



## ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών  
Περιβάλλοντος

*«Μελέτη των επιδράσεων επεισοδίου μεταφοράς σκόνης  
από τη Σαχάρα στις καιρικές συνθήκες της Ανατολικής  
Μεσογείου με χρήση του μοντέλου WRF-Chem»*

Διπλωματική Εργασία  
του  
Εμμανουήλ Δακανάλη

ΧΑΝΙΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ, 2023

## **ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

### **Βουλγαράκης Απόστολος**

Αναπληρωτής Καθηγητής Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών  
Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης  
(επιβλέπων)

### **Λαζαρίδης Μιχαήλ**

Καθηγητής Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του  
Πολυτεχνείου Κρήτης

### **Γρυλλάκης Εμμανουήλ**

Μεταδιδακτορικός Ερευνητής Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών  
Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος προπτυχιακών σπουδών του τμήματος Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης και συγκεκριμένα στο Εργαστήριο Ατμοσφαιρικού Περιβάλλοντος και Κλιματικής Αλλαγής.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να εκφράσω την βαθιά ευγνωμοσύνη μου προς τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Απόστολο Βουλγαράκη, για την εξαιρετική καθοδήγηση και την υποστήριξή του κατά τη διάρκεια της έρευνας μου. Η καθοδήγησή του όχι μόνο διαμόρφωσε το περιεχόμενο και την κατεύθυνση αυτής της εργασίας, αλλά έπαιξε επίσης καίριο ρόλο στη συνολική εξέλιξή μου ως ερευνητή, που πυροδότησε την επιθυμία μου για την συνέχιση των σπουδών μου στον τομέα των Ατμοσφαιρικών Επιστημών. Οι ιδέες, τα εποικοδομητικά σχόλια και η ακούραστη ενθάρρυνση του με ώθησαν να ξεπεράσω τα όρια μου και να εξελίξω την ερευνά μου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον ίδιο αλλά και όλη την ερευνητική ομάδα, που με σύστησαν στον κόσμο της ερευνας και της επιστήμης, μέσα από τις εβδομαδιαίες ομαδικές συναντήσεις του Εργαστηρίου Ατμοσφαιρικού Περιβάλλοντος και Κλιματικής Αλλαγής, στις οποίες συμμετείχα ανελλιπώς, και οι γνώσεις που απέκτησα ξεπέρασαν τις προσδοκίες μου. Ένα ακόμη μεγάλο ευχαριστώ στον κ. Αναστάσιο Ροβιθάκη για την πολύτιμη καθοδήγηση του και την εξαιρετική συνεργασία όλους αυτούς τους μήνες. Επίσης ένα ευχαριστώ στον κ. Κωνσταντίνο Σειραδάκη που μοιράστηκε τις γνώσεις του για τα τεχνικά κομμάτια της εργασίας. Να ευχαριστήσω ακόμα τους κυρίους Γρυλλάκη Εμμανουήλ, Αθανάσιο Παπαδόπουλο, Matthew Ksoar και Iulian Alin Rosu και τις κύριες Ειρήνη Μπολέτη, Ραφαήλα Μουργελά, Δήμητρα Ταράση και Haleema Misal για την πολύτιμη ανταλλαγή ιδεών και γνώσεων αλλά και για το ευχάριστο κλίμα έρευνας και επαγγελματισμού που δημιουργούσαν σε κάθε μας συνάντηση. Τέλος ένα ευχαριστώ από καρδιάς στον κύριο Λαζαρίδη Μιχάλη και Γρυλλάκη Εμμανουήλ για την πολύτιμη παρουσία τους στην παρουσίαση της εργασίας μου και τον χρόνο που διέθεσαν για την αξιολόγηση της.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα επεισόδια μεταφοράς σκόνης αντιπροσωπεύουν μια σημαντική πηγή αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα, επηρεάζοντας τη σύνθεση της ατμόσφαιρας και την ποιότητα του αέρα. Επιπλέον, η ρύπανση που προκαλείται από τα επεισόδια σκόνης μπορεί να έχει επίδραση στο ισοζύγιο ακτινοβολιών, επηρεάζοντας τις μετεωρολογικές συνθήκες και το κλίμα βραχυπρόθεσμα. Στην συγκεκριμένη έρευνα, χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο Weather Research and Forecasting συζευγμένο με χημεία (WRF-Chem) για να διερευνήσουμε πώς τα επεισόδια μεταφοράς σκόνης επηρεάζουν τη ποσότητα των αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα και τις αντίστοιχες μετεωρολογικές επιπτώσεις αυτών βραχυπρόθεσμα, χρησιμοποιώντας την Ανατολική Μεσόγειο ως περιοχή μελέτης. Επικεντρωθήκαμε στο σφοδρό επεισόδιο μεταφοράς σκόνης από τη Σαχάρα τον Μαρτίου του 2018, ένα χρονικό διάστημα που χαρακτηρίστηκε από έντονη μεταφορά σκόνης προς την Ανατολική Μεσόγειο και ιδιαίτερα την Ελλάδα, κυρίως λόγω ισχυρών νοτιοδυτικών ανέμων. Διενεργήσαμε πειράματα, συγκρίνοντας σενάρια με και χωρίς εκπομπές σκόνης, για να ποσοτικοποιήσουμε την επίδραση αυτών των εκπομπών στη συγκέντρωση της σκόνης, στο οπτικό βάθος των αερολυμάτων (AOD), στην μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία και σε μετεωρολογικές μεταβλητές όπως η θερμοκρασία, η συγκέντρωση υδρατμών και η νεφοκάλυψη. Τα αποτελέσματά μας δείχνουν ότι οι υψηλές συγκεντρώσεις σκόνης μπορούν να μειώσουν το ποσό της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του εδάφους λόγω της σκέδασης και της απορρόφησης από τα σωματίδια της σκόνης. Επιπλέον παρατηρήθηκε ότι η επανεκπομπή, σε μεγάλα μήκη κύματος, της ακτινοβολίας που απορροφήσαν τα σωματίδια μπορεί να αυξήσει την θερμοκρασία κοντά στην επιφάνεια. Περιοχές της κεντρικής Ελλάδας, καθώς και η Κρήτη και η δυτική Τουρκία, εμφανίζουν αύξηση της θερμοκρασίας όταν λαμβάνονται υπόψη οι εκπομπές σκόνης στις προσομοιώσεις καθώς φαίνεται να επηρεάστηκαν περισσότερο από το επεισόδιο που εξετάζουμε. Τέλος διαπιστώθηκε μείωση στη συγκέντρωση των υδρατμών η οποία οφείλεται στην αυξημένη υγροσκοπικότητα των σωματιδίων σκόνης αλλά και στην μεταβολή της κυκλοφορίας του αέρα λόγω των αυξημένων θερμοκρασιών. Η έρευνά μας υπογραμμίζει ότι τα αερολύματα που προκύπτουν από τα επεισόδια μεταφοράς σκόνης μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τις μετεωρολογικές συνθήκες, τονίζοντας τη σημασία της ενσωμάτωσης τέτοιων φαινομένων στις σύγχρονες μετεωρολογικές προβλέψεις.

## ABSTRACT

Dust storms represent a significant source of aerosols in the atmosphere, impacting atmospheric composition and air quality. Moreover, the pollution caused by dust storms can exert a radiative effect, influencing short-term weather patterns and climate. In our research, we employed the Weather Research and Forecasting model coupled with Chemistry (WRF-Chem) to investigate how dust storms affect aerosol pollution levels and their related short-term meteorological consequences, using the Eastern Mediterranean as a case study. We focused on the severe dust outbreak of March 2018, a period marked by intense dust transport in the Eastern Mediterranean and especially Greece caused mainly by strong southwesterly winds. We conducted experiments, comparing scenarios with and without dust emissions to quantify the influence of these emissions on dust concentration, aerosol optical depth (AOD), shortwave radiation, and meteorological variables such as temperature, water vapor and cloud cover. Our results indicate that high concentrations of dust in the atmosphere can reduce the amount of radiation reaching the surface due to scattering and absorption by the dust particles. Additionally, it was observed that the reemitting longwave radiation can increase the temperature near the surface. Regions in central Greece, as well as Crete and western Turkey, show an increase in temperature when dust emissions are considered in simulations, since they were more affected by the dust. Finally, a decrease in water vapor concentration was noted, primarily attributed to the hygroscopic nature of the dust particles and also to the change in air circulation due to increased temperatures. Our research underscores that aerosols generated by dust storms can significantly alter weather conditions, emphasizing the importance of incorporating such feedbacks for more accurate weather forecasting.

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>8</b>
1.1 Γενικά Στοιχεία .....	8
1.2 Σκοπός .....	9
<b>2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ .....</b>	<b>10</b>
2.1 Σύσταση σκόνης .....	10
2.2 Η επιρροή της μεταφερόμενης σκόνης .....	11
2.2.1 Ισοζύγιο Ακτινοβολιών (Άμεση επίδραση) .....	11
2.2.2 Σχηματισμός Νεφών και Βροχόπτωση (Έμμεση επίδραση) .....	13
2.2.3 Θάλασσα .....	14
2.2.4 Ανθρώπινη Υγεία .....	14
2.3 Περιοχή Μελέτης – Μεσόγειος .....	15
2.3.1 Γενικά Κλιματικά Χαρακτηριστικά .....	16
2.3.2 Τροχιές Μεταφοράς .....	17
2.4 Το υπό μελέτη επεισόδιο (Μάρτιος 2018) .....	20
2.5 Η γένεση του επεισοδίου .....	21
<b>3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ .....</b>	<b>26</b>
3.1 Οριακές Συνθήκες .....	26
3.2 Μοντέλο WRF-Chem .....	27
3.2.1 Γενικά στοιχεία .....	27
3.2.2 Δημιουργία εκπομπών σκόνης .....	29
3.2.3 Εκτέλεση του μοντέλου .....	30
3.2.4 Υπό-μοντέλα του WRF-Chem .....	32
<b>4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>35</b>
4.1 Εκτίμηση του φορτίου σκόνης .....	35
4.2 Συσχέτιση της μεταφερόμενης σκόνης και των μετεωρολογικών παραγόντων .....	37
4.3 Αξιολόγηση του μοντέλου .....	40
<b>5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ .....</b>	<b>42</b>
<b>6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>44</b>
<b>7. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ .....</b>	<b>45</b>
<b>8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>46</b>





## 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Τα σωματίδια σκόνης που εκπέμπονται από τη Σαχάρα και τη Σαχέλ είναι σημαντικά υψηλότερα από οποιαδήποτε άλλη έρημο στον κόσμο. Η ταχύτητα του ανέμου στην επιφάνεια είναι ο κύριος παράγοντας της εκπομπής και μεταφοράς των σωματιδίων σκόνης στην ατμόσφαιρα σε μεγάλες αποστάσεις μέσω σύνθετων συστημάτων που εξελίσσονται ενεργά στην έρημο. Η σκόνη της Σαχάρας περιέχει θρεπτικά στοιχεία που λειτουργούν ως λίπασμα για τα εδάφη και τα ύδατα, ανακλούν ή απορροφούν το ηλιακό φως, επηρεάζουν τον σχηματισμό νεφών και κυκλώνων. Οι αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων σκόνης με την ακτινοβολία στην τροπόσφαιρα (απορρόφηση, διάχυση κ.λπ.) αποτελούν τη βάση για την αλλαγή των διαφόρων παραμέτρων της ατμόσφαιρας, οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές αλλαγές στο κλίμα. Τα σωματίδια σκόνης επηρεάζουν πολλές διαδικασίες που ρυθμίζουν το τοπικό κλίμα. Καταρχάς, ασκούν άμεση επίδραση είτε μέσω της διάχυσης είτε της απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας, προκαλώντας είτε θέρμανση είτε ψύξη των ατμοσφαιρικών στρωμάτων λόγω της απορρόφησης ή της ανάκλασης αντίστοιχα (Miller et al., 2004). Δεύτερον, τα απορροφητικά σωματίδια μέσω της ημι-άμεσης επίδρασης τους (semi-direct effect) εμποδίζουν το σχηματισμό νεφών μειώνοντας την αδιαβατική ψύξη της ατμόσφαιρας, καθώς τα απορροφητικά σωματίδια θερμαίνουν το στρώμα των νεφών και προκαλούν την εξάτμιση τους, οδηγώντας σε νεφοδιάλυση (Hansen et al., 1997). Ωστόσο άλλες μελέτες υποστηρίζουν ότι τα σωματίδια σκόνης μπορεί να προκαλούν έμμεσα επιπτώσεις αλλάζοντας τη μικροφυσική των νεφών και τη βροχή, λειτουργώντας ως πυρήνες συμπύκνωσης συννέφου (Twomey et al., 1977). Συνεπώς, για να προβλεφθούν επαρκώς οι επιδράσεις της σκόνης στον καιρό και στις διαδικασίες θέρμανσης και ψύξης λόγω ακτινοβολίας, αυτά τα σωματίδια πρέπει να ληφθούν υπόψη, καθώς φαίνεται να τροποποιούν τη στατική και τη θερμοδυναμική της ατμόσφαιρας (Saidou Chaibou et al., 2020).

Κάθε χρόνο μεταφέρεται ένα μεγάλο ποσό σκόνης από την έρημο της Σαχάρας εισέρχεται στην ατμόσφαιρα κάτω από ευνοϊκές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Με βάση επιτόπιες μετρήσεις, δορυφορικές εικόνες και προσομοιώσεις με αριθμητικά μοντέλα, υπολογίζεται ότι η ποσότητα αυτή ανέρχεται σε περίπου 107 εκατομμύρια τόνους ετησίως (Guerzoni, 1999; Goudie et al., 2001; Prospero et al., 2002; Papadopoulos et al., 2002; Zender et al., 2003; Kallos et al., 2009). Έχει παρατηρηθεί ότι μεγάλες ποσότητες σκόνης μπορούν να φτάσουν ακόμη και στο νότιο τμήμα της Βόρειας Αμερικής, ενώ η επίδρασή της στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου και της Ευρώπης είναι ιδιαίτερα σημαντική (Kallos et al., 2006; Paryannis et al., 2008). Υπολογίζεται ότι περίπου το ήμισυ της συνολικής ποσότητας των αιωρούμενων σωματιδίων που εναποτίθενται στους ωκεανούς προέρχεται από την έρημο της Σαχάρας (Goudie et al., 2001).

Οι σημαντικότερες περιοχές που λειτουργούν ως πηγές τροφοδοσίας της ατμόσφαιρας είναι η κοιλάδα του Bodélé μεταξύ των οροσειρών Tibesti και της λίμνης Chad. Ακολουθούν ορισμένες περιοχές της Μαυριτανίας, το Μάλι, η νότια Αλγερία, η Τυνησία και ένα μεγάλο τμήμα της Δυτικής Σαχάρας. Επιπλέον, ως σημαντικές πηγές αναφέρονται το νότιο άκρο της Αφρικής, η έρημος Nubian στη νότια Αίγυπτο, το Βόρειο Σουδάν, η Ανατολική Λιβυκή Έρημος, η Αίγυπτος, η πεδιάδα της Αιθιοπίας, η περιοχή γύρω από το Djibouti, ο Νίγηρας και τα όρη Ahaggar (Εικόνα 1.1; Spyrou, 2011).



**Εικόνα 1.1:** Οι κυριότερες πηγές σωματιδίων σκόνης (Spyrou, 2011).

## 1.2 ΣΚΟΠΟΣ

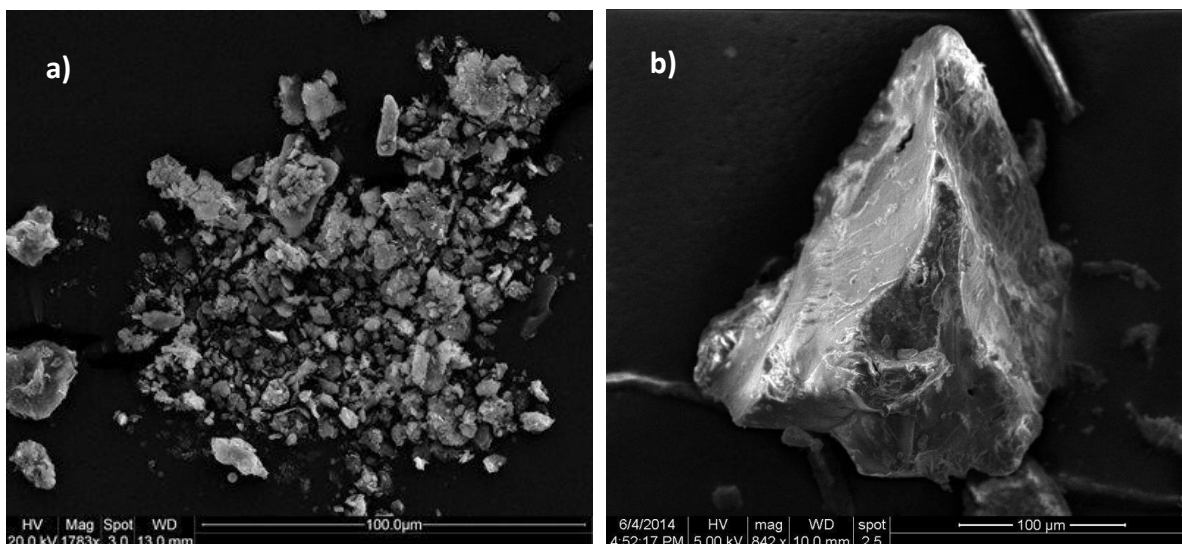
Ο βασικός σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι να ερευνηθεί εάν τα επεισόδια μεταφοράς σκόνης από την Σαχάρα είναι ικανά να μεταβάλλουν τις καιρικές συνθήκες βραχυπρόθεσμα και συνεπώς εάν είναι σημαντικό τέτοια φαινόμενα να λαμβάνονται υπόψη στις σύγχρονες μετεωρολογικές προγνώσεις. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού χρειάστηκε η περαιτέρω μελέτη και κατανόηση της συμπεριφοράς της σκόνης στην ατμόσφαιρα ώστε να διαπιστωθεί η επίδραση αυτής στις καιρικές συνθήκες της Ανατολικής Μεσογείου μέσω προσομοιώσεων του περιοχικού μοντέλου WRF-Chem.

## 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

### 2.1 ΣΥΣΤΑΣΗ ΣΚΟΝΗΣ

Η σύσταση της σκόνης που μεταφέρεται από τις ερημικές περιοχές της Σαχάρας εμφανίζει έντονη μεταβλητότητα και εξαρτάται από τον τύπους εδάφους της πηγής από την οποία προέρχονται, καθώς και της χημικούς μετασχηματισμούς που συμβαίνουν κατά τη μεταφορά σε απομακρυσμένες περιοχές (Querol et al., 2009; Engelbrecht et al., 2010; Astitha et al., 2010).

Με βάση τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί, η σκόνη στην Ευρώπη και στην έρημο της Σαχάρας περιέχει σε μεγάλο βαθμό μεταλλικά συστατικά (Avila et al., 1997; Guieu et al., 2002; Bardouki et al., 2002; Sciare et al., 2003; Kandler et al., 2007), όπως κουάρτς ( $\text{SiO}_2$ ), αλουμίνιο ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), και οξείδιο του τιτανίου ( $\text{TiO}_2$ ). Επιπλέον, η σκόνη της Σαχάρας φαίνεται να περιέχει σημαντικές ποσότητες αιματίτη ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), οξείδιο του μαγνησίου ( $\text{MgO}$ ) και οξείδιο του ασβεστίου ( $\text{CaO}$ ). Ο αιματίτης έχει σημαντική επίδραση στην απορροφητικότητα της σκόνης για την ακτινοβολία (Mishra et al., 2008). Επιπλέον, το ανθρακικό ασβέστιο ( $\text{CaCO}_3$ ), το οποίο συναντάται σε πολλές περιοχές της Βόρειας Αφρικής, είναι γνωστό για τον ρόλο του στην αύξηση του pH του νερού της βροχής (Avila et al., 1997; Herut et al., 2001). Στην Εικόνα 2.1 παρουσιάζονται σωματίδια σκόνης όπως φαίνονται από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης δίνοντας μια αντιπροσωπευτική αναπαράσταση της δομής και της σύστασης τους.



**Εικόνα 2.1:** α) Σωματίδια σκόνης από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Nanoscale and Microscale Research Center, University of Nottingham, 2017) και β) Κόκκος άμμου (λεπτομέρεια) από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (UK Government Web Archive).

## 2.2 Η ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗΣ ΣΚΟΝΗΣ

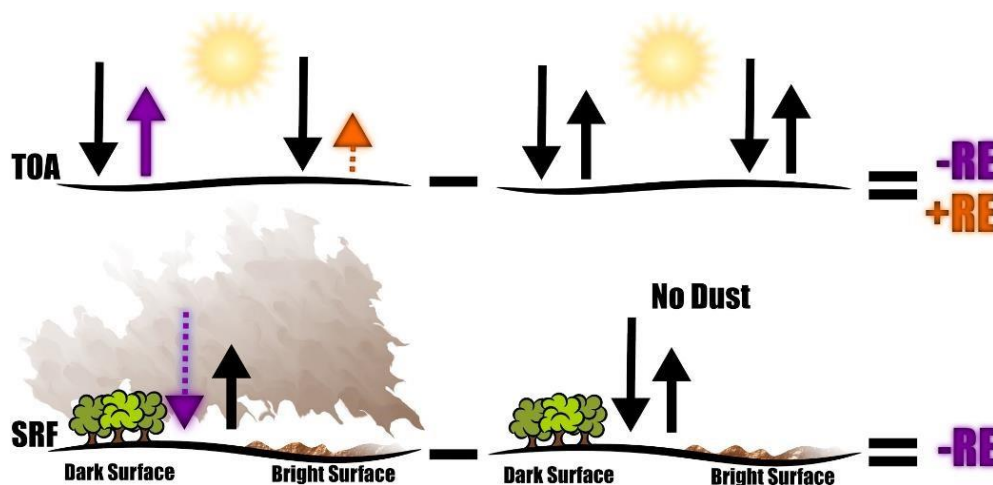
### 2.2.1 ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ (ΆΜΕΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ)

Η επίδραση της σωματιδίων στο ισοζύγιο της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα και στην επιφάνεια του εδάφους είναι ιδιαίτερα σημαντική. Τα αιωρούμενα σωματίδια σκεδάζουν και απορροφούν μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς και της υπέρυθρης ακτινοβολίας (Perlwitz et al., 2001; Miller et al., 2004; Spyrou et al., 2010). Αυτές οι διεργασίες, γνωστές και ως "άμεση επίδραση" των σωματιδίων στις ακτινοβολίες (direct effect – Charlson et al., 1991; Εικόνα 2.2α) μπορούν να επηρεάσουν τη δυναμική της ατμόσφαιρας και διάφορες σχετιζόμενες διεργασίες, όπως την εξάτμιση, το φαινόμενο του θερμοκηπίου και την ευστάθεια (Perez et al., 2006; Heinold et al., 2008).

Τα σωματίδια σκόνης αλληλεπιδρούν τόσο με τη μικρού όσο και τη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία, δημιουργώντας θετική ή αρνητική επίδραση στην ακτινοβολία (RE) ανάλογα με το μέγεθος, το σχήμα και το μεταλλικό περιεχόμενο που απαρτίζει τις οπτικές τους ιδιότητες (Liao και Seinfeld 1998; Sokolik και Toon 1999).

Όσον αφορά στη μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία (Σχήμα 2.2), η άμεση επίδραση της σκόνης είναι πάντα αρνητική στην επιφάνεια (SRF), καθώς η διάχυση και η απορρόφηση από τα σωματίδια σκόνης εμποδίζουν ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας να φθάσει στο έδαφος (Choobari et al., 2014). Αντίθετα, στο άνω όριο της ατμόσφαιρας (TOA), η σκόνη μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την άμεση επίδραση της ακτινοβολίας αυξάνοντας την ανακλαστικότητα της επιφάνειας πάνω από σκοτεινές δασώδεις περιοχές και ωκεανούς ή μειώνοντας την ανακλαστικότητα της επιφάνειας πάνω από φωτεινές ερήμους (Liao και Seinfeld 1998).

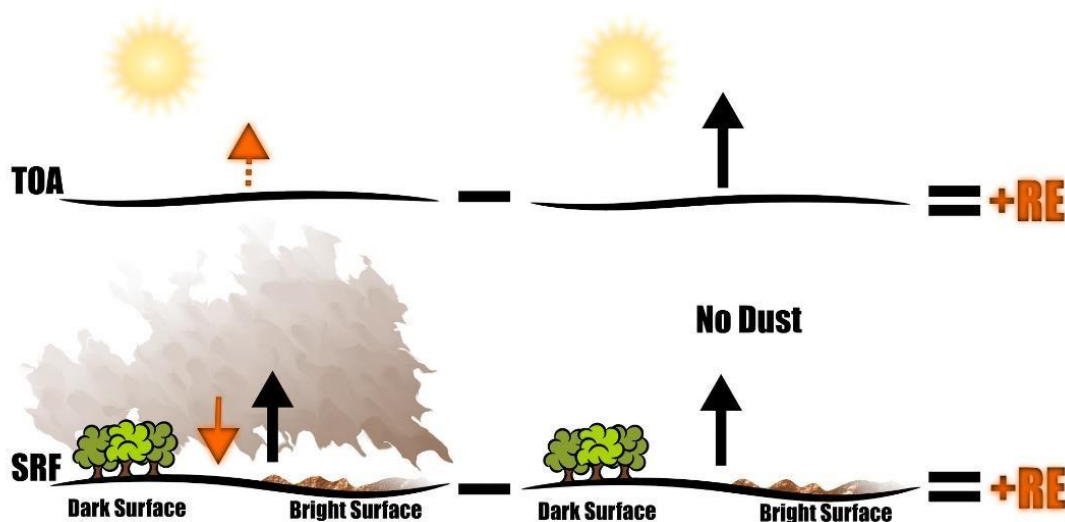
Όσον αφορά στη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία (Σχήμα 2.3), η άμεση επίδραση της σκόνης είναι πάντα θετική. Όταν υπάρχει σκόνη, ένα τμήμα της ανακλώμενης ακτινοβολίας της Γης απορροφάται από τα σωματίδια και επανεκπέμπεται προς την επιφάνεια (Choobari et al., 2014).



Εικόνα 2.2: Επίδραση της σκόνης στην μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία στην κορυφή της ατμόσφαιρας και στην επιφάνεια του εδάφους. Στο αριστερό και το δεξί κομμάτι φαίνεται η



ατμόσφαιρα με σκόνη και χωρίς σκόνη αντίστοιχα. Τα βέλη υποδηλώνουν την κατεύθυνση της ακτινοβολίας προς τα κάτω και προς τα πάνω.. Τα μωβ και τα πορτοκαλί βέλη δείχνουν την αρνητική και την θετική επίδραση της σκόνης στην ακτινοβολία (Tsikerdekis 2017).



**Εικόνα 2.3:** Επίδραση της σκόνης στην μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία στην κορυφή της ατμόσφαιρας και στην επιφάνεια του εδάφους. Στο αριστερό και το δεξί κομμάτι φαίνεται η ατμόσφαιρα με σκόνη και χωρίς σκόνη αντίστοιχα. Τα βέλη υποδηλώνουν την κατεύθυνση της ακτινοβολίας προς τα κάτω και προς τα πάνω. Τα μωβ και τα πορτοκαλί βέλη δείχνουν την αρνητική και την θετική επίδραση της σκόνης στην ακτινοβολία (Tsikerdekis 2017).

Η ακριβής επίδραση της σκόνης είναι δύσκολο να εκτιμηθεί λόγω των αβεβαιοτήτων που συνδέονται με τις οπτικές ιδιότητες των σωματιδίων της, οι οποίες εξαρτώνται από το μήκος κύματος, καθώς και την κατανομή των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Επιπλέον, η παρουσία νεφώσεων και ο βαθμός λευκαύγειας της επιφάνειας επηρεάζουν επίσης την επίδραση αυτή (Liao and Seinfeld, 1998, Ramanathan et al., 2001, Penner et al., 2001, Levin et al. 2005, Solomos et al., 2011, Ramaswamy et al., 2001, Rosenfeld 2000, 2006).

Οι αναφορές σχετικά με την άμεση επίδραση της σκόνης σε διάφορες περιοχές αποδεικνύουν ότι η τοπική επίδραση της είναι ιδιαίτερα έντονη. Για παράδειγμα, στα πλαίσια του προγράμματος SHADE (Saharan Dust Experiment), οι Haywood et al. (2003) χρησιμοποιώντας αεροσκάφος παρατήρησαν μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας έως και  $130 \text{ W/m}^2$  στις ακτές της Δυτικής Αφρικής. Επίσης, κατά τη διάρκεια του πειράματος ERBE (Earth Radiation Budget Experiment), οι Hsu et al. (2001) παρατήρησαν μια μέση πτώση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας κατά  $-45 \text{ W/m}^2$  στο βόρειο τμήμα της ερήμου Σαχάρας για τον Ιούλιο του 1985, χρησιμοποιώντας δεδομένα TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer). Την ίδια περίοδο, παρατηρήθηκε αύξηση της εισερχόμενης μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας κατά  $+25 \text{ W/m}^2$  σε περιοχές της Βορείου Αφρικής. Παρόμοια αποτελέσματα παρουσίασαν και οι

Haywood et al. (2005), οι οποίοι παρατήρησαν αύξηση μέχρι και  $+50\text{W/m}^2$  στην ίδια περιοχή για τον Ιούλιο του 2003.

---

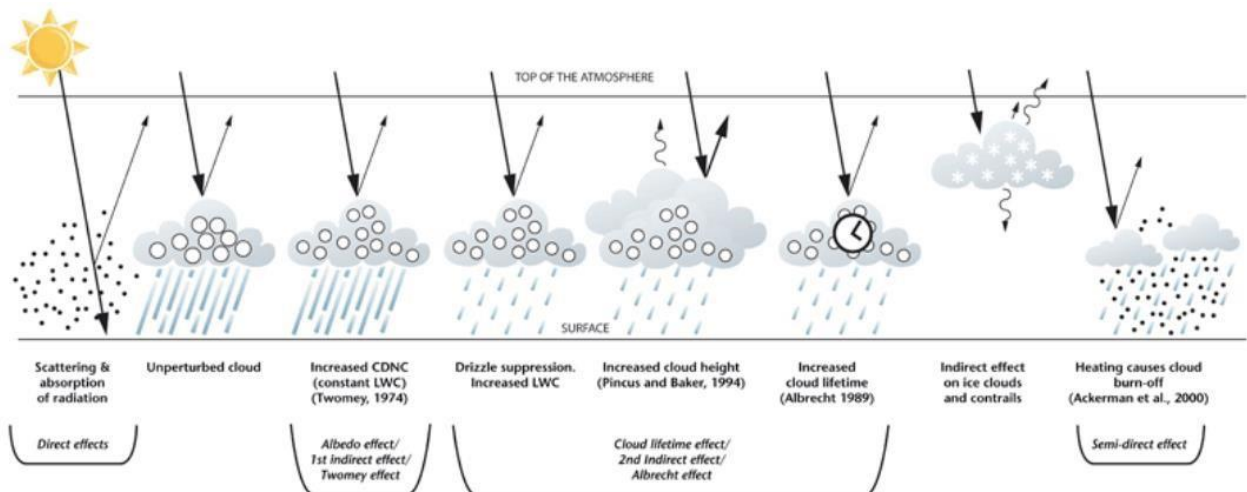
### 2.2.2 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΝΕΦΩΝ ΚΑΙ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ (ΕΜΜΕΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ)

Τα αιωρούμενα σωματίδια (ανθρωπογενούς ή φυσικής προέλευσης) ασκούν σημαντική επίδραση στο κλιματικό σύστημα του πλανήτη και λόγω έμμεσων διεργασιών. Κάποια από αυτά τα σωματίδια μπορούν να λειτουργήσουν ως πυρήνες συμπύκνωσης συννέφου (cloud condensation nuclei – CCN), επηρεάζοντας το σχηματισμό νεφών και αλλάζοντας τις μικροφυσικές, μικροχημικές και οπτικές ιδιότητες τους (Twomey 1974). Η παρουσία σωματιδίων έχει επομένως σημαντικές επιπτώσεις στην ικανότητα των νεφών να προκαλέσουν βροχή ή χιόνι (Charlson et al., 1992), καθώς και στον βαθμό λευκαύγειας των νεφών (Twomey 1977, Junge 1975). Οι δύο αυτές κατηγορίες επιδράσεων των αιωρούμενων σωματιδίων στις ακτινοβολίες της ατμόσφαιρας (και άρα στο κλίμα) μέσω νεφών συνήθως ονομάζονται «έμμεσες επιδράσεις» (aerosol indirect effects – Εικόνα 2.4).

Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με την 1<sup>η</sup> έμμεση επίδραση (1<sup>st</sup> indirect effect), η αυξημένη συγκέντρωση σωματιδίων και άρα αριθμού CCN επηρεάζει τον σχηματισμό των νεφών, καθώς παράγονται επιπλέον σταγόνες νέφους με μικρότερες ακτίνες (σχηματισμός θόλου συννέφου – Twomey effect; Εικόνα 2.4). Μια υψηλότερη συγκέντρωση αριθμού σταγονιδίων προκαλεί αυξημένη ανακλαστικότητα του νέφους (καθώς ο όγκος του υγρού παραμένει σταθερός).

Επίσης, τα σωματίδια επηρεάζουν το μοτίβο της βροχής ανάλογα με τους τύπους νεφών, τη δυναμική και τη θερμοδυναμική της ατμόσφαιρας. Αυτή η διαδικασία αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως η 2<sup>η</sup> έμμεση επίδραση (2<sup>nd</sup> indirect effect; Albrecht, 1989; Εικόνα 2.4).

Τα αερολύματα σκόνης επηρεάζουν λιγότερο τη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία σε σχέση με την μικρού μήκους κύματος. Επιπλέον, όσον αφορά την υπέρυθρη ακτινοβολία, τα σωματίδια σκόνης διασκορπίζουν και απορροφούν ακτινοβολία. Ως εκ τούτου, λειτουργούν ως αέριο του θερμοκηπίου (Tegen, 2003). Επιπλέον, απορροφούν και επανεκπέμπουν ηλιακή ακτινοβολία μειώνοντας τις ποσότητες ενέργειας που φθάνουν στο έδαφος (Spyrou et al., 2010; Tegen, 2003).



**Εικόνα 2.4:** Εικονογράφηση της άμεσης, ημι-άμεσης, 1<sup>ης</sup> έμμεσης και 2<sup>ης</sup> έμμεσης επίδρασης των αερολυμάτων στο κλίμα. Οι μαύροι κύκλοι αναπαριστούν τα σωματίδια αερολύματος και οι λευκοί κύκλοι τους πυρήνες συμπύκνωσης συννέφου. Τα συμπαγή βέλη απεικονίζουν την εισερχόμενη και ανακλώμενη ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος, ενώ τα κυματοειδή βέλη αναπαριστούν την εκπεμπόμενη ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος από την επιφάνεια της Γης και τα σύννεφα. Πηγή: <http://www.metoffice.gov.uk/climate-guide/science/science-behind-climate-change/aerosols>

Οι μηχανισμοί της βροχόπτωσης εξαρτώνται από τις αλληλεπιδράσεις στις θερμές και στις ψυχρές φάσεις των νεφών. Υπάρχουν δύο κύριες περιπτώσεις μηχανισμών βροχόπτωσης: θερμά θαλάσσια σύννεφα με χαμηλές συγκεντρώσεις CCN και ψυχρά ηπειρωτικά σύννεφα με υψηλές συγκεντρώσεις CCN. Στην πρώτη περίπτωση των θερμών θαλάσσιων νεφών υπάρχει ένα ευρύ φάσμα σταγονιδίων λόγω της υγροποίησης των CCN. Έτσι, υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός σταγονιδίων νεφών, όπου μέσω των διαδικασιών συμπύκνωσης, οδηγούν σε βροχή απευθείας από τη θερμή φάση τους (Tsarpalis K., 2021). Ωστόσο, άλλες ερευνητικές μελέτες υποστηρίζουν πως τα σωματίδια σκόνης μπορούν να επηρεάσουν το κλίμα μέσω της ημι-άμεσης επίδρασης τους (semi-direct effect), αναστέλλοντας τον σχηματισμό νεφών (Ackerman et al., 2000). Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, η παρουσία απορροφητικών σωματιδίων σκόνης εμποδίζει τον σχηματισμό νεφών μειώνοντας την αδιαβατική ψύξη της ατμόσφαιρας. Τα απορροφητικά αυτά σωματίδια, θερμαίνουν το στρώμα των νεφών, προκαλώντας την εξάτμισή τους, οδηγώντας σε νεφοδιάλυση (Hansen et al., 1997).

---

### 2.2.3 ΘΑΛΑΣΣΑ

Τα αιωρούμενα σωματίδια σκόνης επηρεάζουν τον βιογεωχημικό κύκλο και την ποιότητα των θαλάσσιων υδάτων. Κατά τη διάρκεια των ατμοσφαιρικών επεισοδίων, η σκόνη μεταφέρεται στην επιφάνεια των ωκεανών και εναποτίθεται εκεί, μεταφέροντας μαζί της σημαντικά θρεπτικά συστατικά για το θαλάσσιο οικοσύστημα, όπως ο σίδηρος και ο φώσφορος (Prospero et al., 1996; Paerl, 1997; Spokes et al., 2000).

Η επίδραση αυτή είναι ιδιαίτερα έντονη κατά τη διάρκεια μεγάλων επεισοδίων υγρής εναπόθεσης στην επιφάνεια της θάλασσας, ιδίως σε oligotροφικές θάλασσες και κατά τη θερινή περίοδο, όπου υπάρχει μικρό στρώμα ανάμειξης (Herut et al., 2001). Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της επίδρασης είναι η ανατολική Μεσόγειος, μια oligotροφική θάλασσα με υψηλή ροή σκόνης από τη Σαχάρα στην επιφάνειά της (Herut et al., 2001). Σε αυτήν την περίπτωση, η ατμοσφαιρική εναπόθεση μπορεί να έχει σημαντική συνεισφορά στην παροχή θρεπτικών αλάτων στα επιφανειακά νερά (Goudie and Middleton, 2001).

---

### 2.2.4 ΑΝΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ

Σωματίδια σκόνης στην ατμόσφαιρα έχουν έντονη επίδραση στην ποιότητα του αέρα και κατά συνέπεια στην υγεία του ανθρώπου. Επιδημιολογικές μελέτες τα τελευταία χρόνια έχουν αποδείξει μια στενή συσχέτιση μεταξύ των σωματιδίων σκόνης και της δημόσιας υγείας (Mitsakou et al., 2008; Dockery and Pope, 1996). Σε περιοχές όπου η παραγωγή σκόνης είναι ιδιαίτερα υψηλή, οι επιπτώσεις στην υγεία είναι παρόμοιες με αυτές των ανθρωπογενών ρύπων (Mitsakou et al., 2008). Κατά τη διάρκεια αμμοθυελλών, οι συγκεντρώσεις σκόνης υπερβαίνουν σημαντικά τα επιτρεπτά όρια (Nickling and Gillies, 1993), δημιουργώντας προβλήματα υγείας όπως αλλεργίες και αναπνευστικές νόσους.

Σωματίδια με διαμέτρους περίπου 3μm ή μικρότερα είναι αρκετά μικρά ώστε να εισπνέονται βαθιά στους πνεύμονες, προκαλώντας φαρυγγίτιδες, βήχα, ερεθισμό των ματιών, πρήξιμο του πνεύμονα, άσθμα και λοιμώξεις του λαιμού. Προηγούμενες μελέτες σε περιοχές που επηρεάζονται από τη μεταφορά σκόνης (κυρίως Κρήτη, Αθήνα, Κύπρος, και μερικώς Σικελία) έχουν αναφέρει θετικές συσχετίσεις μεταξύ της σκόνης και των αποτελεσμάτων στην αναπνευστική υγεία. Αρχικά, οι Middleton et al. (2008) ανέφεραν στη Λευκωσία (Κύπρος) ότι οι νοσηλείες, μεταξύ 1995 και 2004, ήταν κατά 3,1% υψηλότερες για περιπτώσεις αναπνευστικών νοσημάτων κατά τις ημέρες καταιγίδων σκόνης σε σχέση με τις μέρες χωρίς σκόνη. Οι Trianti et al. (2017) έδειξαν στην Αθήνα (Ελλάδα), μεταξύ 2001 και 2006, μια σημαντική αύξηση στον αριθμό επισκέψεων στο τμήμα επειγόντων περιστατικών για άσθμα, ΧΑΠ, και αναπνευστικές λοιμώξεις με αυξήσεις κατά 38%, 57% και 60% αντίστοιχα κατά τις ημέρες καταιγίδων σκόνης. Επιπλέον, οι Samoli et al. (2011b) εντόπισαν επίσης στην Αθήνα μια μεγαλύτερη επίδραση των σωματιδίων στις εισαγωγές απόμων με άσθμα κατά τις ημέρες με έντονη μεταφορά σκόνης. Κατά τις ημέρες καταιγίδων, η αύξηση του κινδύνου ήταν 4,1% για κάθε αύξηση 10μg/m<sup>3</sup> PM<sub>10</sub>, ενώ για τις μέρες χωρίς σκόνη η αύξηση του κινδύνου ήταν



2,1%. Πιο πρόσφατα, οι Renzi et al. (2017) έδειξαν ότι τα PM<sub>10</sub> που προέρχονται από ερήμους συσχετίζονται με τις νοσηλείες λόγω αναπνευστικών προβλημάτων στη Σικελία (Ιταλία), μεταξύ 2006 και 2012, αναφέροντας αύξηση κινδύνου 0,5% για κάθε αύξηση των 10μg/m<sup>3</sup> PM<sub>10</sub> (Monteiro et al., 2022). Αυτό υποδεικνύει την άμεση συνάφεια μεταξύ των σωματιδίων σκόνης και της υγείας του ανθρώπου, καθώς και τη σημασία τους ως παράγοντες που επηρεάζουν την εμφάνιση ασθενειών.

## 2.3 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟΣ

Η περιοχή που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει την ευρύτερη περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου, συμπεριλαμβανομένης της Κεντρικής και Ανατολικής Ευρώπης, μέρους της Δυτικής Ασίας και της Βόρειας Αφρικής έως και την Μαύρη Θάλασσα. Η περιοχή αυτή παρουσιάζει κλιματικά χαρακτηριστικά με ιδιαίτερο ενδιαφέρον που ευνοούν τη μεταφορά σωματιδίων σκόνης σε μακρινές αποστάσεις.



**Σχήμα 2.5:** Περιοχή ενδιαφέροντος (πηγή: Google Earth).

### 2.3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Η Μεσόγειος θάλασσα αποτελεί μια κλειστή θάλασσα, περιβάλλεται από υψηλές χερσονήσους και ορεινούς όγκους που λειτουργούν ως φυσικά εμπόδια. Οι κενοί χώροι μεταξύ των ορεινών περιοχών λειτουργούν ως κανάλια για τη μεταφορά αερίων μαζών προς και από την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου. Γενικά, οι κλιματικές συνθήκες χωρίζονται σε θερμές και ψυχρές περιόδους (Maheras et al. 1999). Κατά τη ψυχρή περίοδο του έτους

(Νοέμβριος - Φεβρουάριος), οι υψηλές πιέσεις που επικρατούν στην Ευρώπη σε συνδυασμό με τη μετατακίνηση της δυτικής ζωνικής ροής προς νότο (low index circulation) ευνοούν την κυκλωνική δραστηριότητα στη Μεσόγειο (Kallos et al., 2007). Οι καιρικές συνθήκες στην περιοχή διαμορφώνονται από τη διέλευση χαμηλών βαρομετρικών σε συνδυασμό με την επέκταση της αντικυκλωνικής κυκλοφορίας της Ανατολικής Ευρώπης στα Βαλκάνια. Η κυκλωνική δραστηριότητα στη Μεσόγειο περιλαμβάνει τη διέλευση υφέσεων από τον Ατλαντικό, την ανάπτυξη ψυχρών μετώπων σε συγκεκριμένες περιοχές κυκλογενούς δραστηριότητας της Μεσογείου και την ενίσχυση εξασθενημένων χαμηλών που προέρχονται από τη Μεσόγειο ή τον Ατλαντικό. Το ανάγλυφο των περιοχών που επηρεάζονται από τη Μεσόγειο και η πολύπλοκη κατανομή ξηράς-θάλασσας καθορίζουν τα χαρακτηριστικά των υφέσεων που κινούνται ή αναπτύσσονται στην περιοχή της Μεσογείου (Metaxas, 1977).

Κατά τη θερμή περίοδο του έτους (Ιούλιος - Σεπτέμβριος), παρατηρείται ατμοσφαιρική κυκλοφορία υψηλού δείκτη, καθώς ο υποτροπικός αντικυκλώνας επεκτείνεται βορειότερα προς τα μέσα γεωγραφικά πλάτη. Τα συστήματα χαμηλών βαρομετρικών του Βόρειου Ατλαντικού Ωκεανού μετακινούνται προς την κεντρική Ευρώπη και μόνο οι άκρες των μετώπων φτάνουν στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου. Κατά τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, η κυκλωνική δραστηριότητα είναι σχεδόν ανύπαρκτη και οι υφέσεις που ενδέχεται να αναπτυχθούν είναι αβαθείς και παραμένουν στην περιοχή κυκλογένεσης, λόγω της εγκατάστασης του υποτροπικού αντικυκλώνα στη Μεσόγειο και τη Βόρεια Αφρική.

Οι μεταβατικές περίοδοι (Μάρτιος - Μάιος και Οκτώβριος) έχουν διαφορετική διάρκεια και η συνοπτική κατάσταση καθορίζεται από την εξασθένηση των υφιστάμενων κυκλωνικών συστημάτων και την ενίσχυση νέων κέντρων δραστηριότητας. Η συχνότητα διέλευσης των υφέσεων της Βόρειας Αφρικής από τη Βορειοανατολική και Ανατολική Μεσόγειο αυξάνεται κατά τη διάρκεια αυτή (Prezerakos, 1985, Alpert et al., 1990), οδηγώντας σε περισσότερο ασταθείς συνθήκες στην περιοχή. Τον Μάρτιο, αυτές οι υφέσεις κινούνται ανατολικά κατά μήκος των ακτών της Βόρειας Αφρικής, τον Απρίλιο οι τροχιές τους στρέφονται ελαφρώς προς τη βορειοανατολικά, ενώ τον Μάιο διέρχονται πάνω από τη Δυτική Μεσόγειο. Η διέλευση αυτών των υφέσεων συνδέεται συχνά με φαινόμενα μεταφοράς σκόνης από τη Σαχάρα.

Η γενική εικόνα της ατμοσφαιρικής ροής στην περιοχή της Μεσογείου παρουσιάζει μια βόρεια ή βορειοδυτική συνιστώσα μέσα στην τροπόσφαιρα. Αυτή η ροή εμφανίζει έντονη σταθερότητα κατά τη θερμή περίοδο του έτους και κατά τη διάρκεια των μεταβατικών περιόδων (άνοιξη, φθινόπωρο) και διαρκεί για αρκετές ημέρες (Kallos et al., 1998b).

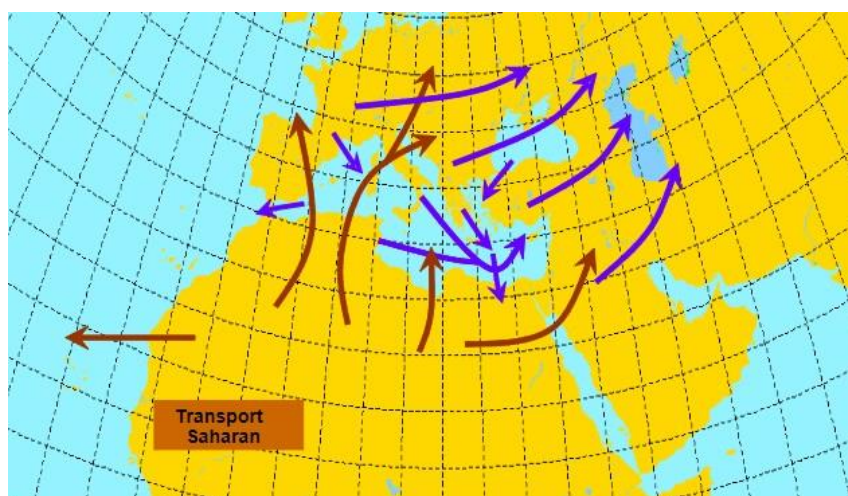
Η βόρεια ροή της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας προκύπτει κυρίως από τη διαφορετική θέρμανση μεταξύ των εδαφών της Νότιας Ευρώπης, της Βόρειας Αφρικής και της Μεσογείου θάλασσας. Λόγω της πολυπλοκότητας της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου, αέριοι και σωματιδιακοί ρύποι που εκπέμπονται από διάφορες πηγές στην περιοχή μπορούν να μεταφερθούν σε μεγάλες αποστάσεις και να βρεθούν αρκετά χιλιόμετρα μακριά από την περιοχή δημιουργίας τους (Kallos et al., 1993, 1998a; Dayan and Levy, 2002; Dayan and Lamb, 2005; Luria et al., 1996;).

Τα μετεωρολογικά και κλιματικά χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω συμβάλλουν στον προσδιορισμό των τροχιών μεταφοράς αερίων και σωματιδιακών ρύπων σε διάφορες χωρικές και χρονικές κλίμακες (Kallos et al., 2007; Zender et al., 2006; Spyrou et al., 2010).

### 2.3.2 ΤΡΟΧΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Ο κύκλος της σκόνης στην ατμόσφαιρα υπόκειται σε έντονη εποχιακή διακύμανση και συνδέεται στενά με την ευρύτερη ατμοσφαιρική κυκλοφορία (Moulin et al., 1997; Nickovic et al., 2001). Κατά τη διάρκεια του χειμώνα και της άνοιξης, η περιοχή της Μεσογείου επηρεάζεται από δύο ανώτερους αεροχειμάρρους (jet streams): τον πολικό αεροχειμάρρο, που αρχικά βρίσκεται πάνω από την Ευρώπη, και τον υποτροπικό αεροχειμάρρο πάνω από τη Βόρεια Αφρική. Η συνδυασμένη επίδραση αυτών των δύο συστημάτων ενισχύει την κίνηση υπερτροπικών (extratropical) κυκλώνων ανατολικά και νοτιοανατολικά, με αποτέλεσμα την εισαγωγή πλουμίων σκόνης (dust plumes) στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου (Avila et al., 1997; Rodriguez et al., 2001; Kubilay et al., 2000; Herut and Krom 1996; Spyrou et al., 2010; Kallos et al., 2006; Εικόνα 2.6).

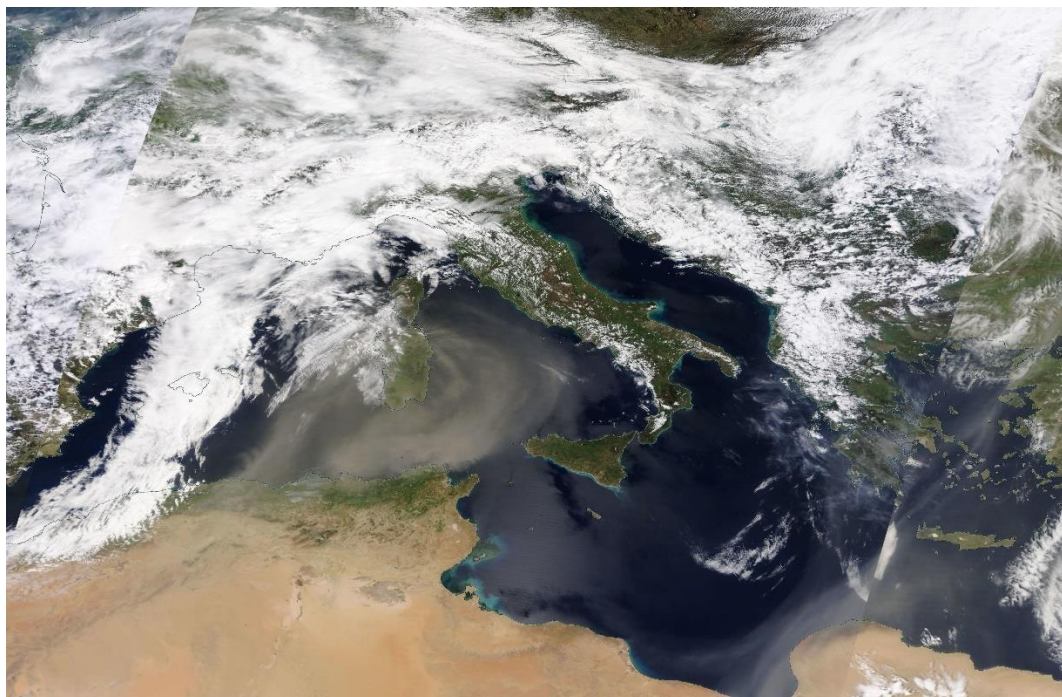
Σύμφωνα με μελέτες (Kallos et al., 1997; Rodriguez et al., 2001; Knippertz et al., 2007; Εικόνα 2.6), τα περισσότερα επεισόδια σκόνης από τη Σαχάρα προς τη Μεσόγειο και την Ευρώπη παρατηρούνται κατά τις μεταβατικές περιόδους του χρόνου. Με βάση μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από το δίκτυο του EARLINET κατά τη χρονική περίοδο 2000-2002, παρατηρήθηκε ότι ο αριθμός των επεισοδίων σκόνης είναι μεγαλύτερος την άνοιξη και νωρίς το φθινόπωρο.



**Εικόνα 2.6:** Τροχιές μεταφοράς ανθρωπογενών και φυσικών σωματιδίων κατά τις μεταβατικές περιόδους. Τα κόκκινα βέλη υποδεικνύουν τις τροχιές μεταφοράς σκόνης από τη Σαχάρα ενώ τα μπλε βέλη υποδεικνύουν τις τροχιές μεταφοράς ανθρωπογενών ρύπων στην Ευρω-Μεσογειακή περιοχή (όζον, θειικά άλατα, κλπ.) στη χαμηλή τροπόσφαιρα. (Kallos et al., 2007).

## I. ΕΥΡΩΠΗ

Σωματίδια σκόνης από τη Σαχάρα μεταφέρονται πάνω από τη Μεσόγειο και εναποτίθενται στη Νότια Ευρώπη (Middleton and Goudie, 2001; Kallos et al., 2005). Σπανιότερα, τα αερολύματα φτάνουν βορειότερα σε χώρες όπως η Μεγάλη Βρετανία, η Ολλανδία, η Γερμανία και ακόμα πιο σπάνια στη Σκανδιναβία. Σε ορισμένες περιπτώσεις, λόγω χαμηλής πίεσης στο Βισκαϊκό κόλπο, σωματίδια από πηγές στην Αλγερία φτάνουν στη Γαλλία και την κεντρική Ευρώπη (Querol et al., 2009). Στο Εικόνα 2.7, φαίνεται ένα παράδειγμα επεισοδίου μεταφοράς σκόνης που κατευθύνεται προς την κεντροδυτική Ευρώπη.



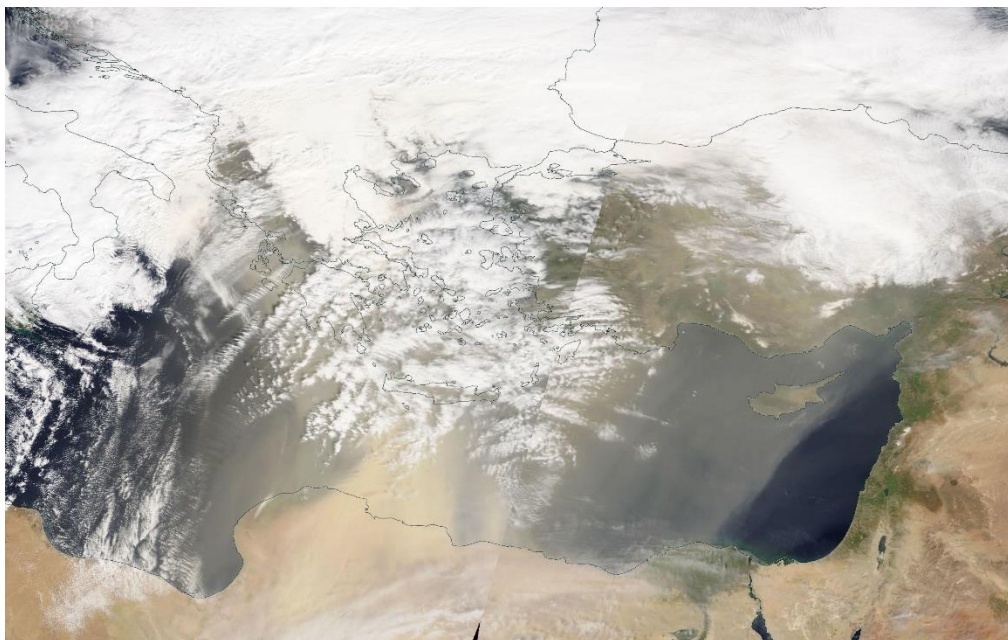
**Εικόνα 2.7 :** Πλούσιο σκόνης με κατεύθυνση την κεντροδυτική Ευρώπη στις 23 Απριλίου 2022 (*MODIS true colour satellite images , Worldview*).

Οι τροχιές μεταφοράς της σκόνης από τη Σαχάρα προς την Μεσόγειο και την Ευρώπη δημιουργούνται από έντονα κυκλωνικά συστήματα που περνούν από την ακτή της Βορείου Αφρικής και κινούνται προς τα ανατολικά. Αυτά τα συστήματα προκαλούν τη μεταφορά ψυχρού αέρα από τα υψηλά γεωγραφικά πλάτη προς τη Βόρεια Αφρική. Ταυτόχρονα, σχηματίζονται βαθιές χαμηλές πιέσεις κατά μήκος του μετώπου που δημιουργείται μεταξύ του ψυχρού αυτού αέρα και των θερμών αερίων μαζών της Αφρικής με έντονους οριζόντιους ανέμους ( $>10\text{m/sec}$ ). Η συνδυασμένη ισχύς αυτών των ανέμων και οι έντονες κατακόρυφες ανοδικές κινήσεις μεταφέρουν σωματίδια σκόνης στην ατμόσφαιρα σε μεγάλες αποστάσεις από τη Σαχάρα προς την κεντρική Ευρώπη (Collaud Coen et al., 2003; Barkan et al., 2005; Bonelli and Marcazzan, 1996).



## II. ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟΣ

Η μεταφορά σκόνης από τη Βόρειο Αφρική προς την Ανατολική Μεσόγειο παρατηρείται κυρίως την άνοιξη και συνήθως συνδέεται με το πέρασμα χαμηλών βαρομετρικών συστημάτων προς τα ανατολικά (Sharav lows; Middleton and Goudie, 2001). Οι κυκλώνες αυτοί δημιουργούνται από τις θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ των ψυχρών θαλάσσιων μαζών στα βόρεια και των θερμότερων ηπειρωτικών μαζών στα νότια (Middleton and Goudie, 2001). Αντίθετα, σωματίδια από πηγές στη Μέση Ανατολή μεταφέρονται προς τη Μεσόγειο κατά τους φθινοπωρινούς μήνες (Kubilay et al., 2000). Τα επεισόδια από την Αραβική Χερσόνησο συνήθως διαρκούν μία ημέρα, ενώ τα επεισόδια από τη Σαχάρα έχουν διάρκεια 2-4 ημέρες (Dayan et al., 1991). Επιπλέον, η σκόνη από τη Σαχάρα εμφανίζεται σε μεγαλύτερα ύψη. Αναλύσεις δειγμάτων που έγιναν σε μια περίοδο 20 ετών στο Ισραήλ έδειξαν ότι η αφρικανική σκόνη είναι πιο συνηθισμένη στην Ανατολική Μεσόγειο (Ganor et al., 1991; Querol et al., 2009). Ένα τέτοιο φαινόμενο απεικονίζεται στην Εικόνα 2.8 όπου το πλούμιο της σκόνης καλύπτει σχεδόν ολόκληρη την Ανατολική Μεσόγειο.



**Εικόνα 2.8:** Πλούμιο σκόνης με κατεύθυνση την Ανατολική Μεσόγειο στις 22 Μαρτίου 2018 (MODIS, Worldview).

## 2.4 ΤΟ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΕΙΣΟΔΙΟ (ΜΑΡΤΙΟΣ 2018)

Τον Μάρτιο του 2018, σημειώθηκαν τέσσερα σημαντικά περιστατικά μεταφοράς σκόνης από τη βόρεια Αφρική προς την Ελλάδα. Αυτά συνέβησαν σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα: από 2 έως 6 Μαρτίου 2018, 17 έως 18 Μαρτίου 2018, 22 Μαρτίου 2018 και 26 Μαρτίου 2018. Κατά τη διάρκεια αυτών των περιστατικών, παρατηρήθηκε υψηλή συγκέντρωση σκόνης, κυρίως στις νότιες και κεντρικές περιοχές της χώρας.

Σύμφωνα με τις μετρήσεις συγκέντρωσης σκόνης που πραγματοποιήθηκαν στον σταθμό του Εθνικού Αστεροσκοπείου στα Χανιά Κρήτης, το βράδυ της Παρασκευής 2 Μαρτίου 2018, καταγράφηκε τιμή συγκέντρωσης  $495 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Επίσης, την Κυριακή 18 Μαρτίου 2018, καταγράφηκαν τιμές συγκέντρωσης σκόνης  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  στον σταθμό του Εθνικού Αστεροσκοπείου στην περιοχή της Μεθώνης, στη νοτιοδυτική Πελοπόννησο, και  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  στα Χανιά, Κρήτη.

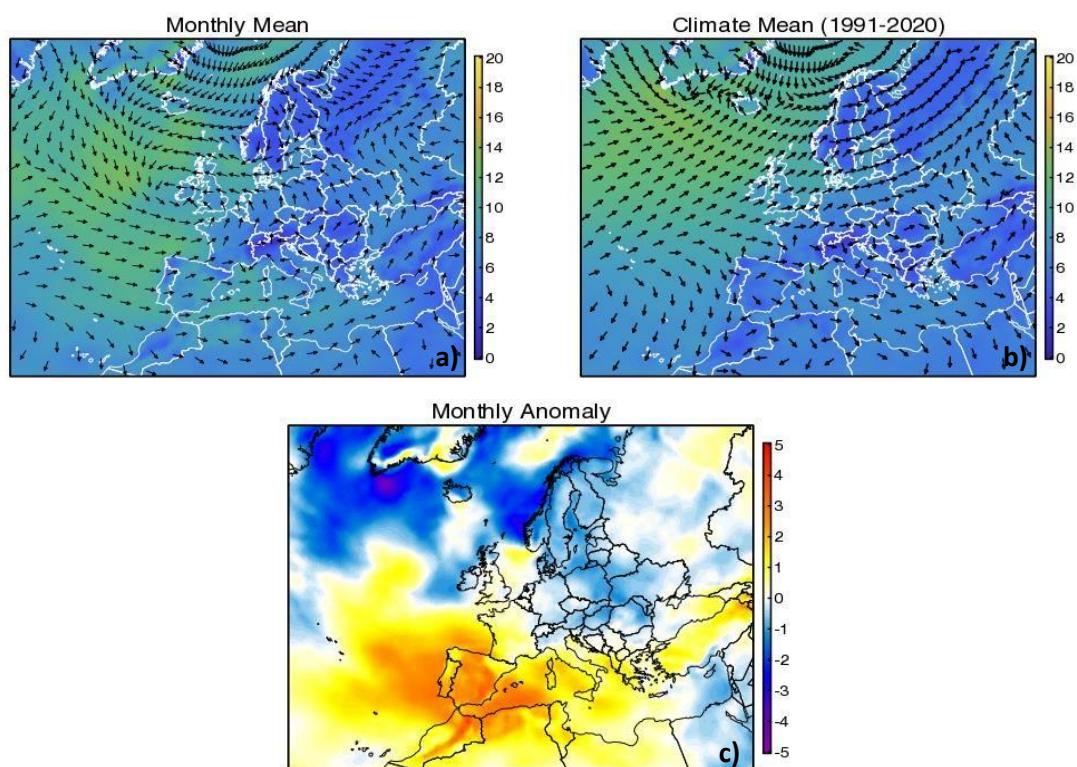
Στις 22 Μαρτίου 2018, σημειώθηκε ένα από τα ισχυρότερα περιστατικά μεταφοράς αφρικανικής σκόνης της τελευταίας δεκαετίας, που επηρέασε κυρίως τις νότιες και κεντρικές περιοχές της χώρας, συνοδευόμενο από θυελλώδεις νότιους ανέμους. Η μέγιστη συγκέντρωση σωματιδίων  $\text{PM}_{10}$  υπερέβη τα  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , με αποτέλεσμα την περιορισμένη ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος. Το νησί της Κρήτης επηρεάστηκε περισσότερο, με αποτέλεσμα τη μείωση της ορατότητας και την αναστολή λειτουργίας του αεροδρομίου του Ηρακλείου (πηγή: Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία).



**Εικόνα 2.9:** Υψηλή συγκέντρωση σκόνης στο λιμάνι του Ηρακλείου Κρήτης, το μεσημέρι της Πέμπτης 22 Μαρτίου 2018. Φωτογραφία του Θοδωρή Τζημόπουλου.

## 2.5 Η ΓΕΝΕΣΗ ΤΟΥ ΕΠΕΙΣΟΔΙΟΥ

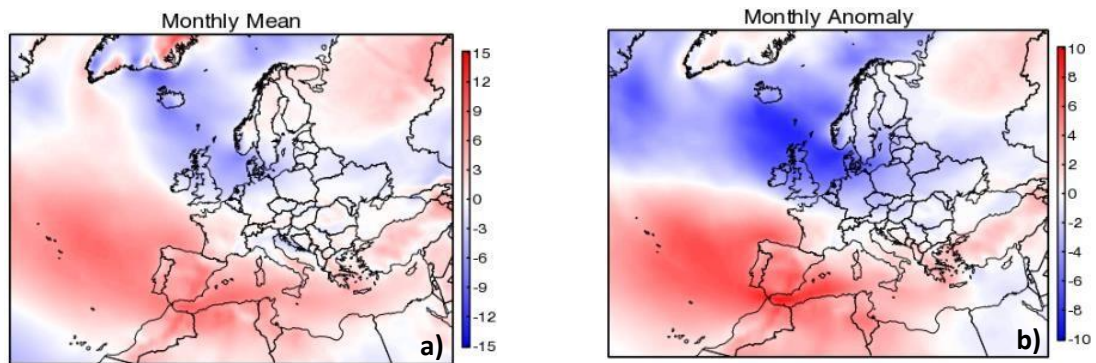
Το πεδίο των ανέμων (δηλαδή η ταχύτητα κοντά στην επιφάνεια, η διαφορά ταχυτήτων, το κατακόρυφο προφίλ) παίζει κρίσιμο ρόλο στο σχηματισμό, την ανάπτυξη, τα χαρακτηριστικά και την κίνηση της αιωρούμενης σκόνης. Οι ενισχυμένες κυκλωνικές συνθήκες και το ασυνήθιστα χαμηλό γεωδυναμικό ύψος πάνω από τη δυτική Ευρώπη, τη δυτική Μεσόγειο και τη βορειοδυτική Αφρική τον Μάρτιο του 2018 επηρέασαν δυναμικά το πεδίο των ανέμων σε ολόκληρη τη λεκάνη της Μεσογείου (Kaskaoutis, D. G. et al., 2019).



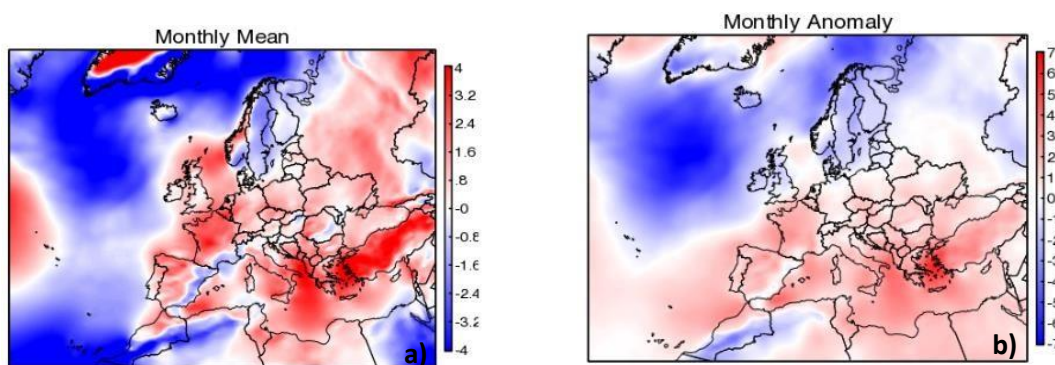
**Εικόνα 2.10:** Ταχύτητα ανέμου στα 50m (m/s) ως α) μέσος όρος για τον μηνά Μάρτιο 2018, ως β) μέσος όρος για τα έτη 1991-2020 και ως γ) μηνιαίες αποκλίσεις από τον μέσο όρο για τον μήνα Μάρτιο 2018 σύμφωνα με την επανάλυση MERRA-2.

Στην Εικόνα 2.10, παρατηρείται έντονη ενίσχυση των ανέμων σε όλα τα επίπεδα πάνω από τον ερευνώμενο τομέα, με τις υψηλότερες ταχύτητες πάνω από τη δυτική Μεσόγειο και κατά μήκος της βορειοδυτικής αφρικανικής ακτής.





**Εικόνα 2.11:** U-συνιστώσα (ζωνική) του ανέμου στα 50m (m/s) ως α) μέσος όρος για τον μηνά Μάρτιο 2018 και ως b) μηνιαίες αποκλίσεις από τον μέσο όρο για τον μήνα Μάρτιο 2018 σύμφωνα με την επανανάλυση MERRA-2.

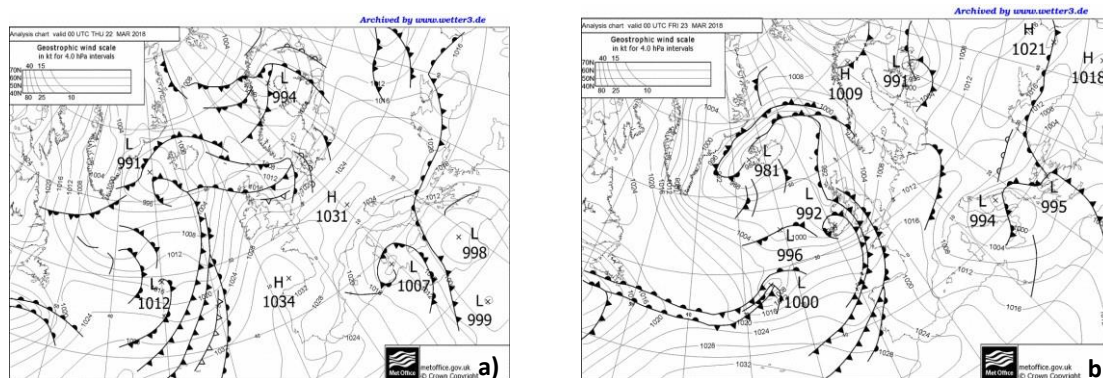


**Εικόνα 2.12:** V-συνιστώσα ανέμου στα 50m (m/s) ως α) μέσος όρος για τον μηνά Μάρτιο 2018 και ως b) μηνιαίες αποκλίσεις από τον μέσο όρο για τον μήνα Μάρτιο 2018 σύμφωνα με την επανανάλυση MERRA-2.

Οι μεγάλες θετικές αποκλίσεις της U-συνιστώσας του ανέμου (Εικόνα 2.11) υποδηλώνουν ενισχυμένη δυτική ροή ανέμου πάνω από τη βορειοδυτική Σαχάρα η οποία διευκόλυνε τις εισβολές σκόνης προς την ανατολική και κεντρική Μεσόγειο. Ενώ οι μεγάλες θετικές αποκλίσεις της V-συνιστώσας (Εικόνα 2.12) υποδηλώνουν μια ενίσχυση της νότιας ροής πάνω από την Ελλάδα τον Μάρτιο του 2018. Επιπλέον, ο συνδυασμός της αυξημένης δυτικής και νότιας ροής πάνω από τις ερημικές περιοχές κατά μήκος της βόρειας αφρικανικής ακτής επιβεβαιώνει την αύξηση της κινητοποίησης σκόνης και τα επεισόδια μεταφοράς σκόνης προς την ανατολική Μεσόγειο. Τέτοιοι ισχυροί άνεμοι, γνωστοί ως "Khamsin" ή "Λίβας", όπως αναφέρεται στην ελληνική βιβλιογραφία, κυριάρχησαν κατά μήκος της ακτής της Λιβύης τις περισσότερες μέρες του Μαρτίου του 2018 (Kaskaoutis, D. G. et al., 2019).

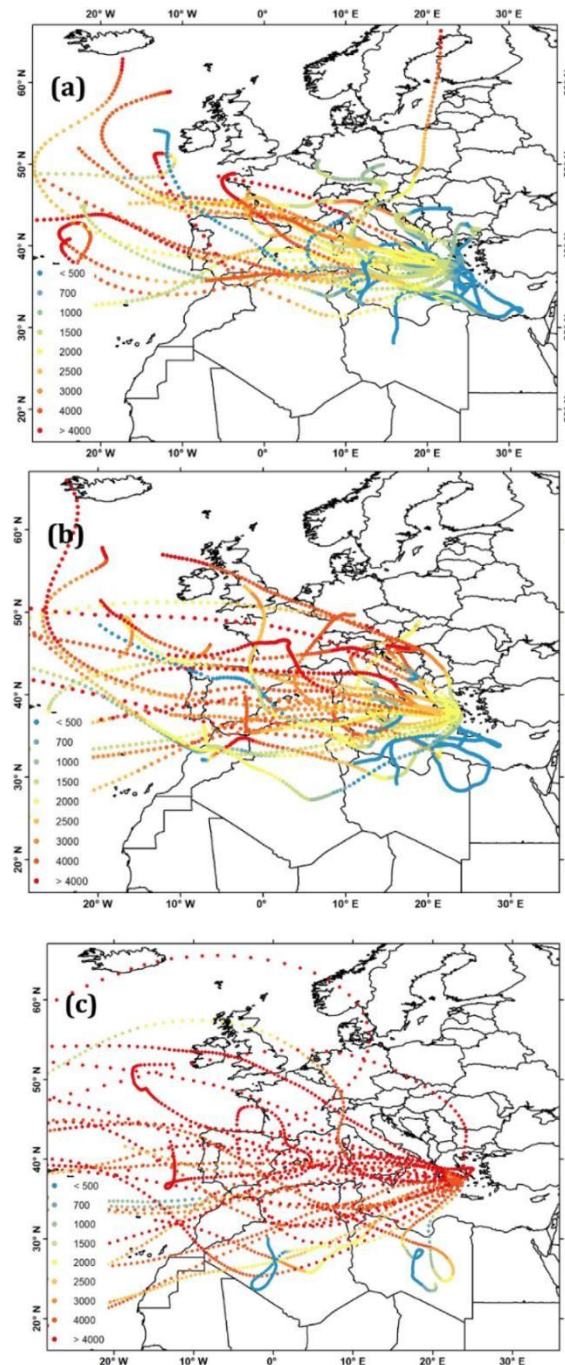
Επιπλέον, επικράτησε ένα καλά οργανωμένο ψυχρό μέτωπο στην ανατολική Λιβύη (22 Μαρτίου 2018, 00 UTC) το οποίο κινήθηκε προς τα ανατολικά (23 Μαρτίου 2018, 00 UTC) (Εικόνα 2.13 α, b). Η παραγωγή ψυχρού αέρα πίσω από το ψυχρό μέτωπο οδηγεί σε μια ανισορροπία μεγάλης κλίμακας και σε έντονες κάθετες κινήσεις στο μπροστινό μέρος του μετώπου, προκαλώντας σημαντική αγωστροφία ενισχύοντας την μεταφορά σκόνης μέσω των ισχυρών δυτικών ανέμων που προκάλεσε (Tsarpalis, 2021).





**Εικόνα 2.13:** Συνοπτικοί χάρτες επιφανειών στις α) 22 Μαρτίου 2018 και στις β) 23 Μαρτίου 2018 (πηγή: [https://www.wetter3.de/archiv\\_dwd\\_en.html](https://www.wetter3.de/archiv_dwd_en.html)).

Σύμφωνα με το μοντέλο HYSPLIT (<http://www.ready.noaa.gov>), η νοτιοδυτική αποτελεί την πιο ευνοϊκή κατεύθυνση για τις αέριες μάζες που επηρέασαν την Ελλάδα τον Μάρτιο του 2018, με σημαντική συνεισφορά από τη Λιβύη σε χαμηλά επίπεδα (500m και 1500m) (Εικόνα 2.14). Στα 4000m, όπου παρατηρήθηκε σημαντικό ποσοστό σκόνης κατά τα επεισόδια μεταφοράς σκόνης τον Μάρτιο του 2018 (Solomos et al., 2018), οι αέριες μάζες προήλθαν κυρίως από δυτικές κατευθύνσεις, διασχίζοντας τη δυτική Ευρώπη και τη Μεσόγειο, ενώ περίπου 1/3 τους ταξίδεψε πάνω από τη βορειοδυτική Αφρική σε υψόμετρα χαμηλότερα από 4km ενώ μερικές ξεκίνησαν από το ύψος του οριακού στρώματος στις ερήμους της Αλγερίας και της Λιβύης (υψόμετρα τροχιών κάτω από 1,5km).



**Εικόνα 2.14:** 4-ήμερες HYSPLIT αντεπιστροφές (*back trajectories*) αερίων μαζών με κατάληξη στην Αθήνα (10 UTC) στα 500m (a), 1500m (b) και 4000m (c) για όλες τις μέρες του Μαρτίου του 2018. Τα χρώματα αντιπροσωπεύουν το υψόμετρο της τροχιάς (Kaskaoutis, D. G., et al., 2019).

Το υψόμετρο της τροχιάς της αερίας μάζας είναι πολύ σημαντικό, καθώς υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα ανάληψης σκόνης εάν η αερία μάζα περνάει περισσότερο χρόνο πάνω από την έρημο ή ταξιδεύει εντός του οριακού στρώματος (Meloni et al., 2007). Το ύψος του στρώματος ανάμιξης πάνω από τη βόρεια Αφρική φτάνει τα 2-3km την άνοιξη, ενώ πάνω από τη Μεσόγειο είναι σχεδόν σταθερό στα 200-350m (Kallos et al., 2007). Επομένως, η συντριπτική πλειοψηφία των αερίων μαζών που προέρχονται από την Αφρική μπορούν να μεταφέρουν σωματίδια σκόνης ακόμη και σε υψηλά επίπεδα, ενώ οι αερίες μάζες από τη

Λιβύη δείχνουν έντονες ανοδικές και βόρειες κινήσεις προς την Ελλάδα που σχετίζονται με έντονα επεισόδια μεταφοράς σκόνης σε συγκεκριμένες ημέρες (π.χ. 4-7, 17-18, 21-22, 25-27) τον Μάρτιο του 2018 (Kaskaoutis, D. G., et al., 2019).

### 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

#### 3.1 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Σε ένα μοντέλο πρόβλεψης καιρού, οι οριακές συνθήκες είναι σημαντικές για να διασφαλίζεται η σωστή λειτουργία του μοντέλου και η ακρίβεια των προβλέψεων του.

Οριακές συνθήκες μπορεί να περιλαμβάνουν:

1. Αρχικές συνθήκες: Οι αρχικές συνθήκες είναι οι συνθήκες του συστήματος στο σημείο εκκίνησης της πρόβλεψης. Για ένα μοντέλο πρόβλεψης καιρού, αυτές οι συνθήκες περιλαμβάνουν τις τρέχουσες καιρικές συνθήκες όπως η θερμοκρασία, η πίεση, η υγρασία και οι κατευθύνσεις των ανέμων στην αρχή της πρόβλεψης.
2. Όρια του μοντέλου: Εδώ περιλαμβάνονται οι συνθήκες που ορίζουν τα όρια του χώρου ή του χρόνου για τις προβλέψεις. Για παράδειγμα, ένα μοντέλο πρόβλεψης καιρού θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα όρια του χρόνου για να προβλέψει την εξέλιξη του καιρού μετά από μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

Ο σωστός προσδιορισμός και η ενσωμάτωση αυτών των οριακών συνθηκών είναι κρίσιμη για την αξιοπιστία μιας πρόβλεψης καιρού. Χρησιμοποιώντας τις οριακές συνθήκες σε ένα μοντέλο πρόβλεψης, μπορούμε να βελτιώσουμε την ακρίβεια των προβλέψεων, εξασφαλίζοντας ότι το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τις σωστές παραμέτρους και τις αρχικές συνθήκες που επηρεάζουν την κατάσταση του καιρού.

Οι οριακές συνθήκες και οι αρχικές συνθήκες για την συγκεκριμένη μελέτη παρέχονται από την NCAR/NCEP Final Analysis (FNL από το GFS) (ds083.3), με ανάλυση 0.25 μοιρών. Οι προσομοιώσεις διήρκησαν 27 ημέρες, ξεκινώντας στις 02 Μαρτίου 2018, 00:00 UTC, κατά την διάρκεια των οποίων εμφανίστηκαν έντονα επεισόδια μεταφοράς σκόνης. Ένα ιδανικό κατακόρυφο προφίλ για κάθε χημικό είδους παρέχεται για να ξεκινήσει η προσομοίωση του μοντέλου. Οι ανθρωπογενείς εκπομπές παρέχονται από το Modal Aerosol Dynamics Model (MADE; Ackermann et al., 1998) για τα μη οργανικά αερολύματα και το Secondary Organic Aerosol Model (SORGAM; Schell et al., 2001) για τα οργανικά αερολύματα με ανάλυση 0.1 μοιρών. Βιογενείς εκπομπές με ανάλυση 1km συμπεριλήφθηκαν στην προσομοίωση χρησιμοποιώντας το Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature (MEGAN). Αυτές οι εκπομπές μπορούν να αντιδρούν στην ατμόσφαιρα για να δημιουργήσουν δευτερογενείς ρυπαντές, όπως όζον και οργανικά αεροζόλ, τα οποία μπορούν να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην ποιότητα του αέρα και το κλίμα.

Τα δεδομένα λειτουργικής ανάλυσης και προγνώσεων παγκόσμιας κλίμακας NCEP FNL (Final) προετοιμάζονται λειτουργικά κάθε έξι ώρες. Αυτό το προϊόν προέρχεται από το Global Data Assimilation System (GDAS), το οποίο συλλέγει συνεχώς δεδομένα παρατήρησης από το Παγκόσμιο Σύστημα Τηλεπικοινωνιών (GTS) και άλλες πηγές, για την παραγωγή πληθώρας αναλύσεων. Το GDAS είναι το σύστημα που χρησιμοποιείται από το προγνωστικό μοντέλο του Παγκόσμιου Συστήματος Προβλέψεων (GFS) για την τοποθέτηση παρατηρήσεων σε ένα

πλέγμα χώρου μοντέλων με σκοπό την έναρξη ή την προετοιμασία προγνώσεων καιρού με παρατηρούμενα δεδομένα (πηγή: National Centers for Environmental Information (NCEI)). Το FNL και το GFS σχετίζονται μεταξύ τους, ωστόσο είναι διαφορετικά προϊόντα από το ίδιο όμως σύστημα πρόγνωσης και με τα ίδια δεδομένα αφομοίωσης (assimilation data). Χρησιμοποιούν το ίδιο βασικό μοντέλο και τεχνικές αφομοίωσης δεδομένων. Περιέχουν τις ίδιες πηγές δεδομένων, αλλά υπάρχει μια διαφορά στο ποσό των "πραγματικών" δεδομένων που προσαρμόζονται στις αρχικές συνθήκες για το GFS και το FNL. Απαιτείται χρόνος για την εκτέλεση ενός παγκόσμιου μοντέλου πρόγνωσης καιρού, ακόμα και με τους μεγάλους υπολογιστικούς πόρους του NCEP. Επομένως, οι προγνώσεις του GFS πρέπει να ξεκινήσουν να παράγονται αρκετά πιο νωρίς ώστε να υπάρξει πρόβλεψη.

Το FNL είναι η τελική ανάλυση, η οποία πραγματοποιείται με μια μικρή καθυστέρηση σε σχέση με το GFS ώστε να μπορέσουν να συμπεριληφθούν όλα τα διαθέσιμα δεδομένα παρατήρησης. Συνήθως, το FNL προσλαμβάνει περίπου 10% περισσότερες παρατηρήσεις από το GFS. Ακόμα και με την καθυστερημένη έναρξη, είναι διαθέσιμο εγκαίρως ώστε η πρόβλεψη βάσει FNL κάθε 6 ώρες να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για το επόμενο κύκλο δεδομένων του GFS.

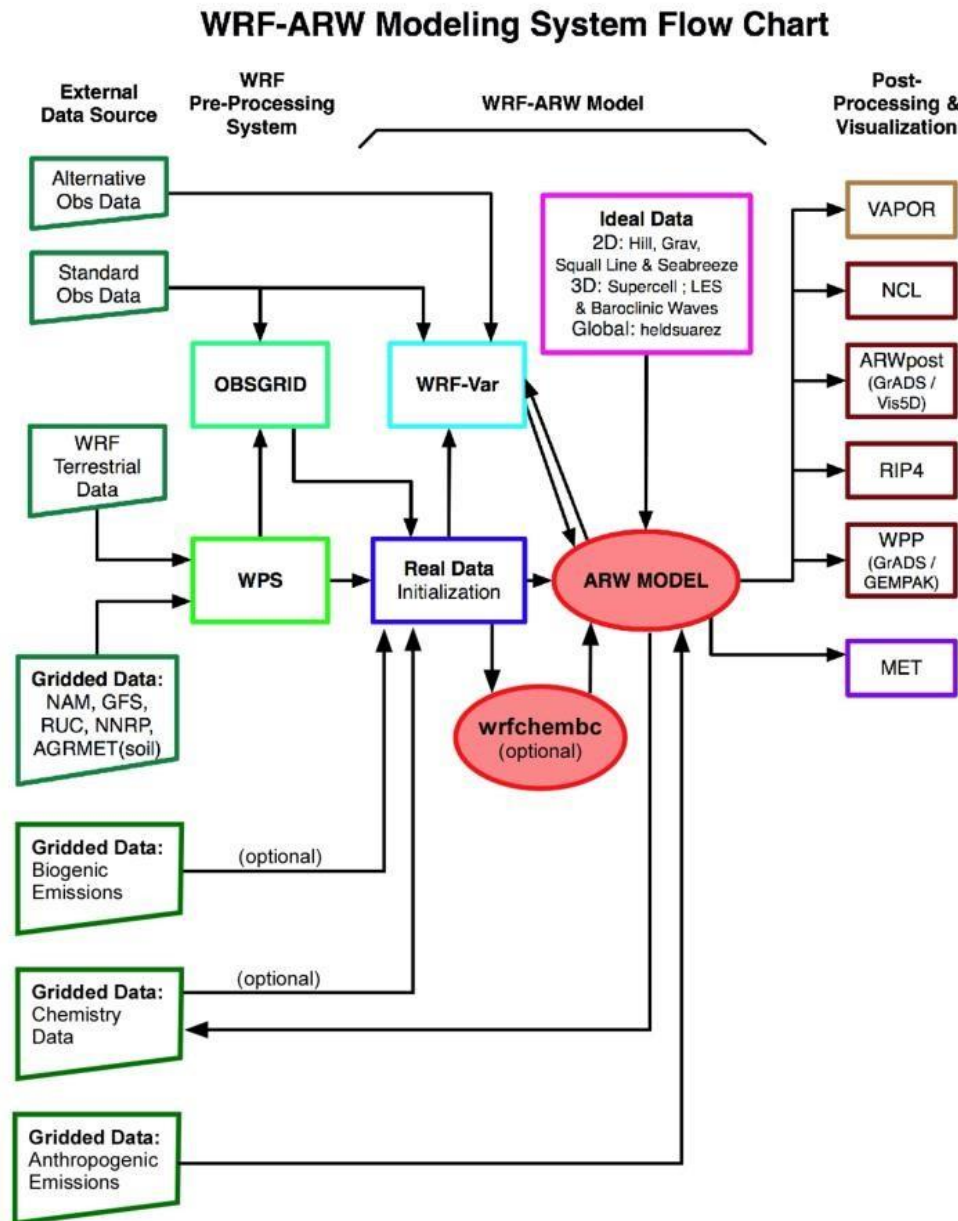
Οι αναλύσεις είναι διαθέσιμες στην επιφάνεια, σε 26 επίπεδα πίεσης, από 1000 millibar έως 10 millibar, στο επιφανειακό οριακό στρώμα και σε ορισμένα στρώματα σίγμα, την τροπόπαυση καθώς και μερικά άλλα. Οι παράμετροι περιλαμβάνουν την επιφανειακή πίεση, την πίεση της στάθμης της θάλασσας, γεωδυναμικό ύψος, τη θερμοκρασία, τη θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας, τις τιμές ποιότητας εδάφους, την κάλυψη πάγου, τη σχετική υγρασία, τους U- και V- ανέμους, την κατακόρυφη κίνηση, τη δίνη και το όζον. Η χρονοσειρά αρχειοθέτησης επεκτείνεται συνεχώς σε μια σχεδόν τρέχουσα ημερομηνία. Δεν διατηρείται σε πραγματικό χρόνο (πηγή: National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S.).

## 3.2 ΜΟΝΤΕΛΟ WRF-CHEM

### 3.2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η παρούσα έρευνα χρησιμοποιεί την έκδοση 4.4.1 του περιοχικού μοντέλου WRF-Chem (Grell et al., 2005) για να εξετάσει τις επιδράσεις της σκόνης στην ατμόσφαιρα. Το WRFChem-V4.4.1 είναι ένα πλήρως συζευγμένο μοντέλο μετεωρολογίας-χημείας-αερολύματος που προσομοιώνει τα ίχνη αερίων (trace gases) και τα αερολύματα ταυτόχρονα με τα μετεωρολογικά πεδία του βασικού μοντέλου WRF (Skamarock et al., 2008). Το μοντέλο WRF είναι ένα πλήρως συμπιέσιμο και μη υδροστατικό μοντέλο μεσοκλιματικής κλίμακας που αναπτύχθηκε από τη συνεργασία πολλών ερευνητικών οργανισμών, συμπεριλαμβανομένου του Εθνικού Κέντρου Ατμοσφαιρικής Έρευνας (NCAR) και της Εθνικής Υπηρεσίας Ωκεανών και Ατμόσφαιρας (NOAA) των Ηνωμένων Πολιτειών, μεταξύ άλλων. Αμφότερες οι χημικές και οι

μετεωρολογικές συνιστώσες του WRF-Chem-V4.4.1 χρησιμοποιούν το ίδιο πλέγμα μοντέλου, το ίδιο δυναμικό μοντέλο και την παραμετροποίηση για τη μεταφορά κλίμακας υποπλέγματος (Grell et al., 2005).



**Εικόνα 3.1 :** Διάγραμμα ροής συστήματος μοντελοποίησης WRF (πηγή: WRF Users guide).

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα (Εικόνα 3.1), το σύστημα μοντελοποίησης WRF-Chem ακολουθεί την ίδια δομή με το μοντέλο WRF και αποτελείται από τα εξής κύρια προγράμματα:

- I. **Το Σύστημα Προεπεξεργασίας WRF (WRF Pre-Processing System - WPS):** Αυτό το πρόγραμμα χρησιμοποιείται για την προεπεξεργασία των δεδομένων εισόδου που απαιτούνται από το μοντέλο WRF-Chem. Περιλαμβάνει την αντιστροφή



γεωγραφικών προβλημάτων (geographical inverse problems), τη δημιουργία αναλύσεων (analyses) και τον προσδιορισμό των ατμοσφαιρικών συνθηκών εκκίνησης.

- II. **Το Σύστημα Αφομοίωσης Δεδομένων WRF-Var (WRF-Var Data Assimilation System):** Αυτό το πρόγραμμα χρησιμοποιείται για την ενσωμάτωση δεδομένων παρατήρησης στο μοντέλο WRF-Chem, ώστε να βελτιωθούν οι αρχικές συνθήκες και άρα να γίνουν πιο ακριβείς οι προγνώσεις.
- III. **Ο Λύτης του WRF (WRF Solver - ARW Core):** Αυτός είναι ο βασικός λύτης του μοντέλου WRF-Chem που περιλαμβάνει τον πυρήνα ARW (Advanced Research WRF). Είναι υπεύθυνος για την επίλυση των δυναμικών εξισώσεων της ατμόσφαιρας και τον υπολογισμό των χημικών διεργασιών.
- IV. **Εργαλεία Μετεπεξεργασίας και Οπτικοποίησης:** Αυτά τα εργαλεία χρησιμοποιούνται για τη μετεπεξεργασία των αποτελεσμάτων του μοντέλου και την οπτικοποίηση των δεδομένων, προσφέροντας μια πιο εύκολη και κατανοητή παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Σε σχέση με το βασικό μοντέλο WRF το οποίο δεν προσομοιώνει τα αερολύματα και τη χημεία, στο WRF-Chem χρειάζεται να παρέχονται επιπλέον δεδομένα εισόδου που σχετίζονται με τις εκπομπές. Αυτά τα επιπλέον δεδομένα παρέχονται είτε από το Σύστημα Προεπεξεργασίας WRF (WPS), είτε διαβάζονται κατά τη διάρκεια της αρχικοποίησης του real.exe (π.χ. εκπομπές από καύση βιομάζας, βιογενείς εκπομπές, πεδία υποβάθρου GOCART κ.λπ.), είτε διαβάζονται κατά την εκτέλεση του λύτη WRF (π.χ. ανθρωπογενείς εκπομπές, συνωριακές συνθήκες, εκπομπές από ηφαιστειακές δραστηριότητες κ.λπ.).

Παρόλο που παρέχονται ορισμένα προγράμματα για να βοηθήσουν τον χρήστη στην δημιουργία αυτών των εξωτερικών αρχείων εκπομπών, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι επιλογές εκπομπών δεν είναι όλες ρυθμισμένες ώστε να λειτουργούν για οποιαδήποτε από τις δυνατές επιλογές σχετικά με το μοντέλο WRF-Chem. Με άλλα λόγια, η δημιουργία δεδομένων εισόδου εκπομπών για την προσομοίωση της χημείας της ατμόσφαιρας μπορεί να είναι εξαιρετικά πολύπλοκη. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ο χρήστης θα πρέπει να τροποποιήσει τον κώδικα ή να διαμορφώσει το μοντέλο για να το καταστήσει λειτουργικό για το εκάστοτε εργασιακό του σχέδιο.

---

### 3.2.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΣΚΟΝΗΣ

Μία από τις κύριες διαφορές μεταξύ της εκτέλεσης με και χωρίς χημεία είναι η συμπερίληψη πρόσθετων δεδομένων που περιγράφουν τις πηγές των συστατικών της ατμόσφαιρας. Θα ήταν ιδανικό να υπάρχει ένα μοντέλο ή κώδικας που θα δημιουργούσε όλα τα σύνολα δεδομένων εκπομπών για οποιοδήποτε πεδίο και οποιαδήποτε επιλογή χημείας που κάνει ο χρήστης. Όμως, αυτό δεν είναι εδραιωμένη πρακτική στα ατμοσφαιρικά μοντέλα και επομένως κάποια από τα αρχεία εκπομπών πρέπει να προετοιμαστούν εξωτερικά από την

προσομοίωση του WRF-Chem. Επομένως δημιουργήθηκε το κατάλληλο σύνολο δεδομένων εκπομπών για το συγκεκριμένο πεδίο και την επιλογή χημείας χρησιμοποιώντας την ευρεία ποικιλία διαθέσιμων πηγών δεδομένων.

Η προσθήκη σκόνης στις προσομοιώσεις WRF είναι ίσως η πιο εύκολη από όλες τις επιλογές του WRF-Chem, καθώς το μοντέλο δημιουργεί τα πεδία εκπομπής σκόνης κατά την πραγματική εκτέλεση της προσομοίωσης. Τα "online" δεδομένα εκπομπής σκόνης παρέχονται μέσω πληροφοριών χρήσης γης που παράγονται από το Σύστημα Προεπεξεργασίας WRF (WPS) και τα προσομοιωμένα μετεωρολογικά πεδία. Συνεπώς, με τη σύνθεση του κώδικα WRF-Chem και ακολουθώντας τις κανονικές διαδικασίες χρήσης του WPS για τη δημιουργία των δεδομένων εισόδου του μοντέλου WRF-Chem, επιλέγεται ένα σχήμα σωματιδίων (aerosols scheme) με ελάχιστη προσπάθεια.

---

### 3.2.3 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Μετά την επιτυχή δημιουργία των αρχείων εισόδου για τις ανθρωπογενείς και βιογενείς εκπομπές, σειρά έχει η εκτέλεση του μοντέλου. Αυτή η διαδικασία δεν διαφέρει από την εκτέλεση της απλής μετεωρολογικής έκδοσης του μοντέλου. Για να πραγματοποιηθεί μια προσομοίωση ποιότητας αέρα, αλλάζουμε κατάλογο στον φάκελο WRF/test/em\_real.

Το μεγαλύτερο μέρος των επιλογών του "chemistry namelist" (σύνολο ρυθμίσεων για τη λειτουργία του χημικού τμήματος του μοντέλου) σχετίζεται με τους χημικούς μηχανισμούς και την επιλογή των αερολυματικών (aerosol) ενότητων. Ο μηχανισμός που χρησιμοποιείται κατά την πρόβλεψη καθορίζεται με την παράμετρο chem\_opt, η οποία περιγράφεται παρακάτω. Ορισμένες από αυτές τις επιλογές απαιτούν άλλες ρυθμίσεις για άλλες παραμέτρους του "chemistry namelist".

Συγκεκριμένα, η παράμετρος chem\_opt αντιπροσωπεύει την επιλογή του χημικού μηχανισμού που χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη. Κάθε χημικός μηχανισμός περιγράφει τις χημικές αντιδράσεις και τις ιδιότητες των ατμοσφαιρικών συστατικών που λαμβάνονται υπόψη κατά την προσομοίωση της χημείας της ατμόσφαιρας.

Οι υπόλοιπες επιλογές του "chemistry namelist" σχετίζονται με τις αερολυματικές ενότητες που επιλέγονται και τις σχετικές ρυθμίσεις για κάθε ενότητα. Αυτό δίνει τη δυνατότητα επιλογής του συνόλου των αερολυματικών διεργασιών που θα λαμβάνονται υπόψη κατά την προσομοίωση των αερολυματικών σωματιδίων στην ατμόσφαιρα.

Η εκτέλεση του μοντέλου έγινε δύο φορές:

- 1) στην πρώτη εκτέλεση (control run) συμπεριλαμβάνεται η συγκέντρωση της σκόνης στην προσομοίωση
- 2) στη δεύτερη εκτέλεση η επιλογή της σκόνης ήταν απενεργοποιημένη.

Αναλύοντας τις διαφορές ανάμεσα στα αποτελέσματα αυτών των δύο προσομοιώσεων, μπορούμε να εμβαθύνουμε στο ποια ήταν η επίδραση των σωματιδίων σκόνης τόσο στη σύσταση της ατμόσφαιρας όσο και στις μετεωρολογικές συνθήκες.



Οι βασικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση του μοντέλου με σκόνη στην συγκεκριμένη εργασία είναι οι εξής:

**chem\_opt = 401**, περιλαμβάνει μόνο προσομοιώσεις της συγκέντρωσης της σκόνης και όχι άλλων ατμοσφαιρικών συστατικών αλλά ούτε τις χημικές αντιδράσεις στην αέρια φάση (Chen et al., 2023), και

**dust\_opt = 5**, περιλαμβάνει εκπομπές σκόνης από το μοντέλο GOCART (Ginoux et al., 2001; Zhao et al., 2010; Zhao et al., 2013).

Ενώ η παράμετρος που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση του μοντέλου χωρίς σκόνη είναι:

**dust\_opt = 0**, δεν περιλαμβάνει εκπομπές σκόνης.

Ο κώδικας WRF-Chem είναι ικανός να προβλέπει τη μεταφορά σκόνης μαζί με τη μετεωρολογία. Για να τρέξει το μοντέλο μόνο με τη σκόνη, ανακτήθηκαν αρκετά αρχεία εισόδου για το Σύστημα Προεπεξεργασίας WRF (WPS). Αυτά τα αρχεία είναι τα πεδία που σχετίζονται με τη σκόνη (παράγοντας διάβρωσης, ποσοστό αργίλου, ποσοστό άμμου) που περιλαμβάνονται στον κατάλογο GEOG του WPS και στο αρχείο πίνακα GEOGRIB.TBL\_ARW\_CHEM. Έπειτα από το κατέβασμα και τη μεταγλώττιση του WPS, συνδέθηκε ο πίνακας GEOGRIB στο GEOGRIB.TBL\_ARW\_CHEM. Το WPS μπορεί στη συνέχεια να εκτελεστεί έτσι ώστε τα σχήματα διάβρωσης σκόνης να περιλαμβάνονται στην έξοδο geogrib και στη συνέχεια να συμπεριληφθούν στα αρχεία εισόδου της μετεωρολογίας. Με τα δεδομένα διάβρωσης σκόνης πλέον στα αρχεία εισόδου, το μοντέλο WRF μπορεί να τρέξει χρησιμοποιώντας τις ρυθμίσεις του "chemistry namelist" για μόνο σκόνη (chem\_opt=401).

Κατηγορίες	Αριθμός επιλογής	Επεξήγηση επιλογής
Ανθρωπογενείς εκπομπές	3	Χρησιμοποιούνται MADE-SORGAM ανθρωπογενείς εκπομπές
Βιογενείς εκπομπές	3	Σχήμα Meghan
Φωτόλυση	0	Απενεργοποιημένο
Εκπομπές καύσης βιομάζας	0	Απενεργοποιημένο
Ξηρή εναπόθεση αερίων	0	Απενεργοποιημένο
Ξηρή εναπόθεση αερολυμάτων	1	Ενεργοποιημένο
Χημεία νεφών	0	Απενεργοποιημένο
Άμεση και έμμεση επίδραση των αερολυμάτων	/	Ενεργοποιημένο
Ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος	4	Σχήμα RRTMG
Ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος	4	Σχήμα RRTMG

**Πίνακας 3.1:** Επιλογές χημείας που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία στο μοντέλο WRF-chem.

### 3.2.4 ΥΠΟ-MONTEΛΑ ΤΟΥ WRF-CHEM

Το μοντέλο WRF-chem έχει επιστρατεύσει κάποια επιπλέον εσωτερικά υπό-μοντέλα για περαιτέρω αναλύσεις της επίδρασης των σωματιδίων σκόνης, τα οποία περιγράφονται παρακάτω:

- GOCART (Bulk aerosol scheme)

Για την προσομοίωση της εκπομπής σκόνης και των σχετικών ατμοσφαιρικών διεργασιών στις προσομοιώσεις του WRF-Chem, έχει υλοποιηθεί το μοντέλο σκόνης Goddard Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport (GOCART), όπως περιγράφεται από τους Ginoux et al. (2001). Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη την εκπομπή σωματιδίων σκόνης, η οποία εκτιμάται βάσει μεταβλητών που επηρεάζουν τη σκόνη στην επιφάνεια, όπως οι άνεμοι επιφάνειας, η υγρασία επιφάνειας και η διάβρωση (Chin et al., 2002).

Όσον αφορά στις οπτικές ιδιότητες των αερολυμάτων, εκτιμώνται βάσει προσέγγισης όγκου, δηλαδή χρησιμοποιείται η μέθοδος της κατηγοριοποίησης των μεγεθών (μόνο για σκόνη και θαλασσινό αλάτι), που αναφέρουμε στον Πίνακα 3.2 για την αναπαράσταση των κατανομών μεγέθους των αερολυμάτων. Αυτό επιτρέπει την επίτευξη ισορροπίας ανάμεσα στην ακριβή αναπαράσταση της σκόνης και την υπολογιστική αποδοτικότητα των προσομοιώσεων. Το σχήμα σκόνης GOCART λαμβάνει υπόψη αυτούς τους παράγοντες για την προσομοίωση της εκπομπής, της μεταφοράς και της ακτινοβολιακής επίδρασης των σωματιδίων σκόνης στο μοντέλο WRF-Chem.

Οι εκπομπές σκόνης υπολογίζονται με ξεχωριστό τρόπο όσον αφορά στις κατηγορίες μεγέθους (size bins) σωματιδίων εδάφους. Στο WRF-Chem-V4.4.1 υπάρχουν πέντε κατηγορίες με μέσες διαμέτρους  $D_p$  (effective diameter) μεταξύ 0,5  $\mu\text{m}$  και 8  $\mu\text{m}$  (Πίνακας 3.2; Ukhov et al., 2020).

Τύπος	Εύρος ακτίνας ( $\mu\text{m}$ )	Διάμετρος $D_p$ ( $\mu\text{m}$ )	Πυκνότητα σωματιδίου $\rho_p(\text{kg m}^{-3})$
Bin 1	0,1-1	0,5	2500
Bin 2	1-1,8	1,4	2650
Bin 3	1,8-3	2,4	2650
Bin 4	3-6	4,5	2650
Bin 5	6-10	8	2650

**Πίνακας 3.2:** Κατηγορίες μεγεθών (size bins) σωματιδίων σκόνης.

Η ροή εκπομπής  $F_p$  για μια ομάδα μεγέθους  $p$  εκφράζεται ως:

$$F_p = S s_p u^2 (u - u_t) \quad \text{αν } u > u_t \quad (3.1)$$

Εδώ η  $S$  αντιπροσωπεύει την πιθανολογική συνάρτηση πηγής, η οποία είναι η πιθανότητα συσσώρευσης ιζήματος στις περιοχές των κοιλωμάτων της τοπογραφίας με ξηρή επιφάνεια. Το  $s_p$  αναπαριστά το ποσοστό της ομάδας μεγέθους  $p$  στο έδαφος. Το  $u$  είναι η ταχύτητα των επιφανειακών ανέμων και το  $u_t$  είναι η οριακή ταχύτητα ενεργοποίησης της διάβρωσης από τον άνεμο, η οποία καθορίζεται από το μέγεθος των σωματιδίων και την υγρασία της επιφάνειας και δίνεται από την σχέση:

$$u_t(D_p) = A \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_a}} \frac{g}{D_p} \quad (3.2)$$

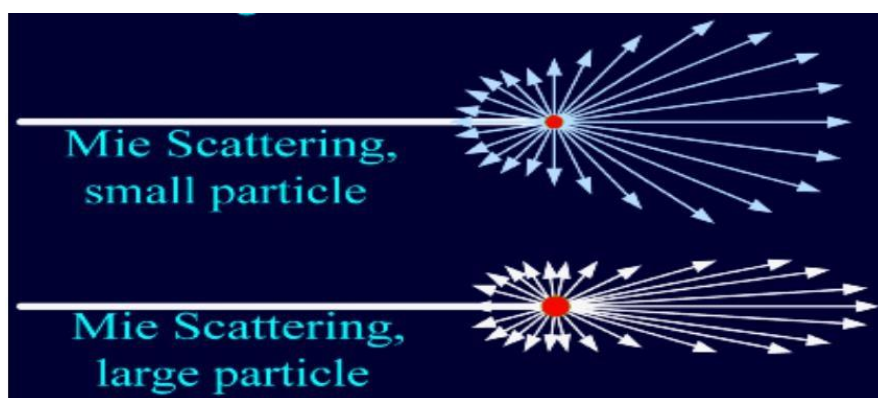
όπου  $\rho_p$  είναι η πυκνότητα σωματιδίων για κάθε κατηγορία μεγέθους (Πίνακας 3.2),  $\rho_a$  είναι η πυκνότητα του αέρα και  $g$  είναι η βαρυτική επιτάχυνση (Bagnold, 2012; Ginoux et al., 2001).

- MADE/SORGAM (Modal aerosol scheme)

Συμπληρωματικά με το GOCART χρησιμοποιείται το MADE/SORGAM το οποίο σε αντίθεση με το GOCART δίνει πληροφορίες για το πλήθος και την μάζα των σωματιδίων καθώς επίσης περιλαμβάνει και οργανικά, μη οργανικά και δευτερεύοντα οργανικά αερολύματα ([https://ruc.noaa.gov/wrf/wrf-chem/wrf\\_tutorial\\_2017/WRF\\_CHEM\\_aerosols.pdf](https://ruc.noaa.gov/wrf/wrf-chem/wrf_tutorial_2017/WRF_CHEM_aerosols.pdf)). Πιο συγκεκριμένα, το τμήμα των αερολυμάτων σε σύζευξη με το μοντέλο WRF για αυτήν τη μελέτη περιλαμβάνει το Modal Aerosol Dynamics Model (MADE; Ackermann et al., 1998) για τα μη οργανικά αερολύματα και το Secondary Organic Aerosol Model (SORGAM; Schell et al., 2001) για τα οργανικά αερολύματα. Το αερολυματικό μοντέλο MADE-SORGAM χρησιμοποιεί τη μέθοδο των κατηγοριών μεγέθους για την κατανομή των αερολυμάτων σε τρεις κατηγορίες μεγέθους (πυρήνες Aitken, σωματίδια στην περιοχή συσσώρευσης και χονδρά σωματίδια) υποθέτοντας μια λογαριθμική κατανομή μεγεθών για κάθε κατηγορία. Τα είδη αερολυμάτων που υπολογίζονται σε αυτό το μοντέλο περιλαμβάνουν τα κύρια μη οργανικά ιόντα (θειικά, νιτρικά και αμμωνία), τον στοιχειώδη άνθρακα, την οργανική ουσία (πρωτογενής και δευτερογενής), το νερό ως αερόλυμα, το αλάτι της θάλασσας και την ορυκτή σκόνη. Οι πηγές των αερολυμάτων περιλαμβάνουν την άμεση εκπομπή σωματιδίων και το δευτερογενή σχηματισμό μέσω της πυρηνοποίησης. Άλλες φυσικές διεργασίες που συντελούν στο πλήθος των αερολυμάτων περιλαμβάνουν την συμπύκνωση, την συσσωμάτωση, τις χημικές διεργασίες στην υδατική φάση, την ανάληψη νερού από τα αερολύματα και την ξηρή και υγρή εναπόθεση. Η ξηρή εναπόθεση και οι ταχύτητες καθίζησης υπολογίζονται ξεχωριστά για κάθε κατηγορία μεγέθους, βασιζόμενοι στο έργο των Binkowski και Shankar (1995).

- RRTMG

Η σύζευξη των άμεσων και έμμεσων επιδράσεων των αερολυμάτων σε αριθμητικά μοντέλα απαιτεί αμοιβαία ανάδραση μεταξύ των σχημάτων ακτινοβολίας (radiation schemes) και μικροφυσικής νεφών (microphysical schemes) του μοντέλου. Για τον λόγο αυτό, επιλέγουμε το Rapid Radiative Transfer Model for General Circulation Model (RRTMG; Iacono et al., 2008) το οποίο είναι ικανό να διαχειρίζεται τις συνδυασμένες προσομοιώσεις της ακτινοβολίας αντίστοιχα. Το RRTMG υπολογίζει τις ροές ακτινοβολίας και την αύξηση της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας για 16 περιοχές μεγάλου μήκους κύματος (3,08-1000  $\mu\text{m}$ ) και 14 περιοχές μικρού μήκους κύματος (0,2-12,2  $\mu\text{m}$ ). Σύμφωνα με τους Fast et al. (2006), οι οπτικές ιδιότητες των αερολυμάτων υπολογίζονται σε ένα ξεχωριστό τμήμα χρησιμοποιώντας τη θεωρία Mie (Εικόνα 3.2) και στη συνέχεια περνάνε στο μοντέλο ακτινοβολίας RRTMG.



**Εικόνα 3.2:** Χαρακτηριστικοί λοβοί της σκέδασης Mie

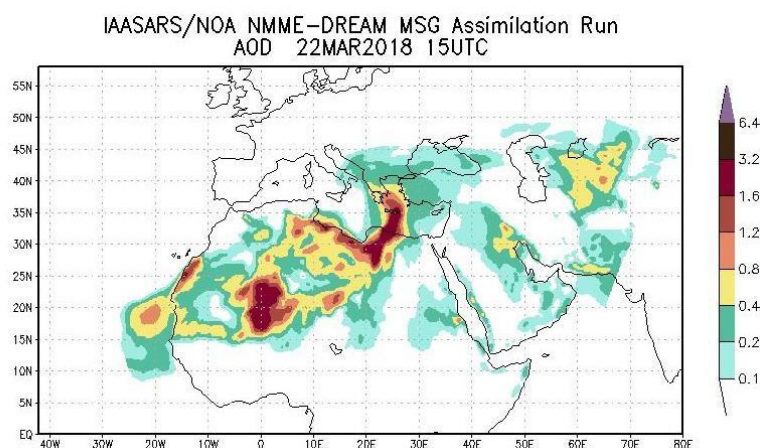
Η θεωρία Mie υπολογίζει την αποδοτικότητα εξασθένησης (extinction efficiency), την αποδοτικότητα σκέδασης (scattering efficiency) και την παράμετρο ασυμμετρίας σε κάθε κελί πλέγματος για ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος και μέγεθος της κάθε κατηγορίας μεγέθους αερολυμάτων. Οι συνολικές οπτικές ιδιότητες καθορίζονται στη συνέχεια από το άθροισμα όλων των κατηγοριών μεγέθους. Στην Εικόνα 3.2 παρατηρούμε ότι στη σκέδαση Mie ευνοείται η εμπροσθοσκέδαση και συγκεκριμένα τα μεγαλύτερα σωματίδια εμφανίζουν μικρότερη γωνία σκέδασης.

Για αυτήν τη μελέτη, επιλέξαμε τον κανόνα μέτρησης μέσου όρου όγκου που υποθέτει την εσωτερική ανάμιξη των συστατικών των αερολυμάτων και υπολογίζει τους δείκτες διάθλασης για κάθε μέγεθος από τους δείκτες διάθλασης των μεμονωμένων ειδών αερολυμάτων. Για τις τέσσερις περιοχές μικρού μήκους κύματος, οι πραγματικοί και φανταστικοί δείκτες διάθλασης των αερολυμάτων σκόνης που χρησιμοποιούνται για τις τρέχουσες προσομοιώσεις είναι αντίστοιχα 1,55 και 0,003 αντίστοιχα, σύμφωνα με το Zhao et al. (2010). Οι δείκτες διάθλασης μεγάλου μήκους κύματος κυμαίνονται από 1,242 έως 2,904 για το πραγματικό μέρος και από 0,0068 έως 0,857 για το φανταστικό μέρος.

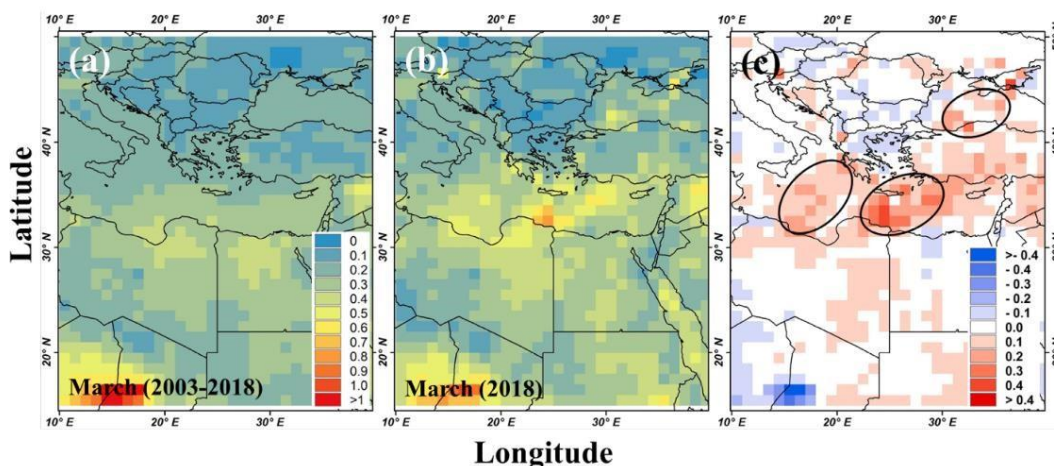
## 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 4.1 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΚΟΝΗΣ

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αναδεικνύουν την πρωτοφανή ένταση του επεισοδίου μεταφοράς σκόνης που έλαβε χώρα το Μάρτιο του 2018 επηρεάζοντας μεγάλο μέρος της Ανατολικής Μεσογείου. Η εικόνα 4.1 αποτυπώνει την αιχμή του επεισοδίου εμφανίζοντας ασυνήθιστα υψηλές τιμές οπτικής πυκνότητας σκόνης (DOD). Οι ακραίες αυτές τιμές επιβεβαιώνονται από τα σχήματα 4.2 και 4.3 όπου συγκρίνουν την χωρική κατανομή της μηνιαίας μέσης τιμής του οπτικού βάθους σκόνης ( $AOD_{550}$ ) και της συγκέντρωσης αντίστοιχα, του Μαρτίου του 2018, με τις μέσες τιμές προηγούμενων ετών εμφανίζοντας σημαντικές αποκλίσεις.



**Εικόνα 4.1** Προβλεπόμενες τιμές οπτικής πυκνότητας σκόνης (DOD) από το μοντέλο σκόνης πάνω από την Αφρική και την Ευρώπη στις 15:00 UTC της 22ης Μαρτίου 2018.

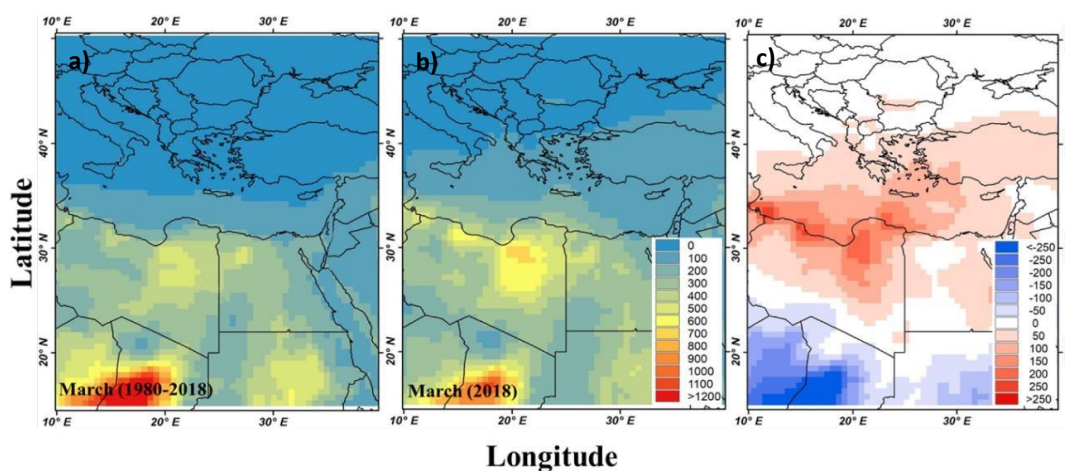




**Εικόνα 4.2:** Χωρική κατανομή της μηνιαίας μέσης τιμής του οπτικού βάθους σκόνης ( $AOD_{550}$ ) από το Aqua MODIS a) για το μέσο όρο των Μαρτίων των ετών 2003-2018, b) για τον Μάρτιο του 2018 και c) για τις διαφορές μεταξύ των τιμών της  $AOD_{550}$  του Μαρτίου του 2018 και της μέσης τιμής του Μαρτίου (2003-2018) (Kaskaoutis et al., 2019).

Σε αυτό το σημείο επισημαίνεται η υψηλή συγκέντρωση σκόνης στην ατμόσφαιρα πάνω από τη λεκάνη της Ανατολικής Μεσογείου το Μάρτιο του 2018, σε σύγκριση με τη μέση κλιματολογία του Μαρτίου, μέσω δορυφορικών παρατηρήσεων MODIS και επαναanalύσεων MERRA-2 (<https://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/>). Η Εικόνα 4.2 συγκρίνει τις χωρικές κατανομές του οπτικού βάθους σκόνης  $AOD_{550}$  από το Aqua MODIS μεταξύ του Μαρτίου του 2018 και του των μέσων τιμών Μαρτίου (2003-2018), μαζί με τις διαφορές τους και εμφανίζει αύξηση 7,7% (κατά μέσο όρο) σε σχέση με τις μέσες τιμές  $AOD_{550}$  των Μαρτίων (2003-2018).

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι παρατηρήσεις Terra-MODIS απέδειξαν πολύ παρόμοιες χωρικές κατανομές  $AOD_{550}$  με τις Aqua MODIS και μια μέση αύξηση κατά 15,4% το Μάρτιο του 2018 σε σύγκριση με τη μέση κλιματολογία του Μαρτίου (2003-2018). Οι υψηλότερες τιμές  $AOD$  το Μάρτιο του 2018 εντοπίστηκαν πάνω από τη Λιβυκό Πέλαγος (μεταξύ Λιβύης και Κρήτης), τον Κόλπο της Σύρτης, την Θάλασσα του Ιονίου, καθώς και πάνω από μέρη της Μαύρης Θάλασσας (Kaskaoutis et al., 2019).



**Εικόνα 4.3:** Χωρική κατανομή της μηνιαίας μέσης συγκέντρωσης σκόνης στην επιφάνεια ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) από το Aqua MODIS για τον a) για το μέσο όρο των Μαρτίων των ετών 1980-2018, b) για τον Μάρτιο του 2018 και c) για τις διαφορές μεταξύ των τιμών της μέσης συγκέντρωσης του Μαρτίου του 2018 σύμφωνα με την επανάλυση MERRA-2 v5.12.4 (Kaskaoutis et al., 2019).

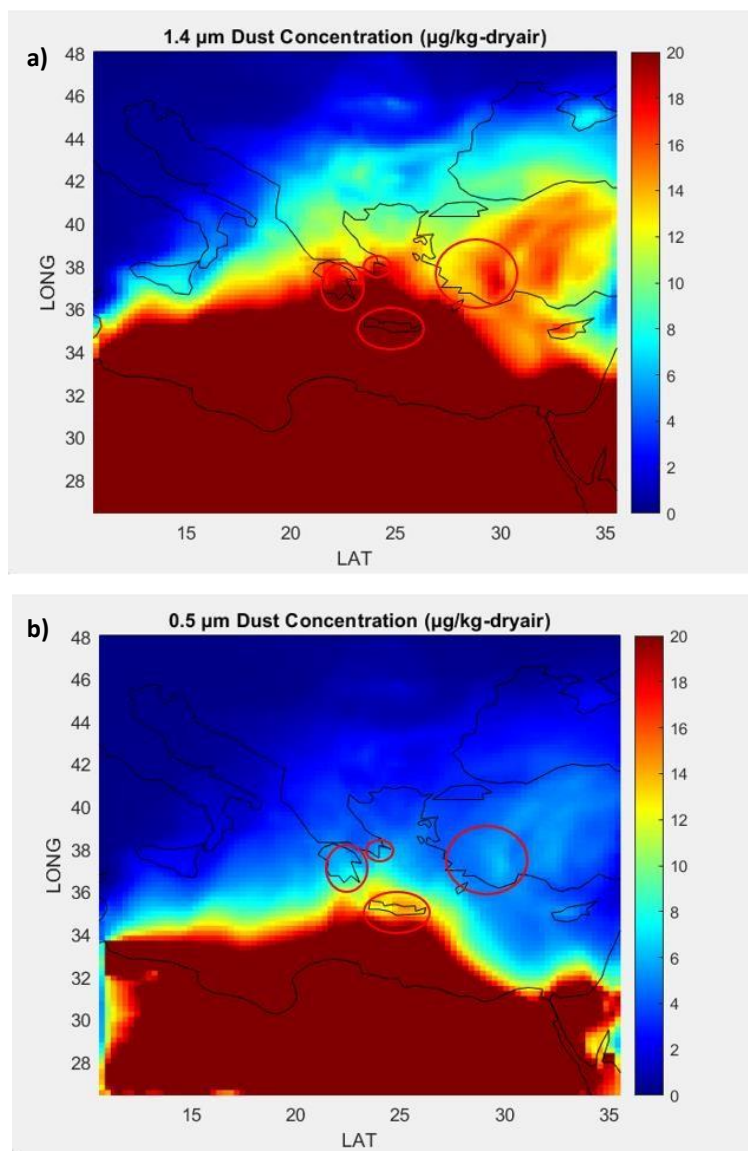
Η χωρική κατανομή της συγκέντρωσης σκόνης στην επιφάνεια μέσω του MERRA-2 (Εικόνα 4.3) συμφωνεί γενικά με τις παρατηρήσεις του MODIS (Σχήμα 4.2), αποκαλύπτοντας πολύ μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ( $> 250\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) κατά μήκος της βόρειας ακτής της Λιβύης τον Μάρτιο του 2018 σε σύγκριση με τη κλιματολογία του Μαρτίου (1980–2018). Το MERRA-2 εντοπίζει μια περιοχή υψηλής συγκέντρωσης σκόνης ( $\sim 700\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) στο βόρειο τμήμα της Λιβυκής ερήμου, που αποτελεί μια χαμηλή λεκάνη και ταιριάζει αρκετά καλά με την περιοχή προέλευσης των έντονων εισβολών σκόνης από τη Λιβύη που επηρέασαν την Ελλάδα τον Μάρτιο του 2018 (Solomos et al., 2018). Επιπλέον, η δυτική ακτή της Λιβύης δείχνει επίσης

πολύ υψηλές συγκεντρώσεις σκόνης τον Μάρτιο του 2018, σε σύγκριση με τη κλιματολογία του Μαρτίου (Kaskaoutis et al., 2019).

#### 4.2 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗΣ ΣΚΟΝΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ

Σε αυτό το σημείο παραθέτουμε τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από το μοντέλο WRF-Chem και οπτικοποιήθηκαν με χρήση της MATLAB με σκοπό να αποδείξουμε την συσχέτιση της μεταφερομένης σκόνης με τις καιρικές συνθήκες της περιοχής. Όπως αναφέρθηκε και στη Μεθοδολογία, η εκτέλεση του μοντέλου έγινε αρχικά λαμβάνοντας υπόψη τις εκπομπές της σκόνης (control run) και έπειτα χωρίς αυτές. Τα αποτελέσματα που φαίνονται παρακάτω απεικονίζουν την διαφορά μεταξύ των δυο προσομοιώσεων. Οι πέντε βασικές παράμετροι που μελετήσαμε είναι η συγκέντρωση της σκόνης, η ακτινοβολία, η θερμοκρασία, η συγκέντρωση υδρατμών, το ποσοστό νεφοκάλυψης. Κάποιες περιοχές, εμφανίζουν μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των δυο προσομοιώσεων συνεπώς συμπεραίνουμε ότι οι περιοχές αυτές επηρεάστηκαν περισσότερο από την μεταφορά σκόνης και γι' αυτό επισημαίνονται στους χάρτες εντός των κόκκινων κύκλων. Στην συνέχεια για να επιβιώσουμε την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων μας συγκρίναμε τα δεδομένα των προσομοιώσεων που μας δίνει το μοντέλο με δεδομένα επανάλυσης ERA5 για την παράμετρο της θερμοκρασίας.

Στο σχήμα 4.4 απεικονίζεται η συγκέντρωση της σκόνης για διαμέτρους (effective diameter)  $1.4\mu\text{m}$  και  $0.5\mu\text{m}$ . Επιλέχθηκαν οι μικρότερες δυνατές διάμετροι που μας παρέχει το μοντέλο καθώς έχει παρατηρηθεί ότι τα λεπτά σωματίδια είναι οπτικά πιο αποτελεσματικά ανά μονάδα μάζας από τα χονδρά σωματίδια (Ukhon et al., 2020), αυτό διότι η ξηρή εναπόθεση των σωματιδίων με μικρή διάμετρο καθυστερεί, συνεπώς έχουν περισσότερο χρόνο να αλληλεπιδράσουν με την ακτινοβολία, όπου μελετάται παρακάτω.



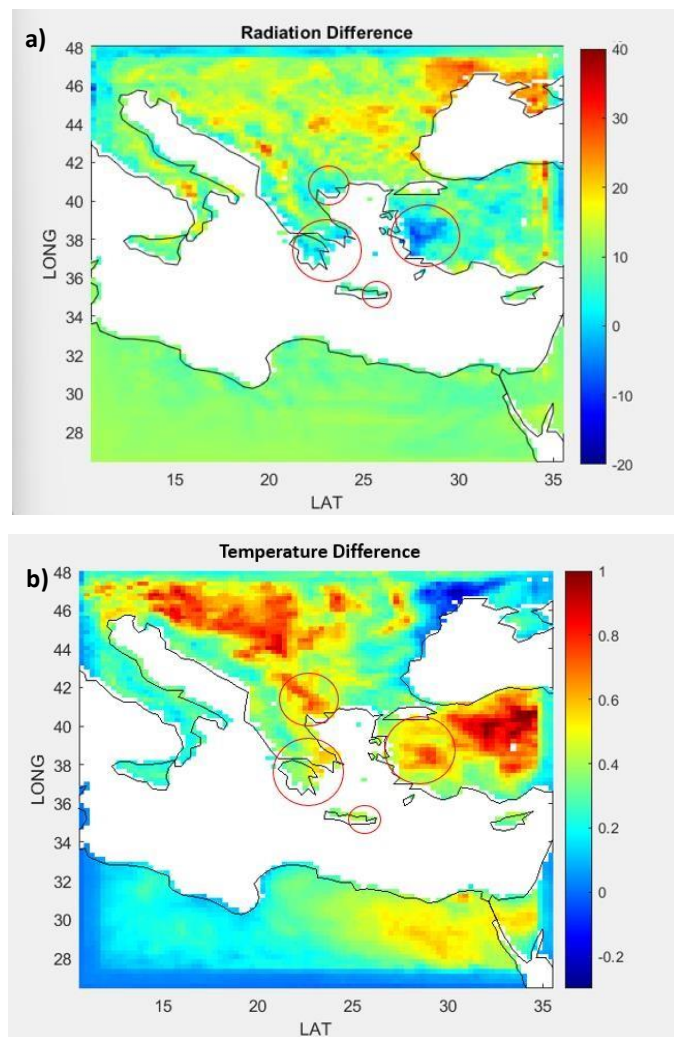
Σχήμα 4.4: Συγκέντρωση σκόνης με μέση διάμετρο α)  $1.4\mu m$  β)  $0.5\mu m$

Παρατηρούμε λοιπόν ότι το μοντέλο μας δείχνει την πορεία την σκόνης από την Σαχάρα προς την ανατολική Μεσόγειο με νοτιοδυτική κατεύθυνση όπως είδαμε και παραπάνω από πραγματικές παρατηρήσεις για τον Μάρτιο του 2018. Εντός των κόκκινων κύκλων φαίνονται κάποιες περιοχές που εμφανίζουν υψηλές συγκεντρώσεις σκόνης και αξίζει να μελετηθούν περισσότερο στη συνέχεια.

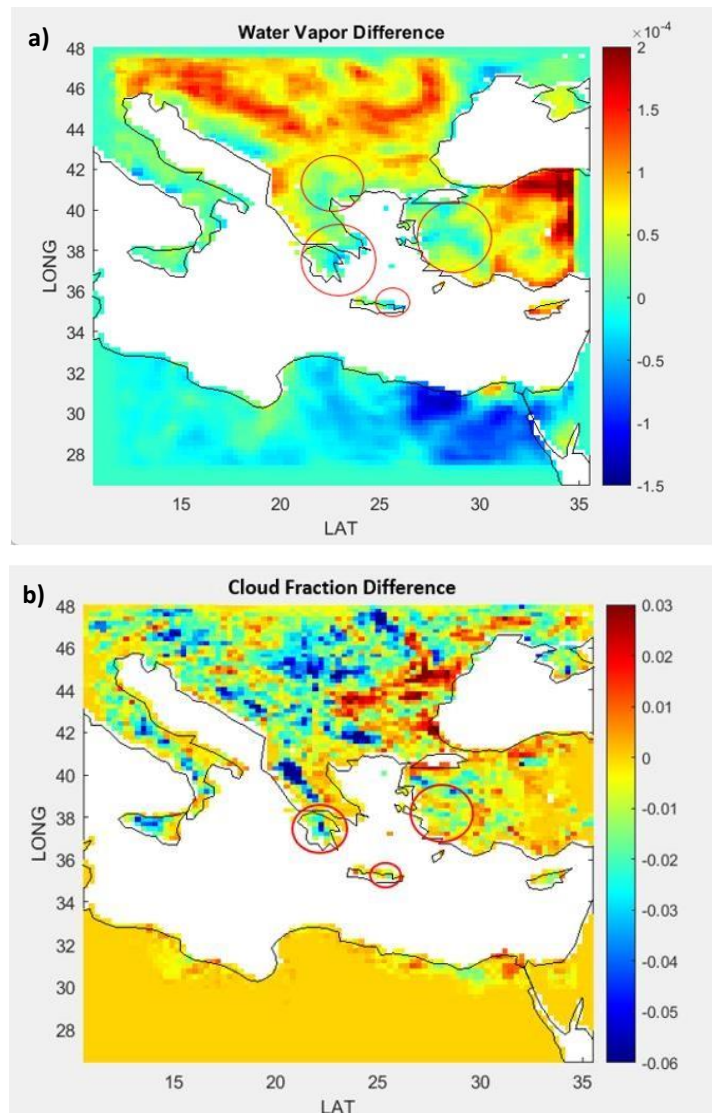
Στα Σχήματα 4.5, 4.6 τα σημεία εντός των κόκκινων κύκλων είναι οι περιοχές που φαίνεται να έχουν επηρεαστεί περισσότερο από το επεισόδιο σκόνης (Πελοπόννησος, Αττική, Δυτική



Τουρκία, Κεντρική Μακεδονία και Ανατολική Κρήτη) και εμφανίζουν μεγαλύτερη διαφορά στις προσομοιώσεις με και χωρίς σκόνη.



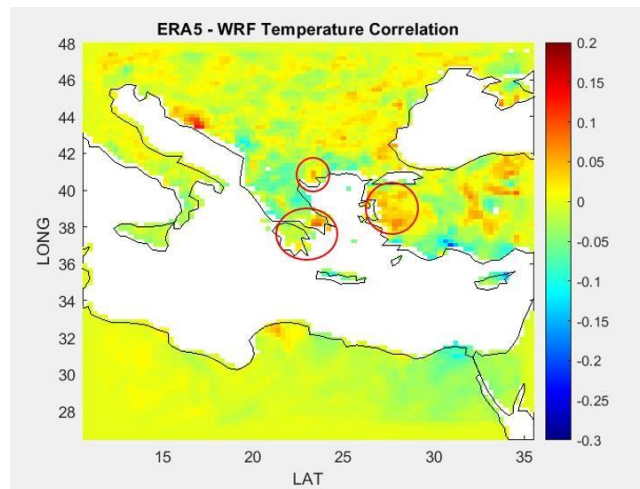
**Σχήμα 4.5:** Διαφορά ανάμεσα στις προσομοιώσεις με και χωρίς σκόνη α) της μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας στο έδαφος και b) της θερμοκρασίας στα 2m.



**Σχήμα 4.6:** Διαφορά ανάμεσα στις προσομοιώσεις με και χωρίς σκόνη α) της συγκέντρωσης των υδρατμών στην επιφάνεια και β) του ποσοστού νεφοκάλυψης για κάθε κελί του μοντέλου.

#### 4.3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Για την αξιολόγηση της θερμοκρασίας όπως αυτή προσομοιώνεται από το μοντέλο, χρησιμοποιήθηκαν ωριαία πλέγματα δεδομένων επανανάλυσης ERA5 (πηγή: Copernicus Climate Data Store) επιφανειακής θερμοκρασίας με χωρική ανάλυση  $0,25^\circ$ . Η επανανάλυση συνδυάζει δεδομένα μοντέλου με παρατηρήσεις από όλο τον κόσμο σε ένα παγκόσμιο, πλήρες και συνεπές σύνολο δεδομένων χρησιμοποιώντας τους νόμους της φυσικής, επομένως παράγει δεδομένα για αξιολόγηση μοντέλων τα οποία βασίζονται σε παρατηρήσεις, αλλά δεν έχουν κενά πάνω από οποιαδήποτε γεωγραφική περιοχή εξετάζεται.



**Σχήμα 4.8:** Συσχέτιση της θερμοκρασίας στα 2m από την επανανάλυση ERA5 και από το μοντέλο WRF-Chem ,για τα δύο σενάρια.

Από το Σχήμα 4.8 φαίνεται πως όταν χρησιμοποιούνται εκπομπές σκόνης, η προσομοίωση του WRF-Chem έχει καλύτερη επίδοση, καθώς η συσχέτιση με τα δεδομένα ERA5 γίνεται πιο ισχυρή στις περιοχές που επηρεάζονται από το πλούμιο της σκόνης. Επομένως μπορούμε να επιβεβαιώσουμε ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου υπόκεινται σε μικρό σφάλμα, καθώς και ότι η συμπερίληψη της σκόνης στο μοντέλο βελτιώνει την παραγόμενη πρόγνωση μίας μετεωρολογικής παραμέτρου κεντρικού ενδιαφέροντος (θερμοκρασίας).

## 5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα σωματίδια σκόνης κυρίως διασκορπίζουν/ανακλούν την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία μικρού κύματος και απορροφούν/εκπέμπουν την μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία της Γης, ανάλογα με το μέγεθος, το χρώμα και την ορυκτολογική σύστασή τους (Liao και Seinfeld 1998; Sokolik και Toon 1999). Οι κύριες διαδικασίες σχετικές με τη σκόνη και την ακτινοβολία μπορούν να συνοψιστούν σε δύο κατηγορίες, την άμεση και την έμμεση επίδραση της σκόνης στο κλίμα. Όπως αναφέρεται και στην ενότητα 2, η άμεση επίδραση αφορά αποκλειστικά την προσαρμογή της ακτινοβολίας λόγω της παρουσίας σκόνης (διασπορά, ανάκλαση, απορρόφηση, εκπομπή) στην ατμόσφαιρα, ενώ η έμμεση επίδραση αφορά τις αλλαγές στις ιδιότητες των νεφών (ποσοστό νεφοκάλυψης, διάρκεια ζωής των νεφών) λόγω της παρουσίας σκόνης και πώς αυτή επηρεάζει το ισοζύγιο ακτινοβολιών. Υπάρχει επίσης μια υβριδική κατηγορία που εξετάζει πώς η ημι-άμεση επίδραση της σκόνης μπορεί να καταστείλει την δημιουργία ή/και την ανάπτυξη των νεφών και κάποιες φορές μπορεί να είναι τοπικά μεγαλύτερη ακόμα και από την άμεση επίδραση της σκόνης, όπως φαίνεται να συμβαίνει στο επεισόδιο που μελετάμε.

Στο φάσμα της μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας, η άμεση επίδραση της σκόνης στην ακτινοβολία είναι πάντα θετική και ο ρόλος των σωματιδίων σκόνης είναι παρόμοιος με τον ρόλο των αερίων του θερμοκηπίου (Choobari et al. 2014). Όταν υπάρχει σκόνη, ένα τμήμα της εκπεμπόμενης από τη γη ακτινοβολίας απορροφάται, κυρίως από τα χονδρά σωματίδια σκόνης, και εκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις, συμπεριλαμβανομένης και της προς την επιφάνεια αλλά και της ανακλώμενης προς το διάστημα ως μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας. Έτσι, η ακτινοβολία που εγκαταλείπει το άνω όριο της ατμόσφαιρας μειώνεται και η εισερχόμενη ροή μεγάλου μήκους κύματος προς την επιφάνεια ακτινοβολίας αυξάνεται (Liao και Seinfeld 1998) με αποτέλεσμα να παρατηρούμε αύξηση της θερμοκρασίας κοντά στην επιφάνεια στις περιοχές που επηρεάστηκαν περισσότερο από τη σκόνη (Σχήμα 4.5b).

Έπειτα παρατηρούμε μείωση της συγκέντρωσης των υδρατμών κοντά στην επιφάνεια (Σχήμα 4.6a). Η έρευνα των Sullivan et al. (2009), έδειξε ότι η ορυκτολογική σύσταση των σωματιδίων σκόνης σε συνδυασμό με την πορεία των αντιδράσεων στις οποίες συμμετέχουν κατά την μεταφορά τους στην ατμόσφαιρα μπορούν να αυξήσουν σημαντικά την υγροσκοπικότητα τους, δηλαδή την ικανότητα απορρόφησης/προσρόφησης μορίων νερού από το περιβάλλον. Διαπιστώνουμε λοιπόν ότι η παρουσία της σκόνης δημιούργησε ξηρές συνθήκες στις περιοχές με υψηλές συγκεντρώσεις σκόνης. Επιπλέον η σκόνη μπορεί να δράσει και έμμεσα στη μείωση της υγρασίας μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας που προκάλεσε στην επιφάνεια του εδάφους μεταβάλλοντας την κυκλοφορία του αέρα τοπικά. Στις περιοχές με αυξημένη θερμοκρασία επικρατούν και υψηλότερες πιέσεις οι οποίες προκαλούν μια μεγάλης κλίμακας ανατροφοδότηση από την στεριά προς την θάλασσα, που μειώνει την μεταφορά υδρατμών (υγρασίας) στην ηπειρωτική Ελλάδα. Οι υψηλές πιέσεις συσχετίζονται με αίθριο και ξηρό καιρό, επομένως οδηγούν σε μείωση των υδρατμών (Rovithakis & Voulgarakis, 2023).

Τέλος, όπως συζητήθηκε στην Ενότητα 2, τα σωματίδια σκόνης μπορούν να τροποποιήσουν τις ιδιότητες των νεφών καθώς λειτουργούν ως πυρήνες συμπύκνωσης σύννεφου (CCN). Ωστόσο υπάρχουν αντιφάσεις μεταξύ διαφορετικών μελετών όσον αφορά στη δραστηριότητα CCN της σκόνης από τη Σαχάρα, λόγω διάφορων παραγόντων, συμπεριλαμβανομένων των αβεβαιοτήτων στην υγροσκοπικότητα και την απορρόφηση των σωματιδίων σκόνης (Smoydzin et al., 2012; Tang et al., 2016; Twohy, 2015; Twohy et al., 2009; Zhang et al., 2007). Οι Smoydzin et al. (2012) σημείωσαν ότι η σχετική συνεισφορά της σκόνης από τη Σαχάρα στον συνολικό πληθυσμό CCN είναι πιθανό να μην είναι ιδιαίτερα σημαντική σε όλες τις περιπτώσεις. Διαπιστώνουμε λοιπόν πως τα σωματίδια σκόνης στην περίπτωση που μελετάμε δεν λειτουργήσαν ως πυρήνες συμπύκνωσης νεφών (CCN). Στην συγκεκριμένη περίπτωση η απορρόφηση της ακτινοβολίας από τα σωματίδια της σκόνης φαίνεται να οδήγησε σε αύξηση της θερμοκρασίας στο επίπεδο συμπύκνωσης της ατμοσφαιράς ακολουθούμενη από εξάτμιση και συνεπώς νεφοδιάλυση (Hansen et al., 1997). Έτσι, συμπεραίνουμε ότι η περίπλοκη ημι-άμεση επίδραση (semi-direct effect) της σκόνης μπορεί να καταστείλει το σχηματισμό νεφών και κατά συνέπεια να επηρεάσει το ισοζύγιο ακτινοβολιών, ανάλογα με την κατακόρυφη κατανομή της σκόνης και των νεφών, καθιστώντας το ένα πολύ ενδιαφέρον θέμα έρευνας στις μελέτες επίδρασης των αεροζόλ στο κλίμα, ειδικά αν λάβουμε υπόψη ότι σε ορισμένες τοπικές περιπτώσεις η απόλυτη τιμή της ημι-άμεσης ακτινοβολιακής επίδρασης της σκόνης μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την άμεση ακτινοβολιακή επίδραση.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αξιολογήθηκαν οι επιπτώσεις του σφοδρού επεισοδίου μεταφοράς σκόνης από τη Σαχάρα στην Ανατολική Μεσόγειο και ιδιαίτερα στην Ελλάδα που σημειώθηκαν τον Μάρτιο του 2018 στις καιρικές συνθήκες, λόγω της αλληλεπίδρασης των αιωρούμενων σωματιδίων σκόνης με τους μετεωρολογικούς μηχανισμούς της ατμόσφαιρας. Σημειώθηκαν ασυνήθιστα αυξημένες συγκεντρώσεις σκόνης σε σύγκριση με τον μέσο όρο προηγούμενων ετών που οδήγησαν στη μείωση της μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας που έφτασε στο έδαφος. Διαπιστώθηκε σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του εδάφους στις περιοχές που επηρεάστηκαν περισσότερο από τη σκόνη. Όπως αποδείχτηκε, η αύξηση αυτή οφείλεται κυρίως στην επανεκπομπή της μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας προς το έδαφος, από τα σωματίδια της σκόνης και τη συνοδευόμενη μείωση στη νεφοκάλυψη που προκάλεσε η απορρόφηση της ακτινοβολίας από τα σωματίδια. Επιπλέον παρατηρήθηκε μείωση στην συγκέντρωση των υδρατμών κατά την περίοδο του επεισοδίου η οποία οφείλεται στην συνδυασμένη επίδραση της απορρόφησης των μορίων νερού από τα σωματίδια της σκόνης και στην μεταβολή στην κυκλοφορία του αέρα που προκάλεσε η αύξηση της θερμοκρασίας στο έδαφος. Διαπιστώθηκε λοιπόν ότι για το συγκεκριμένο επεισόδιο η ημι-άμεση επίδραση της σκόνης έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην διάδοση της ακτινοβολίας και κατά συνέπεια διαμόρφωσε τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες. Η προσομοιωμένη θερμοκρασία του μοντέλου επικυρώθηκε χρησιμοποιώντας τα δεδομένα θερμοκρασίας του ERA5 για την ίδια περίοδο. Βρέθηκε ότι η χωρική συσχέτιση μεταξύ της προσομοιωμένης θερμοκρασίας και της θερμοκρασίας του ERA5 βελτιώθηκε για τις περιοχές που επηρεάστηκαν από τη σκόνη όταν συμπεριλαμβάνονταν οι εκπομπές σκόνης στην προσομοίωση. Τέλος, η συγκεκριμένη μελέτη δείχνει καθαρή δυνητική επιρροή της μεταφερόμενης σκόνης στις καιρικές συνθήκες της Ανατολικής Μεσογείου, με σημαντική συνεισφορά στην καλύτερη κατανόηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ αιωρούμενων σωματιδίων φυσικής προέλευσης και καιρικών συνθηκών για την βελτίωση των σύγχρονων μετεωρολογικών προγνώσεων.

## 7. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Όπως είναι λογικό η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αφήνει κάποια ερωτήματα αναπάντητα. Επιπλέον, μπορεί να γεννηθούν νέα ερευνητικά ζητήματα. Τα προτεινόμενα θέματα που μπορεί να απασχολήσουν μια μελλοντική έρευνα συνοψίζονται ως εξής:

- Η χρήση ενός διαφορετικού μοντέλου όπως το MM5/CMAQ θα μπορούσε να εξελίξει την έρευνα αυτή καθώς οι Yang Zhang et al. (2016), απέδειξαν ότι οι συνολικές αξιολογήσεις του WRF/Chem και η σύγκριση του με το MM5/CMAQ υποδεικνύουν ότι οι δυνατότητες του WRF/Chem είναι γενικά όχι τόσο καλές όσο του MM5/CMAQ στις μετεωρολογικές προβλέψεις, λόγω περιορισμών στα σχήματα φυσικής (physics schemes) και στις παραμετροποιήσεις. Αυτή η μελέτη εντοπίζει επίσης αρκετούς τομείς βελτίωσης για το WRF/Chem, συμπεριλαμβανομένης της ακαταλληλότητας του προεπιλεγμένου σχήματος εκπομπής σκόνης Shaw (2008).
- Τα σωματίδια σκόνης είναι πολύ αποτελεσματικά IN δηλαδή πυρήνες για τον σχηματισμό κρυστάλλου πάγου στην ατμόσφαιρα. Επομένως, η εφαρμογή ενός σχήματος πυρήνων πάγου (π.χ. το σχήμα των Barahona & Nenes (2009)) που σχετίζεται με τα σωματίδια σκόνης μπορεί να αποτελέσει μια πολύ σημαντική προσθήκη στο μοντέλο WRF-Chem.
- Το μοντέλο GOCART θεωρεί τα σωματίδια σκόνης σφαιρικά. Η άμεση/έμμεση επίδραση των μη σφαιρικών σωματιδίων σκόνης θα μπορούσε να εξεταστεί στο μέλλον



## 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ackermann, I. J., Hass, H., Memmesheimer, M., Ebel, A., Binkowski, F. S., & Shankar, U. M. A. (1998). Modal aerosol dynamics model for Europe: Development and first applications. *Atmospheric environment*.
- Albrecht, B. A. (1989). Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness. *Science*.
- Alpert, P., Neeman, B. U., & Shay-El, Y. (1990). Intermonthly variability of cyclone tracks in the Mediterranean. *Journal of Climate*.
- AR4 Climate Change 2007: Synthesis report (2007) IPCC. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/> (Accessed: 05 May 2023).
- Asthitha, M. et al. (2010) 'Modelling the chemically aged and mixed aerosols over the eastern central Atlantic Ocean – potential impacts', *Atmospheric Chemistry and Physics*.
- Atmospheric Chemistry Observations & Modeling (29 Apr, 2023). Available at: <https://www2.acom.ucar.edu/wrf-chem> (Accessed: 29 April 2023),
- Avila, A., Queralt-Mitjans, I. and Alarcón, M. (1997) 'Mineralogical composition of African dust delivered by Red Rains over northeastern Spain', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.
- Bardouki, H. et al. (2002) 'Kinetics and mechanism of the oxidation of dimethylsulfoxide (DMSO) and methanesulfinic acid (MSIA) by OH radicals in aqueous medium', *Atmospheric Environment*.
- Barahona, D., & Nenes, A. (2009). Parameterizing the competition between homogeneous and heterogeneous freezing in ice cloud formation–polydisperse ice nuclei. *Atmospheric Chemistry and Physics*.
- Barkan, J., Alpert, P., Kutiel, H., & Kishcha, P. (2005). Synoptics of dust transportation days from Africa toward Italy and central Europe. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.
- Binkowski, F. S., & Shankar, U. (1995). The regional particulate matter model: 1. Model description and preliminary results. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.
- Bonelli, P., Marcazzan, G. B., & Cereda, E. (1996). Elemental composition and air trajectories of African dust transported in Northern Italy. The impact of desert dust across the Mediterranean.
- Charlson, R.J. et al. (1991) 'Perturbation of the Northern Hemisphere radiative balance by backscattering from anthropogenic sulfate aerosols\*', *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*.
- Charlson, R.J. et al. (1992) 'Climate forcing by Anthropogenic Aerosols', *Science*.



- Chen, Y., An, J., Qu, Y., Xie, F., & Ma, S. (2023). Dust radiation effect on the weather and dust transport over the Taklimakan Desert, China. *Atmospheric Research*.
- Choobari, O. A., Zawar-Reza, P., & Sturman, A. (2014). The global distribution of mineral dust and its impacts on the climate system: A review. *Atmospheric Research*.
- Climate forcing (2018) Copernicus. Available at: <https://atmosphere.copernicus.eu/climateforcing> (Accessed: 11 May 2023).
- Copernicus Climate Data Store | Copernicus Climate Data Store. Available at: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-singlelevels?tab=form> (Accessed: 09 September 2023).
- Collaud Coen, M., Weingartner, E., Schaub, D., Hueglin, C., Corrigan, C., Henning, S., ... & Baltensperger, U. (2004). Saharan dust events at the Jungfraujoch: detection by wavelength dependence of the single scattering albedo and first climatology analysis. *Atmospheric Chemistry and Physics*.
- Dayan, U., & Lamb, D. (2005). Global and synoptic-scale weather patterns controlling wet atmospheric deposition over central Europe. *Atmospheric Environment*.
- Dayan, U., & Levy, I. (2002). Relationship between synoptic-scale atmospheric circulation and ozone concentrations over Israel. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.
- Dayan, U., Heffter, J., Miller, J., & Gutman, G. (1991). Dust intrusion events into the Mediterranean basin. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*.
- Di Sarra, A., Di Iorio, T., Cacciani, M., Fiocco, G., & Fuà, D. (2001). Saharan dust profiles measured by lidar at Lampedusa. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.
- Dockery, D. and Pope, A. (1996) 'Epidemiology of acute health effects: summary of timeseries studies', U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information.
- Dufresne, E.R., Altman, D. and Grier, D.G. (2001) 'Brownian dynamics of a sphere between parallel walls', *Europhysics Letters (EPL)*.
- D'Almeida, G.A. (1987) 'On the variability of desert aerosol radiative characteristics', *Journal of Geophysical Research*.
- Engelbrecht, J.P. (2010) 'Airborne mineral dust', *Elements*.
- Fast, J. D., Gustafson Jr, W. I., Easter, R. C., Zaveri, R. A., Barnard, J. C., Chapman, E. G., ... & Peckham, S. E. (2006). Evolution of ozone, particulates, and aerosol direct radiative forcing in the vicinity of Houston using a fully coupled meteorology-chemistry-aerosol model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.

- Ganor, E., Foner, H. A., Brenner, S., Neeman, E., & Lavi, N. (1991). The chemical composition of aerosols settling in Israel following dust storms. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*.
- Ginoux, P., Chin, M., Tegen, I., Prospero, J. M., Holben, B., Dubovik, O., & Lin, S. J. (2001). Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.
- Goudie, A.S. and Middleton, N.J. (2001) 'Saharan dust storms: Nature and consequences', *Earth-Science Reviews*.
- Grell, G. A., Peckham, S. E., Schmitz, R., McKeen, S. A., Frost, G., Skamarock, W. C., & Eder, B. (2005). Fully coupled "online" chemistry within the WRF model. *Atmospheric environment*.
- Guerzoni, S. et al. (1999) 'The role of atmospheric deposition in the biogeochemistry of the Mediterranean Sea', *Progress in Oceanography*.
- Guerzoni, S., Chester, R., Dulac, F., Herut, B., Loÿe-Pilot, M. D., Measures, C., ... & Ziveri, P. (1999). The role of atmospheric deposition in the biogeochemistry of the Mediterranean Sea. *Progress in Oceanography*.
- Guieu, C. (2002) 'Chemical characterization of the Saharan dust end-member: Some biogeochemical implications for the western Mediterranean Sea', *Journal of Geophysical Research*.
- Hansen, J., Mki Sato, and R. Ruedy (1997). "Radiative forcing and climate response." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.
- Haywood, J., Francis, P., Osborne, S., Glew, M., Loeb, N., Highwood, E., ... & Hirst, E. (2003). Radiative properties and direct radiative effect of Saharan dust measured by the C-130 aircraft during SHADE: 1. Solar spectrum. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.
- Haywood, J. M., Allan, R. P., Culverwell, I., Slingo, T., Milton, S., Edwards, J., & Clerbaux, N. (2005). "Can desert dust explain the outgoing longwave radiation anomaly over the Sahara during July 2003". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D5).
- Heinold, B. et al. (2008) 'Dust radiative feedback on Saharan boundary layer dynamics and dust mobilization', *Geophysical Research Letters*.
- Herut, B. and Krom, M. (1996) 'Atmospheric input of nutrients and dust to the SE Mediterranean', *Environmental Science and Technology Library*.
- Herut, B. et al. (2001) 'Dry atmospheric inputs of trace metals at the Mediterranean coast of Israel (Se Mediterranean): Sources and fluxes', *Atmospheric Environment*.
- Husar, R. B., Prospero, J. M., & Stowe, L. L. (1997). Characterization of tropospheric aerosols over the oceans with the NOAA advanced very high-resolution radiometer optical thickness operational product. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.
- Iacono, M. J., Delamere, J. S., Mlawer, E. J., Shephard, M. W., Clough, S. A., & Collins, W.

- D. (2008). Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.
- Junge, C.E. (1975) 'Transport mechanisms for pesticides in the atmosphere', *Pure and Applied Chemistry*.
- Kallos, G. (2009) 'African dust contributions to mean ambient PM<sub>10</sub> mass-levels across the Mediterranean Basin', *Atmospheric Environment*.
- Kallos, G. et al. (2006) 'Transatlantic Saharan dust transport: Model simulation and results', *Journal of Geophysical Research*.
- Kallos, G. et al. (2007) 'Long-range transport of anthropogenically and naturally produced particulate matter in the Mediterranean and North Atlantic: Current State of Knowledge', *Journal of Applied Meteorology and Climatology*.
- Kallos, G., Kassomenos, P., & Pielke, R. A. (1993). Synoptic and mesoscale weather conditions during air pollution episodes in Athens, Greece. *Transport and Diffusion in Turbulent Fields: Modeling and Measurement Techniques*.
- Kallos, G., Kotroni, V., Lagouvardos, K., & Papadopoulos, A. (1998). On the long-range transport of air pollutants from Europe to Africa. *Geophysical Research Letters*.
- Kandler, K. et al. (2007) 'Chemical composition and complex refractive index of Saharan mineral dust at Izaña, Tenerife (Spain) derived by electron microscopy', *Atmospheric Environment*.
- Kaskaoutis, D. G., et al (2019). "Atmospheric dynamics associated with exceptionally dusty conditions over the eastern Mediterranean and Greece in March 2018." *Atmospheric Research*.
- Knippertz, P. et al. (2007) 'Dust mobilization due to density currents in the Atlas Region: Observations from the Saharan Mineral Dust Experiment 2006 field campaign', *Journal of Geophysical Research*.
- Konsta, D.; Tsekeri, A.; Solomos, S.; Siomos, N.; Gialitaki, A.; Tetoni, E.; Lopatin, A.; Goloub, P.; Dubovik, O.; Amiridis, V.; et al (2021). The Potential of GRASP/GARRLiC Retrievals for Dust Aerosol Model Evaluation: Case Study during the PreTECT Campaign. *Remote Sens.* 2021.
- Kubilay, N. et al. (2000) 'An illustration of the transport and deposition of mineral dust onto the Eastern Mediterranean', *Atmospheric Environment*.
- Kubilay, N., Nickovic, S., Moulin, C., & Dulac, F. (2000). An illustration of the transport and deposition of mineral dust onto the eastern Mediterranean. *Atmospheric Environment*.
- Levin, M.A. and Wen, X.-G. (2005) 'String-net condensation: A physical mechanism for topological phases', *Physical Review B*.

- Liao, H. and Seinfeld, J.H. (1998) 'Radiative forcing by mineral dust aerosols: Sensitivity to key variables', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. Luria, M., Peleg, M., Sharf, G., Tov-Alper, D. S., Spitz, N., Ben Ami, Y., ... & Seter, I. (1996). Atmospheric sulfur over the east Mediterranean region. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.
- Maheras, P. et al. (1999) 'Warm and cold monthly anomalies across the Mediterranean Basin and their relationship with circulation; 1860-1990', *International Journal of Climatology*.
- Meloni, D., Di Sarra, A., Biavati, G., DeLuisi, J. J., Monteleone, F., Pace, G., ... & Sferlazzo, D. M. (2007). Seasonal behavior of Saharan dust events at the Mediterranean island of Lampedusa in the period 1999–2005. *Atmospheric Environment*, 41(14), 3041-3056.
- Metaxas, D. A., & CC, R. (1977). EVAPORATION IN THE MEDITERRANEAN.
- Middleton, N. J., & Goudie, A. S. (2001). Saharan dust: sources and trajectories. *Transactions of the Institute of British Geographers*.
- Miller, R.L., Tegen, I. and Perlwitz, J. (2004) 'Surface radiative forcing by soil dust aerosols and the hydrologic cycle', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.
- Mishra, V.K. and Tripathi, B.D. (2008) 'Concurrent removal and accumulation of heavy metals by the three aquatic macrophytes', *Bioresource Technology*.
- Mitsakou, C. et al. (2008) 'Saharan dust levels in Greece and received inhalation doses', *Atmospheric Chemistry and Physics*.
- Monteiro, A., Basart, S., Kazadzis, S., Votsis, A., Gkikas, A., Vandenbussche, S., ... & Nickovic, S. (2022). Multi-sectoral impact assessment of an extreme African dust episode in the Eastern Mediterranean in March 2018. *Science of The Total Environment*.
- Moulin, C. et al. (1997) 'Control of atmospheric export of dust from North Africa by the North Atlantic Oscillation', *Nature*.
- Nanoscale and Microscale Research Center (2017) The University of Nottingham. Available at: <https://www.nottingham.ac.uk/nmrc/index.aspx> (Accessed: 27 July 2023).
- National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce. (2015). NCEP GDAS/FNL 0.25 Degree Global Tropospheric Analyses and Forecast Grids (Updated daily) [Dataset]. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. <https://doi.org/10.5065/D65Q4T4Z>. (Accessed 29 April 2023).
- NASA Technical Reports Server (NTRS) NASA. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/> (Accessed: 29 August 2023).
- Nickling, W.G. and Gillies, J.A. (1993) 'Dust emission and transport in Mali, West Africa', *Sedimentology*.
- Nickovic, S. et al. (2001) 'A model for prediction of desert dust cycle in the atmosphere', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.

- Özsoy, E., Kubilay, N., Nickovic, S., & Moulin, C. (2001). A hemispheric dust storm affecting the Atlantic and Mediterranean in April 1994: Analyses, modeling, ground-based measurements and satellite observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.
- Paerl, H.W. (1997) 'Coastal eutrophication and harmful algal blooms: Importance of atmospheric deposition and groundwater as "new" nitrogen and other nutrient sources', *Limnology and Oceanography*.
- Pandithurai, G. et al. (2008) 'Aerosol radiative forcing during dust events over New Delhi, India', *Journal of Geophysical Research*.
- Papadopoulos, A. et al. (2002) 'The Weather Forecasting System for poseidon - an overview', *Journal of Atmospheric & Ocean Science*.
- Papayannis, A. et al. (2009) 'Systematic lidar observations of Saharan dust layers over Athens, Greece in the frame of EARLINET project (2004–2006)', *Annales Geophysicae*.
- Penner, J.E., Hegg, D. and Leaitch, R. (2001) 'Peer reviewed: Unraveling the role of aerosols in climate change', *Environmental Science & Technology*.
- Perlwitz, J., Tegen, I. and Miller, R.L. (2001) 'Interactive soil dust aerosol model in the GISS GCM: 1. sensitivity of the soil dust cycle to radiative properties of soil dust aerosols', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.
- Perry, K. D., Cahill, T. A., Eldred, R. A., Dutcher, D. D., & Gill, T. E. (1997). Long-range transport of North African dust to the eastern United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.
- Prezerakos, N. G. (1985). The northwest African depressions affecting the south Balkans. *Journal of Climatology*.
- Prospero, J.M. (1996) 'Saharan dust transport over the North Atlantic Ocean and Mediterranean: An overview', *Environmental Science and Technology Library*.
- Prospero, J.M. et al. (2002) 'Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product', *Reviews of Geophysics*.
- Pérez, C. et al. (2006) 'Interactive dust-radiation modeling: A step to improve weather forecasts', *Journal of Geophysical Research*.
- Querol, X. et al. (2009) 'African dust contributions to mean ambient PM10 mass-levels across the Mediterranean Basin', *Atmospheric Environment*.
- Radiative forcing (2022) *Encyclopædia Britannica*. Available at: <https://www.britannica.com/science/radiative-forcing> (Accessed: 10 May 2023).

- Ramanathan, V. et al. (2001) 'Aerosols, climate, and the hydrological cycle', Science.
- Ramaswamy, V. et al. (2001) 'Stratospheric temperature trends: Observations and model simulations', Reviews of Geophysics.
- Research Data Archive Available at: <https://doi.org/10.5065/D65Q4T4Z>. (Accessed: 29 April 2023).
- Rodríguez, S. et al. (2001) 'Saharan dust contributions to PM<sub>10</sub> and TSP levels in southern and eastern Spain', Atmospheric Environment.
- Rosenfeld, D. (2000) 'Suppression of rain and snow by urban and Industrial Air Pollution', Science.
- Rosenfeld, D. (2006) 'Aerosols, clouds, and climate', Science.
- Rovithakis, A. and Voulgarakis, A. (2023) *An investigation of fire emissions impacts on weather over Greece using WRF-Chem*.
- Saidou Chaibou, Abdoul Aziz, Xiaoyan Ma, and Tong Sha (2020). "Dust radiative forcing and its impact on surface energy budget over West Africa." *Scientific reports*.
- Sciare, J. et al. (2003) 'Aerosol sources and their contribution to the chemical composition of aerosols in the Eastern Mediterranean Sea during summertime', Atmospheric Chemistry and Physics.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., ... & Powers, J. G. (2008). A description of the advanced research WRF version 3. NCAR technical note.
- Smoydzin, L., Teller, A., Tost, H., Fnais, M., & Lelieveld, J. (2012). Impact of mineral dust on cloud formation in a Saharan outflow region. Atmospheric Chemistry and Physics.
- Sokolik, I. N., & Toon, O. B. (1999). Incorporation of mineralogical composition into models of the radiative properties of mineral aerosol from UV to IR wavelengths. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.
- Solomos, S. et al. (2011) 'An integrated modeling study on the effects of mineral dust and sea salt particles on clouds and precipitation', Atmospheric Chemistry and Physics.
- Solomos, S., Kalivitis, N., Mihalopoulos, N., Amiridis, V., Kouvarakis, G., Gkikas, A., ... & Marenco, F. (2018). From tropospheric folding to Khamsin and Foehn winds: How atmospheric dynamics advanced a record-breaking dust episode in Crete. Atmosphere.
- Spokes, L.J. et al. (2000) 'Nitrogen deposition to the eastern Atlantic Ocean. the importance of south-easterly flow', Tellus B: Chemical and Physical Meteorology.
- Spyrou, C. (2011) Ανάπτυξη αλγόριθμων για τον υπολογισμό των επιδράσεων των σωματιδίων φυσικής προέλευσης στη διάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας και στο ενεργειακό ισοζύγιο.



- Spyrou, C. et al. (2010) ‘An improved limited area model for describing the dust cycle in the atmosphere’, *Journal of Geophysical Research*.
- Sullivan, R. C., Moore, M. J. K., Petters, M. D., Kreidenweis, S. M., Roberts, G. C., & Prather, K. A. (2009). Effect of chemical mixing state on the hygroscopicity and cloud nucleation properties of calcium mineral dust particles. *Atmospheric Chemistry and Physics*.
- Sultan, B. et al. (2005) ‘Climate drives the meningitis epidemics onset in West Africa’, *PLoS Medicine*.
- Tang, M., Cziczo, D. J., & Grassian, V. H. (2016). Interactions of water with mineral dust aerosol: water adsorption, hygroscopicity, cloud condensation, and ice nucleation. *Chemical reviews*.
- The National Archives (2022) The National Archives, UK Government Web Archive. Available at: <https://www.nationalarchives.gov.uk/webarchive/> (Accessed: 27 July 2023).
- Tsarpalis, K. (2021). *Desert dust interactions with the atmospheric environment: the dust aerosols' role on cloud nucleation and precipitation* (Doctoral dissertation, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο. Σχολή Περιβάλλοντος, Γεωγραφίας και Εφαρμοσμένων Οικονομικών. Τμήμα Γεωγραφίας).
- Tsikerdekis, A. (2017). Study of dust aerosol-Climate interactions using a regional climate model. *Προ/Μεταπτυχιακές Διατριβές στη Βιβλιοθήκη Θεόφραστος του Τμήματος Γεωλογίας του ΑΠΘ*.
- Twohy, C. H. (2015). Measurements of Saharan dust in convective clouds over the tropical eastern Atlantic Ocean. *Journal of the Atmospheric Sciences*.
- Twohy, C. H., Kreidenweis, S. M., Eidhammer, T., Browell, E. V., Heymsfield, A. J., Bansemer, A. R., ... & Van Den Heever, S. C. (2009). Saharan dust particles nucleate droplets in eastern Atlantic clouds. *Geophysical Research Letters*.
- Twomey, S. (1977). The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds. *Journal of the atmospheric sciences*.
- Twomey, S. (1974) ‘Pollution and the planetary albedo’, *Atmospheric Environment* (1967).
- Ukhov, A., Ahmadov, R., Grell, G., & Stenchikov, G. (2020). Improving dust simulations in WRF-Chem model v4. 1.3 coupled with GOCART aerosol module. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2020, 1-30.
- Varlas, G., Katsafados, P., & Papadopoulos, A. (2017). Temperature Seasonal Predictability of the WRF Model. In *Perspectives on Atmospheric Sciences*. Springer International Publishing.

- Washington, R. et al. (2003) ‘Dust-storm source areas determined by the total ozone monitoring spectrometer and Surface Observations’, *Annals of the Association of American Geographers*.
- Weather information - framed version*. Available at: <https://www.atmos.washington.edu/data/> (Accessed: 29 August 2023).
- Zender, C.S. (2003) ‘Mineral Dust Entrainment and deposition (dead) model: Description and 1990s dust climatology’, *Journal of Geophysical Research*.
- Zhang, Y., Zhang, X., Wang, L., Zhang, Q., Duan, F., & He, K. (2016). Application of WRF/Chem over East Asia: Part I. Model evaluation and intercomparison with MM5/CMAQ. *Atmospheric Environment*.
- Zhao, C., Liu, X., Leung, L. R., Johnson, B., McFarlane, S. A., Gustafson Jr, W. I., ... & Easter, R. (2010). The spatial distribution of mineral dust and its shortwave radiative forcing over North Africa: modeling sensitivities to dust emissions and aerosol size treatments. *Atmospheric Chemistry and Physics*.
- EMY, Εθνική Μετεωρολογική υπηρεσία ΑΚΡΑΙΑ ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΓΕΓΟΝΟΤΑ(2018). Available at: [http://www.emy.gr/emyl/climatology/climatology\\_extreme](http://www.emy.gr/emyl/climatology/climatology_extreme) (Accessed: 06 June 2023).