Γκόμπι για το σενάριο SSP3-7.0. Στη περιοχή της Ν. Κίνας-Μογγολίας παρατηρείται ισχυρή μείωση της ταχύτητας του ανέμου.

Διαφορετική πορεία των επιπέδων της σκόνης ακολουθείται από το μοντέλο **MRI-ESM2.0**. Αναλυτικά αναμένεται μείωση του **φορτίου της σκόνης** στο εγγύς μέλλον μέχρι την σταθεροποίηση του στα τέλη του αιώνα. Οι **εκπομπές σκόνης** εμφανίζουν ισχυρή μείωση στο εγγύς μέλλον ( $1,4 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) φτάνοντας τα  $0,8 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  το 2060. Η κατάσταση αλλάζει στο τέλος του αιώνα όταν καταγράφεται ελάχιστη μείωση στα ανατολικά της ερήμου και αύξηση ( $0,1 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) στα δυτικά αυτής. Στο ίδιο μοτίβο κυμαίνεται και η **ξηρή εναπόθεση της σκόνης** στην οποία η διαφορά σε σχέση με το **UKESM1-0-LL** καταγράφεται στην μακροπρόθεσμη περίοδο. Στο **MRI-ESM2.0**, η αρχική μείωση εξασθενεί μέχρι το 2060 και διαφοροποιείται στη μακροπρόθεσμη περίοδο, όπου αυξάνεται κατά  $0,26 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  σε σχέση με την περίοδο αναφοράς. Η εικόνα που παρουσιάζεται για την **υγρή εναπόθεση της σκόνης** στην έρημο Γκόμπι κυμαίνεται στα ίδια μονοπάτια με αυτή του ξηρής. Αξιοσημείωτη είναι η τάση που εμφανίζεται στο μοντέλο **MRI-ESM2.0**, σύμφωνα με το οποίο η σημαντικότερη μείωση των τιμών καταγράφεται στο εγγύς μέλλον και σταδιακά γίνεται μικρότερη με την πάροδο των ετών.

### 3.2.7 Επίπεδα σκόνης στην έρημο Καρακούμ

Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων των μοντέλων **UKESM1-0-LL** και **GFDL-ESM4** προκύπτουν μεταβολές στα επίπεδα της σκόνης στην έρημο Καρακούμ. Όπως στην περίπτωση της ερήμου Τάκλα Μακάν, έτσι και στην περίπτωση αυτή, τα μοντέλα παρουσιάζουν τις μεταβολές με διαφορετικό τρόπο κατά τη διάρκεια του 21<sup>ου</sup> αιώνα. Οι μεταβολές που απεικονίζονται από το **MRI-ESM2.0** και το **GISS-E2-1-G** είναι μικρές σε σχέση με τα άλλα δυο μοντέλα και στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι στατιστικά σημαντικές.

Το **UKESM1-0-LL** ακολουθεί τη γενική τάση μείωσης των τιμών στις περιοχές μελέτης και παρουσιάζει μείωση του **φορτίου σκόνης** στο εγγύς μέλλον, η οποία ενισχύεται μέχρι το τέλος του αιώνα. Στο ίδιο μήκος κύματος με το φορτίο σκόνης κυμαίνονται και οι υπόλοιποι τρεις εξεταζόμενοι παράγοντες. Ίδια πορεία καταγράφεται στις **εκπομπές της σκόνης** στην έρημο Καρακούμ, καθώς αναμένεται σταδιακή μείωση των ποσοτήτων φτάνοντας τις μέγιστες τιμές κατά την μακροπρόθεσμη περίοδο. Η **ξηρή εναπόθεση της σκόνης** σύμφωνα με το **UKESM1-0-LL** μειώνεται σταδιακά με την πάροδο του χρόνου. Όσον αφορά στην **υγρή εναπόθεση της σκόνης**, εμφανίζεται μικρή μείωση στο εγγύς μέλλον, ενώ τις υπόλοιπες δύο περιόδους η κατάσταση ισχυροποιείται έως ότου να παρατηρηθεί σημαντική μείωση στο τέλος του αιώνα.

Η εικόνα που παρουσιάζεται στο **GFDL-ESM4** είναι αντίθετη με αυτή του **UKESM1-0-LL**. Συγκεκριμένα, το **φορτίο σκόνης** αναμένεται να αυξηθεί στα επόμενα είκοσι χρόνια και να διατηρείται σε σταθερά επίπεδα και κατά την διάρκεια της μεσοπρόθεσμης μελλοντικής περιόδου. Σε σύγκριση με το προαναφερμένο μοντέλο, σε αυτή την περίπτωση αναμένεται μικρή αύξηση των ποσοτήτων μέχρι το 2060 και σημαντική αύξηση κατά την εικοσαετία 2081-2100. Η μεταβολή της **ξηρής εναπόθεσης και των εκπομπών σκόνης** είναι μικρή σε όλη την διάρκεια της περιόδου μελέτης, με την μείωση να έχει στατιστική σημασία στη μακροπρόθεσμη μελλοντική

περίοδο. Τέλος, η υγρή εναπόθεση παρουσιάζει μείωση που παραμένει σε σταθερά επίπεδα σε όλη την διάρκεια των ετών μελέτης. Η κατάσταση που παρουσιάζεται στο **GFDL-ESM4** συνδέεται με τα κλιματολογικά πρότυπα στην περιοχή αυτή. Η Κ. Ασία είναι μία από τις περιοχές που είναι ιδιαίτερα εκτεθειμένες στην κλιματική αλλαγή, με τα επίπεδα αύξησης της θερμοκρασίας να αναμένεται να είναι υψηλότερα από τον παγκόσμιο μέσο όρο (Hoegh-Guldberg et al., 2018), οδηγώντας σε περισσότερα ακραία φαινόμενα καύσωνα (Reyer et al., 2017), κι έχοντας ως αποτέλεσμα την αύξηση των ξηρασίων (Τουρκμενιστάν, Ουζμπεκιστάν).

Αξιοσημείωτη είναι η εικόνα που καταγράφεται στο μοντέλο **MRI-ESM2.0** στην έρημο Καρακούμ. Στο εγγύς μέλλον αναμένεται σημαντική αύξηση της **υγρής εναπόθεσης της σκόνης**. Κατά τη μεσοπρόθεσμη περίοδο φαίνεται πως οι μεταβολές έχουν περιοριστεί με αποτέλεσμα να εμφανιστούν δύο τμήματα στην ευρύτερη περιοχή της ερήμου, στο βόρειο τμήμα της οποίας υπάρχει αύξηση και στο νότιο μείωση των ποσοτήτων. Οι αντιθέσεις αυτές γίνονται εντονότερες και εμφανέστερες κατά τη μακροπρόθεσμη περίοδο.

### 3.2.8 Επίπεδα σκόνης στην έρημο Ταρ

Μία ακόμα περιοχή στην οποία παρουσιάζονται μεταβολές στα επίπεδα της σκόνης είναι η έρημος Ταρ, στη ΒΔ Ινδία. Τα μοντέλα στα οποία εκδηλώνονται οι σημαντικότερες μεταβολές είναι τα **UKESM1-0-LL** και **GFDL-ESM4** που σε μεγάλο βαθμό έρχονται σε συμφωνία ως προς την παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Ερμηνεύοντας τους χάρτες που προκύπτουν από το μοντέλο **UKESM1-0-LL** γίνεται αντιληπτό ότι η έρημος Ταρ χωρίζεται σε δύο υποπεριοχές, οι οποίες έχουν διαφορετική συμπεριφορά μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, από μελέτη του **φορτίου σκόνης** παρατηρείται μια αύξηση στο δυτικό άκρο της ερήμου, η οποία παραμένει σε σταθερά επίπεδα κατά την πάροδο των ετών. Αντιθέτως, καταγράφεται μείωση στο βορειοανατολικό κομμάτι της ερήμου, η οποία φτάνει την μέγιστη τιμή της στη μακροπρόθεσμη περίοδο. Η ίδια συμπεριφορά εντοπίζεται και στις υπόλοιπες εξεταζόμενες παραμέτρους. Λαμβάνοντας υπόψη την έρημο σαν μια ενιαία περιοχή, το φορτίο της σκόνης αναμένεται να μειωθεί από τα δεύτερο μισό του αιώνα και να παραμείνει σε σταθερές τιμές μέχρι το τέλος αυτού. Οι **εκπομπές τις σκόνης** θα αυξάνονται σταδιακά μέχρι την μεσοπρόθεσμη μελλοντική περίοδο, ενώ κατά την μεσοπρόθεσμη μελλοντική περίοδο η αύξηση θα περιοριστεί σε μικρότερα επίπεδα. Η **ξηρή εναπόθεση** θα παρουσιάσει μεγάλη αύξηση κατά το εγγύς μέλλον, η οποία θα περιοριστεί τα επόμενα χρόνια, παρόλο που οι τιμές θα εξακολουθούν να είναι θετικές. Τέλος η **υγρή εναπόθεση της σκόνης** αναμένεται να μειωθεί στο εγγύς μέλλον και να αυξάνεται συνεχώς μέχρι το 2100. Η ισχυρή ενίσχυση της τοπικής βροχόπτωσης στη Ν. Ασία (Ινδία) συμβάλλει στην προώθηση της υγρής εναπόθεσης σκόνης, προκαλώντας μείωση του φορτίου σκόνης στην περιοχή. Επιστημονικές μελέτες συμφωνούν στις αυξημένες βροχοπτώσεις και τιμές της υγρής εναπόθεσης σκόνης στην Ινδία, καθώς αποτελούν αποτέλεσμα της υπερθέρμανσης του πλανήτη που τείνει να ενισχύσει τους καλοκαιρινούς μουσώνες της Ν. Ασίας (Sabade et al., 2010; Rana et al., 2014)

Παρόμοια κατάσταση με αυτή του **UKESM1-0-LL** παρουσιάζεται και στο μοντέλο **GFDL-ESM4**, με την διαφορά να βρίσκεται στο δυτικό τμήμα της ερήμου. Χαρακτηριστικά, η μείωση των τιμών



καταγράφεται στο μεγαλύτερο μέρος της ερημικής περιοχής, με τις αυξήσεις να εντοπίζονται είτε δυτικότερα, στην περιοχή του Πακιστάν, είτε να απουσιάζουν εντελώς. Συγκεκριμένα, το **φορτίο σκόνης** αναμένεται να αυξηθεί στο εγγύς μέλλον και έκτοτε να παρουσιάσει σταδιακή μείωση φτάνοντας τις μέγιστες αρνητικές τιμές του κατά τη μακροπρόθεσμη περίοδο στην πλειοψηφία της περιοχής. Ακόμα, εντοπίζεται μία μικρή αύξηση στα δυτικά της ερήμου, στην περιοχή του Πακιστάν. Όσον αφορά στις **εκπομπές σκόνης**, αυτές θα παρουσιάζουν μια ισχυρή μείωση, η οποία θα εντατικοποιείται κατά την πάροδο των ετών. Η μεταβολή που παρουσιάζεται για την **ξηρή εναπόθεση** και στην **υγρή εναπόθεση σκόνης** είναι παρόμοια με αυτή των εκπομπών, με την αρνητική τάση να μεγαλώνει έως το τέλος του αιώνα

Άξια αναφοράς είναι η εικόνα που καταγράφεται στο μοντέλο **MRI-ESM2.0** στην έρημο Ταρ. Στο μοντέλο αυτό, δεν σημειώνονται σημαντικές αλλαγές στην πλειοψηφία των παραμέτρων με εξαίρεση αυτή της **υγρής εναπόθεσης σκόνης**. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, εμφανίζεται σημαντική αύξηση των τιμών της ήδη από το εγγύς μέλλον, με την τάση να έχει αυξητική πορεία και να φτάνει σε μεγάλα ποσά στο τέλος του αιώνα.

### 3.2.9 Επίπεδα σκόνης στην έρημο Λουτ

Εξετάζοντας τους χάρτες που προκύπτουν από τα εξεταζόμενα μοντέλα, παρατηρούνται μεταβολές στα επίπεδα σκόνης και στην έρημο Λουτ, στην περιοχή του Ιράν. Όπως συμβαίνει στην περίπτωση της ερήμου Καρακούμ, παρόμοια εικόνα εκδηλώνεται και στην έρημο Λουτ, κατά την οποία τα μοντέλα ενδιαφέροντος είναι το **MRI-ESM2.0** και το **GFDL-ESM4** που παρουσιάζουν τις τάσεις με διαφορετικό τρόπο το καθένα. Η εικόνα που εκδηλώνεται στο **UKESM1-0-LL** είναι ίδια με αυτή του **MRI-ESM2.0**, με την διαφορά να εντοπίζεται στην μικρότερη ένταση των μεταβολών.

Στο μοντέλο **MRI-ESM2.0** παρατηρείται μείωση του **φορτίου της σκόνης** από τα πρώτα χρόνια της περιόδου αναφοράς, η οποία ισχυροποιείται με την πάροδο του χρόνου, κορυφώνοντας κατά την μακροπρόθεσμη περίοδο. Οι **εκπομπές σκόνης** και η **ξηρή εναπόθεση της σκόνης** παρουσιάζουν μια μείωση από το εγγύς μέλλον, η οποία θα ισχυροποιείται μέχρι το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα. Η σημαντικότερη μεταβολή των παραμέτρων εντοπίζεται στην **υγρή εναπόθεση της σκόνης**. Συγκεκριμένα, αναμένεται αύξηση των ποσοτήτων στο εγγύς μέλλον, όπου θα ακολουθήσει ισχυρή μείωση στη μεσοπρόθεσμη μελλοντική περίοδο, με αποκορύφωση την τελευταία εικοσαετία του αιώνα. Η έρημος Λουτ ανήκει γεωγραφικά στην ευρύτερη περιοχή της ΝΔ Ασίας, όπου εκδηλώνεται σημαντική μείωση της υγρής εναπόθεσης σκόνης σύμφωνα με αυτό το εξεταζόμενο μοντέλο. Αναλυτικά, αναμένεται μία σταθερή μείωση των επίπεδων σκόνης, που θα διατηρηθεί μέχρι το 2100.

Η εικόνα που παρουσιάζεται στο μοντέλο **GFDL-ESM4** για την έρημο Λουτ είναι διαφορετική από αυτή που αναφέρθηκε στο προηγούμενο μοντέλο. Συγκεκριμένα, το **φορτίο σκόνης** αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου σε αντίθεση με τη μείωση που εκδηλώνεται στο **MRI-ESM2.0**. Οι **εκπομπές της σκόνης** παρουσιάζουν μικρή αύξηση μέχρι το 2060, η οποία μεγιστοποιείται στην τελευταία εικοσαετία του αιώνα. Οι μεταβολές που προκύπτουν στην **ξηρή εναπόθεση της σκόνης** στην περίπτωση αυτή, έχουν μια μικρή αυξητική τάση, η οποία παραμένει

σε χαμηλά επίπεδα σε όλη την διάρκεια της περιόδου μελέτης. Όσον αφορά την **υγρή εναπόθεση της σκόνης**, αν και παρατηρείται μια μείωση σε όλη την διάρκεια μελέτης, οι μεταβολές που εκδηλώνονται είναι μικρές και μη στατιστικά σημαντικές για να εξαχθούν συμπεράσματα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια αρχική ανάλυση των ιστορικών και μελλοντικών μεταβολών των επιπέδων σκόνης που προήλθαν από προσομοιώσεις τριών GCM κι ενός CCM τελευταίας γενιάς στα πλαίσια του CMIP6. Ως περίοδος αναφοράς χρησιμοποιείται η εικοσαετία 1991-2010 (historical) και οι προσομοιώσεις για το σενάριο SSP3-7.0 για κάθε μία από τις εξής μελλοντικές περιόδους: α) εγγύς μέλλον (2021-2040), β) μεσοπρόθεσμη μελλοντική περίοδος (2041-2060) και γ) μακροπρόθεσμη μελλοντική περίοδος (2081-2100).

Στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ το οποίο προηγείται αυτού, αναλύεται κάθε κλιματική παράμετρος προκειμένου να εξεταστεί ο ρόλος της σκόνης στο κλίμα καθώς και να προβληθεί η γενική της εικόνα κατά τη διάρκεια του αιώνα. Στις παραμέτρους που μελετώνται συγκαταλέγονται η θερμοκρασία του αέρα, η βροχόπτωση, η επιφανειακή ταχύτητα του ανέμου, το φορτίο, οι εκπομπές η ξηρή και υγρή εναπόθεση της σκόνης. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων παρατηρούνται αρκετές περιοχές στην υφήλιο με μεταβολές σε διάφορες παραμέτρους που αφορούν τα επίπεδα σκόνης, όπως η Παταγονία, η έρημος Ατακάμα στην Χιλή και η έρημος Μεγάλη Βικτώρια στην Αυστραλία. Παρόλα αυτά, στην παρούσα εργασία δίνεται έμφαση στις αλλαγές που αναμένεται να πραγματοποιηθούν στα επίπεδα σκόνης στην Αφρική και στην Ασία. Συνεπώς, προκύπτουν επτά ερημικές περιοχές πάνω από την αφρικανική και ασιατική ήπειρο, στις οποίες η σκόνη αναμένεται να παρουσιάσει σημαντικές αυξομειώσεις τα επόμενα 80 χρόνια. Οι συγκεκριμένες περιοχές είναι η έρημος Σαχάρα, η ερημική περιοχή Σαχέλ, η έρημος Τάκλα Μακάν, η έρημος Γκόμπι, η έρημος Καρακούμ, η έρημος Ταρ και η έρημος Λουτ.

Είναι φανερό πως τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις των τεσσάρων μοντέλων εμφανίζουν ομοιότητες αλλά και αρκετές διαφορές μεταξύ τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως το κάθε κλιματικό μοντέλο έχει τις δικές του εξισώσεις, παραμέτρους και προσεγγίσεις για την περιγραφή του κλιματικού συστήματος της Γης. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι καμία μοντελοποίηση δεν αποτελεί πιστή περιγραφή της πραγματικότητας και οι αποκλίσεις μεταξύ των μοντέλων είναι αναμενόμενες. Για το συγκεκριμένο λόγο, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται ποικίλα μοντέλα για να ληφθεί μία πιο πλήρης εικόνα των πιθανών αποτελεσμάτων και να εκτιμηθεί η αβεβαιότητα στις μελλοντικές προβολές.

Οι μεγαλύτερες τιμές του φορτίου και των εκπομπών σκόνης προσομοιώνονται στα μοντέλα CMIP6 κοντά σε περιοχές πηγών σκόνης και ανθρωπογενών εκπομπών. Από τα σχήματα των παγκόσμιων μέσων ετησίων τιμών των παραμέτρων γίνεται αντιληπτή η κλιματική ευαισθησία και ετερογένεια των μοντέλων μελέτης. Χαρακτηριστικές είναι εκτιμήσεις της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης από το μοντέλο UKESM1-0-LL. Το UKESM1-0-LL τείνει να προσομοιώνει τη μεγαλύτερη ιστορική μεταβολή και το GISS-E2-1-G τη μικρότερη. Αυτό συμβαίνει διότι το UKESM1-0-LL αποτελεί ένα μοντέλο με υψηλή κλιματική ευαισθησία ισορροπίας (ECS-5,4 K) σε σύγκριση με άλλα μοντέλα CMIP6 (Sellar et al., 2019) και, ως εκ τούτου, θα παρουσιάσει μεγαλύτερη κλιματική απόκριση. Οι μεγάλες μεταβολές στα επίπεδα σκόνης του UKESM1-0-LL σε σχέση με τα υπόλοιπα μοντέλα συμβαίνει εξαιτίας της εξάρτησης των εκπομπών σκόνης με το κλάσμα του γυμνού εδάφους και την ευαισθησία του γυμνού εδάφους στο κλίμα του μοντέλου

σε ημίξηρες περιοχές. Η προσθήκη της αλληλεπίδρασης της σκόνης με την βλάστηση βοήθησε στη σημαντική μείωση των σφαλμάτων.

Όσον αφορά στις παραμέτρους της σκόνης σε παγκόσμιο επίπεδο προκύπτει σταθερή πορεία, δίχως σημαντικές αλλαγές στα επίπεδα σκόνης από τις προσομοιώσεις των μοντέλων GISS-E2-1-G και GFDL-ESM4. Αυξητική τάση καταγράφεται στην πλειοψηφία των παραμέτρων από το MRI-ESM2.0 αποτελώντας το ενδιάμεσο μοντέλο από το σύνολο των μελετώμενων GCM. Στο μοντέλο αυτό, η αυξημένη ταχύτητα του επιφανειακού αέρα, συνδέεται με τις αυξημένες εκπομπές σκόνης, ενώ τα αυξημένα πόσα του ύψους βροχής με τα αντίστοιχα της υγρής εναπόθεσης της σκόνης.

Για το σενάριο ασθενούς μετριασμού του κλίματος και των ατμοσφαιρικών ρύπων (SSP3-7.0), οι μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις και εκπομπές της σκόνης εκτιμάται να μειωθούν και να αυξηθούν σε αρκετές περιοχές. Τα μοντέλα CMIP6 έρχονται σε συμφωνία σε ικανοποιητικό βαθμό πάνω από την αφρικανική ήπειρο. Η μεγαλύτερη ποικιλομορφία στην απόκριση των μοντέλων CMIP6 εμφανίζεται πάνω από τις ασιατικές περιοχές. Με βάση την προσέγγιση του συνόλου των μοντέλων διαπιστώνεται ότι οι εκπομπές σκόνης πιθανότατα αυξάνονται στην Αφρική, αλλά μειώνονται στην Ασία. Συγκεκριμένα, στην Αφρική, αναμένεται αύξηση στην Δ. Σαχάρα και μείωση στην Α. Σαχάρα και στο Σάχελ. Στην Ασία, τα επίπεδα σκόνης εκτιμώνται ότι θα αυξηθούν στο δυτικό τμήμα της ηπείρου (έρημοι Καράκουμ, Λουτ και Ταρ) και θα μειωθούν στις ερήμους Τακλά Μακάν και Γκόμπι. Οι αλλαγές στο φορτίο σκόνης γενικά ακολουθούν εκείνες των εκπομπών, αλλά με την κοινή επίδραση την επιφανειακή ένταση του ανέμου και της βροχόπτωσης, η οποία επηρεάζει το φορτίο σκόνης μέσω της υγρής εναπόθεσης. Η μείωση της βροχόπτωσης μπορεί να αυξήσει περαιτέρω το φορτίο σκόνης σε περιοχές με αυξημένες εκπομπές (π.χ., Κ. Αφρική) μέσω της μείωσης της υγρής εναπόθεσης. Αντίθετα, η αυξημένη βροχόπτωση μειώνει το φορτίο σκόνης με περισσότερη υγρή εναπόθεση σε περιοχές με μέτριες ή περιορισμένες αλλαγές στις εκπομπές σκόνης (π.χ. Α. Ασία). Η παγκόσμια εκπομπή σκόνης καθοδηγείται κυρίως από τους επιφανειακούς ανέμους στην Ασία όπου επικρατούν οι ηπειρώτικου τύπου έρημοι και η υγρασία είναι ελάχιστη. Η περιοχή της Βόρειας Κίνας φαίνεται να αποτελεί ιδιαίτερη πρόκληση για τα μοντέλα, καθώς τρία από τα τέσσερα μοντέλα μελέτης παρουσιάζουν διαφορετική προσέγγιση στα επίπεδα σκόνης. Ένας ακόμα παράγοντας που πιθανό να οφείλεται στην ποικιλομορφία των προσημειώσεων στην Ασία είναι η ανεπάρκεια των μοντέλων να αποδώσουν πλήρως τα αναπαριστώμενα συστήματα μουσώνων που διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στις εκπομπές σκόνης στις περιοχές αυτές (Wu et al., 2018).

Η μελέτη των παραμέτρων για τα επίπεδα σκόνης που προσομοιώνονται από τα μοντέλα CMIP6 παρουσιάζει παρόμοιες τάσεις με τις προηγούμενες γενιές GCM. Οι αναλύσεις των μοντέλων CMIP5 (Evan, 2018; Wu et al., 2018; Wu et al., 2020; Adebisi et al., 2020) αποκαλύπτουν ότι όλα τα κλιματικά μοντέλα υποεκτιμούν συστηματικά την αναπαράσταση των κινητήριων μηχανισμών εκπομπής, της μεταφοράς και απόθεσης σκόνης, το μέγεθος και το σχήμα σωματιδίων σκόνης. Ένας κοινώς προτεινόμενος λόγος για την έλλειψη μεταβλητότητας της σκόνης από τα κλιματικά μοντέλα είναι η αδυναμία των μοντέλων να προσομοιώσουν τις επιπτώσεις των αλλαγών στις μετεωρολογικές και κλιματικές διεργασίες που διαδραματίζουν



κρίσιμο ρόλο στις διεργασίες της σκόνης (Stanelle et al. 2014, Kok et al., 2017). Οι μελλοντικές τάσεις των εκπομπών σκόνης εξαρτώνται από τις αλλαγές στα πρότυπα βροχόπτωσης και της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας. Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι οι μοντελοποιημένες διεργασίες σκόνης γίνονται όλο και πιο αβέβαιες καθώς τα μοντέλα γίνονται πιο εξελιγμένα. Για την καλύτερη και πιο λεπτομερή εξαγωγή συμπερασμάτων απαιτούνται περισσότερες μεταβλητές που σχετίζονται με το μέγεθος της σκόνης και αφορούν στον κύκλο ζωής της σκόνης, καθώς και αλληλεπιδράσεις που εξαρτώνται από τις αλλαγές στα πρότυπα βροχόπτωσης και της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας.

Οι διαφορές στις προσομοιωμένες μελλοντικές μεταβολές της σκόνης στα μοντέλα CMIP6 στο SSP3-7.0 υπογραμμίζουν ότι είναι σημαντικό να εξεταστεί πώς ανταποκρίνονται οι φυσικές πηγές αερολυμάτων σε ένα μελλοντικό κλίμα εκτός από τις μεταβολές από τις ανθρωπογενείς εκπομπές. Απαιτούνται επιπλέον μελέτες για τη διερεύνηση των αβεβαιοτήτων των μοντέλων και των διαφορών με τις παρατηρήσεις. Η περαιτέρω έρευνα και κατανόηση αυτών των διεργασιών είναι απαραίτητες για τη βελτίωση της αξιοπιστίας των περιφερειακών μελλοντικών προβολών των ατμοσφαιρικών ρύπων σε κλίμακες κλιματικής αλλαγής (δεκαετείς έως εκατονταετείς).

Abercrombie & Kent (2023). Chile: From the Andes to the Atacama Desert. [online] Available at: <https://www.abercrombiekent.com/tours/luxury-small-group-journeys/2023/chile-from-the-andes-to-the-atacama-desert> [Accessed 22 Oct. 2023].

Adebisi, A.A., Kok, J.F., Wang, Y., Ito, A., Ridley, D.A., Nabat, P. and Zhao, C. (2020). Dust Constraints from joint Observational-Modelling-experimental analysis (DustCOMM): comparison with measurements and model simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(2), pp.829–863. doi:<https://doi.org/10.5194/acp-20-829-2020>.

Anderson, R.S., Haff, P.K. (1991). Aeolian Grain Transport 1. *Acta mechanica*. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6706-9>.

Archibald, A.T., O'Connor, F.M., Abraham, N.L., Archer-Nicholls, S., Chipperfield, M.P., Dalvi, M., Folberth, G.A., Dennison, F., Dhomse, S.S., Griffiths, P.T., Hardacre, C., Hewitt, A.J., Hill, R.S., Johnson, C.E., Keeble, J., Köhler, M.O., Morgenstern, O., Mulcahy, J.P., Ordóñez, C. and Pope, R.J. (2020). Description and evaluation of the UKCA stratosphere–troposphere chemistry scheme (StratTrop vn 1.0) implemented in UKESM1. *Geoscientific Model Development*, 13(3), pp.1223–1266. doi:<https://doi.org/10.5194/gmd-13-1223-2020>.

BBC (2023). Yellow dust: Sandstorms bring misery from China to South Korea. BBC News. [online] 13 Apr. Available at: <https://www.bbc.com/news/world-asia-65247927>.

Bellouin, N., Collins, W.J., Culverwell, I.D., Halloran, P.R., Hardiman, S.C., Hinton, T.J., Jones, C.D., McDonald, R.E., McLaren, A.J., O'Connor, F.M., Roberts, M.J., Rodriguez, J.M., Woodward, S., Best, M.J., Brooks, M.E., Brown, A.R., Butchart, N., Dearden, C., Derbyshire, S.H. and Dharssi, I. (2011). The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. *Geoscientific Model Development*, 4(3), pp.723–757. doi:<https://doi.org/10.5194/gmd-4-723-2011>.

Best, M.J., Pryor, M., Clark, D.B., Rooney, G.G., Essery, R. .L. H., Ménard, C.B., Edwards, J.M., Hendry, M.A., Porson, A., Gedney, N., Mercado, L.M., Sitch, S., Blyth, E., Boucher, O., Cox, P.M., Grimmond, C.S.B. and Harding, R.J. (2011). The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description – Part 1: Energy and water fluxes. *Geoscientific Model Development*, 4(3), pp.677–699. doi:<https://doi.org/10.5194/gmd-4-677-2011>.

BodEx 2005 ([www.geog.ox.ac.uk](http://www.geog.ox.ac.uk)). (2023). Measurements and observations in northern Chad (Bodélé/Djourab) - Research Project - School of Geography and the Environment. [online] Available at: <https://www.geog.ox.ac.uk/research/climate/projects/bodex/intro.html> [Accessed 22 Oct. 2023].

Bombi, P., Salvi, D., Shuuya, T., Vignoli, L. and Wassenaar, T. (2021). Climate change effects on desert ecosystems: A case study on the keystone species of the Namib Desert *Welwitschia mirabilis*. *PLOS ONE*, 16(11), p.e0259767. doi:<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0259767>.

Boudreau, D., McDaniel, M., Sprout, E. and Turgeon, A. (2023). desert | National Geographic Society. [online] education.nationalgeographic.org. Available at: <https://education.nationalgeographic.org/resource/desert/>.

Broom, D. (2022). Deserts have a biocrust skin and it's suffering because of climate change. Could 'skin grafts' provide a solution? [online] World Economic Forum. Available at: <https://www.weforum.org/agenda/2022/05/climate-change-harming-deserts/>.

CA.gov (ww2.arb.ca.gov). (2023). Visibility-Reducing Particles & Health | California Air Resources Board. [online] Available at: <https://ww2.arb.ca.gov/resources/visibility-reducing-particles-and-health>.

Cakmur, R.V., Miller, R.L., Perlwitz, J., Geogdzhayev, I.V., Ginoux, P., Koch, D., Kohfeld, K.E., Tegen, I. and Zender, C.S. (2006). Constraining the magnitude of the global dust cycle by minimizing the difference between a model and observations. Journal of Geophysical Research, 111(D6). doi:<https://doi.org/10.1029/2005jd005791>.

Carlson, T.N. and Prospero, J.M. (1972). The Large-Scale Movement of Saharan Air Outbreaks over the Northern Equatorial Atlantic. Journal of applied meteorology, 11(2), pp.283–297. doi:[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1972\)011%3C0283:tlsmos%3E2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1972)011%3C0283:tlsmos%3E2.0.co;2).

Chate, D.M. and Pranesha, T.S. (2004). Field studies of scavenging of aerosols by rain events. Journal of Aerosol Science, 35(6), pp.695–706. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2003.09.007>.

Chen, G., Ziemba, L.D., Chu, D.A., Thornhill, K.L., Schuster, G.L., Winstead, E.L., Diskin, G.S., Ferrare, R.A., Burton, S.P., Ismail, S., Kooi, S.A., Omar, A., Slusher, D.L., Kleb, M.M., Reid, J.S., Twohy, C.H., Zhang, H. and Anderson, B.E. (2011). Observations of Saharan dust microphysical and optical properties from the Eastern Atlantic during NAMMA airborne field campaign. Atmospheric Chemistry and Physics, 11(2), pp.723–740. doi:<https://doi.org/10.5194/acp-11-723-2011>.

Cheng, Y., YEH, H.-C. and ALLEN, M.D. (1988). PHYSICAL CHARACTERISATION AND AERODYNAMIC BEHAVIOUR OF PLATE-LIKE PARTICLES. Elsevier eBooks, pp.369–378. doi:<https://doi.org/10.1016/b978-0-08-034185-9.50043-7>.

Cockerton, H.E., Holmes, J.A., Street-Perrott, F.A. and Ficken, K.J. (2014). Holocene dust records from the West African Sahel and their implications for changes in climate and land surface conditions. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 119(14), pp.8684–8694. doi:<https://doi.org/10.1002/2013jd021283>.

Copernicus (atmosphere.copernicus.eu). (2022). What is desert dust and how does it change atmosphere and the air we breathe? | Copernicus. [online] Available at: <https://atmosphere.copernicus.eu/what-saharan-dust-and-how-does-it-change-atmosphere-and-air-we-breathe>.

Csavina, J., Field, J., Félix, O., Corral-Avitia, A.Y., Sáez, A.E. and Betterton, E.A. (2014). Effect of wind speed and relative humidity on atmospheric dust concentrations in semi-arid climates.

Science of The Total Environment, 487, pp.82–90.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.138>.

"Das, S., Pal, D. and Sarkar, A. (2021). Particulate Matter Pollution and Global Agricultural Productivity. Sustainable agriculture reviews, pp.79–107. doi:[https://doi.org/10.1007/978-3-030-63249-6\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-63249-6_4).

deMenocal, P.B. and Tierney, J.E. (2012). Green Sahara: African Humid Periods Paced by Earth's Orbital Changes | Learn Science at Scitable. [online] [www.nature.com](http://www.nature.com). Available at: <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/green-sahara-african-humid-periods-paced-by-82884405/>.

DKRZ. (2023). The SSP Scenarios. [online] Available at: <https://www.dkrz.de/en/communication/climate-simulations/cmip6-en/the-ssp-scenarios>.

Dunne, J.P., Horowitz, L.W., Adcroft, A.J., Ginoux, P., Held, I.M., John, J.G., Krasting, J.P., Malyshev, S., Naik, V., Paulot, F., Shevliakova, E., Stock, C.A., Zadeh, N., Balaji, V., Blanton, C., Dunne, K.A., Dupuis, C., Durachta, J., Dussin, R. and Gauthier, P.P.G. (2020). The GFDL Earth System Model Version 4.1 (GFDL-ESM 4.1): Overall Coupled Model Description and Simulation Characteristics. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 12(11). doi:<https://doi.org/10.1029/2019ms002015>.

Durcan, J.A., Thomas, D.S.G., Gupta, S., Pawar, V., Singh, R.N. and Petrie, C.A. (2019). Holocene landscape dynamics in the Ghaggar-Hakra palaeochannel region at the northern edge of the Thar Desert, northwest India. Quaternary International, 501, pp.317–327. doi:<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.10.012>.

EEA ([www.eea.europa.eu](http://www.eea.europa.eu)). (2012). Particulate matter from natural sources and related reporting under the EU Air Quality Directive in 2008 and 2009 — European Environment Agency. [online] Available at: <https://www.eea.europa.eu/publications/particulate-matter-from-natural-sources>.

Emanuela Molinaroli (1996). Mineralogical Characterisation of Saharan Dust with a View to its Final Destination in Mediterranean Sediments. Environmental science and technology library, pp.153–162. doi:[https://doi.org/10.1007/978-94-017-3354-0\\_14](https://doi.org/10.1007/978-94-017-3354-0_14).

Encounter Edu. (2022). Learn about Global atmospheric circulation. [online] Available at: <https://encounteredu.com/cpd/subject-updates/learn-about-global-atmospheric-circulation>.

Encyclopedia Britannica (2018). Sahel | Location, Facts, & Desertification. In: Encyclopædia Britannica. [online] Available at: <https://www.britannica.com/place/Sahel>.

Encyclopedia Britannica (2023). Hadley cells, a model to describe the Earth's atmospheric circulation. In: Encyclopædia Britannica Britannica. [online] Available at: <https://shorturl.at/eLSZ9>.

Evan, A.T. (2018). Surface Winds and Dust Biases in Climate Models. Geophysical Research Letters, 45(2), pp.1079–1085. doi:<https://doi.org/10.1002/2017gl076353>.



Evan, A.T., Flamant, C., Gaetani, M. and Guichard, F. (2016). The past, present and future of African dust. *Nature*, [online] 531(7595), pp.493–495. doi:<https://doi.org/10.1038/nature17149>.

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J. and Taylor, K.E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), pp.1937–1958. doi:<https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>.

Falkovich, A.H., E. Ganor, Levin, Z., Formenti, P. and Rudich, Y. (2001). Chemical and mineralogical analysis of individual mineral dust particles. *Journal of Geophysical Research*, 106(D16), pp.18029–18036. doi:<https://doi.org/10.1029/2000jd900430>.

Field, P.R., Ottmar Möhler, Connolly, P., Kramer, M., Cotton, R., Heymsfield, A.J., Saathoff, H. and Schnaiter, M. (2006). Some ice nucleation characteristics of Asian and Saharan desert dust. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(10), pp.2991–3006. doi:<https://doi.org/10.5194/acp-6-2991-2006>.

Foret, G., Bergametti, G., Dulac, F. and Menut, L. (2006). An optimized particle size bin scheme for modeling mineral dust aerosol. *Journal of Geophysical Research*, 111(D17). doi:<https://doi.org/10.1029/2005jd006797>.

Forster, P.M., Ramaswamy, V., P. Artaxo, Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D.W., Haywood, J.M., Lean, J., Lowe, D., Myhre, G., J.K. Ng'ang'a, Prinn, R.G., Raga, G.B., Schulz, M. and R. van Dorland (2007). Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. Chapter 2.

Geology.com. (2023). Largest Desert in the World - Desert Map. [online] Available at: <https://geology.com/records/largest-desert.shtml#:~:text=Approximately%201%2F3%20of%20Earth> [Accessed 22 Oct. 2023].

Global Weather & Climate Center. (2023). Why Particulate Matter(s)! [online] Available at: <https://www.globalweatherclimatecenter.com/air-quality-topics/why-particulate-matters> [Accessed 22 Oct. 2023].

Goelles, T. and Bøggild, C.E. (2015). Albedo reduction caused by black carbon and dust accumulation: a quantitative model applied to the western margin of the Greenland ice sheet. *The Cryosphere Discussions*, 9(1), pp.1345–1381. doi:<https://doi.org/10.5194/tcd-9-1345-2015>.

Goudie, A.S. and Middleton, N.J. (2001). Saharan dust storms: nature and consequences. *Earth-Science Reviews*, 56(1-4), pp.179–204. doi:[https://doi.org/10.1016/s0012-8252\(01\)00067-8](https://doi.org/10.1016/s0012-8252(01)00067-8).

Griffin, D.W., Kellogg, C.A. and Shinn, E.A. (2001). Dust in the Wind: Long Range Transport of Dust in the Atmosphere and Its Implications for Global Public and Ecosystem Health. *Global Change and Human Health*, 2(1), pp.20–33. doi:<https://doi.org/10.1023/a:1011910224374>.

Hamanaka, R.B. and Mutlu, G.M. (2018). Particulate Matter Air Pollution: Effects on the Cardiovascular System. *Frontiers in Endocrinology*, [online] 9(9). doi:<https://doi.org/10.3389/fendo.2018.00680>.

Hausfather, Z. (2018a). Explainer: What climate models tell us about future rainfall. [online] Carbon Brief. Available at: <https://www.carbonbrief.org/explainer-what-climate-models-tell-us-about-future-rainfall/>.

Hausfather, Z. (2018b). Explainer: How 'Shared Socioeconomic Pathways' explore future climate change. [online] Carbon Brief. Available at: <https://www.carbonbrief.org/explainer-how-shared-socioeconomic-pathways-explore-future-climate-change/>.

Hoegh-Guldberg, O. et al. (2018). Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems. HELDA - University of Helsinki Open Repository, Available at: <https://helda.helsinki.fi/items/d4dfab57-98bf-4dd2-86a8-a13ae41deec1>.

Horowitz, L.W. et al. (2018a). NOAA-GFDL GFDL-ESM4 model output prepared for CMIP6 AerChemMIP. Earth System Grid Federation. doi:<https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.8695>.

Horowitz, L.W. et al. (2018b). NOAA-GFDL GFDL-ESM4 model output prepared for CMIP6 AerChemMIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.11338>.

JMP (www.jmp.com). (2023). Paired t-Test. [online] Available at: [https://www.jmp.com/en\\_nl/statistics-knowledge-portal/t-test/paired-t-test.html](https://www.jmp.com/en_nl/statistics-knowledge-portal/t-test/paired-t-test.html).

Kamal, A., Wu, C. and Lin, Z. (2019). Interannual variations of dust activity in western Iran and their possible mechanisms. Big Earth Data, pp.1–16. doi:<https://doi.org/10.1080/20964471.2019.1685825>

Kelley, M., Schmidt, G.A., Nazarenko, L.S., Bauer, S.E., Ruedy, R., Russell, G.L., Ackerman, A.S., Aleinov, I., Bauer, M., Bleck, R., Canuto, V., Cesana, G., Cheng, Y., Clune, T.L., Cook, B.I., Cruz, C.A., Del Genio, A.D., Elsaesser, G.S., Faluvegi, G. and Kiang, N.Y. (2020). GISS-E2.1: Configurations and Climatology. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 12(8). doi:<https://doi.org/10.1029/2019ms002025>.

Knippertz, P. (2014). Meteorological Aspects of Dust Storms. Springer eBooks, pp.121–147. doi:[https://doi.org/10.1007/978-94-017-8978-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-94-017-8978-3_6).

Kok, J.F. and Renno, N.O. (2009). A comprehensive numerical model of steady state saltation (COMSALT). Journal of Geophysical Research, 114(D17). doi:<https://doi.org/10.1029/2009jd011702>.

Kok, J.F., Parteli, E.J.R., Michaels, T.I. and Karam, D.B. (2012). The physics of wind-blown sand and dust. Reports on Progress in Physics, 75(10), p.106901. doi:<https://doi.org/10.1088/0034-4885/75/10/106901>.

Kok, J.F., Ridley, D.A., Zhou, Q., Miller, R.L., Zhao, C., Heald, C.L., Ward, D.S., Albani, S. and Haustein, K. (2017). Smaller desert dust cooling effect estimated from analysis of dust size and abundance. Nature Geoscience, [online] 10(4), pp.274–278. doi:<https://doi.org/10.1038/ngeo2912>.

Koren, I., Kaufman, Y.J., Rosenfeld, D., Remer, L.A. and Rudich, Y. (2005). Aerosol invigoration and restructuring of Atlantic convective clouds. *Geophysical Research Letters*, 32(14), p.n/a-n/a. doi:<https://doi.org/10.1029/2005gl023187>.

Kubilay, N., Cokacar, T. and Oguz, T. (2003). Optical properties of mineral dust outbreaks over the northeastern Mediterranean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D21). doi:<https://doi.org/10.1029/2003jd003798>.

Kuhlbrot, T., Jones, C.G., Sellar, A., Storkey, D., Blockley, E., Stringer, M., Hill, R., Graham, T., Ridley, J., Blaker, A., Calvert, D., Copsey, D., Ellis, R., Hewitt, H., Hyder, P., Ineson, S., Mulcahy, J., Siahann, A. and Walton, J. (2018). The Low-Resolution Version of HadGEM3 GC3.1: Development and Evaluation for Global Climate. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10(11), pp.2865–2888. doi:<https://doi.org/10.1029/2018ms001370>.

Kyung, S.Y. and Jeong, S.H. (2020). Particulate-Matter Related Respiratory Diseases. *Tuberculosis and Respiratory Diseases*, 83(2). doi:<https://doi.org/10.4046/trd.2019.0025>.

Liao, H. and Seinfeld, J.H. (1998). Radiative forcing by mineral dust aerosols: Sensitivity to key variables. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D24), pp.31637–31645. doi:<https://doi.org/10.1029/1998jd200036>.

Makoni, M. (2021). The 'Green Sahara' Left Behind Fossil Rivers. [online] Eos. Available at: <https://eos.org/articles/the-green-sahara-left-behind-fossil-rivers>.

Martin, J.H. and Fitzwater, S.E. (1988). Iron deficiency limits phytoplankton growth in the north-east Pacific subarctic. *Nature*, 331(6154), pp.341–343. doi:<https://doi.org/10.1038/331341a0>.

Mashat, A.-W.S., Awad, A.M., Assiri, M.E. and Labban, A.H. (2020). Dynamic and synoptic study of spring dust storms over northern Saudi Arabia. *Theoretical and Applied Climatology*, 140(1-2), pp.619–634. doi:<https://doi.org/10.1007/s00704-020-03095-6>.

Meersens (2022). Particules fines (PM) : sources de pollution et impact sur la santé. [online] Meersens. Available at: <https://meersens.com/particulate-matter-sources-of-pollution-and-impact-on-health> [Accessed 22 Oct. 2023].

Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.M., Collins, W., Fuglestad, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., and Zhang, H. (2013). Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. pp.659–740. doi:<https://doi.org/10.1017/cbo9781107415324.018>.

NASA Earth Observatory (2019). The Causes of Climate Change. [online] Climate Change: Vital Signs of the Planet. Available at: <https://climate.nasa.gov/causes>.

NASA Earth Observatory (2020). Desert: Mission: Biomes. [online] earthobservatory.nasa.gov. Available at: <https://earthobservatory.nasa.gov/biome/biodesert.php>.

NASA Earth Observatory (2022). A Burst of Saharan Dust. [online] Available at: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/149918/a-burst-of-saharan-dust>.

NASA. (2020a). NASA-GISS GISS-E2.1G model output prepared for CMIP6 AerChemMIP. Goddard Institute for Space Studies (NASA/GISS). Earth System Grid Federation. doi:<https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.7435>.

NASA. (2020b). NASA-GISS GISS-E2.1G model output prepared for CMIP6 AerChemMIP. Goddard Institute for Space Studies (NASA/GISS). Earth System Grid Federation. doi:<https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.11387>.

Nathanson, J.A. (2018). air pollution | Description, Pollutants, & Effects. In: Encyclopædia Britannica. [online] Available at: <https://www.britannica.com/science/air-pollution>.

National Geographic (2022). Air Pollution. [online] [education.nationalgeographic.org](https://education.nationalgeographic.org). Available at: <https://education.nationalgeographic.org/resource/air-pollution/>.

National Geographic (2023). dust. [online] Available at: <https://education.nationalgeographic.org/resource/dust/>.

Nicholson, S.E. (1998). Deserts. Encyclopedia of Hydrology and Lakes. Encyclopedia of Earth Science. Springer, Dordrecht. doi:[https://doi.org/10.1007/1-4020-4497-6\\_61](https://doi.org/10.1007/1-4020-4497-6_61).

Noy-Meir, I. (1973). Desert Ecosystems: Environment and Producers. Annual Review of Ecology and Systematics, 4(1), pp.25–51. doi:<https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000325>.

NSF ([www.nsf.gov](http://www.nsf.gov)). (2009). Climate Change, Nitrogen Loss Threaten Plant Life in Arid Desert Soils. [online] Available at: [https://www.nsf.gov/news/news\\_summ.jsp?cntn\\_id=115871](https://www.nsf.gov/news/news_summ.jsp?cntn_id=115871).

O'Connor, F. (2020a). NERC UKESM1.0-LL model output prepared for CMIP6 AerChemMIP. Earth System Grid Federation. doi:<https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.405>.

O'Connor, F. (2020b). NERC UKESM1.0-LL model output prepared for CMIP6 AerChemMIP. Earth System Grid Federation. doi:<https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.11405>.

Oshima, N., Yukimoto, S., Deushi, M., Koshiro, T., Kawai, H., Tanaka, T.Y. and Yoshida, K. (2020). Global and Arctic effective radiative forcing of anthropogenic gases and aerosols in MRI-ESM2.0. Progress in Earth and Planetary Science, 7(1). doi:<https://doi.org/10.1186/s40645-020-00348-w>.

Pan, L., Han, Y., Lu, Z., Li, J., Gao, F., Liu, Z., Liu, W. and Liu, Y. (2021). Integrative investigation of dust emissions by dust storms and dust devils in North Africa. Science of The Total Environment, 756, p.144128. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144128>.

Petrov, M. (2019). Gobi Desert | Map, Plants, Animals, & Facts. In: Encyclopædia Britannica. [online] Available at: <https://www.britannica.com/place/Gobi>.

Pu, B. and Ginoux, P. (2018). How reliable are CMIP5 models in simulating dust optical depth? Atmospheric Chemistry and Physics, 18(16), pp.12491–12510. doi:<https://doi.org/10.5194/acp-18-12491-2018>.



QuarkExpeditions (explore.quarkexpeditions.com). (2023). Polar Deserts: Exploring the Most Arid Regions in the Arctic & Antarctica. [online] Available at: <https://explore.quarkexpeditions.com/blog/polar-deserts-exploring-the-most-arid-regions-in-the-arctic-antarctica>.

Rafferty, J.P., (2020) How Do Deserts Form? Encyclopædia Britannica. [online] Available at: <https://www.britannica.com/story/how-do-deserts-form>.

Rana, A., Foster, K., Bosshard, T., Olsson, J. and Bengtsson, L. (2014). Impact of climate change on rainfall over Mumbai using Distribution-based Scaling of Global Climate Model projections. Journal of Hydrology: Regional Studies, 1, pp.107–128. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2014.06.005>.

Reyer, C.P.O., Otto, I.M., Adams, S., Albrecht, T., Baarsch, F., Carlsburg, M., Coumou, D., Eden, A., Ludi, E., Marcus, R., Mengel, M., Mosello, B., Robinson, A., Schleussner, C.-F., Serdeczny, O. and Stagl, J. (2015). Climate change impacts in Central Asia and their implications for development. Regional Environmental Change, 17(6), pp.1639–1650. doi:<https://doi.org/10.1007/s10113-015-0893-z>.

Riahi, K., van Vuuren, D.P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B.C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaserna, J.C., KC, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J. and Ebi, K. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. Global Environmental Change, [online] 42, pp.153–168. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.

Rogers, K. and Kadner, R.J. (2018). bacteria | Cell, Evolution, & Classification. In: Encyclopædia Britannica. [online] Available at: <https://www.britannica.com/science/bacteria>.

Ryder, C.L., Highwood, E.J., Lai, T.M., Sodemann, H. and Marsham, J.H. (2013). Impact of atmospheric transport on the evolution of microphysical and optical properties of Saharan dust. Geophysical Research Letters, 40(10), pp.2433–2438. doi:<https://doi.org/10.1002/grl.50482>.

Sabade, S.S., Kulkarni, A. and Kripalani, R.H. (2010). Projected changes in South Asian summer monsoon by multi-model global warming experiments. Theoretical and Applied Climatology, 103(3-4), pp.543–565. doi:<https://doi.org/10.1007/s00704-010-0296-5>.

Sally Ride EarthKAM (www.earthkam.org). (2023). Introduction to Lake Chad. [online] Available at: [https://www.earthkam.org/ek-images/investigating\\_images/chad](https://www.earthkam.org/ek-images/investigating_images/chad).

Science Learning Hub. (2009). What is smoke? [online] Available at: <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/748-what-is-smoke>.

Seinfeld, J.H. and Pandis, S.N. (1998). Atmospheric Chemistry and Physics. John Wiley and Sons, New York. - References - Scientific Research Publishing. [online] Available at: [https://www.scirp.org/\(S\(lz5mqp453edsnp55rrgjct55\)\)/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2299522](https://www.scirp.org/(S(lz5mqp453edsnp55rrgjct55))/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2299522).

Sellar, A.A., Jones, C.G., Mulcahy, J.P., Tang, Y., Yool, A., Wiltshire, A., O'Connor, F.M., Stringer, M., Hill, R., Palmieri, J., Woodward, S., Mora, L., Kuhlbrodt, T., Rumbold, S.T., Kelley, D.I., Ellis, R., Johnson, C.E., Walton, J., Abraham, N.L. and Andrews, M.B. (2019). UKESM1: Description and Evaluation of the U.K. Earth System Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(12), pp.4513–4558. doi:<https://doi.org/10.1029/2019ms001739>.

Shao, Y. (2009). *Physics and Modelling of Wind Erosion*. Atmospheric and oceanographic sciences library. doi:<https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8895-7>.

Shao, Y., Ishizuka, M., Mikami, M. and Leys, J.F. (2011). Parameterization of size-resolved dust emission and validation with measurements. *Journal of Geophysical Research*, 116(D8). doi:<https://doi.org/10.1029/2010jd014527>.

Skonieczny, C., McGee, D., Winckler, G., Bory, A., Bradtmiller, L.I., Kinsley, C.W., Polissar, P.J., De Pol-Holz, R., Rossignol, L. and Malaizé, B. (2019). Monsoon-driven Saharan dust variability over the past 240,000 years. *Science Advances*, 5(1). doi:<https://doi.org/10.1126/sciadv.aav1887>.

Smith, D. (2020). The Three Types of Particulate Matter: All About PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and PM<sub>0.1</sub>. [online] learn.kaiterra.com. Available at: <https://learn.kaiterra.com/en/resources/three-types-of-particulate-matter>.

Smith, M.D., (2019) Desert - Environment. *Encyclopædia Britannica*. [online] Available at: <https://www.britannica.com/science/desert/Environment>.

Stanelle, T., Bey, I., Raddatz, T., Reick, C. and Tegen, I. (2014). Anthropogenically induced changes in twentieth century mineral dust burden and the associated impact on radiative forcing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(23), pp.13, 526–13, 546. doi:<https://doi.org/10.1002/2014jd022062>.

TravelNevada. (2023). Death Valley National Park | Things to Do in Death Valley | NV. [online] Available at: <https://travelnevada.com/parks-recreational-areas/death-valley-national-park>.

UNEP (Environment, U.N.) (2017). Restoring clean air. [online] UNEP - UN Environment Programme. Available at: <https://www.unep.org/regions/asia-and-pacific/regional-initiatives/restoring-clean-air>.

United States Environmental Protection Agency (EPA) (2018b). Air Quality and Climate Change Research | US EPA. [online] US EPA. Available at: <https://www.epa.gov/air-research/air-quality-and-climate-change-research>.

United States Environmental Protection Agency (EPA). (2018a). Particulate Matter (PM) Basics. [online] US EPA. Available at: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>.

United States Environmental Protection Agency (EPA). (2019). What Are Molds? | US EPA. [online] US EPA. Available at: <https://www.epa.gov/mold/what-are-molds>.

USGS (pubs.usgs.gov). (1997). Distribution of Non-Polar Arid Land. [online] Available at: <https://pubs.usgs.gov/gip/deserts/what/world.html>.

Williams, K.D., Copsey, D., Blockley, E.W., Bodas-Salcedo, A., Calvert, D., Comer, R., Davis, P., Graham, T., Hewitt, H.T., Hill, R., Hyder, P., Ineson, S., Johns, T.C., Keen, A.B., Lee, R.W., Megann, A., Milton, S.F., Rae, J.G.L., Roberts, M.J. and Scaife, A.A. (2018). The Met Office Global Coupled Model 3.0 and 3.1 (GC3.0 and GC3.1) Configurations. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, [online] 10(2), pp.357–380. doi:<https://doi.org/10.1002/2017ms001115>.

Woodward, S., Sellar, A.A., Tang, Y., Stringer, M., Yool, A., Robertson, E. and Wiltshire, A. (2022). The simulation of mineral dust in the United Kingdom Earth System Model UKESM1. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(22), pp.14503–14528. doi:<https://doi.org/10.5194/acp-22-14503-2022>.

WorldAtlas (2017). The Major Parts Of The Sahara Desert In Africa. [online] WorldAtlas. Available at: <https://www.worldatlas.com/articles/the-major-parts-of-the-sahara-desert-in-africa.html>.

Wu, C., Lin, Z. and Liu, X. (2020). The global dust cycle and uncertainty in CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project phase 5) models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(17), pp.10401–10425. doi:<https://doi.org/10.5194/acp-20-10401-2020>.

Wu, C., Lin, Z., Liu, X., Li, Y., Lu, Z. and Wu, M. (2018). Can Climate Models Reproduce the Decadal Change of Dust Aerosol in East Asia? *Geophysical Research Letters*, 45(18), pp.9953–9962. doi:<https://doi.org/10.1029/2018gl079376>.

Wu, M., Liu, X., Yang, K., Luo, T., Wang, Z., Wu, C., Zhang, K., Yu, H. and Darmanov, A. (2019). Modeling Dust in East Asia by CESM and Sources of Biases. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(14), pp.8043–8064. doi:<https://doi.org/10.1029/2019jd030799>.

Yool, A., Popova, E.E. and Anderson, T.R. (2013). MEDUSA-2.0: an intermediate complexity biogeochemical model of the marine carbon cycle for climate change and ocean acidification studies. *Geoscientific Model Development*, 6(5), pp.1767–1811. doi:<https://doi.org/10.5194/gmd-6-1767-2013>.

Yukimoto, S. et al. (2019). MRI MRI-ESM2.0 model output prepared for CMIP6 AerChemMIP. Earth System Grid Federation, doi:<https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6918>.

Yukimoto, S. et al. (2020). MRI MRI-ESM2.0 model output prepared for CMIP6 AerChemMIP. Earth System Grid Federation, doi:<https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.11409>.

Zanis, P., Dimitris Akritidis, Turnock, S.T., Naik, V., Szopa, S., Georgoulas, A.K., Bauer, S.E., Makoto Deushi, Horowitz, L.W., Keeble, J., Philippe Le Sager, O'Connor, F.M., Oshima, N., Kostas Tsigaridis and Twan van Noije (2022). Climate change penalty and benefit on surface ozone: a global perspective based on CMIP6 earth system models. *Environmental Research Letters*, 17(2), pp.024014–024014. doi:<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4a34>.

Zhao, Y., Yue, X., Cao, Y., Zhu, J., Tian, C., Zhou, H., Chen, Y., Hu, Y., Fu, W. and Zhao, X. (2023). Multi-model ensemble projection of the global dust cycle by the end of 21st century using the

Coupled Model Intercomparison Project version 6 data. Atmospheric Chemistry and Physics, 23(13), pp.7823–7838. doi:<https://doi.org/10.5194/acp-23-7823-2023>.

Zsolt Horváth, Zoltán Kovács and Gergely, L. (2006). Geometrodynamics in a spherically symmetric, static crossflow of null dust. Physical review, 74(8). doi:<https://doi.org/10.1103/physrevd.74.084034>.

### **Ελληνική Βιβλιογραφία**

Λαζαρίδης, Μ. (2010) Ατμοσφαιρική ρύπανση με στοιχεία Μετεωρολογίας, 2η Έκδοση, Τζιόλας.

Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας (ΤΕΕ). (2008). Καταγραφή & Μελέτη αιωρουμένων σωματιδίων στο Πολεοδομικό Συγκρότημα της Θεσσαλονίκης. Διαθέσιμο στο: [https://tkm.tee.gr/wp-content/uploads/2018/02/aiwroumena\\_swmatidia.pdf](https://tkm.tee.gr/wp-content/uploads/2018/02/aiwroumena_swmatidia.pdf).