

ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ & ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ

Προσομοίωση της Μεταφοράς της Σαχάριας Σκόνης στη Ανατολική Μεσόγειο Θάλασσα και την Κύπρο

Μεταπτυχιακή εργασία

Νεφέλη Μακρυγιάννη

Αθήνα, 2017

ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ & ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Κατσαφάδος Πέτρος (Επιβλέπων)

Επίκουρος Καθηγητής, Γεωγραφία, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Αρτελάρης Παναγιώτης

Λέκτορας, Γεωγραφία, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Παπαδόπουλος Αναστάσιος

Διευθυντής Ερευνών, Ινστιτούτο Θαλάσσιας Βιολογίας και εσωτερικών Υδάτων Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ)

Αθήνα, 2017

Η Μακρυγιάννη Νεφέλη

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

1) Είμαι ο κάτοχος των πνευματικών δικαιωμάτων της πρωτότυπης αυτής εργασίας και από όσο γνωρίζω η εργασία μου δε συκοφαντεί πρόσωπα, ούτε προσβάλει τα πνευματικά δικαιώματα τρίτων.

2) Αποδέχομαι ότι η ΒΚΠ μπορεί, χωρίς να αλλάξει το περιεχόμενο της εργασίας μου, να τη διαθέσει σε ηλεκτρονική μορφή μέσα από τη ψηφιακή Βιβλιοθήκη της, να την αντιγράψει σε οποιοδήποτε μέσο ή/και σε οποιοδήποτε μορφότυπο καθώς και να κρατά περισσότερα από ένα αντίγραφα για λόγους συντήρησης και ασφάλειας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο τμήμα Γεωγραφίας του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου και υπεύθυνο της διπλωματικής μου κ. Κατσαφάδο Πέτρο καθώς με εμπιστεύτηκε για ακόμη μία φορά και μου ανέθεσε τη συγκεκριμένη εργασία. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για όλη τη βοήθεια του σε ότι και αν χρειάστηκα τόσο για την εργασία, αλλά και για τη συνέχεια της πορείας μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Τσαρπαλή Κωνσταντίνο για την καθοδήγησή, την απίστευτη υπομονή του και τον χρόνο που μου διέθεσε, ώστε να μάθω το μοντέλο.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω το κ. Πικριδά Μιχάλη, από το Ινστιτούτο της Κύπρου, για τη βοήθεια του στην εύρεση των δεδομένων που υποστηρίζουν τη συγκεκριμένη εργασία.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους στενούς μου φίλους, ιδιαίτερα την Νάνση Τομπολίδη, για τη συμπαράσταση και την ψυχολογική υποστήριξη που μου πρόσφεραν καθ' όλη τη διάρκεια της υλοποίησης της διπλωματικής μου εργασίας, καθώς και για τη βοήθεια τους κατά διόρθωση της.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ 4
Περίληψη στα Ελληνικά 7
Abstract 8
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ 9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ 10
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΧΑΡΤΩΝ 11
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ 12
ΕΙΣΑΓΩΓΗ 14
ΚΕΦ.1: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση 17
ΚΕΦ.2: Η σκόνη φυσικής προέλευσης και η μεταφορά της στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον. 22
2.1 Σωματίδια PM2,5 και PM10 22
2.2. Τρόποι Μετακίνησης της Σκόνης 24
2.3. Σκόνη Φυσικής Προέλευσης και Ατμοσφαιρικές Συνθήκες 26
2.4. Κύριες Πηγές Σκόνης Φυσικής Προέλευσης και Εποχικότητα 27
2.5. Άνεμος και Τύρβη 29
2.6. Ταχύτητα Τριβής 30
2.7. Εξίσωση Διάχυσης 31
2.8. Διασπορά Σκόνης 31
2.9. Ξηρή Εναπόθεση της Σκόνης 35
2.10. Το μοντέλο WRF 35
2.10.1. Κύρια χαρακτηριστικά του συστήματος ARW 37
2.10.2 Διέπουσες εξισώσεις 38
2.10.2.1 Κάθετη συντεταγμένη και μεταβλητές 38
2.10.2.2 Εξισώσεις ροής (flux-form) Euler 39
2.10.2.3 Εξισώσεις 40
2.10.2.4 Σχήμα ενσωμάτωσης χρόνου Runge-Kutta (RK) 41
2.10.3. Το WRF-Chem 41
2.10.3.1 Το υπομοντέλο GOCART 43
2.10.4. NCL 45
ΚΕΦ.3: Μεθοδολογία και Ανάλυση Αποτελεσμάτων 46
3.1. Περίπτωση 22-25/03/2016 49
3.2. Περίπτωση 13- 15/04/2016 57
ΚΕΦ. 4^{Ο}: Επαλήθευση του Μοντέλου 66
4.1 PM10 66
4.1.1. Στατιστικές μετρήσεις 66

4.1.2. Περίπτωση 22-25/03/2016 68
4.1.3. Περίπτωση 13-15/04/2016 71
4.2 PM 2.5 74
4.2.1. Στατιστικές μετρήσεις 75
4.2.2. Περίπτωση 22-25/03/2016 76
4.2.3. Περίπτωση 13-15/04/2016 78
ΚΕΦ.5: Συμπεράσματα 81
Βιβλιογραφία 84

Περίληψη στα Ελληνικά

Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στη μελέτη της προσομοίωσης της μεταφοράς αφρικανικής σκόνης προς την Ανατολική Μεσόγειο, με κύριο ενδιαφέρον την περιοχή της Κύπρου. Η μελέτη βασίστηκε σε δυο γεγονότα μεταφοράς σκόνης, το πρώτο πραγματοποιήθηκε στις 22-25/03/2016, ενώ το δεύτερο πραγματοποιήθηκε στις 13-15/04/2016. Η μελέτη βασίστηκε σε ένα σύγχρονο ατμοσφαιρικό μοντέλο περιορισμένης περιοχής.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επαληθεύτηκαν με την βοήθεια μετρήσεων ποιότητας αέρα από επίγειους σταθμούς μέτρησης στην Κύπρο. Οι σταθμοί των οποίων εξετάστηκαν τα δεδομένα ήταν οι σταθμού της Λάρνακας, Λευκωσίας, Λεμεσού και Αγίας Μαρίνας Ξυλιάτου. Οι τρεις πρώτοι σταθμοί βρίσκονται τοποθετημένοι σε περιοχές με κυκλοφοριακό φόρτο ενώ ο τελευταίος σταθμός είναι σταθμός υποβάθρου.

Η ανάλυση έδειξε σε γενικές γραμμές το μοντέλο προσομοίωσε ικανοποιητικά τα δύο γεγονότα. Οι προβλέψεις όπως ήταν αναμενόμενο ήταν πιο κοντά στις μετρήσεις του σταθμού της Αγίας Μαρίνας. Αυτό συμβαίνει καθώς οι υπόλοιποι σταθμοί οι οποίοι βρίσκονται σε περιοχές με κυκλοφοριακό φόρτο επηρεάζονται από πολλές διαφορετικές πηγές σκόνης, με αποτέλεσμα να μη μετρούν μόνο μικροσωματίδια σκόνης φυσικής προέλευσης. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι οι σταθμοί της Λεμεσού, Λάρνακας και Λευκωσίας έδωσαν μεγαλύτερες τιμές φορτίου και συγκέντρωσης σκόνης συγκριτικά με το μοντέλο. Διαφορές στο μοντέλο και στις μετρήσεις οφείλονταν επίσης, στη αραιή οριζόντια διακριτοποίηση του μοντέλου, αλλά και στον υπολογισμό της συγκέντρωσης της σκόνης από 5 διαφορετικές ομάδες μεγέθη σωματιδίων (particle size bins) από το μοντέλο.

Λέξεις κλειδιά: Μεταφορά Σκόνης, Σαχάρα, Κύπρος, Μεσόγειος, Μοντέλο WRF-Chem

Abstract

This study focuses on the simulation of the Saharan dust advection towards the Mediterranean, with main interest in Cyprus. The analysis was based on two dust advection events, the first was in 22-25/03/2016 and the second one was in 13-15/04/2016. The study was based on a state of art local model.

Simulation results were evaluated with measurements from ground based air quality stations in Cyprus. Those stations were Nicosia, Larnaca, Limassol and Ayia Marina Xyliatou. The stations of Nicosia, Larnaca and Limassol are based in areas with traffic congestion, while Ayia Marina is background station.

The analysis show that in general the model succeeds to simulate the dust events. As it was expected Ayia Marina station has closer values to models results. That can be explained by the fact that the other tree stations are in areas with traffic congestion, so they are affected by different dust sources. That has as a result that those stations do not measure only Saharan dust, so the model seems to underestimate the intensity of the event. Other differences in the values between the stations and the model can be explained from the sparse grid points of the model and the fact that the model takes into account five different particle size bins to calculate dust concentration.

Keywords: Dust advection, Saharan, Cyprus, Mediterranean, WRF-Chem Model

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχ.1.1α,β Πρόγνωση φορτίου σκόνης (α) και συγκέντρωσης άλατος (β) από το http://meteoclima.hua.gr/..... σελ15

Σχ.2.1.1. Η ταχύτητα καθίζησης σε συνάρτηση με το μέγεθος των σωματιδίων (Κατσαφάδος&Μαυροματίδης 2015)..... σελ18

Σχ.2.2.1 Τρόποι εναπόθεση σκόνης στην ατμόσφαιρα… σελ19

Σχ.2.4.1 Κύριες πηγές σκόνης ανά περιοχή και τύπο κάλυψης γης (WMO)…σελ22

Σχ. 2.4.2. Κύριες πηγές σκόνης ανά περιοχή (NASA).....σελ22

Σχ.2.5.1 Ελάχιστες απαιτούμενες ταχύτητες ανέμου (ms -1) για τη μετακίνηση των σωματιδίων σκόνης από διαφορετικές πηγές Πηγή: Κατσαφάδος & Μαυροματίδης, 2015.....σελ23

Σχ.2.8.1 Σχηματική αναπαράσταση της μεταφοράς σκόνης. Πηγή: Κατσαφάδος

Μαυροματίδης, 2015.....σελ26

Σχ.2.8.2 Διασπορά και συνθήκες ατμοσφαιρικής ευστάθειας Πηγή: Κατσαφάδος & Μαυροματίδης, 2015.....σελ27

Σχ.2.10.1 Βασική περιγραφή συστήματος μοντέλου WRF.....σελ31

Σχ.2.10.2.1.1 Η συντεταγμένη η του μοντέλου ARW.....σελ34

Σχ.3.1. Περιοχή προσομοίωση του υπομοντέλου GOCART σελ42

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.5.1 Ελάττωση ορατότητας από αιωρούμενα σωματίδια Πηγή: Χρήστου,2009……σελ26

Πίνακας 2.8.1: Αντιστοίχιση κατηγοριών εδαφών και αργίλου, άμμου και ιλύς για την παράμετρο Mi,j Πηγή: Κατσαφάδος & Μαυρομματίδης, 2015..... σελ28

Πίνακας 3. 1: Συνοπτική περιγραφή τμήματος GOCART του WRF-Chem, Πηγή

http://meteoclima.hua.gr/ ……σελ44

Πίνακας 4.1.1.1: Στατιστικά στοιχεία επαλήθευσης του μοντέλου……σελ64

Πίνακας 4.2.1.1: Στατιστικά στοιχεία επαλήθευσης του μοντέλου……σελ72

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΧΑΡΤΩΝ

Χάρτης 3.1.1: Χάρτης γεωδυναμικού ύψους και θερμοκρασίας στα 500 hPa για τις 24/03/2016 στις 12UTC.....σελ45

Χάρτης 3.1.2: Χάρτης επιφανείας για τις 24/03/2016 στις 12 UTC Πηγή:

http://www1.wetter3.de/Archiv/archiv_ukmet.htm..... σελ46

Χάρτης 3.1.3. Ανεμολογικό καθεστώς και στροβιλισμός (vorticity) στα 850 hPa για τις 24/03/2016 στις 12 UTC Πηγή: http://www1.wetter3.de/Archiv/archiv_ukmet.html.....σελ46

Χάρτης 3.1.4: Χάρτης φορτίου σκόνης (dust load) με διεύθυνση ανέμου στα 3 km για τις 24/03/2016 στις 12UTC.....σελ48

Χάρτης 3.1.5: Χάρτης συγκέντρωσης σκόνης (dust concentration) και διεύθυνση ανέμου στα 10 m για τις 24/03/2016 στις 12UTC.....σελ 49

Χάρτης 3.1.6: Χάρτης ξηρής εναπόθεσης (dry deposition) για τις 24/03/2016 στις 12UTC.....σελ 50

Χάρτης 3.2.1:Χάρτης γεωδυναμικού ύψους και θερμοκρασίας στα 500 hPa για τις 15/04/2016 12UTC.....σελ54

Χάρτης3.2.2:Χάρτης επιφανείας για τις 15/04/2016 στις 12UTC Πηγή:http://www1.wetter3.de/Archiv/archiv_ukmet.html.....σελ55

Χάρτης 3.2.3: Ανεμολογικό καθεστώς και στροβιλισμός στα 850 hPa για τις 15/04/2016 στις 12UTC Πηγή: http://www1.wetter3.de/Archiv/archiv_ukmet.html.....σελ 55

Χάρτης 3.2.4: Χάρτης φορτίου σκόνης (dust load) για τις 15/04/2016 στις 12 UTC σελ56

Χάρτης 3.2.5: Χάρτης συγκέντρωσης σκόνης (dust concentration) για τις 15/04/2016 στις 12UTC.....σελ57

Χάρτης 3.2.6 : Χάρτης ξηρής εναπόθεσης σκόνης (dry deposition) για τις 15/04/2016 στις 12UTC.....σελ58

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διαγράμματα 3.1.1: Ιστογράμματα συγκέντρωσης σκόνης (κόκκινο) και ξηρής εναπόθεσης σκόνης (μπλε) για τις 23-25/03/2016 για την περιοχή της Λεμεσού (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)……σελ.51

Διαγράμματα 3.1.1: Ιστογράμματα συγκέντρωσης σκόνης (κόκκινο) και ξηρής εναπόθεσης σκόνης (μπλε) για τις 23-25/03/2016 για την περιοχή της Λάρνακας (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)…… σελ.51

Διαγράμματα 3.1.2: Ιστογράμματα συγκέντρωσης σκόνης (κόκκινο) και ξηρής εναπόθεσης σκόνης (μπλε) για τις 23-25/03/2016 για την περιοχή της Λευκωσίας (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)……σελ.52

Διαγράμματα 3.1.3: Ιστογράμματα συγκέντρωσης σκόνης (κόκκινο) και ξηρής εναπόθεσης σκόνης (μπλε) για τις 23-25/03/2016 για την περιοχή της Αγίας Μαρίνας (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)……..σελ.52

Διαγράμματα 3.2.1: Ιστογράμματα συγκέντρωσης σκόνης (κόκκινο) και ξηρής εναπόθεσης σκόνης (μπλε) για τις 13-15/03/2016 για την περιοχή της Λεμεσού (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)……σελ. 59

Διαγράμματα 3.2.2: Ιστογράμματα συγκέντρωσης σκόνης (κόκκινο) και ξηρής εναπόθεσης σκόνης (μπλε) για τις 13-15/03/2016 για την περιοχή της Λάρνακας (Πηγή: Ιδία επεξεργασία) ……..σελ.60

Διαγράμματα 3.2.3: Ιστογράμματα συγκέντρωσης σκόνης (κόκκινο) και ξηρής εναπόθεσης σκόνης (μπλε) για τις 13-15/03/2016 για την περιοχή της Λευκωσίας (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)……..σελ60

Διαγράμματα 3.2.4: Ιστογράμματα συγκέντρωσης σκόνης (κόκκινο) και ξηρής εναπόθεσης σκόνης (μπλε) για τις 13-15/03/2016 για την περιοχή της Λεμεσού (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)……..σελ61

Διάγραμμα 4.1.2.1 : Συγκριτικά διαγράμματα PM10 εκτιμήσεων του μοντέλου (κόκκινο)και πραγματικών μετρήσεων (μπλε) για την περιοχή της Λάρνακας για το γεγονός στις 23-25/03/2016……σελ66

Διαγράμματα 4.1.2.2: Συγκριτικά διαγράμματα PM10 εκτιμήσεων του μοντέλου (κόκκινο) και πραγματικών μετρήσεων (μπλε) για την περιοχή της Λεμεσού για το γεγονός στις 23-25/03/2016……σελ67

Διαγράμματα 4.1.2.3: Συγκριτικά διαγράμματα PM10 εκτιμήσεων του μοντέλου (κόκκινο) και πραγματικών μετρήσεων (μπλε) για την περιοχή της Αγίας Μαρίνας Ξυλιάτου για το γεγονός στις 23-25/03/2016……σελ68

Διαγράμματα 4.1.3.1: Συγκριτικά διαγράμματα PM10 εκτιμήσεων του μοντέλου (κόκκινο) και πραγματικών μετρήσεων (μπλε) για την περιοχή της Λευκωσίας για το γεγονός στις 13-15/03/2016……σελ69

Διαγράμματα 4.1.3.2: Συγκριτικά διαγράμματα PM10 εκτιμήσεων του μοντέλου (κόκκινο) και πραγματικών μετρήσεων (μπλε) για την περιοχή της Λεμεσού για το γεγονός στις 13-15/03/2016……..σελ70

Διαγράμματα 4.1.3.3: Συγκριτικά διαγράμματα PM10 εκτιμήσεων του μοντέλου (κόκκινο) και πραγματικών μετρήσεων (μπλε) για την περιοχή της Αγίας Μαρίνας Ξυλιάτου για το γεγονός στις 13-15/03/2016……σελ71

Διάγραμμα 4.2.2.1: Συγκριτικά διαγράμματα PM 2.5 εκτιμήσεων του μοντέλου (κόκκινο)και πραγματικών μετρήσεων (μπλε) για την περιοχή της Λάρνακας για το γεγονός στις 23-25/03/2016……σελ74

Διαγράμματα 4.2.2.2: Συγκριτικά διαγράμματα εκτιμήσεων του μοντέλου (κόκκινο) και πραγματικών μετρήσεων (μπλε) για την περιοχή της Αγίας Μαρίνας για το γεγονός στις 23-25/03/2016……σελ75

Διαγράμματα 4.2.3.1: Συγκριτικά διαγράμματα PM2.5 εκτιμήσεων του μοντέλου (κόκκινο) και πραγματικών μετρήσεων (μπλε) για την περιοχή της Λευκωσίας για το γεγονός στις 13-15/03/2016……σελ76

Διαγράμματα 4.2.3.2: Συγκριτικά διαγράμματα PM2.5 εκτιμήσεων του μοντέλου (κόκκινο) και πραγματικών μετρήσεων (μπλε) για την περιοχή της Αγίας Μαρίνας για το γεγονός στις 13-15/03/2016……σελ77

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα αερολύματα που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην ροή της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη Γη, ενώ παράλληλα επηρεάζουν τον υδρολογικό κύκλο. Τα αερολύματα μπορούν να αλλάξουν την ισορροπία της ακτινοβολίας στο σύστημα ατμόσφαιρας- επιφάνειας γης. Αυτό γίνεται μέσω της απορρόφησης, τη σκέδασης και της διάθλασης της εισερχόμενης ακτινοβολίας αλλά και της επανεκμπομπής της εξερχόμενης ακτινοβολίας. Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (International Panel on Climate Change-IPCC) χαρακτηρίζει τη σκόνη φυσικής προέλευσης ως σημαντική αβεβαιότητα στο κλιματικό σύστημα. Οι άμεσες αβεβαιότητες για το κλίμα σχετίζονται με το βαθμό της απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας και του παγκόσμιου ποσοστού της σκόνης στην ατμόσφαιρα. Έμμεσα αποτελέσματα της σκόνης στην ατμόσφαιρα είναι η επιρροή της στον σχηματισμό των νεφών και την βροχή. Η σκόνη φυσικής προέλευσης παράγει μεγάλα ποσοστά συγκέντρωσης των πυρήνων συμπύκνωσης των νεφών (cloud condensation nuclei-CCN), ιδιαίτερα στα μικρά εύρη μεγεθών (Xin *et al*., 2016, Perez *et al.* 2006).

Συγκεκριμένα επίπεδα φορτίου σκόνης στην ατμόσφαιρα μπορούν να επηρεάσουν και την υγεία του ανθρώπου. Κύριες ασθένειες που σχετίζονται με την ύπαρξη σκόνης στο περιβάλλον είναι οι αλλεργικές αντιδράσεις το άσθμα, η πνευμονία, τραχειίτιδα, καρδιολογικές ασθένειες κ.α. (Goudie 2014, Griffin & Kelogg 2004)

Η σκόνη φυσικής προέλευσης η οποία παράγεται από την αιολική δραστηριότητα θεωρείται σημαντική πηγή αιωρουμένων σωματιδίων (particulate matter – PM) στην ατμόσφαιρα (Κατσαφάδος και Μαυροματίδης, 2015). Το έδαφος είναι περισσότερο ευάλωτο στην αιολική διάβρωση σε ξηρές περιοχές, όπου τα σωματίδια είναι χαλαρά δεσμευμένα στην επιφάνεια λόγω της χαμηλής υγρασίας του εδάφους. Τα μεγαλύτερα σωματίδια πέφτουν κοντά στην περιοχή της πηγής, αλλά μικρότερα σωματίδια μπορούν να μεταφερθούν χιλιόμετρα μακριά από την πηγή. Σκόνη από τη Σαχάρα και την Υποσαχάρια Αφρική (Σαχέλ) έχει, τακτικά, παρατηρηθεί να διασχίζουν τον Ατλαντικό, έχοντας μεγαλύτερα ποσά κατά τη διάρκεια των ετών χαμηλής βροχόπτωσης στην πηγή (Miller & Tegen, 1998).

Στη παρούσα εργασία αναλύεται αρχικά το θεωρητικό υπόβαθρο της μεταφοράς της

σκόνης φυσικής προέλευσης στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον. Στη συνέχεια εφαρμόζεται ένα σύγχρονο ατμοσφαιρικό μοντέλο περιορισμένης περιοχής με δυνατότητα προσομοίωσης των διεργασιών απελευθέρωσης, μεταφοράς και εναπόθεσης σκόνης σε μελέτες περιπτώσεων του 2016. Η πρώτη περίπτωση σημειώθηκε στις 22-25/03/2016, ενώ η δεύτερη στις 12-15/04/2016 στην ευρύτερη περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου και ιδιαίτερα την Κύπρο. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επαληθεύτηκαν με στοιχεία από επίγειους σταθμούς μέτρησης μικροσωματιδίων στην Κύπρο.

Με βάση τα παραπάνω οι κύριοι στόχοι της συγκεκριμένης εργασίας είναι:

- Μελέτη του θεωρητικού υποβάθρου της μεταφοράς σκόνης φυσικής προέλευσης στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον.
- Η εφαρμογή ενός σύγχρονου ατμοσφαιρικού μοντέλου περιορισμένης περιοχής με δυνατότητα προσομοίωσης των διεργασιών απελευθέρωσης, μεταφοράς και εναπόθεσης της σκόνης σε επιλεγμένες μελέτες περιπτώσεων.
- Η επαλήθευση των εκτιμήσεων του μοντέλου.

Η δομή της εργασίας περιγράφεται από τα ακόλουθα κεφάλαια τα οποία προσεγγίζουν το θέμα της μελέτης.

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση, σχετικά με το θέμα της εργασίας

Το Κεφάλαιο 2 περιγράφει το θεωρητικό υπόβαθρο που θα βοηθήσει στην καλύτερη κατανόηση της εργασίας. Επίσης, γίνεται παρουσίαση του μοντέλου WRF-Chem και των σχημάτων προσομοίωσης της μεταφοράς της σκόνης που περιλαμβάνει.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά στα δεδομένα καθώς και ανάλυση της μεθοδολογίας, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται αρχικά μία παρουσίαση της συνοπτικής κατάστασης της ατμόσφαιρας, η οποία επικρατούσε τις περιόδους μελέτης.

Στο Κεφάλαιο 5 αναλύονται τα αποτελέσματα της μελέτης με τη βοήθεια των χαρτών

μεταφοράς σκόνης, καθώς και ιστογραμμάτων. Η ανάλυση γίνεται σε επίπεδο συγκέντρωσης της σκόνης, φορτίου σκόνης και ξηρής εναπόθεσης αυτής.

Στο Κεφάλαιο 6 γίνεται η επαλήθευση του μοντέλου βάση στατιστικών μεθόδων και συγκριτικών διαγραμμάτων, των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των πραγματικών μετρήσεων από επίγειους σταθμούς μέτρησης των αερίων ρύπων.

Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της μελέτης.

ΚΕΦ.1: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Βάση όλων των παραπάνω γίνεται φανερός ο λόγος που κάνει τη μελέτη και την πρόγνωση των θυελλών σκόνης ιδιαίτερα σημαντική. Για το σκοπό αυτό, οι Kallos et al. (2006) προσπάθησαν να περιγράψουν πλήρως όλες τις φάσεις του κύκλου σκόνης. Αυτό έγινε με την αξιοποίηση του ατμοσφαιρικού μοντέλου SKIRON, το οποίο αποτελείται από δύο βασικά μέρη α) το μοντέλο SKIRON/Eta για περιορισμένη περιοχή και β) το τμήμα του κύκλου σκόνης το οποίο ενσωματώνει στο μοντέλο μονάδες λήψης – μεταφοράς – εναπόθεσης σκόνης. Στόχος ήταν να αξιολογηθεί ποσοτικά η πρόβλεψη του κύκλου της σκόνης για μεγάλο χρονικό διάστημα (Ιούνιο – Ιούλιο 1993) για μεταφορά από τη Σαχάρα προς τον Ατλαντικό Ωκεανό και τη Μεσόγειο Θάλασσα. Η σύγκριση των προβλέψεων με τις διαθέσιμες παρατηρήσεις έδειξαν ότι το μοντέλο βρίσκεται σε θέση να προσομοιώνει πρότυπα μεταφοράς σκόνης μακροπρόθεσμα, αλλά κυρίως εκτιμά τη χωροχρονική κατανομή της συγκέντρωσης της σκόνης ικανοποιητικά. Αντίστοιχα, ο Dulam (2005) ανέλυσε την πιθανότητα πρόβλεψης αμμοθύελας στη Μογγολία. Η επαλήθευση των προβλέψεων πιθανότητας αμμοθύελας παρουσίασε ακρίβεια από 72,2% έως 79,9%.

Οι Shao et al. (2003) χρησιμοποιώντας ένα ολοκληρωμένο σύστημα μοντελοποίησης αιολικής διάβρωσης ασχολήθηκαν με την ποσοτική πρόβλεψη ανεμοθύελλας σε πραγματικό χρόνο για 24-, 48-, 72- ωρη πρόβλεψη στη βορειοανατολική Ασία για γεγονότα σκόνης τον Μάρτιο και τον Απρίλιο του 2002. Οι προβλέψεις αξιολογήθηκαν βάση συνοπτικών παρατηρήσεων και μετρήσεων από το μετεωρολογικό δίκτυο 12 σταθμών στην Κίνα, την Ιαπωνία και τη Κορέα. Οι προβλέψεις τόσο χωρικά όσο και στη χρονική εξέλιξη των γεγονότων σκόνης, καθώς και οι προβλέψεις συγκέντρωσης σκόνης κοντά στην επιφάνεια βρέθηκε να συμφωνούν καλά με τις παρατηρήσεις.

Το μοντέλο BSC-DREAM8b και ο προκάτοχος του αναλύθηκαν για το 2004 πάνω από τη βόρεια Αφρική τη Μεσόγειο και την Μέση Ανατολή (Basart et al. 2012). Τα αποτελέσματα αξιολογήθηκαν χρησιμοποιώντας δεδομένα από 44 σταθμούς AERONET και δορυφορικές παρατηρήσεις. Οι επιχειρησιακές εκδόσεις υποτιμούσαν έντονα το χειμερινό Οπτικό Βάθος Αερολυμμάτων (Aerosol Optical Depth - AOD) πάνω από τη Μέση Ανατολή και τη Μεσόγειο. Η χρήση πιο λεπτομερούς κατανομής μεγέθους και μία διορθωμένη αναλογία ξηρής και υγρής εναπόθεσης βελτίωσε τον

εντοπισμό των κύριων πηγών της Βόρειας Αφρικής και κατά συνέπεια τη μεταφορά σκόνης προς την Ευρώπη και τον Ατλαντικό. Τέλος, με τη χρήση μίας βάσης δεδομένων για την υφή του εδάφους η συγκεκριμένη εργασία οδήγησε σε σημαντικές βελτιώσεις όσο αναφορά τη μεταφορά των εκπομπών από τη Σαχέλ.

Οι Huag et al. (2013) κατάφεραν να προβλέψουν μεγάλης κλίμακας περίπτωση μεταφοράς σκόνης. Αυτό έγινε συνδυάζοντας ένα μοντέλο σκόνης (Eta-8bin) που εκτελεί γρήγορα πρόβλεψη με χαμηλή ανάλυση (22km), για τον εντοπισμό των περιοχών με υψηλή συγκέντρωση σκόνης, και ένα λεπτότερο, μη υδροστατικό, μέσης κλίμακας μοντέλο (NMM-dust) που εκτελεί πρόβλεψη υψηλής ανάλυσης (3km) σε περιορισμένη περιοχή.

Σε εργασία τους οι Barnum et al. (2004) χρησιμοποιώντας ένα επιχειρησιακό μοντέλο σε συνδυασμό με ένα 5η γενιάς Penn State Mesoscale Meteorology Model (CARMA-dust model και MM5 αντίστοιχα) θέλησαν να προβλέψουν ανεμοθύελλες στην Βόρεια Αφρική, τη Μέση Ανατολή και τη Νοτιοδυτική Ασία. Επιχειρώντας, λοιπόν, μια 60 ημερών αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του μοντέλου θέλησαν να φτιάξουν μία βραχυπρόθεσμη, μεσοπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη (εύρος 72 ωρών) πρόβλεψη ανεμοθύελλας. Η μελέτη συνδύασε δορυφορικά δεδομένα με επίγειες παρατηρήσεις, ώστε να ελεγχθεί η αξιοπιστία του μοντέλου, χρησιμοποιώντας βασικές μετεωρολογικές στατιστικές. Επιπλέον, κάθε μία από τις κύριες περιοχές πρόβλεψης χωρίστηκαν σε μικρότερες περιοχές για λεπτομερέστερη ανάλυση. Η μελέτη διαπίστωσε ότι η πρόβλεψη του μοντέλου για τη Βόρειο Αφρική είναι αποτελεσματική, με πιθανότητα ανίχνευσης σκόνης 68% και ποσοστό σφάλματος στο 16%. Στη Νότια Ασία οι προβλέψεις δείχνουν πιθανότητα ανίχνευσης στο 61% με το ποσοστό του σφάλματος να είναι 10% κατά μέσο όρο.

Οι Samadi et al. (2014) αναγνώρισαν και μελέτησαν 20 γεγονότα σκόνης που συνέβησαν στο δυτικό τμήμα του Ιράν, κατά τη διάρκεια των ετών 2000-2011. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποίησαν δορυφορικές εικόνες από τον αισθητήρα MODIS και αναπτύσσοντας ένα μοντέλο που βασίζεται στην ανάκλαση και τις θερμικές υπέρυθρες ζώνες. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου ελέγχθηκε με τη χρήση γεγονότων σκόνης. Τα αποτελέσματα έδειξαν καλή απόδοση σε όλες τις περιπτώσεις.

Την ίδια χρονιά οι Kumar et al. ανέλυσαν την επίπτωση της εκδήλωσης τυπικής ανεμοθύελλας στην περίοδο πριν από την εποχή των μουσώνων. Επιπλέον, αναλύθηκε και υπολογίστηκε η ηλιακή ακτινοβολία στη Βόρεια Ινδία. Η περίπτωση μελέτης μεταφοράς σκόνης την περίοδο 17-22 Απριλίου του 2010 προσομοιώθηκε με το μοντέλο WRF-Chem, το εκτίμησε συνολική εκπομπή σκόνης 7,5Tg πάνω από την περιοχή μελέτης. Από την άλλη τόσο το AERONET όσο και οι δορυφορικές εικόνες έδειξαν την περίοδο αυτή σημαντική αύξηση (>50%) σε περιφερειακή κλίμακα και μείωση (>70%) στον δείκτη Ångström. Επίσης, εκτιμήθηκε ότι οι επιπτώσεις στο ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας θα είναι μικρές σε περιφερειακό επίπεδο αλλά σημαντικές σε τοπικό επίπεδο.

Σε μελέτη τους οι Wong et al. (2015) ανέπτυξαν μία μέθοδο για την ανίχνευση επεισοδίων σκόνης, συνδυάζοντας παρατηρήσεις από επίγειο σταθμό (συγκεντρώσεις PM10, δεδομένα AERONET), εικόνων γεωστατικών δορυφορικών (MSAT), την αριθμητική πρόγνωση καιρού και τις κλιματικές προγνώσεις του μοντέλου WRF-Chem. Η μέθοδος βασίζεται σε ένα υβριδικό Neural Network (NN) μοντέλο ανάκτησης για δύο κλίμακες: α) ένα μοντέλο NN για σχεδόν πραγματικό χρόνο ανίχνευσης της θύελλας σε ευρεία περιφερειακή κλίμακα και β) ένα NN μοντέλο για λεπτομερή χαρτογράφηση για το Χονγκ Κονγκ και την Ταϊβάν. Η ακρίβεια στον άμεσο εντοπισμό σε σχεδόν πραγματικό χρόνο ήταν 96,6%, ενώ για τη λεπτομερή χαρτογράφηση του Χονγκ Κονγκ και της Ταϊβάν ήταν 74,8%.

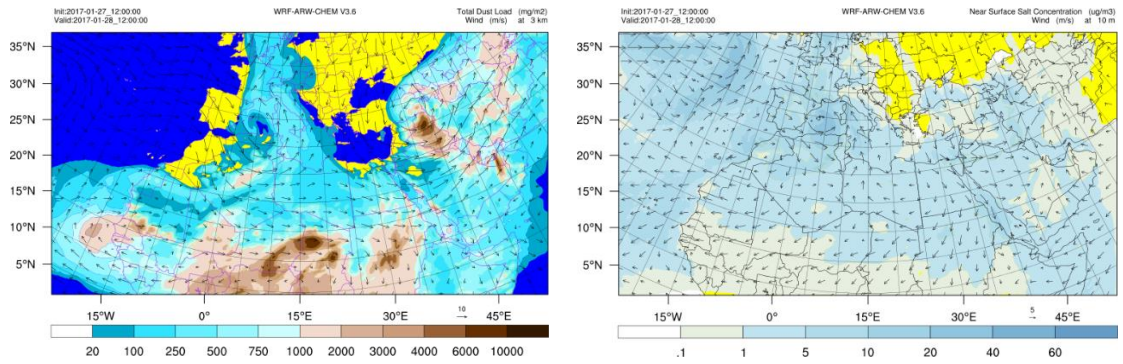
Σε παρόμοια μελέτη για τη Σαουδική Αραβία οι Zhang et al. (2015) έλεγξαν την αποτελεσματικότητα του WRF-Chem επιλύοντας το σε 21,6 και 7,2 χιλιόμετρα πάνω από την περιοχή μελέτης, προσομοιώνοντας μία ακραία περίπτωση ανεμοθύελλας που συνέβη τον Μάρτιο του 2009. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με τις παρατηρήσεις από το AERONET και τις μετρήσεις του MODIS φάνηκε ότι το μοντέλο WRF-Chem προσομοιώνει ικανοποιητικά την άφιξη, εξέλιξη και χωρική κατανομή της σκόνης πάνω από τη Σαουδική Αραβία, κυρίως στην ανάλυση των 7,2 χιλιομέτρων.

Σε άλλες εργασίες οι Bian et al. (2011) ανέλυσαν μία περίπτωση ισχυρής μεταφοράς σκόνης στην Κίνα την περίοδο 20-22 Μαρτίου 2010. Η ανάλυση έγινε με τη βοήθεια του μοντέλου WRF-dust . Και σε αυτήν την περίπτωση το μοντέλο κρίθηκε ως χρήσιμο εργαλείο για την ανάλυση των σημαντικών περιπτώσεων μεταφοράς σκόνης. Στο ίδιο

αποτέλεσμα κατέληξαν και οι Chen etl al. (2013), οι οποίοι είχαν ως πεδίο μελέτης το Υψίπεδο του Θιβέτ το καλοκαίρι του 2006. Οι Alizadeh-Choobari et al. το 2014 χρησιμοποίησαν το μοντέλο WRF- Chem για να προσομοιώσουν την ανεμοθύελλα που δημιουργείται κατά τις γνωστές ως "120 μέρες ανέμου" στο Ιράν και το Δυτικό Αφγανιστάν. Την ίδια χρονιά οι Roberts & Knippertz προσδιόρισαν τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που είναι υπεύθυνες για την δημιουργία μέσης κλίμακας συστημάτων κατακόρυφης ανάπτυξης και εξέτασαν τους μηχανισμούς για τον προσδιορισμό των διαδικασιών εναπόθεσης της σκόνης.

Λόγω της σημαντικότητας του φαινομένου της μεταφοράς της σκόνης πολλά είναι τα προγράμματα παροχής πρόγνωσης της ποιότητας του αέρα. Το 2007 το πρόγραμμα SDS-WAS (Sand and Dust Warning Advisory and Assessment System) καθιερώθηκε από το Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό (World Meteorological Organization - WMO) για να βελτιωθούν οι δυνατότητες πρόβλεψης και προειδοποίησης ανεμοθύελλας, ώστε να μειωθούν οι κίνδυνοι που μπορούν να προκληθούν σε διάφορους τομείς. Σήμερα, πάνω από 15 οργανισμοί παρέχουν καθημερινά προγνώσεις σκόνης σε διαφορετικές περιοχές. Για την υποστήριξη του προγράμματος υπάρχουν εγκατεστημένοι δύο κόμβοι α) ένας για την περιοχή της Βορείου Αφρικής- Μέσης Ανατολής- Ευρώπης (ο οποίος βρίσκεται στην Ισπανία) και β) ένας για την περιοχή της Ασίας (ο οποίος βρίσκεται στην Κίνα). Η αποστολή του προγράμματος SDS-WAS είναι η ολοκληρωμένη, συντονισμένη και σταθερή παρατήρηση και μοντελοποίηση των ανεμοθύελλων με στόχο την καλύτερη κατανόηση των διεργασιών του κύκλου της σκόνης
(https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/Sand_and_Dust_Storm.html).

Στην Ελλάδα γίνεται χρήση του μοντέλου WRF-Chem v.3.6 από το τμήμα Γεωγραφία του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου από τον Ιούλιο του 2014. Το μοντέλο παράγει μια 72-ωρη (τριήμερη) πρόβλεψη σκόνης (τη συγκέντρωση σκόνης κοντά στην επιφάνεια, το συνολικό φορτίο σκόνης και τη ξηρή εναπόθεση) που καλύπτει την περιοχή της Βορείου Αφρικής, της Μέσης Ανατολής και τη Χερσόνησο της Σαουδικής Αραβίας. Μέσα από τη σελίδα του http://meteoclima.hua.gr/ υπάρχει καθημερινή ενημέρωση (ανά τρεις ώρες) του ποσού σκόνης στην ατμόσφαιρα της περιοχής μελέτης.



α *β*

Σχήμα 1.1 α,β: Πρόγνωση φορτίου σκόνης (α) και συγκέντρωσης άλατος (β) (Πηγή: http://meteoclima.hua.gr/)

ΚΕΦ.2: Η σκόνη φυσικής προέλευσης και η μεταφορά της στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον.

2.1 Σωματίδια PM2,5 και PM10

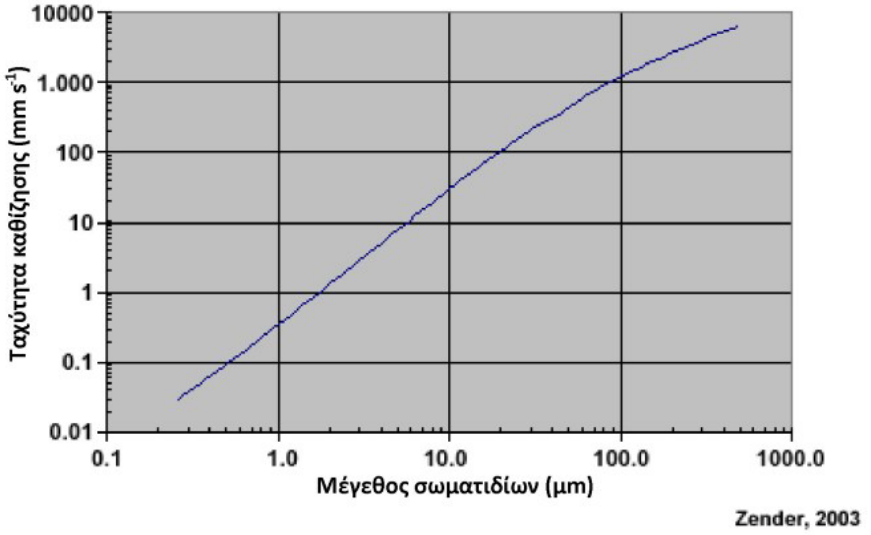
Η σκόνη κατατάσσεται σε μία από τις τρεις βασικές κατηγορίες αερολυμάτων: α) αερολύματα από ερημικές ή ηπειρωτικές περιοχές, β) βιομηχανικά αερολύματα και γ) ηφαιστειακά αερολύματα. Τα σωματίδια σκόνης από ερημικές εκτάσεις εμφανίζουν διαμέτρους που κυμαίνονται από δέκατα μέχρι δεκάδες μm. Το σωματιδιακό μέρος ενός αερολύματος καλείται αιωρούμενο σωματίδιο (Particulate Matter-PM), το οποίο έχει τη μορφή πολύ μικρών σωματιδίων σε στερεά ή υγρή μορφή στην ατμόσφαιρα. Η γεωμετρία, το μέγεθος, η σύσταση και γενικά οι φυσικές και χημικές ιδιότητες των PMs εμφανίζουν σημαντική μεταβλητότητα στην ατμόσφαιρα.

Το μέγεθος των σωματιδίων μπορεί να κυμαίνεται από 0,001 έως και 500 μm. Σωματίδια διαμέτρου 2,5-10 μm καλούνται χοντρόκοκκα (coarse), ενώ αυτά με διαμέτρους 0,1-2,5 μm καλούνται λεπτόκοκκα (fine). Σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 0,1 μm καλούνται υπερ-λεπτόκοκκα (ultra-fine). Οι δυο πολύ γνωστές κατηγορίες αιωρούμενων σωματιδίων PM2,5 και PM10 αφορούν σωματίδια με διαμέτρους μέχρι 2,5 μm και μέχρι 10 μm αντίστοιχα. Το εύρος της οριζόντιας μεταφοράς των αιωρούμενων σωματιδίων εξαρτάται από τη σύνθεση και το μέγεθός τους. Γενικά, τα σωματίδια τύπου PM2,5 έχουν τη συμπεριφορά ιδανικών αερίων, διότι η βαρυτική τους καθίζηση μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Τα συγκεκριμένα σωματίδια μπορούν να μεταφερθούν καλύπτοντας αποστάσεις χιλιάδων χιλιομέτρων. Ένα σύνηθες φαινόμενο, που σχετίζεται με τέτοιου είδους μεταφορά σωματιδίων σκόνης, είναι το κόκκινο χιόνι (red snow), που παρατηρείται σε περιοχές της Β. Ευρώπης, της Ασίας ή ακόμα και της Β. Αμερικής Τα σωματίδια τύπου PM10 έχουν μεγαλύτερη μάζα, συνεπώς η βαρυτική τους καθίζηση δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, και εναποτίθενται σε μικρότερες αποστάσεις από τις πηγές τους σε σχέση με τα PM2,5. Σωματίδια μεγαλύτερα από τα PM10 εναποτίθενται πολύ πιο γρήγορα και σε περιοχές κοντινές με αυτές των πηγών τους, οπότε και ευνοούν την εκπομπή μικρότερων σωματίων στην ατμόσφαιρα καθώς συγκρούονται με άλλα σωματίδια κατά την επιστροφή τους στο έδαφος (saltation).

Τα σωματίδια που εκπέμπονται από αργιλώδη εδάφη και εδάφη χαρακτηριζόμενα από σημαντικές ποσότητες ιλύος (λάσπης) έχουν ενδεικτικές διαμέτρους 1,6, 6,7 και 14,2

μm . Ο μηχανισμός απελευθέρωσης σκόνης βασίζεται στην εισαγωγή στην ατμόσφαιρα σωματιδίων διαμέτρου μέχρι 60 μm. Ωστόσο, μόνο τα μικρότερα σωματίδια με ακτίνα μέχρι 10 μm μπορούν να παραμείνουν μέσα στην ατμόσφαιρα και να μεταφερθούν σε μεγάλες αποστάσεις, αλλά και να επανέλθουν στην επιφάνεια του εδάφους μέσω της υγρής, ή ξηρής εναπόθεσης.

Οι διεργασίες υγρής και ξηρής εναπόθεσης αποτελούν τους βασικότερους μηχανισμούς απομάκρυνσης από την ατμόσφαιρα σωματιδίων μικρότερων από 10 μm. Σωματίδια μεγαλύτερα από 10 μm απομακρύνονται κυρίως λόγω βαρυτικής καθίζησης. Τα σωματίδια άμμου είναι μεγαλύτερα και δεν συμμετέχουν ενεργά σε μεγάλης κλίμακας οριζόντια μεταφορά. Εμφανίζουν όμως σημαντικό ρόλο σε επεισόδια σκόνης κοντά στις πηγές τους καθώς μεγάλες ποσότητες άμμου ανυψώνονται και παρασύρονται από τυρβώδεις ροές, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις ρευμάτων πυκνότητας. Τέτοια φαινόμενα είναι υπεύθυνα για τη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων άμμου σε γειτονικές ως προς τις πηγές τους περιοχές, διευρύνοντας με αυτόν τον τρόπο την ερημοποίηση.
Η κίνηση των σωματιδίων σκόνης μέσα στην ατμόσφαιρα είναι συνεχής όσο η ανοδική κίνηση υπερβαίνει την ταχύτητα καθίζησής τους (Σχήμα 2.1.1). Τα σωματίδια που μπορούν να μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις έχουν διάμετρο μικρότερη από 20 μm και ταχύτητα καθίζησης περίπου 0,1 ms^{-1}. Σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη από 20 μm πέφτουν πολύ πιο γρήγορα. Τα PM10 έχουν ταχύτητα καθίζησης περίπου 0,03 ms^{-1}. Τα λεπτόκοκκα σωματίδια έχουν πολύ μικρές ταχύτητες καθίζησης, της τάξης των 0,001 ms^{-1}, με αποτέλεσμα να μπορούν να μεταφερθούν σε μακρινές από τις πηγές τους αποστάσεις σε περιπτώσεις ευνοϊκών συνοπτικών συνθηκών (Κατσαφάδος και Μαυροματίδης, 2015)



Σχήμα 2.1.1: Η ταχύτητα καθίζησης σε συνάρτηση με το μέγεθος των σωματιδίων (Πηγή: Κατσαφάδος&Μαυρομματίδης 2015)

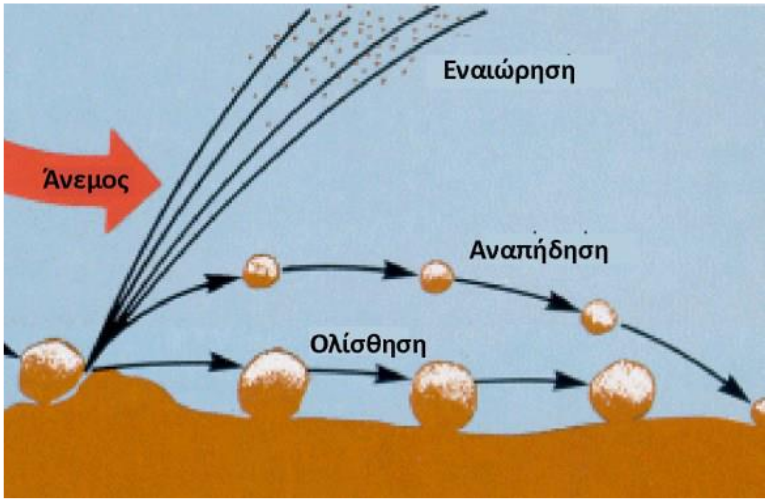
2.2. Τρόποι Μετακίνησης της Σκόνης

Όπως αναφέρουν οι Κατσαφάδος και Μαυρομματίδης (2015) τα σωματίδια σκόνης κινούνται με τρεις διαφορετικούς τρόπους μέσα στην ατμόσφαιρα την ολίσθηση (creeping) , την αναπήδηση (saltation) και την εναιώρηση (suspension):

- Η ολίσθηση ευνοείται από ασθενείς ανέμους και από την κοκοποίηση (granulation) των ελαφρότερων σωματιδίων.
- Κατά την αναπήδηση παρασύρονται, λόγω ισχυρότερων ανέμων, μεγαλύτερα σωματίδια, τα οποία μετακινούνται οριζόντια κατά μέσο όρο τέσσερις φορές την κατακόρυφη ανύψωση τους. Με τη επιστροφή τους στο έδαφος συγκρούονται με άλλα σωματίδια σκόνης ή με την επιφάνεια και αναπηδούν εκ νέου στην ατμόσφαιρα απελευθερώνοντας ταυτόχρονα και σωματίδια μικρότερου μεγέθους.
- Εναιώρηση είναι η διαδικασία κατά τη οποία τα σωματίδια από το έδαφος (συνήθως ιζηματογενούς προέλευσης) εισέρχονται στην ατμόσφαιρα και παραμένουν αιωρούμενα σε αυτήν. Εάν τα συγκεκριμένα σωματίδια είναι ιδιαιτέρως ελαφριά και η ροή είναι ικανή να υπερνικήσει το βάρος τους τότε παραμένουν αιωρούμενα. Τα μεγαλύτερα από αυτά εναποτίθενται στο έδαφος σε κοντινές αποστάσεις, ενώ τα ελαφρύτερα παρασύρονται από τον άνεμο και τις τυρβώδεις ροές. Η ποσότητα των εναιωρούμενων σωματιδίων εξαρτάται από την ένταση του ανέμου. Όσο ισχυρότεροι είναι οι άνεμοι, τόσο μεγαλύτερα

και βαρύτερα σωματίδια μπορούν να παραμένουν στην ατμόσφαιρα.

Οι παραπάνω τρόποι εναπόθεσης της σκόνης στην ατμόσφαιρα φαίνονται στο Σχήμα 2.2.1



Σχήμα 2.2.1: Τρόποι εναπόθεση σκόνης στην ατμόσφαιρα (Πηγή: Κατσαφάδος&Μαυροματίδης 2015)

Η ισχυρή ροή μέσης ή συνοπτικής κλίμακας ανασηκώνει τη σκόνη σε ύψη χιλιάδων χιλιομέτρων και τη μεταφέρει οριζόντια σε αποστάσεις εκατοντάδων ή χιλιάδων χιλιομέτρων. Μεγάλης κλίμακας τυρβώδεις ροές ή ανοδικά ρεύματα βοηθούν στην εναιώρηση της σκόνης μέχρι να επανέλθει στην επιφάνεια λόγω βαρύτητας ή υγρής εναπόθεσης. Συνήθως τα μικρότερα σωματίδια (διαμέτρου μικρότερης από 2,5μm) μεταφέρονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις, ενώ τα μεγαλύτερα (διαμέτρου 10μm) εναποτίθενται γρηγορότερα στην επιφάνεια έχοντας διανύσει αποστάσεις από μερικά χιλιόμετρα έως μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα.

Κατά τον Pewe (1981), η σκόνη που δημιουργείται λόγω των ανέμων χωρίζεται σε δύο βασικούς τύπους μεγέθους – κόκκων. Η σκόνη που μετακινείται για μερικά χιλιόμετρα ή λιγότερο από 100km, είναι η κοινή σκόνη των θυελλών σκόνης και των "δαιμόνων κονιορτού" (dust devils) που συναντώνται παγκοσμίως. Αυτά τα σωματίδια είναι συνήθως μεταξύ 5μm και 50μm. Ο άλλος τύπος είναι τα λεπτόκοκκα τα οποία κινούνται όπως τα αερολύματα, τα οποία παραμένουν στην ατμόσφαιρα έως ότι πέσουν στην επιφάνεια ή στον υδροφόρο ορίζοντα με τη βοήθεια τη βροχής. Η σκόνη αυτού

του τύπου είναι μεταξύ 2μm και 10μm.

2.3. Σκόνη Φυσικής Προέλευσης και Ατμοσφαιρικές Συνθήκες

Η εμφάνιση σκόνης στην ατμόσφαιρα επηρεάζει τις συνθήκες τις ατμόσφαιρας και του περιβάλλοντος. Βασικό αποτέλεσμα της σκόνης είναι η αλλαγή του ισοζυγίου του κλιματικού συστήματος. Αυτό γίνεται λόγω της μείωσης της απορρόφησης της μικροκυματικής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα και την εκπομπή ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος. Με την απορρόφηση και τη σκέδαση τα αερολύματα μειώνουν το ποσό της ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια, ενώ παράλληλα ενισχύουν την επίδραση του φαινομένου του θερμοκηπίου κατά την απορρόφηση και την εκπομπή της εξερχόμενης ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος (Yoshika M. et al., 2007; IPCC, 2007; Spyroy et al., 2013; Kaufman et al., 2002; Tegen, 2003; Κατσαφάδος & Μαυροματίδης, 2015).

Βασικό μέτρο για την περιγραφή των παραπάνω διεργασιών είναι Οπτικό Βάθος Αερολυμμάτων (Aerosol Optical Depth - AOD). Το AOD είναι μέτρο της μείωσης της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω της σκόνης και της ομίχλης. Με άλλα λόγια τα μικροσωματίδια στην ατμόσφαιρα (σκόνη, καπνός, ρύπανση) μπορούν να εμποδίσουν την ηλιακή ακτινοβολία λόγω της απορρόφησης και της σκέδασης. Το AOD περιγράφει πόση από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία παρεμποδίζεται από το να φτάσει στο έδαφος λόγω αυτών των αερολυμάτων. Είναι ένας αδιάστατος αριθμός ο οποίος σχετίζεται με το ποσό των αερολυμάτων εντός μίας κάθετης στήλης στην ατμόσφαιρα πάνω από την περιοχή μελέτης (http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/surfrad/aod/). Το AOD (τ) υπολογίζεται από το συντελεστή μείωσης της ακτινοβολίας ενός συγκεκριμένου αερολύματος σε συνδυασμό του ύψους του προφίλ N της στήλης (h) ή δίνεται από τον χρήστη για τέσσερα χωριστά επίπεδα:

$$\tau = \sum_{j} \int_{H_{j,max}}^{H_{j,max}} \sigma e,j(h)\,dh = \sum_{j} \sigma_{e,j}^{1} N_j(0) \int_{H_{j,min}}^{H_{j,max}} e^{-\frac{h}{Z_j}}\,dh$$

(Hess et al., 1998)

Επιπλέον, από τη μείωση της άμεσης ακτινοβολίας μειώνεται η ενέργεια που φτάνει στην επιφάνεια της θάλασσας, μειώνοντας τη θερμοκρασία ακόμη και 1-2°C. Ταυτόχρονα, μειώνεται σημαντικά και η διαδικασία της εξάτμισης με αποτέλεσμα μία μέση διαφορά περίπου 10mm ανα χρόνο στον υδρολογικό κύκλο. (Elguindi et al. 2016)

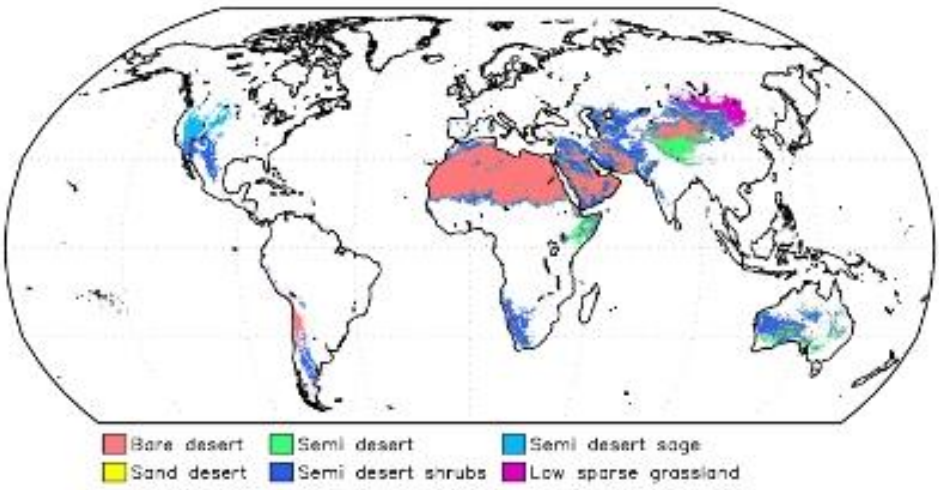
Εκτός των παραπάνω, τα αιωρούμενα σωματίδια ελαττώνουν σημαντικά και την ορατότητα. Ο πίνακας 2.3.1 δείχνει ενδεικτικά τιμές ορατότητας για διάφορες συγκεντρώσεις αιωρουμένων σωματιδίων (Χρήστου, 2009)

Συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων σε mg m^{-3}	**Ορατότητα σε km**
100	12
200	6
700	1,6

Πίνακας 2.3. 1 Ελάττωση ορατότητας από αιωρούμενα σωματίδια (Πηγή: Χρήστου, 2009)

2.4. Κύριες Πηγές Σκόνης Φυσικής Προέλευσης και Εποχικότητα

Υπάρχει ισχυρή συσχέτιση ανάμεσα σε περιοχές παραγωγής σκόνης με την ξηρασία ή τη χαμηλή ετήσια βροχόπτωση (μικρότερη από 200-250 mm ανά έτος). Η λεγόμενη «ζώνη της σκόνης» εκτείνεται από τη Δυτική Αφρική μέχρι τη Μέση Ανατολή, την Αραβική Χερσόνησο, αλλά και ανατολικότερα, μέχρι την Κεντρική, τη Νότια Ασία και τα Ιμαλάια. Οι συγκεκριμένες περιοχές θεωρούνται ως οι πιο παραγωγικές περιοχές σκόνης λόγω των σπανίων βροχοπτώσεων που παρατηρούνται σε αυτές, της σύστασης του εδάφους, των ημερήσιων διακυμάνσεων της θερμοκρασίας και γενικότερα λόγω των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών τους (παρουσία εφήμερων λιμνών και ποταμών και γενικότερα ύπαρξη λεκανών απορροής σε άγονες ορεινές εξάρσεις). Συνήθως σε αυτούς τους εφήμερους σχηματισμούς συλλέγονται υλικά από διαβρωμένα εδάφη κατά την υγρή περίοδο του έτους. Οι σχηματισμοί αυτοί μετατρέπονται σε πηγές εκπομπής σωματιδίων σκόνης κατά την ξηρή περίοδο του έτους (Κατσαφάδος & Μαυροματίδης, 2015). Οι κύριες πηγές σκόνης φαίνονται στα σχήματα 2.4.1 και 2.4.2



Σχήμα 2.4.1: Κύριες πηγές σκόνης ανά περιοχή και τύπο κάλυψης γης (Πηγή: WMO)



Σχήμα 2.4.2. Κύριες πηγές σκόνης ανά περιοχή (Πηγή: NASA)

Η Σαχάρα είναι παγκοσμίως η μεγαλύτερη πηγή σκόνης φυσικής προέλευσης και μία από τις κυριότερες πηγές για την περιοχή της Μεσόγειου (Middleton & Goudie, 2002). Κύριες πηγές σκόνης για τη Μεσόγειο είναι η Δυτική Σαχάρα, το Μαρόκο, η Αλγερία και η Τυνησία. Κατά τους καλοκαιρινούς μήνες κύριες πηγές σκόνης για τη Μεσόγειο είναι η Δυτική Σαχάρα, το Μαρόκο και η Νότια Τυνησία. Από την άλλη τόσο το καλοκαίρι όσο και το φθινόπωρο κύρια πηγή σκόνης είναι η Νότια Αλγερία. Η Βόρεια Αλγερία είναι κύρια πηγή την άνοιξη και το καλοκαίρι. Λιγότερο συχνά, κυρίως την άνοιξη και λιγότερο το χειμώνα, λειτουργούν ως πηγές η Δυτική Σαχάρα και το Νότιο

Μαρόκο (Salvador et al., 2014).

Η άνοιξη αποτελεί ευνοϊκή περίοδο για τις εστίες σκόνης της Σαχάρας και της μεταφοράς στην Ανατολική Μεσόγειο και άρα την Ελλάδα. Μία τέτοια περίπτωση ήταν η έντονη εμφάνιση σκόνης στις 16-17 Απριλίου του 2005, όταν ένα παχύ στρώμα μεταφέρθηκε από τη Λιβύη και επηρέασε το σύνολο της επικράτειας ανεβάζοντας το AOD (Aerosol optical depth) σε πολύ υψηλά επίπεδα (Kaskaoutis et al. 2008)

2.5. Άνεμος και Τύρβη

Όπως αναφέρουν οι Κατσαφάδος και Μαυρομματίδης (2015), τα χαρακτηριστικά του ανεμολογικού πεδίου επηρεάζουν σημαντικά τη μεταφορά των σωματιδίων της σκόνης. Γενικά, για τη μετακίνηση των σωματιδίων σκόνης απαιτούνται ταχύτητες ανέμου τουλάχιστον 7 m/s. Τα αρχικά σωματίδια σκόνης παρασύρουν τα μικρότερα προς την ατμόσφαιρα μέσω της διαδικασίας αναπήδησης. Στον Πίνακα 2.5.1 φαίνονται οι ελάχιστες απαιτούμενες ταχύτητες για τη μετακίνηση σωματίων σκόνης από διαφορετικές πηγές.

Πηγή	**Ελάχιστη ταχύτητα ανέμου (ms-1)**
Περιοχές αμμόλοφων	4,50-6,70
Αμμώδεις περιοχές σε περιορισμένες ερημικές εκτάσεις	8,95
Ερημικές επίπεδες εκτάσεις	8,95-11,16
Περιοχές αποξηραμένων λιμνών	13,40-15,60
Εκτενείς ερημικές εκτάσεις	18,90

Πίνακας: 2.5. 1 Ελάχιστες απαιτούμενες ταχύτητες ανέμου (ms^{-1}) για τη μετακίνηση των σωματιδίων σκόνης από διαφορετικές πηγές (Πηγή: Κατσαφάδος & Μαυρομματίδης, 2015)

Μετά την εκπομπή μεγάλης ποσότητας σκόνης στην ατμόσφαιρα η αμμοθύελλα που δημιουργείται μπορεί να διατηρήσει την ισχύ της ακόμα και στην περίπτωση που το ανεμολογικό πεδίο έχει ένταση μικρότερη από την ελάχιστη ταχύτητα ανέμου για την έναρξη της εκπομπής. Ο μηχανισμός της αναπήδησης είναι υπεύθυνος σε αυτή την περίπτωση για την άνοδο της σκόνης στην ατμόσφαιρα. Στην υπόθεση της τέλειας στρωτής ροής, τα σωματίδια της σκόνης κινούνται σε ένα λεπτό στρώμα κατά μήκος της ερημικής επιφάνειας. Για τη δημιουργία της αμμοθύελλας θα πρέπει αυτό το στρώμα σκόνης να ανέλθει και να διαχυθεί στην ατμόσφαιρα.

Λόγω της διάτμησης του ανέμου, η τύρβη είναι ουσιαστικά υπεύθυνη για την

απομάκρυνση και τη μεταφορά των σωματιδίων της σκόνης από την επιφάνεια του εδάφους. Συνεπώς, ένα ασταθές οριακό στρώμα ευνοεί τις κατακόρυφες κινήσεις που απαιτούνται για την απομάκρυνση των σωματιδίων από την επιφάνεια του εδάφους. Αντιθέτως, ένα ευσταθές οριακό στρώμα περιορίζει τα ανοδικά ρεύματα και επομένως και την κατακόρυφη μεταφορά των σωματιδίων σκόνης λόγω της ύπαρξης αναστροφής σε χαμηλά επίπεδα. Λόγω της ιδιαιτέρως αραιής βλάστησης στις ερημικές περιοχές, η μεγάλη θέρμανση του εδάφους κατά τη διάρκεια της ημέρας ευνοεί τη δημιουργία ασταθούς οριακού στρώματος, όπως συμβαίνει στις ερήμους των μέσων γεωγραφικών πλατών. Μετά τη δύση του ηλίου, η ψύξη των κατωτέρων στρωμάτων της ατμόσφαιρας οδηγεί σε αναστροφή κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, με αποτέλεσμα τον περιορισμό της εκπομπής κατά τις νυχτερινές ώρες.

Η θερμοκρασιακή αναστροφή αναστέλλει τις ανοδικές κινήσεις στο οριακό στρώμα και δεν επιτρέπει την άνοδο σωματιδίων σκόνης στην ατμόσφαιρα. Για παράδειγμα, άνεμος 5 ms^{-1} μπορεί να προκαλέσει μεταφορά σκόνης την ημέρα αλλά τη νύχτα όχι. Η δημιουργία αναστροφής δεν επηρεάζει τη σκόνη που έχει ήδη απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα και μετακινείται πάνω από το οριακό στρώμα.

2.6. Ταχύτητα Τριβής

Η ταχύτητα τριβής καθορίζει αν το ανεμολογικό πεδίο μπορεί να χαρακτηριστεί τυρβώδες, ώστε να υπάρχουν ευνοϊκές συνθήκες για την απομάκρυνση και τη μεταφορά της σκόνης από το έδαφος. Η ελάχιστη απαιτούμενη ταχύτητα τριβής ώστε να κινηθούν τα σωματίδια της σκόνης είναι 0,6 m/s. Η ταχύτητα τριβής, u_*, δίνεται ως:

$$u_* = \frac{V_s\, K}{\ln\left(\frac{z_s}{z_0}\right) - \psi_m\left(\frac{z_s}{L}\right)}$$

Όπου, Vs είναι η ταχύτητα του ανέμου στο μέσο ύψος z_s του επιφανειακού στρώματος, κ είναι η σταθερά Von Karman, z_o η επιφανειακή τραχύτητα (για την έρημο $z_o = 0{,}01$), ψ_m είναι η παράμετρος ευστάθειας για την ορμή και L είναι το μήκος Monin - Obukhov. Για ουδέτερες συνθήκες ισχύει $z_s/L = 0$ και $\psi_m = 0$. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, όπου οι ατμοσφαιρικές συνθήκες είναι ασταθείς, ισχύει $z_s/L < 0$ και $\psi_m > 0$.

2.7. Εξίσωση Διάχυσης

Ο κύκλος της σκόνης στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον γενικά περιγράφεται από ένα σετ K - Eulerian προγνωστικών εξισώσεων συνέχειας για τη συγκέντρωση της σκόνης:

$$\frac{\partial C_k}{\partial t} = -u\frac{\partial C_k}{\partial x} - v\frac{\partial C_k}{\partial y} - (w - v_{gk})\frac{\partial C_k}{\partial z} - \nabla(K_H \nabla C_k) - \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial C_k}{\partial z}\right) + \left(\frac{\partial C_k}{\partial t}\right)_{SOURCE} - (\frac{\partial C_k}{\partial t})_{SINK}$$

όπου, k η κλάση των σωματιδίων σκόνης ανάλογα με το μέγεθός τους, C_k η συγκέντρωση για το k-σωματίδιο, u και v οι οριζόντιες συνιστώσες ανέμου, w η κάθετη συνιστώσα ανέμου, v_{gk} η ταχύτητα μεταφοράς, K_H ο συντελεστής διάχυσης, Kz ο συντελεστής μεταφοράς τυρβώδους ροής, $(\partial Ck/\partial t)_{SOURCE}$ ο ρυθμός εκπομπής σκόνης στις περιοχές - πηγές και $(\partial Ck/\partial t)_{SINK}$ ο όρος της καθίζησης που περιλαμβάνει την ξηρή και υγρή εναπόθεση. Η ολική συγκέντρωση δίνεται από τη σχέση:

$$C = \sum_{k=1}^{K} \delta_\kappa C_k \ , \sum_{k=1}^{K} \delta_\kappa = 1$$

Το δ_k υποδηλώνει την αναλογία μάζας για την k-κλάση.

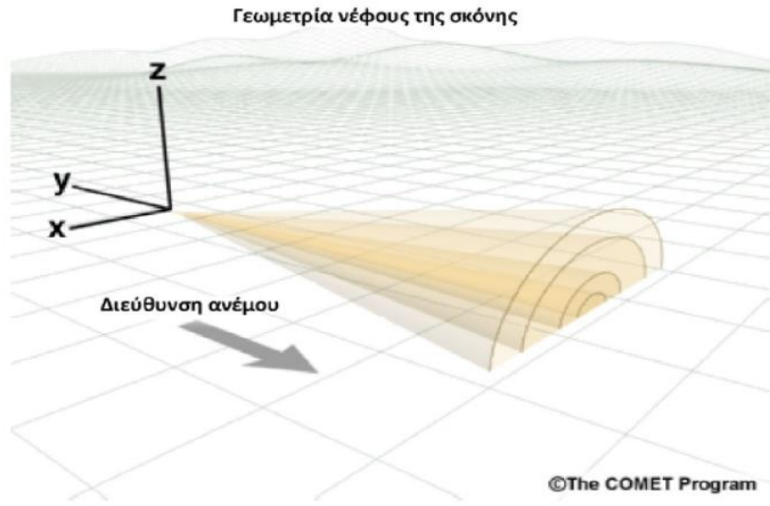
Από τη στιγμή που τα σωματίδια της σκόνης εισέρχονται στην ατμόσφαιρα μεταφέρονται σε μεγαλύτερα ύψη στο οριακό στρώμα ή μπορεί να επανέλθουν στο έδαφος. Οι ακόλουθοι μηχανισμοί επηρεάζουν την κίνηση των σωματιδίων σκόνης:

- Διασπορά
- Βαρυτική καθίζηση και
- Εισροή σκόνης σε κινήσεις κατακόρυφης μεταφοράς και εναπόθεση μέσω του υετού

2.8. Διασπορά Σκόνης

Διασπορά είναι το σύνολο των μηχανισμών που είναι υπεύθυνοι για τη μεταφορά ενός νέφους σκόνης από την πηγή του υπό την επίδραση της ατμοσφαιρικής ροής. Εμπεριέχει μια διαδικασία διάλυσης, η οποία ενισχύεται όσο αυξάνεται η ποσότητα του

αέρα που αναμειγνύεται με το νέφος της σκόνης. Η διασπορά είναι μια μονόδρομη διαδικασία, η οποία δεν επιτρέπει τη δημιουργία νέων νεφών σκόνης. Στο Σχήμα 2.8.1 αποτυπώνεται η διαδικασία της διασποράς, η οποία εκκινεί από σημειακή πηγή με την συγκέντρωση να μην έχει ομοιόμορφη κατανομή μέσα στο νέφος. Παραμένει μέγιστη στο κέντρο του νέφους και ελαχιστοποιείται σε περιοχές που απέχουν από αυτό.



Σχήμα 2.8.1: Σχηματική αναπαράσταση της μεταφοράς σκόνης (Πηγή: Κατσαφάδος Μαυροματίδης, 2015)

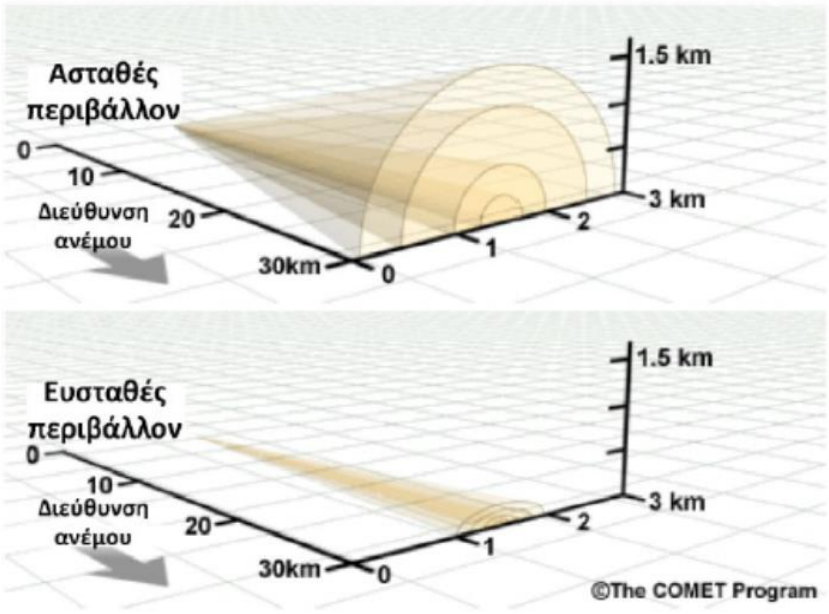
Η τύρβη αποτελεί τον κύριο μηχανισμό που ελέγχει τη διασπορά καθώς αναμειγνύει τον περιβάλλοντα αέρα με το πλούμιο (μεγαλύτερη τύρβη οδηγεί σε μεγαλύτερη διασπορά). Τρεις τύποι τύρβης συμμετέχουν στη διαδικασία της διασποράς: η μηχανική τύρβη, η τύρβη λόγω διάτμησης του ανέμου και η τύρβη από ανωστικές δυνάμεις λόγω διαφοράς πυκνότητας (buoyancy).

- Η μηχανική τύρβη δημιουργείται από τη ροή αέρα πάνω ή γύρω από ένα εμπόδιο.
- Η τύρβη λόγω διάτμησης του ανέμου είναι αποτέλεσμα της κατακόρυφης διακύμανσης της έντασης και της διεύθυνσης του ανέμου.
- Η τύρβη από ανωστικές δυνάμεις, λόγω διαφοράς πυκνότητας δημιουργείται από τις ανοδικές κινήσεις των αερίων μαζών λόγω της θέρμανσης των κατωτέρων στρωμάτων της ατμόσφαιρας

Εάν δεν υπάρχουν συνθήκες τύρβης, τα σωματίδια της σκόνης μπορούν να

μεταφέρονται οριζόντια με ρυθμό 300 μέτρα την ώρα. Ωστόσο, αυτό εξαρτάται κυρίως από τις συνθήκες συνοπτικής και μέσης κλίμακας που επικρατούν, ενώ μια ασταθής ατμόσφαιρα θα επιβραδύνει το ρυθμό με τον οποίο μεταφέρεται η σκόνη.

Οι συνθήκες ευστάθειας επηρεάζουν σημαντικά το μηχανισμό διασποράς της σκόνης. Στο Σχήμα 2.8.2 φαίνεται η διασπορά των πλουμίων σκόνης κάτω από ασταθείς και ευσταθείς συνθήκες. Η διασπορά λαμβάνει χώρα τόσο σε οριζόντιο όσο και σε κατακόρυφο επίπεδο σε ασταθείς συνθήκες, με τη διασπορά καθ' ύψος να είναι πιο έντονη. Αντιθέτως, σε ευσταθείς συνθήκες η διασπορά κατά τον κατακόρυφο άξονα είναι περιορισμένη. Σε ουδέτερες συνθήκες η σκόνη διασπείρεται ομοιόμορφα σε οριζόντιες και κατακόρυφες διευθύνσεις.



Σχήμα 2.8.2: Διασπορά και συνθήκες ατμοσφαιρικής ευστάθειας (Πηγή: Κατσαφάδος & Μαυροματίδης, 2015)

Όπως έχει αναφερθεί, τα σωματίδια της σκόνης αρχίζουν να απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα όταν μεγαλύτερα σωματίδια (διαμέτρου μεγαλύτερης των 10 μm) διαρρηγνύουν τις δυνάμεις συνοχής στο έδαφος και απελευθερώνουν μικρότερα σωματίδια. Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες κοντά στο έδαφος, οι ιδιότητες και οι συνθήκες του εδάφους (π.χ. υγρασία του εδάφους, θερμοκρασία, βλάστηση) καθορίζουν το ποσό της εκπεμπόμενης σκόνης.

Συνήθως, ο υπολογισμός των οριακών συνθηκών για την μαθηματική προσομοίωση

του κύκλου της σκόνης γίνεται είτε μέσω των επιφανειακών ροών, είτε μέσω των επιφανειακών συγκεντρώσεων των σωματιδίων της σκόνης. Ωστόσο, η προσέγγιση της ροής μάζας σκόνης συναντάται σε αρκετά μοντέλα.

Δυο τύποι παραμέτρων διέπουν την συγκέντρωση των σωματιδίων σκόνης, που απελευθερώνονται κοντά στο έδαφος, αλλά και την εκπεμπόμενη κατακόρυφη ροή. Ο πρώτος τύπος σχετίζεται με τη δομή και την κατάσταση του εδάφους, ενώ ο δεύτερος τύπος περιγράφει την ατμοσφαιρική τυρβώδη ροή κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Οι Zender et al., (2003) προτείνουν την ακόλουθη σχέση για την κατακόρυφη ροή σκόνης Fs:

$$F_{s,j} = T \cdot A_m \cdot S \cdot a \cdot Q_s \cdot \sum_{i=1}^{I} M_{i,j}$$

όπου, T μία παγκόσμια ρυθμιστική παράμετρος, Am η αναλογία ξηρού και ημίξηρου εδάφους σε κάθε πλεγματική περιοχή, S η ικανότητα του εδάφους για εκπομπή σκόνης κάτω από συγκεκριμένες ατμοσφαιρικές συνθήκες, α η ικανότητα παραγωγής μάζας σκόνης, Qs η οριζόντια ροή μεγαλυτέρων σωματιδίων που ευθύνονται για τη διαδικασία της αναπήδησης και $M_{i,j}$ η επικάλυψη μάζας μεταξύ πηγών και μηχανισμών μεταφοράς, ενώ ο όρος j σχετίζεται με τις κατηγορίες εδαφών, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.8.1:

	$M_{i,j}$			
Κατηγορίες εδαφών	**Άργιλος**	**Μικρή Ιλύς**	**Μεγάλη Ιλύς**	**Άμμος**
Αργιλώδης άμμος	0,12	0,08	0,08	0,80
Άργιλος με ιλύ	0,34	0,56	0,56	0,10
Άργιλος	0,45	0,30	0,30	0,25
Αμμώδης ιλύς	0,12	0,18	0,18	0,70
Αμμώδης άργιλος	0,40	0,10	0,10	0,50
Αργιλώδης ιλύς	0,34	0,36	0,36	0,30
Αμμώδης και αργιλώδης ιλύς	0,22	0,18	0,18	0,60

Πίνακας 2.8.1: Αντιστοίχιση κατηγοριών εδαφών και αργίλου, άμμου και ιλύς για την παράμετρο $M_{i,j}$ (Πηγή: Κατσαφάδος & Μαυροματίδης, 2015)

Κατά την μαθηματική προσομοίωση, οι πλεγματικές περιοχές που θεωρούνται πηγές σκόνης προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας υψηλής ανάλυσης βάσεις δεδομένων ξηρών και ημίξηρων κατηγοριών βλάστησης. Το ποσοστό εμφάνισης αυτών των πλεγματικών σημείων σκόνης μέσα στην περιοχή που ορίζεται γύρω από το σημείο πλέγματος του εκάστοτε μοντέλου περιγράφεται από την παράμετρο A_m και δίνεται από τον τύπο:

$$A_m = \frac{Αριθμός\ πλεγμάτικών\ σημείων\ σκόνης\ σε\ μία\ πλεγματική\ περιοχή}{Συνολικός\ αριθμός\ πλεγματικών\ σημείων\ βλάστησης\ σε\ μία\ πλεμγατική\ περιοχή}$$

Η παράμετρος α δίνεται από τους Marticorena & Bergametti, (1995) ως ακολούθως :

$$\alpha = 100\exp\left[\left(13{,}4M_{clay} - 6\right)ln10\right]$$

όπου clay είναι ο άργιλος.

2.9. Ξηρή Εναπόθεση της Σκόνης

Σύμφωνα με τους Kumar et al., (1996) η ταχύτητα της ξηρής εναπόθεσης V_d των σωματιδίων σκόνης δίνεται από τους τύπους:

$$V_d = V_{sed} + \frac{1}{r_a + r_b + r_a r_b V_{SED}}$$

$$r_a = \frac{1}{k u_*}\left[\ln\left(\frac{1}{z_0}\right) - \varphi_h\right]$$

$$r_b = \frac{1}{u_*\left(S_c^{-\frac{2}{3}} + 10^{\frac{-3}{St}}\right)}$$

όπου r_a και r_b η αεροδυναμική και η οριακή αντίσταση αντίστοιχα, κ η σταθερά Von Karmann, z_0 το μήκος της επιφανειακής τραχύτητας, φ_h ο διορθωτικός όρος ευστάθειας, Sc ο αριθμός Schmidt, St ο αριθμός Stokes που είναι χαρακτηριστικός της ατμοσφαιρικής ροής και V_{SED} η ταχύτητα καθίζησης των σωματιδίων σκόνης, όπως ορίζεται από το νόμο του Stokes.

2.10. Το μοντέλο WRF

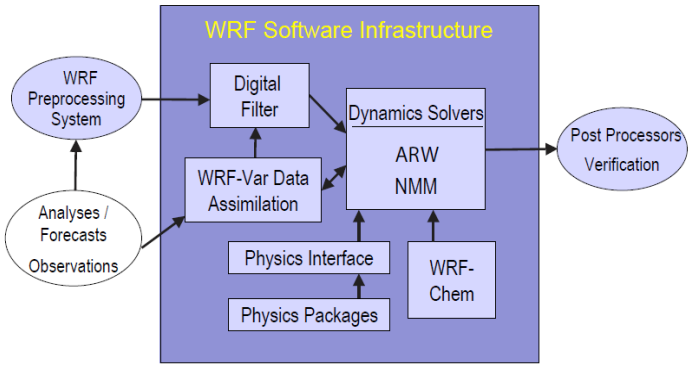
Το μοντέλο καιρού και πρόβλεψης (Weather and Forecasting model-WRF) είναι ένα σύστημα επόμενης γενιάς, μέσης κλίμακας καιρικών προβλέψεων, σχεδιασμένο για την κάλυψη αναγκών τόσο πανεπιστημιακών / ερευνητικών σκοπών όσο και

επιχειρησιακών προβλέψεων. Διαθέτει δύο δυναμικούς πυρήνες, ένα σύστημα αφομοίωσης δεδομένων, και μία αρχιτεκτονική λογισμικού διευκολύνοντας παράλληλα στον υπολογισμό αλλά και στην επέκταση του συστήματος. Το μοντέλο εξυπηρετεί ένα ευρύ φάσμα μετεωρολογικών εφαρμογών σε κλίμακες από δεκάδες μέτρα έως χιλιάδες χιλιόμετρα. Η προσπάθεια ανάπτυξης του μοντέλου WRF ξεκίνησε κατά το τέλος της δεκαετίας του 1990 και ήταν μία συνεργασία κυρίως μεταξύ του National Center of Environmental Prediction (NCEP) και (στη συνέχεια) των Forecast Systems Laboratory (FSL), Air Force Weather Agency (AFWA), Naval Reasearch Laboratory, Πανεπιστήμιο της Οκλαχόμα, και Federal Aviation Administration(FAA)

Το WRF μπορεί να δημιουργήσει ατμοσφαιρικές προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα (παρατηρήσεις, αναλύσεις) ή εξιδανικευμένες συνθήκες. Το μοντέλο χρησιμοποιείται σε επιχειρησιακό επίπεδο από το NCEP, AFWA αλλά και από άλλα κέντρα.

Το μοντέλο χρησιμοποιείται σε παγκόσμιο επίπεδο, έχοντας πάνω από 300.000 χρήστες σε 150 χώρες. Το WRF περιέχει δύο βασικούς πυρήνες, που αναφέρονται ως πυρήνας ARW (Advanced Research WRF) και πυρήνας NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model). Επιπλέον , το μοντέλο παρέχει έκδοση που σχετίζεται με τη χημεία της ατμόσφαιρας, το WRF-Chem (Επίσημη ιστοσελίδα WRF http://www.wrf-model.org/index.php, Skamarock et al. 2008).

Τα κύρια συστατικά του συστήματος του WRF περιγράφονται στο Σχήμα 2.10.1.



Σχήμα 2.10.1: Βασική περιγραφή συστήματος μοντέλου WRF (Πηγή: Skamarock et al. 2008)

2.10.1. Κύρια χαρακτηριστικά του συστήματος ARW

Πυρήνας ARW

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται από το σύστημα είναι πλήρως συμπιεστές εξισώσεις Euler, μη υδροστατικές. Το φυσικό μοντέλο περιλαμβάνει το σχήμα της μικροφυσικής. Το σχήμα κυμαίνεται από απλοποιημένη φυσική, κατάλληλη για εξιδανικευμένες μελέτες μέχρι εξελιγμένη φυσική, κατάλληλη για μελέτες διαδικασίας (process studies) Επιπλέον, υπάρχει η παραμετροποίηση Cumulus, η οποία περιλαμβάνει ρυθμίσεις και σχήμα ροής μάζας για μέσης κλίμακας μοντελοποίηση. Για το τμήμα της φυσικής στην επιφάνεια υπάρχουν πολυεπίπεδα μοντέλα επιφάνειας γης που κυμαίνονται από απλά θερμικά μοντέλα μέχρι πλήρη μοντέλα βλάστησης και υγρασίας του εδάφους, περιλαμβανομένης της κάλυψης από χιόνι και του θαλάσσιου πάγου. Το μοντέλο εκτός των παραπάνω περιλαμβάνει και φυσική για την πρόγνωση της κινητικής ενέργειας της τυρβώδους ροής στο πλανητικό οριακό στρώμα. Για την ατμοσφαιρική ακτινοβολία υπάρχουν σχήματα μεγάλου και μικρού μήκους κύματος με πολλαπλές φασματικές ζώνες και ένα απλό μικροκυματικό σχήμα κατάλληλο για κλιματικές και μετεωρολογικές εφαρμογές. Σε αυτό περιλαμβάνονται και οι επιδράσεις των σύννεφων και των επιφανειακών ροών.

Μοντέλο WRF-Chem

Το μοντέλο που σχετίζεται με τη χημεία της ατμόσφαιρας είναι ένα συνδεδεμένο μοντέλο το οποίο συμφωνεί με τη συντηρητική μεταφορά που υπολογίζεται από το μετεωρολογικό μοντέλο. Επίσης, η ξηρή εναπόθεση είναι συνδυασμένη με το σχήμα εδάφους/βλάστησης, ενώ οι χημεία της υγρής φάσης συνδυάζεται με μερική από τη μικροφυσική και τα σχήματα των αερολυμάτων. Υπάρχουν τρεις επιλογές βιογενών εκπομπών: α) μη βιογενείς εκπομπές β) συνδεδεμένος υπολογισμός βιογενών εκπομπών και γ) συνδεδεμένη τροποποίηση χρήσης συγκεκριμένων βιογενών εκπομπών. Επιπλέον, υπάρχουν δύο επιλογές ανθρωπογενών εκπομπών: α) χωρίς ανθρωπογενείς εκπομπές και β) προσδιορισμός ανθρωπογενών εκπομπών από των χρήστη. Ταυτόχρονα είναι διαθέσιμες δύο επιλογές υπολογισμού χημικών αντιδράσεων αέριας φάσης: α) RADM2 χημικοί μηχανισμοί και β) CBM-Z μηχανισμοί. Στο μοντέλο υπάρχει, επίσης, πλήθος επιλογών υπολογισμού των χημικών αντιδράσεων αέριας φάσης μέσω χρήσης του κινητικού προεπεξεργαστή (kinetic pre-processor-KPP). Τρεις είναι οι επιλογές σχετικά με τα σχήματα φωτόλυσης: α) σχήμα

Madronich συνδυασμένο με υδρομετέωρα, αερολύματα και παραμετροποίηση επαγωγής β) σχήμα φωτόλυσης Fast – J συνδυασμένο με υδρομετέωρα, αερολύματα και παραμετροποιήσεις επαγωγής και γ) FTUV σχήμα συνδυασμένο και αυτό με υδρομετέωρα, αερολύματα και παραμετροποιήσεις επαγωγής. Τέλος, υπάρχουν επιλογές για σχήματα αερολυμάτων: α) το τυπικό μοντέλο δυναμικής αερολυμάτων για την Ευρώπη (The Modal Aerosol Dynamics Model for Europe- MADE/SORGAM), β) μοντέλο προσομοίωσης αλληλεπιδράσεων των αερολυμάτων και χημείας (Model for Simulation Aerosol Interaction and Chemistry – MOSAIC) και γ) το μοντέλο αερολυμάτων GOCART.

2.10.2 Διέπουσες εξισώσεις

Ο δυναμικός πυρήνας του ARW ενσωματώνει τις μη υδροστατικές εξισώσεις συμπίεσης του Euler. Οι εξισώσεις υπάρχουν σε μορφή ροής χρησιμοποιώντας μεταβλητές που έχουν ιδιότητες διατήρησης, ακολουθώντας τη φιλοσοφία του Ooyama (1990). Οι εξισώσεις σχηματίζονται χρησιμοποιώντας μια μάζα εδάφους – ακόλουθη μάζα κάθετης συντεταγμένης (terrain-following mass vertical coordinate).

2.10.2.1 Κάθετη συντεταγμένη και μεταβλητές

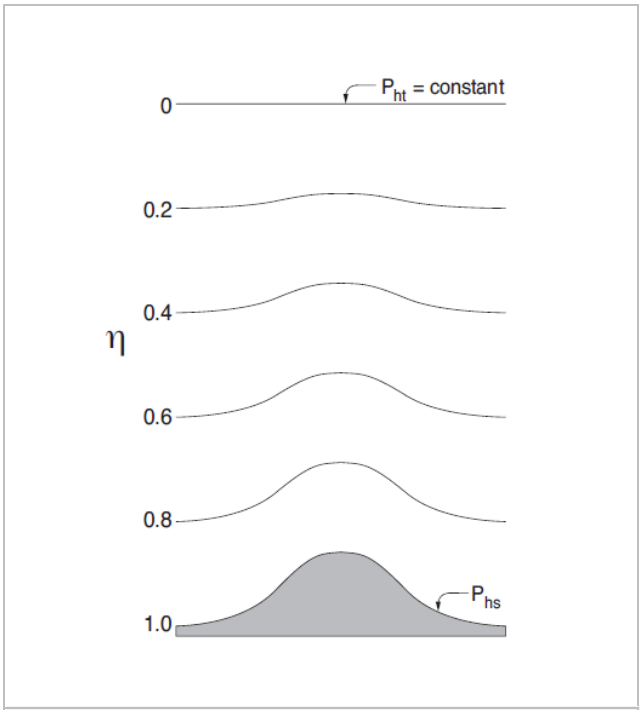
Οι εξισώσεις του μοντέλου ARW σχηματίζονται χρησιμοποιώντας μία εδάφους-ακολουθούμενη υδροστατική-πίεσης συντεταγμένη η οποία συμβολίζεται με η και περιγράφεται ως εξής:

$$\eta = \left(\frac{p_h - p_{hs}}{\mu}\right), \text{όπου } \mu = (p_{hs} - p_{ht})$$

Συγκεκριμένα το p_h είναι υδροστατική συνιστώσα της πίεσης, ενώ τα p_{hs} και p_{ht} αναφέρονται στις τιμές κατά μήκος της επιφάνεια μέχρι και το πάνω όριο, αντίστοιχα. Το μ(χ,y) αντιστοιχεί στην μάζα ανά μονάδα επιφάνειας εντός της στήλης στο πεδίο ορισμού του μοντέλου σε (x,y).

Ο ορισμός των συντεταγμένων προτάθηκε από τον Laprise (1992) και είναι η παραδοσιακή σ-συντεταγμένη που χρησιμοποιείται σε πολλά υδροστατικά ατμοσφαιρικά μοντέλα. Το η παίρνει τιμές από 1 (στην επιφάνεια) μέχρι 0 (στο πάνω

όριο του πεδίου ορισμού του μοντέλου), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.10.2.1.1)



Σχήμα 2.10.2.1.1: Η συντεταγμένη η του μοντέλου ARW
(Πηγή: Skamarock et al. 2008)

Στις βασικές εξισώσεις του μοντέλου εμφανίζονται οι μη – διατηρούμενες (non-conserved) μεταβλητές. Αυτές είναι:

- Το γεωδυναμικό (φ=gz)
- Η πίεση (p)
- Και η αντίστροφη πυκνότητα (α=1/ρ)
-

2.10.2.2 Εξισώσεις ροής (flux-form) Euler

Χρησιμοποιώντας τις μεταβλητές που ορίστηκαν παραπάνω η εξισώσεις ροής του Euler μπορούν να γραφούν ως ακολούθως:

$$\partial t U + (\nabla \cdot Vu) - \partial x(p\varphi_\eta) + \partial \eta(p\varphi_x) = F_U \quad (2.10.2.2.1)$$

$$\partial t V + (\nabla \cdot Vu) - \partial y(p\varphi_\eta) + \partial \eta(p\varphi_y) = F_V \quad (2.10.2.2.2)$$

$$\partial t W + (\nabla \cdot Vw) - g(\partial_\eta p - \mu) = F_W \quad (2.10.2.2.3)$$

$$\partial t \Theta + (\nabla \cdot V\theta) = F_\Theta \quad (2.10.2.2.4)$$

$$\partial_t \mu + (\nabla \cdot V) = 0 \quad (2.10.2.2.5)$$

$\partial_t\varphi + \mu^{-1}[(V \cdot \nabla\varphi) - gW] = 0$ (2.10.2.2.6)

Σε συνδυασμό με τη διαγνωστική σχέση για την αντίστροφη πυκνότητα

$\partial_\eta\varphi = -\alpha\mu,$ (2.10.2.2.7)

Και την εξίσωση της κατάστασης

$$p = p_0(R_d\theta/p_0\alpha)^\gamma \text{ (2.10.2.2.8).}$$

όπου το α αντιπροσωπεύει μία γενική μεταβλητή. Το $\gamma=c_p - c_\upsilon = 1.4$ είναι η αναλογία της θερμοχωρητικότητας για τον ξηρό αέρα, R_d είναι η σταθερά των αερίων για τον ξηρό αέρα και το p_0 είναι μία πίεση αναφοράς (συνήθως 10^5 Pascals). Το δεξί μέρος των εξισώσεων F_U ,F_V, F_W αναφέρονται σε όρους δύναμης που προκύπτουν από το μοντέλο της φυσικής.

2.10.2.3 Εξισώσεις

Για λόγους ευκολίας παρακάτω η ροή εμφανίζεται σε καρτεσιανές συντεταγμένες, ενώ παράλληλα αγνοείται η επίδραση της δύναμης Coriolis. Με αυτούς τους περιορισμούς, το μοντέλο μπορεί να ρυθμιστεί έτσι ώστε να λύνει τις παρακάτω εξισώσεις:

Διατήρηση μάζας: $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0$ (2.10.2.3.1)

Διατήρηση ορμής: $\frac{\partial U}{\partial t} + c_p\Theta\frac{\partial \pi}{\partial x} = -\frac{\partial Uu}{\partial x} - \frac{\partial Vu}{\partial y} - \frac{\partial Wu}{\partial z} + F_x$ (2.10.2.3.2)

$\frac{\partial V}{\partial t} + c_p\Theta\frac{\partial \pi}{\partial y} = -\frac{\partial U\upsilon}{\partial x} - \frac{\partial V\upsilon}{\partial y} - \frac{\partial W\upsilon}{\partial z} + F_y$ (2.10.2.3.3)

$\frac{\partial W}{\partial t} + c_p\Theta\frac{\partial \pi}{\partial z} = -\frac{\partial Uw}{\partial x} - \frac{\partial Vw}{\partial y} - \frac{\partial Ww}{\partial z} + F_z$ (2.10.2.3.4)

Διατήρηση ενέργειας: $\frac{\partial \Theta}{\partial t} + \frac{\partial U\theta}{\partial x} + \frac{\partial V\theta}{\partial y} + \frac{\partial W\theta}{\partial y} = \rho Q$ (2.10.2.3.5)

με $U = \rho u,\ V = \rho u,\ W = \rho w,\ \Theta = \rho\theta$

όπου v,υ,w είναι η ταχύτητα στις κατευθύνσεις x,y,z, θ το δυναμικό θερμοκρασίας. Οι υπόλοιπες μεταβλητές που εμφανίζονται παραπάνω είναι η απόλυτη θερμοκρασία T και η συνάρτηση Exner $\pi= (p/p_0)^{Rd/cp}$, όπου p είναι η πίεση και p_0 = 1000 hPa, η τιμή αναφοράς. Η ειδική θερμότητα σε σταθερή θερμοκρασία, για τον ξηρό αέρα, δίνεται από το c_p = 1004.5 J K^{-1} kg^{-1} , ενώ το $R_d = (2/7)c_p$ είναι η σταθερά των αερίων για τον ξηρό αέρα.

2.10.2.4 Σχήμα ενσωμάτωσης χρόνου Runge-Kutta (RK)

Το σχήμα RK3 το οποίο περιγράφηκε από τους Wicker & Skamarock (2002), ενσωματώνει σύνολο συνήθων διαφορικών εξισώσεων, χρησιμοποιώντας μία διατύπωση πρόγνωσης/διόρθωσης. Ορίζοντας τις προγνωστικές μεταβλητές μέσα στο ARW ως Φ = (U, V,W,Θ,φ', μ',Qm) και την εξίσωση του μοντέλου ως Φt = R(Φ), η ενσωμάτωση RK3 παίρνει τη μορφή τριών βημάτων ανεπτυγμένης λύσης από Φ(t) έως Φ(t+Δt):

$$\Phi^* = \Phi^t + \frac{\Delta t}{3} R(\Phi^t)$$
$$\Phi^{**} = \Phi^t + \frac{\Delta t}{3} R(\Phi^*)$$
$$\Phi^{t+\Delta t} = \Phi^t + \Delta t R(\Phi^{**})$$

Όπου Δt είναι το χρονικό βήμα για λειτουργείες χαμηλής – συχνότητας (χρονικό βήμα του μοντέλου) και οι εκθέτες δηλώνουν τα επίπεδα του χρόνου. Αυτό το σχήμα δεν είναι πραγματικό σχήμα Runge- Kutta, διότι έχει τρίτης τάξης ακρίβεια για γραμμικές εξισώσεις και μόνο δεύτερης τάξης ακρίβεια για μη-γραμμικές εξισώσεις.
(Skamarock et al., 2008; Bianco, 2008).

2.10.3. Το WRF-Chem

Όπως αναφέρουν οι Grell et al. (2005), γενικά τα περισσότερα μοντέλα μελέτης της ποιότητας του αέρα εξετάζουν μία ποικιλία συζευγμένων φυσικών και χημικών διεργασιών όπως είναι η μεταφορά, η απόθεση, η εκπομπή, η χημική μετατροπή, η αλληλεπίδραση των αερολυμάτων, η φωτόλυση και η ακτινοβολία.
Σε ό,τι αφορά τη μεταφορά το μοντέλο που χρησιμοποιείται, το οποίο καλείται Advanced Research WRF (ARW), οι εξισώσεις πρόγνωσης υπολογίζονται με μορφή διατήρησης (conservative form) των μεταβλητών. Μη διατηρούμενες μεταβλητές,

όπως η πίεση και η θερμοκρασία, υπολογίζονται από τις συντηρημένες προγνωστικές μεταβλητές. Στις μεταβλητές με διατηρούμενη προσέγγιση το μοντέλο ARW ενσωματώνει μία εξίσωση διατήρησης της μάζας και μία βαθμωτή εξίσωση της διατήρησης της μορφής:

$\mu_t + \nabla \cdot (V_\mu) = 0$ (2.10.3.1)

$(\mu\varphi)_t + \nabla(V_{\mu\varphi}) = 0$ (2.10.3.2)

όπου, m η μάζα στήλης ξηρού αέρα

V η ταχύτητα (που προκύπτει από τις οριζόντιες συνιστώσες u,v,∇)

και φ η βαθμωτή αναλογία ανάμιξης.

Αυτές οι εξισώσεις διακρίνονται σε ένα πεπερασμένο όγκο και ως αποτέλεσμα το μοντέλο διατηρεί τη μάζα και την βαθμωτή μάζα. Το διακριτό μοντέλο είναι επίσης συνεπές (η διακριτή βαθμωτή διατήρηση παύει να ισχύει στην εξίσωση μάζας όταν φ=1) και διατηρεί τη συσχέτιση με το ίχνος του ρύπου (tracer correlation). Το μοντέλο ARW χρησιμοποιεί μία 5ης τάξης χωρική αξιολόγηση της οριζόντιας μεταφοράς στη βαθμωτή εξίσωση διατήρησης (conservation equation) και μία 3ης τάξης αξιολόγηση για την κάθετη ροή σε συνδυασμό με ένα 3ης τάξης Runge-Kutta σύστημα ολοκλήρωσης χρόνου. Η τυρβώδης μεταφορά στο οριακό στρώμα εκτελείται χρησιμοποιώντας ένα επίπεδο 2,5 Mellor – Yamada (closure parameterization).

Σε ό,τι αφορά την ξηρή εναπόθεση η ροή των ιχνών των αερίων και των σωματιδίων από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τις συγκεντρώσεις στο χαμηλό επίπεδο με τη χωρική και τη χρονική μεταβαλλόμενη ταχύτητα εναπόθεσης, η οποία είναι ανάλογη του αθροίσματος των τριών αντιστάσεων (αεροδυναμική αντίσταση, αντίσταση υποστρώματος, επιφανειακή αντίσταση). Για την παραμετροποίηση της επιφανειακής αντίστασης χρησιμοποιείται η παραμετροποίηση που αναπτύχθηκε από τον Wesley (1989). Σε αυτήν, η επιφανειακή αντίσταση προέρχεται από τις αντιστάσεις των επιφανειών του εδάφους και των φυτών. Οι ιδιότητες των φυτών προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας δεδομένα χρήσεων γης και εποχής. Η επιφανειακή αντίσταση εξαρτάται επίσης από τη διάχυση την αντιδραστικότητα και την διαλυτότητα του αερίου στο νερό.

2.10.3.1 Το υπομοντέλο GOCART

Το μοντέλο Goddard Chemistry Aerosol Radiation and Transport (GOCART) προσομοιώνει κύρια αερολύματα της ατμόσφαιρας, συμπεριλαμβανομένου του θειικού άλατος, της σκόνης, του μαύρου άνθρακα (BC), του οργανικού άνθρακα (OC) και του θαλάσσιου άλατος.

Το μοντέλο GOCART χρησιμοποιεί μετεωρολογικά πεδία του συστήματος παρακολούθησης γης – σύστημα αφομοίωσης δεδομένων (Goddard Earth System Data Assimilation System – GEOS DAS) το οποίο δημιουργήθηκε από το Goddard Global Modeling Assimilation Office.

Το μοντέλο έχει οριζόντια ανάλυση 2^0 γεωγραφικό πλάτος με 2.5^0 γεωγραφικό μήκος ή 1^0x1^0 , και 20-55 κάθετα sigma επίπεδα (αναλόγως την έκδοση του GEOS DAS).

Οι παρακάτω μέθοδοι περιλαμβάνονται στο μοντέλο:

Εκπομπές

1. Θείο: Οι ανθρωπογενείς εκπομπές SO_2 από ορυκτά καύσιμα και η καύση βιοκαυσίμων, καθώς και η μεταφορά τους λαμβάνεται από τη βάση δεδομένων των εκπομπών για την ατμοσφαιρική έρευνα (Emissions Data Base for Global Atmospheric Research – EDGAR). Οι εκπομπές SO_2 από καύση βιομάζας βαθμονομούνται με τις εποχιακές διακυμάνσεις των δεδομένων της καύσης βιομάζας. Δεδομένα ηφαιστειακών εκπομπών SO_2 υπάρχουν από συνεχώς ενεργά ηφαίστεια και από σποραδικά ενεργά ηφαίστεια (όταν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα). Ωκεάνιες εκπομπές διμεθυλοθειαιθέρα (DMS) υπολογίζονται βάση των επιφανειακών συγκεντρώσεων θαλάσσιου νερού του DMS , σε συνδυασμό με τους ανέμους στα 10 m πάνω από τους ωκεανούς, χρησιμοποιώντας έναν εμπειρικό τύπο.

2. Σκόνη: Το μοντέλο υπολογίζει σωματίδια σκόνης των οποίων η ακτίνα κυμαίνεται από 0.1 έως 10 μικρόμετρα. Η ροή εκπομπών F_p για μία ομάδα μικροσωματιδίων p εκφράζεται ως

$$F_p = \begin{cases} S \cdot s_p \cdot u^2 \cdot (u - u_t), & \alpha\nu\ u > u_t \\ 0\ , & \alpha\nu\ u < u_t \end{cases}$$

Όπου S η συνάρτηση πιθανότητας της πηγής, η οποία είναι η πιθανότητα συσσώρευσης ιζημάτων στις περιοχές γυμνών εδαφών. S_p το ποσοστό της ομάδας μεγέθους, u η ταχύτητα του ανέμου επιφάνειας και u_t η οριακή ταχύτητα αιολικής διάβρωσης, η οποία καθορίζεται από το μέγεθος των σωματιδίων και την επιφανειακή υγρασία.

3. OC και BC: Οι εκπομπές OC και BC λόγω καύσης βιομάζας εκτιμώνται από τη βάση δεδομένων εποχιακών και διαχρονικών μεταβολών της καμένης βιομάζας, η οποία αναπτύχθηκε από μακροχρόνιες δορυφορικές παρατηρήσεις του παγκόσμιου αριθμού πυρκαγιών, τον δείκτη αερολυμάτων και μία μέση ετήσια καύση αποθεμάτων βιομάζας.

4. Θαλάσσιο Αλάτι: Οι εκπομπές θαλάσσιου άλατος από τους ωκεανούς εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα των ανέμων στην επιφάνεια, η οποία υπολογίζεται ως ακολούθως:
   $dF/dr = 1.37u^{3.41}r^{-3}(1 + 0.057r^{1.05})10^{1.19\exp(-B^2)}$
   όπου F η ροή εκπομπών, r η ακτίνα του σωματιδίου , u η ταχύτητα του ανέμου στα 10 m και $B = (0.380 – \log r) / 0.65$

Μεταφορά, Χημεία, Ξηρή και Υγρή Εναπόθεση

Η οριζόντια μεταφορά υπολογίζεται από ένα τύπο ροής με ημι-Λαγκρασιανή μέθοδο. Η τυρβώδης ανάπτυξη στο οριακό στρώμα αντιμετωπίζεται από ένα κλειστό σχήμα δεύτερης τάξης. Η υγρή μεταφορά θερμότητας υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το σύννεφο ροής μάζας, το οποίο βρίσκεται αρχειοθετημένο στα δεδομένα GEOS-DAS. Η ξηρή εναπόθεση περιλαμβάνει τη βαρυτική καθίζηση σαν συνάρτηση των σωματιδίων και του ιξώδους του αέρα, καθώς και την επιφανειακή εναπόθεση σαν συνάρτηση του τύπου επιφανείας και των μετεωρολογικών συνθηκών. Χημικές αντιδράσεις, συμπεριλαμβανομένων και των αντιδράσεων του DMS με το OH στον αέρα και του SO_2 με το H_2O_2 στα σύννεφα υπολογίζεται χρησιμοποιώντας προβλεπόμενα οξειδωτικά πεδία από το μοντέλο IMAGES.

Η ξηρή εναπόθεση υπολογίζεται από τον τύπο

$F=u_dC$

Όπου u_d η ταχύτητα της ξηρής εναπόθεσης και C την συγκέντρωση στο χαμηλότερο στρώμα του μοντέλου

Οπτικό πάχος

Για δεδομένο τύπο και μάζα αερολυμάτων, το οπτικό βάθος του εξαρτώμενου αερολύματος (tau) υπολογίζεται με την ακόλουθη συνάρτηση:

$$tau = BM_d$$

όπου M_d η ξηρή μάζα του αερολύματος, B η ειδική μάζα ή συντελεστής απόσβεσης (m^2g^{-1}), το οποίο εξαρτάται από το δείκτη διάθλασης, τη κατανομή μεγέθους, τη πυκνότητα του σωματιδίου καθώς και τη σχετική υγρασία. Η τιμή B υπολογίζεται με έναν Mie κώδικα ο οποίος στηρίζεται στη βάση δεδομένων οπτικής ιδιότητας του Global Aerosol Data Set (Ginoux et al., 2001).

Το μοντέλο έχει τρεις διαδικασίες:

- Pre-Processing: Επεξεργασία αρχικών και οριακών συνθηκών.
- Run: Τρέξιμο του μοντέλου – Αποτελέσματα.
- Post-Processing: Επεξεργασία αποτελεσμάτων - Δημιουργία γραφικών με τη βοήθεια άλλων προγραμμάτων όπως η NCL (NCAR Command Language)

2.10.4. NCL

Η NCL είναι μία ερμηνευτική γλώσσα προγραμματισμού σχεδιασμένη συγκεκριμένα για την ανάλυση και την ποσοτικοποίηση επιστημονικών δεδομένων. Φορητή, ανθεκτική και ελεύθερη η NCL έχει διαθέσιμο εκτελέσιμο ή ανοιχτό κώδικα, ενώ υποστηρίζει αρχεία NetCDF ¾, GRIB ½, HDF 4/5, HDF-EOS 2/5, shapefiles, ASCII, binary.

Στην NCL είναι ενσωματωμένος ένας αριθμός αναλυτικών λειτουργιών, έτσι ώστε να δημιουργούνται εύκολα, υψηλής ανάλυσης γραφικά (http://www.ncl.ucar.edu/).

ΚΕΦ.3: Μεθοδολογία και Ανάλυση Αποτελεσμάτων

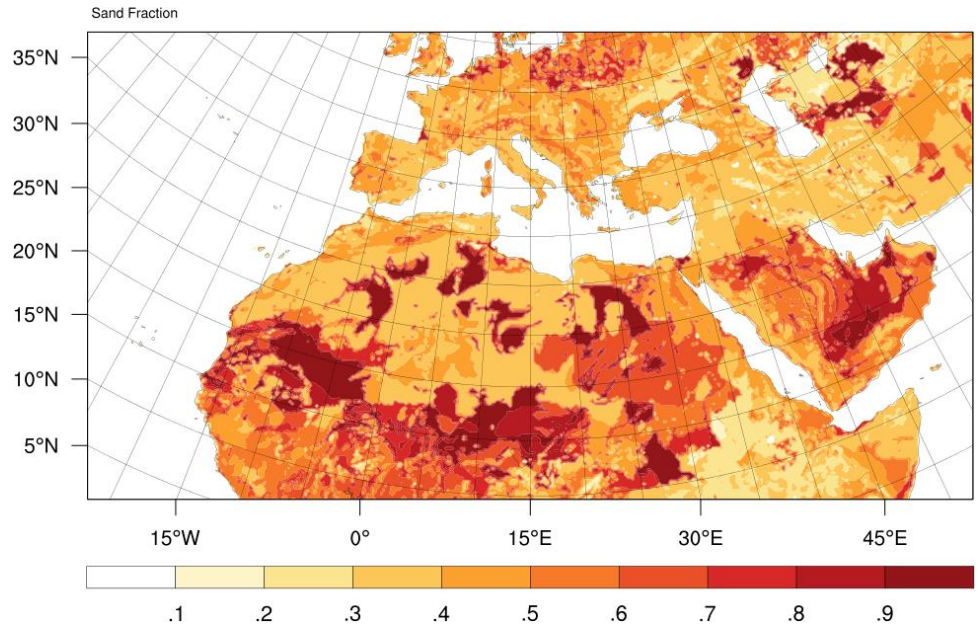
Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν γεγονότα μεταφοράς αφρικανικής σκόνης στην περιοχή της Κύπρου. Οι ημερομηνίες των δύο γεγονότων τα οποία αναλύονται στη συγκεκριμένη μελέτη είναι η 22-25/03/2016 και η 12-15/04/2016.

Αρχικό βήμα της εργασίας ήταν η μελέτη της συνοπτικής κατάστασης της ατμόσφαιρας τόσο στην επιφάνεια και όσο και στα 500 hPa, ώστε να γίνει μία πρώτη ανάλυση της κατάστασης που επικρατούσε στην ατμόσφαιρα τις συγκεκριμένες περιόδους και η οποία προφανώς βοήθησε στην μεταφορά της σκόνη.

Στην συνέχεια η μελέτη επικεντρώθηκε στην προσομοίωση μεταφοράς σκόνης για τις συγκεκριμένες ημερομηνίες. Αυτό έγινε με τη βοήθεια του μοντέλου WRF-Chem v.3.6. Η εκμάθηση του μοντέλου και η προσομοίωση των γεγονότων συμπεριλαμβανόταν στην συνολική εργασία. Το υπομοντέλο αερολυμάτων (aerosol module) GOCART (Georgia Tech/Goddard Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport model, , Chin et al., JGR, 2000), το οποίο χρησιμοποιείται έχει ένα σχήμα σκόνης, το οποίο προσομοιώνει για πέντε τύπους μεγεθών σωματιδίων πραγματικής ακτίνας 0.5, 1.4, 2.4, 4.5 και 8 μm. Στην επιχειρησιακή διαμόρφωση του στο Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο το μοντέλο παράγει πρόγνωση 72 ωρών (3 ημερών), για το φορτίο της σκόνης, τη συγκέντρωση της σκόνης κοντά στην επιφάνεια και τη ξηρή εναπόθεση της σκόνης. Η πρόγνωση γίνεται για την περιοχή της Μεσογείου, η οποία καλύπτει τη Βόρειο Αφρική, την Ευρώπη, τη Μέση Ανατολή και την Αραβική Χερσόνησο. Το επιχειρησιακό πεδίο ορισμού (operational domain) αποτελείται από 400x212 σημεία πλέγματος (grid points), πάνω σε απόσταση πλέγματος (grid distance) 25x25 km , με 38 κάθετα επίπεδα πάνω από τα 25 hPa. Οι πηγές σκόνης αναγνωρίζονται από το μοντέλο μέσω βάσεων δεδομένων αναλογιών για άργιλο και άμμο, τις οποίες υπολογίζει το μοντέλο βάση της περιοχή μελέτης.

Επίσης, το υπομοντέλο GOCART περιλαμβάνει ένα σχήμα προσομοίωσης της μεταφοράς θαλάσσιου άλατος, παρέχοντας πρόγνωση για τέσσερις τύπους μεγεθών σωματιδίων πραγματικής ακτίνας 0.3, 1.0, 3.2, 7.5 μm, που αφορά στην κάλυψη της αντίστοιχης με τη σκόνη περιοχή. Στο Σχήμα 4.1 εμφανίζεται η περιοχή προσομοίωσης του GOCART, ενώ στον πίνακα 4.1 εμφανίζονται συγκεντρωτικά τα χαρακτηριστικά

του τμήματος GOCART.



Σχήμα 3.1. Περιοχή προσομοίωση του υπομοντέλου GOCART (Πηγή: http://meteoclima.hua.gr)

Χαρακτηριστικά τμήματος GOCART (Georgia Tech/Goddard Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport model) του WRF-Chem		
5 particle - size bins (for dust)	0.5, 1.4, 2.4, 4.5 & 8 μm	
4 particle-size bins (for sea salt)	*0.3, 1.0, 3.2 & 7.5 μm*	
Περίοδος Πρόγνωσης	72-hour	
Πεδίο ορισμού: Βόρειος Αφρική, Ευρώπη, Μέση Ανατολή, Χερσόνησος Σαουδικής Αραβίας	400x212 grid points, σε 25x25km grid distance	38 κάθετα επίπεδα πάνω από τα 25 hPa

Πίνακας 3. 1: Συνοπτική περιγραφή τμήματος GOCART του WRF-Chem, (Πηγή http://meteoclima.hua.gr/)

Οι αρχικές και οριακές συνθήκες του μοντέλου προέρχονται από το σύστημα GFS (Global Forecast System). Το Παγκόσμιο Σύστημα Πρόγνωσης (Global Forecast System - GFS) είναι ένα μοντέλο πρόγνωσης καιρού που δημιουργήθηκε από το Εθνικό Κέντρο Περιβαλλοντικής Πρόγνωσης (National Centers for Environmental Prediction – NCEP). Μέσω αυτού του συνόλου δεδομένων γίνονται διαθέσιμες όλες οι μεταβλητές της ατμόσφαιρας, του εδάφους και της θάλασσας, για την αρχικοποίηση του επιχειρησιακού WRF-Chem.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις δύο περιόδους αξιολογήθηκαν με βάση

δεδομένα από επίγειους σταθμούς μέτρησης. Στο τελικό στάδιο έγινε η επαλήθευση του μοντέλου. Για να γίνει η επαλήθευση του μοντέλου γίνεται σύγκριση μεταξύ της προβλεπόμενης από το μοντέλο συγκέντρωσης σκόνης και των μετρούμενων PM10 μικροσωματιδίων από επίγειους σταθμούς μέτρησης.

Οι μετρήσεις αυτές αντλήθηκαν από την επίσημη ιστοσελίδα της κυβέρνησης της Κύπρου (Υπουργείο Εργασίας, Πρόνοιας και Κοινωνικών Ασφαλίσεων) και του Τμήματος Επιθεώρησης Εργασίας (ΤΕΕ) για την Ποιότητα Αέρα στην Κύπρο (http://www.airquality.dli.mlsi.gov.cy/site/). Η συγκεκριμένη ιστοσελίδα ενημερώνεται καθημερινά για τη συγκεντρώσεις των μετρούμενων ρύπων, ανά ώρα. Στην περίπτωση της συγκεκριμένης εργασίας χρειάζονται οι μετρήσεις των PM10 και PM2.5 οι οποίες κατέστη δυνατό να βρεθούν από του σταθμούς της Λάρνακας – Λευκωσίας – Λεμεσού. Εν συνεχεία ήταν δυνατή και η εύρεση δεδομένων για τον σταθμό της Αγίας Μαρίνας Ξυλιάτου, τα οποία ήταν και πάλι δεδομένα του παραπάνω υπουργείου, αλλά δόθηκαν από το Ινστιτούτο της Κύπρου. Η σύγκριση, όπως θα αναφερθεί και στη συνέχεια, γίνεται μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των σταθμών που έχουν μετρήσεις για όλες τις ώρες τις οποίες μετράει το μοντέλο. Δηλαδή, έχουν αποκλειστεί οι σταθμοί στους οποίους λείπουν μετρήσεις κατά τις ώρες ενδιαφέροντος.

Σε αυτό το σημείο κρίνεται απαραίτητο να σημειωθεί ότι, οι μετρήσεις που προέρχονται από την ιστοσελίδα όπως αναφέρεται και εντός αυτής προέρχονται απευθείας από τους σταθμούς μέτρησης χωρίς να ελεγχθούν. Έτσι, ενδέχεται να υπάρχουν σφάλματα στις τιμές. Αντιθέτως οι μετρήσεις οι οποίες δόθηκαν από το Ινστιτούτο τη Κύπρου υπάρχουν σε μορφή ψηφιακών δεδομένων και έχουν ελεγχθεί ως προς την ποιότητα τους.

Στην παρακάτω εικόνα (4.1) φαίνονται οι θέσεις των σταθμών μέτρησης των ρύπων, οι οποίοι μελετήθηκαν στην συγκεκριμένη εργασία:



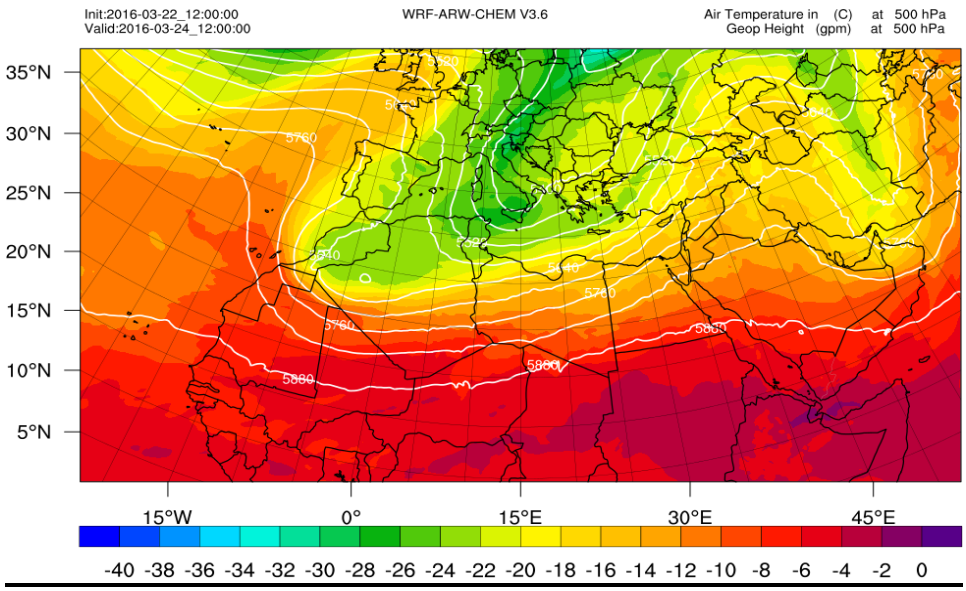
Εικόνα 3.1: Θέση των υπό μελέτη σταθμών (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Παρακάτω το κεφάλαιο επικεντρώνεται στην ανάλυση των δύο γεγονότων. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η ανάλυση βασίστηκε αρχικά στη μελέτη της συνοπτικής κατάστασης της ατμόσφαιρας με τη βοήθεια χαρτών επιφανείας, χαρτών γεωδυναμικών υψών στα 500 hPa αλλά και χαρτών για το ανεμολογικό καθεστώς. Εν συνεχεία γίνεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων του μοντέλου WRF-Chem για το φορτίου της σκόνης, το οποίο μελετάται σε ύψος 3 km και μετράται σε χιλιοστόγραμμα ανά τετραγωνικό μέτρο (mgm^{-2}). Έπειτα η εκτίμηση επικεντρώνεται στη συγκέντρωση της σκόνης κοντά στην επιφάνεια. Σε αυτή την περίπτωση οι προβλέψεις αναφέρονται στα 2 m και έχουν μονάδα μέτρησης τα μικρογραμμάρια ανά κυβικό μέτρο (μgm^{-3}). Τέλος, γίνεται πρόβλεψη της ξηρής εναπόθεσης της σκόνης η οποία μετράται σε χιλιοστόγραμμα ανά τετραγωνικό μέτρο (mgm^{-2}).

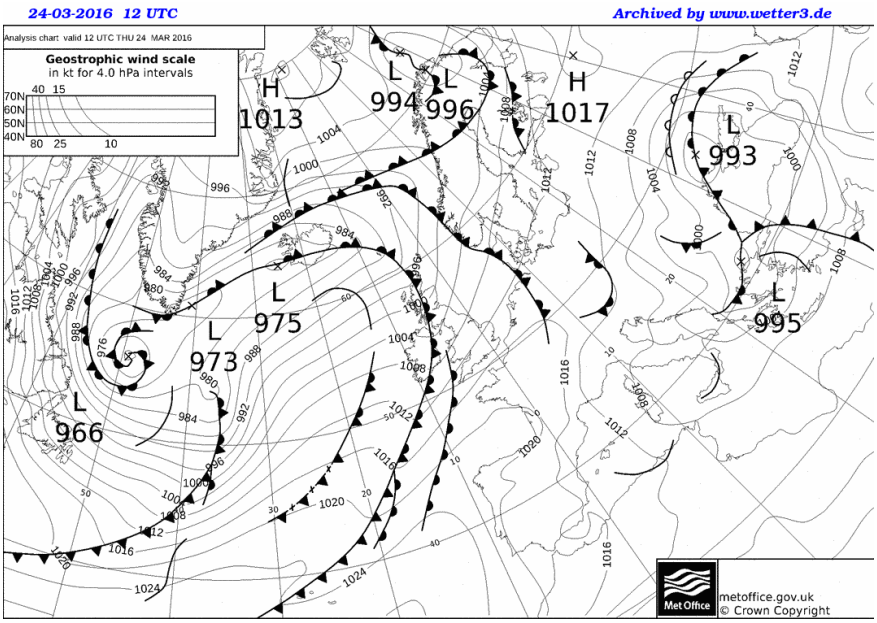
3.1. Περίπτωση 22-25/03/2016

Όπως φαίνεται από τον χάρτη της συνοπτικής κατάστασης στα 500 hPa (Χάρτης 3.1.1), στον οποίο παρουσιάζονται το γεωδυναμικό ύψος και η θερμοκρασία, η περιοχή της Κύπρου και της Μέσης Ανατολής καλύπτεται από μία σφήνα εξάρσεως (ridge), η οποία μεταφέρει θερμές αέριες μάζες από τη Βόρεια Αφρική. Στην κεντρική Μεσόγειο επικρατεί μία σφήνα υφέσεως με ΒΑ διεύθυνση η οποία μεταφέρει ψυχρές αέριες μάζες

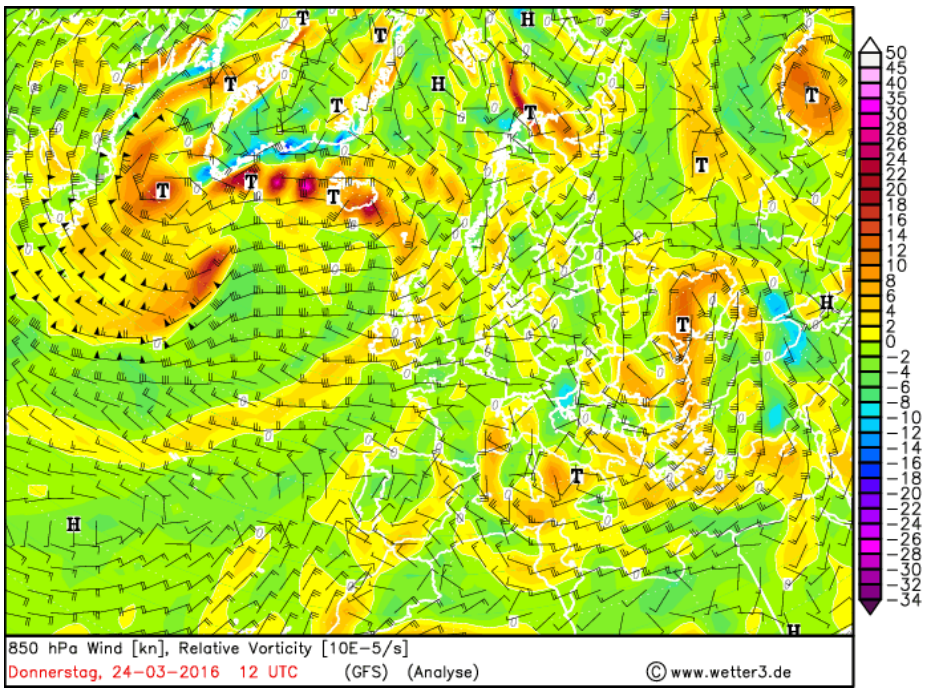
προς την περιοχή. Αυτή συνδυάζεται με ένα καλά οργανωμένο χαμηλό βαρομετρικό (Χάρτης 3.1.2) που συνοδεύεται από ψυχρό μέτωπο πάνω από την Κύπρο μπροστά από το οποίο μεταφέρονται αέριες μάζες από τη Βόρεια Αφρική. Οι άνεμοι μεγάλης έντασης που βοήθησαν στην μεταφορά των θερμών αέριων μαζών προς την περιοχή της Κύπρου γίνονται ιδιαίτερα εμφανής στο χάρτη του ανεμολογικού καθεστώτος (Χάρτης 3.1.3)



Χάρτης 3.1.1: Χάρτης γεωδυναμικού ύψους και θερμοκρασίας στα 500 hPa για τις 24/03/2016 στις 12UTC (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)



Χάρτης 3.1.2: Χάρτης επιφανείας για τις 24/03/2016 στις 12 UTC Πηγή: http://www1.wetter3.de/Archiv/archiv_ukmet.html

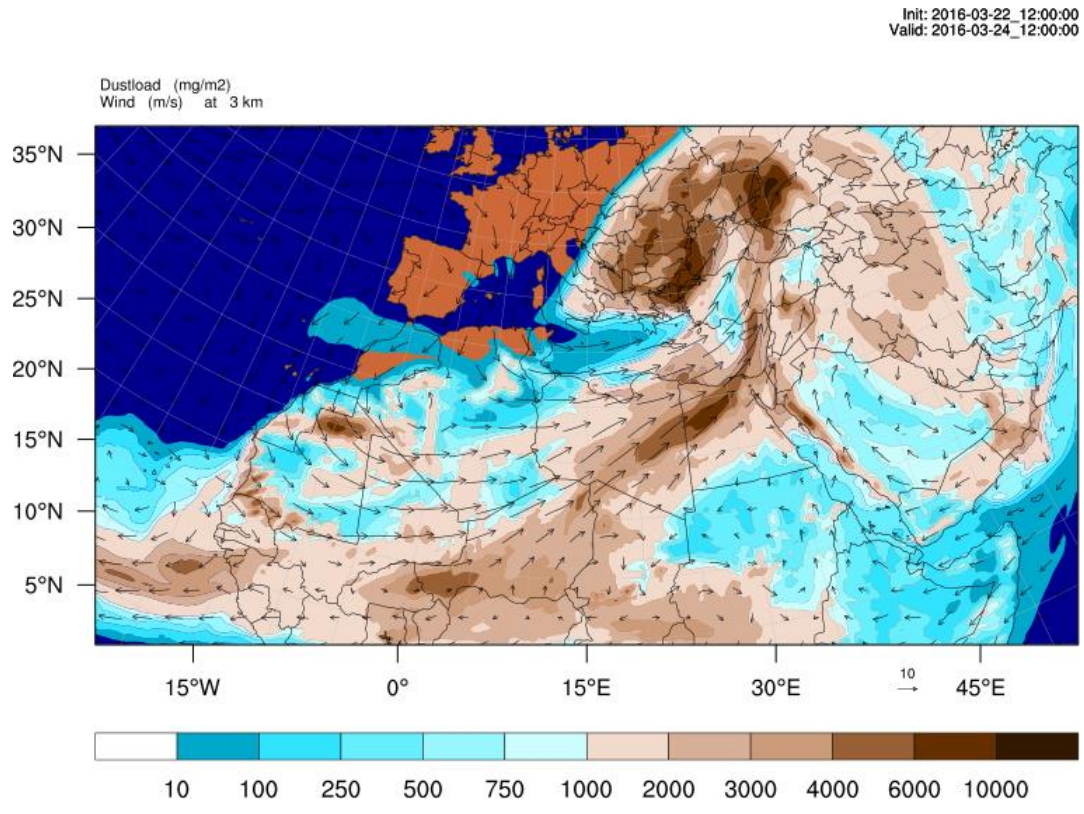


Χάρτης 3.1.3. Ανεμολογικό καθεστώς και στροβιλισμός (vorticity) στα 850 hPa για τις 24/03/2016 στις 12 UTC
Πηγή: http://www1.wetter3.de/Archiv/archiv_ukmet.html

Η ύπαρξη σφήνας εξάρσεως στην περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου και η μεταφορά θερμών αέριων μαζών λόγω αυτής βοήθησαν στην ανάπτυξη μεταφοράς αφρικανικής σκόνης στην περιοχή. Το φαινόμενο άρχισε να εμφανίζεται και να εντείνεται στην περιοχή στις 22/03/2016, ενώ στις 24/03/2016 το προβλεπόμενο συνολικό φορτίο της σκόνης (dust load) έφτασε σε μέγιστες τιμές, ξεπερνώντας ακόμη και τα 6000mgm^{-2}. Στον χάρτη 3.1.4 εμφανίζεται η πρόβλεψη του φορτίου της σκόνης για τις 24/03/2016 και ώρα 12 UTC, στιγμιότυπο κατά το οποίο το μοντέλο εμφάνιζε τη μέγιστη πρόβλεψη.

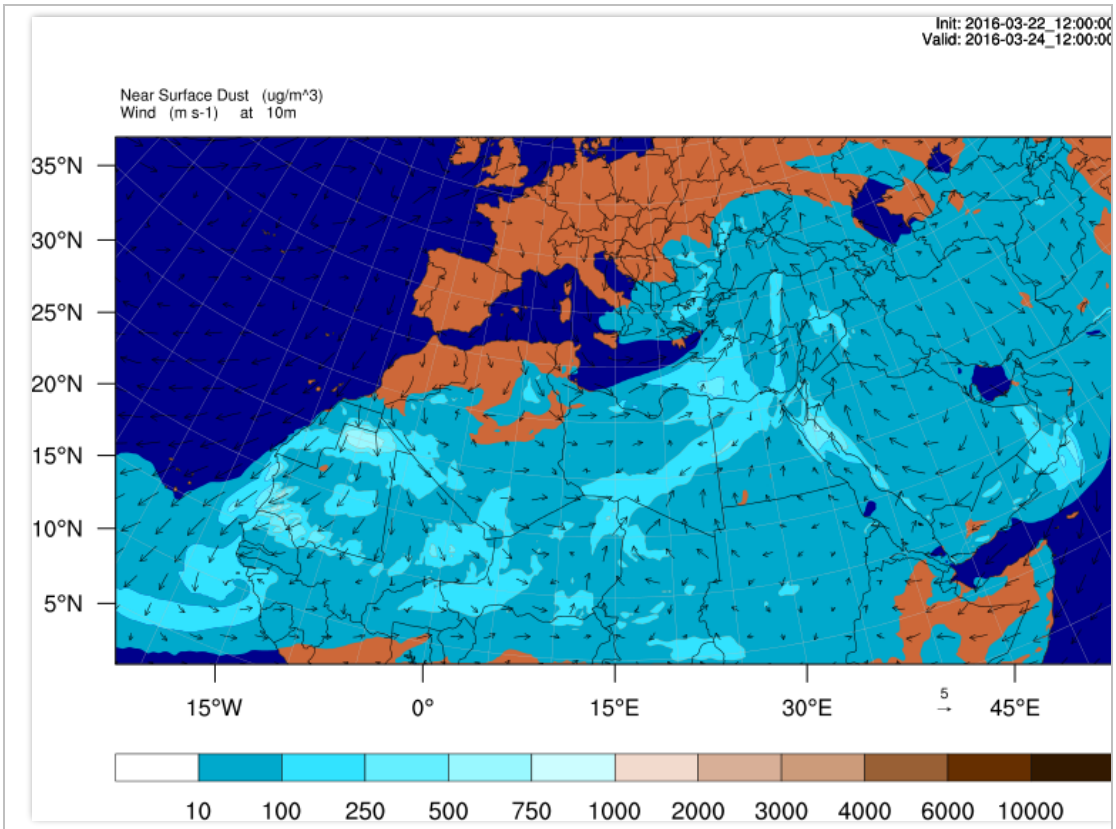
Το μεγαλύτερο πρόβλημα, όπως φαίνεται από τον Χάρτη 3.1.4 εντοπίζεται στην ανατολική πλευρά του νησιού. Επιπλέον, γίνεται εμφανής η ένταση του φαινομένου καλύπτοντας πολύ μεγάλο μέρος της Ευρώπης αλλά και όλη τη Μέση Ανατολή. Σε αυτό το σημείο, είναι ενδιαφέρον να τονιστεί ο τρόπος με τον οποίο η κίνηση της σκόνης κατά τη μεταφορά της ακολουθεί τη διεύθυνση του ανέμου. Συγκεκριμένα από το μοντέλο φάνηκε ότι άνεμοι νότιο δυτικής διεύθυνσης (δηλαδή με κίνηση προς τα βορειοανατολικά) βοήθησαν στη μεταφορά σκόνης από τη Βόρεια Αφρική, και κυρίως τη ΝΑ Λιβύη και την Αίγυπτο. Το συγκεκριμένο «κύμα» σκόνης φαίνεται να δημιούργησε έντονα φαινόμενα τόσο στην Κύπρο όσο και στην Ελλάδα και την Τουρκία. Επιπλέον, στην περιοχή της Ελλάδας εμφανίζεται επιστροφή του νέφους

σκόνης από τα Βαλκάνια, αυτό συμβαίνει λόγω του ανέμου ο οποίος ακολουθεί αυτή την πορεία και αυτό φαίνεται τόσο στο χάρτη του γεωδυναμικού ύψους όσο και στα σχήματα φορτίου και συγκέντρωσης σκόνης η οποία εμφανίζεται στο Χάρτη 3.1.5.



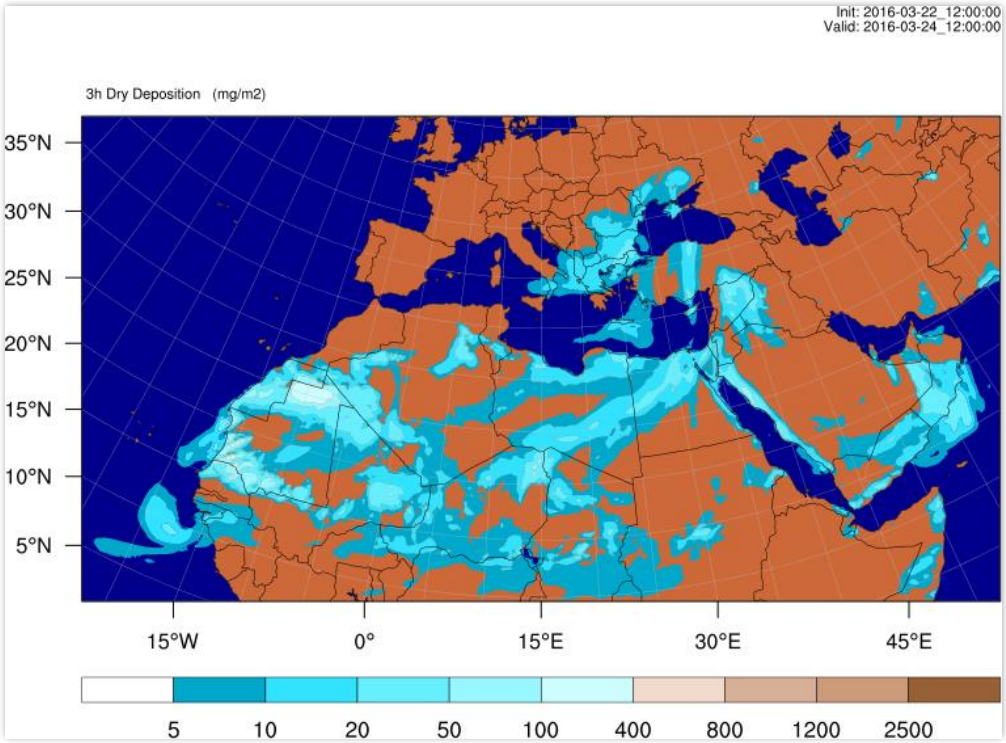
Χάρτης 3.1.4: Χάρτης φορτίου σκόνης (dust load) με διεύθυνση ανέμου στα 3 km για τις 24/03/2016 στις 12UTC (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Έχοντας λοιπόν, προβλέψει το φορτίο της σκόνης στη συνέχεια γίνεται μελέτη της συγκέντρωσης της σκόνης (dust concentration) κοντά στην επιφάνεια. Η συγκέντρωση στις 24/03/2016 και ώρα 12 UTC (Χάρτης 3.1.5). Οι συγκεντρώσεις σκόνης την 24η Μαρτίου 2016 ξεπέρασαν τα 80 μg/m^3, ενώ ανά περιοχές εμφανίζεται να έχουν υπερβεί τα 100 μg/m^3 (στην κεντρική περιοχή του νησιού).



Χάρτης 3.1.5: Χάρτης συγκέντρωσης σκόνης (dust concentration) και διεύθυνση ανέμου στα 10 m για τις 24/03/2016 στις 12UTC (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Η τρίωρη ξηρή εναπόθεση σκόνης την ώρα της κορύφωσης του φαίνεται στον παρακάτω χάρτη (Χάρτης 3.1.6). Για την συγκεκριμένη περίπτωση κατά την περίοδο του φαινομένου οι μεγαλύτερες τιμές ξηρής εναπόθεσης που παρατηρήθηκαν ξεπερνούν τα 20 mg/m^2.



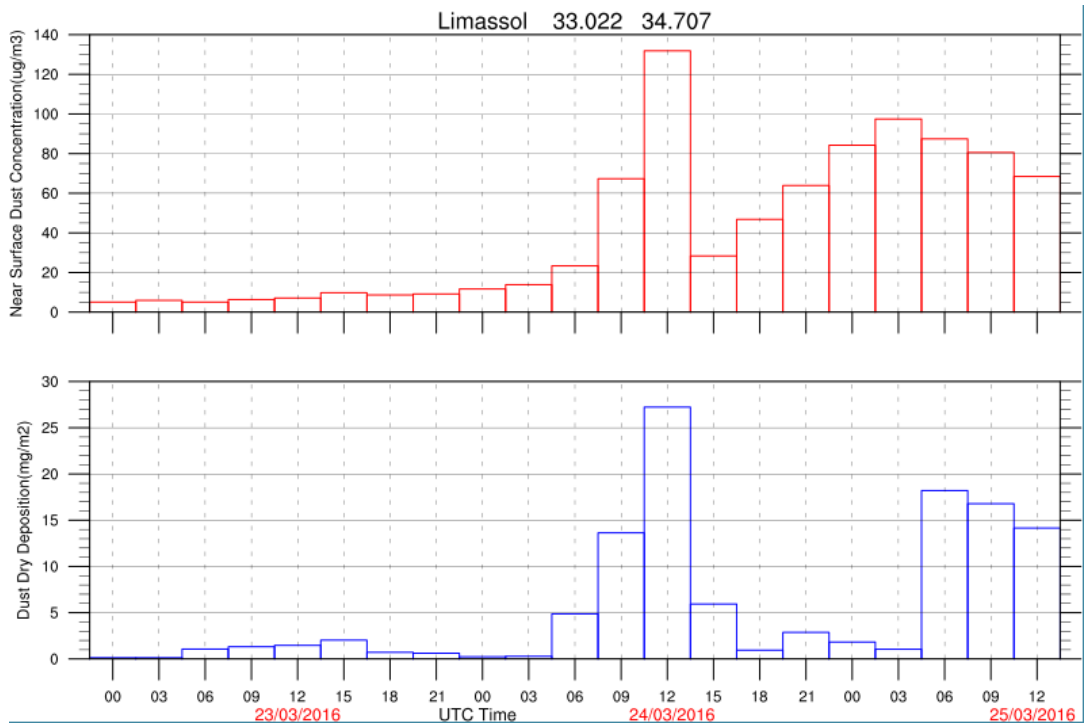
Χάρτης 3.1.6: Χάρτης ξηρής εναπόθεσης (dry deposition) για τις 24/03/2016 στις 12UTC (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Παρακάτω εμφανίζεται η χρονική εξέλιξη του φαινομένου, καθ' όλη τη διάρκεια του, με τη βοήθεια ιστογραμμάτων (Διαγράμματα 3.1.1-3.1.4). Συγκεκριμένα απεικονίζονται η συγκέντρωση της σκόνης κοντά στην επιφάνεια και η ξηρή εναπόθεση αυτής, για τις ημερομηνίες 23-25/03/2016 και για τις θέσεις των σταθμών μέτρησης ποιότητας αέρα στις περιοχές της Λεμεσού – Λάρνακας – Λευκωσίας-Αγίας Μαρίνας.

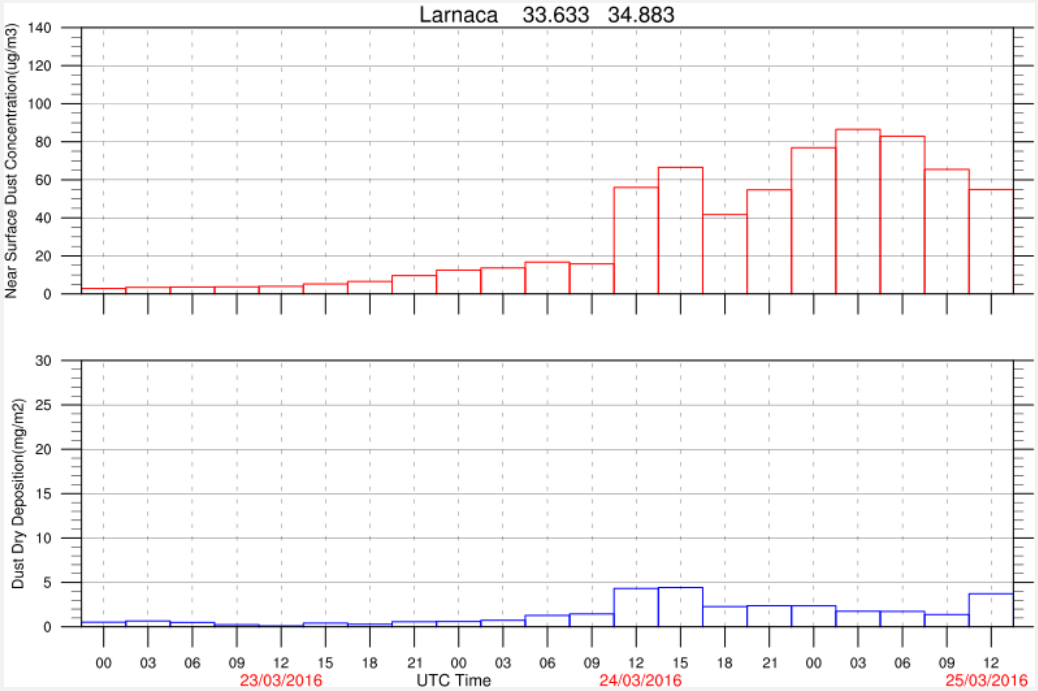
Όπως φαίνεται από τα παρακάτω ιστογράμματα, για την περιοχή της Λεμεσού υπάρχει ιδιαίτερα μεγάλη συγκέντρωση σκόνης στις 24/03/2016 και ώρα 12 UTC η οποία ξεπερνά τα 120 μgm^{-3}, ενώ καθ' όλη τη διάρκεια της 25ης Μαρτίου 2016 υπήρχαν υψηλές συγκεντρώσεις κοντά και πάνω από τα 80 μgm^{-3}. Στην περιοχή της Λάρνακας η συγκέντρωση της σκόνης εμφανίζει μέγιστες τιμές κατά τις 25/03/2016, όπου επικρατούν συγκεντρώσεις κοντά και πάνω από τα 80μgm^{-3}. Υψηλότερη τιμή συγκέντρωσης σκόνης για την περιοχή της Λευκωσίας εντοπίζεται στις 24/03/2016 και ώρα 12 UTC, ξεπερνώντας τα 120 μgm^{-3}. Από την πρόγνωση για την περιοχή της Αγίας Μαρίνας, φαίνεται ότι η μεγαλύτερη προγνωστική συγκέντρωση σκόνης κοντά στην επιφάνεια εμφανίζεται στις 24/03/2016 και ώρα 12UTC. Συγκεκριμένα η πρόγνωση αυτής της στιγμής είναι κοντά στα 135 μgm^{-3}. Υψηλές συγκεντρώσεις

αναμένονταν και κατά τις επόμενες ώρες με τις προβλέψεις για τις 25/03/2016 να είναι από τα 80 μg/m^3 και πάνω. Οι ελάχιστες τιμές και για τις τέσσερις περιοχές εμφανίζονται, όπως είναι λογικό, κατά τις πρώτες ώρες δημιουργίας του φαινομένου.

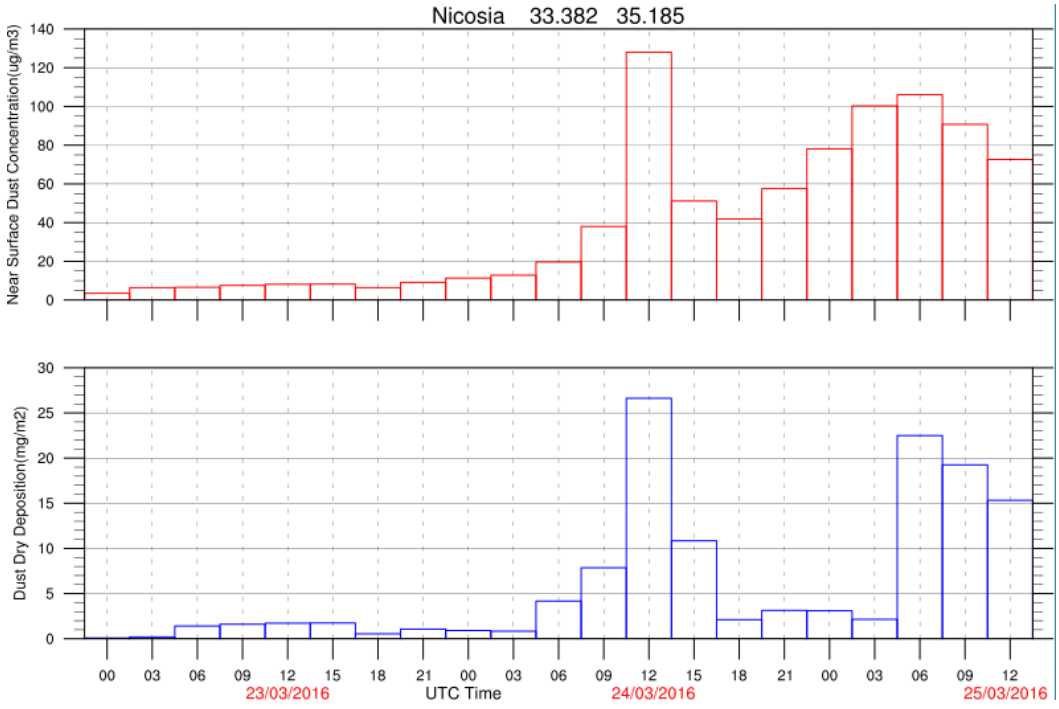
Σε ότι αφορά την ξηρή εναπόθεση της σκόνης, στην περιοχή της Λεμεσού, μέγιστη τιμή παρατηρείται στις 24/03/2016 και ώρα 12 UTC (κοντά στα 28mgm^2). Στην περιοχή της Λάρνακας υπάρχει πολύ λιγότερη ξηρή εναπόθεση, λίγο πάνω από 4 mgm^{-2}, στις 24/03/2016 και ώρες 12 και 15 UTC. Η μέγιστη τιμή της ξηρής εναπόθεσης για την περιοχή της Λευκωσίας είναι τα ~27mgm^{-2}, η οποία προβλέφθηκε για τις 24/03/2016 και ώρα 12 UTC. Και σε αυτήν την περίπτωση οι χαμηλότερες τιμές ξηρής εναπόθεσης αναμένονταν τις πρώτες ώρες μελέτης. Αυτό είναι λογικό αφού το φαινόμενο δεν έχει προλάβει να ξεκινήσει. Στη συνέχεια εντοπίζεται μείωση της ξηρής εναπόθεσης κατά τις απογευματινές και βραδινές ώρες της 24ης Μαρτίου. Αυτό φαίνεται ιδιαίτερα στις περιοχές της Λεμεσού και της Λευκωσίας. Τέλος, σε ότι αφορά την ξηρή εναπόθεση της σκόνης στην περιοχή της Αγίας Μαρίνας η μέγιστη προγνωστική τιμή είναι και πάλι στις 12 UTC της 24ης Μαρτίου όπου ξεπερνά τα 25 mgm^{-2}. Υψηλές τιμές ξηρής εναπόθεσης αναμένονται από το μοντέλο και κατά τις τελευταίες ώρες τις ανάλυσης, δηλαδή από τις 6 UTC έως τις 12 UTC της 25ης Μαρτίου όπου οι τιμές ξεπερνούν ακόμη και τα 20 mgm^{-2}.



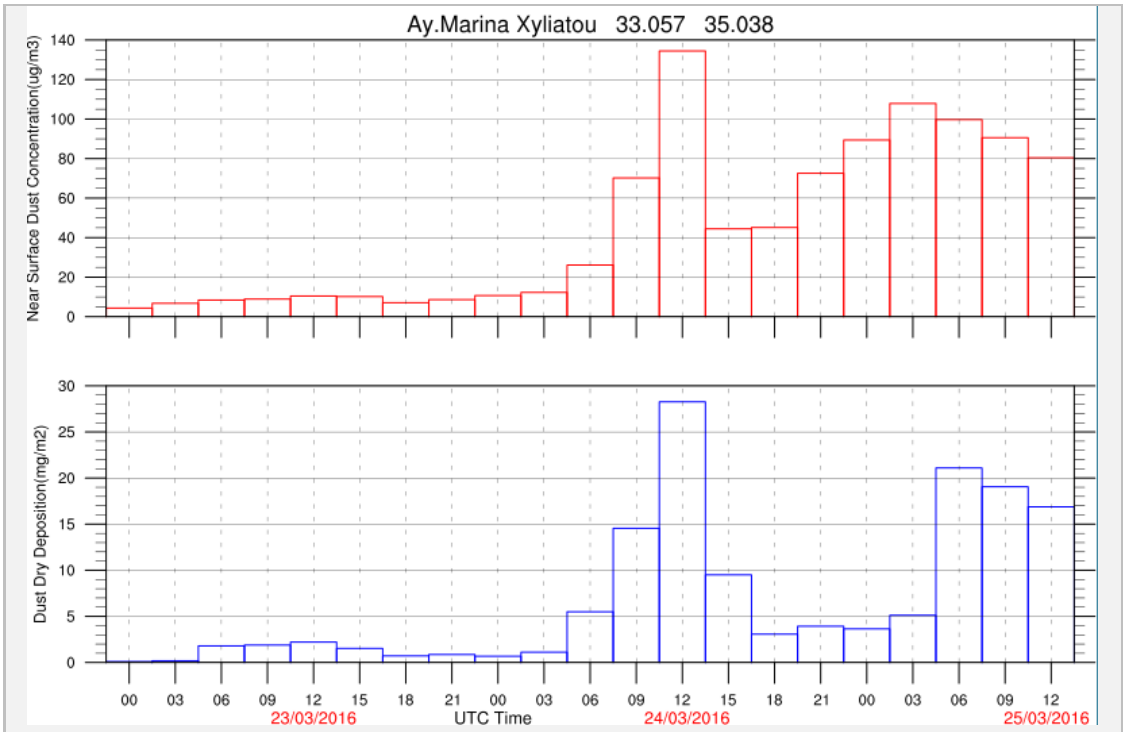
Διαγράμματα 3.1.1: Ιστογράμματα συγκέντρωσης σκόνης (κόκκινο) και ξηρής εναπόθεσης σκόνης (μπλε) για τις 23-25/03/2016 για την περιοχή της Λεμεσού (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)



Διαγράμματα 3.1.2: Ιστογράμματα συγκέντρωσης σκόνης (κόκκινο) και ξηρής εναπόθεσης σκόνης (μπλε) για τις 23-25/03/2016 για την περιοχή της Λάρνακας (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)



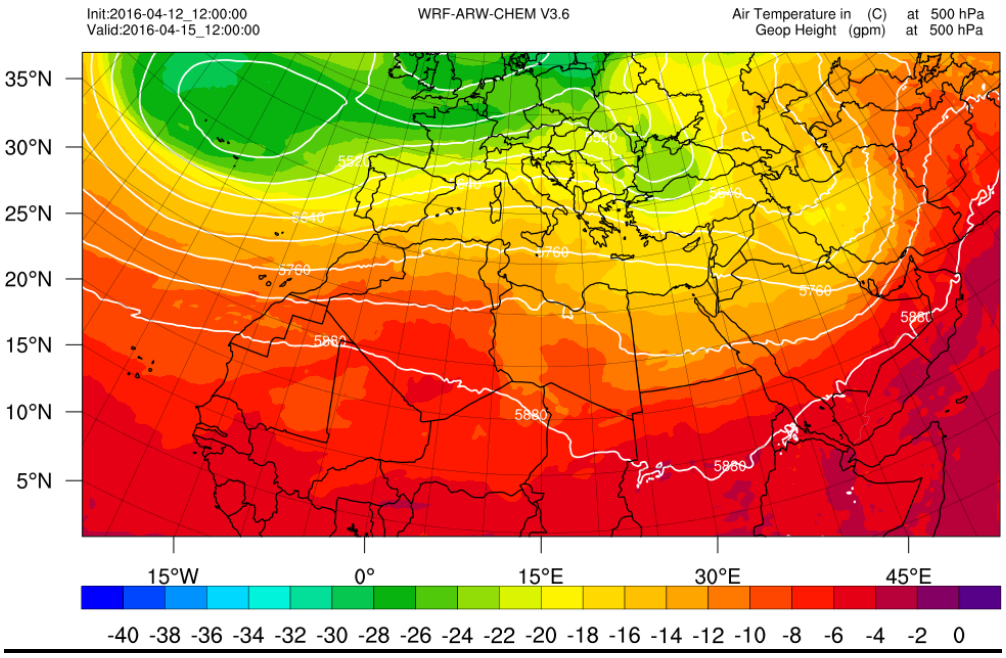
Διαγράμματα 3.1.3: Ιστογράμματα συγκέντρωσης σκόνης (κόκκινο) και ξηρής εναπόθεσης σκόνης (μπλε) για τις 23-25/03/2016 για την περιοχή της Λευκωσίας (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)



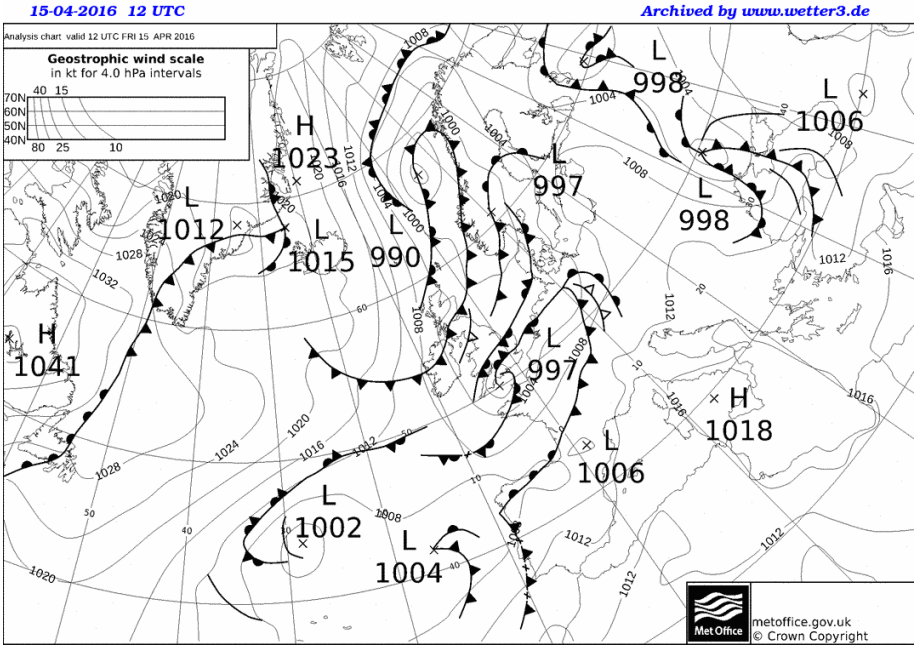
Διαγράμματα 3.1.4: Ιστογράμματα συγκέντρωσης σκόνης (κόκκινο) και ξηρής εναπόθεσης σκόνης (μπλε) για τις 23-25/03/2016 για την περιοχή της Αγίας Μαρίνας (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

3.2. Περίπτωση 13- 15/04/2016

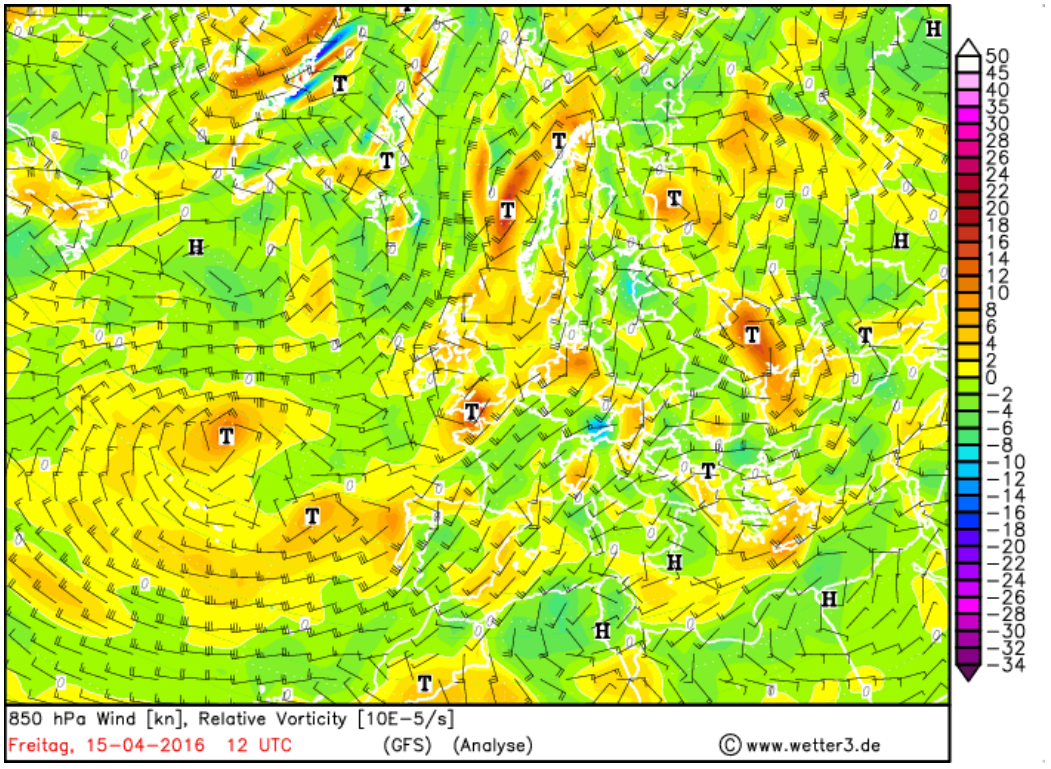
Σε αυτήν την περίπτωση εμφανίζεται μία ασθενής σφήνα εξάρσεως στην κεντρική Μεσόγειο μετά το πέρασμα μίας σφήνας υφέσεως η οποία έχει προχωρήσει προς την ανατολική Τουρκία και το Ιράν (Χάρτης 4.2.1) . Η σφήνα εξάρσεως μεταφέρει θερμές αέριες μάζες από την Βόρεια Αφρική αρχικά προς την Κεντρική Μεσόγειο και στη συνέχεια προς την Ελλάδα και την Κύπρο. Στην Ανατολική Μεσόγειο επικρατεί μέτρια συνοπτική ροή δυτικών διευθύνσεων καθ' ύψος η οποία έμμεσα μεταφέρει σκόνη από τη δυτική Λιβύη. Στην επιφάνεια επικρατούν υψηλές πιέσεις (1016 hPa στην Κύπρο). Η κίνηση των θερμών αέριων μαζών προς την Ελλάδα και την Κύπρο φαίνεται ιδιαίτερα και στον χάρτη του ανεμολογικού καθεστώτος (Χάρτης 4.2.3).



Χάρτης 3.2.1:Χάρτης γεωδυναμικού ύψους και θερμοκρασίας στα 500 hPa για τις 15/04/2016 12UTC (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

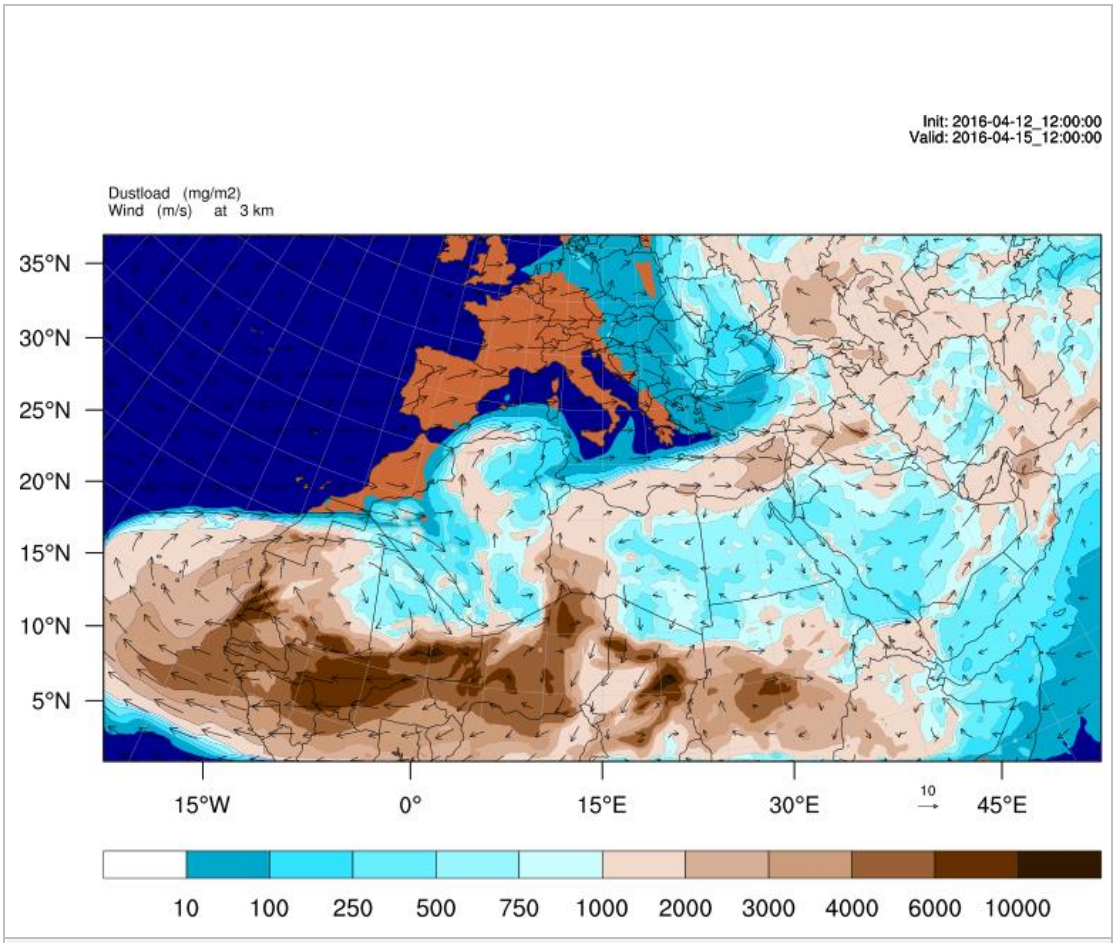


Χάρτης 3.2.2:Χάρτης επιφανείας για τις 15/04/2016 στις 12UTC Πηγή: http://www1.wetter3.de/Archiv/archiv_ukmet.html



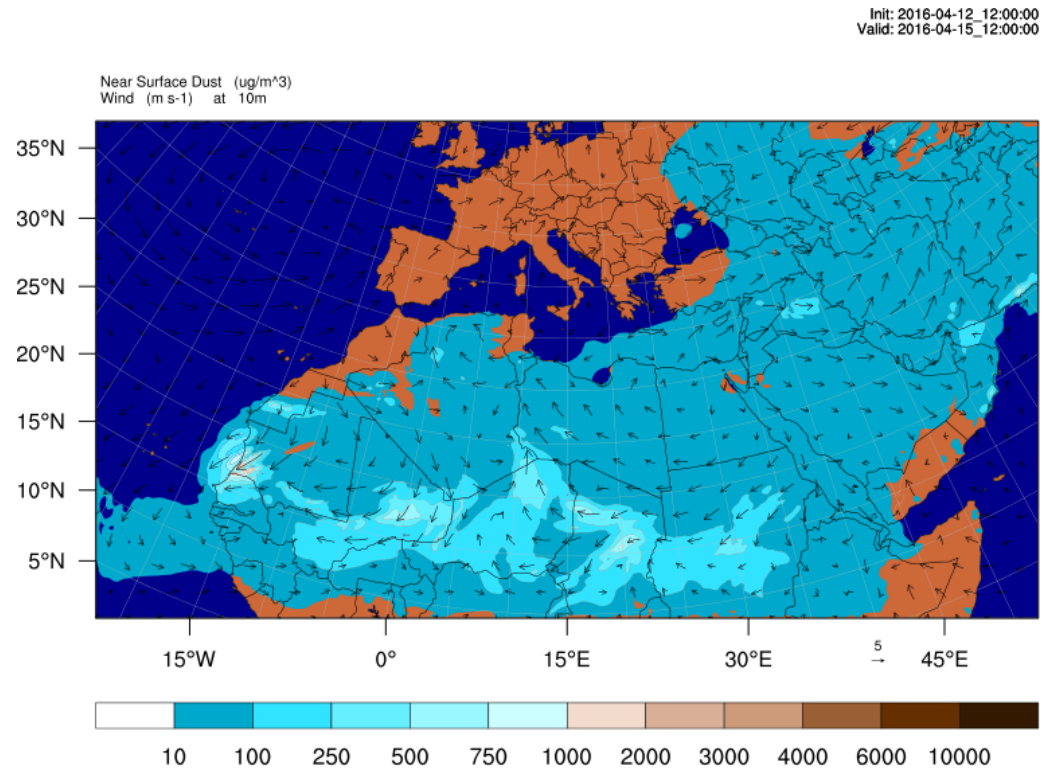
Χάρτης 3.2.3: Ανεμολογικό καθεστώς και στροβιλισμός στα 850 hPa για τις 15/04/2016 στις 12UTC Πηγή: http://www1.wetter3.de/Archiv/archiv_ukmet.html

Για την περίοδο13-15/04/2016, το μοντέλο προσομοίωσε τη δεύτερη περίπτωση μεταφοράς σκόνης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η σφήνα εξάρσεως ήταν λιγότερο έντονη, και ίσως για αυτόν το λόγο και η μεταφορά του φορτίου της σκόνης είχε μικρότερη ένταση. Παρακάτω εμφανίζεται ο χάρτης φορτίου σκόνης (Χάρτης 4.2.4) κατά τις 15/04/2016 και ώρα 12 UTC, η οποία ήταν η στιγμή που το μοντέλο πρόβλεψε τις μεγαλύτερες τιμές. Σε όλη την έκταση της περιοχής προσομοίωσης από το μοντέλο η σκόνη φαίνεται να έχει πολύ μικρότερο φορτίο από την προηγούμενη περίπτωση, ενώ στην περιοχή μελέτης της συγκεκριμένης εργασίας το φορτίο της σκόνης ανέρχεται στα 2000-4000 mgm^{-2}. Το μεγαλύτερο πρόβλημα εντοπίζεται στο ανατολικό τμήμα του νησιού όπου προβλέφθηκε φορτίο σκόνης πάνω από τα 3000 mgm^{-2}. Σε αυτή την περίπτωση κύριες πηγές της μεταφοράς αποτελούν η Δυτική Λιβύη και η Αλγερία. Η σκόνη η οποία απελευθερώθηκε από τις περιοχές αυτές ακολούθησε τη δυτική συνοπτική κυκλοφορία προς την Κύπρο.



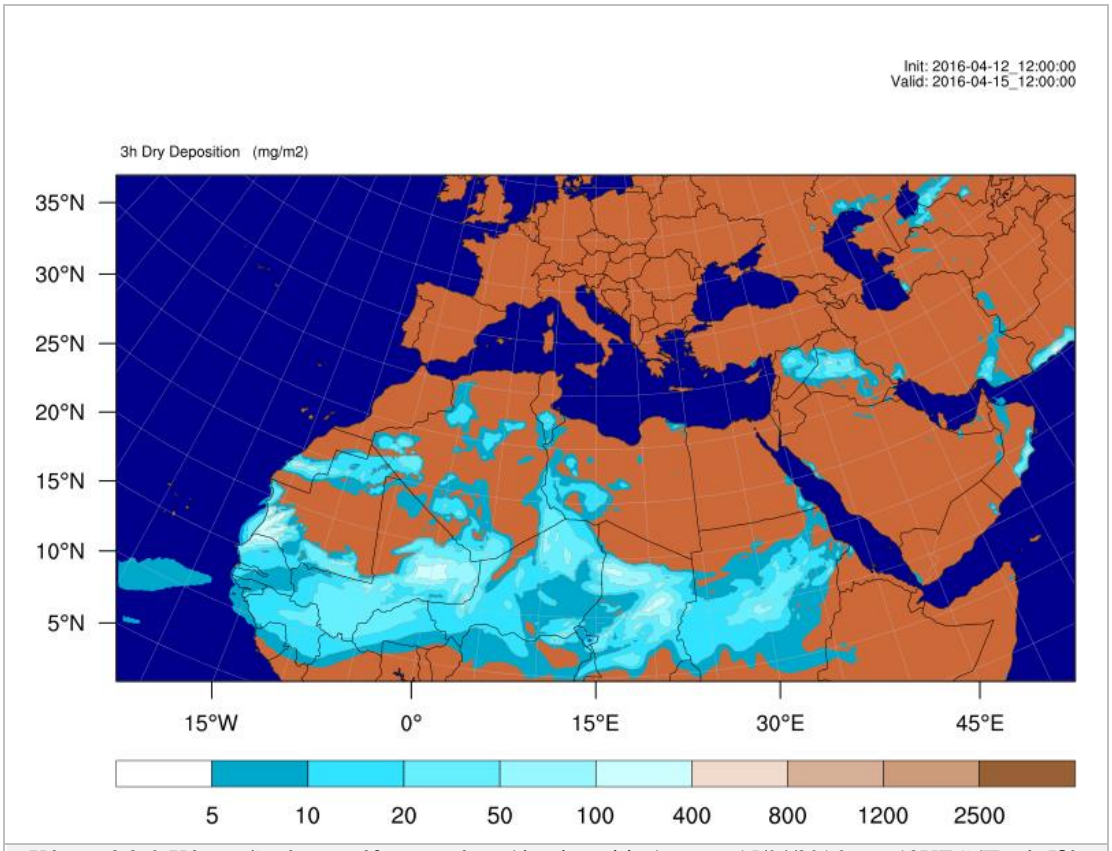
Χάρτης 3.2.4: Χάρτης φορτίου σκόνης (dust load) για τις 15/04/2016 στις 12 UTC (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Παρακάτω εμφανίζεται ο χάρτης της συγκέντρωσης σκόνης (Χάρτης 4.2.5), στον οποίο εμφανίζεται η πρόβλεψη για τις 15/04/2016 και ώρα 12, δηλαδή τη ώρα μέγιστης έντασης του φαινομένου σύμφωνα με το μοντέλο. Σε ό,τι αφορά τη συγκέντρωση σκόνης κοντά στην επιφάνεια, η προσομοίωση έδειξε ότι η συγκέντρωση θα ανέρχεται έως και τα πάνω από τα 50 μgm^3. Σε όλη την έκταση του νησιού φαίνεται ότι η συγκέντρωση είναι περίπου στα ίδια επίπεδα, πάνω από τα 10 μgm^{-3} αλλά χωρίς να ξεπερνούν τα 100 μgm^{-3}. Συγκεκριμένα για όλο το νησί οι πρόβλεψη κυμαίνεται από 45 έως λίγο πάνω από τα 50 μgm^{-3}.



Χάρτης 3.2.5: Χάρτης συγκέντρωσης σκόνης (dust concentration) για τις 15/04/2016 στις 12UTC (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Τέλος, και για αυτήν την περίπτωση γίνεται εκτίμηση της ξηρής εναπόθεσης της σκόνης (Χάρτης 4.2.6). Η εναπόθεση της σκόνης περιορίστηκε στην περιοχή της αφρικανικής ηπείρου και λιγότερο στη μέση ανατολή. Στην Κύπρο σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση δεν εμφανίζεται ιδιαίτερα μεγάλη ξηρή εναπόθεση. Το μοντέλο πρόβλεψε για την περιοχή μελέτης ξηρή εναπόθεση κοντά στα 11 mgm^{-3}. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι η συγκεκριμένη τιμή ξηρής εναπόθεσης θα έπρεπε θεωρητικά να εμφανίζεται στο χάρτη, όμως ίσως λόγω εμφάνισης έντονης ξηρής εναπόθεσης σε συγκεκριμένους σταθμούς και μη ιδιαίτερα μεγάλης χωρικής διακριτικής ικανότητας το μοντέλου η τιμές αυτές δεν εμφανίζονται στο χάρτη (ή είναι τόσο μικρές που δεν φαίνονται)



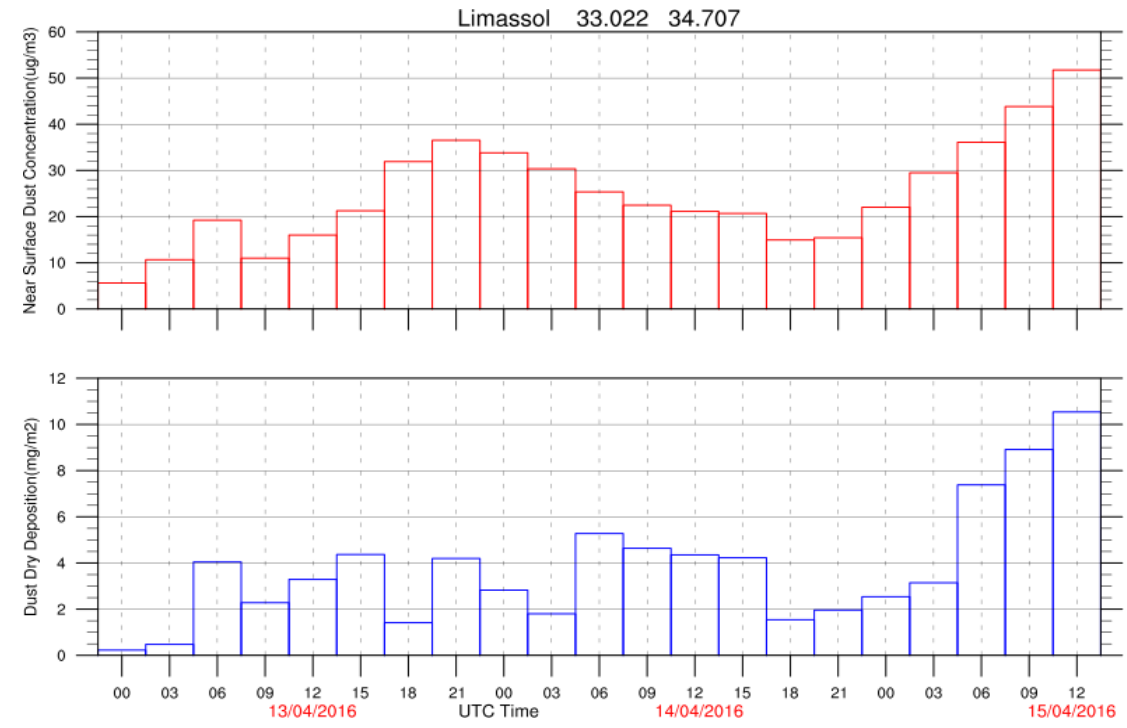
Χάρτης 3.2.6: Χάρτης ξηρής εναπόθεσης σκόνης (dry deposition) για τις 15/04/2016 στις 12UTC (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Στη συνέχεια εμφανίζεται και για αυτήν την περίπτωση η πορεία του φαινομένου σε όλη την περίοδο μελέτης, όπως αυτή προσομοιώθηκε από το μοντέλο (Διαγράμματα 4.2.1-4.2.4). Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση παρουσιάζονται η συγκέντρωση της σκόνης κοντά στην επιφάνεια και η ξηρή εναπόθεση αυτής. Η περίοδος μελέτης για αυτό το γεγονός είναι η 13-15/03/2016, ενώ και εδώ οι περιοχές μελέτης είναι οι Λεμεσός – Λάρνακα – Λευκωσία-Αγία Μαρίνα.

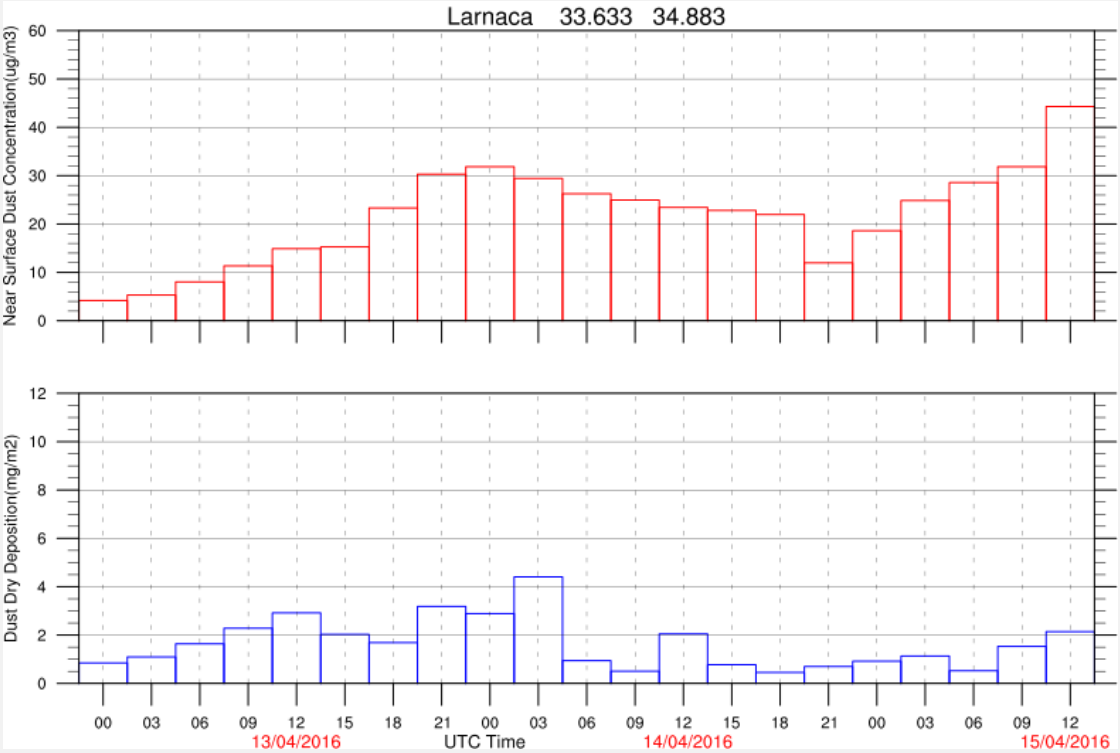
Σε ότι αφορά την συγκέντρωση της σκόνης για την περιοχή της Λεμεσού από το ιστόγραμμα φαίνεται ότι η μέγιστη τιμή εμφανίζεται στις 15/04/2016 και ώρα 12 UTC, όπου είναι λίγο πάνω των 50 μgm^{-3}. Ενώ μεγάλες τιμές εμφανίζονται μετά τις 12 UTC της 13/04/2016 και έως τις 14/04/2016 και ώρα 03 UTC όπου οι τιμές ξεπερνούν τα 30 μgm^{-3}. Για την περιοχή της Λάρνακας η μέγιστη τιμή συγκέντρωσης εμφανίζεται στις 15/04/2016 και ώρα 12 UTC, ξεπερνώντας τα 40 μgm^{-3}, ενώ υψηλές τιμές εμφανίζονται και τις βραδινές και πρώτες πρωινές ώρες των 13/04/2016 και 14/04/2016 αντίστοιχα. Στην περιοχή της Λευκωσίας η μέγιστη τιμή συγκέντρωσης εντοπίζεται στις 15/04/2016 και ώρα 12 UTC, ξεπερνώντας τα 50μgm^{-3}. Επιπλέον, όπως στις προηγούμενες δύο περιπτώσεις (περιοχές) εμφανίζονται υψηλές τιμές συγκέντρωσης

και κατά τις βραδινές ώρες και τις πρωινές των 13 και 14/04/2016, αντίστοιχα. Κατά το δεύτερο γεγονός η μέγιστη προγνωστική τιμή για την περιοχή της Αγίας Μαρίνας εμφανίζεται στις 12 UTC της 15ης Απριλίου, φτάνοντας κοντά στα 50 μgm^{-3}, ενώ υψηλές τιμές πάνω από τα 30 μgm^{-3} παρουσιάζονται και στις 13/ 04/2016 κατά τις μεσημεριανές και βραδινές ώρες.

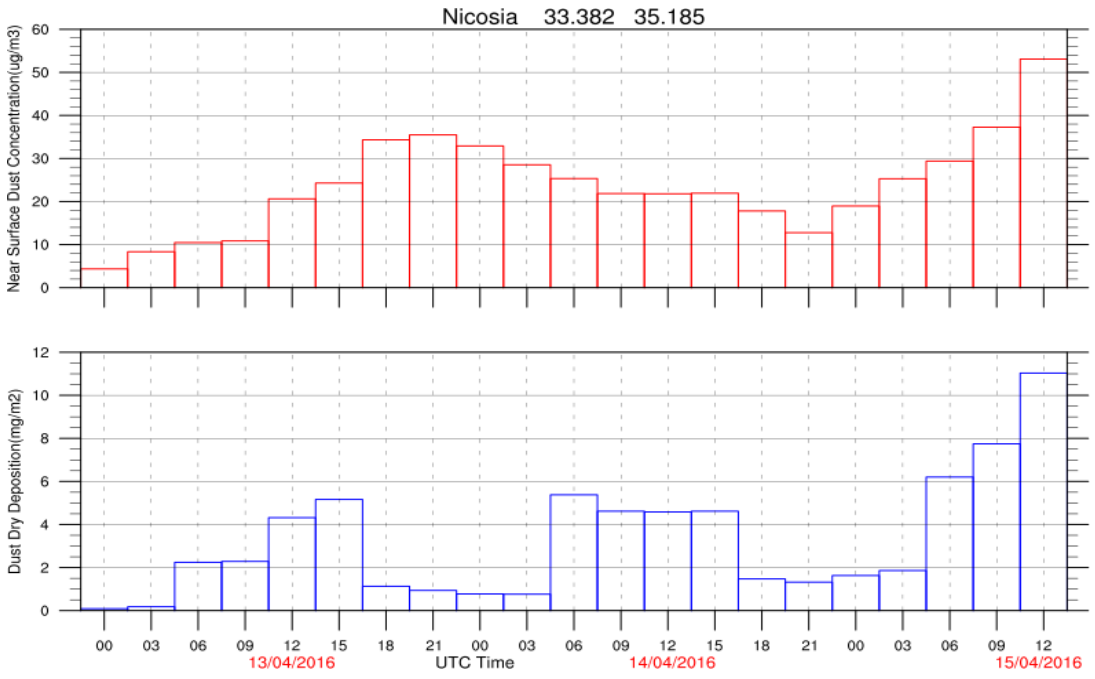
Μελετώντας τα ιστογράμματα για την ξηρή εναπόθεση φαίνεται ότι για την περιοχή της Λεμεσού η μέγιστη τιμή είναι στις 15/04/2016 και ώρα 12 UTC, η οποία ξεπερνά τα 10 mgm^{-2}. Για την περιοχή της Λάρνακας η μέγιστη τιμή ξηρής εναπόθεσης είναι λίγο πάνω από τα 4mg/m^2, η οποία παρατηρείται στις 13/04/2016 στις 03 UTC. Τέλος, σε ότι αφορά την ξηρή εναπόθεση στην περιοχή της Λευκωσίας η μέγιστη τιμή εντοπίζεται στις 15/04/2016 και ώρα 12 UTC, η οποία ξεπερνά τα 10mgm^{-2}. Σχετικά με την ξηρή εναπόθεση στην περιοχή της Αγίας Μαρίνας οι μέγιστες προγνωστικές τιμές παρατηρούνται στις 15/04/2016 όπου φτάνουν ακόμη και τα 10 mgm^{-2}. Και σε αυτή την περίπτωση οι κύριες ώρες ξηρής εναπόθεσης είναι κατά τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες.



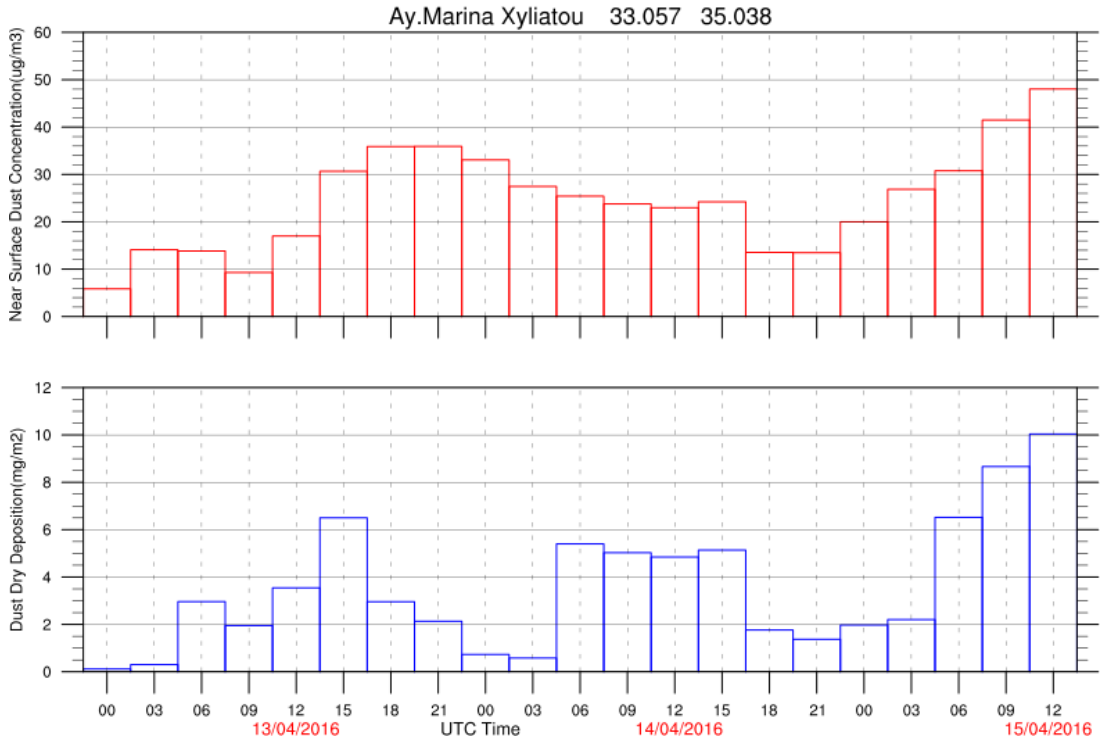
Διαγράμματα 3.2.1: Ιστογράμματα συγκέντρωσης σκόνης (κόκκινο) και ξηρής εναπόθεσης σκόνης (μπλε) για τις 13-15/03/2016 για την περιοχή της Λεμεσού (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)



Διαγράμματα 3.2.2: Ιστογράμματα συγκέντρωσης σκόνης (κόκκινο) και ξηρής εναπόθεσης σκόνης (μπλε) για τις 13-15/03/2016 για την περιοχή της Λάρνακας (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)



Διαγράμματα 3.2.3: Ιστογράμματα συγκέντρωσης σκόνης (κόκκινο) και ξηρής εναπόθεσης σκόνης (μπλε) για τις 13-15/03/2016 για την περιοχή της Λευκωσίας (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)



Διαγράμματα 3.2.4: Ιστογράμματα συγκέντρωσης σκόνης (κόκκινο) και ξηρής εναπόθεσης σκόνης (μπλε) για τις 13-15/03/2016 για την περιοχή της Αγίας Μαρίνας (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

ΚΕΦ. 4^{Ο}: Επαλήθευση του Μοντέλου

4.1 PM10

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η επαλήθευση του μοντέλου, για την περιοχή μελέτης. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια επίγειων μετρήσεων συγκέντρωσης, από σταθμούς μέτρησης μικροσωματιδίων που βρίσκονται στην Κύπρο, και οι οποίες συγκρίνονται με τα αποτελέσματα του μοντέλου.

Οι σταθμοί, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, επιλέχθηκαν ώστε να μετρούν μικροσωματίδια PM10 τα οποία αφορούν σε σωματίδια σκόνης, άλατος κτλ. Επίσης, βασικός παράγοντας επιλογής του κάθε σταθμού ήταν η γεωγραφική κάλυψη, δηλαδή η όσο το δυνατόν πλήρης κάλυψη της περιοχή μελέτης. Τέλος, ένας ακόμη βασικός παράγοντας επιλογής κάθε σταθμού ήταν η ύπαρξη μετρήσεων για κάθε ζητούμενη ώρα, δηλαδή για κάθε ώρα πρόβλεψης του μοντέλου (ανά τρίωρο με αρχή τις 00UTC).

Τελικά, οι διαθέσιμοι σταθμοί για την σύγκριση, βάση όλων των παραπάνω, ήταν οι σταθμοί Λεμεσού, Λάρνακας, Λευκωσίας και της Αγίας Μαρίνας. Αυτός ήταν άλλωστε και ο λόγος που στο προηγούμενο κεφάλαιο τα συγκεντρωτικά ιστογράμματα έγιναν για τις συγκεκριμένες περιοχές.

Η επαλήθευση γίνεται αρχικά βάση στατιστικών στοιχείων ενώ στη συνέχεια παρατίθενται αναλυτικά συγκριτικά διαγράμματα για κάθε σταθμό και για όλη τη διάρκεια του προς μελέτη γεγονότος.

4.1.1. Στατιστικές μετρήσεις

Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν δύο βασικές στατιστικές μεταβλητές, έχοντας ως στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων για την απόδοση του μοντέλου. Αρχικά υπολογίστηκε το Mean Bias (MB) ο οποίος παρέχει πληροφορία για την υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση του μοντέλου. Ο υπολογισμός του γίνεται βάση του παρακάτω τύπου:

$$MB = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N}(O_i - M_i)$$

όπου O_i, η τιμή της παρατήρησης και M_i η εκτιμώμενη τιμή από το μοντέλο για n πλήθος τιμών.

Εν συνεχεία έγινε υπολογισμός του Root-Mean-Square Error (RMSE), το οποίο εκτιμά το σφάλμα αντιστάθμισης λόγω διαφορών πρόσημου και ενθυλακώνει το μέσο σφάλμα που παράγεται από το μοντέλο. Το RMS error υπολογίζεται ως εξής:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(O_i - M_i)^2}{N}}$$

(Kumar et al., 2012)

Τα αποτελέσματα του BIAS και του RMSE για τις δύο περιπτώσεις φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

23-25/03/2016				13-15/04/2016		
Station	BIAS (μgm^{-3})	RMSE (μgm^{-3})		Stations	BIAS (μgm^{-3})	RMSE (μgm^{-3})
Limassol	-31,27	65,35		Limassol	-11,08	21,57
Larnaca	-28,01	44,10		Nicosia	-7,79	12,47
Ay. Marina	0,16	57,79		Ay. Marina	12,8	16,7

Πίνακας 4.1.1.1: Στατιστικά στοιχεία επαλήθευσης του μοντέλου (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα για την πρώτη περίπτωση υπάρχει υποεκτίμηση των γεγονότων από το μοντέλο για τους σταθμούς της Λεμεσού και της Λάρνακας και ελάχιστη υπερεκτίμηση στο σταθμό της Αγίας Μαρίνας. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι οι δύο πρώτοι σταθμοί είναι σταθμοί σε περιοχές με κυκλοφοριακό φόρτο ενώ ο σταθμός της Αγίας Μαρίνας είναι σταθμός υποβάθρου. Αυτό σημαίνει ότι ο σταθμός της Αγίας Μαρίνας δίνει περισσότερο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα, καθώς στους άλλους δύο σταθμούς μετριούνται μικροσωματίδια που εκπέμπονται από τοπικές πηγές. Το RMS error για την περίπτωση αυτή βρίσκεται κοντά και πάνω από το 50 μgm^{-3} (Αγία Μαρίνα) και έως περίπου 65 μgm^{-3} (Λεμεσός).

Κατά τη δεύτερη περίπτωση στις 13-15/04/2016 από τους κυκλοφορικούς σταθμούς φαίνεται μία σχετικά μικρή υποεκτίμηση ενώ στην περίπτωση της Αγίας Μαρίνας φαίνεται να υπάρχει υπερεκτίμηση του γεγονότος από το μοντέλο. Στη δεύτερη περίπτωση το RMS error είναι σε πολύ μικρότερα επίπεδα συγκριτικά με το πρώτο γεγονός, έχοντας μέγιστη τιμή στα 21,57 μgm^{-3}.

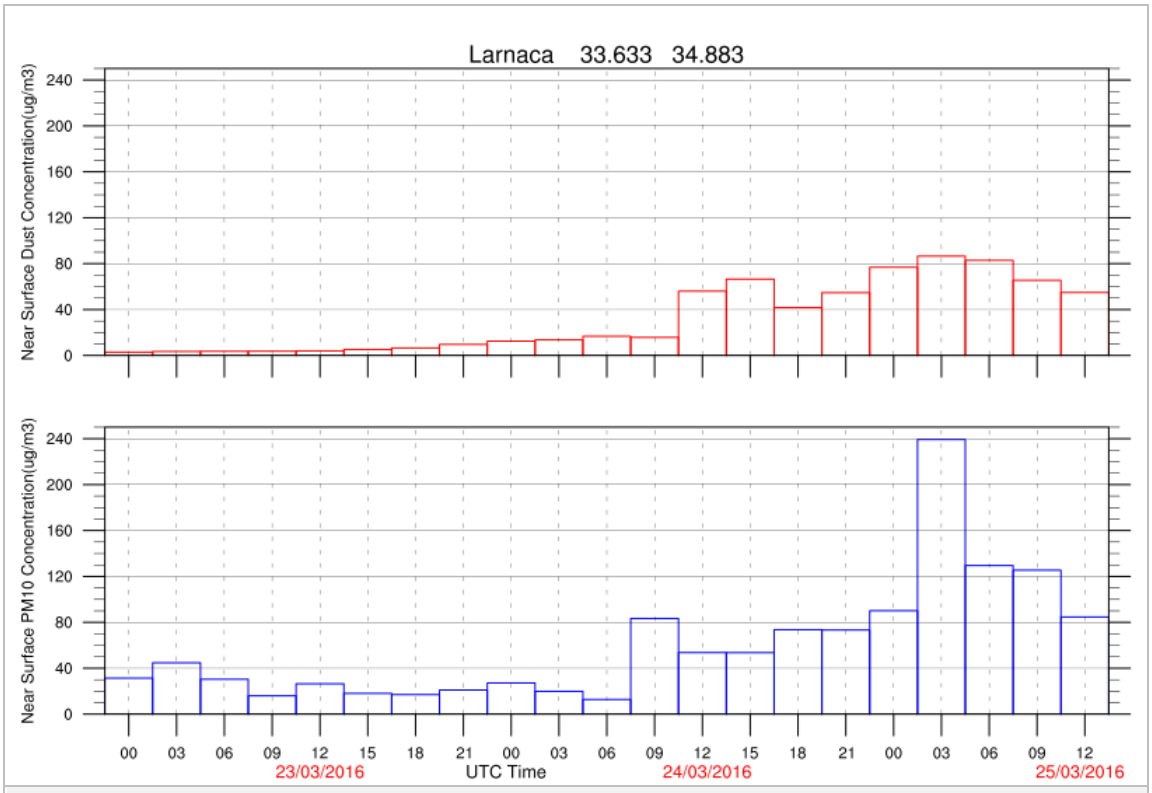
Παρακάτω εμφανίζονται τα συγκριτικά διαγράμματα ξεχωριστά για κάθε περίπτωση.

4.1.2. Περίπτωση 22-25/03/2016

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπως αναφέρεται και παραπάνω, οι σταθμοί που ικανοποιούν τα κριτήρια είναι αυτοί της Λάρνακας, της Λεμεσού και της Αγίας Μαρίνας. Παρακάτω εμφανίζονται τα συγκριτικά διαγράμματα για την περιοχή της Λάρνακας (Διαγράμματα 4.1.2.1).

Με βάση τα διαγράμματα για το σταθμό της Λάρνακας παρατηρείται μεγάλη διαφορά μεταξύ των εκτιμήσεων του μοντέλου και τον παρατηρήσεων. Αυτό εν μέρη είναι λογικό καθώς, όπως έχει αναφερθεί, τα μικροσωματίδια που υπολογίζονται στα PM10 δεν είναι μόνο αφρικάνική σκόνη αλλά είναι κάθε είδους μικροσωματίδιο μέχρι τα 10 μm, ενώ στην περίπτωση του μοντέλου γίνεται υπολογισμός μόνο για τα σωματίδια της σκόνης φυσικής προελεύσεως. Αυτό γίνεται περισσότερο εμφανές μελετώντας τις πρώτες ώρες του γεγονότος, καθώς και τις ώρες αιχμής του. Κατά τις πρώτες ώρες η μέτρηση των PM10 φτάνει μέχρι και πάνω από τα 40 μgm^{-3} ενώ η πρόβλεψη του μοντέλου δίνει σχεδόν μηδενικές τιμές, ενώ οι μετρήσεις των ωρών αιχμής του γεγονότος τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι γύρω στα 80 μgm^{-3} και οι μετρήσεις φτάνουν τα 120 μgm^{-3}. Επιπλέον, όπως έχει ήδη αναφερθεί οι εκτιμήσεις του μοντέλου είναι χωρικές, για μία έκταση 25x25 km. Αντιθέτως οι μετρήσεις των σταθμών είναι σημειακές.

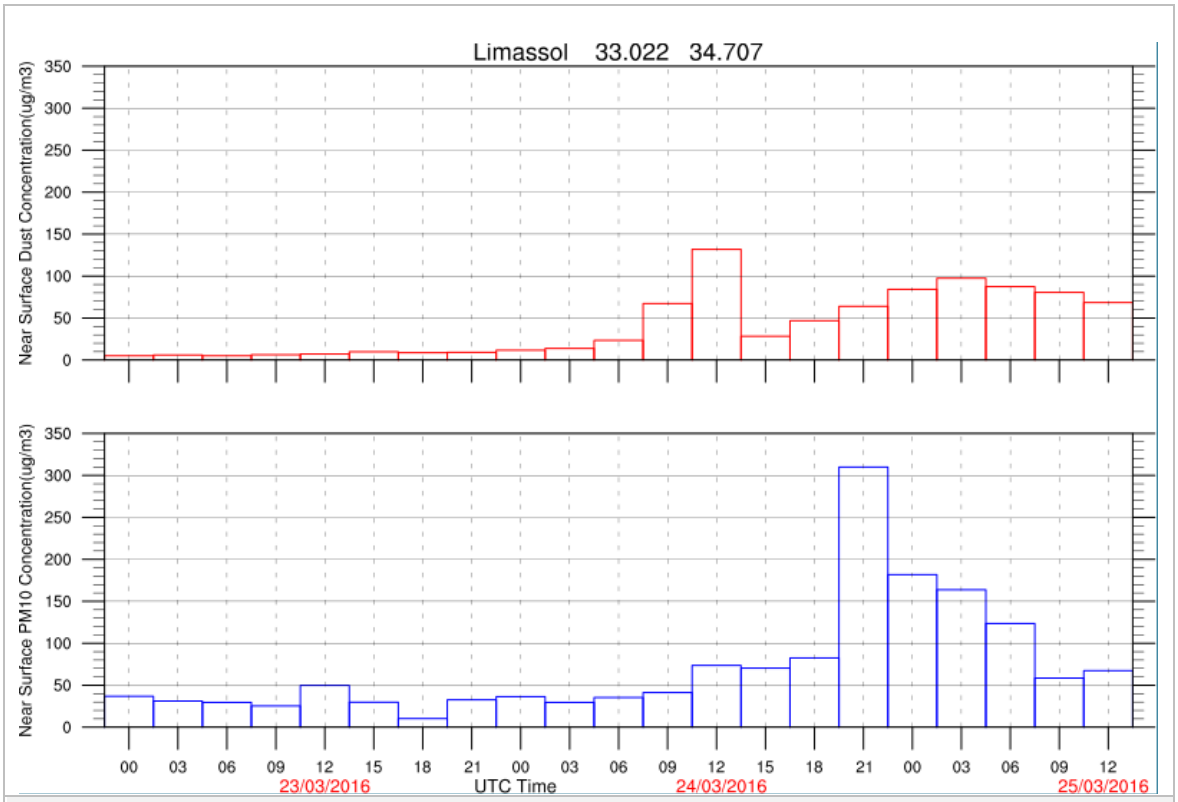
Συγκρίνοντας, λοιπόν, τα διαγράμματα σε γενικές γραμμές φαίνεται ότι ακολουθούν την ίδια πορεία με τα μέγιστα και στις δύο περιπτώσεις να είναι μετά τις 12 UTC της 24ης Μαρτίου και μέχρι το τέλος της περιόδου προσομοίωσης. Ενδιαφέρον εμφανίζεται στις 03 UTC της 25ης Μαρτίου όπου η μέτρηση είναι αισθητά μεγαλύτερη από το αποτέλεσμα της πρόβλεψης (συγκριτικά με τις υπόλοιπες ώρες). Αυτό ίσως οφείλεται σε κάποιο στιγμιαίο φαινόμενο που αύξησε άλλων ειδών μικροσωματίδια τη συγκεκριμένη ώρα.



Διάγραμμα 4.1.2.1: Συγκριτικά διαγράμματα PM10 εκτιμήσεων του μοντέλου (κόκκινο) και πραγματικών μετρήσεων (μπλε) για την περιοχή της Λάρνακας για το γεγονός στις 23-25/03/2016 (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Εν συνεχεία γίνεται η σύγκριση και για την περιοχή της Λεμεσού (Διαγράμματα 4.1.2.2). Σε αυτή την περίπτωση οι διαφορές μεταξύ των πραγματικών μετρήσεων και της εκτίμησης του μοντέλου είναι ακόμη μεγαλύτερες. Και πάλι, όμως, η γενική σύγκριση των διαγραμμάτων τα δείχνει να συμφωνούν, έχοντας τα μέγιστά τους κατά την 24η και 25η Μαρτίου.

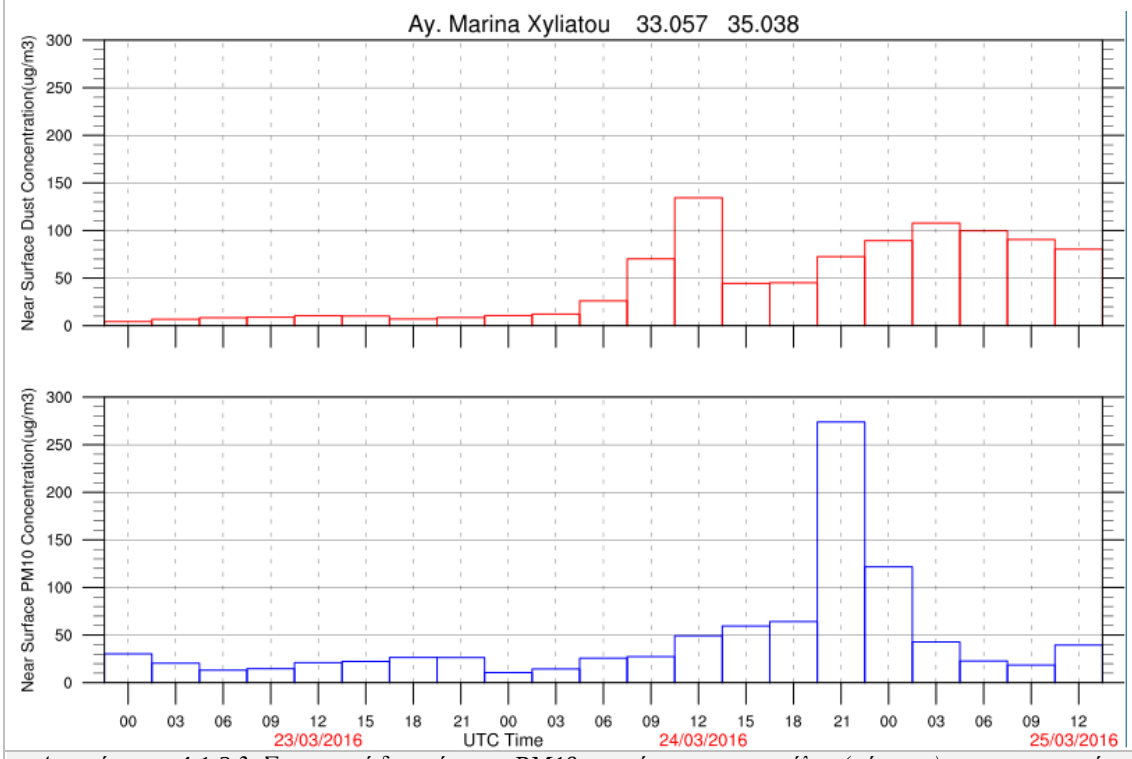
Και στην περιοχή της Λεμεσού εντοπίζεται μια έξαρση στο διάγραμμα των μετρήσεων (το οποίο εδώ υπερβαίνει τα 300 μgm^{-3}) ένα εξάωρο μετά την έξαρση στην περιοχή της Λάρνακας.



Διαγράμματα 4.1.2.2: Συγκριτικά διαγράμματα PM10 εκτιμήσεων του μοντέλου (κόκκινο) και πραγματικών μετρήσεων (μπλε) για την περιοχή της Λεμεσού για το γεγονός στις 23-25/03/2016 (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Ο τελευταίος σταθμός που μελετήθηκε ώστε να γίνει επαλήθευση του μοντέλου είναι στην περιοχή της Αγίας Μαρίνας Ξυλιάτου (Διαγράμματα 4.1.2.3).

Μελετώντας την περίπτωση της Αγίας Μαρίνας παρατηρείται μία σχετική υποεκτίμηση της μέγιστης φάσης του γεγονότος από το μοντέλο. Συγκεκριμένα αν και η εκτίμηση του χρόνου εμφάνισης της μέγιστης τιμής είναι σχετικά σωστός, από το μοντέλο αναμενόταν συγκέντρωση κάτω από τα 150 μgm^{-3}, ενώ ο σταθμός έδωσε μέτρηση πάνω από τα 250 μgm^{-3}. Επίσης κατά τις τελευταίες ώρες υπάρχει υπερεκτίμηση από το μοντέλο, ενώ ο σταθμός έδειξε ότι κατά την 25η Μαρτίου η ατμόσφαιρα ήταν σχετικά καθαρή. Όπως αναφέρθηκε ο σταθμός της Αγίας Μαρίνας είναι σταθμός υποβάθρου, επομένως δεν υπάρχουν μικροσωματίδια από άλλες πηγές (όπως στους σταθμούς με κυκλοφοριακό φόρτο). Παρόλα αυτά, και σε αυτή την περίπτωση υπάρχει υποεκτίμηση των τιμών συγκέντρωσης από το μοντέλο. Η υποεκτίμηση σε αυτή την περίπτωση μπορεί να αποδοθεί στο σχετικά αραιό πλέγμα (25x25 km) καθώς και στο γεγονός ότι τα σφάλματα πρόγνωσης κατά την τρίτη μέρα της προσομοίωσης αυξάνονται.

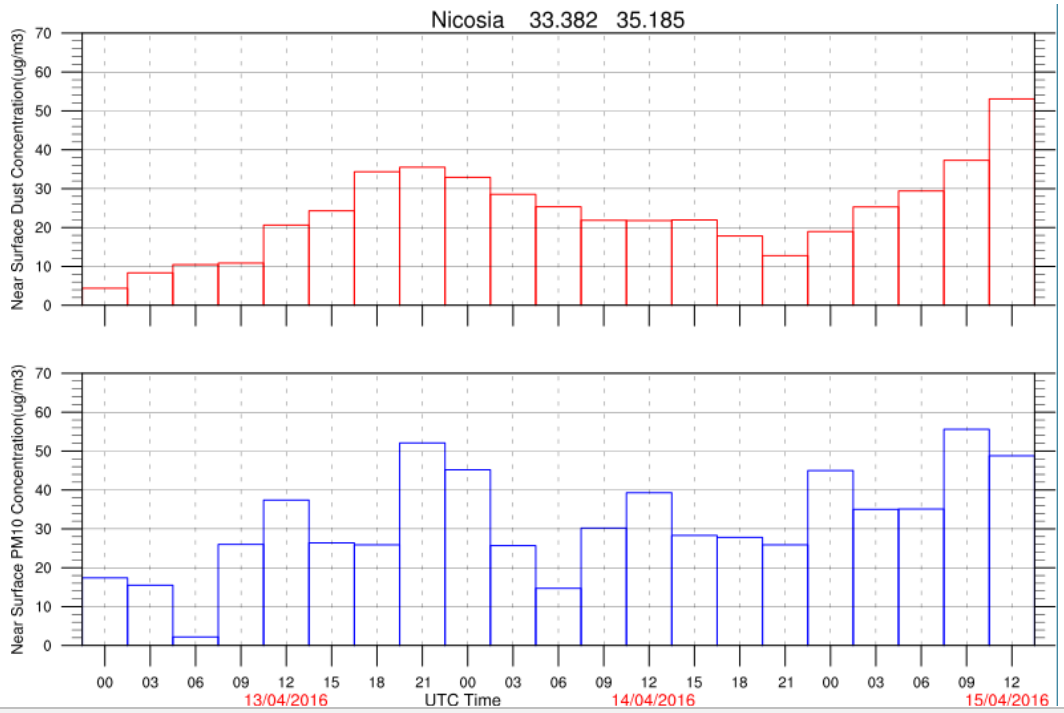


Διαγράμματα 4.1.2.3: Συγκριτικά διαγράμματα PM10 εκτιμήσεων του μοντέλου (κόκκινο) και πραγματικών μετρήσεων (μπλε) για την περιοχή της Αγίας Μαρίνας Ξυλιάτου για το γεγονός στις 23-25/03/2016 (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

4.1.3. Περίπτωση 13-15/04/2016

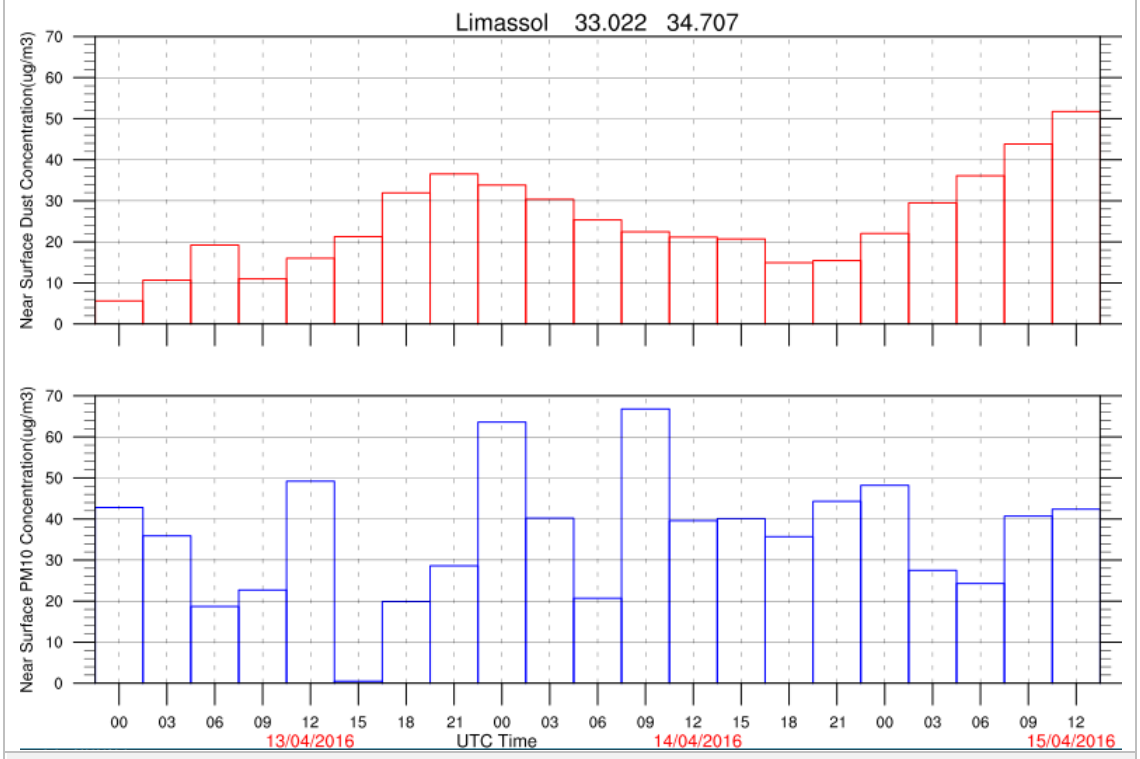
Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι σταθμοί που ικανοποιούν τα παραπάνω κριτήρια είναι αυτοί της Λευκωσίας, της Λεμεσού και της Αγίας Μαρίνας. Παρακάτω εμφανίζονται τα συγκριτικά διαγράμματα για την περιοχή της Λευκωσίας (Διαγράμματα 4.1.3.1).

Σε αυτή την περίπτωση εμφανίζονται κάποιες περιπτώσεις υπερεκτίμησης από το μοντέλο. Αν και σε γενικές γραμμές φαίνεται οι μετρήσεις να συμφωνούν με την πρόβλεψη, υπάρχουν ωστόσο συγκεκριμένες ώρες κατά τις οποίες οι μετρήσεις φαίνεται να υπερβαίνουν τα αποτελέσματα του μοντέλου. Για παράδειγμα, στις 15/04/2016 και ώρα 12 UTC η πρόγνωση δείχνει συγκέντρωση σκόνης άνω των 50 μgm^{-3}, ενώ ο σταθμός μέτρησε συνολικά PM10 κάτω από τα 50 μgm^{-3}. Κάτι τέτοιο δεν είναι λογικό, καθώς όπως έχει αναφερθεί τα PM10 δεν μετρούν απλά σκόνη αλλά και άλλα μικροσωματίδια. Η απόκλιση μπορεί να αποδοθεί σε σφάλμα της πρόγνωσης όπου καθυστέρησε κατά τρεις ώρες περίπου (12UTC αντί για 9UTC) το μέγιστο της συγκέντρωσης στο συγκεκριμένο σταθμό. Ο πρώτος είναι να έχει γίνει υπερεκτίμηση από το μοντέλο. Ενώ ο δεύτερος να έχει γίνει εσφαλμένη μέτρηση από τον σταθμό λόγω κάποιου προβλήματος σε αυτόν.



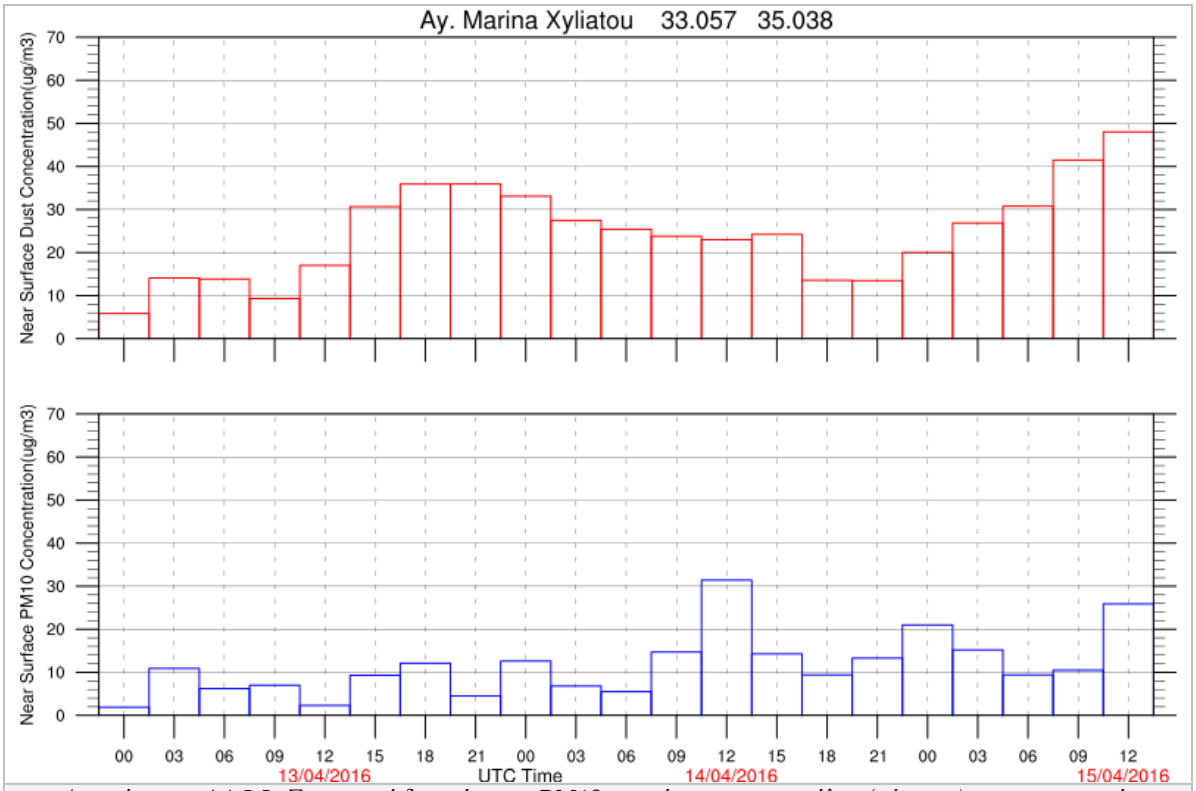
Διαγράμματα 4.1.3.1: Συγκριτικά διαγράμματα PM10 εκτιμήσεων του μοντέλου (κόκκινο) και πραγματικών μετρήσεων (μπλε) για την περιοχή της Λευκωσίας για το γεγονός στις 13-15/04/2016 (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των πραγματικών μετρήσεων για την περιοχή της Λεμεσού. Αυτός είναι και ένας τρόπος να αποσαφηνιστεί το αν το μοντέλο παρουσίαση συστηματική υπερεκτίμηση. Τα συγκριτικά διαγράμματα για τη Λεμεσό φαίνονται στα Διαγράμματα 4.1.3.2. Και σε αυτή τη περίπτωση ενώ σε γενικές γραμμές το μοντέλο συμφωνεί με τις μετρήσεις, υπάρχουν ανά ώρες κάποια προβλήματα υπερεκτίμησης όπως είναι στις 06 UTC της 15ης Απριλίου. Το μοντέλο δεν μπόρεσε να αποδώσει τις απότομες χρονικές διακυμάνσεις της συγκεντρώσεις σκόνης το οποίο μπορεί να οφείλεται στην αραιή οριζόντια διακριτοποίηση του πλέγματος που συνεπάγεται και σχετικά μεγάλο βήμα ολοκλήρωσης.



Διαγράμματα 4.1.3.2: Συγκριτικά διαγράμματα PM10 εκτιμήσεων του μοντέλου (κόκκινο) και πραγματικών μετρήσεων (μπλε) για την περιοχή της Λεμεσού για το γεγονός στις 13-15/04/2016 (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Τελευταίος σταθμός προς μελέτη είναι στην Αγία Μαρίνα Ξυλιάτου (Διαγράμματα 4.1.3.3) . Σε αυτή την περίπτωση γίνεται εμφανής η υπερεκτίμηση των συγκεντρώσεων από το μοντέλο. Αν και παρατηρώντας γενικά τα διαγράμματα εμφανίζεται συμφωνία στης περιόδους αυξημένης συγκέντρωσης μικροσωματιδίων, οι προβλέψεις του μοντέλου ξεπερνούν ακόμη και τα 40 μgm^{-3}, ενώ η μέγιστη μέτρηση από τον σταθμό της Αγίας Μαρίνας φτάνει μέχρι λίγο πάνω από τα 30 μgm^{-3}.



Διαγράμματα 4.1.3.3: Συγκριτικά διαγράμματα PM10 εκτιμήσεων του μοντέλου (κόκκινο) και πραγματικών μετρήσεων (μπλε) για την περιοχή της Αγίας Μαρίνας Ξυλιάτου για το γεγονός στις 13-15/04/2016 (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

4.2 PM 2.5

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται και πάλι επαλήθευση του μοντέλου, αλλά αυτή τη φορά βάση των μετρήσεων των σταθμών για τα σωματίδια PM 2.5. Οι σταθμοί, όπως αναφέρθηκε και στην περίπτωση των PM10, επιλέχθηκαν ώστε να μετρούν μικροσωματίδια ενδιαφέροντος (σε αυτή την περίπτωση τα PM 2.5. Επίσης, και ως προς τα PM 2.5έγινε προσπάθεια γεωγραφικής κάλυψης, δηλαδή η όσο το δυνατόν πλήρης κάλυψη της περιοχή μελέτης. Τέλος, ίσως ο βασικότερος παράγοντας επιλογής των σταθμών ήταν η ύπαρξη μετρήσεων για κάθε ζητούμενη ώρα, δηλαδή για κάθε ώρα πρόβλεψης του μοντέλου (ανά τρίωρο με αρχή τις 00UTC).

Τελικά, οι κατάλληλοι σταθμοί για την σύγκριση, βάση όλων των παραπάνω, ήταν οι σταθμοί Λάρνακας, Λευκωσίας και της Αγίας Μαρίνας, συγκεκριμένα για την πρώτη περίπτωση η σύγκριση γίνεται από τους σταθμούς Λάρνακας και Αγίας Μαρίνας, ενώ για τη δεύτερη περίπτωση Λευκωσίας και Αγίας Μαρίνας. Και στα δύο γεγονότα φαίνεται ότι δεν υπάρχει ο σταθμός της Λεμεσού, όπως συνέβαινε στην περίπτωση των PM10. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο σταθμός αυτός δεν δίνει μετρήσεις PM2.5.

Η επαλήθευση γίνεται αρχικά βάση στατιστικών στοιχείων ενώ στη συνέχεια παρατίθενται αναλυτικά συγκριτικά διαγράμματα για κάθε σταθμό και για όλη τη διάρκεια του προς μελέτη γεγονότος.

4.2.1. Στατιστικές μετρήσεις

Και σε αυτήν την περίπτωση τα δύο βασικά στατιστικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι ο Mean Bias (MB) και το root-mean-square error (RMSE), των οποίων οι τύποι υπολογισμού έχουν δοθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο

Τα αποτελέσματα του BIAS και του RMSE για τις δύο περιπτώσεις, ως προς τα PM 2.5 φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

23-25/03/2016				13-15/04/2016		
Station	BIAS (μgm^{-3})	RMSE (μgm^{-3})		Stations	BIAS (μgm^{-3})	RMSE (μgm^{-3})
Larnaca	-9,16	16,67		Nicosia	0,70	6,98
Ay. Marina	4,30	25,19		Ay. Marina	8,92	11,68

Πίνακας 4.2.1.1: Στατιστικά στοιχεία επαλήθευσης του μοντέλου (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα για την πρώτη περίπτωση υπάρχει υποεκτίμηση της συγκέντρωσης από το μοντέλο για την περιοχή της Λάρνακας, και υπερεκτίμηση σε σχέση με τον σταθμό της Αγίας Μαρίνας. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω ο σταθμός της Λάρνακας σε περιοχή αυξημένης κυκλοφορίας ενώ ο σταθμός της Αγίας Μαρίνας είναι σταθμός υποβάθρου. Αυτό σημαίνει ότι ο σταθμός της Αγίας Μαρίνας δίνει περισσότερο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα, καθώς οι σταθμοί σε περιοχές με πυκνό κυκλοφορικό φόρτο μετρούν κάθε είδος μικροσωματιδίου. Το RMS error για την περίπτωση αυτή βρίσκεται σε σχετικά καλά επίπεδα με την Αγία Μαρίνα 25,19 μgm^{-3} και την Λάρνακα στα 16,67 μgm^{-3}. Κατά τη δεύτερη περίπτωση στις 13-15/04/2016 από τον κυκλοφοριακό σταθμό της Λευκωσίας φαίνεται μία σχετικά ελάχιστη υπερεκτίμηση ενώ στην περίπτωση της Αγίας Μαρίνας φαίνεται να υπάρχει υπερεκτίμηση του γεγονότος από το μοντέλο. Στη δεύτερη περίπτωση το RMS error είναι σε πολύ μικρότερα επίπεδα συγκριτικά με το πρώτο γεγονός, έχοντας μέγιστη τιμή στα 11,68 μgm^{-3} στον σταθμό της Αγίας Μαρίνας.

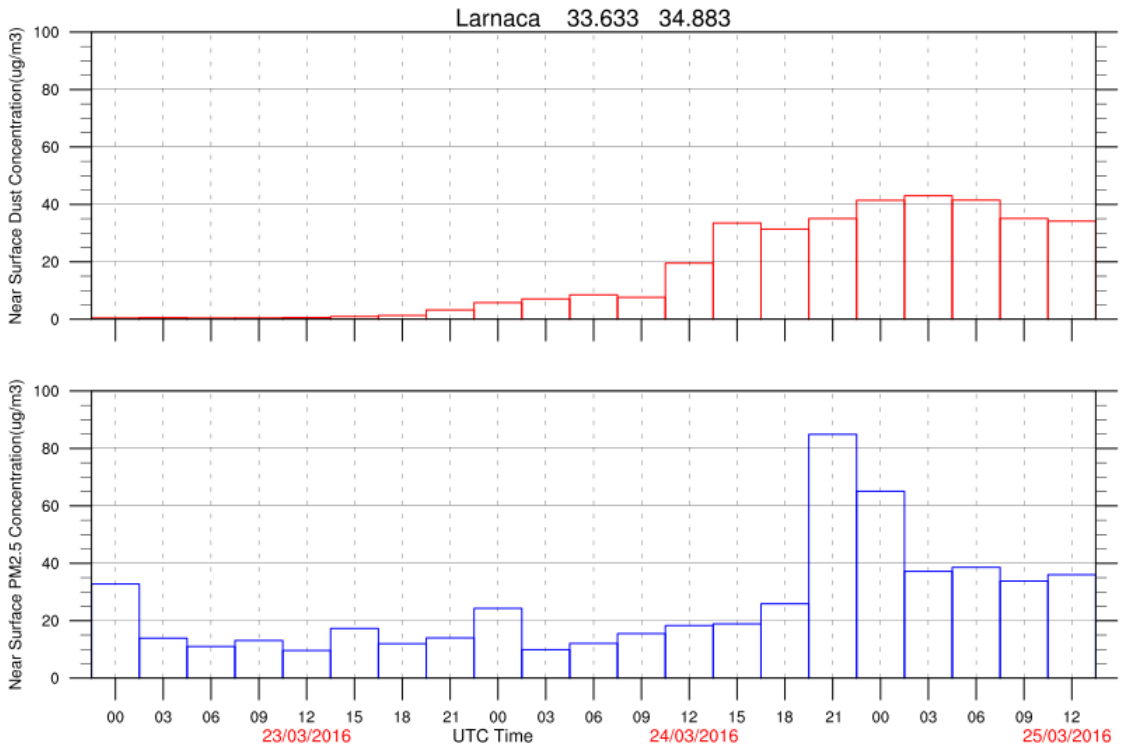
Παρακάτω εμφανίζονται τα συγκριτικά διαγράμματα ξεχωριστά για κάθε περίπτωση:

4.2.2. Περίπτωση 22-25/03/2016

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα για τους σταθμούς της Λάρνακας και της Αγίας Μαρίνας (Διαγράμματα 4.2.2.1 και 4.2.2.2), οι οποίοι όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω πληρούν τις προϋποθέσεις ανάλυσης για τα μικροσωματίδια PM 2.5.

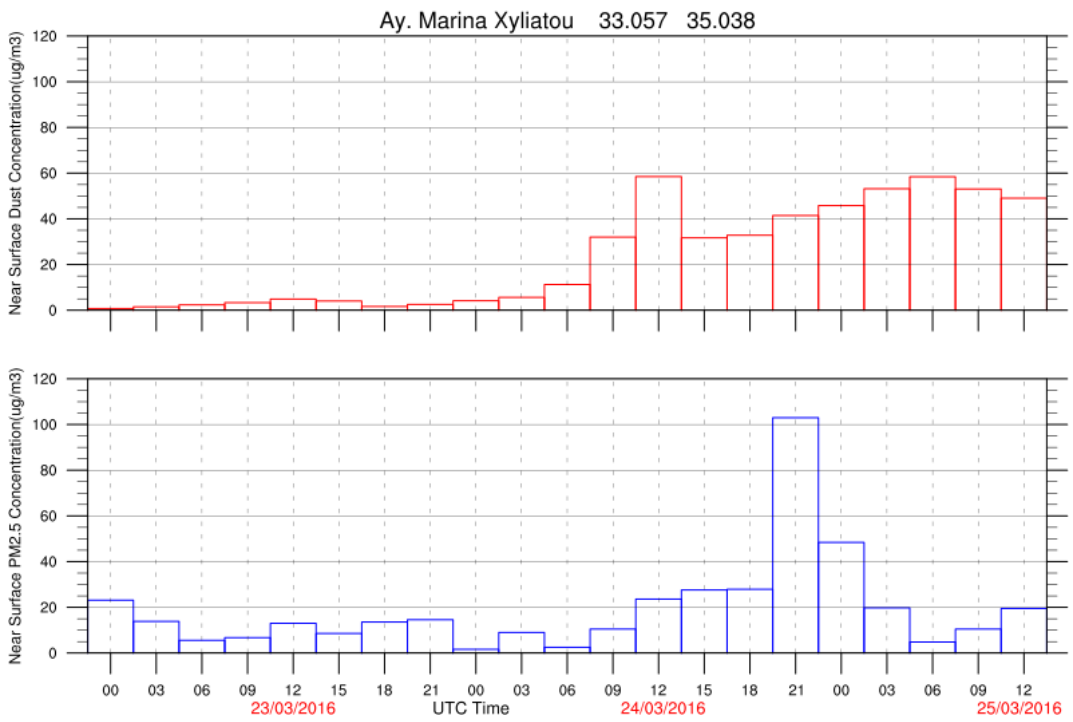
Όπως φαίνεται από το διάγραμμα για την Λάρνακα, το μοντέλο επιτυγχάνει μία πολύ καλή πρόβλεψη. Οι μετρήσεις των σταθμών συμπεριλαμβάνουν κάθε μικροσωματίδιο διαμέτρου μέχρι 2.5μm. Επομένως, οι διαφορές μεταξύ των εκτιμήσεων και των μετρήσεων μπορούν να αποδοθούν, και σε αυτή την περίπτωση όπως στην περίπτωση των PM 10, στο γεγονός ότι οι μετρήσεις δεν συμπεριλαμβάνουν μόνο σκόνη φυσικής προέλευσης αλλά είναι κάθε είδους μικροσωματίδιο μέχρι 2.5μm. Αυτό μπορεί γίνεται εμφανές κατά τις πρώτες ώρες, όπου η μέτρηση των PM2,5 φτάνει μέχρι και τα 30 μgm^{-3} ενώ η πρόβλεψη του μοντέλου δίνει σχεδόν μηδενικές τιμές. Επιπλέον μελετώντας τις μετρήσεις και τις προβλέψεις κατά τις ώρες αιχμής, φαίνεται ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι γύρω στα 40 μgm^{-3} και οι μετρήσεις φτάνουν τα 80μgm^{-3} . Ο δεύτερος λόγος που έχει αναφερθεί και παραπάνω είναι ότι οι προβλέψεις του μοντέλου είναι χωρικές, για μία έκταση 25x25 km, ενώ οι μετρήσεις των σταθμών είναι σημειακές.

Συγκρίνοντας λοιπόν τα διαγράμματα γενικά φαίνεται ότι συμφωνούν καλά ως προς τις ώρες αιχμής του φαινομένου, εμφανίζοντας μόνο μία αδυναμία του μοντέλου να προβλέψει σωστά τα μέγιστα που συνέβησαν κατά την 21UTC της 24ης Μαρτίου και την 00UTC της 25ης Μαρτίου, αυτό όμως μπορεί να οφείλεται στο σταθμό ο οποίος όπως έχει αναφερθεί είναι κυκλοφοριακός και μπορεί η αύξηση αυτή να οφείλεται σε άλλου τύπου μικροσωματίδια και όχι στη σκόνη φυσικής προέλευσης.



Διάγραμμα 4.2.2.1: Συγκριτικά διαγράμματα PM 2.5 εκτιμήσεων του μοντέλου (κόκκινο)και πραγματικών μετρήσεων (μπλε) για την περιοχή της Λάρνακας για το γεγονός στις 23-25/03/2016 (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Εν συνεχεία γίνεται η σύγκριση και για την περιοχή της Αγίας Μαρίνας (Διαγράμματα 4.2.2.2). Μελετώντας την περίπτωση της Αγίας φαίνεται ότι το μοντέλο δίνει σχετικά αποδεκτές εκτιμήσεις για το χρονικό σημείο μέγιστου προβλήματος. Παράλληλα όμως παρατηρείται και μία ασυμφωνία μεταξύ του μοντέλου και του σταθμού κατά τις τελευταίες ώρες παρατήρησης, όπου από το μοντέλο δείχνει συνέχεια στην ένταση του φαινομένου ενώ ο δίνει πολύ χαμηλές μετρήσεις. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε κάποιο φαινόμενο που δεν προέβλεψε το μοντέλο ή σε λάθος του σταθμού. Γενικά μέγιστη συγκέντρωση από τον σταθμό δίνεται κατά τις 21UTC της 24ης Μαρτίου (λίγο πάνω από τα 100 μgm^{-3}) ενώ από το μοντέλο στις 12UTC της ίδια μέρας (σχεδόν 60 μgm^{-3}).

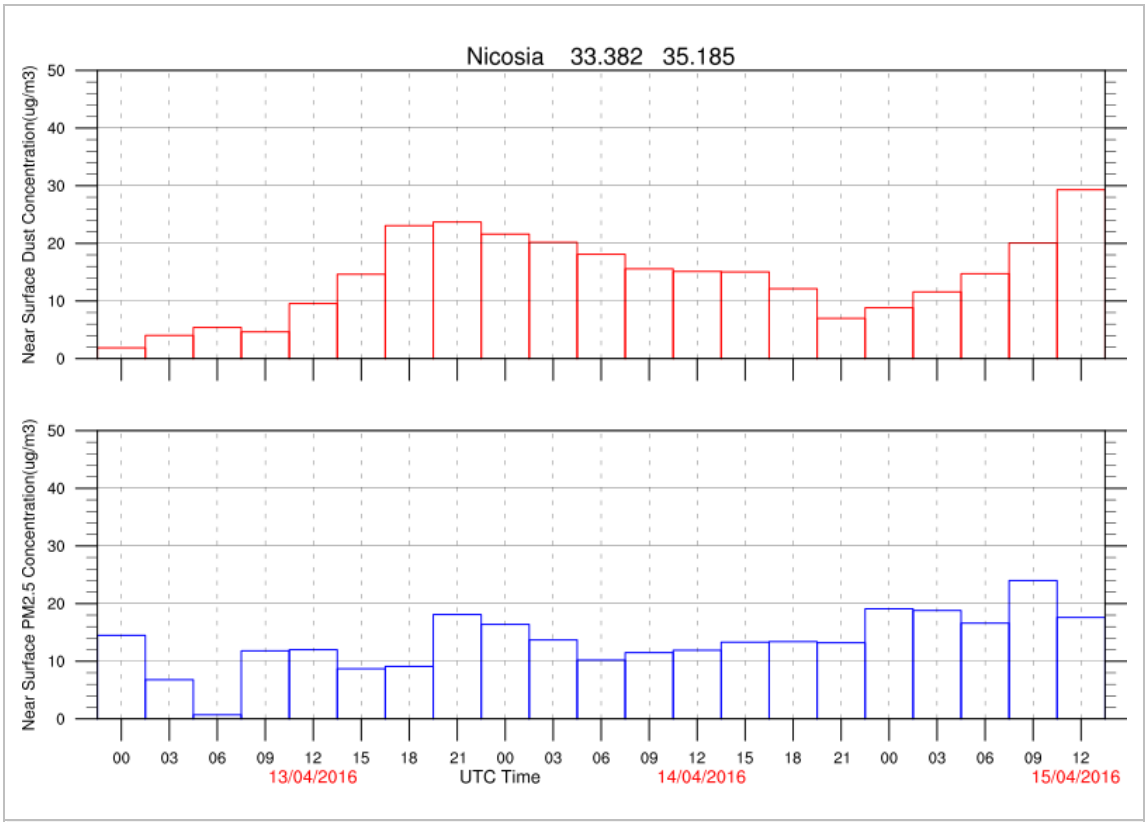


Διαγράμματα 4.2.2.2: Συγκριτικά διαγράμματα εκτιμήσεων του μοντέλου (κόκκινο) και πραγματικών μετρήσεων (μπλε) για την περιοχή της Λεμεσού για το γεγονός στις 23-25/03/2016(Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

4.2.3. Περίπτωση 13-15/04/2016

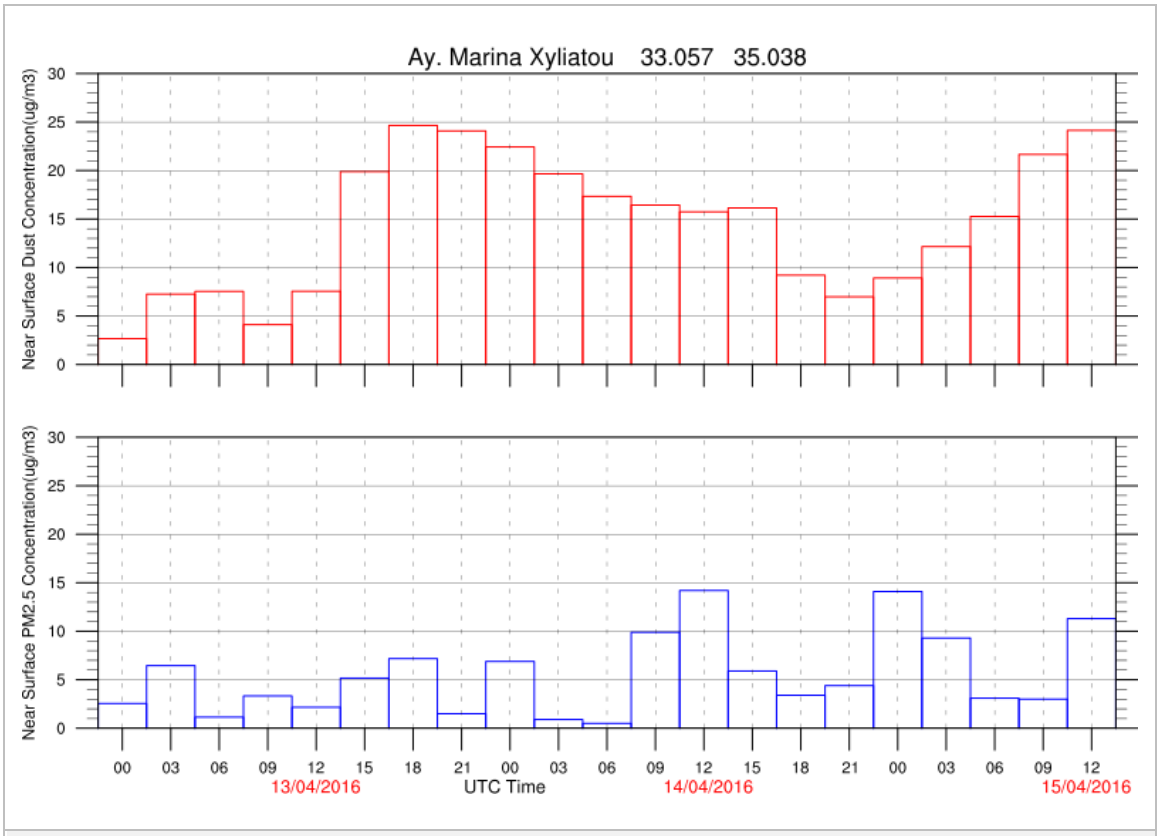
Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι σταθμοί που ικανοποιούν ζητούμενα κριτήρια είναι αυτοί της Λευκωσίας και της Αγίας Μαρίνας. Παρακάτω εμφανίζονται τα συγκριτικά διαγράμματα για την περιοχή της Λευκωσίας (Διαγράμματα 4.2.3.1).

Σε αυτή την περίπτωση εμφανίζεται μικρή υπερεκτίμηση από το μοντέλο, παρόλα αυτά και πάλι εμφανίζεται συμφωνία στην γενική αποτύπωση του γεγονότος καθώς τόσο ο σταθμός όσο και το μοντέλο αναμένουν σταθερά αύξηση της συγκέντρωσης της σκόνης στην ατμόσφαιρα καθ' όλη τη διάρκεια της υπό μελέτης περιόδου. Σημαντικό είναι ότι οι μεγαλύτερες τιμές αναμένονται από το μοντέλο στις τις βραδινές ώρες της 13ης Απριλίου και τις πρωινές ώρες της 15ης Απριλίου, με το οποίο συμφωνεί ο σταθμός.



Διαγράμματα 4.2.3.1: Συγκριτικά διαγράμματα PM2.5 εκτιμήσεων του μοντέλου (κόκκινο) και πραγματικών μετρήσεων (μπλε) για την περιοχή της Λευκωσίας για το γεγονός στις 13-15/03/2016(Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Παρακάτω εμφανίζονται τα συγκριτικά διαγράμματα για την περιοχή της Αγίας Μαρίνας (Διαγράμματα 4.2.3.2). Σε αυτή την περίπτωση, όπως και στην αντίστοιχη των PM10, γίνεται εμφανής η υπερεκτίμηση των συγκεντρώσεων από το μοντέλο. Σε γενικές γραμμές παρατηρώντας τα διαγράμματα εμφανίζεται συμφωνία στης περιόδους αυξημένης συγκέντρωσης μικροσωματιδίων, αν και οι προβλέψεις εμφανίζουν συνεχή ύπαρξη αυξημένων συγκεντρώσεων σκόνης στην ατμόσφαιρα ενώ ο σταθμός παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις. Οι προβλέψεις του μοντέλου φτάνουν κοντά στα 25 μgm^{-3}, ενώ η μέγιστη μέτρηση από τον σταθμό της Αγίας Μαρίνας φτάνει κοντά στα 15 μgm^{-3}. Στην περίπτωση αυτή η υπερεκτίμηση μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι το μοντέλο υπολογίζει τις συγκεντρώσεις του από όλα τα bins (τα οποία για την περίπτωση του GOCART είναι 5 bins σκόνης και 4 άλατος).



Διαγράμματα 4.2.3.2: Συγκριτικά διαγράμματα PM2.5 εκτιμήσεων του μοντέλου (κόκκινο) και πραγματικών μετρήσεων (μπλε) για την περιοχή της Αγίας Μαρίνας για το γεγονός στις 13-15/03/2016 (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

ΚΕΦ.5: Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν δύο γεγονότα μεταφοράς αφρικανικής σκόνης στην περιοχή της Κύπρου. Οι ημερομηνίες των γεγονότων τα οποία εξετάστηκαν στη συγκεκριμένη εργασία είναι η 22-25/03/2016 και η 12-15/04/2016. Η μελέτη βασίστηκε στην εφαρμογή ενός σύγχρονου ατμοσφαιρικού μοντέλου περιορισμένης περιοχής με δυνατότητα προσομοίωσης των διεργασιών απελευθέρωσης, μεταφοράς και εναπόθεσης της σκόνης σε επιλεγμένες μελέτες περιπτώσεων (WRF-Chem). Εν συνεχεία έγινε επαλήθευση του μοντέλου βάση μετρήσεων από τρεις επίγειους σταθμούς στην Κύπρο (Λεμεσό, Λευκωσία, Λάρνακα, Αγία Μαρίνα), βασικών στατιστικών μεθόδων και διαγραμμάτων. Η επαλήθευση έγινε για δύο τύπους μικροσωματιδίων (PM 10 PM 2.5)

Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη είναι:

- Η μεταφορά της σκόνης κατά την πρώτη περίπτωση οφειλόταν κυρίως στην κάλυψη της Κύπρου και της Ανατολικής Μεσογείου από μία σφήνα εξάρσεως (ridge), η οποία μετέφερε θερμές αέριες μάζες από την Αφρική. Η μεταφορά αυτή συνδυάστηκε με την ύπαρξη καλά οργανωμένου χαμηλού βαρομετρικού το οποίο συνοδεύεται από ψυχρό μέτωπο που περνάει πάνω από την Κύπρο.
- Κατά το δεύτερο γεγονός εμφανίζεται ασθενής σφήνα εξάρσεως στην κεντρική Μεσόγειο μετά το πέρασμα μία σφήνας υφέσεως. Η σφήνα εξάρσεως μεταφέρει, και πάλι, θερμές αέριες μάζες από την Βόρεια Αφρική αρχικά προς την Κεντρική Μεσόγειο και στην συνέχεια στην Ελλάδα και την Κύπρο. Επιπλέον, υπάρχει μία έμμεση μεταφορά σκόνης από τη δυτική Λιβύη, λόγω ύπαρξης μέτριας συνοπτικής ροής δυτικών διευθύνσεων.
- Σε γενικές γραμμές το μοντέλο αποδίδει τα δύο γεγονότα ικανοποιητικά, ακολουθώντας την πορεία
- Στις 24/03/2016 εμφανίζεται το μεγαλύτερο φορτίο σκόνης, το οποίο ξεπερνά και τα 6000 mgm^{-2} . Το μεγαλύτερο πρόβλημα εντοπίζεται την ανατολική πλευρά του νησιού. Η μεγαλύτερη συγκέντρωση σκόνης ήταν και πάλι στις 24/03/2016 η οποία ξεπερνούσε και τα 80 μgm^{-3} , ενώ ανά περιοχές ξεπερνά ακόμη και τα 100 μgm^{-3}. Η ξηρή εναπόθεση ξεπέρασα τα 20 mgm^{-2}.
- Ένα ακόμη μεγάλο φορτίο σκόνης επηρέασε την Κύπρο το οποίο στις

15/04/2016 είχε την μεγαλύτερη τιμή, ξεπερνώντας ακόμη και τα 3000 mgm^{-2}. Το μεγαλύτερο πρόβλημα εντοπίστηκε και πάλι στην ανατολική πλευρά του νησιού. Η συγκέντρωση σκόνης για το γεγονός του Απριλίου ξεπέρασε τα 50μgm^{-3}.

- Ως προς την επαλήθευση του μοντέλου φαίνεται ότι κατά την περίπτωση του Μαρτίου, σε ότι αφορά τα PM 10, το μοντέλο φαίνεται να έχει υποεκτιμήσει το φαινόμενο για τους σταθμούς της Λεμεσού (BIAS -31.27 μgm^{-3}) και της Λάρνακας (BIAS -28.01 μgm^{-3}), ενώ υπάρχει μία ελάχιστη υπερεκτίμηση για τον σταθμό της Αγίας Μαρίνας (BIAS 0.16 μgm^{-3}). Η υποεκτίμηση από τους σταθμούς της Λεμεσού και της Λάρνακας μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι οι δύο σταθμοί είναι τοποθετημένοι σε περιοχές με κυκλοφοριακό φόρτο. Έτσι, γίνεται μέτρηση όλων των μικροσωματιδίων ακτίνας έως 10 μm. Από την άλλη ο σταθμός της Αγίας Μαρίνας είναι σταθμός υποβάθρου και δεν επηρεάζεται από άλλες πηγές σκόνης. Τα RMSE για τους σταθμούς της Λεμεσού, Λάρνακας, Αγίας Μαρίνας ήταν 65.35 μgm^{-3}, 44.10 μgm^{-3}, 57.79 μgm^{-3} ,αντίστοιχα.
- Στη περίπτωση του Απριλίου, και πάλι ως προς τα PM10, γίνεται μικρότερη υποεκτίμηση από το μοντέλο (BIAS -11.08 μgm^{-3} για το σταθμό της Λεμεσού -7.79 μgm^{-3} για το σταθμό της Λευκωσίας). Ενώ γίνεται πιο σημαντική υπερεκτίμηση για το σταθμό της Αγίας Μαρίνας (BIAS 12.8 μgm^{-3}). Τα RMSE σε αυτή την περίπτωση ήταν 21.57 μgm^{-3}, 12.47 μgm^{-3}, 16.7 μgm^{-3}, αντίστοιχα. Επιπλέον, σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν ώρες στις οποίες ο σταθμός της Αγίας Μαρίνας δίνει υποεκτίμηση του φαινομένου. Αυτό για την περίπτωση του σταθμού υποβάθρου μπορεί να αποδοθεί στο σχετικά αραιό πλέγμα τον (25x25)
- Σε ότι αφορά τα PM2.5 για την περίπτωση του Μαρτίου ο σταθμός της Λάρνακας δίνει υποεκτίμηση του γεγονότος, οποία όμως είναι μικρότερη σε σχέση με την υποεκτίμηση για τα PM10 (BIAS -9.16 μgm^{-3}), το οποίο λογικά οφείλεται στο ότι ο σταθμός είναι σε σημείο με κυκλοφοριακό φόρτο και επηρεάζεται από διαφορετικές πηγές σκόνης. Ο σταθμός της Αγίας Μαρίνας δίνει μικρή υπερεκτίμηση (BIAS 4.30 μgm^{-3}). Και σε αυτή την περίπτωση η υπερεκτίμηση αποδίδεται στον υπολογισμό των όλων των bins από το μοντέλο. Τα RMSE για τους σταθμούς της Λάρνακας και της Αγίας Μαρίνας είναι 16.67 μgm^{-3} και 25.19 μgm^{-3}, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα μπορούν να αποδοθούν,

αρχικά στους διαφορετικούς τύπους σταθμών μέτρησης. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω οι σταθμοί με κυκλοφοριακό φόρτο μπορεί να δώσουν ψευδείς μετρήσεις, λόγω των σωματιδίων τα οποία μετρούν και είναι από άλλες μη φυσικής προέλευσης πηγές. Επίσης, η χωρική ανάλυση του μοντέλου (25x25) μπορεί επίσης να έχει συντελέσει στα προβλήματα της ακρίβειας του μοντέλου.

- Στο δεύτερο γεγονός, σε ότι αφορά τα PM2.5 ο σταθμός της Λευκωσίας δίνει ελάχιστη υπερεκτίμηση (BIAS 0.70 μgm^{-3}) ενώ υπάρχει υπερεκτίμηση για το σταθμό της Αγίας Μαρίνας (8.92 μgm^{-3}). Τα RMSE για τους σταθμούς της Λευκωσίας και της Αγίας Μαρίνας είναι 6.28 μgm^{-3}, 11.68 μgm^{-3}.

Βιβλιογραφία

1. Air Quality in Cyprus, Εύρεση 28 Απριλίου 2016, στην ιστοσελίδα http://www.airquality.dli.mlsi.gov.cy/site/graphs
2. Alizadeh-Choobari O., Zawar-Reza P., Sturman A. 2014, *The "wind of 120 days" and dust storm activity over the Sistan Basin*, Atmospheric Research, 143, pp.328–341
3. Atmosphere & Climate Dynamics Group, Εύρεση 20 Μαρτίου 2016, στην ιστοσελίδα, http://meteoclima.hua.gr/
4. Bianco H., Tie X., Cao J., Ying Z., Han S., Xue Y. 2011, *Analysis of a Severe Dust Storm Event over China: Application of the WRF-Dust Model*, Aerosol and Air Quality Research, 11, pp.419–428, 2011 doi: 10.4209/aaqr.2011.04.0053
5. Barnum B.H. , Winstead N.S. , Wesely J., Hakola A., Colarco P.R., Toon O.B., Ginoux P., Brooks G., Hasselbarth L., Toth B. 2004, *Forecasting dust storms using the CARMA-dust model and MM5 weather data,* Environmental Modelling & Software, 19, pp.129–140.
6. Basart, S., Pérez, C., Nickovic, S., Cuevas, E., and Baldasano, J . 2012, Development and evaluation of the BSC-DREAM8b dust regional model over Northern Africa, the Mediterranean and the Middle East, Tellus B, 64, 18539, doi:10.3402/tellusb.v64i0.18539.
7. Chen S., Huang J., Zhao C., Qian Y., Leung L.R., Yang B. 2013, *Modeling the transport and radiative forcing of Taklimakan dust over the Tibetan Plateau: A case study in the summer of 2006*, Journal of Geophysical Research, 118, 2 16/28, pp. 797-812
8. CISL's NCAR Command Language (NCL), Εύρεση 17 Μαρτίου 2016, στην ιστοσελίδα http://www.ncl.ucar.edu/
9. Dulam J. 2005, *Discriminate Analysis for Dust Stortm Prediction in Global and Steppe Regions in Mongolia,* Water, Air, and Soil Pollution: Focus, **5,** 37–49
10. Elguindi N., Solmon F., Turuncoglu U. 2016, *Quantifying some of the impacts of dust and other aerosol on the Caspian Sea region using a regional climate model,* Climate Dynamics January 2016,Volume 46,1, pp 41-55
11. Ginoux, P., M. Chin, I. Tegen, J. M. Prospero, B. Holben, O. Dubovik, andS.-J. Lin. 2001, Sources and distributions of dust aerosols simulated with the

GOCART model, *J. Geophys. Res.*, **106**, 20,255–20,274

12. Global Forecast System (GFS) - National Climatic Data Center, Εύρεση 18 Μαΐου 2016 στην ιστοσελίδα, https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forcast-system-gfs

13. GOCART Model Simulation of Atmospheric Aerosols, Εύρεση στις 4 Αυγούστου 2016 στην ιστοσελίδα, http://acd-ext.gsfc.nasa.gov/People/Chin/gocartinfo.html

14. Goudie A.S.,2014. Desert dust and human health disorders. Environ Int 63 pp101–113

15. Grell, G.A., S.E. Peckham, R. Schmitz, S.A. McKeen, G. Frost, W.C. Skamarock and B. Eder, 2005. *Fully coupled online chemistry within the WRF model.* Atmos. Environ., 39, pp.6957-6975.

16. Griffin, D. W. and Kellogg, C. A., 2004. Dust storms and their impact on ocean and human health: dust in Earth's atmosphere, Ecohealth, 1, pp.284–295

17. Hess M., Koepke P., and Schult I. 1998, Optical Properties of Aerosols and Clouds: The Software Package OPAC, Bulletin of the American Meteorological Society Vol.79, 5, pp 831-844

18. Kallos G., Papadopoulos A, Katsafados P. and Nickovic S. 2006, *Transatlantic Saharan dust transport: Model simulation and results*, Journal of Geophysical Research, 111, D09204, doi:10.1029/2005JD006207

19. Kaskaoutis D.G., Kambezidis H.D., Nastos P.T., and Kosmopoulos P.G. 2008, *Study on an intense dust storm over Greece*, Atmospheric Environment, 42, pp6884–6896

20. Κατσαφάδος Π. και Μαυροματίδης Η. 2015, *Εισαγωγή στη Φυσική της Ατμόσφαιρας και Κλιματική Αλλαγή*, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.

21. Kaufman, Y.J., D. Tanre, B.N. Holben, S. Mattoo, L.A. Remer, T.F. Eck, J. Vaughan, and B. Chatenet 2002. *Aerosol radiative impact on spectral solar flux at the surface, derived from principal-plane sky measurements*, J. Atmos. Sci., 59: 635-646.

22. Kumar R., Barth M. C., Pfister G. G., Naja M. and Brasseur G. P. 2014, *WRF-Chem simulations of a typical pre-monsoon dust storm in northern India: influences on aerosol optical properties and radiation budget,* Atmos. Chem.

Phys., 14, pp.2431–2446, doi:10.5194/acp-14-2431-2014

23. Kumar R., Naja M., Pfister G.G., Barth M.C., and Brasseur G.P. 2012, *Simulations over South Asia using theWeather Research and Forecasting model with Chemistry (WRF-Chem): set-up and meteorological evaluation*, Geosci. Model Dev., 5, pp 321–343

24. Kumar R., Naja M, Pfister G.G., Barth M.C., Wiedinmyer C., and Brasseur G.P. 2012, *Simulations over South Asia using theWeather Research and Forecasting model with Chemistry (WRF-Chem): chemistry evaluation and initial results*, Geosci. Model Dev., 5, pp 619–648

25. Kumar, N., F.W. Lurmann, A.S. Wexler, S. Pandis, and J.H. Seinfeld 1996, *Development and Application of a Three Dimensional Aerosol Model.* Presented at the A&WMA Specialty Conference on Computing in Environmental Resource Management, Research Triangle Park, NC, December 2-4, 1996.

26. Marticorena, B., and G. Bergametti 1995, *Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme*, Journal of Geophysical Research, 100, pp. 16415-16430.

27. Middleton N. J. and Goudie A.S. 2002, *Saharan dust: sources and trajectories,*Transactions of the Institute of British Geographers, Volume 26, 2, pp. 165–181

28. Miller R.L. and Tegen 1998, *Climate Response to Soil Dust Aerosols*, Journal of Climate, 11, pp 3247- 3267.

29. National Aeronautics and Space Administration (NASA)

30. NOAA Earth System Research Laboratory, Εύρεση 04 Αυγούστου 2016, στην ιστοσελίδα: http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/surfrad/aod/

31. Perez, C., Nickovic, S., Pejanovic, G., Baldasano, J. M., and ´ Ozsoy, E., 2006. Interactive dust-radiation modeling: A step to im- ¨ prove weather forecasts, J. Geophys. Res., 111, pp1–17

32. Pewe T.L. 1981, *Desert Dust an Overview, Desert Dust: Origin, Characteristics, and Effect* of ManT. L. Pèwè,Spec.Pap. Geol. Soc. Am.,186,pp 2-10.

33. Roberts A. J. and Knippertz P. 2014, *The formation of a large summertime Saharan dust plume: Convective and synoptic-scale analysis*, Journal of Geophysical Research:Atmospheres 10.1002/2013JD020667

34. Salvador P. , Alonso-Pérez S., Pey J., Artíñano B., de Bustos J.J. ,Alastuey A. and Querol X. 2014, *African dust outbreaks over the western Mediterranean Basin: 11-year characterization of atmospheric circulation patterns and dust source areas*

35. Samadi M., Boloorani A.D., Alavipanah S.K., Mohamadi H.and Najaf M.S. 2014, *Global dust Detection Index (GDDI); a new remotely sensed methodology for dust storms detection,* Journal of Environmental Health Science & Engineering, 12:20

36. Shao Y., Yang Y, Wang J., Song Z., Leslie L.M, Dong C., Zhang Z. , Lin Z., Kanai Y., Yabuki S. and Chun Y. 2003, *Northeast Asian dust storms: Real-time numerical prediction and validation,* Journal Of Geophysical Research , VOL. 108, D22, pp 4691, doi:10.1029/2003JD003667

37. Skamarock W.C., Klemp J.B.,Dudhia J., Gill D. O., Barker D. M., Duda M.G., Huang X.Y., Wang W., and Powers J.G. 2008, A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR/TN–475+STR NCAR TECHNICAL NOTE.

38. Tegen I. 2003. *Modeling the mineral dust aerosol cycle in the climate system.* Quaternary Science Reviews , 22, pp. 1821 – 1834.

39. The Cyprus Institute www.cyi.ac.cy .

40. World Meteorological Organization- Dust sources and atmospheric dust process, Εύρεση 28 Ιανουαρίου 2017, στην ιστοσελίδα https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/source.html

41. Wesley, M.L., 1989. *Parameterization of surface resistance to gaseous dry deposition in regional numerical models.* Atmospheric Environment 16, pp.1293–1304

42. Wetter3- Aktuelle Wetterkarten, Εύρεση 15 Μάϊου 2016, στην ιστοσελίδα **http://www.wetter3.de/Archiv/**

43. The SDS-WAS programme at WMO, Εύρεση 17 Μαρτίου 2016, στην ιστοσελίδα **https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/Sand_and_Dust_Storm.html**

44. Wong M.S., Xiao F, Nichol J., Fung J., Kim J., Campbell J., Chan P.W. 2015, *A multi-scale hybrid neural network retrieval model for dust storm detection, a study in Asia,* Atmospheric Research, 158–159, pp.89–106

45. WRF - Model, Εύρεση 16 Μαρτίου 2016, στην ιστοσελίδα **http://www.wrf-**

model.org/index.php

46. Xin J. , Gong C., Wang S. and Wang Y. 2016, *Aerosol direct radiative forcing in desert and semi-desert regions of northwestern China,* Atmosheric Research, 171, pp 56-65

47. Χρήστου Ζ.Σ. 2009, *Εισαγωγικά Μαθήματα στη Φυσική της Ατμόσφαιρας*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου.

48. Zender, C. S., H. Bian, and D. Newman 2003, *Mineral Dust Entrainment and Deposition (DEAD) model: Description and 1990s dust climatology,* J. Geophys. Res.-Atmos., 108, D14, doi:10.1029/2002JD002775.

49. Zhang Y.,, Liu Y., Kucera P.A., Alharbi B.H., Pan L., Ghulam A. 2015, *Dust modeling over Saudi Arabia using WRF-Chem: March 2009* severe dust case, Atmospheric Environment, 119, pp.118-130