

ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΠΙΘΑΝΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΩΝ ΑΥΞΗΜΕΝΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΚΑΥΣΗΣ
ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΟΜΙΧΛΗΣ ΣΤΟ ΛΕΚΑΝΟΠΕΔΙΟ ΤΩΝ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΠΙΘΑΝΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΩΝ
ΑΥΞΗΜΕΝΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΩΝ ΚΑΥΣΗΣ
ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΟΜΙΧΛΗΣ ΣΤΟ
ΛΕΚΑΝΟΠΕΔΙΟ ΤΩΝ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΝΑΣΙΚΑΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ
ΑΜ 858

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΧΑΤΖΗΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΣ (ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ)

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική διατριβή εκπονήθηκε στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών (Π.Μ.Σ) «Ατμοσφαιρικές Επιστήμες και Περιβάλλον» του τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Νικόλαου Χατζηαναστασίου. Εκφράζω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στον κ. Χατζηαναστασίου για την άριστη συνεργασία και την πολύτιμη συμβολή του και την επιστημονική καθοδήγηση καθ' όλη την διάρκεια τόσο των μεταπτυχιακών μου σπουδών όσο και της παρούσας διατριβής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης, την Επίκουρη Καθηγήτρια του τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων κα. Αγγελική Φωτιάδη, για το διαρκές ενδιαφέρον και τις χρήσιμες συμβουλές που μου πρόσφερε. Ακόμη, να ευχαριστήσω τον Καθηγητή και Διευθυντή Ερευνών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ) κ. Νικόλαο Μιχαλόπουλο για τις εύστοχες παρατηρήσεις και υποδείξεις, το ενδιαφέρον για την πρόοδο της προσπάθειάς μου και τη μετάδοση γνώσεων κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μαθημάτων. Θέλω να εκφράσω ακόμη, τις ευχαριστίες μου προς την Κύρια Ερευνήτρια του ΕΑΑ κα. Κατερίνα Μπουγιατιώτη και τον Μεταδιδακτορικό Ερευνητή του ΕΑΑ κ. Παναγιώτη Καλκαβούρα, για τις επικοινωνητικές συζητήσεις και τη διάθεση δεδομένων, απαραίτητα για την ανάλυση της συγκεκριμένης εργασίας.

Περιεχόμενα

Περίληψη	6
Abstract.....	8
Λίστα Συμβόλων	11
Λίστα Ακρωνυμίων	12
Κεφάλαιο 1 ^ο Εισαγωγή.....	13
Κεφάλαιο 2 ^ο Περιγραφή Μοντέλων.....	22
2.1 Μοντέλο δυναμικής.....	23
2.2 Μοντέλο εδάφους-υπεδάφους και χαμηλής βλάστησης.....	24
2.3 Μοντέλο ακτινοβολίας.....	25
2.4 Σχήμα μικροφυσικής.....	28
2.4.1 Μοντέλο πλήρους μικροφυσικής MIFOG.....	28
2.4.2 Μοντέλο παραμετροποιημένης μικροφυσικής PAFOG	33
2.5 Αρχικοποίηση των μοντέλων	35
Κεφάλαιο 3 ^ο Δεδομένα και Μεθοδολογία.....	36
3.1 Τόπος μελέτης και χρονική περίοδος	36
3.2 Επεισόδια ομίχλης και αιθαλομίχλης.....	37
3.3 Δεδομένα αρχικοποίησης και επαλήθευσης.....	48
Κεφάλαιο 4 ^ο Αποτελέσματα	53
4.1 Μελέτες ευαισθησίας.....	53
4.1.1 Προσομοίωση ελέγχου PaFog και MiFog.....	55
4.1.2 Ευαισθησία στο θερμοκρασιακό προφίλ της ατμόσφαιρας.....	63
4.1.3 Ευαισθησία στην κατακόρυφη ταχύτητα καθίζησης.....	67
4.1.4 Ευαισθησία στο ύψος ανάμιξης των αερολυμάτων.....	69
4.1.5 Ευαισθησία στον τύπο του εδάφους	71
4.1.6 Ευαισθησία στο θερμοκρασιακό προφίλ του υπεδάφους	73
4.1.7 Ευαισθησία στην υγρασία του υπεδάφους	75
4.1.8 Ευαισθησία στο είδος των αερολυμάτων	76
4.1.9 Ευαισθησία στον αριθμό των αερολυμάτων.....	78
4.1.10 Ευαισθησία στο υδατοδιαλυτό μέρος (ε) των αερολυμάτων.....	80
4.1.11 Ευαισθησία στο χρόνο εκκίνησης.....	81
4.2 Βέλτιστη προσομοίωση	84
4.3 Μελέτη της επίδρασης των σωματιδίων καύσης βιομάζας στην ομίχλη.	90
Κεφάλαιο 5 ^ο Συμπεράσματα και προοπτικές	97

Παράρτημα Α	105
Παράρτημα Β	110
Παράρτημα Γ	112
Παράρτημα Δ	114
Παράρτημα Ε	115
Βιβλιογραφία	117

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία εφαρμόζονται δύο αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης ομίχλης στα Ιωάννινα με σκοπό, αφενός, την πρόγνωση και μελέτη της ομίχλης και αφετέρου τη διερεύνηση της επίδρασης των τοπικά παραγόμενων σωματιδίων καύσεων βιομάζας στις ιδιότητες της ομίχλης, για πρώτη φορά στην Ελλάδα. Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων χρησιμοποιήθηκαν δύο μονοδιάστατα (1-D) μοντέλα ομίχλης, το MiFog (Microphysical Fog) και PaFog (Parameterized Fog). Τα δύο αυτά μοντέλα διαθέτουν κοινό κώδικα που περιγράφει την δυναμική, την τύρβη, την ακτινοβολία και το έδαφος, ενώ διαφέρουν ως προς τη μικροφυσική. Το MiFog περιέχει σχήμα πλήρους μικροφυσικής ενώ το PaFog χρησιμοποιεί ένα παραμετροποιημένο σχήμα. Η αρχικοποίηση των μοντέλων γίνεται με χρήση μετεωρολογικών δεδομένων εδάφους (εδάφους-αέρα) και υπεδάφους, από το μετεωρολογικό σταθμό του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων (ΠΙ) και κατακόρυφα προφίλ ατμόσφαιρας, από δεδομένα επανάλυσης MERRA-2, εξαιτίας της έλλειψης τοπικών ραδιοβολίσεων. Επιπλέον, τα αερολύματα στο μοντέλο MiFog εισάγονται μέσω θεωρητικών αριθμητικών κατανομών μεγεθών και μέσω του υδατοδιαλυτού τους μέρους (ϵ). Αντίστοιχα, στο PaFog χρησιμοποιούνται αριθμητικές συγκεντρώσεις αερολυμάτων, ενώ η ενεργοποίηση των αερολυμάτων περιγράφεται μέσω παραμετροποιήσεων.

Αρχικά, προσδιορίστηκαν τα επεισόδια ομίχλης και αιθαλομίχλης που σημειώθηκαν στα Ιωάννινα, καθώς και αυτά που εκδηλώθηκαν ταυτόχρονα, κατά την περίοδο περίπου τριών ετών (05/2019 – 02/2022). Τα επεισόδια αυτά ορίστηκαν ως η τομή των ημερών έντονης αιθαλομίχλης και των ημερών ομίχλης. Για τον εντοπισμό των ημερών έντονης αιθαλομίχλης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα συγκέντρωσης μάζας αιωρούμενων σωματιδίων (particulate matter, PM) από τον Περιβαλλοντικό Σταθμό της Περιφέρειας Ηπείρου, βάσει τεχνικής καθορισμού κατωφλίων για τις τιμές PM. Ο προσδιορισμός των ημερών ομίχλης πραγματοποιήθηκε με τη χρήση METAR του αεροδρομίου των Ιωαννίνων, τα οποία ανέφεραν την ημέρα και την ώρα ύπαρξης ομίχλης σε ανάλυση μισής ώρας.

Στη συνέχεια, για την εφαρμογή των μοντέλων ομίχλης, επιλέχθηκε ένα τριήμερο επεισόδιο ομίχλης – αιθαλομίχλης το οποίο έλαβε χώρα στις 16-19/12/2020. Για την ορθή εφαρμογή των μοντέλων και εξαιτίας της έλλειψης μετρήσεων σε βασικές παραμέτρους εισόδου, πραγματοποιήθηκε μια σειρά από μελέτες ευαισθησίας προκειμένου να διερευνηθεί η διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων υπό διαφορετικές αρχικές συνθήκες και ως εκ τούτου και το σχετικό εύρος αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν στις μελέτες ευαισθησίας ήταν το θερμοκρασιακό προφίλ της ατμόσφαιρας, η ένταση των καθοδικών κινήσεων (κατακόρυφη ταχύτητα) του ατμοσφαιρικού αέρα, το ύψος ανάμιξης των αερολυμάτων, ο τύπος εδάφους, η θερμοκρασία και η υγρασία υπεδάφους, ο τύπος, ο αριθμός και το υδατοδιαλυτό μέρος (ϵ) των αερολυμάτων και τέλος η ώρα εκκίνησης του μοντέλου. Από τις μελέτες ευαισθησίας προέκυψε ότι τα αποτελέσματα των μοντέλων εμφανίζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στο θερμοκρασιακό προφίλ της ατμόσφαιρας, στον τύπο και στην υγρασία του εδάφους και στον τύπο των αερολυμάτων. Μικρότερη είναι η ευαισθησία στην κατακόρυφη ταχύτητα, στο ύψος ανάμιξης, τον αριθμό και το υδατοδιαλυτό μέρος των αερολυμάτων. Η πλέον μικρή ευαισθησία παρουσιάζεται στη θερμοκρασία του υπεδάφους. Επιπλέον, για μικρές χρονικές διαφοροποιήσεις στην ώρα εκκίνησης του μοντέλου, της τάξης των μερικών ωρών, δεν παρατηρείται σημαντική απόκλιση των αποτελεσμάτων.

Με βάση τα αποτελέσματα των παραπάνω μελετών ευαισθησίας, επιλέχθηκαν οι καταλληλότερες αρχικές συνθήκες για τη ρεαλιστικότερη προσομοίωση του υπό μελέτη επεισοδίου ομίχλης – αιθαλομίχλης. Η προσομοίωση αυτή έγινε με χρήση του μοντέλου MiFog καθώς αυτό περιέχει πλήρη μικροφυσική και αποδίδει πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα σε σχέση με το παραμετροποιημένο σχήμα μικροφυσικής του PaFog. Η ποιότητα της προσομοίωσης αυτής αξιολογήθηκε μέσω συγκρίσεων των αποτελεσμάτων των μοντέλων με μετεωρολογικά δεδομένα του ΠΙ, ενώ η χρονική στιγμή εξασθένισης της ομίχλης και η ορατότητά της ελέγχθηκαν μέσω συγκρίσεων με δεδομένα της EMY και METARs του αεροδρομίου

Ιωαννίνων. Από τη σύγκριση μεταξύ προσομοίωσης και παρατηρήσεων για την πρώτη ημέρα προσομοίωσης βρέθηκε αρκετά καλή συνδιακύμανση της θερμοκρασίας στα 2 m, της σχετικής υγρασίας στο ίδιο ύψος και της εισερχόμενης στο έδαφος ηλιακής ακτινοβολίας. Οι παράμετροι αυτοί εμφάνιζαν μικρές διαφορές κατά τις μεσημβρινές ώρες. Αντίθετα, η θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους και η εισερχόμενη υπέρυθρη ακτινοβολία στην επιφάνεια παρουσίαζαν κοινή διακύμανση, όμως υπήρξε σημαντική υποεκτίμηση από το μοντέλο. Η ώρα διάλυσης της ομίχλης κατά την πρώτη ημέρα της προσομοίωσης εκτιμήθηκε από το μοντέλο στις 10:39 UTC, ενώ τα METARs την ανέφεραν στις 10:50 UTC. Η ορατότητα σύμφωνα με τις παρατηρήσεις ήταν στα 100 m έως και τις 09:00 UTC, ενώ το μοντέλο μέχρι εκείνη την στιγμή προσομοίωσε ομίχλη με λίγο χαμηλότερες τιμές, με την ελάχιστη να είναι στα 70 m. Ακόμη, υπολογίστηκαν στατιστικοί δείκτες και βρέθηκε η γραμμική σχέση μέσω της θεωρίας ελαχίστων τετραγώνων, για κάθε ημέρα προσομοίωσης ξεχωριστά. Κατά την πρώτη μέρα βρέθηκε πολύ καλή γραμμική σχέση μεταξύ του μοντέλου και των παρατηρήσεων για τη θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία και την ηλιακή ακτινοβολία, με συντελεστές συσχέτισης R ίσους με 0.980, 0.938 και 0.955, αντίστοιχα. Ακόμη, το RMSE (Root Mean Squared Error) και το BIAS ήταν 0.74 (14.5 %) και -0.13 (-2.6 %), αντίστοιχα, για τη θερμοκρασία στα 2 m, 2.83% (2.94 %) και 0.42% (0.4 %) για τη σχετική υγρασία στα 2 m και 48.55 W/m² (62.0 %) και -13.49 W/m² (-17.24 %) για την ηλιακή ακτινοβολία, αντίστοιχα. Η θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους εμφάνισε καλή γραμμική σχέση με συντελεστή R= 0.989, όμως παρουσίαζε μεγάλη υποεκτίμηση της ελάχιστης τιμής, έως και 6 K (69.0 %), με το RMSE και το BIAS να είναι 3.86 K (44.4 %) και -3.26 K (-37.5 %), αντίστοιχα. Η υπέρυθρη ακτινοβολία εμφάνισε τη χειρότερη γραμμική συσχέτιση με τις τιμές των R, RMSE και BIAS να είναι ίσες με 0.739, 17.02 (49.8 %) και -13.99 (-40.9%) W/m², αντίστοιχα. Τις επόμενες δύο ημέρες (δεύτερη και τρίτη του επεισοδίου) της προσομοίωσης τα παραπάνω στατιστικά χειροτέρευαν σταδιακά.

Τέλος, για τη διερεύνηση της επίδρασης των σωματιδίων καύσης βιομάζας στην ομίχλη, πραγματοποιήθηκαν με το μοντέλο MiFog τέσσερις προσομοιώσεις με διαφορετικά σενάρια εκπομπών, τα οποία περιγράφουν περιπτώσεις χωρίς αιθαλομίχλη, με ήπια αιθαλομίχλη και με έντονη (με φρέσκα και γερασμένα σωματίδια) αιθαλομίχλη. Κάθε περίπτωση χαρακτηρίστηκε από διαφορετική αριθμητική κατανομή σωματιδίων και διαφορετικό υδατοδιαλυτό μέρος (ϵ), με τις προσομοιώσεις έντονης αιθαλομίχλης με φρέσκα σωματίδια να έχουν μικρότερες τιμές (ϵ) σε σχέση με τα γερασμένα. Οι τιμές του υδατοδιαλυτού μέρους βασίστηκαν σε μετρήσεις της εκστρατείας PANACEA στα Ιωάννινα. Προέκυψε ότι, όταν υπάρχει αιθαλομίχλη σχηματίζεται ευκολότερα και πυκνότερη ομίχλη από ό,τι χωρίς αιθαλομίχλη, ενώ η παρουσία ισχυρότερης αιθαλομίχλης οδηγεί στη δημιουργία ακόμη πυκνότερης και μεγαλύτερης διάρκειας ομίχλης. Οι ορατότητες των τεσσάρων προαναφερθέντων προσομοιώσεων κυμάνθηκαν περίπου στα 200, 150, 100 και 80 m, με τις ελάχιστες τιμές να φθάνουν τα 133, 107, 72 και 57 m, αντίστοιχα. Η περίπτωση έντονης αιθαλομίχλης με γερασμένα σωματίδια παρουσίασε τη μέγιστη τιμή LWP (Liquid Water Path), 27.5 g/m², ενώ η περίπτωση χωρίς αιθαλομίχλη την ελάχιστη, 12.5 g/m². Οι περιπτώσεις έντονης (με φρέσκα) και ήπιας αιθαλομίχλης εμφάνισαν ενδιάμεσες τιμές LWP, με μέγιστα 15 και 22.5 g/m², αντίστοιχα. Όλα τα σενάρια προσομοιώνουν παρόμοιο ύψος ομίχλης, με μέγιστο ύψος στα περίπου 80 m. Η έναρξη της ομίχλης παρατηρήθηκε μετά τις 18:00 UTC, σε όλες τις προσομοιώσεις, ενώ η διάλυσή της εκτιμήθηκε στις 09:54, 10:06, 10:05 UTC, για τα σενάρια χωρίς, ήπιας και έντονης με φρέσκα σωματίδια αιθαλομίχλης, ενώ στην περίπτωση της έντονης αιθαλομίχλης με γερασμένα αερολύματα η διάλυσή της καθυστέρησε κατά περίπου μία ώρα, έως τις 11:01 UTC.

Abstract

In this study, we implemented two numerical weather prediction fog models for the region of Ioannina with the aim of firstly forecasting and studying fog and secondly investigating the effect of locally emitted biomass burning aerosols in fog properties, which represents the first study of its kind conducted in Greece. To accomplish the above goals we implemented two one dimensional (1-D) fog models, MiFog (Microphysical Fog) and PaFog (Parameterized Fog). These models have common dynamic, turbulent, radiation and soil modules while their differences are in the microphysical module. MiFog has a full microphysics scheme while PaFog has a parameterized scheme. To initialize the models, ground -air and surface meteorological data is used from the University of Ioannina (UoI). The atmospheric vertical profile is estimated with the use of MERRA-2 reanalysis data, due to lack of local radiosondes. Moreover, in MiFog, aerosols are modeled using theoretical number size distributions along with their soluble fraction (ϵ). In contrast, PaFog uses aerosol number concentrations and their activation to cloud droplets is described through a parameterization scheme.

Firstly, the fog and intense smog episodes, as well as their common occurrences, were identified for Ioannina, over approximately three-year period (05/2019 – 02/2022). The intense smog days were determined based on threshold values of particulate matter (PM) concentrations using data obtained from the Environmental Station of the Epirus Region. Fog days were identified using METARs from the airport of Ioannina, which record the date and hour of fog occurrences at thirty minutes intervals.

Afterwards, the models were initialized for a selected three day fog-smog episode that took place on 16-19/12/2020. Given the absence of directly observable input parameters, we performed sensitivity analyses to assess how variations in initial conditions influence the model outputs and to quantify the associated uncertainty ranges. The input parameters examined in these sensitivity tests included the temperature atmospheric vertical profile, the strength of subsidence (vertical wind), the aerosol mixing height, the soil type, the temperature and moisture profile of soil, aerosol type, number concentration and soluble fraction (ϵ) and lastly the model initialization time. These tests showed that the models are very sensitive to temperature vertical profiles, soil type and moisture and aerosol type. The models exhibited lower sensitivity to the strength of subsidence, the aerosol mixing height, number concentration of aerosols and their soluble fraction. Models are least sensitive to the temperature profile of the soil. Also, for small changes in initialization time, in magnitude of few hours, results do not diverge significantly.

According to the results of the above sensitivity tests, we create a realistic simulation of the selected fog-smog episode. This simulation was performed using MiFog model, as it incorporates a comprehensive microphysical module and thus provides more realistic results compared to the parameterized scheme used in PaFog. This simulation was validated and compared with meteorological data of UoI, while the fog dissipation time was compared with visibility data from HNM (Hellenic National Meteorological service) and METARs from the airport of Ioannina. The comparison between simulation and observations, for the first episode day, showed very good covariance for the 2 m temperature and relative humidity and for the surface solar radiation. However, all these parameters showed small discrepancies with observations during noon. On the other hand, the surface temperature and surface infrared radiation showed good covariance with observations however the model significantly underestimated their magnitudes. The fog dissipation time of the model, for the first day was estimated at 10:39 UTC, while METARs reported fog dissipation time at 10:50 UTC. The visibility according to observations was at 100 m until 09:00 UTC, whereas the model simulated lower visibilities with a minimum value of 70 m. Moreover, statistical indices were calculated, and the least square theory was applied for each separate episode day. During the first day model showed very good linear relationship with observations for the 2 m temperature,

2 m relative humidity and surface solar radiation with their correlation coefficients (R) being equal to 0.980, 0.938, 0.955, respectively. Also, RMSE (Root Mean Squared Error) and BIAS were 0.74 (14.5 %) and -0.13 (-2.6 %) for 2 m temperature, 2.83% (2.94 %) and 0.42% (0.4 %) for 2m relative humidity and 48.55 W/m² (62.0 %) and -13.49 W/m² (-17.24 %) for surface solar radiation, respectively. The surface temperature showed very good linear relationship with observations with correlation coefficient equal to 0.989, but showed large underestimation of low temperature values up to 6 K (69.0 %), with RMSE and BIAS equal to 3.86 K (44.4 %) and -3.26 K (-37.5 %), respectively. The surface infrared radiation exhibited the weakest linear relationship with the values of R, RMSE and BIAS equal to 0.739, 17.02 (49.8 %) and -13.99 (-40.9%) W/m², respectively. The next two days (second and third episode days) of simulations results showed gradual deterioration of the above statistics for all parameters.

Finally, for the investigation of the effect of local biomass burning aerosols on fog properties we performed four distinct simulations for cases of no, light, heavy (with fresh and aged aerosols) smog. Each case was characterized by the different aerosol number size distribution and soluble fraction (ϵ). The simulations of heavy smog with fresh and aged biomass burning aerosols differ only in the soluble fraction, with the fresh aerosols having lower soluble fraction compared to the aged ones. The values of soluble fraction are based on measurements during the PANACEA campaign in Ioannina. These simulations show that when smog is present, fog forms more easily and becomes denser. Under stronger smog conditions, the fog becomes even thicker and its dissipation is further delayed. The visibilities of the previously mentioned simulations, fluctuate at around 200, 150, 100 and 80 m with the minimum values being equal to 133, 107, 72 and 57 m, respectively. The case of heavy smog with aged aerosols exhibits the highest LWP with value at 27.5 g/m², while the no smog case showed the minimum value at 12.5 g/m². The cases of heavy (with fresh) and light smog showed intermediate values with their peaks being at 15 and 22.5 g/m², respectively. All scenarios simulate same fog height with the maximum value at 80 m. In all smog scenarios, fog occurs after 18:00 UTC and dissipates at 09:54, 10:06, 10:05, UTC for the no, light and heavy (with fresh aerosols) smog scenarios, respectively. In the case of heavy smog with aged aerosols fog dissipates one hour later at 11:01 UTC.

Λίστα Συμβόλων

C	ρυθμός συμπύκνωσης
D'_v	ικανότητα διάχυσης των υδρατμών
E_n	πυκνότητα ροής ακτινοβολίας
L	λανθάνουσα θερμότητα
M_s	μοριακό βάρος της διαλυμένης ουσίας
M_w	μοριακό βάρος του καθαρού νερού
N_D	αριθμητική συγκέντρωση σταγόνων
Q_{ext}	ενεργός παράγοντας εξασθένησης
Q_{sca}	ενεργός παράγοντας σκέδασης
R_i	μέση ακτίνα αερολυμάτων i οστής κατανομής
R_v	σταθερά αερίων για τους υδρατμούς
S_∞	λόγος μερικής πίεσης υδρατμών προς πίεση κορεσμού υδρατμών
S_r	υπερκορεσμός
c_w	ειδική θερμότητας
$e_{\infty,S}$	μερική πίεση κορεσμού
e_∞	μερική πίεση υδρατμών
f	παράγοντας Coriolis
$f(a, r)$	δυσδιάστατη κατανομή σωματιδίων ξηρού (a) και υγρού (r) πύρινα
g	παράγοντας ασυμμετρίας
k'	θερμική αγωγιμότητα του υγρού αέρα
k_h	τυρβώδης συντελεστής θερμότητας
k_m	τυρβώδης συντελεστής ορμής
$\log\sigma$	πολυδιασπορά
m_w	μάζα νερού
q_v	ειδική υγρασία
q_w	περιεχόμενο υγρού νερού
\dot{r}	ρυθμός μεταβολής μεγέθους σταγόνας
u	οριζόντια ταχύτητα (x διεύθυνση)
u_g	οριζόντια ταχύτητα (x διεύθυνση) γεωστροφικού ανέμου
v	οριζόντια ταχύτητα (y διεύθυνση)
v_g	οριζόντια ταχύτητα (y διεύθυνση) γεωστροφικού ανέμου
w	κατακόρυφη ταχύτητα (z διεύθυνση)
w_t	οριακή ταχύτητα
β_{ext}	συντελεστής εξασθένησης
β_{sca}	συντελεστής σκέδασης
ε	κλάσμα της μάζας του υδατοδιαλυτού προς το συνολικό μέρος του αερολύματος
θ	δυναμική θερμοκρασία
ν	συνολικός αριθμός ξεχωριστών ιόντων άλατος
ρ_s	πυκνότητα κορεσμένων υδρατμών
ρ_w	ειδική πυκνότητα
ρ_α	πυκνότητα ξηρών αερολυμάτων
$\sigma_{s/\alpha}$	επιφανειακή τάση του υδατικού διαλύματος

Λίστα Ακρωνυμίων

BBA	Biomass Burning Aerosols
BC	Black Carbon
CCN	Cloud Condensation Nucleus
CN	Cloud Nucleus
CWC	Cloud Water Content
DWC	Drizzle Water Content
LWC	Liquid Water Content
LWP	Liquid Water Path
METAR	METeorological Aerodrome Report
MODIS	MOderate-resolution Imaging Spectroradiometer
NWP	Numeric Weather Prediction
PBL	Planetary Boundary Layer
PBLH	Planetary Boundary Layer Height
PM	Particulate Matter
SIR	Surface Infrared Radiation
SmD	Smog Day
SSR	Surface Solar Radiation,
VOCs	Volatile Organic Compounds
WMO	World Meteorological Organization
EMY	Ελληνική Μετεωρολογική Υπηρεσία

Κεφάλαιο 1^ο

Εισαγωγή

Τα νέφη είναι ένα από τα σημαντικότερα συστατικά της Γήινης ατμόσφαιρας, καθώς συμμετέχουν σε πολλές φυσικές διεργασίες, παίζοντας σημαντικότατο ρόλο για διάφορα μετεωρολογικά φαινόμενα και το κλίμα, τα οποία διαμορφώνουν αποφασιστικά. Πιο συγκεκριμένα, τα νέφη συμμετέχουν και διαμορφώνουν τα ισοζύγια ακτινοβολιών και ενέργειας του συστήματος Γης-ατμόσφαιρας. Καθορίζουν το ποσό της εισερχόμενης, μικρού μήκους κύματος ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης, αλλά και την μεγάλου μήκους κύματος υπέρυθρη γήινη ακτινοβολία που εισέρχεται και εξέρχεται από αυτήν, καθιστώντας τα ρυθμιστικό παράγοντα για τη θερμοκρασία που επικρατεί στην επιφάνεια της Γης, αλλά και της ατμόσφαιρας. Επιπλέον, είναι άρρηκτα συνδεδεμένα και υπεύθυνα για τον καιρό της κάθε περιοχής, καθώς επιδρούν στη θερμοκρασία, συμμετέχουν σε οργανωμένα καιρικά συστήματα και παρέχουν υετό. Με την τελευταία ιδιότητα, αποτελούν σημαντικό κομμάτι του υδρολογικού κύκλου και κατά συνέπεια της ζωής στον πλανήτη μας. Ακόμη, καθώς τα νέφη αποτελούν ρυθμιστικό παράγοντα για τις ροές ακτινοβολίας που εισέρχονται και εξέρχονται από τη Γη, ασκούν σημαντική επίδραση στο κλίμα τόσο σε τοπική κλίμακα όσο και σε πλανητικό επίπεδο.

Τα νέφη αποτελούνται από μικροσκοπικές υδροσταγόνες, παγοκρυστάλλους ή και συνύπαρξη των δύο, τα οποία προέρχονται από τη συμπύκνωση των υδρατμών της ατμόσφαιρας πάνω σε μικροσκοπικά σωματίδια (αερολύματα) γνωστά ως πυρήνες συμπύκνωσης νεφών (Cloud Condensation Nucleus, CCN). Οι πυρήνες συμπύκνωσης των νεφών είναι στερεής ή υγρής φάσης σωματίδια που αιωρούνται στο ατμοσφαιρικό αέρα, δηλαδή αερολύματα, πάνω στα οποία υδρατμοί της ατμόσφαιρας συμπυκνώνονται ετερογενώς και δημιουργούν σταγονίδια ή παγοκρυστάλλους. Γενικά, τα νέφη έχουν διάφορα σχήματα, μορφές και μεγέθη και μπορούν να σχηματίζονται ακριβώς πάνω από την επιφάνεια του έδαφους, κοντά της, αλλά και ψηλότερα στην ατμόσφαιρα (μέσα στο στρώμα της τροπόσφαιρας). Η κατηγοριοποίησή τους γίνεται με διάφορα κριτήρια και κυρίως ανάλογα με το ύψος που βρίσκονται μέσα στην ατμόσφαιρα, βάσει του οποίου διακρίνονται σε χαμηλά, που βρίσκονται από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι τα 2 km, σε μεσαία από ύψη 2 έως 6 km, σε υψηλά τα οποία εντοπίζονται άνω των 6 km αλλά και σε νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης, τα οποία βρίσκονται σε ύψη σχεδόν από την επιφάνεια της Γης μέχρι και την τροπόπαυση. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον, που είναι και το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, έχουν τα χαμηλά νέφη, συγκεκριμένα τα χαμηλά στρωματόμορφα νέφη (low stratus) και ιδιαίτερα η ομίχλη.

Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό οργανισμό (WMO, 1992) ως ομίχλη ορίζεται η μείωση της οριζόντιας ορατότητας κάτω από 1 km. Αυτή συνήθως προκαλείται από την αιώρηση μικροσκοπικών σταγονιδίων νερού πάνω από την επιφάνεια της Γης, δηλαδή επιφανειακού νέφους, τα οποία έχουν διάμετρο από 5 έως 50 μm (Pruppacher and Klett, 2010). Επιπλέον στην βιβλιογραφία χρησιμοποιείται και ο ορισμός της «ασθενούς» ομίχλης (mist) στις περιπτώσεις στις οποίες η ορατότητα διατηρείται σε χαμηλά σχετικά επίπεδα αλλά παραμένει πάνω από 1km.

Μια ειδική περίπτωση ομίχλης μπορεί να θεωρηθεί η αιθαλομίχλη (smog). Ο όρος αυτός προέρχεται από τις λέξεις αιθάλη και ομίχλη (smoke & fog) και αναφέρεται

στην μείωση της ορατότητας εξαιτίας της αυξημένης παρουσίας ρύπων, τόσο αέριων όσο και σωματιδιακών, μέσα στον ατμοσφαιρικό αέρα. (<https://www.britannica.com/science/smog>, τελευταία προβολή 4 Ιουλίου, 2025). Οι όροι ομίχλη και αιθαλομίχλη δεν αναφέρονται στο ίδιο φαινόμενο, καθώς η ομίχλη σχηματίζεται από φυσικές διεργασίες, ενώ η αιθαλομίχλη προέρχεται από ανθρωπογενή δραστηριότητα. Τα δύο φαινόμενα, όμως, μπορούν να συνυπάρχουν, συνεισφέροντας ταυτόχρονα στην μείωση της ορατότητας.

Η ομίχλη ανάλογα με τον μηχανισμό σχηματισμού της μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε διάφορες ομάδες. Σύμφωνα με τον Willett (1928) οι τύποι ομίχλης μπορούν να ενταχθούν σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες, οι οποίες έχουν μεταξύ τους διαφορές τόσο ως προς τη διαδικασία σχηματισμού όσο και ως προς τα χαρακτηριστικά τους. Αυτές οι κατηγορίες είναι :

i) Μετωπική ομίχλη: Ο τύπος αυτός παρατηρείται κατά το πέρασμα από μία περιοχή ενός μετώπου, το οποίο χωρίζει δύο αέριες μάζες με διαφορετικά θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά. Η ανάμιξη τέτοιων αερίων μαζών, οι οποίες έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες και βρίσκονται κοντά στον κορεσμό, έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ομίχλης. Η δημιουργία της μπορεί να προκύψει πριν, κατά τη διάρκεια, αλλά και μετά το πέρασμα του μετώπου. Αυτού του τύπου ομίχλες είναι συνήθεις σε περιοχές όπου το πέρασμα μετώπων είναι συχνό ή στις περιοχές στις οποίες υπάρχει έντονη κυκλωνική δραστηριότητα. Επιπλέον, σχηματίζονται σε στενές περιοχές παράλληλα με το μέτωπο, ενώ μπορούν να μεταφερθούν μαζί με αυτό. Τέλος, οι ομίχλες αυτές δεν έχουν μεγάλη έκταση και χρονική διάρκεια.

ii) Ομίχλη μεταφοράς: Αυτός ο τύπος ομίχλης χαρακτηρίζεται κυρίως από την μεταφορά θερμών αερίων μαζών, με την επικράτηση μικρής έντασης ανέμων, πάνω από ψυχρές επιφάνειες ή τη μεταφορά ψυχρού αέρα πάνω από θερμή επιφάνεια νερού. Στην πρώτη περίπτωση θερμός αέρας μεταφέρεται πάνω από ψυχρή επιφάνεια με αποτέλεσμα να ψύχεται και να αυξάνεται η σχετική του υγρασία, ενώ παράλληλα η ειδική υγρασία παραμένει σταθερή, φτάνοντας στο κορεσμό. Τέτοιες περιπτώσεις είναι οι ομίχλες μουσώνων, θαλάσσης και οι τροπικές. Στη δεύτερη περίπτωση, η δημιουργία της ομίχλης οφείλεται στην αύξηση της σχετικής υγρασίας της ψυχρής ξηρότερης αέριας μάζας, με εμπλουτισμό υδρατμών κατά το πέρασμα της πάνω από μια θερμότερη υδάτινη επιφάνεια. Στην περίπτωση αυτή αυξάνεται η ειδική υγρασία και ελαφρώς η θερμοκρασία της. Τέτοιου είδους ομίχλης μεταφοράς είναι ο «καπνός» αρκτικής θάλασσας και η ομίχλη «ατμού», που σχηματίζεται νωρίς το πρωί πάνω από λίμνες και ποτάμια κατά τους φθινοπωρινούς μήνες.

iii) Ομίχλη ακτινοβολίας: Οι ομίχλες του τύπου αυτού δημιουργούνται σε συνθήκες στις οποίες ο ουρανός είναι ανέφελος και επικρατούν χαμηλές έως μηδενικές ταχύτητες ανέμου πάνω από επίπεδες ηπειρωτικές περιοχές. Χαρακτηρίζονται από θερμοκρασιακή αναστροφή η οποία μπορεί να είναι είτε επιφανειακή είτε να βρίσκεται λίγο ψηλότερα στην ατμόσφαιρα. Ομίχλες τέτοιου τύπου είναι συχνές όταν επικρατούν αντικυκλωνικές συνθήκες, διότι κατά τη διάρκειά τους υπάρχουν καθοδικές κινήσεις αέρα, οι οποίες δεν ευνοούν την ύπαρξη νεφών. Όταν επικρατούν οι παραπάνω συνθήκες το έδαφος ψύχεται εξαιτίας της ικανής εκπομπής υπέρυθρης γήινης ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα να ψύχεται το ίδιο αλλά και ο υπερκείμενος αέρας εξαιτίας της επαφής του με το έδαφος. Έτσι, η αέρια μάζα φτάνει στη θερμοκρασία (σημείου) δρόσου οπότε αρχίζει η συμπύκνωση των υδρατμών και εμφάνιση της

ομίχλης. Οι ομίχλες αυτές διαλύονται συνήθως αργά το πρωί, όταν η ηλιακή ακτινοβολία θερμαίνει το έδαφος και την υπερκείμενη αέρια μάζα έως ότου διαλυθεί η θερμοκρασιακή αναστροφή και επιτραπεί η κατακόρυφη διάχυση της υγρασίας ή εξατμιστεί το συμπυκνωμένο νερό.

iv) Θαλάσσια ομίχλη: Ο τύπος αυτός ομίχλης σχηματίζεται όταν υγρός θαλάσσιος πολικός αέρας μεταφέρεται πάνω από στεριά, όπου υπόκειται σε περαιτέρω ψύξη και φτάνει στο σημείο κορεσμού με αποτέλεσμα τη συμπύκνωση υδρατμών και την εμφάνιση ομίχλης. Τέτοιες ομίχλες εμφανίζονται κυρίως στα παράλια της δυτικής Ευρώπης με τη μεταφορά του θαλάσσιου πολικού αέρα.

Η παραπάνω είναι μια βασική κατηγοριοποίηση των τύπων ομίχλης ανάλογα με τον μηχανισμό δημιουργία της. Φυσικά, υπάρχουν και πιο λεπτομερείς κατηγορίες, αν κανείς αναφερθεί στο καθ' αυτό αίτιο λόγω του οποίου η αέρια μάζα καθίσταται κορεσμένη ή σε άλλα πιο λεπτομερή φυσικά χαρακτηριστικά της ομίχλης. Έτσι, για παράδειγμα, έχουμε την ομίχλη βροχής, την παγωμένη ομίχλη, την ομίχλη ορεογραφίας (κοιλιάδων και ορέων) κ.ά.

Συχνά, σε αστικά κέντρα παρατηρείται το φαινόμενο της αιθαλομίχλης. Ο όρος αιθαλομίχλη (smog) χρησιμοποιήθηκε από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα και τις αρχές του 20^{ου} αιώνα για να περιγράψει την ρυπασμένη κατάσταση της ατμόσφαιρας που επικρατούσε πάνω από αστικές περιοχές. Η ρύπανση αυτή συνδύαζε εκπομπές αιθάλης (καπνού) και ομίχλη, δημιουργώντας ένα στρώμα αιθαλομίχλης, το οποίο συχνά ήταν τοξικό. Ένα σημαντικό επεισόδιο αιθαλομίχλης έλαβε μέρος στις 5 Δεκεμβρίου 1952 στο Λονδίνο το οποίο διήρκεσε 5 ημέρες. Κατά την διάρκεια αυτού, επικρατούσε πυκνή ομίχλη με την συνύπαρξη σωματιδίων διοξειδίου του θείου, εξαιτίας της καύσης κάρβουνου, το οποίο προκάλεσε τον θάνατο σε περίπου 4000 άτομα (Wilkins, 1954).

Οι επιπτώσεις της ομίχλης και της αιθαλομίχλης είναι εξαιρετικής σημασίας και επηρεάζουν άμεσα πολλούς τομείς της καθημερινότητας, όπως την οικονομία, τις μεταφορές αγαθών, τις μετακινήσεις ανθρώπων, την ποιότητα του αέρα και την υγεία.

Οι οικονομικές καταστροφές που προκαλεί η ομίχλη στον τομέα των μεταφορών, αγαθών ή ανθρώπων, είναι συγκρίσιμοι μεγέθους με αυτές που δημιουργούν οι σίφωνες, ενώ σε ακραίες περιπτώσεις φτάνει ακόμα και το μέγεθος των καταστροφών από χειμερινές καταιγίδες ή ακόμη και από τυφώνες (Gulterpe et al., 2007).

Πολλές έρευνες ανά τον κόσμο δείχνουν την επικινδυνότητα της οδήγησης μέσα στην ομίχλη. Η μειωμένη ορατότητα που προκαλείται από την ομίχλη δημιουργεί μεγάλες δυσκολίες στην μεταφορά αγαθών και στη μετακίνηση ανθρώπων. Η οδήγηση γίνεται εξαιρετικά δύσκολη κάτω από ομιχλώδεις συνθήκες, καθώς ο οδηγός αδυνατεί να διακρίνει τα προπορευόμενα οχήματα και την σηματοδότηση, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται σοβαρά ατυχήματα ακόμη και δυστυχήματα (Mutairi, 2017; Peng et al., 2018; Lakra and Avishek, 2022). Επιπλέον, η ομίχλη δημιουργεί προβλήματα και στις εναέριες μεταφορές. Συγκεκριμένα, οι πιλότοι, υπό συνθήκες ομίχλης, βασίζονται εντελώς σε αυτόματα συστήματα για να μπορέσουν να απογειωθούν ή να προσγειωθούν, αυξάνοντας έτσι τον κίνδυνο ατυχήματος σε περίπτωση σφάλματος του συστήματος. Ως εκ τούτου, αναγκάζονται να αναβάλλουν την αναχώρηση ή την προσγείωση, δημιουργώντας καθυστερήσεις ή ακυρώσεις πτήσεων, οι οποίες ούτως ή άλλως σημειώνονται σε αεροδρόμια που δε διαθέτουν αυτόματα ηλεκτρονικά βοηθητικά μέσα. Παρόλα αυτά, ο κίνδυνος δεν παύει να υπάρχει με αποτέλεσμα να σημειώνονται αεροπορικά ατυχήματα (Brock, 2024). Οι Gulterpe et al. (2019)

αναφέρουν πως η ορατότητα και επακόλουθα η ομίχλη είναι ο δεύτερος σημαντικότερος μετεωρολογικός παράγοντας, μετά τον άνεμο, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την πρόκληση αεροπορικών ατυχημάτων. Παρόμοια είναι η κατάσταση και στις θαλάσσιες μεταφορές. Η μειωμένη ορατότητα, δεν επιτρέπει στα πλοία να κινούνται με μεγάλες ταχύτητες, η είσοδος και η έξοδος από τα λιμάνια γίνεται με καθυστέρηση, προκαλώντας καθυστερήσεις στην μεταφορά αγαθών. Επιπρόσθετα, μειώνει την ικανότητα του πληρώματος να ανιχνεύει έγκαιρα σκάφη που βρίσκονται στην περιοχή και να πραγματοποιεί μανούβρες αποφυγής τους (Du et al., 2021; Ding et al., 2024).

Εκτός τις παραπάνω αρνητικές συνέπειες, η ομίχλη διαθέτει και ευεργετικές επιδράσεις. Η ομίχλη κατά την χειμερινή περίοδο δεν επιτρέπει το σχηματισμό παγετού, ο οποίος μπορεί να αποβεί καταστροφικός για μερικές καλλιέργειες. Επιπλέον, μερικά ζώα και φυτά τα οποία ζούνε σε ιδιαίτερα ξηρές περιοχές αξιοποιούν το νερό της ομίχλης, καθώς έχουν αναπτύξει την ικανότητα να εκμετάλλευσής του για ζωτικές τους λειτουργίες. Βασισμένη σε αυτή τη φυσική προσαρμογή των φυτών και των ζώων, η βιομηχανία έχει αναπτύξει τεχνολογίες συλλογής του νερού από την ομίχλη μέσω ειδικών συλλεκτών, οι οποίοι μπορούν να παρέχουν πολύτιμο νερό σε άνυδρες περιοχές (Bendix et al., 2011; Mitchell et al., 2020). Επιπλέον, η έκθεση ενός ατόμου στην ομίχλη έχει ευεργετικές ιδιότητες στην υγεία, καθώς τονώνει το δέρμα ως φυσικό ενυδατικό, ενώ το ομιχλώδες τοπίο μπορεί να αποτελεί για μερικούς ευχάριστη αισθητηριακή εμπειρία. Η φυσικά δημιουργούμενη ομίχλη μπορεί να επηρεάσει αρνητικά μόνο άτομα που ανήκουν σε ευπαθείς ομάδες και πάσχουν από άσμα (Hackney et al., 1985; Pérez-Díaz et al., 2017).

Αντίθετα, οι επιπτώσεις στην υγεία είναι σημαντικές όταν αναφερόμαστε στην αιθαλομίχλη και ιδιαίτερα όταν συνυπάρχει με ομίχλη. Τα αστικά περιβάλλοντα είναι συνήθως γεμάτα με ρύπους, οι οποίοι με εμφάνιση θερμοκρασιακών αναστροφών, χαμηλού ύψους ανάμιξης, ήπιων ασθενών ανέμων και υψηλής υγρασίας, μπορούν να αυξηθούν σημαντικά και να προκαλέσουν επεισόδια αιθαλομίχλης (Gray et al., 2019; Zhu et al., 2022). Κατά την διάρκεια αυτών, συχνή είναι και η εμφάνιση ομίχλης η οποία μέσω των μηχανισμών πυρηνοποίησης (nucleation) και συσσωμάτωσης (coagulation) συγκρατεί του ρύπους και δημιουργεί μια επιβαρυσμένη αστική ατμόσφαιρα στην οποία αιωρούνται σταγονίδια και σωματίδια τα οποία είναι εξαιρετικά επιβλαβή για την ανθρώπινη υγεία (Pandis et al., 1990). Η εισπνοή των σωματιδίων της αιθαλομίχλης σε καθημερινή και συνεχόμενη βάση έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία αναπνευστικών δυσλειτουργιών, ενόχληση σε όργανα όπως μάτια, μύτη και λαιμό, καρδιαγγειακά προβλήματα και νευρολογικές παθήσεις. Τα πολύ μικρά σωματίδια που υπάρχουν κατά την δημιουργία αιθαλομίχλης, σωματίδια με διάμετρο έως 2.5 μm (PM_{2.5}), διεισδύουν βαθιά στους πνεύμονες και στο αίμα και προκαλούν φλεγμονές και καταστροφή ιστών σε όλο το σώμα, με αποτέλεσμα να δημιουργούν αγγειακά εγκεφαλικά επεισόδια, καρκίνο του αναπνευστικού και γενικά μείωση του προσδόκιμου ζωής (Mishra, 2017; Zhu et al., 2022; Ezani, 2025; Ha, 2025). Η αιθαλομίχλη εκτός από τους ανθρώπους επηρεάζει και την φυσιολογία της βλάστησης. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις σωματιδίων και το όζον προκαλούν μείωση της επιφάνειας του φυλλώματος, καταστρέφουν την χλωροφύλλη και γενικώς επιβραδύνουν την ανάπτυξη των φυτών (Aier et al., 2024).

Από τα παραπάνω διαπιστώνεται η σημαντικότητα και το μέγεθος των επιδράσεων της ομίχλης και της αιθαλομίχλης. Για αυτόν τον λόγο, παγκοσμίως και ιδιαίτερα για περιοχές όπου το φαινόμενο είναι συχνό, γίνονται προσπάθειες για τη μελέτη του, την επέκταση και βελτίωση της ήδη υπάρχουσα γνώσης. Η επέκταση της γνώσης αναφέρεται σε τομείς που αφορούν στην υγεία, τις μικροφυσικές διεργασίες και τη χημεία που περιβάλλει τα CCN, την ανάπτυξη τεχνικών και οργάνων παρατήρησης, αλλά και την ανάπτυξη/βελτίωση αριθμητικών μοντέλων καιρού (Numeric Weather Prediction, NWP) για την ρεαλιστική προσομοίωση και πρόγνωση του φαινομένου της ομίχλης.

Στην Ελλάδα έχουν γίνει μελέτες του φαινομένου της ομίχλης. Πρώτος ο Angouridakis (1973) μελέτησε τους τύπους καιρού που συνδέονται με περιστατικά ομίχλης στην περιοχή της Θεσσαλονίκης. Έπειτα οι Angouridakis & Flocas (1983) πρότειναν μια γραμμική εξίσωση η οποία χρησιμοποιήθηκε για την πρόγνωση ομίχλης ακτινοβολίας στην περιοχή της Θεσσαλονίκης. Στη συνέχεια, με τη χρήση δορυφορικών εικόνων από το δορυφόρο METEOSAT έγινε πρόγνωση της ώρας διάλυσης της ομίχλης για την περιοχή της Θεσσαλίας (Anthis and Cracknell, 1999). Ακόμη, έγινε μια κλιματολογική εργασία για την περίοδο 1971-2002, όπου ταυτοποιήθηκαν οι κυριότεροι τύποι ομίχλης για την Θεσσαλονίκη (Foris, 2002). Επίσης, για την ίδια πόλη, έγινε με στατιστική προσέγγιση μια μελέτη για να διερευνηθούν τα φυσικά χαρακτηριστικά της ομίχλης για περίοδο 35 ετών 1971-2005 (Stolaki et al., 2009). Οι Houssos et al. (2009) εξέτασαν τα χαρακτηριστικά της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας τα οποία σχετίζονται με τη δημιουργία της ομίχλης στον ελλαδικό χώρο. Μια πολύ ενδιαφέρουσα εργασία είναι των Stolaki et al. (2012), στην οποία για πρώτη φορά στην Ελλάδα χρησιμοποιήθηκαν τα συζευγμένα αριθμητικά μετεωρολογικά μοντέλα WRF(3D) και COBEL(1D) για τη μελέτη ενός επεισοδίου ομίχλης το οποίο έλαβε μέρος στην Θεσσαλονίκη. Τέλος, οι Houssos et al. (2012) μελέτησαν τα χαρακτηριστικά της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας που ευνοούν το σχηματισμό ομίχλης στην πόλη των Ιωαννίνων την περίοδο 1957-2002. Επισημαίνεται λοιπόν, ότι στα πλαίσια της προ υπάρχουσας έρευνας, όλες σχεδόν οι μελέτες δεν έχουν προσεγγίσει το ζήτημα της ομίχλης με χρήση αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης, εργαλεία που είναι απαραίτητα για τη διερεύνηση του σχηματισμού της ομίχλης και των λεπτομερών μικροφυσικών διαδικασιών και χαρακτηριστικών της.

Εκτός από την υπάρχουσα έρευνα και βιβλιογραφία στην ομίχλη, είναι επίσης απαραίτητο να αναφέρουμε και την έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί στο θέμα της ποιότητας του αέρα και στην αιθαλομίχλη, ένα φαινόμενο που παρουσιάζεται σε αρκετές ελληνικές πόλεις τις τελευταίες δεκαετίες και ιδιαίτερα μετά την πρόσφατη οικονομική κρίση (Fourtziou et al., 2017; Sindosi et al., 2021)

Η ταχεία βιομηχανική και κοινωνική ανάπτυξη που έλαβε χώρα στις δεκαετίες των '70, '80 και '90 είχε ως αποτέλεσμα τη χειροτέρευση της ποιότητας του αέρα στα αστικά περιβάλλοντα και ιδιαίτερα στις δύο μεγαλύτερες ελληνικές πόλεις Θεσσαλονίκη και Αθήνα. Η μόλυνση του αέρα προκλήθηκε από την εκβιομηχάνιση των πόλεων, τη ραγδαία αύξηση των αυτοκινούμενων οχημάτων αλλά και των καύσεως κεντρικής θέρμανσης. Επιπλέον, η ατμόσφαιρα επιβαρύνθηκε στις περιοχές της Πτολεμαΐδας και της Μεγαλόπολης, λόγω των εργοστασίων παραγωγής ενέργειας με καύση λιγνίτη (Skourtos, 1991).

Το φωτοχημικό νέφος αιθαλομίχλης που εμφανίστηκε στην Αθήνα μελετήθηκε εκτενώς, με μετρήσεις (Tsalkani et al., 1987; Gusten, 1988; Tsani-Bazaca et al., 1988; Klemm et al., 1998; Rappenglück et al., 1998; Paliatsos and Amanatidis, 1994) αλλά και με την χρήση αριθμητικών μοντέλων (Moussiopoulos and Oehler, 1988; Pilinis et al., 1993; Moussiopoulos, 1993; Moussiopoulos et al., 1995). Η αιθαλομίχλη που σχηματιζόταν οφειλόταν σε χημικές διεργασίες, αέριων ουσιών, δηλαδή μεταξύ O_3 , NO_x και πτητικών υδρογονανθράκων (Volatile Organic Compounds, VOCs), τα οποία κάτω από έντονη ακτινοβολία και ιδανικές μετεωρολογικές συνθήκες παρήγαγαν φωτοχημικά προϊόντα και εν τέλη αιθαλομίχλη. Επιπλέον, μελετήθηκε και η επίδρασή της στην υγεία για την πόλη της Αθήνας εκείνη την περίοδο (Katsouyanni, 1995). Επίσης, διερευνήθηκε το πως η θαλάσσια αύρα επηρεάζει το φαινόμενο (Clappier et al., 2000; Grossi et al., 2000). Στη Θεσσαλονίκη, την ίδια περίοδο, το φαινόμενο αυτό ήταν μικρότερης κλίμακας, επομένως μελετήθηκε λιγότερο (Güsten et al., 1997; Kelessis, 2001; Nikolaou and Papadakis, 2001).

Η λήψη μέτρων, όπως η χρήση καυσίμων με μικρή περιεκτικότητα θείου (για θέρμανση ή μετακίνηση), οι κυκλοφοριακές ρυθμίσεις (δακτύλιος) και οι αυστηροί έλεγχοι στα εργοστάσια, είχαν ως αποτέλεσμα την καταπολέμηση του φαινομένου, βελτίωση της ποιότητας του αέρα στα αστικά περιβάλλοντα, καθώς έγιναν τα πρώτα βήματα για εγκατάσταση σταθμών παρατήρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε πανελλήνια κλίμακα (Skourtos, 1991).

Την τελευταία δεκαετία, περίπου από το 2010 και μετά, με την επικράτηση της οικονομικής κρίσης στην χώρα σημειώθηκε μεγάλη μείωση των ρύπων που προερχόταν από την κίνηση των οχημάτων και τη βιομηχανία (Theodosi et al., 2018). Αντίθετα όμως, όλο και περισσότερα νοικοκυριά άρχισαν να χρησιμοποιούν εναλλακτικά φθηνά καύσιμα, όπως βιομάζα και καυσόξυλα, ως κύριο τρόπο θέρμανσης. Η συνέπεια αυτού ήταν να παρατηρηθεί σημαντική υποβάθμιση της ποιότητας του αέρα, όχι μόνο στην Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη, αλλά και σε άλλες επαρχιακές πόλεις, κατά τους χειμερινούς κυρίως μήνες (Kassomenos et al., 2011; Zogou and Stamatelos, 2012; Vrekoussis et al., 2013; Pikridas et al., 2013; Manousakas et al., 2013; Gerasopoulos et al., 2017; Sindosi et al., 2019, 2021; Dimitriou and Mihalopoulos, 2024). Τα τελευταία χρόνια γίνεται προσπάθεια για τη χαρτογράφηση των φαινομένων και επιπέδων ρύπανσης, ιδιαίτερα σωματιδιακής, και προσδιορισμό των αιτίων δημιουργίας τους, με σκοπό την καταπολέμησή τους. Στο κέντρο των προσπαθειών αυτών βρίσκεται η εθνική υποδομή της PANACEA (PANhellenic infrastructure for Atmospheric Composition and climatE chAnge), η οποία έχει, μεταξύ άλλων, αναπτύξει ένα δίκτυο παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα και των συγκεντρώσεων σωματιδιακής μάζας, ενώ έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές πειραματικές εκστρατείες σε πόλεις που αντιμετωπίζουν έντονη υποβάθμιση της ποιότητας του αέρα.

Τα Ιωάννινα είναι μία από αυτές τις επαρχιακές πόλεις, η οποία ακόμα και σήμερα αντιμετωπίζει ακραία περιστατικά αιθαλομίχλης, που αρκετές φορές συνυπάρχουν με την εμφάνιση ομίχλης. Υπάρχει δηλαδή συχνά συνύπαρξη των δύο φαινομένων. Τα Ιωάννινα είναι μια πόλη περίπου 120.000 κατοίκων στη βορειοδυτική Ελλάδα. Η πόλη βρίσκεται σε λεκανοπέδιο, σε ύψος περίπου 500 m από την επιφάνεια της θάλασσας, περιτριγυρισμένη από ψηλά βουνά και οροσειρές και είναι χτισμένη δίπλα στην λίμνη Παμβώτιδα. Ο συνδυασμός των παραπάνω γεωμορφολογικών

χαρακτηριστικών μαζί με τις κατάλληλες μετεωρολογικές συνθήκες έχουν ως συνέπεια το σχηματισμό και την εμφάνιση ομίχλης και αιθαλομίχλης στο λεκανοπέδιο. Πιο συγκεκριμένα, κατά την διάρκεια του χειμώνα και σε περιπτώσεις αντικυκλωνικών συνθηκών ο ουρανός καθίσταται συνήθως ανέφελος. Η απουσία της νεφοκάλυψης επιτρέπει την έντονη νυχτερινή ψύξη μέσω εκπομπής υπέρυθρης ακτινοβολίας από το έδαφος και τη δημιουργία θερμοκρασιακών επιφανειακών αναστροφών. Επιπλέον, σε συνδυασμό με τα παραπάνω η ύπαρξη της λίμνης μέσα στο λεκανοπέδιο τροφοδοτεί και εμπλουτίζει τις τοπικές αέριες μάζες με υδρατμούς. Όλα αυτά, σε συνδυασμό με την επικράτηση ασθενών ανέμων, δημιουργούν ένα ρηχό οριακό στρώμα (πάχους έως και 500 m το χειμώνα), το οποίο δεν επιτρέπει την κατακόρυφη διάχυση της υγρασίας και των ρύπων, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται επεισόδια ομίχλης και αιθαλομίχλης (Papanikolaou et al., 2022). Η αιθαλομίχλη που δημιουργείται στα Ιωάννινα προέρχεται από την εκπομπή σωματιδίων (αερολυμάτων) στην τοπική ατμόσφαιρα. Τα σωματίδια αυτά, όπως έχει τεκμηριωθεί και από αναλυτικές μετρήσεις που έγιναν στα πλαίσια δύο χειμερινών (τους χειμώνες 2019-2020 και 2021-2022) και μια θερινής (θέρος 2020) πειραματικών εκστρατειών της PANACEA στα Ιωάννινα, προέρχονται κυρίως από τις καύσεις βιομάζας που λαμβάνουν μέρος στο λεκανοπέδιο για τη θέρμανση των νοικοκυριών (Kaskaoutis et al., 2022; Papanikolaou et al., 2022)

Φυσικά, εκτός από τις μετεωρολογικές και γεωμορφολογικές συνθήκες, σημαντικό ρόλο στην δημιουργία της ομίχλης και στον καθορισμό των ιδιοτήτων της διαδραματίζουν τα αερολύματα που δρουν ως CCN. Ιδιαίτερο είναι το ενδιαφέρον του ρόλου των αερολυμάτων καύσης βιομάζας (Biomass Burning Aerosols, BBA) και των αυξημένων συγκεντρώσεων αερολυμάτων στη δημιουργία ομίχλης σε αστικά περιβάλλοντα. Ερευνητικές εργασίες ανά τον κόσμο δείχνουν πως η επίδραση των αερολυμάτων αυτών στην ομίχλη είναι σύνθετη. Η περιπλοκότητα αποδίδεται στο γεγονός ότι τα BBA μπορούν να θεωρηθούν και υπάρχουν είτε ως «φρέσκα» είτε ως «γερασμένα». Πιο συγκεκριμένα, βάσει της διεθνούς βιβλιογραφίας (Conant et al., 2002; Wu et al., 2017; Li et al., 2018), αναφέρεται πως τα «φρέσκα» σωματίδια καύσης βιομάζας είναι: 1) υδρόφοβα, δηλαδή χρειάζονται μεγαλύτερους υπερκορεσμούς για να ενεργοποιηθούν και να δράσουν ως CCN, και 2) καλοί απορροφητές της ηλιακής ακτινοβολίας, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την τοπική θέρμανση της ατμόσφαιρας και την πτώση της σχετικής υγρασίας. Οι δύο παραπάνω ιδιότητες δημιουργούν αρχικά δυσκολία στην δημιουργία της ομίχλης, ενώ ευνοούν την πιο γρήγορη διάλυσή της. Όμως, όταν τα αερολύματα αυτά «γερνούν», παραμένοντας στην ατμόσφαιρα για κάποιο χρονικό διάστημα και συμμετέχουν σε διάφορες χημικές αντιδράσεις, αποκτούν ένα υδρόφιλο περίβλημα που τα καθιστά ευνοϊκά για την δράση τους ως CCN (Gautam et al., 2007; Leng et al., 2014). Ακόμη, οι Kuang et al. (2024) αναφέρουν πως τα BBA μπορούν να δράσουν ως CCN αφού πρώτα οξειδωθούν στο πλούσιο με υγρασία περιβάλλον της ομίχλης και δημιουργήσουν δευτερογενή οργανικά αερολύματα (Secondary Organic Aerosols, SOA).

Επιπλέον, οι Maalick et al. (2016) αναφέρουν ότι οι μεταβολές στον αριθμό των CCN αποτελεί τον κυριότερο παράγοντα που επηρεάζει τη χρονική διάρκεια και το ύψος της ομίχλης, ενώ η χημική σύσταση των σωματιδίων, δηλαδή αν αποτελούνται από καύσεις βιομάζας ή προέρχονται από άλλες πηγές έχει μικρότερη επίδραση στις προαναφερθείσες ιδιότητες. Τέλος, οι Shao et al. (2023) αναφέρουν πως σε ρυπασμένη ατμόσφαιρα, από μεγάλο φορτίο σωματιδίων, η ομίχλη περιέχει περισσότερο LWC

(Liquid Water Content), μεγαλύτερη συγκέντρωση ενεργοποιημένων σταγονιδίων, μικρότερη ακτίνα ενεργοποίησης, μεγαλύτερη χρονική διάρκεια, ύψος και οριζόντια έκταση.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, το φαινόμενο της ομίχλης και η επίδραση των BBA έχει μελετηθεί ως ένα βαθμό σε διάφορες περιοχές ανά τον κόσμο, όχι όμως στην Ελλάδα. Επίσης, στην Ελλάδα ουσιαστικά δεν έχει διερευνηθεί η ομίχλη σε θεωρητική βάση, δηλαδή δεν έχει προσομοιωθεί με χρήση μοντέλων, ούτε έχει διερευνηθεί η επίδραση των αυξημένων συγκεντρώσεων αερολυμάτων καύσης βιομάζας σε αυτή.

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι να εισάγει και να εγκαταστήσει ένα θεωρητικό εργαλείο/μοντέλο, το οποίο θα προσομοιώσει αριθμητικά την ομίχλη στα Ιωάννινα και θα συνεισφέρει στη μελέτη των μικροφυσικών και μετεωρολογικών ιδιοτήτων της αλλά και των πιθανών επιπτώσεων που έχουν οι αυξημένες συγκεντρώσεις αερολυμάτων καύσης βιομάζας στον σχηματισμό της. Με άλλα λόγια, επιχειρεί, για πρώτη φορά τουλάχιστον στην Ελλάδα, τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ ομίχλης και αιθαλομίχλης.

Η μελέτη της παρούσας εργασίας υλοποιήθηκε αρχικά με τη λήψη και εγκατάσταση των αριθμητικών μοντέλων πρόγνωσης ομίχλης MiFog (Microphysics Fog)(Bott et al., 1990) και PaFog (Parameterized Fog) (Bott and Trautmann, 2002) για την περιοχή των Ιωαννίνων. Τα μοντέλα αξιολογήθηκαν για την εγκυρότητά τους μέσω μιας σειράς μελετών ευαισθησίας σε βασικές παραμέτρους εισόδου, στις οποίες τα αποτελέσματά τους για μια σειρά παραμέτρων συγκρίθηκαν με διαθέσιμες μετρήσεις από το μετεωρολογικό σταθμό του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις πραγματικές τιμές, έγινε για μεταβλητές όπως η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία στα 2 m, η εισερχόμενη υπέρυθη και ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της Γης, ενώ έγινε και σύγκριση της ώρας εμφάνισης/διάλυσης της ομίχλης μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου με METARs, τα οποία παρείχαν πληροφορία για την ύπαρξη ή όχι ομίχλης την εκάστοτε ώρα έκδοσής τους από το αεροδρόμιο των Ιωαννίνων, τα οποία ελήφθησαν από την EMY.

Για τη μελέτη της πιθανής επίδρασης των αερολυμάτων καύσης βιομάζας στην ομίχλη, δημιουργήθηκαν τέσσερα σενάρια εκπομπών αερολυμάτων, τα οποία αντιστοιχούν σε έντονη (με φρέσκα και γερασμένα) και ασθενή αιθαλομίχλη, καθώς και απουσία αιθαλομίχλης. Τα αποτελέσματα των τεσσάρων αυτών σεναρίων συγκρίθηκαν μεταξύ τους για να φανεί η επίδραση που προκαλούν στις μικροφυσικές και θερμοδυναμικές ιδιότητες της ομίχλης.

Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη παρουσίαση των αριθμητικών μοντέλων ομίχλης MiFog και PaFog. Αναφέρονται οι εξισώσεις δυναμικής, το είδος της τύρβης, η αλληλεπίδραση με το έδαφος, το σχήμα ακτινοβολίας, καθώς και τα δύο διαφορετικά σχήματα μικροφυσικής που χρησιμοποιούν τα δύο μοντέλα. Στο τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε και τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, ενώ παρουσιάζεται συνοπτικά η περιοχή, συγκεκριμένα ο τόπος ο τόπος μελέτης, που είναι τα Ιωάννινα. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μελετών ευαισθησίας των μοντέλων, καθώς και η επιλεγείσα περίπτωση μελέτης ομίχλης, της οποίας τα αποτελέσματα συγκρίνονται ποσοτικά και ποιοτικά με δεδομένα παρατηρήσεων/μετρήσεων. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα της μελέτης που πραγματοποιήθηκε για τη διερεύνηση του ρόλου και της επίδρασης των αερολυμάτων καύσης βιομάζας στις ιδιότητες της ομίχλης. Τέλος,

στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα και οι προοπτικές της παρούσας εργασίας.

Κεφάλαιο 2^ο

Περιγραφή Μοντέλων

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών των δυο μοντέλων ομίχλης που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία. Τα δύο αυτά μοντέλα είναι τα μονοδιάστατα (1-D) αριθμητικά μετεωρολογικά προγνωστικά μοντέλα (NWP) ομίχλης MiFog (MIcrophysics FOG) και PaFog (PArameterized FOG) τα οποία προσομοιάζουν ατμοσφαιρικές διεργασίες στο πλανητικό οριακό στρώμα (Planetary Boundary Layer, PBL).

Αρχικά, το MIFOG αναπτύχθηκε από τους Bott et. al. (1990) με σκοπό τη μελέτη ομιχλών ακτινοβολίας, αλλά και ειδικά για τη μελέτη της διάδοσης ακτινοβολίας και της αλληλεπίδρασής της με τις μικροφυσικές διεργασίες της ομίχλης. Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου μοντέλου είναι η θεώρηση των υγροποιημένων αερολυμάτων (humidified aerosols) και των ενεργοποιημένων νεφοσταγόνων. Αυτά θεωρούνται ως μια κοινή δισδιάστατη κατανομή σωματιδίων, στην οποία η μάζα του ξηρού στερεού πυρήνα και η μάζα του νερού που τον περιβάλλει θεωρούνται ως δύο ανεξάρτητες μεταβλητές. Για τους υπολογισμούς των ροών ακτινοβολίας και των ρυθμών θέρμανσης χρησιμοποιείται μια τροποποιημένη έκδοση μιας δ-δύο ροών προσέγγισης (δ-two stream approximation) από το μοντέλο των Zdunkowski et. al. (1982). Οι παράμετροι ακτινοβολίας υπολογίζονται ως συνάρτηση της χρονικά μεταβαλλόμενης δισδιάστατης κατανομής μεγεθών αερολυμάτων/σταγονιδίων. Παράλληλα λαμβάνεται υπόψιν η επίδραση της ακτινοβολίας στην μεγέθυνση των σταγόνων.

Εξαιτίας των πολύπλοκων υπολογισμών που πραγματοποιεί το MIFOG για την αλληλεπίδραση των σωματιδίων (υγροποιημένα αερολύματα και σταγόνες) με την ακτινοβολία, δεν το καθιστά εύχρηστο για καθημερινή πρόγνωση ομίχλης, καθώς είναι αρκετά απαιτητικό υπολογιστικά. Για το λόγο αυτόν αναπτύχθηκε από τους Bott and Trautmann (2002) ένα δεύτερο μοντέλο αριθμητικής προσομοίωσης φυσικών διεργασιών στο πλανητικό οριακό στρώμα (Planetary Boundary Layer, PBL) με κύριο σκοπό την πρόγνωση ομίχλης και των χαμηλών στρωματομορφών νεφών, σε καθημερινή βάση. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού εισήχθη ένα παραμετροποιημένο σχήμα μικροφυσικής, το οποίο αντικατέστησε το αντίστοιχο λεπτομερές σχήμα του MIFOG. Πιο συγκεκριμένα, το σχήμα που χρησιμοποιείται στο PAFOG υπολογίζει τη συνολική αριθμητική συγκέντρωση σταγόνων, από την οποία εξάγεται η αναλογία μίγματος υγρού νερού που περιέχεται στο νέφος.

Τα δύο παραπάνω μοντέλα περιέχουν ένα κοινό δυναμικό μοντέλο, τον κώδικα ακτινοβολίας και ένα κώδικα (module) για διεργασίες εδάφους, υπεδάφους και χαμηλής βλάστησης. Όλα τα επιμέρους μοντέλα και οι κώδικες που αναφέρθηκαν, καθώς και τα δύο ξεχωριστά σχήματα μικροφυσικής, της πλήρους (MiFog) και της παραμετροποιημένης (PaFog), εξηγούνται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στις επόμενες ενότητες. Επιπλέον, πρέπει να αναφερθεί ότι και τα δύο μοντέλα εξαιτίας της προσομοίωσης φυσικών διεργασιών σε μία μόνο διάσταση (κατακόρυφη), υποθέτουν οριζόντια ομοιογένεια των θερμοδυναμικών παραμέτρων και δεν περιέχουν όρους που περιγράφουν την οριζόντια μεταφορά των αέριων μαζών, γεγονός που βέβαια τα

καθιστά προσεγγιστικά και λειτουργικά σε περιπτώσεις ασθενών οριζόντιων ανέμων, συνθηκών που τυπικά απαντώνται σε συνθήκες και περιπτώσεις ομιχλών ακτινοβολίας.

2.1 Μοντέλο δυναμικής

Το δυναμικό μέρος του μοντέλου αποτελείται από μια σειρά προγνωστικών εξισώσεων (Bott, 2020), οι οποίες θεωρούν οριζόντια ομοιογένεια για το πεδίο των οριζόντιων ταχυτήτων (u, v) , της δυναμικής θερμοκρασίας θ και της ειδικής υγρασίας q_v , όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) - w \frac{\partial u}{\partial z} + f(v - v_g) \quad (2.1.1\alpha)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_m \frac{\partial v}{\partial z} \right) - w \frac{\partial v}{\partial z} - f(u - u_g) \quad (2.1.1\beta)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_h \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - w \frac{\partial \theta}{\partial z} - \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{R}{c_p}} \frac{1}{c_p \rho} \left(\frac{\partial E_n}{\partial z} - LC \right) \quad (2.1.1\gamma)$$

$$\frac{\partial q_v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_h \frac{\partial q_v}{\partial z} \right) - w \frac{\partial q_v}{\partial z} + \frac{C}{\rho} \quad (2.1.1\delta)$$

Οι πρώτοι όροι στο δεξί μέλος των εξισώσεων περιγράφουν την τυρβώδη ανάμιξη και περιέχουν τους συντελεστές ορμής και θερμότητας (k_m, k_h , αντίστοιχα) των οποίων οι τιμές τους υπολογίζονται διαγνωστικά από τους Mellor και Yamada (1982) βάσει συναρτήσεων της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (Turbulent Kinetic Energy, TKE) και της ατμοσφαιρικής ευστάθειας (Bott, 1990), για την οποία λύνεται μια προγνωστική εξίσωση (Bott, 1990).

Οι δεύτεροι όροι στο δεξί μέλος των εξισώσεων 2.1.1 παρουσιάζουν τη μεγάλης κλίμακας καθίζηση (large-scale subsidence) με κατακόρυφο πεδίο ταχύτητας ανέμου w . Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι στα μονοδιάστατα μοντέλα δεν θα έπρεπε να υπάρχουν κατακόρυφες κινήσεις ($w=0$) διότι παραβιάζουν την αρχή διατήρησης της μάζας. Παρόλα αυτά, χωρίς αυτούς τους όρους θα ήταν αδύνατον να προσομοιωθεί σωστά η ομίχλη και τα χαμηλά στρωματομόρφα νέφη (Bott, 2020).

Τέλος, ο τρίτος όρος των εξισώσεων 2.1.1α,β στο δεξί μέλος, αντιπροσωπεύει τη δύναμη Coriolis μαζί με τη δύναμη βαροβαθμίδας, όπου f είναι ο παράγοντας Coriolis και u_g, v_g είναι οι γεωστροφικές ταχύτητες ανέμου. Ο όρος E_n ο οποίος εμφανίζεται στην προγνωστική εξίσωση της δυναμικής θερμοκρασίας (2.1.1γ) είναι η συνολική (εισερχομένη και εξερχομένη) πυκνότητα ροής ακτινοβολίας (net radiative flux density) η οποία υπολογίζεται από τον κώδικα ακτινοβολίας. Οι τελευταίοι όροι στις προγνωστικές εξισώσεις των θ και q_v αναφέρονται σε διεργασίες συμπύκνωσης και εξάτμισης όπου L είναι η λανθάνουσα θερμότητα που απελευθερώνεται κατά την συμπύκνωση των υδρατμών και C ο ρυθμός συμπύκνωσής τους, που δίνεται από τον τύπο:

$$C = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{\partial}{\partial r} \{ \dot{r} f(a, r) \} m_w(a, r) da dr \quad (2.2)$$

όπου $m_w(a, r)$ είναι η μάζα του νερού για κάθε σωματίδιο (ξηρού πυρήνα ακτίνας a και υγρής ακτίνας r), $f(a, r)$ η δισδιάστατη κατανομή των σωματιδίων και \dot{r} ο ρυθμός μεταβολής του μεγέθους της σταγόνας. Όλοι οι υπόλοιποι όροι στις εξισώσεις 2.1.1 έχουν τη συνηθισμένη έννοια.

2.2 Μοντέλο εδάφους-υπεδάφους και χαμηλής βλάστησης

Σε όλα τα ατμοσφαιρικά μοντέλα ο ακριβής ορισμός των οριακών συνθηκών είναι μέγιστης σημασίας για την ποιότητα των αποτελεσμάτων του. Στην περίπτωση του μονοδιάστατου μοντέλου της παρούσας εργασίας είναι εξίσου μεγάλης σημασίας ο ορθός ορισμός των συνοριακών συνθηκών στο όριο επιφάνειας (της Γης) και ατμοσφαιρικού αέρα, δηλαδή στην επιφάνεια του εδάφους. Σαυτό το μοντέλο παρέχονται τρεις επιλογές εδάφους: 1) υδάτινη επιφάνεια στην οποία θεωρείται σχεδόν σταθερή θερμοκρασία με σχεδόν κορεσμένες αέριες μάζες, 2) γυμνό έδαφος και 3) έδαφος με βλάστηση. Οι δύο τελευταίες επιλογές βασίζονται στην προσέγγιση των Siebert et al. (1992a, b). Το έδαφος θεωρείται ως πορώδες μέσο, το οποίο αποτελείται από ξηρό αέρα, υδρατμούς, νερό και τη δομή (στοιχεία/στερεά συστατικά-ορυκτά συστατικά και οργανική ύλη) του εδάφους (soil matrix). Υπάρχει επιλογή ανάμεσα σε δώδεκα διαφορετικούς τύπους εδάφους (πίνακας 2.1) με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Αυτά είναι το πόσο πορώδες είναι το έδαφος (soil porosity), το δυναμικό κορεσμού υγρασίας (saturated moisture potential), το περιεχόμενο υγρασίας μόνιμου μαρασμού (permanent wilting moisture content), κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα ή υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού (saturated hydraulic conductivity) και ξηρή ογκομετρική θερμοχωρητικότητα (dry volumetric heat capacity). Οι παραπάνω ιδιότητες των τύπων εδάφους έχουν εισαχθεί από τον McGumber (1980) και Pielke (2002). Μέσα στο έδαφος λύνονται δύο προγνωστικές εξισώσεις για τη θερμοκρασία εδάφους και την ογκομετρική περιεκτικότητα υγρασίας (volumetric moisture content).

Πίνακας 2.1 Είδη εδάφους εισαγωγής στο μοντέλο (Siebert et al. (1992a, b))

1) Άμμος (sand)	7) Λασπώδης αργιλώδης πηλός (silty clay loam)
2) Αργιλώδης άμμος (loamy sand)	8) Πηλώδες χώμα (clay loam)
3) Αμμώδης χώμα (sandy loam)	9) Αμμώδης πηλός (sandy clay)
4) Ιλυώδης άργιλος (silt loam)	10) Ιλυώδης πηλός (silty clay)
5) Παχύ χώμα (loam)	11) Πηλός (clay)
6) Αμμώδης αργιλώδης πηλός (sandy clay loam)	12) Τύρφη (peat)

Επιπλέον, όταν η προσομοίωση γίνεται με βλάστηση, υπολογίζεται η απομάκρυνση του νερού από το έδαφος εξαιτίας της άντλησής του από το ριζικό σύστημα των φυτών και είναι ίσο με την απώλεια του νερού εξαιτίας της εξατμισοδιαπνοής των φύλλων. Στην επιφάνεια του εδάφους λύνεται ένα συζευγμένο σύστημα τριών εξισώσεων ισορροπίας, το οποίο δίνει τη θερμοκρασία και την ειδική

υγρασία στην επιφάνεια (στο έδαφος), αλλά και τη θερμοκρασία του φυλλώματος. Η βλάστηση θεωρείται σαν ένα στρώμα και αποτελείται από τον αέρα μεταξύ του εδάφους και του ύψους του φυλλώματος. Για την περιγραφή του είδους της βλάστησης χρησιμοποιούνται πολλές παράμετροι. Αυτοί είναι ο παράγοντας προστασίας (Shielding Factor) που περιγράφει τη μέση κάλυψη του φυλλώματος ανά μονάδα επιφάνειας, ο δείκτης επιφάνειας φυλλώματος (Leaf area index), που είναι ο λόγος της συνολικής μονόπλευρης επιφάνειας προς την μεγαλύτερη οριζόντια διατομή του φυτού και ο παράγοντας εποχικής ανάπτυξης (seasonal growth factor), ο οποίος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της αντίστασης των στομάτων (του φυτού) ως συνάρτηση του ρυθμού ανάπτυξης του φυτού. Οι τιμές αυτής της παραμέτρου κυμαίνονται από 0 έως 5, με τις τιμές κοντά στο 0 να υποδηλώνουν την ραγδαία ανάπτυξη του φυτού.

Στην περίπτωση γυμνού εδάφους, λύνονται δύο εξισώσεις ισοζυγίου ενέργειας και υγρασίας στην επιφάνεια της Γης, οι οποίες δίνουν τις συνοριακές συνθήκες μεταξύ της ατμόσφαιρας και του εδάφους (Bott, 1991; Bott and Trautmann, 2002)

2.3 Μοντέλο ακτινοβολίας

Είναι προφανές ότι για τη μελέτη και την αριθμητική προσομοίωση μιας ομίχλης ακτινοβολίας ένα απολύτως απαραίτητο, αναπόσπαστο και σημαντικό κομμάτι του μοντέλου είναι η περιγραφή και προσομοίωση της διάδοσης ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα. Στο παρόν μοντέλο έχει εισαχθεί το σχήμα της δ-δύο ροών ακτινοβολίας (δ-two radiation stream scheme, Loughlin et al., 1997). Στο σχήμα αυτό οι ροές ακτινοβολίας υπολογίζονται για 6 φασματικές περιοχές του ηλιακού φάσματος, που καλύπτουν το εύρος μηκών κύματος 0.28-6 μ m και σε 12 φασματικές περιοχές στο υπέρυθρο, από 6 έως 100 μ m. Στις ηλιακές φασματικές περιοχές λαμβάνεται υπόψιν η εξασθένηση της ηλιακής ακτινοβολίας από τους υδρατμούς (H₂O), το όζον (O₃), τα αερολύματα και τις σταγόνες νεφών. Στις υπέρυθρες φασματικές περιοχές λαμβάνεται υπόψιν η απορρόφηση από τους υδρατμούς, το μεθάνιο (CH₄), το υποξείδιο του αζώτου (N₂O), το όζον, το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και τις σταγόνες των νεφών. Πολύ σημαντικός είναι ο υπολογισμός των ροών ακτινοβολίας για κάθε φασματική περιοχή i , αλλά και ο υπολογισμός των παραμέτρων/ιδιοτήτων ακτινοβολίας των αερολυμάτων και των σταγονιδίων σε αυτές. Οι παράμετροι που υπολογίζονται είναι οι συντελεστές εξασθένησης ($\beta_{ext,i}$), σκέδασης ($\beta_{sca,i}$) και ο παράγοντας ασυμμετρίας (g_i).

Για το MIFOG οι παράμετροι αυτές υπολογίζονται για μία μεταβαλλόμενη με το χρόνο δισδιάστατη κατανομή σωματιδίων $f(a,r,t)$, αποτελούμενη από υγροποιημένα αερολύματα και ενεργοποιημένες νεφοσταγόνες. Για να πραγματοποιηθεί αυτό εκτελούνται πάνω από 10^6 υπολογισμοί της θεωρίας Mie για σφαιρικά σωματίδια ξηρού πυρήνα με ακτίνα a από 0.01-10 μ m και για σφαιρικά σταγονίδια με υγρή ακτίνα r από 0.01-500 μ m. Σε αυτούς τους υπολογισμούς, οι οποίοι καλύπτουν ένα μεγάλο φάσμα μαζών το οποίο ξεκινάει από ξηρά αερολύματα έως και καθαρές σταγόνες νερού, ο μιγαδικός δείκτης διάθλασης της ανάμεικτης κατανομής υπολογίζεται ως συνάρτηση του δείκτη διάθλασης του καθαρού νερού και των ξηρών αερολυμάτων σύμφωνα με την προσέγγιση του Hänel (1976). Για κάθε φασματική περιοχή i , αλλά και για κάθε πιθανό συνδυασμό a,r της δισδιάστατης κατανομής, υπολογίζονται και καταγράφονται οι ενεργοί παράγοντες εξασθένησης $Q_{ext,i}(a,r)$, σκέδασης $Q_{sca,i}(a,r)$ και

ασυμμετρίας $g_i(a,r)$ και έτσι τελικά υπολογίζονται οι χρονομεταβαλλόμενοι αντίστοιχοι συντελεστές:

$$\beta_{\text{ext},i}(t) = \int_0^\infty \int_0^\infty f(a,r,t) Q_{\text{ext},i}(a,r) \pi r^2 da dr \quad (2.3.1)$$

$$\beta_{\text{sca},i}(t) = \int_0^\infty \int_0^\infty f(a,r,t) Q_{\text{sca},i}(a,r) \pi r^2 da dr, \quad (2.3.2)$$

$$g_i(t) = \frac{1}{\beta_{\text{sca},i}(t)} \int_0^\infty \int_0^\infty f(a,r,t) Q_{\text{sca},i}(a,r) g_i(a,r) \pi r^2 da dr \quad (2.3.3)$$

Είναι επίσης σημαντικό να αναφέρουμε τον όρο ακτινοβολίας, που περιλαμβάνεται στο MIFOG και επηρεάζει την διόγκωση των σταγόνων της ομίχλης. Ο όρος αυτός είναι βασισμένος στον Davies (1985), ο οποίος στην προσέγγισή του θεωρεί, αρχικά, ξεχωριστές εξισώσεις θερμικής ισορροπίας για μία σταγόνα και τον περιβάλλοντα αέρα. Σε αυτές τις εξισώσεις λαμβάνονται υπόψιν οι ροές αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας μεταξύ της σταγόνας και του περιβάλλοντός της, αλλά και οι αλλαγές στη θερμοκρασία της σταγόνας εξαιτίας ακτινοβόλων διεργασιών. Έτσι εισάγοντας τα παραπάνω, προκύπτει η εξίσωση διόγκωσης μιας σταγόνας που περιλαμβάνει τον όρο ακτινοβολίας:

$$r \frac{dr}{dt} = \frac{1}{C_1} \left[C_2 \left(\frac{S_\infty}{S_r} - 1 \right) - \frac{F_d(a,r) - m_w(a,r) c_w \frac{dT}{dt}}{4\pi r} \right] \quad (2.3.4)$$

όπου για τους όρους C_1 και C_2 ισχύει:

$$C_1 = \rho_w L + \frac{\rho_w C_2}{D'_v S_r \rho_s} \quad (2.3.4a)$$

$$C_2 = k'T \left[\frac{L}{R_v T} - 1 \right]^{-1} \quad (2.3.4b)$$

Στην εξίσωση (2.3.4) ο πρώτος όρος στο δεξί μέλος αναφέρεται στην καθιερωμένη εξίσωση μεγέθυνσης σταγόνας σύμφωνα με θεωρία του Köhler, η οποία θα αναλυθεί περαιτέρω στην ενότητα της μικροφυσικής του μοντέλου. Η ποσότητα $m_w(a,r)$ εκφράζει τη μάζα του νερού για κάθε σωματίδιο (ξηρού πυρήνα ακτίνας a και υγρής ακτίνας r), c_w και ρ_w είναι η ειδική θερμότητα και η πυκνότητα του υγρού νερού, ρ_s η πυκνότητα κορεσμένων υδρατμών και R_v η σταθερά αερίων για τους υδρατμούς. Στις σχέσεις 2.3.6 το k' εκφράζει τη θερμική αγωγιμότητα του υγρού αέρα

και D'_v είναι η ικανότητα διάχυσης των υδρατμών, τροποποιημένες για επιδράσεις της κίνησης αερίων, (Pruppacher and Klett, 2010). Ο δεύτερος όρος της εξίσωσης 2.3.4 περιγράφει την επίδραση της μεταφοράς θερμότητας μέσω ακτινοβολίας στο ρυθμό μεγέθυνσής της σταγόνας, όπου $F_D(a,r)$ είναι η καθαρή ροή ακτινοβολίας στην επιφάνεια της σταγόνας και δίνεται από την εξίσωση:

$$F_D(a,r) = \pi r^2 \int_0^\infty Q_{abs}(\lambda, \alpha, r) \times \left[\int_0^{2\pi} \int_0^\pi L(\lambda, \theta, \varphi) \sin\theta \, d\theta d\varphi + S(\lambda, \theta_0, \varphi_0) - 4B(\lambda) \right] d\lambda \quad (2.3.5)$$

Ο όρος $L(\lambda, \theta, \varphi)$ είναι η εισερχόμενη φασματική διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της σταγόνας, $S(\lambda, \theta_0, \varphi_0)$ η ροή πυκνότητας της εισερχόμενης φασματικής άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της σταγόνας και $B(\lambda)$ είναι η θερμική εκπομπή (υπέρυθρης ακτινοβολίας) της σταγόνας. Έπειτα από πράξεις για τον κάθε επιμέρους όρο προκύπτει ότι η επίδραση της ακτινοβολίας στη μεγέθυνση των σταγόνων εξαρτάται γραμμικώς από την ενεργό διατομή (cross section) απορρόφησης (Q_{abs}) ακτινοβολίας της σταγόνας. Για τις αναλυτικές πράξεις ο αναγνώστης παραπέμπεται στους (Bott et al., 1990). Το παραπάνω αποτέλεσμα φανερώνει πως καθώς η σταγόνα μεγθύνεται ο όρος της ακτινοβολίας F_D στην (2.3.4) γίνεται όλο και πιο κυρίαρχος στην αύξηση του μεγέθους της. Έτσι, καθώς η σταγόνα μεγαλώνει, ψύχεται μέσω ακτινοβολίας και μεγαλώνει επιπρόσθετα έως ότου το βάρος της γίνει σημαντικό και αρχίσει να κινείται προς το έδαφος.

Για το PAFOG το παραπάνω σχήμα ακτινοβολίας δεν είναι εφικτό να είναι το ίδιο, καθώς στο παραμετροποιημένο σχήμα μικροφυσικής δεν υπάρχει η διδιάστατη κατανομή αερολυμάτων/σταγόνων. Αντί για αυτό δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων με υπολογισμούς από τους συντελεστές εξασθένησης, απορρόφησης και του παράγοντα ασυμμετρίας για περιπτώσεις ομίχλης με διαφορετικά χαρακτηριστικά, σύμφωνα με τον αναλυτικό κώδικα του MIFOG. Η βάση αυτή χρησιμοποιήθηκε για να δημιουργηθεί ένα πίνακας με μεσοποιημένες τιμές παραμέτρων ακτινοβολίας και περιεκτικότητας νερού του νέφους, αντίστοιχος με τον πίνακα του Fu (1991). Οι τιμές αυτές δεν αποτελούν παρατηρήσεις, αλλά αποτελέσματα από διάφορα ενδεχόμενα ομίχλης, προσομοιωμένα με το MIFOG. Έπειτα, οι παράμετροι αυτοί κατηγοριοποιήθηκαν σε 10 διαφορετικές κατηγορίες μεγέθους, ανάλογα με την ενεργό ακτίνα σταγόνας (effective cloud droplet radius), μεταξύ 4-22 μ m. Έτσι, ο πίνακας αυτός χρησιμοποιείται τελικά στο PAFOG, για την μελέτη ομιχλών ακτινοβολίας και βάσει αυτού υπολογίζονται οι εξαρτώμενοι από το χρόνο φασματικοί παράγοντες ακτινοβολίας ως συνάρτηση της ενεργού ακτίνας της σταγόνας και της περιεκτικότητας νερού της ομίχλης.

Μέσω του κώδικα της ακτινοβολίας υπολογίζεται επίσης και η ορατότητα, η οποία είναι σημαντικότερη παράμετρος για την ομίχλη. Ο υπολογισμός μπορεί να γίνει με δύο διαφορετικές εξισώσεις, αυτή του Koschmieder (1924) (2.3.6) και του Gulterpe et al. (2006) (2.3.7).

$$VIS_{Kos} = \frac{3.912}{\beta_{ext,1}} \quad (2.3.6)$$

$$VIS_{Gul} = \frac{1.002}{(q_w N_D)^{0.6473}} \quad (2.3.7)$$

Στις παραπάνω σχέσεις $\beta_{ext,1}$ είναι ο συντελεστής εξασθένησης στην πρώτη (μικρότερου μήκους κύματος) ηλιακή φασματική περιοχή από 0.28 έως 0.43 μm , q_w είναι το περιεχόμενο υγρού νερού (liquid water content) και N_D η αριθμητική συγκέντρωση των σταγόνων.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήσαμε μόνο την εξίσωση του Koschmieder, καθώς είναι βασισμένη στη θεωρία διάδοσης ακτινοβολίας, ενώ η εξίσωση του Gulpepe είναι μια εμπειρική σχέση βασισμένη σε μετρήσεις κατά τη διάρκεια πολλών φαινομένων ομίχλης στην πειραματική εκστρατεία RACE (Radiation, Aerosol and Cloud Experiment) στο Οντάριο του Καναδά (Gulpepe et al., 2001). Ο Bott (2021) αναφέρει πως με τη χρήση της εξίσωσης του Gulpepe δημιουργούνται μεγάλες αποκλίσεις στην ορατότητα σε σχέση με την εξίσωση του Koschmieder, όταν ο αριθμός των σταγόνων είναι μικρός, ενώ σχολιάζει πως όταν οι παράγοντες ακτινοβολίας υπολογίζονται από το MiFog είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται η εξίσωση Koschmieder.

2.4 Σχήμα μικροφυσικής

Εξίσου σημαντικές είναι επίσης και οι διεργασίες μικροφυσικής που λαμβάνουν χώρα κατά τη δημιουργία και εξέλιξη της ομίχλης, για αυτό είναι αναγκαίο να αναφέρουμε τα δύο σχήματα, πλήρους και παραμετροποιημένης, μικροφυσικής.

2.4.1 Μοντέλο πλήρους μικροφυσικής MIFOG

Το μοντέλο πλήρους μικροφυσικής MIFOG έχει το χαρακτηριστικό να χρησιμοποιεί μια κοινή δισδιάστατη κατανομή σωματιδίων $f(a, r)$ για αερολύματα και νεφοσταγόνες ως δύο ανεξάρτητες μεταβλητές συναρτήσεως της ξηρής (a) και της υγρής (r) ακτίνας. Το φάσμα των σωματιδίων χωρίζεται σε 70×70 τάξεις μεγέθους (bins) οι οποίες είναι χωρισμένες σε λογαριθμικά ίσες αποστάσεις, με τις ακτίνες των ξηρών πυρήνων να κυμαίνονται από 0.01 έως 10 μm , ενώ αυτές των νεφοσταγόνων από 0.01 έως 500 μm . Έτσι, λύνονται μια σειρά από 4900 προγνωστικές εξισώσεις, για όλο το φάσμα των κατανομών αυτών, που έχουν τη μορφή:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(a, r)}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial z} \left(k_m \frac{\partial f(a, r)}{\partial t} \right) - \{w + w_t(a, r)\} \frac{\partial f(a, r)}{\partial t} \\ & - \frac{\partial}{\partial r} \{ \dot{r} f(a, r) \} + \left(\frac{\partial f(a, r)}{\partial t} \right)_{coa} \end{aligned} \quad (2.4.1)$$

Οι δύο πρώτοι όροι στο δεξί μέλος της εξίσωσης 2.4.1 περιγράφουν την τυρβώδη ανάμειξη και την κατακόρυφη μετατόπιση της κατανομής $f(a, r)$ λόγω μεγάλης κλίμακας καθίζησης (large-scale subsidence) με κατακόρυφες ταχύτητες w και βαρυτικής καθίζησης των σωματιδίων με οριακές ταχύτητες $w_t(a, r)$. οι οποίες υπολογίζονται σύμφωνα με τον Beard (1976).

Ο τρίτος όρος στο δεξί μέλος περιγράφει τη μεταβολή του φάσματος των σωματιδίων εξαιτίας φαινομένων συμπύκνωσης και εξάτμισης, όπου ο ρυθμός μεταβολής του μεγέθους της σταγόνας \dot{r} δίνεται από την εξίσωση μεγέθυνσης της σταγόνας με τον όρο ακτινοβολίας (2.3.4). Στην εξίσωση αυτή (τη 2.3.4) ο πρώτος όρος στο δεξί μέλος περιγράφει την καθιερωμένη μεγέθυνση (διόγκωση) των σταγόνων, όπου η ποσότητα S_∞ είναι ο λόγος της μερικής πίεσης υδρατμών e_∞ προς την μερική πίεση κορεσμού $e_{\infty, S}$ του περιβάλλοντα αέρα, ενώ ο όρος S_r είναι ο υπερκορεσμός της σταγόνας, ο οποίος δίνεται σύμφωνα με την θεωρία Köhler:

$$S_\infty = \frac{e_\infty}{e_{\infty, S}} \quad (2.4.2)$$

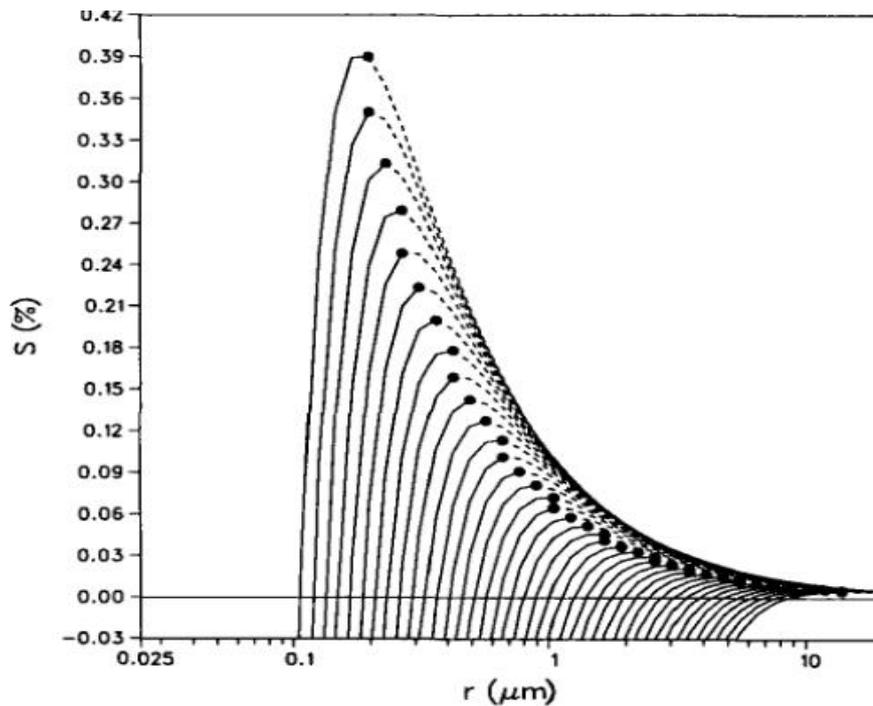
$$S_r = \exp \left[\frac{A}{r} - \frac{B}{r^3 - a^3} \right] \quad (2.4.3)$$

Η κίνηση των σωματιδίων πάνω στο σταθερό αλλά και το ασταθές μέρος της καμπύλης Köhler (Σχήμα 2.1) υπολογίζεται απευθείας για κάθε τάξη μεγέθους της δισδιάστατης κατανομής ως συνάρτηση της σχετικής υγρασίας του υποκορεσμένου και του υπερκορεσμένου αέρα. Οι ποσότητες A και B αντιπροσωπεύουν την επίδραση της κυρτότητας (Kelvin effect) και του διαλύματος (την επίδραση της διαλυμένης ουσίας, Raoult effect) στη σταγόνα. Οι ποσότητες αυτές δίνονται από τις σχέσεις:

$$A = \frac{2\sigma_{s/a}}{R_v T \rho_w} \quad (2.4.3\alpha)$$

$$B = \frac{\epsilon \nu \rho_\alpha M_w}{\rho_w M_s} \quad (2.4.3\beta)$$

όπου $\sigma_{s/a}$ είναι η επιφανειακή τάση του υδατικού διαλύματος έναντι του αέρα, M_w και M_s τα μοριακά βάρη του καθαρού νερού και της διαλυμένης ουσίας μέσα στη σταγόνα, ν είναι ο συνολικός αριθμός των ξεχωριστών ιόντων του άλατος, ϵ είναι το κλάσμα της μάζας του υδατοδιαλυτού προς τη συνολική μάζα του σωματιδίου, ενώ ρ_α και ρ_w οι πυκνότητες των ξηρών αερολυμάτων και του υγρού νερού, αντίστοιχα (Pruppacher and Klett, 2010).



Σχήμα 2.1 Καμπύλες Köhler για ένα εύρος μεγεθών σωματιδίων υγρού πυρήνα από 0.1 έως 5.5 μm . Οι μαύρες συμπαγείς καμπύλες δείχνουν το σταθερό μέρος, οι διακεκομμένες το ασταθές μέρος και οι μαύρες βούλες το κρίσιμο σημείο κάθε καμπύλης (Bott et al., 1996)

Ο τελευταίος (τέταρτος) όρος της εξίσωσης 2.4.1 είναι η μεταβολή του φάσματος των σωματιδίων λόγω των φαινομένων σύγκρουσης/σύμφυσης (collision/coalescence). Ο όρος αυτός εισήχθη στις τελευταίες εκδόσεις του μοντέλου για να προτυποποιηθούν ρεαλιστικότερα τα στρωματόμορφα νέφη. Με την εισαγωγή αυτού του όρου το φάσμα των σταγόνων χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες: 1) Σωματίδια με ακτίνα μέχρι $r_1 = 1 \mu\text{m}$, που θεωρούνται ως υγροποιημένα (ενδιάμεσα) αερολύματα (interstitial aerosols), 2) σωματίδια με διάμετρο από r_1 έως $r_2 = 40 \mu\text{m}$, που θεωρούνται (αναφέρονται) ως σταγόνες νεφών και (3) σωματίδια με ακτίνα μεγαλύτερη από r_2 , που θεωρούνται (καλούνται) ψιλόβροχο/ψιχάλες (drizzle). Με βάση αυτήν την κατηγοριοποίηση των σωματιδίων, δημιουργούνται και οι ορισμοί: περιεχόμενο νερού νέφους (Cloud Water Content, CWC) που περιέχουν οι σταγόνες του νέφους (σταγόνες με ακτίνες $r_1 < r < r_2$) και περιεχόμενο νερού ψιλόβροχου (Drizzle Water Content, DWC) που περιέχουν οι ψιχάλες (σταγόνες με ακτίνες $r > r_2$). Το άθροισμα των δύο, δηλαδή των CWC και DWC, αντιπροσωπεύει το συνολικό περιεχόμενο νερού υγρής φάσης (του νέφους, δηλαδή όλων των σταγονιδίων του, Liquid Water Content, LWC). Σημειώνεται ότι ο όρος σύγκρουσης/σύμφυσης όσον αφορά στην προσομοίωση της ομίχλης ακτινοβολίας είναι σχεδόν μηδενικός ($DWC \approx 0$) και άρα το LWC αποτελείται σχεδόν εξολοκλήρου από CWC (Bott, 2020). Αυτό συμβαίνει διότι τα σταγονίδια της ομίχλης έχουν πολύ μικρό μέγεθος και κινούνται με πολύ μικρές ταχύτητες με αποτέλεσμα να μην πραγματοποιείται σημαντικός αριθμός συγκρούσεων και συμφύσεων (Anon, 2014). Η προσομοίωση και ο υπολογισμός του όρου σύγκρουσης και σύμφυσης των σταγόνων γίνεται με τη λύση της στοχαστικής εξίσωσης συλλογής (stochastic collection equation) σύμφωνα με τον Bott (2001), όμως εξαιτίας της μικρής συνεισφορά του όρου αυτού δεν αναλύεται εδώ περαιτέρω.

Ο χαρακτηρισμός των φυσικοχημικών ιδιοτήτων των αερολυμάτων είναι επίσης ιδιαίτερα σημαντικός, καθώς διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στον κύκλο ζωής ενός επεισοδίου ομίχλης (όπως και ενός νέφους).

Αρχικά, ο αριθμός και το μέγεθος των αερολυμάτων είναι άμεσα συνδεδεμένα με τον πληθυσμό των CCN και άρα με τις ιδιότητες της ομίχλης. Τα μεγαλύτερα αερολύματα ενεργοποιούνται (δρουν ως CCN) για χαμηλότερους υπερκορεσμούς, ενώ για υψηλότερους υπερκορεσμούς ενεργοποιούνται και τα μικρότερα αερολύματα (Pruppacher and Klett, 2010). Επιπρόσθετα, με την αύξηση του αριθμού των αερολυμάτων υπάρχει παράλληλα και αύξηση των CCN (Twomey et al., 1984). Ο αριθμός και το μέγεθος των αερολυμάτων διαφέρουν πολύ από τόπο σε τόπο. Για παράδειγμα, ο αριθμός τους σε θαλάσσια (maritime) και υπαίθρια (rural) περιβάλλοντα μπορεί να είναι από μερικές εκατοντάδες έως μερικές χιλιάδες, ενώ αντίθετα σε αστικά (urban) περιβάλλοντα μπορεί να φτάνει και τα 10^5 σωματίδια ανά κυβικό εκατοστό (Hobbs, 1993). Οι μεγάλες αυτές διαφορές αυτές έχουν ως συνέπεια η ομίχλη να έχει εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά από περιοχή σε περιοχή. Για τις προσομοιώσεις του MIFOG υπάρχει επιλογή μεταξύ τριών διαφορετικών τύπων αερολυμάτων. Αυτοί οι τύποι αναφέρονται σε: αστικά, υπαίθρια και θαλάσσια περιβάλλοντα (urban, rural, maritime). Οι αριθμητικές κατανομές τους έχουν εξαχθεί από τον Jaenicke (1993) και ακολουθούν μία υπέρθεση τριών λογαριθμικών (log-normal) κατανομών:

$$\frac{dN(a)}{d(\log a)} = \sum_{i=1}^3 \frac{n_i}{\sqrt{2\pi} \log \sigma_i} \exp \left\{ -\frac{(\log a/R_i)^2}{2(\log \sigma_i)^2} \right\} \quad (2.4.4)$$

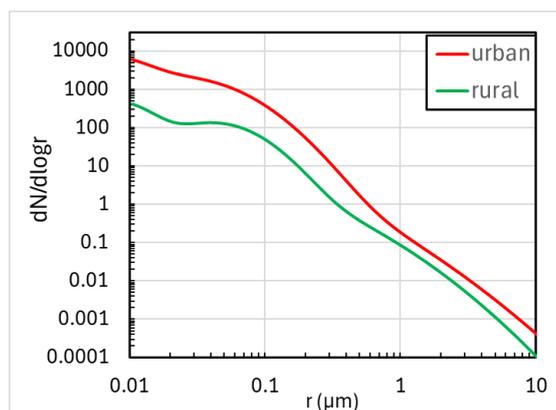
όπου a είναι η ακτίνα των ξηρών αερολυμάτων (σε μm), $N(a)$ είναι η συνολική αριθμητική συγκέντρωση της κατανομής αερολυμάτων (σε cm^{-3}), R_i είναι η μέση ακτίνα των αερολυμάτων (σε μm), n_i είναι το ολοκλήρωμα της i κανονικής συνάρτησης (του τύπου i) και $\log \sigma_i$ είναι η πολυδιασπορά (polydispersity) της i κατανομής. Έτσι, για την περιγραφή ενός τύπου αερολύματος και τη δημιουργία της κατανομής μεγεθών του χρειάζονται εννέα παράμετροι. Στον Πίνακα 2.4.1 φαίνονται οι προεπιλεγμένες τιμές των τριών κατανομών που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο, ενώ στο Σχήμα 2.2 απεικονίζονται οι αριθμητικές κατανομές μεγέθους για τα αστικά και τα υπαίθρια αερολύματα. Όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα, οι τάξεις μεγεθών (size bins) της κατανομής ξηρών αερολυμάτων είναι 70, με εύρος από 0.01 έως 10 μm .

Πίνακας 2.4.1 Παράμετροι για την δημιουργία των τριών κατανομών μεγεθών των ξηρών αερολυμάτων (Jaenicke, 1993)

	i	n_i (cm^{-3})	R_i (μm)	$\log \sigma_i$
Υπαίθρια	1	6.65×10^3	7.39×10^{-3}	0.225
	2	1.47×10^2	2.69×10^{-2}	0.557
	3	1.99×10^3	4.19×10^{-2}	0.266
Αστικά	1	9.93×10^4	6.51×10^{-3}	0.245
	2	1.11×10^3	7.14×10^{-3}	0.666
	3	3.36×10^4	2.48×10^{-2}	0.337
Θαλάσσια	1	1.33×10^2	3.90×10^{-3}	0.657

2	6.66×10^1	1.33×10^{-1}	0.210
3	3.06×10^0	2.90×10^{-1}	0.396

Για τις παραπάνω τρεις κατανομές αερολυμάτων οι τιμές των συνολικών συγκεντρώσεων αριθμού σωματιδίων τους είναι 54380, 3926, 108 cm^{-3} για το αστικό, υπαίθριο και θαλάσσιο περιβάλλον, αντίστοιχα. Οι αντίστοιχες συνολικές μάζες των κατανομών είναι 145, 37, 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



Σχήμα 2.2 Αριθμητικές κατανομές μεγέθους αερολυμάτων.

Επιπρόσθετα, εκτός από τις φυσικές ιδιότητες των αερολυμάτων σημαντική είναι και οι χημικές τους ιδιότητες. Η διαφοροποίηση στη χημική σύσταση ενός αερολύματος επηρεάζει τον υπερκορεσμό που απαιτείται για την ενεργοποίησή του. Σύμφωνα με τον Hänel (1976) για διαφορετική χημική σύσταση αλλά ίδιο μέγεθος του αερολύματος το κρίσιμο σημείο της καμπύλης Köhler αλλάζει. Το σημείο αυτό αλλάζει επίσης από το είδος της διαλυμένης ουσίας, δηλαδή τη χημική σύσταση του αερολύματος, αλλά και το κλάσμα μαζών του υδατοδιαλυτού και του υδοτοαδιάλυτου μέρος του αερολύματος (παράγοντας ϵ). Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί πως η χημεία των αερολυμάτων επηρεάζει παράλληλα και τις παραμέτρους ακτινοβολίας που έχουν αναλυθεί στην προηγούμενη ενότητα.

Στο MIFOG δεν περιέχονται καθόλου χημικές αντιδράσεις υγρής και αέριας φάσης, έτσι για την περιγραφή της χημείας των αερολυμάτων χρησιμοποιείται ένα απλοποιημένο σχήμα. Σύμφωνα με αυτό, τα ξηρά υπαίθρια/αγροτικά αερολύματα (rural) αποτελούνται από θειικό αμμώνιο ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) το οποίο αποτελεί την υδατοδιαλυτή ουσία, ενώ η υδατοαδιάλυτη ουσία αποτελείται από αδιάλυτα άλατα. Οι τιμές M_s και ν για το $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ είναι 132 και 3 αντίστοιχα. Το κλάσμα της μάζας ϵ του υδατοδιαλυτού μέρος του σωματιδίου μειώνεται γραμμικά από 90% για $\alpha = 0.01 \mu\text{m}$ έως 50% για $\alpha = 1 \mu\text{m}$. Για μεγέθη σωματιδίων μεγαλύτερα του $1 \mu\text{m}$ το ϵ παραμένει σταθερό και ίσο με 50%.

Το υδατοδιαλυτό μέρος των αστικών αερολυμάτων για αποτελείται από νιτρικό και θειικό αμμώνιο (NH_4NO_3 και $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) ενώ η αδιάλυτη ουσία αποτελείται από αιθάλη (soot). Όπως και για τα υπαίθρια αερολύματα, οι τιμές M_s και ν είναι 80 και 2 για το NH_4NO_3 , 132 και 3 για το $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ αντίστοιχα. Το κλάσμα της μάζας του υδατοδιαλυτού μέρος μειώνεται (όπως και για τα υπαίθρια αερολύματα) γραμμικά από 40% έως 10% για τα ίδια μεγέθη σωματιδίων όπως και στα αγροτικά, ενώ παραμένει σταθερό και ίσο με 10% για αερολύματα με ακτίνα μεγαλύτερης των $1 \mu\text{m}$.

Η τρίτη κατηγορία αερολυμάτων, αυτή των θαλάσσιων, διακρίνεται σε δύο είδη: μικρότερα αερολύματα με ακτίνα μικρότερη των 0.5 μm , που αποτελούνται αποκλειστικά από $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (με $M_s=132$ και $\nu=3$) και αερολύματα μεγαλύτερα των 0.5 μm , που αποτελούνται εξ' ολοκλήρου από καθαρό NaCl με $M_s = 58.4$ και $\nu = 2$. Αυτός ο διαχωρισμός λαμβάνει χονδρικά υπόψιν το γεγονός ότι τα μικρά θαλάσσια αερολύματα προέρχονται από μετατροπή του SO_2 από αέριο σε σωματίδιο (gas-to-particle conversion) ενώ τα μεγαλύτερα σωματίδια προέρχονται κυρίως από την εξάτμιση του θαλασσινού νερού. Οι τιμές του παράγοντα ϵ για τα θαλάσσια αερολύματα μεταβάλλονται με τον ίδιο τρόπο όπως των αγροτικών.

Στον Πίνακα 2.4.2 συνοψίζονται όλες οι τιμές που λαμβάνει ο παράγοντας ϵ για μικρά (με ακτίνα από 0.01 έως 1 μm) και για μεγάλα (με ακτίνα από 1 έως 10 μm) αερολύματα, για τις τρεις κατηγορίες αερολυμάτων αστικά, υπαίθρια και θαλάσσια

Αν και η παραπάνω κατηγοριοποίηση των αερολυμάτων είναι αρκετά χονδρική, είναι παρόλα αυτά ικανή να προτυποποιήσει ορθά τις χημικές ιδιότητες των αερολυμάτων, οι οποίες επηρεάζουν άμεσα την μεγέθυνσή τους μέσω των καμπυλών Köhler (Bott, 1991). Επιπλέον, οι παραπάνω τύποι αερολυμάτων έχουν διαφορετικές παραμέτρους ακτινοβολίας, αυτές που αναφέρονται στην ενότητα 2.3, δηλαδή τους ενεργούς παράγοντες εξασθένησης $Q_{ext,i}(a,r)$, σκέδασης $Q_{sca,i}(a,r)$ και ασυμμετρίας $g_i(a,r)$, καθώς έχουν διαφορετικό μιγαδικό δείκτη διάθλασης.

Πίνακας 2.4.2 Υδατοδιαλυτό μέρος αερολυμάτων για τρεις διαφορετικούς τύπους αερολυμάτων

a (μm)	Αστικά	Υπαίθρια	Θαλάσσια
0.01 - 1	40 – 10%	90 – 50 %	90 – 50 %
1 - 10	10%	50 %	50 %

2.4.2 Μοντέλο παραμετροποιημένης μικροφυσικής PAFOG

Το μοντέλο παραμετροποιημένης μικροφυσικής PAFOG χρησιμοποιεί ένα πιο απλοποιημένο σχήμα σε σχέση με το MIFOG, με σκοπό τη μείωση του υπολογιστικού χρόνου/πόρων, στοχεύοντας στην εισαγωγή και σύζευξή του με τρισδιάστατα προγνωστικά μοντέλα για την πραγματοποίηση καθημερινών προγνώσεων. Το σχήμα μικροφυσικής του είναι βασισμένο στους Chaumerliac et al. (1987) και Nickerson et al. (1987) και βάσει αυτού χρησιμοποιείται μία λογαριθμική κατανομή μεγεθών σταγόνων, με την εξής μορφή:

$$dN_c = \frac{N_c}{\sqrt{2\pi} \sigma_c D} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_c^2} \ln^2 \left(\frac{D}{D_0} \right) \right] dD \quad (2.4.5)$$

Σε αυτή την εξίσωση, D είναι η διάμετρος της σταγόνας, D_0 είναι η μέση διάμετρος του φάσματος των σταγόνων και σ_c ο όρος διασποράς της κατανομής, για τον οποίο στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η τιμή 0.15, ως προεπιλεγμένη από το μοντέλο. Στο PAFOG εκτός από τις δυναμικές προγνωστικές εξισώσεις 2.1.1, λύνονται οι παρακάτω προγνωστικές εξισώσεις για το συνολικό αριθμό νεφοσταγόνων N_c και για αναλογία μείγματος του συνολικού νερού, από όπου εξάγεται το LWC:

$$\frac{\partial N_c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_h \frac{\partial N_c}{\partial z} \right) - \{w + w_{t,c}\} \frac{\partial N_c}{\partial z} + N_{act} \quad (2.4.6)$$

$$\frac{\partial q_c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_h \frac{\partial q_c}{\partial z} \right) - \{w + w_{t,c}\} \frac{\partial q_c}{\partial z} - \left(\frac{\partial q_c}{\partial t} \right)_{af} + \frac{C}{\rho} \quad (2.4.7)$$

όπου $w_{t,c}$ είναι η οριακή ταχύτητα των σταγονιδίων. Ο όρος $\left(\frac{\partial q_c}{\partial t} \right)_{af}$ που εμφανίζεται στην εξίσωση (2.4.7) αναφέρεται στην μείωση του LWC εξαιτίας της δημιουργίας μεγαλύτερων σταγόνων και απομάκρυνσής τους από το νέφος, δηλαδή του DWC (επίδραση του φαινομένου σύγκρουσης/σύμψυξης). Στις περιπτώσεις ομίχλης αυτός ο όρος είναι μηδενικός, ενώ είναι μόνο υπολογίσιμος σε χαμηλά στρωματομόρφα νέφη. Επιπλέον, ο όρος N_{act} αναφέρεται στην εισαγωγή σταγόνων εξαιτίας της ενεργοποίησής τους. Υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση του Twomey (1959), όπως φαίνεται παρακάτω:

$$N_{act} = nS^k \quad (2.4.8)$$

Εδώ, το n είναι η αριθμητική συγκέντρωση των αερολυμάτων, S είναι ο υπερκορεσμός και k μια (αδιάστατη) εμπειρική παράμετρος που εκφράζει την ικανότητα ενεργοποίησης των διαφόρων τύπων αερολυμάτων ανάλογα με τη χημική τους σύσταση. Η παράμετρος αυτή προσπερνά την ανάγκη για γνώση της χημείας των CCN. Στην παρούσα παραμετροποίηση δεν υπάρχει κατανομή μεγεθών αερολυμάτων παρά μόνο η συνολική αριθμητική συγκέντρωση n . Ομοίως με το MiFog, υπάρχουν τρεις κατηγορίες αερολυμάτων: i) αστικά, ii) υπαίθρια και iii) θαλάσσια. Ανάλογα με τον τύπο των αερολυμάτων καθορίζονται και οι παραπάνω παράμετροι n και k και οι τιμές που παίρνουν δίνονται στον Πίνακα 2.4.2.

Πίνακας 2.4.3 Παράμετροι διαφορικών τύπων αερολυμάτων για την σχέση ενεργοποίησης του Twomey

	n (cm^{-3})	k (l)
Υπαίθρια	3926	0.9
Αστικά	54380	0.9
Θαλάσσια	108	0.7

Οι αριθμητικές συγκεντρώσεις n έχουν εξαχθεί από την ολοκλήρωση της εκάστοτε κατανομής μεγεθών αερολυμάτων του MiFog και έχουν εισαχθεί στον ως αρχικές τιμές στον κώδικα του PaFog. Η παράμετρος k έχει καθορισθεί από μετρήσεις υπερκορεσμού και αριθμού ενεργοποιημένων πυρήνων συμπίκνωσης που έχουν πραγματοποιηθεί σε διάφορα είδη νεφών, για τα οποία η εξίσωση (2.4.8) τα περιγράφει καταλλήλως. Οι τιμές για την παράμετρο αυτή κυμαίνονται από 0.2 έως 1.2. (Twomey and Wojciechowski, 1969)

2.5 Αρχικοποίηση των μοντέλων

Για την αρχικοποίηση των μοντέλων απαιτούνται αρχικές συνθήκες για διάφορες παραμέτρους εισαγωγής. Συγκεκριμένα, χρειάζονται κατακόρυφα προφίλ θερμοκρασίας, ατμοσφαιρικής πίεσης, σχετικής υγρασίας, σημείο δρόσου, οριζόντιας ταχύτητα ανέμου και κατεύθυνση αυτού. Επιπλέον, εκτός από τις παραμέτρους της βλάστησης που αναγράφονται στον Πίνακα 3.2 και το είδος του εδάφους, απαραίτητη είναι η εισαγωγή δεδομένων θερμοκρασίας υπεδάφους σε διάφορα βάθη, ενώ προαιρετική είναι η εισαγωγή δεδομένων υγρασίας υπεδάφους.

Στο παρόν αριθμητικό μοντέλο το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα χωρίζεται σε 150 ατμοσφαιρικά επίπεδα. Οι αποστάσεις μεταξύ των επιπέδων ξεκινούν από 1m στην επιφάνεια και αυξάνονται γραμμικά με σταθερό ρυθμό, με αποτέλεσμα η απόσταση μεταξύ δύο επιπέδων να είναι 10m και 50m σε ύψη 300m και 1500m, αντίστοιχα. Το πάχος της ατμόσφαιρας, για το οποίο επιλύονται οι προγνωστικές δυναμικές εξισώσεις του μοντέλου, είναι τα 2000m. Για την υπόλοιπη ατμόσφαιρα, μεταξύ 2000 και 50,000 m, χρησιμοποιούνται σταθερές ατμοσφαιρικές παράμετροι για τους υπολογισμούς της ακτινοβολίας.

Το υπεδάφος χωρίζεται σε 20 κατακόρυφα επίπεδα και η μεταξύ τους απόσταση αυξάνεται με σταθερό ρυθμό, ξεκινώντας από 1 mm μεταξύ των δύο πρώτων επιπέδων και φτάνοντας έως και τα 20 cm στα τελευταία επίπεδα βάρους, το τελευταίο εκ των οποίων βρίσκεται στα 0,87 m. Η επιλογή αυτού του λεπτομερούς πλέγματος οφείλεται στη μη γραμμική συμπεριφορά των θερμοδυναμικών διεργασιών μέσα στο έδαφος (Bott, 2021).

Επιπλέον, για το σχήμα λεπτομερούς μικροφυσικής προσδιορίζεται η αρχική (στην αρχή της προσομοίωσης) φασματική κατανομή μεγεθών των αερολυμάτων, με τη μορφή τριών λογαριθμικών κατανομών σε υπέρθεση. Ενώ για το παραμετροποιημένο σχήμα μικροφυσικής, όπως έχει εξηγηθεί στην ενότητα 2.4.2, χρειάζεται μόνο η συνολική συγκέντρωση των αερολυμάτων.

Τέλος, το βήμα χρονικής ολοκλήρωσης (timestep) του μοντέλου έχει οριστεί στα 10 δευτερόλεπτα.

Πίνακας 2.5.1 Δεδομένα εισόδου για αρχικοποίηση των μοντέλων.

Προφίλ Ατμόσφαιρας	Προφίλ Υπεδάφους	Αερολύματα
Θερμοκρασία	Θερμοκρασία	Αριθμητική κατανομή μεγεθών (MIFOG)
Πίεση	-	
Σχετική υγρασία	Υγρασία (προαιρετικό)	Συνολική αριθμητική συγκέντρωση (PAFOG)
Σημείο δρόσου	-	
Ταχύτητα & Διεύθυνση ανέμου	-	

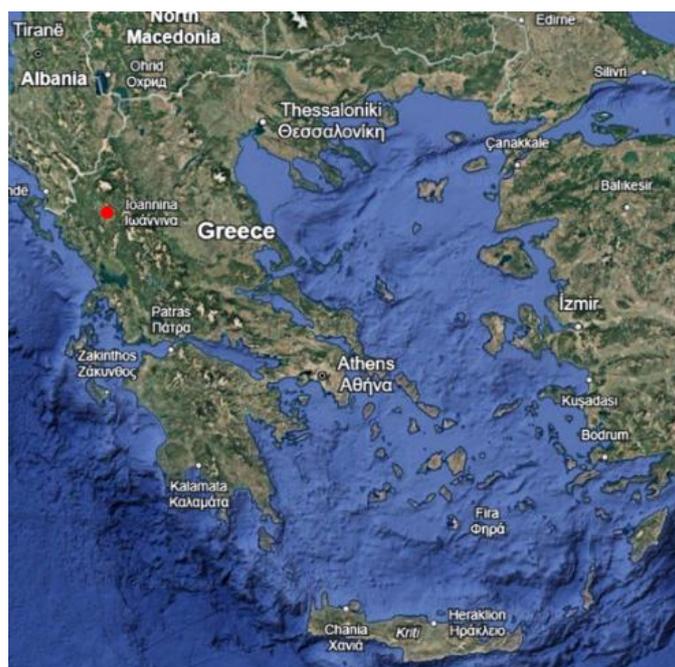
Κεφάλαιο 3^ο

Δεδομένα και Μεθοδολογία

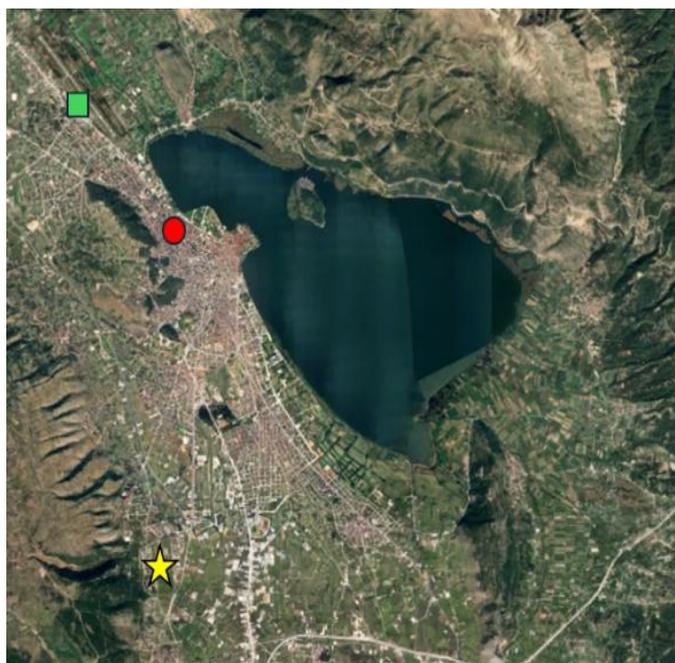
3.1 Τόπος μελέτης και χρονική περίοδος

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή μελετώνται η ομίχλη και η αιθαλομίχλη που εμφανίζονται στο λεκανοπέδιο και την πόλη των Ιωαννίνων. Τα Ιωάννινα βρίσκονται στη βορειοδυτική Ελλάδα (Σχήμα 3.1α) και είναι η πρωτεύουσα της περιφέρειας Ηπείρου. Ο πληθυσμός της πόλης και των περίχωρων συνοικισμών που βρίσκονται μέσα στο λεκανοπέδιο είναι περίπου 120,000 κάτοικοι. Η πόλη είναι χτισμένη μέσα στο ομώνυμο λεκανοπέδιο, το οποίο βρίσκεται σε υψόμετρο περίπου 500 m από την επιφάνεια της θάλασσας. Το λεκανοπέδιο είναι περιτριγυρισμένο από βουνά και οροσειρές, τα οποία ξεπερνούν τα 1500 m. Επιπλέον, η πόλη είναι χτισμένη δίπλα στην λίμνη Παμβώτιδα, η οποία έχει τα εξής χαρακτηριστικά: επιφάνεια 19,4 Km², μέσο βάθος περίπου 5 m και μέγιστο τα 11 m.

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε τρεις τοποθεσίες μέσα στο λεκανοπέδιο καθοριστικές για την έρευνα της παρούσας εργασίας, οι οποίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1β. Το Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων (κίτρινο αστέρι), ο Περιβαλλοντικός Σταθμός της Περιφέρειας Ηπείρου (κόκκινος κύκλος) και το αεροδρόμιο Ιωαννίνων (πράσινο τετράγωνο). Το Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων βρίσκεται υπεραστικά της πόλης, στην πλαγιά ενός λόφου (της Δουρούτης, με ύψος περίπου 80 m από την επιφάνεια της Παμβώτιδας) και απέχει περίπου 6 χιλιόμετρα από τον Περιβαλλοντικό Σταθμό. Ο τελευταίος είναι τοποθετημένος (στο Γενικό Λύκειο Ζωσιμαίας) σε απόσταση μικρότερη από το ένα χιλιόμετρο από το κέντρο της πόλης και απέχει μικρή απόσταση από την λίμνη. Τέλος, το αεροδρόμιο των Ιωαννίνων απέχει περίπου 3 Km από τον Περιβαλλοντικό Σταθμό, ενώ βρίσκεται σχεδόν στο ίδιο υψόμετρο με την λίμνη.



(α)



(β)

Σχήμα 3.1. Περιοχή μελέτης. (α) Ευρύτερος Ελλαδικός χώρος και (β) λεκανοπέδιο και πόλη των Ιωαννίνων. Φαίνονται οι τοποθεσίες ενδιαφέροντος, το Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων (κίτρινο αστέρι), ο Περιβαλλοντικός Σταθμός (κόκκινος κύκλος) και το αεροδρόμιο (πράσινο τετράγωνο).

Η χρονική περίοδος της μελέτης μας ορίζεται από τις 01/05/2019 έως τις 28/02/2022. Η επιλογή αυτής της περιόδου έγινε με σκοπό να χρησιμοποιηθούν δεδομένα αερολυμάτων από την πειραματική εκστρατεία της PANACEA, η οποία έλαβε μέρος στα Ιωάννινα για δύο χειμερινές περιόδους. Η πρώτη εκστρατεία πραγματοποιήθηκε από τις 05/01/2020 έως τις 10/02/2021, ενώ η δεύτερη από 06/12/2021 έως τις 10/01/2022 (Kaskaoutis et al., 2020; Stavroulas et al., 2020; Kaskaoutis et al., 2022; Papanikolaou et al., 2022). Για την παραπάνω περίοδο μελέτης, επιλέχθηκαν ημέρες κατά τις οποίες σημειώθηκε επεισόδιο ομίχλης, το οποίο συνυπήρξε με αυξημένες συγκεντρώσεις αερολυμάτων στο λεκανοπέδιο των Ιωαννίνων. Αυτό έγινε με σκοπό την αξιοποίηση δεδομένων χημικής σύστασης αερολυμάτων από την εκστρατεία της PANACEA, από τα οποία μπορεί να προσδιοριστεί η επίδραση της αιθαλομίχλης στο σχηματισμό ομίχλης. Η μεθοδολογία για τον καθορισμό των ημερών αυτών αναλύεται παρακάτω.

3.2 Επεισόδια ομίχλης και αιθαλομίχλης

Αρχικά, για την εύρεση ημερών ομίχλης μέσα στην περίοδο μελέτης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από METARs, τα οποία εκδίδονται από το αεροδρόμιο Ιωαννίνων και ελήφθησαν από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (Ε.Μ.Υ). Αυτά παρέχουν πληροφορία για την ύπαρξη ή όχι ομίχλης. Εκδίδονται ανά μισή ώρα, μέσα στο ωράριο λειτουργίας του τοπικού αεροδρομίου (περίπου από τις 08:00 έως τις 21:30 τοπική ώρα). Ημέρα ομίχλης θεωρείται μια ημέρα κατά την οποία υπάρχει τουλάχιστον ένα METAR με ομίχλη. Στην παρούσα μελέτη, βάσει του κριτηρίου αυτού, βρέθηκαν 76 ημέρες ομίχλης. Επιπλέον, ελήφθησαν και δεδομένα ορατότητας, τα οποία παρέχονται ανά 3 ώρες, από την ΕΜΥ και έχουν ανάλυση 100 m.

Επιπλέον, εκτός τις ημέρες ομίχλης αναζητήθηκαν και ημέρες ακραίας αιθαλομίχλης (Smog Days, SmD), οι οποίες σημειώθηκαν στα Ιωάννινα κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου μελέτης. Για τον προσδιορισμό αυτών των ημερών χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα/μετρήσεις αιωρούμενων σωματιδίων από τον Περιβαλλοντικό Σταθμό Ιωαννίνων, ο οποίος βρίσκεται κοντά στο κέντρο της πόλης (κόκκινος κύκλος, Σχήμα 3.1β). Ο Σταθμός προσφέρει ωριαίες μετρήσεις μετεωρολογικών παραμέτρων, δηλαδή θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου, αλλά και μετρήσεις σωματιδιακής μάζας αερολυμάτων, για τρία κατώφλια μεγεθών (PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_{10}). Οι μετρήσεις των αιωρούμενων σωματιδίων, της σωματιδιακής μάζας, γίνονται με οπτική μέθοδο, δηλαδή με καταγραφή της εξασθένησης ακτινοβολίας από ένα δείγμα αέρα το οποίο πρώτα έχει θερμανθεί για την απομάκρυνση όσο το δυνατό περισσότερης υγρασίας. Έτσι, υπολογίζεται η ξηρή μάζα των σωματιδίων, χωρίς την συνεισφορά πιθανής ύπαρξης νερού.

Η μεθοδολογία για των καθορισμό των ημερών ακραίας αιθαλομίχλης είναι η ακόλουθη. Από τις ωριαίες συγκεντρώσεις μάζας, PM , υπολογίστηκαν αρχικά οι μέσες ημερήσιες τιμές τους για όλη την περίοδο μελέτης. Έπειτα, μεσοποιήθηκαν οι μέσες ημερήσιες τιμές των συγκεντρώσεων, για τους χειμερινούς μόνο μήνες (Δεκέμβριο-Ιανουάριο-Φεβρουάριο). Έτσι ορίστηκαν τα κατώφλια για τον καθορισμό των ακραίων ημερών αιθαλομίχλης ως η μέση τιμή των συγκεντρώσεων κατά τους χειμερινούς μήνες, $PM_{winter\ days}$, συν δύο τυπικές αποκλίσεις (standard deviations, SD).

$$PM_{SmD} = \overline{PM}_{winter\ days} + 2 SD \quad (3.1)$$

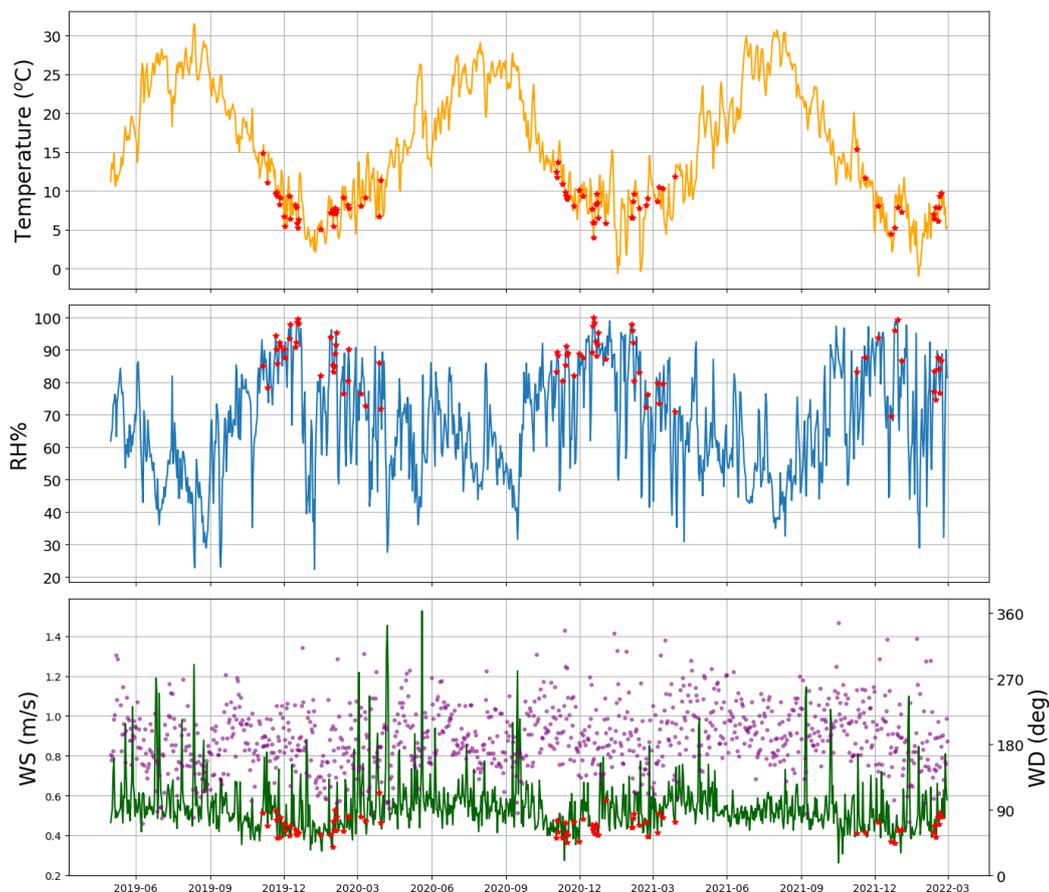
Η Εξίσωση 3.1 δίνει τα κατώφλια που καθορίζουν τις ημέρες ακραίας αιθαλομίχλης ενώ οι αντίστοιχες τιμές τους αναγράφονται στον Πίνακα 3.1. Τα κατώφλια των συγκεντρώσεων αυτών είναι εξαιρετικά μεγάλα για να περιέχουν περιπτώσεις μόνο ακραίας αιθαλομίχλης. Οι Sindosi et al. (2019) για την χειμερινή περίοδο των ετών 2010-2012 και 2014-2017 υπολόγισαν μέση τιμή και τυπική απόκλιση (SD) των PM_{10} ίση με $40.7 \pm 17.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ η μέγιστη (μηνιαία) τιμή ήταν $89.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Για τα έτη 2008-2011 η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση, για την χειμερινή περίοδο, των $PM_{2.5}$ ήταν $18.6 \pm 6.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, με την μέγιστη (μηνιαία) τιμή να φτάνει τα $44.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Τα ευρήματα αυτά αναφέρονται σε χρονική περίοδο όπου η Ελλάδα βρισκόταν πριν την οικονομική κρίση, όπου δεν παρουσιαζόταν έντονα φαινόμενα αιθαλομίχλης εξαιτίας της καλύτερης ποιότητας καυσίμου θέρμανσης. Τα τελευταία χρόνια οι συγκεντρώσεις των $PM_{2.5}$ κατά τους χειμερινούς μήνες έχουν αυξηθεί σημαντικά, εξαιτίας των καύσεων βιομάζας μέσα στο λεκανοπέδιο των Ιωαννίνων. Οι Kaskaoutis et al. (2022) για την χειμερινή περίοδο 12/12/2019 έως 17/02/2020 αναφέρουν μέση τιμή και τυπική απόκλιση σωματιδίων $PM_{2.5}$ ίση με $57.5 \pm 35.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ με την μέγιστη τιμή να βρίσκεται ίση με $127.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Έτσι, για τον καθορισμό των ακραίων ημερών αιθαλομίχλης χρησιμοποιήθηκε το όριο που δίνεται από $PM_{2.5}$, καθώς τα PM_{10} περιέχουν και μεγαλύτερα σωματίδια όπως σκόνη, ενώ τα PM_{10} περιλαμβάνουν μόνο υπέρλεπτα σωματίδια. Η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και το κατώφλι για τις συγκεντρώσεις των $PM_{2.5}$, για τους χειμερινούς μήνες, είναι 42.50, 29.21 και $100.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$, αντίστοιχα.

Πίνακας 3.1 Κατώφλια, μέση τιμή και τυπική απόκλιση συγκεντρώσεων μάζας για τον καθορισμό ακραίων ημερών αιθαλομίχλης.

	PM ₁	PM _{2.5}	PM ₁₀	(μg/m ³)
Κατώφλι	97.34	100.92	109.92	
Μέση τιμή	40.35	42.50	47.65	
Τυπική απόκλιση	28.49	29.21	31.13	

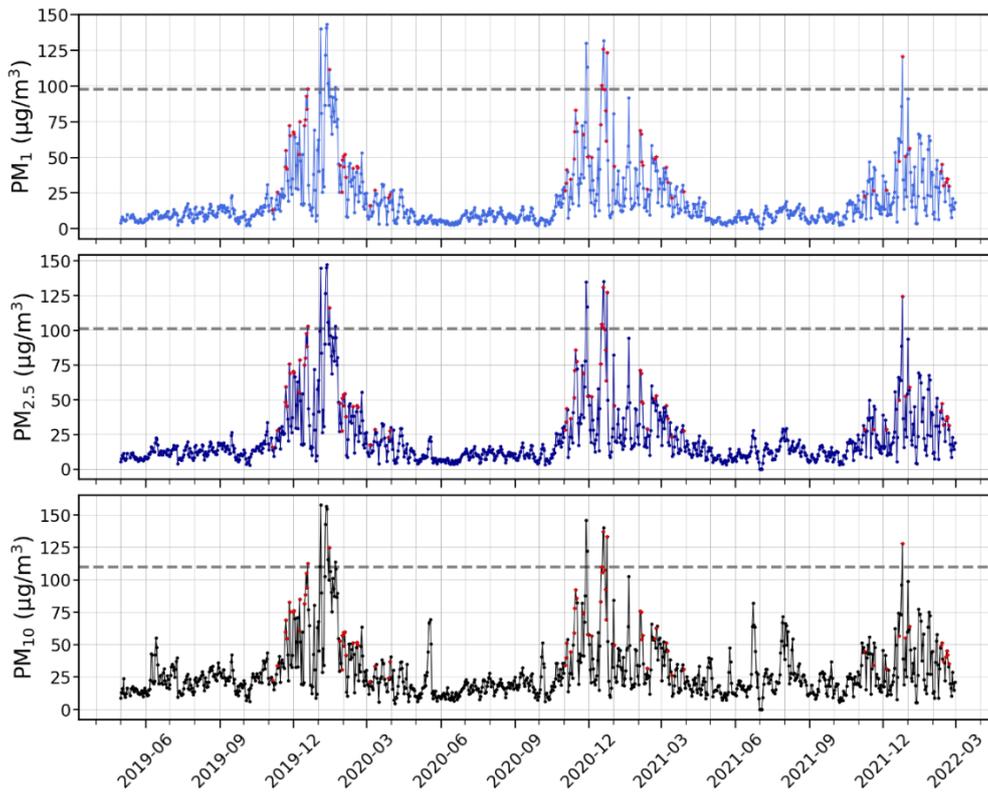
Οι ημέρες ακραίας αιθαλομίχλης υπολογίστηκαν σε 16 για το σύνολο της περιόδου μελέτης

Στα Σχήματα 3.1 και 3.2 φαίνεται η διαχρονική μεταβολή των μέσων ημερήσιων μετεωρολογικών παραμέτρων και συγκεντρώσεων αερολυμάτων αντίστοιχα, για την περίοδο μελέτης. Οι κόκκινες κουκίδες, στα δύο σχήματα, φανερώνουν τις ημέρες κατά τις οποίες παρουσιάστηκε ομίχλη, σύμφωνα με τα METARs. Στο Σχήμα 3.1 είναι διακριτός ο εποχιακός κύκλος της θερμοκρασίας (κίτρινο), με τη μέση ημερήσια θερμοκρασία να κυμαίνεται από τιμές κοντά στο 0 έως και τους 30 °C. Η σχετική υγρασία (μπλε) δεν παρουσιάζει κάποιον εποχιακό κύκλο με τις τιμές της να κυμαίνονται από 20 έως 100%. Ομοίως και η ταχύτητα (πράσινο) και η διεύθυνση (ροζ) του ανέμου δεν εμφανίζει κάποιον ενδοετήσιο κύκλο με τις τιμές του να κυμαίνονται κυρίως από 0.4 έως 0.8 m/s, με κυρίως νοτιοδυτικές διευθύνσεις. Στο ίδιο σχήμα παρατηρούμε πως οι ημέρες ομίχλης παρατηρούνται κυρίως τους χειμερινούς μήνες, όταν η ταχύτητα ανέμου (συνεχής πράσινη καμπύλη) είναι χαμηλή (συνθήκες άπνοιας) και επικρατούν υψηλές σχετικές υγρασίες. Στο Σχήμα 3.2 βλέπουμε τις μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις των σωματιδίων, όπου φαίνεται ότι τους χειμερινούς μήνες οι συγκεντρώσεις είναι αυξημένες φτάνοντας πάνω από 100 μg/m³. Είναι σημαντικό ότι αυτό συμβαίνει τόσο για τα λεπτά αερολύματα (PM₁ και PM_{2.5}) όσο και το σύνολο των αερολυμάτων (PM₁₀), καθώς φαίνεται πως το μεγαλύτερο μέρος της μάζας οφείλεται στα λεπτότερα σωματίδια, τα οποία είναι συνδεδεμένα με εκπομπές καύσεων. Τις υπόλοιπες εποχές οι συγκεντρώσεις των σωματιδίων είναι σε χαμηλά επίπεδα και δεν ξεπερνούν τα 50 μg/m³. Εξάιρεση αποτελούν τα PM₁₀ τα οποία μπορούν να αυξηθούν πάνω από αυτήν την τιμή κατά την διάρκεια επεισοδίων μεταφοράς αφρικανικής σκόνης τα οποία συμβαίνουν συνήθως τους ανοιξιάτικους μήνες (Dimitriou and Kassomenos, 2019) Οι οριζόντιες διακεκομμένες γραμμές προσδιορίζουν τα κατώφλια των συγκεντρώσεων που αναγράφονται στον Πίνακα 3.1 και υποδεικνύουν τις ημέρες ακραίας αιθαλομίχλης.

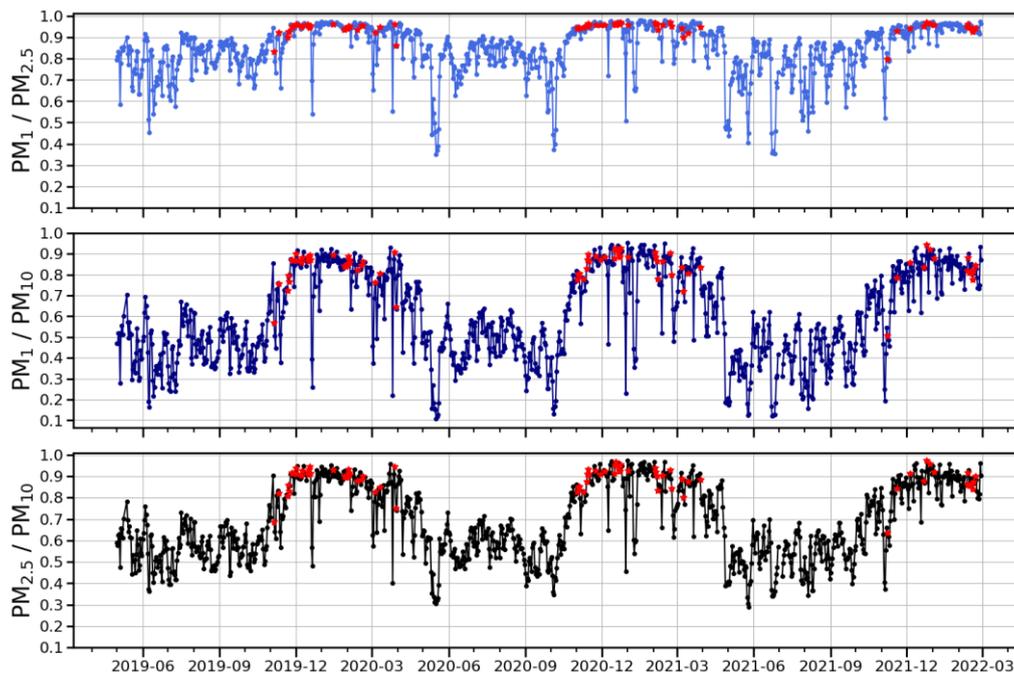


Σχήμα 3.1 Μέσες ημερήσιες τιμές θερμοκρασίας στα 2 m (κίτρινο), σχετικής υγρασίας στα 2 m (μπλε), ταχύτητας (πράσινο) και διεύθυνσης (ροζ σημεία) ανέμου στον Περιβαλλοντικού Σταθμό της Περιφέρειας Ηπείρου, στα Ιωάννινα, κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης. Τα κόκκινα σημεία αναφέρονται στις ημέρες ομίχλης.

Επιπρόσθετα, στο Σχήμα 3.3 φαίνονται, με συμπαγές καμπύλες, οι μέσοι ημερήσιοι λόγοι $PM_1/PM_{2.5}$, PM_1/PM_{10} και $PM_{2.5}/PM_{10}$, για την περίοδο μελέτης. Οι λόγοι αυτοί, χρησιμοποιούνται σαν δείκτες που προσδίδουν την προέλευση των αερολυμάτων για την εκάστοτε ημέρα. Για μεγάλους λόγους έχουμε μεγαλύτερη συμμετοχή στο σύνολο της μάζας από τον αριθμητή παρά από τον παρονομαστή, δηλαδή από λεπτά αερολύματα. Έτσι, όταν οι τιμές των λόγων πλησιάζουν την μονάδα βρισκόμαστε σε περιβάλλοντα με ατμόσφαιρα επιβαρυνμένη από λεπτά αερολύματα κυρίως, δηλαδή καύσεων. Αντίθετα, όταν οι λόγοι είναι χαμηλοί, υποδεικνύεται η σημαντική συμμετοχή μεγαλύτερων αερολυμάτων (π.χ. σκόνης).



Σχήμα 3.2 Μέσες ημερήσιες τιμές συγκεντρώσεων σωματιδιακής μάζας αερολυμάτων PM_1 (πάνω), $PM_{2.5}$ (μέση) και PM_{10} (κάτω) του Περιβαλλοντικού Σταθμού της Περιφέρειας Ηπείρου, στα Ιωάννινα, κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης. Οι διακεκομμένες οριζόντιες γραμμές υποδεικνύουν τα κατώφλια των ημερών ακραίας αιθαλομίχλης, ενώ οι τα κόκκινα σημεία τις μέρες ομίχλης.

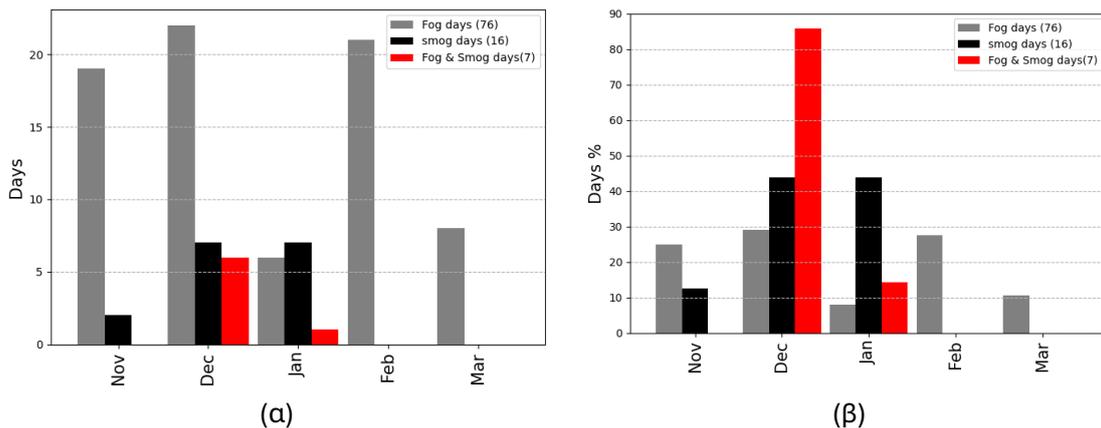


Σχήμα 3.3 Διακύμανση των λόγων σωματιδιακής μάζας $PM_1/PM_{2.5}$ (πάνω), PM_1/PM_{10} (μέση) και $PM_{2.5}/PM_{10}$ (κάτω) του Περιβαλλοντικού Σταθμού της Περιφέρειας Ηπείρου, στα Ιωάννινα, κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης. Τα κόκκινα σημεία αναφέρονται στις μέρες ομίχλης.

Στο Σχήμα 3.3 παρατηρούμε μία εποχικότητα. Κατά τους χειμερινούς μήνες, στα Ιωάννινα, οι λόγοι είναι πάνω από το 0.9, υποδεικνύοντας την ύπαρξη κυρίως λεπτών αερολυμάτων καύσεων. Αντίθετα, κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, όταν οι λόγοι παίρνουν τις μικρότερες τιμές τους, επικρατούν στην τοπική ατμόσφαιρα κυρίως μεγαλύτερα σωματίδια, όπως σκόνη και γύρη, ενώ μειώνεται αισθητά η συμμετοχή αερολυμάτων καύσεων. Όπως και στα προηγούμενα διαγράμματα, οι κόκκινες βούλες δείχνουν τις ημέρες με ομίχλη. Παρατηρούμε ότι στις περισσότερες ημέρες ομίχλης, το χειμώνα, οι λόγοι παίρνουν μεγάλες τιμές, υποδεικνύοντας τη συνύπαρξη της ομίχλης με λεπτά αερολύματα (καύσεων), γεγονός που αποτελεί δείκτη για πιθανή συμμετοχή των λεπτών αερολυμάτων καύσης (κυρίως βιομάζας) στο σχηματισμό της.

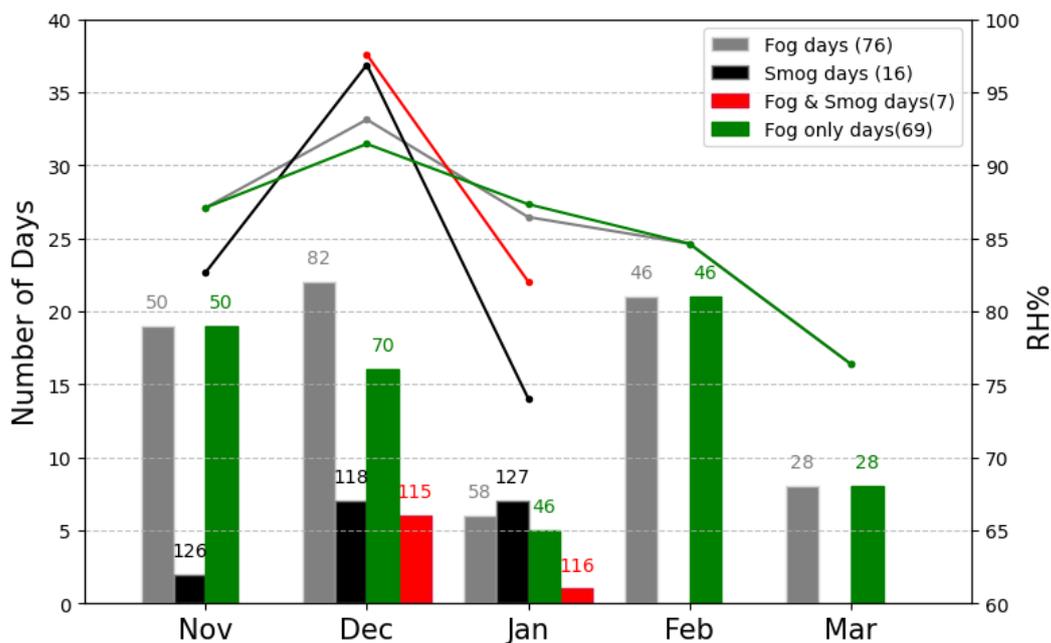
Ως εκ τούτου, θεωρήθηκε σημαντικό να ορισθούν εκείνες οι ημέρες κατά τις οποίες συνυπήρξαν ομίχλη και ακραία αιθαλομίχλη. Οι ημέρες αυτές ορίστηκαν από την τομή των ημερών ομίχλης και αιθαλομίχλης και είναι συνολικά 7 για την περίοδο μελέτης. Οι μέρες αυτές ήταν: 19/12/2019, 15/01/2020, 17-19/12/2020, 24/12/2020 και 25/12/2021.

Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η κατανομή ανά μήνα των ημερών ομίχλης, ακραίας αιθαλομίχλης και η τομή τους, δηλαδή ο αριθμός των ημερών με συνύπαρξη ομίχλης και (ακραίας) αιθαλομίχλης. Τα αποτελέσματα δίνονται τόσο σε απόλυτες τιμές (Σχήμα 3.4α) όσο και ποσοστιαίες (Σχήμα 3.4β). Για τη περίοδο για την οποία διεξήχθη η παρούσα μελέτη, δηλαδή από 01/05/2019 έως τις 31/03/2022, διαπιστώθηκε ότι ημέρες ομίχλης εμφανίστηκαν, όπως είναι αναμενόμενο, μόνο κατά τους πέντε μήνες της ψυχρής περιόδου του έτους, από τους οποίους οι τρεις είναι οι χειμερινοί και οι υπόλοιποι δύο ο Νοέμβριος και ο Μάρτιος. Επιπλέον, οι μήνες με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης ομίχλης είναι (κατά σειρά) ο Δεκέμβριος, ο Νοέμβριος και ο Φεβρουάριος. Αντίθετα, ο μήνας με τη μικρότερη συχνότητα εμφάνισης ομίχλης βρέθηκε να είναι ο Ιανουάριος. Βέβαια, σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα αυτά δε μπορούν να θεωρηθούν ως γενικά δεδομένου του μικρού αριθμού ετών μελέτης. Όντως, οι Houssos et al. (2012) για την περίοδο 1957-2002 βρήκαν πως τον Νοέμβριο υπάρχει μέγιστο στον αριθμό ημερών ομίχλης με τον Δεκέμβριο να βρίσκεται πολύ κοντά, να ακολουθεί ο Ιανουάριος, όπου δεν παρατηρείται ελάχιστο στην συχνότητα εμφάνισης της ομίχλης και έπειτα ο Φεβρουάριος. Επίσης, βρήκαν ότι ο μέσος ετήσιος αριθμός ημερών ομίχλης ανέρχεται περίπου στις 35 ημέρες ανά έτος, ενώ αντίστοιχα στην δική μας μελέτη (περίπου 3 χρόνια) ο αριθμός αυτός είναι 25 ημέρες ανά έτος. Όσον αφορά στις ημέρες ακραίας αιθαλομίχλης, αυτές εμφανίζονται μόνο κατά τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο και λιγότερο το Νοέμβριο. Ιδιαίτερα το Δεκέμβριο, τα περιστατικά ακραίας αιθαλομίχλης λαμβάνουν χώρα σχεδόν πάντοτε με παράλληλη ύπαρξη ομίχλης, καθώς αυτό συνέβη στις έξι από τις επτά ημέρες (σε ποσοστό 86%) ακραίας αιθαλομίχλης που σημειώθηκαν αυτόν το μήνα στα Ιωάννινα. Αντίθετα, η συνύπαρξη αυτή ήταν πολύ αραιότερη τον Ιανουάριο (ποσοστό 14%) ενώ δε συνέβη καθόλου το Νοέμβριο.



Σχήμα 3.4 Αριθμητική κατανομή ανά μήνα της ψυχρής περιόδου του έτους των ημερών ομίχλης (γκρι), ακραίας αιθαλομίχλης (μαύρο) και συνύπαρξης των δύο (κόκκινο). Τα αποτελέσματα δίνονται σε (α) απόλυτες και (β) ποσοστιαίες τιμές αναφερόμενες στο συνολικό αριθμό ημερών κάθε κατηγορίας.

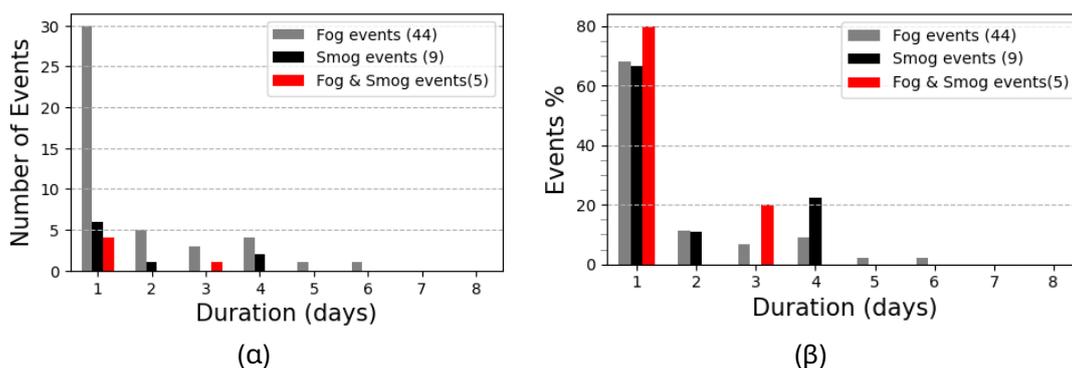
Στο Σχήμα 3.5 φαίνεται η κατανομή ανά μήνα των ημερών ομίχλης (γκρι), αιθαλομίχλης (μαύρο), η τομή αυτών (κόκκινο) αλλά και οι ημέρες ομίχλης κατά τις οποίες δεν υπήρξαν συνθήκες ακραίας αιθαλομίχλης (πράσινο). Στο ίδιο σχήμα με γραμμές φαίνεται και η διακύμανση ανά μήνα της σχετικής υγρασίας για την κάθε ομάδα ημερών του κάθε μήνα. Γενικά, παρατηρούμε πως το μέγιστο της σχετικής υγρασίας, για όλες τις ομάδες ημερών, παρατηρείται το Δεκέμβριο. Είναι σημαντικό να τονιστεί πως κατά το μήνα αυτόν η σχετική υγρασία για τις ημέρες συνύπαρξης ομίχλης και αιθαλομίχλης (κόκκινο) είναι μεγαλύτερη σε σχέση με μέρες όπου εμφανιζόταν απλά ομίχλη (πράσινο), ενώ είναι σχεδόν ισοδύναμη με τη σχετική υγρασία των ημερών με αιθαλομίχλη (μαύρο). Επιπλέον, στο Σχήμα 3.5, πάνω από κάθε μπάρα αναγράφεται η μέση συγκέντρωση των σωματιδίων (PM_{2.5}) ανά μήνα για την κάθε ομάδα ημερών. Φαίνεται ότι κατά τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο και Ιανουάριο οι συγκεντρώσεις PM_{2.5} είναι πολύ αυξημένες, παρόμοιες μεταξύ τους και μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις των ημερών ομίχλης. Επίσης, φαίνεται ότι κατά τους μήνες αυτούς, όπως και το Φεβρουάριο, η ομίχλη λαμβάνει χώρα όταν επικρατούν στα Ιωάννινα υψηλές συγκεντρώσεις (τιμές πάνω από περίπου 50 μg/m³) λεπτών αερολυμάτων καύσης βιομάζας, γεγονός που υποδεικνύει τον πιθανό ρόλο των αερολυμάτων αυτών στο σχηματισμό της ομίχλης, παράλληλα με τις ευνοϊκές μετεωρολογικές συνθήκες (υψηλή σχετική υγρασία, άνω του 70-80%). Τέλος, κατά τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο στις οποίες παρατηρούνται οι ημέρες ομίχλης- (ακραίας) αιθαλομίχλης (κόκκινο), η μέση συγκέντρωση των λεπτών σωματιδίων είναι ελαφρώς μικρότερη σε σχέση με τις ημέρες καθαρής αιθαλομίχλης (μαύρο), υποδηλώνοντας πως η ομίχλη μπορεί να δράσει ως παράγοντας μείωσης των αιωρούμενων σωματιδίων.



Σχήμα 3.5 Κατανομή ανά μήνα των επεισοδίων/ημερών ομίχλης (γκρι), αιθαλομίχλης (μαύρο), συνύπαρξης των δύο (κόκκινο) και των ημερών ομίχλης χωρίς αιθαλομίχλη (πράσινο). Οι γραμμές δείχνουν τις μέσες τιμές, ανά μήνα, της σχετικής υγρασίας και ο αριθμός πάνω από τις μπάρες αναφέρεται στην μέση συγκέντρωση σωματιδίων PM2.5 του Περιβαλλοντικού Σταθμού, που επικρατούσε για τις τέσσερις ομάδες ημερών.

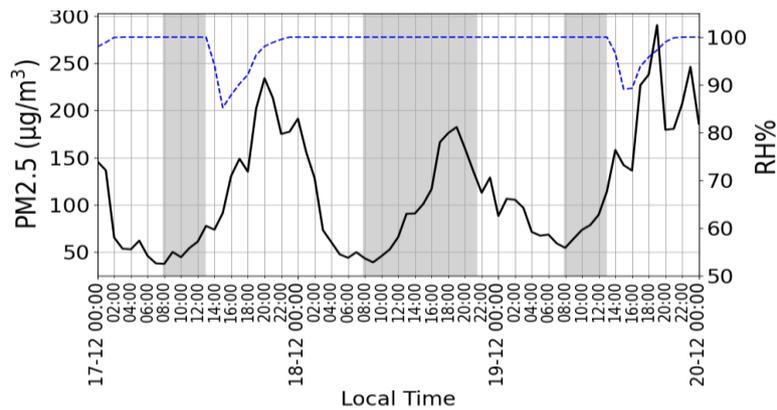
Τα φαινόμενα της ομίχλης και της αιθαλομίχλης είναι δυνατόν να διαρκέσουν για αρκετές συνεχόμενες ημέρες. Στα Ιωάννινα έχει βρεθεί πως το 70% των επεισοδίων ομίχλης έχουν διάρκεια μία ημέρα, 18% διαρκούν δύο ημέρες, ενώ 6% των περιπτώσεων έχει διάρκεια τριών ημερών (Houssos et al., 2012) Στο Σχήμα 3.6 φαίνεται η κατανομή των φαινομένων αυτών ανάλογα με τη διάρκειά τους σε απόλυτες (Σχήμα 3.6α) και ποσοστιαίες τιμές σε σχέση με το συνολικό αριθμό των επεισοδίων κάθε κατηγορίας (Σχήμα 3.6β). Ως επεισόδιο ορίζουμε την αλληλουχία ημερών ομίχλης (γκρι), ακραίας αιθαλομίχλης (μαύρο) και συνύπαρξη των δύο (κόκκινο) Παρατηρούμε πως τα περισσότερα επεισόδια ομίχλης και ακραίας αιθαλομίχλης, όπως και ομίχλης-αιθαλομίχλης έχουν διάρκεια μία ημέρα (σε ποσοστά 68, 67 και 80%, αντίστοιχα). Παρόλα αυτά, είναι αρκετά και τα επεισόδια ομίχλης που διήρκησαν πάνω από μία ημέρα. Παρατηρούμε πως το μεγαλύτερο σε διάρκεια (ένα) επεισόδιο ομίχλης διήρκησε έξι (6) ημέρες και έλαβε χώρα από τις 30/01/2020 έως τις 04/02/2020. Επίσης, υπήρξε ένα ακόμη επεισόδιο ομίχλης με διάρκεια πέντε (5) ημέρες, και τέσσερα (4), τρία (3) και πέντε (5) επεισόδια ομίχλης με διάρκεια 4, 3 και 2 ημέρες. Αντίστοιχα τα περισσότερα επεισόδια ακραίας αιθαλομίχλης (6 ή ποσοστό 67%) είχαν διάρκεια μίας ημέρα, ενώ υπήρξαν και ένα επεισόδιο διάρκειας 2 ημερών και δύο επεισόδια με διάρκεια 4 ημερών. Το πρώτο από τα επεισόδια αιθαλομίχλης διάρκειας 4 ημερών σημειώθηκε στις 10-13/01/2020 και σε αυτό δεν επικρατούσαν συνθήκες ομίχλης, ενώ αντίθετα το δεύτερο έλαβε χώρα στις 17-20/12/2020 όπου τις πρώτες 3 ημέρες του επεισοδίου επικρατούσε ομίχλη στο λεκανοπέδιο των Ιωαννίνων, με αποτέλεσμα να υπάρξει ένα επεισόδιο συνύπαρξης ομίχλης – ακραίας αιθαλομίχλης με διάρκεια 3 ημερών από τις 17 έως 19 /12/2020. Το τριήμερο επεισόδιο αυτό αποτελεί ιδανική περίπτωση μελέτης της επίδρασης των σωματιδίων καύσης βιομάζας στην ομίχλη, καθώς υπήρχαν από κοινού αυξημένες συγκεντρώσεις σωματιδίων και ομίχλης.

Όπως παρουσιάζεται παρακάτω, η ομίχλη που δημιουργείται σε αυτό είναι ακτινοβολίας, οπότε τα μοντέλα που εισάγουμε (MiFog, PaFog) μπορούν να προσομοιώσουν αρκετά καλά και να παράγουν αξιόπιστα αποτελέσματα του φαινομένου. Επιπλέον, η επιλογή ενός τριήμερου επεισοδίου αποσκοπεί στην εύρεση του μεγαλύτερου δυνατού χρόνου προσομοίωσης, για τον οποίο τα αποτελέσματα των μοντέλων δεν αποκλίνουν από τις παρατηρήσεις. Παρακάτω, παρουσιάζεται το φαινόμενο αυτό καθώς και η συνοπτική κατάσταση της ατμόσφαιρας που επικρατούσε κατά την διάρκειά του.



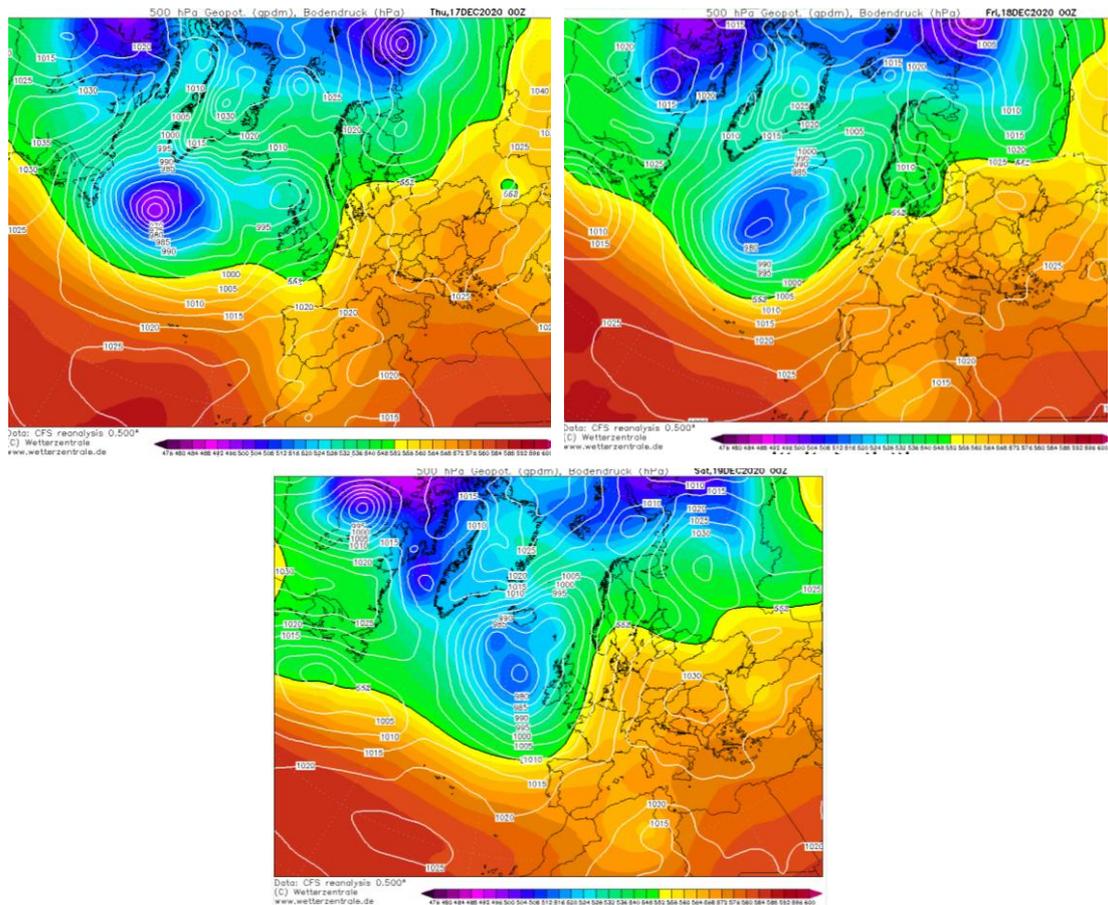
Σχήμα 3.6 Κατανομή ανά διάρκεια (σε ημέρες) των επεισοδίων ομίχλης (γκρι), αιθαλομίχλης (μαύρο) και επεισοδίων συνύπαρξης αιθαλομίχλης-ομίχλης των δύο (κόκκινο) στα Ιωάννινα, κατά τη διάρκεια της περιόδου 01/05/2019 έως 31/03/2022. Τα αποτελέσματα δίνονται τόσο σε (α) απόλυτες τιμές (αριθμό ημερών) όσο και (β) ποσοστιαίες τιμές αναφερόμενες στο συνολικό αριθμό των επεισοδίων κάθε κατηγορίας.

Σε αυτές τις τρεις ημέρες (17-20/12/2020) υπήρχαν αυξημένες συγκεντρώσεις αερολυμάτων, οι οποίες ξεπερνούσαν καθημερινά τις απογευματινές και βραδινές ώρες τα $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ την πρώτη και την τρίτη μέρα ξεπέρασαν και τα $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7. Η σχετική υγρασία τις ημέρες αυτές, με εξαίρεση το διάστημα 14:00 – 18:00 (τοπική ώρα) 17/12/2020 ήταν σε πολύ υψηλά επίπεδα (άνω του 90%). Μάλιστα, τη δεύτερη ημέρα (18/12/2020) η σχετική υγρασία παρέμεινε σταθερά ίση με 100%, υποδηλώνοντας την πιθανή ύπαρξη της ομίχλης καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας αυτής, χωρίς να διαλυθεί. Όντως, η υπόθεση αυτή υποστηρίζεται από την πληροφορία των METARs της ημέρας αυτής, όπου η ομίχλη στις 18/12 ήταν παρούσα από τις πρωινές ώρες (08:00) της ημέρας αυτής έως και τις πρωινές μέρες (13:00) της τρίτης ημέρας (19/12), τουλάχιστον για τις ώρες λειτουργίας του αεροδρομίου Ιωαννίνων.



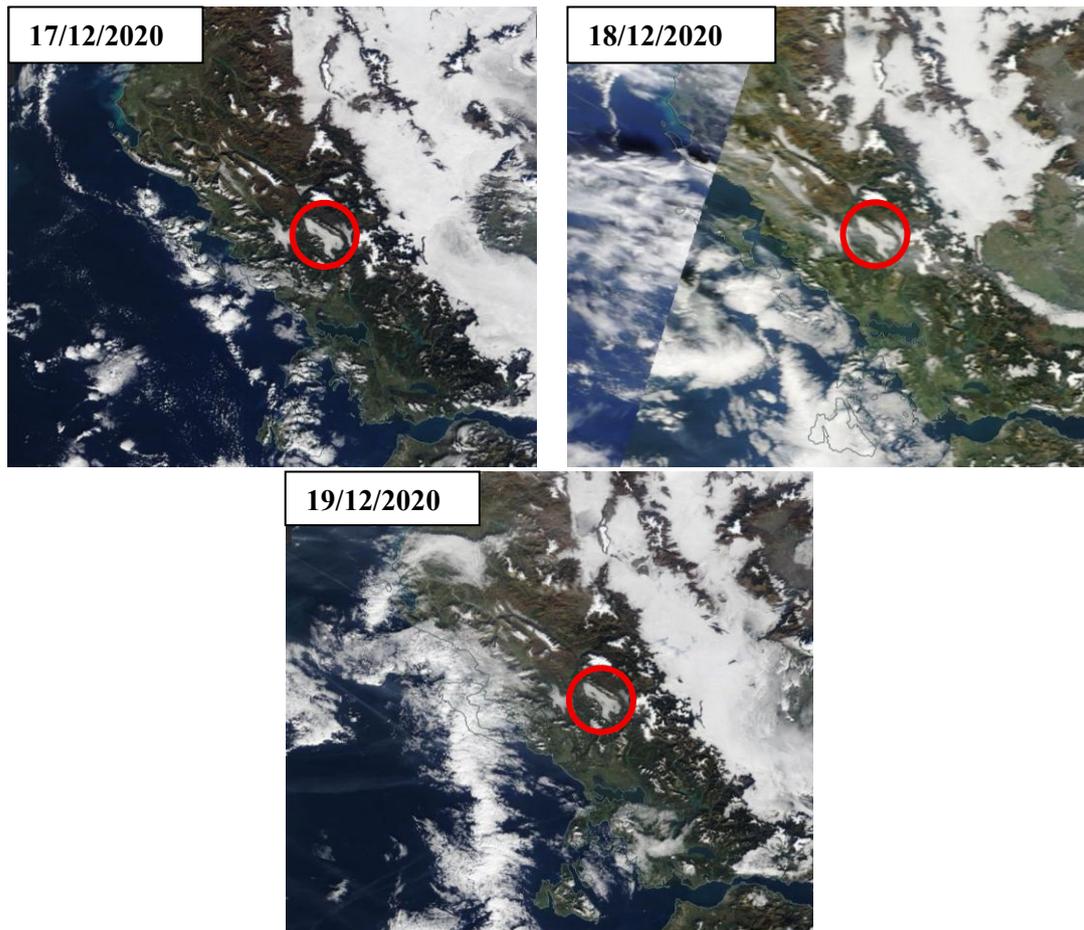
Σχήμα 3.7 Ωριαίες τιμές συγκέντρωσης σωματιδίων PM2.5 (μαύρη καμπύλη) και σχετικής υγρασίας (μπλε καμπύλη) του Περιβαλλοντικού Σταθμού της Περιφέρειας Ηπείρου (στην οδό Βηλαρά) για τις τρεις ημέρες του επεισοδίου ομίχλης-αιθαλομίχλης, στις 17-19/12/2020, στα Ιωάννινα.

Η συνοπτική κατάσταση της ατμόσφαιρας που επικρατούσε τις ημέρες αυτού του επεισοδίου συνύπαρξης αιθαλομίχλης-ομίχλης στα Ιωάννινα, στις 17-19/12/2020, φαίνεται στο Σχήμα 3.8. Στο σχήμα αυτό παρουσιάζονται χάρτες ισούψων στην επιφάνεια των 500 hPa (χρωματική παλέτα) και πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους (λευκές καμπύλες) στις 00:00 UTC. Παρατηρούμε πως στην ανώτερη ατμόσφαιρα (στην επιφάνεια των 500 hPa), επικρατεί πάνω από τον ελλαδικό χώρο μια σφήνα υψηλών πιέσεων, η οποία παραμένει σχετικά σταθερή κατά τις τρεις ημέρες. Η σφήνα αυτή υποδηλώνει την ύπαρξη καθοδικών κινήσεων (subsidence) του ατμοσφαιρικού αέρα υπό αντικυκλωνικές συνθήκες και αίθριο καιρό. Στην επιφάνεια επικρατούν υψηλές πιέσεις, ενώ ο αέρας είναι ασθενής και πνέει με ανατολικές-βορειοανατολικές διευθύνσεις. Ο άνεμος αυτός εξαιτίας της οροσειράς της Πίνδου γίνεται καταβατικός στο λεκανοπέδιο των Ιωαννίνων, αποτρέποντας την κατακόρυφη διάχυση των ατμοσφαιρικών ρύπων και της υγρασίας. Τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα την επικράτηση αίθριου καιρού και ανέφελου ουρανού (Σχήμα 3.9), με συσσώρευση ρύπων και υγρασίας στο λεκανοπέδιο. Κατά τις νυχτερινές ώρες το έδαφος ψύχεται μέσω εκπομπής υπέρυθρης ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία να πέφτει και να φτάνει στο σημείο δρόσου., ενώ αυξάνεται η σχετική υγρασία. Έτσι, αρχίζουν οι συμπυκνώσεις των υδρατμών και εν τέλει σχηματίζεται ομίχλη. Αυτές οι μετεωρολογικές συνθήκες δεν ευνοούν μόνο τη δημιουργία ομίχλης, αλλά και την εμφάνιση αιθαλομίχλης, καθώς οι αέριοι ρύποι δεν μπορούν να δραπετεύσουν από το οριακό στρώμα εξαιτίας αφενός της επιφανειακής θερμοκρασιακής αναστροφής που δημιουργείται λόγω της ψύξης του εδάφους τις νυχτερινές ώρες και αφετέρου των καθοδικών κινήσεων εξαιτίας της μεγάλης κλίμακας κατολίσθησης αερίων μαζών.



Σχήμα 3.8: Συνοπτικοί χάρτες ισοϋψών στα 500 hPa (χρώματα) και πίεσης στην επιφάνεια (λευκές καμπύλες) στις 00:00 UTC κατά τις τρεις ημέρες επεισοδίου συνύπαρξης ομίχλης και αιθαλομίχλης στα Ιωάννινα, από τις 17 έως τις 19 Δεκεμβρίου 2020 (<https://www.wetterzentrale.de/en/default.php>, τελευταία πρόσβαση 10/09/2025).

Συνοψίζοντας, στην παρούσα εργασία επικεντρωθήκαμε σε μία μελέτη περίπτωσης (case study), μέσω της οποίας εξετάζουμε την επίδραση των σωματιδίων καύσης βιομάζας στη δημιουργία ομίχλης. Πιο συγκεκριμένα μελετώνται η ομίχλη που έλαβε χώρα στο λεκανοπέδιο των Ιωαννίνων από τις 17 έως τις 19 Δεκεμβρίου του 2020 και οι ιδιότητές της. Η επιλογή του συγκεκριμένου επεισοδίου έγινε, όπως έχει ήδη εξηγηθεί, λόγω της ταυτόχρονης εμφάνισης ομίχλης και συνθηκών ακραίας αιθαλομίχλης, διάρκειας τριών ημερών, καθώς και της επικρατούσας συνοπτικής κατάστασης που υποδηλώνει ότι επρόκειτο για ομίχλη ακτινοβολίας. Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζεται η αρχικοποίηση των προαναφερθέντων μοντέλων ομίχλης.



Σχήμα 3.9 Δορυφορικές εικόνες από το δορυφόρο MODIS (<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>, τελευταία πρόσβαση 21/12/2025) για τις τρεις ημέρες του επεισοδίου ομίχλης – αιθαλομίχλης. Με κόκκινο κύκλο φαίνεται το λεκανοπέδιο των Ιωαννίνων όπου στο εσωτερικό του έχει σχηματιστεί το νέφος της ομίχλης.

3.3 Δεδομένα αρχικοποίησης και επαλήθευσης

Η παρούσα ενότητα περιγράφει αναλυτικά τόσο τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την αρχικοποίηση των μοντέλων όσο και εκείνα που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων τους.

Πίνακας 3.1 Δεδομένα εισαγωγής μοντέλου και πηγή προέλευσης. Το νούμερο της παρένθεσης αναφέρεται στον αριθμό των επιπέδων κάθε παραμέτρου.

Προφίλ θερμοκρασίας (5000)	MERRA-2*
Προφίλ σχετική υγρασίας (5000)	MERRA-2*
Προφίλ σημείου δρόσου (5000)	MERRA-2*
Προφίλ ατμοσφαιρικής πίεσης (5000)	MERRA-2*
Προφίλ ταχύτητας ανέμου (5000)	MERRA-2*

Προφίλ διεύθυνσης ανέμου (5000)	MERRA-2*
Θερμοκρασία στα 2m (1)	Μετεωρολογικός σταθμός ΠΙ
Σχετική υγρασία στα 2m (1)	Μετεωρολογικός σταθμός ΠΙ
Σημείου δρόσου στα 2m (1)	Μετεωρολογικός σταθμός ΠΙ
Θερμοκρασία εδάφους (1)	Μετεωρολογικός σταθμός ΠΙ
Θερμοκρασία υπεδάφους (4)	Μετεωρολογικός σταθμός ΠΙ

*Τα δεδομένα MERRA-2 έχουν υποστεί γραμμική παρεμβολή και προσαρμογή

Τα κυριότερα δεδομένα που είναι απαραίτητα για την εκκίνηση των μοντέλων και οι πηγές προέλευσής τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1. Επιπλέον, υπάρχουν και άλλα δεδομένα εισαγωγής όπως η νεφοκάλυψη, δεδομένα βλάστησης, η κατακόρυφη ταχύτητα ανέμου εξαιτίας της μεγάλης κλίμακας καθίζηση, το είδος των αερολυμάτων κ.ά. Όλα τα υπόλοιπα δεδομένα εισόδου παρουσιάζονται στο Σχήμα Π.Γ.1 Αρχικά, όσον αφορά στο ατμοσφαιρικό προφίλ (θερμοκρασίας, υγρασίας, πίεσης, ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου), η έλλειψη τοπικών ραδιοβολίσεων, οδήγησε στη χρήση δεδομένων επανανάλυσης από τη βάση δεδομένων MERRA-2 και τη βιβλιοθήκη M2I3NVASM. Τα δεδομένα αυτά παρέχονται για χωρική ανάλυση $0.5^\circ \times 0.625^\circ$ (latitude, longitude) και για 72 κατακόρυφα επίπεδα, από την επιφάνεια του εδάφους έως περίπου τα 75km. Η συγκεκριμένη βάση δεδομένων επιλέχθηκε καθώς παρείχε την μεγαλύτερη κατακόρυφη ανάλυση σε σύγκρισή με άλλες παρόμοιες. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

- 1) ύψος στο μέσο του στρώματος (mid layer heights)
- 2) κατακόρυφη ταχύτητα πίεσης (vertical pressure velocity)
- 3) πίεση στο μέσο του στρώματος (mid level pressure)
- 4) πίεση στην επιφάνεια (surface pressure)
- 5) σχετική υγρασία
- 6) θερμοκρασία αέρα
- 7) ταχύτητα αέρα σε δύο διευθύνσεις

Για τη δημιουργία των κατακόρυφων προφίλ χρησιμοποιήθηκε το ύψος στο μέσο του στρώματος για τον καθορισμό του ύψους των επιπέδων. Η κατακόρυφη ταχύτητα πίεσης χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των κατακόρυφων κινήσεων στην ατμόσφαιρα και της μεγάλης κλίμακας κατολίσθησης (large scale subsidence) η οποία δημιουργείται από την αντικυκλωνική κυκλοφορία και εισάγεται στην αρχικοποίηση του μοντέλου με την κατακόρυφη συνιστώσα (w) του ανέμου. Η τιμή της w , που παρέχεται από το MERRA-2 σε hPa/s και η μετατροπή της σε μονάδες m/s έγινε με την χρήση της εξίσωσης υδροστατικής ισορροπίας, χρησιμοποιώντας τιμές 1.2 kg/m^3 για την πυκνότητα του αέρα και 9.8 m/s^2 για την επιτάχυνση της βαρύτητας (g). Για τα εκάστοτε επίπεδα, έγινε υπολογισμός του σημείου δρόσου με χρήση της εξίσωσης του Bolton (1980)

$$e_s(T) = 6.112 \exp\left(\frac{17.67 T_C}{T_C + 243.5}\right) \quad (3.1.1)$$

η οποία κάνει χρήση της σχετικής υγρασίας και της θερμοκρασίας (σε βαθμούς °C) (από τη βάση δεδομένων MERRA-2). Από τις οριζόντιες διευθύνσεις του ανέμου υπολογίστηκε η συνισταμένη ταχύτητά του, το μέτρο και η διεύθυνσή της. Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκαν τελικά τα κατακόρυφα προφίλ θερμοκρασίας, πίεσης, σχετικής υγρασίας, σημείο δρόσου, ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στα προφίλ αυτά εφαρμόστηκε γραμμική παρεμβολή, μεταξύ των επιπέδων του πλέγματος των δεδομένων MERRA-2, προκειμένου να αυξηθεί η πυκνότητα των κατακόρυφων επιπέδων, καθώς το αρχικό πλέγμα ήταν αρκετά αραιό (Σχήμα 3.10) και δεν επέτρεπε την αρχικοποίηση του μοντέλου. Για την παρεμβολή της πίεσης μεταξύ των πλεγματικών σημείων χρησιμοποιήθηκε ο τύπος της εκθετικά μειούμενης πίεσης με το ύψος για ένα ισόθερμο στρώμα μέσης θερμοκρασίας \bar{T} (Εξίσωση 3.1.2)

$$P_{level} = P_{level-1} \exp\left\{-\frac{g}{R_d \bar{T}} (z_{level} - z_{level-1})\right\} \quad (3.1.2)$$

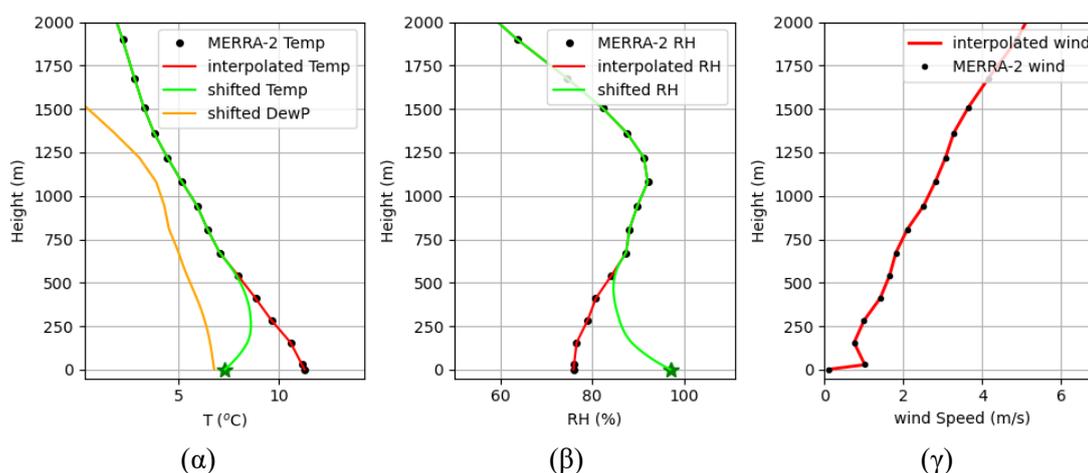
Τα δεδομένα επανάλυσης MERRA-2 αντλήθηκαν για ένα μεμονωμένο πλεγματικό σημείο, μία μεμονωμένη κυψελίδα, της οποίας το κέντρο έχει συντεταγμένες 39.5 °N και 20.625 °E, με υψόμετρο πρώτου επιπέδου 508.5 m και η οποία περιέχει το λεκανοπέδιο και την πόλη των Ιωαννίνων. Η κυψελίδα αυτή επιλέχθηκε εξαιτίας της μικρότερης απόστασής της από το Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων (39.62°N 20.83°E) σε σχέση με τα υπόλοιπες κοντινές κυψελίδες της βάσης δεδομένων MERRA-2. Το κέντρο της εν λόγω κυψελίδας απέχει περίπου 20 km (οριζόντια απόσταση) από το Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων. Η απόσταση αυτή δεν παύει να είναι σχετικά μεγάλη και να οδηγεί σε σημαντικές αποκλίσεις της θερμοκρασίας και της υγρασίας, ιδιαίτερα στο εσωτερικό του επιφανειακού και του οριακού στρώματος. Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, προσαρμόστηκε το ατμοσφαιρικό προφίλ της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του επιφανειακού και οριακού στρώματος (0–500 m) του MERRA-2 να συγκλίνει στις μετρούμενες τιμές του Μετεωρολογικού Σταθμού του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων στα 2 m, έτσι ώστε στα 2 m χρησιμοποιήθηκε η μετρούμενη τιμή, ενώ για τα υπόλοιπα ύψη πάνω των 500 m διατηρήθηκε το ατμοσφαιρικό προφίλ των δεδομένων MERRA-2. Η προσαρμογή αυτή πραγματοποιήθηκε με χρήση μια συνεχούς εκθετικής συνάρτησης βάρους ως προς το ύψος, η οποία στα 2 m συγκλίνει στις μετρήσεις του σταθμού, ενώ στα μεγαλύτερα ύψη τείνει στις αρχικές τιμές του MERRA-2. Η συνάρτηση αυτή φαίνεται παρακάτω:

$$f(z) = f_{station} \exp\left(-\frac{z}{H}\right) + f_{MERRA} \left(1 - \exp\left(-\frac{z}{H}\right)\right) \quad (3.1.3)$$

όπου $f_{station}$ η τιμή της συνάρτησης (θερμοκρασίας ή υγρασίας) στα 2 m, f_{MERRA} η τιμή της συνάρτησης στο μεγαλύτερο ύψος διόρθωσης των δεδομένων MERRA-2 και H το μεγαλύτερο ύψος διόρθωσης.

Η παραπάνω μέθοδος εφαρμόστηκε αποκλειστικά για τη δημιουργία των προφίλ θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, από τα οποία υπολογίστηκε και το προφίλ του σημείου δρόσου. Αντίθετα, η προσαρμογή αυτή δεν εφαρμόστηκε για την ταχύτητα του

ανέμου, διότι δεν υπήρχαν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των μετρήσεων στην επιφάνεια και των δεδομένων του MERRA-2, καθώς ήταν αρκετά ασθενής στην επιφάνεια. Στο Σχήμα 3.10 παρουσιάζονται τα αρχικά ατμοσφαιρικά προφίλ θερμοκρασίας, υγρασίας και ταχύτητας του ανέμου, του MERRA-2, καθώς και τα αντίστοιχα προσαρμοσμένα βάσει της μεθοδολογίας που προαναφέρθηκε. Οι μαύρες κουκίδες αντιστοιχούν στα πρωτογενή (σημειακά καθ' ύψος) δεδομένα του MERRA-2, η κόκκινη γραμμή στην εφαρμοσθείσα γραμμική παρεμβολή στα σημεία, για την αύξηση της πυκνότητας των σημείων, ενώ με πράσινο χρώμα δίνονται τα τελικά προφίλ θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας μετά την δράση της συνάρτησης βάρους. Επιπλέον στο σχήμα 3.10α παρουσιάζεται με πορτοκαλί καμπύλη η κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας σημείου δρόσου που υπολογίστηκε με τη χρήση της Εξίσωσης 3.1. Η προσαρμογή στο προφίλ της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας είναι μεγαλύτερες στην επιφάνεια. Η διαφορά της θερμοκρασίας στα δύο μέτρα, μεταξύ του προφίλ MERRA και της μέτρησης από τον σταθμό είναι κοντά στους 4-5 °C με τα δεδομένα του MERRA να την υπερεκτιμάνε, ενώ η σχετική υγρασία στα δύο μέτρα υποεκτιμάται κατά περίπου 20%. Καθώς μεταβαίνουμε σε μεγαλύτερα ύψη οι διαφορές μειώνονται έως ότου μηδενιστούν. Σημειώνεται ότι τα προφίλ των παραμέτρων αυτών, θερμοκρασίας, υγρασίας και ανέμου, αναφέρονται στην αρχικοποίηση των μοντέλων, δηλαδή στις 16/12/2020 και 18:00 UTC, ενώ έχουν δημιουργηθεί και άλλα αντίστοιχα για διαφορετικές χρονικές στιγμές αρχικοποίησης, τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί στις μελέτες ευαισθησίας του χρόνου εκκίνησης (Ενότητα 4.1.11). Είναι σημαντικό να τονιστεί πως τα προφίλ αυτά δεν προέρχονται από πραγματικές μετρήσεις αλλά είναι μια εκτίμηση για την επικρατούσα κατάσταση της ατμόσφαιρας εκείνη την χρονική στιγμή. Εξαιτίας αυτού επιφέρουν αβεβαιότητες στις προσομοιώσεις του μοντέλου και για αυτό έχει πραγματοποιηθεί μια μελέτη ευαισθησίας που αφορά την μεταβολή της θερμοκρασίας του κατακόρυφου προφίλ της ατμόσφαιρας (Ενότητα 4.1.1)



Σχήμα 3.10 Κατακόρυφα προφίλ: (α) θερμοκρασίας και σημείου δρόσου, (β) σχετικής υγρασίας και (γ) ταχύτητας ανέμου. Με μαύρες κουκίδες συμβολίζονται τα πρωτογενή δεδομένα MERRA-2, με κόκκινη η γραμμική παρεμβολή στα σημεία αυτά και με πράσινο τα τελικά προσαρμοσμένα προφίλ στις μετρήσεις επιφανείας/εδάφους.

Εκτός από τα προφίλ της ατμόσφαιρας είναι απαραίτητος για την αρχικοποίηση του μοντέλου ομίγλης και ο καθορισμός της θερμοκρασίας και υγρασίας του εδάφους και υπεδάφους. Έτσι, εκτός από τη χρήση των δεδομένων MERRA-2 και των

μετεωρολογικών δεδομένων/μετρήσεων εδάφους-αέρα (στα 2 m) του Μετεωρολογικού Σταθμού του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, έγινε χρήση και δεδομένων θερμοκρασίας εδάφους και υπεδάφους από τον ίδιο Σταθμό. Χρησιμοποιήθηκαν διαθέσιμα δεδομένα θερμοκρασίας στην επιφάνεια του εδάφους (skin surface temperature) και σε βάθη 0.1, 0.2, 0.3 και 0,6 m από την επιφάνεια. Όσο αφορά στην υγρασία του υπεδάφους, αυτή δεν παρέχεται από μετρήσεις του Σταθμού, οπότε η αρχικοποίηση του μοντέλου γίνεται χωρίς τέτοιο προφίλ. Σε αυτήν την περίπτωση, όπως προβλέπεται από το μοντέλο, η εισαγωγή της υγρασίας του υπεδάφους γίνεται μέσω μιας (εσωτερικής) μεταβλητής του μοντέλου, η οποία ρυθμίζεται από το χρήστη. Από αυτή τη μεταβλητή εισάγεται από το χρήστη (βλέπε Ενότητα 4.1) το ποσοστό υγρασίας στο υπέδαφος, από το οποίο γίνεται μια εκτίμηση της ογκομετρικής περιεχόμενης υγρασίας υπεδάφους σε m^3/m^3 (όγκος νερού προς τον όγκο εδάφους) , για κάθε επίπεδο του μοντέλου. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα η υγρασία του εδάφους δεν παρέχεται από μετρήσεις για αυτό έχει πραγματοποιηθεί μία μελέτη ευαισθησίας αναφορικά με αυτή (Ενότητα 4.1.7) Τέλος, οι προσομοιώσεις έχουν γίνει με εισαγωγή βλάστησης, η οποία θεωρήθηκε ως γρασίδι, με τις ιδιότητές του να αναγράφονται στο Πίνακα 3.2 και το έδαφος θεωρείται ως .

Πίνακας 3.2 Δεδομένα εισόδου στο μοντέλο για τη βλάστηση.

Ύψος φυλλώματος (m)	0.10
Παράγοντας προστασίας (Shielding Factor)	0.85
Δείκτης επιφάνειας φυλλώματος (Leaf area index)	2.00
Λευκαύγεια βλάστησης	0.20
Μέγιστη αποθήκη νερού στο φύλλωμα ($Kg\ m^{-2}$)	0.20
Αρχική τιμή (υγρού) νερού στο φύλλωμα ($Kg\ m^{-2}$)	0.00
Ελάχιστη αντίσταση στομάτων ($s\ m^{-1}$)	200.00
Παράγοντας εποχιακής ανάπτυξης	3.0

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των μοντέλων έγινε με χρήση διαθέσιμων δεδομένων από το Μετεωρολογικό Σταθμό του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα θερμοκρασίας εδάφους-αέρα και σχετικής υγρασίας, στα 2m, τα οποία καταγράφονται ανά δεκαπέντε λεπτά, εισερχόμενης στην επιφάνεια ηλιακής ακτινοβολίας (Surface Solar Radiation, SSR), κατερχόμενης στο έδαφος υπέρυθρης ακτινοβολία (Surface Infrared Radiation, SIR), με περίοδο καταγραφής πέντε λεπτών, και θερμοκρασίας στην επιφάνεια του εδάφους ανά μισή ώρα. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν και METARs με χρονική ανάλυση ανά μισή ώρα και μετρήσεις ορατότητας χρονική ανάλυση ανά τρεις ώρες και διακριτική ικανότητα 100 m, από το αεροδρόμιο των Ιωαννίνων, τα οποία παρείχαν την πληροφορία εμφάνισης της ομίχλης και την ώρα διάλυσής της. Τα παραπάνω δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων του μοντέλου για τις ίδιες μεταβλητές και για την ώρα διάλυσης της ομίχλης.

Κεφάλαιο 4^ο

Αποτελέσματα

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εργασίας, τα οποία αναπτύσσονται σε δύο ενότητες. Η πρώτη ενότητα αφορά στη διενέργεια δοκιμών ευαισθησίας (sensitivity tests) για βασικές παραμέτρους και δεδομένα εισαγωγής των μοντέλων. Στόχος αυτής της διαδικασίας είναι αφενός η καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας και της συμπεριφοράς του μοντέλου, και αφετέρου η αξιολόγηση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων του. Στη δεύτερη ενότητα παρουσιάζονται τα κύρια αποτελέσματα της εργασίας, που αφορούν στη διερεύνηση των πιθανών επιπτώσεων που έχουν τα αερολύματα καύσης βιομάζας στο σχηματισμό και στις βασικές ιδιότητες της ομίχλης.¶

Τα αποτελέσματα που ακολουθούν αναφέρονται στο τριήμερο επεισόδιο ομίχλης ακτινοβολίας και αιθαλομίχλης που σημειώθηκε στο λεκανοπέδιο των Ιωαννίνων από τις 17 έως τις 19 Δεκεμβρίου 2020. Το επεισόδιο αυτό επιλέχθηκε καθώς ήταν το μοναδικό που διήρκησε 3ημέρες στις οποίες συνυπήρχαν ομίχλη και αιθαλομίχλη καθώς για αυτή την διάρκεια μπορούμε να ελέγξουμε την ποιότητα των αποτελεσμάτων για μεγάλους χρόνους προσομοίωσης, οι οποίοι ξεπερνούν τη μία ημέρα.

4.1 Μελέτες ευαισθησίας

Στις μελέτες ευαισθησίας ενός αριθμητικού μοντέλου είναι σημαντική η δημιουργία μιας προσομοίωσης ελέγχου (Control run), η οποία χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για τις υπόλοιπες προσομοιώσεις. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιούμε δύο προσομοιώσεις ελέγχου. Μία για το μοντέλο παραμετροποιημένης μικροφυσικής PaFog και μία για το μοντέλο πλήρους μικροφυσικής MiFog.

Η χρήση δύο προσομοιώσεων ελέγχου γίνεται για λόγους εξοικονόμησης χρόνου. Το MiFog χρειάζεται περίπου σαράντα πέντε λεπτά υπολογιστικού χρόνου για την προσομοίωση τριών ημερών, ενώ το PaFog για την ίδια προσομοίωση χρειάζεται μόνο δέκα δευτερόλεπτα. Όπως φαίνεται, η διαφορά στον υπολογιστικό χρόνο είναι αρκετά μεγάλη. Αυτή γίνεται ακόμα μεγαλύτερη για εφαρμογές μεγαλύτερης κλίμακας π.χ. προσομοίωση σε περισσότερα σημεία ή σύζευξη με κάποιο τρισδιάστατο προγνωστικό μοντέλο. Αυτή δημιουργείται κυρίως εξαιτίας του διαφορετικού σχήματος μικροφυσικής που έχουν τα δύο μοντέλα, καθώς το MiFog κάνει υπολογισμούς για μια δυσδιάστατη κατανομή σωματιδίων (αερολυμάτων και σταγόνων) ενώ το PaFog χρησιμοποιεί μόνο μία μονοδιάστατη κατανομή σταγόνων και αριθμητική συγκέντρωση αερολυμάτων. Για τη μείωση του υπολογιστικού χρόνου μερικοί έλεγχοι ευαισθησίας σε παραμέτρους οι οποίες δεν επηρεάζουν άμεσα το σχήμα μικροφυσικής πραγματοποιήθηκαν με το PaFog, δεδομένου ότι αυτές οι παράμετροι και οι διεργασίες στις οποίες εμπλέκονται είναι κοινές και στα δύο μοντέλα.

Εκτός από τα κατακόρυφα ατμοσφαιρικά προφίλ (θερμοκρασίας, θερμοκρασίας σημείου δρόσου και υγρασίας, Σχήμα 3.10) και τις μετρήσεις του μετεωρολογικού σταθμού που χρησιμοποιήθηκαν (θερμοκρασία και σχετική υγρασία στα 2m,

θερμοκρασίας εδάφους και υπεδάφους, Πίνακας 3.1), είναι αναγκαίο να αναφερθούν και να περιγράψουν άλλες σημαντικές παράμετροι αρχικοποίησης των μοντέλων, που διαδραματίζουν σημαντικότατο ρόλο στην εξέλιξη των προσομοιώσεων και φαίνονται στο Παράρτημα Γ (Σχήμα Π.Γ.1). Αυτές είναι:

- 1) ανέφελος συνθήκες
- 2) ύψος κατακόρυφης ανάμιξης (ή ύψος στρώματος ανάμιξης): 300 m
- 3) κατακόρυφη ταχύτητα ανέμου: -3 mm/s
- 4) είδος/τύπος αερολυμάτων: υπαίθρια
- 5) είδος/τύπος εδάφους: ιλυώδης άργιλος με γρασίδι ύψους 10 cm
- 6) υγρασία υπεδάφους 50%

Τα νέφη και ιδιαίτερα αυτά που βρίσκονται σε χαμηλά ύψη επηρεάζουν σημαντικά την εξέλιξη ενός επεισοδίου ομίχλης ακτινοβολίας καθώς εκπέμπουν υπέρυθρη ακτινοβολία στο έδαφος επηρεάζοντας σημαντικά τη θερμοκρασία στα κατώτερα ατμοσφαιρικά στρώματα, όπου σχηματίζεται η ομίχλη. Για τη δική μας περίπτωση υποθέσαμε και επιβάλαμε στο μοντέλο ανέφελος συνθήκες καθ' όλη την διάρκεια των τριών ημερών. Λόγω απουσίας σχετικής πληροφορίας από άλλη πηγή, η ύπαρξη νεφών και το ύψος κορυφής τους ελέγχθηκαν μέσω εικόνων οι οποίες παρέχονται από το δορυφόρο METEOSAT (<https://view.eumetsat.int/>, τελευταία προβολή 30 Οκτωβρίου, 2025). Αυτές έδειξαν πως γενικά, κατά τη διάρκεια της περιόδου προσομοίωσης, επικρατούσαν ανέφελος συνθήκες πάνω από το λεκανοπέδιο των Ιωαννίνων, με την ύπαρξη μερικών υψηλών (cirrus) νεφών τις βραδινές ώρες μεταξύ 18 και 19 Δεκεμβρίου 2020 (Παράρτημα Α, σχήμα Π.Α.1).

Το ύψος κατακόρυφης ανάμιξης (ή ύψος ανάμιξης) επιλέχθηκε στα 300 m. Αυτό το ύψος εξήχθη από τη μέγιστη τιμή της θερμοκρασιακής αναστροφής η οποία παρατηρείται στο κατακόρυφο προφίλ της θερμοκρασίας (Σχήμα 3.10α). Φυσικά, το ύψος αυτό δεν είναι το πραγματικό, διότι βασίζεται απλώς στην εκτίμηση του θερμοκρασιακού προφίλ και για το λόγο αυτόν παρακάτω πραγματοποιείται μια μελέτη ευαισθησίας για την επίδραση της παραμέτρου αυτής στα αποτελέσματα του μοντέλου. Μετρήσεις με LIDAR, στα Ιωάννινα, έχουν δείξει πως το ύψος του οριακού στρώματος κυμαίνεται από περίπου 500 έως 800 m (Papanikolaou et al., 2022). Γενικά το οριακό στρώμα δεν είναι σταθερό στη διάρκεια της ημέρα και εξαρτάται από την τοπογραφία αλλά και τις συνοπτικές συνθήκες που επικρατούν την εκάστοτε στιγμή (Stull, 2012)

Η επιλογή του ύψους κατακόρυφης ανάμιξης επηρεάζει, επίσης, και άλλες δύο παραμέτρους, το φορτίο των αερολυμάτων και την κατακόρυφη ταχύτητα ανέμου. Βάσει της αρχικοποίησης του μοντέλου, τα αερολύματα από το έδαφος μέχρι το ύψος κατακόρυφης ανάμιξης έχουν την ίδια συγκέντρωση, ενώ πάνω από αυτό η συγκέντρωσή τους μειώνεται κατά 50% (η τιμή αυτή μπορεί να αλλαχθεί από τον χρήστη, στις παρούσες προσομοιώσεις διατηρήσαμε την μείωση της συγκέντρωσης των αερολυμάτων στο 50%. Η κατακόρυφη ταχύτητα ανέμου έχει σταθερή τιμή ίση με -3.0 mm/s (αρχική τιμή) από την κορυφή του μοντέλου (2000 m) έως και το ύψος κατακόρυφης ανάμιξης. Από το ύψος αυτό και έως το έδαφος η κατακόρυφη ταχύτητα μειώνεται γραμμικά μέχρι να μηδενιστεί στο έδαφος. Αυτό το προφίλ της κατακόρυφης ταχύτητας παραμένει αναλλοίωτο καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης.

Τα αερολύματα που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις είναι υπαίθριου (αγροτικού) τύπου (rural). Χρησιμοποιήθηκε αυτός ο τύπος, καθώς υποθέσαμε αρχικά

ότι ήταν ο καταλληλότερος, αφού το Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων όπου πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις δεν βρίσκεται στο κέντρο της πόλης αλλά στα περίχωρά της. Φυσικά, γνωρίζουμε ότι για τις ημέρες προσομοίωσης οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων ήταν αυξημένες στο κέντρο της πόλης (Περιβαλλοντικός σταθμός) όπου πραγματοποιούνται οι αντίστοιχες μετρήσεις. Στην περιοχή του Πανεπιστημίου δεν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις αιωρούμενων σωματιδίων, οπότε πραγματοποιείται μια μελέτη ευαισθησίας στον τύπο των αερολυμάτων (Ενότητα 4.1.8)

Ως τύπος εδάφους επιλέχθηκε ο ιλυώδης άργιλος με γρασίδι 10 cm. Αυτός ο τύπος ήταν προεπιλεγμένος στο μοντέλο, ενώ δε βρέθηκαν δεδομένα για το είδος του εδάφους του λεκανοπεδίου και επιπλέον είναι εκτός του θέματος της παρούσας εργασίας η διερεύνηση της επίδρασης του διαφορετικού τύπου εδάφους στην ομίχλη. Παρόλα αυτά, έγινε και παρουσιάζεται παρακάτω μελέτη ευαισθησίας για το είδος του εδάφους. Επιπλέον, η θερμοκρασία του υπεδάφους εισήχθη, από μετρήσεις υπεδάφους του Σταθμού του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, για βάθη: 0.1, 0.2, 0.3 και 0,6 m από την επιφάνεια. Οι θερμοκρασίες αυτές ήταν, αντίστοιχα, ίσες με: 283.55, 284.15, 284.35 και 285.55 K. Τέλος, η ογκομετρική υγρασία του υπεδάφους, καθώς δεν υπάρχουν μετρήσεις, επιλέχθηκε στο 50% (όγκος νερού προς τον συνολικό όγκο εδάφους, m^3/m^3). Αυτό το ποσοστό υποδηλώνει πως το έδαφος ήταν σε μια μέση κατάσταση ανάμεσα στο απολύτως ξηρό (0%) και το απολύτως υγρό (100%). Για τις παραπάνω μεταβλητές (εκτός των νεφών) έγιναν μελέτες ευαισθησίας οι οποίες φαίνονται παρακάτω.

Επισημαίνεται ότι στις μελέτες ευαισθησίας που εκτελέστηκαν και παρουσιάζονται η ανάλυση επικεντρώνεται κυρίως στην πρώτη ημέρα των προσομοιώσεων καθώς το μοντέλο δεν τροφοδοτείται με καινούργια δεδομένα (nudging) για να γίνει προσαρμογή των δυναμικών παραμέτρων σε μετρούμενες τιμές, έτσι με την πάροδο του χρόνου τα αποτελέσματα αρχίζουν ολοένα και περισσότερο να αποκλίνουν από τις πραγματικές τιμές

4.1.1 Προσομοίωση ελέγχου PaFog και MiFog

Στα Σχήματα 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3 και 4.1.4 φαίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ελέγχου για το PaFog και MiFog. Τα αποτελέσματα αφορούν στις σημαντικότερες μετεωρολογικές παραμέτρους (Σχήματα 4.1.1, 4.1.3) και στις βασικές ιδιότητες της ομίχλης (Σχήματα 4.1.2, 4.1.4) για την περίπτωση μελέτης, δηλαδή από τις 18:00 UTC της 16/12/2020 έως τις 18:00 UTC της 19/12/2020. Στα σχήματα παρουσιάζεται και η σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τις μετρήσεις από το Μετεωρολογικό Σταθμό του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Για την πρώτη μέρα μελέτης παρατηρούμε το επιφανειακό στρώμα (θερμοκρασία εδάφους-αέρα, στα 2m) να ψύχεται τη νύχτα, με τη παρατηρούμενη θερμοκρασία να φτάνει τους 274 K στις 03:00UTC της 17/12/2020 (Σχήματα 4.1.1α και 4.1.3α). Μετά την ανατολή του Ήλιου, λόγω της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος, αυτό, όπως και το υπερκείμενο επιφανειακό στρώμα του ατμοσφαιρικού αέρα, θερμαίνεται σταδιακά, φτάνοντας τελικά στη μέγιστη ημερήσια μετρούμενη θερμοκρασία (285.5 K) στις 13:00-14:00 UTC της 17/12/2020. Παρατηρούμε, όπως

αναμένεται, ότι το μέγιστο της θερμοκρασίας δε συμπίπτει χρονικά με το μέγιστο της ηλιακής ακτινοβολίας, το οποίο παρατηρείται στις 11:00 UTC, με τη χρονική αυτή υστέρηση να οφείλεται στη θερμική αδράνεια του εδάφους και κυρίως της ατμόσφαιρας (οφειλόμενη στην πολύ μικρή θερμική αγωγιμότητα του αέρα). Τόσο στις 17/12/2020 όσο και στις επόμενες δύο ημέρες φαίνεται πως η θερμοκρασία που κατέγραψε ο μετεωρολογικός σταθμός συσχετίζεται ικανοποιητικά με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Έτσι, για παράδειγμα, τη δεύτερη ημέρα η μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία φτάνει τα 250 W m^{-2} , έναντι 425 W m^{-2} την πρώτη και 450 W m^{-2} την τρίτη ημέρα, με αποτέλεσμα η μέγιστη θερμοκρασία να φτάσει στις 18/12/2020 τους 280 K, έναντι 285 K την τρίτη. Η λιγότερη ηλιακή ακτινοβολία στις 18/12/2020 έναντι των άλλων δύο ημερών οφείλεται στην μη διάλυση της ομίχλης κατά τις μεσημεριανές ώρες, καθώς όπως φαίνεται από τα METARs (γκρι περιοχές των σχημάτων) αυτή διήρκησε όλη την ημέρα προκαλώντας μεγαλύτερη εξασθένησή της. Επιπλέον, η ελάχιστη θερμοκρασία, η οποία εμφανίζεται τις πρώτες πρωινές ώρες, είναι γνωστό ότι, εκτός των άλλων παραγόντων, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα και τα νέφη, επηρεάζεται από την εισερχόμενη υπέρυθρη ακτινοβολία. Έτσι, φαίνεται μια διαφορά περίπου 2 K μεταξύ των ελαχίστων θερμοκρασιών της δεύτερης (18/12) και της τρίτης (19/12) ημέρας, η οποία οφείλεται εν μέρει στα αυξημένα ποσά υπέρυθρης ακτινοβολίας μεταξύ των δύο ημερών καθώς το βράδυ της δεύτερης ημέρας (18/12 προς 19/12) η υπέρυθρη ακτινοβολία είχε ποσά επί των πλείστων μεγαλύτερα των 330 W m^{-2} έναντι της προηγούμενης νύχτας όπου η υπέρυθρη ακτινοβολία κυμαινόταν γύρω από τα 310 W m^{-2} . Βέβαια, το σημαντικότερο ρόλο παίζει πιθανότατα η ύπαρξη περισσότερων νεφών την τρίτη από ό,τι τη δεύτερη ημέρα (Σχήμα Π.Α.1). Μάλιστα, είναι χαρακτηριστικό ότι η παρουσία νεφών τη νύχτα της 19/12/2020, ήδη από τις 00:00 UTC, συγκρατεί τη θερμοκρασία σε περίπου σταθερά επίπεδα καθ' όλη τη διάρκεια της νύχτας, αποτρέποντας τη σταδιακή μείωσή της με το χρόνο (λόγω εκπομπής υπέρυθρης ακτινοβολίας και ψύξης του εδάφους), όπως έγινε τις προηγούμενες 2 ημέρες κατά τις νύχτες των οποίων δεν υπήρχαν νέφη. Η σχετική υγρασία διατηρείται τον περισσότερο χρόνο κοντά στο 100%, με εξαίρεση τις μεσημβρινές ώρες, όταν μειώνεται εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας, έως και 75, 98 και 82.5 %, αντίστοιχα στις τρεις ημέρες. Τη δεύτερη ημέρα η σχετική υγρασία δεν μειώνεται σημαντικά από το 100% εξαιτίας της μη διάλυσης της ομίχλης και της μη έντονης θέρμανσης του εδάφους και του υπερκείμενου αέρα.

Τέλος, με γκρι χρώμα στα σχήματα υποδεικνύεται η ύπαρξη METARs στα οποία αναφέρεται ομίχλη, για τις ώρες λειτουργίας του αεροδρομίου των Ιωαννίνων. Όπως φαίνεται στα σχήματα, τα METARs υποδεικνύουν ύπαρξη ομίχλης τις ώρες 5:50-10:50 UTC την πρώτη ημέρα (17/12). Τη δεύτερη ημέρα (18/12) η ομίχλη εμφανίζεται πάλι στις 5:50 UTC (αρχή λειτουργίας του αεροδρομίου) ενώ διαρκεί όλη τη διάρκεια του φωτιζόμενου τμήματος της ημέρας, για περισσότερο από 13 ώρες, έως τις 19:20 UTC (κλείσιμο αεροδρομίου). Το πρωί της τρίτης ημέρας (19/12) εμφανίζεται πάλι ομίχλη στις ώρες 5:50-10:50 UTC.

Προσομοίωση ελέγχου PaFog

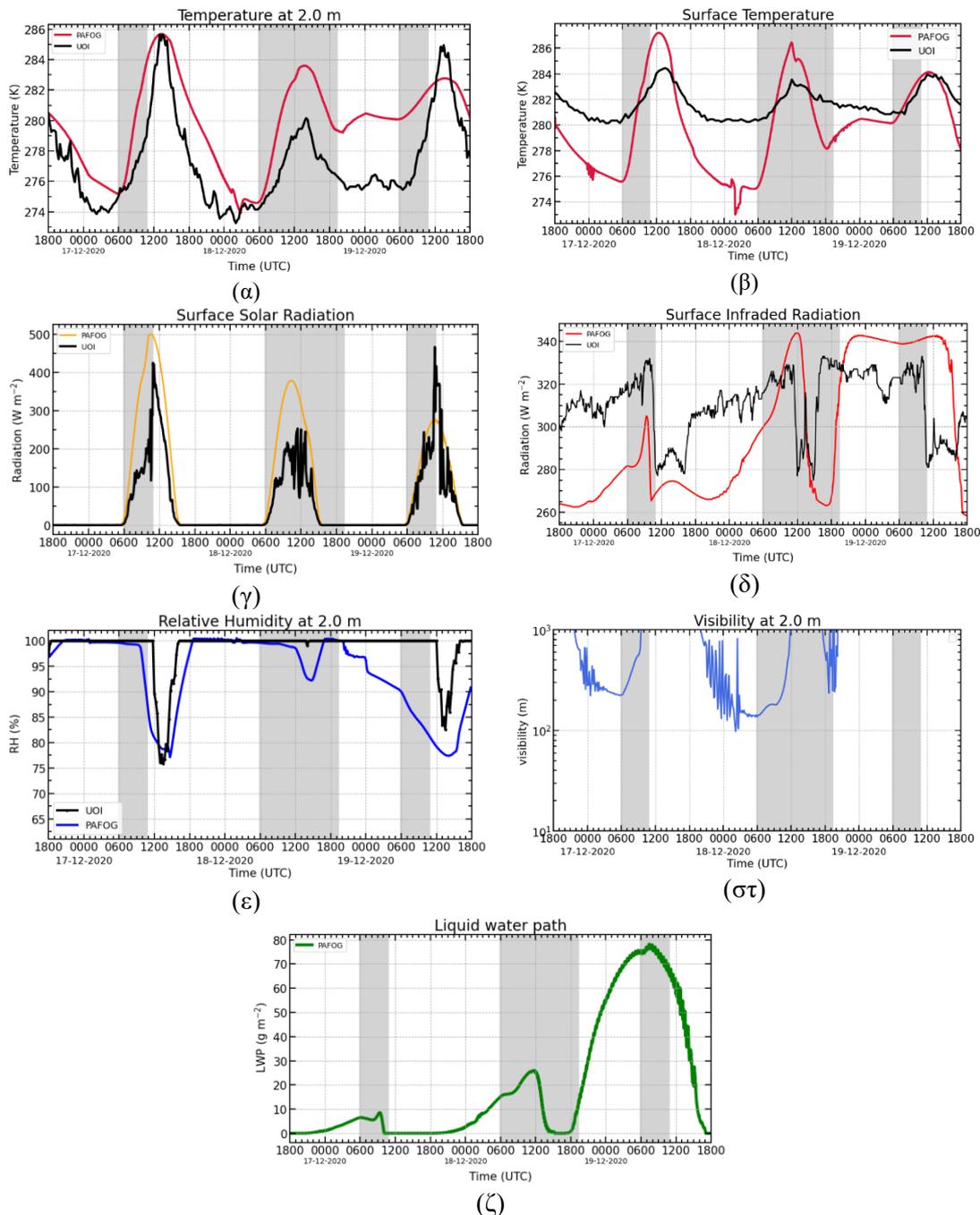
Στ Σχήμα 4.1.1 δίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και η σύγκριση με τις διαθέσιμες μετρήσεις για τις παραμέτρους εδάφους-αέρα, ενώ στο Σχήμα 4.1.2 παρέχονται τα αποτελέσματα του μοντέλου για τις κατακόρυφες διατομές της

ατμόσφαιρας για τη θερμοκρασία και τις βασικές ιδιότητες της ομίχλης. Με χρωματιστές καμπύλες στο Σχήμα 4.1.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ελέγχου του PaFog ενώ με μαύρες καμπύλες φαίνονται οι μετρήσεις του μετεωρολογικού Σταθμού. Επισημαίνεται ότι η συζήτηση των ευρημάτων εστιάζεται κυρίως στην πρώτη ημέρα της προσομοίωσης, για τους λόγους που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

Στο Σχήμα 4.1.1α φαίνεται η θερμοκρασία εδάφους-αέρα (στα δύο μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους). Γενικά, παρά το γεγονός ότι το μοντέλο PaFog προσομοιώνει ικανοποιητικά τη θερμοκρασία εδάφους-αέρα, παρατηρείται ότι την υπερεκτιμά ελαφρώς την πρώτη ημέρα. Πιο συγκεκριμένα, η ελάχιστη θερμοκρασία υπερεκτιμάται κατά 1.5 K. Αντίθετα, η μέγιστη θερμοκρασία συμπίπτει με τις μετρήσεις. Παρόλα αυτά, φαίνεται ότι υπάρχει υπερεκτίμηση του μοντέλου για το υπόλοιπο της ημέρας, εκτός του μεγίστου. Γενικά, κατά μέσον όρο, την πρώτη ημέρα οι διαφορές στη θερμοκρασία μεταξύ μοντέλου και μετρήσεων έχουν μέση τιμή και μέση τυπική απόκλιση ίση με 1.96 ± 1.25 K. Οι διαφορές μοντέλου PaFog-μετρήσεων είναι μεγαλύτερες για τη θερμοκρασία επιφανείας/εδάφους (Σχήμα 4.1.1β), φτάνοντας έως και τους 4 K, ενώ παρατηρείται μεγαλύτερη υποεκτίμηση την ημέρα και υπερεκτίμηση τη νύχτα. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας των διαφορών μεταξύ μοντέλου-μετρήσεων στην ηλιακή και υπέρυθρη ακτινοβολία. Υπάρχει συμφωνία της μέγιστης ημερήσιας θερμοκρασίας εδάφους-αέρα μεταξύ PaFog και μετρήσεων παρά το γεγονός ότι η μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία του μοντέλου τη στιγμή καταγραφής της μέγιστης θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη κατά 70 W/m^2 από τις μετρήσεις (Σχήμα 4.1.1γ). Βέβαια, διαπιστώνεται ότι η συστηματική υπερεκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας (της 17/12) βρίσκεται σε συμφωνία με την υπερεκτίμηση της θερμοκρασίας εδάφους-αέρα. Αναφορικά με την εισερχόμενη υπέρυθρη ακτινοβολία στο έδαφος (Σχήμα 4.1.1δ) διαπιστώνεται ότι το μοντέλο PaFog την υποεκτιμά σε σχέση με τις μετρήσεις, από 5.8 έως και 63.3 W/m^2 (και κατά 32.8 W/m^2 κατά μέσον όρο) την πρώτη ημέρα. Η υποεκτίμηση αυτή είναι μεγαλύτερη τη νύχτα (35 W/m^2) από ό,τι την ημέρα, ενώ η υποεκτίμησή της την ημέρα είναι μικρότερη από την υπερεκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας, γεγονός που ίσως εξηγεί την υπερεκτίμηση της θερμοκρασίας εδάφους-αέρα (αλλά και του εδάφους). Αντίστοιχα, η σημαντική υποεκτίμηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας τη νύχτα πιθανώς εξηγεί την υποεκτίμηση της ελάχιστης θερμοκρασίας εδάφους κατά 4 K. Σε ό,τι αφορά στη σχετική υγρασία (Σχήμα 4.1.1ε), διατηρείται στο 100% τις νυχτερινές ώρες της πρώτης ημέρας, ενώ προσομοιώνεται επιτυχώς και η πτώση της στο 77.5% κατά τις μεσημβρινές ώρες, έναντι 75% με βάση τις παρατηρήσεις. Στα Σχήματα 4.1.1στ,ζ φαίνονται η ορατότητα και το LWP, όπως προσομοιώθηκαν από το μοντέλο PaFog. Σε αυτά φαίνεται η μείωση της ορατότητας, σε τιμές έως και 200-300 m και η σημαντική αύξηση του LWP, έως και περίπου 10 g/m^2 , τα οποία υποδηλώνουν την δημιουργία/ύπαρξη ομίχλης, η οποία διαλύεται περίπου στις 9:30 UTC.

Την δεύτερα ημέρα προσομοιώνεται επίσης ομίχλη, η οποία την τρίτη μέρα μετατρέπεται σε πυκνό χαμηλό νέφος. Γενικά, τις δύο αυτές ημέρες (δεύτερη και τρίτη) τα αποτελέσματα του μοντέλου PaFog διαφέρουν αρκετά (και περισσότερο από ό,τι την πρώτη ημέρα) από τις παρατηρήσεις. Η θερμοκρασία εδάφους-αέρα γενικώς υπερεκτιμάται εξαιτίας υπερεκτίμησης αφενός της ηλιακής ακτινοβολίας (μεσημέρι 18/12) και αφετέρου της υπέρυθρης ακτινοβολίας (βράδυ 18/12 και 19/12). Εξαιρέση

αποτελεί το μεσημέρι της 19/12 όπου η μετρούμενη ηλιακή ακτινοβολία είναι μεγαλύτερη από αυτή που προβλέπει το μοντέλο με αποτέλεσμα να παρατηρείται μεγαλύτερη μέγιστη θερμοκρασία εδάφους-αέρα. Η υποεκτίμηση της ηλιακής και υπερεκτίμηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας στις 19/12 οφείλεται στην εμφάνιση του πυκνού ($LWP \approx 75 \text{ g/m}^2$) χαμηλού νέφους που προσομοιώνεται όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.1.2.

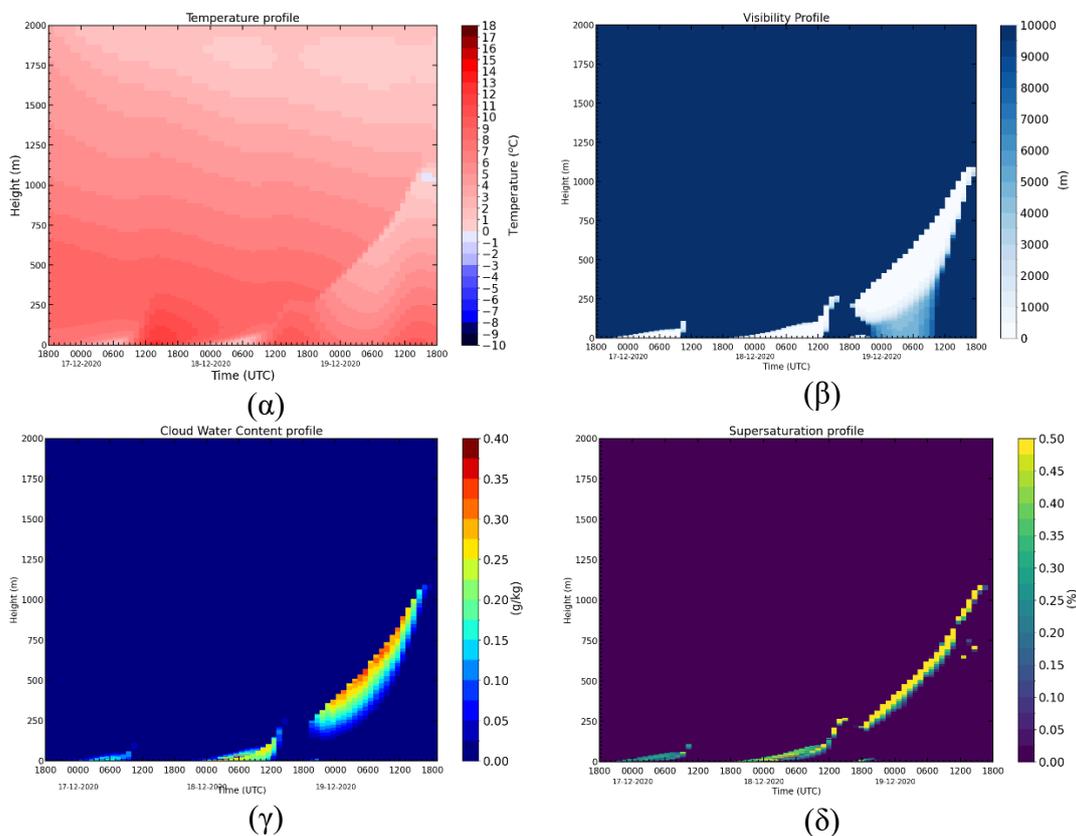


Σχήμα 4.1.1: Χρονική εξέλιξη της προσομοίωσης ελέγχου PaFog (χρωματιστές καμπύλες) και σύγκριση με μετρήσεις του μετεωρολογικού σταθμού (μαύρες καμπύλες) για την περίπτωση επεισοδίου ομίχλης-αιθαλομίχλης την περίοδο 17-19/12/2020. Τα αποτελέσματα του μοντέλου δίνονται για: (α) τη θερμοκρασία στα 2 m, (β) τη θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους, (γ) την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια, (δ) την εισερχόμενη

υπερύθρη ακτινοβολία στην επιφάνεια, (ε) τη σχετική υγρασία, (στ) την ορατότητα στα 2 m και (ζ) το περιεχόμενο νερού υγρής φάσης στην ατμοσφαιρική στήλη (LWP).

Στο Σχήμα 4.1.2 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες τομές της ατμόσφαιρας από τα 0 m (έδαφος) έως τα 2000 m. Όπως φαίνεται από το θερμοκρασιακό προφίλ (Σχήμα 4.1.2α) τις βραδινές ώρες της πρώτης ημέρας, υπό την απουσία της ηλιακής ακτινοβολίας, την απουσία νεφών και την έντονη ψύξη λόγω εκπομπής υπέρυθρης ακτινοβολίας από το έδαφος, δημιουργείται επιφανειακή θερμοκρασιακή αναστροφή με ύψος περίπου 100 m. Μέσα σε αυτό το στρώμα της θερμοκρασιακής αναστροφής δημιουργείται η ομίχλη, με την ορατότητα να μειώνεται κάτω από 1000 m και έως και τα 181 m (Σχήμα 4.1.2β). Η ομίχλη που σχηματίζεται στις 17/12/2020 είναι σχετικά ασθενής, αφού παρατηρούνται σχετικά χαμηλά ποσά CWC (Σχήμα 4.1.2γ) της τάξης 0.1-0.2 g/kg, ενώ ο υπερκορεσμός (σχήμα 4.1.2δ) φτάνει έως 0,25% στο εσωτερικό της ομίχλης, με την ομίχλη να διαλύεται ανάμεσα στις 09:00-10:00 UTC.

Τη δεύτερη ημέρα παρουσιάζεται πάλι επιφανειακή θερμοκρασιακή αναστροφή με παρόμοια χαρακτηριστικά, όμως λίγο πιο έντονη, ενώ η ομίχλη που δημιουργείται είναι πιο παχιά, φτάνοντας έως και τα 125 m και πυκνή, με μεγαλύτερα ποσά CWC και υπερκορεσμού. Παρατηρείται ότι η ομίχλη τη δεύτερη ημέρα (18/12) διατηρείται έως λίγο πιο αργά, έως στις 12:00 UTC, ενώ μετά το μεσημέρι, από τις 12:00 μετατρέπεται σε χαμηλό νέφος, το οποίο διαλύεται στις 17:00 UTC. Τέλος, την τρίτη ημέρα (19/12) η θερμοκρασιακή αναστροφή εμφανίζεται σε μεγαλύτερο ύψος, που φτάνει τα 300 m. Έτσι ευνοείται η δημιουργία κυρίως ενός χαμηλού νέφους, το οποίο με την πάροδο της ημέρας αναπτύσσεται κατακόρυφα, έως και τα 1000 m, μαζί με τη θερμοκρασιακή αναστροφή. Το νέφος αυτό παρουσιάζει υψηλό CWC (έως και 0.4 g/kg) και υπερκορεσμό (έως και 0.5%).



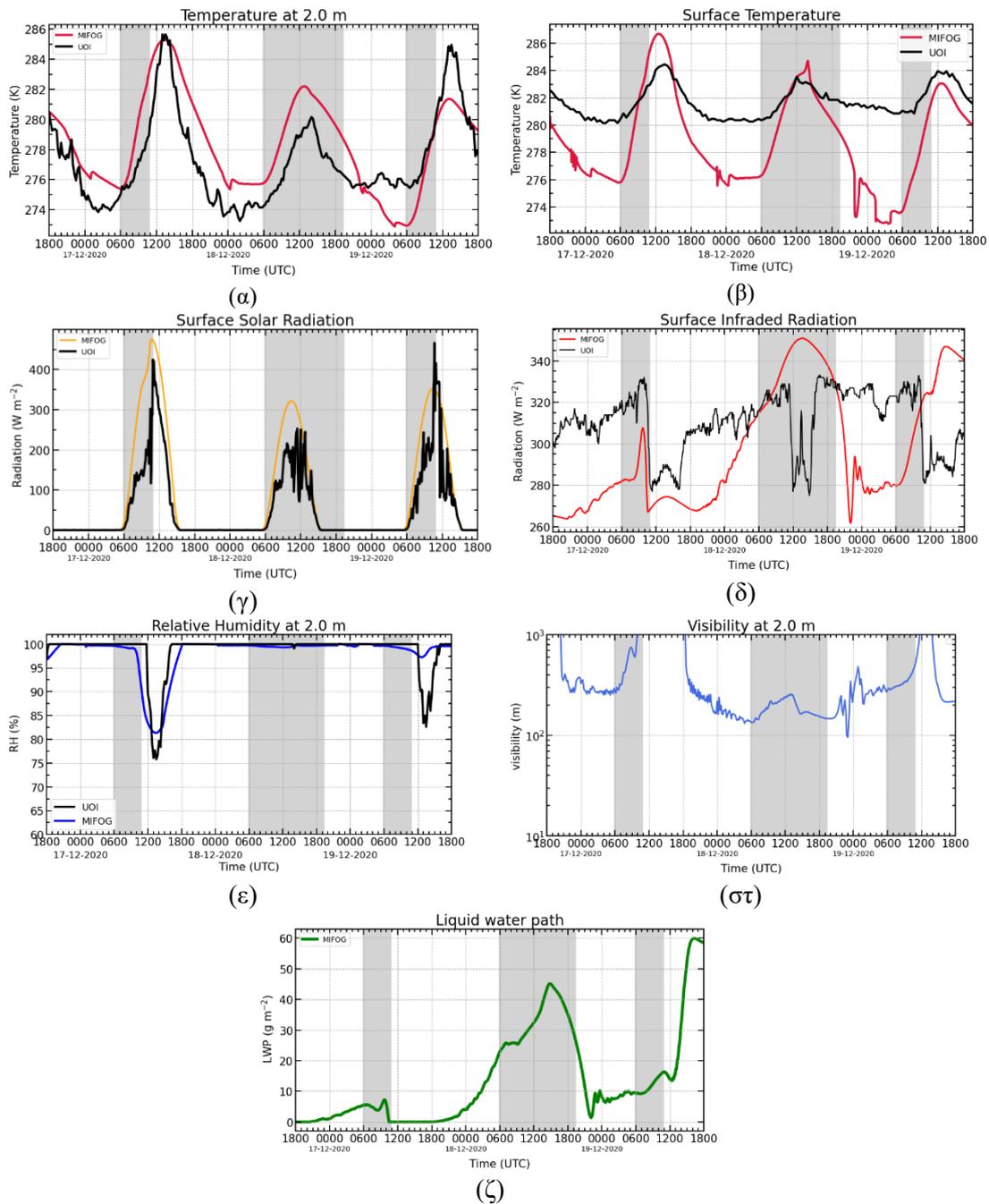
Σχήμα 4.1.2: Χρονική εξέλιξη των κατακόρυφων τομών της ατμόσφαιρας για την προσομοίωση του PaFog. Αποτελέσματα δίνονται για: (α) τη θερμοκρασία, (β) την ορατότητα, (γ) το περιεχόμενο υγρού νερού του νέφους (CWC) και (δ) τον υπερκορεσμό.

Προσομοίωση ελέγχου MiFog

Στα Σχήματα 4.1.3 και 4.1.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ελέγχου του MiFog (χρωματισμένες καμπύλες) μαζί με τις μετρήσεις του μετεωρολογικού Σταθμού (μαύρες καμπύλες), για το έδαφος / δύο μέτρα και για κατακόρυφες διατομές της ατμόσφαιρας, αντίστοιχα. Στη συνέχεια, σε αυτήν υποενότητα, δίνεται περισσότερη έμφαση στις διαφορές των ευρημάτων σε σχέση με αυτά της προσομοίωσης ελέγχου του μοντέλου PaFog.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ελέγχου του MiFog συμφωνούν αρκετά με αυτά του PaFog για την πρώτη ημέρα. Έτσι, για παράδειγμα, παρατηρείται μια υπερεκτίμηση από το MiFog της ελάχιστης θερμοκρασίας εδάφους-αέρα (στα 2 m) κατά 1.5 K και μία σύμπτωση τιμών για τη μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία (Σχήμα 4.1.3α) Γενικά, κατά μέσον όρο, την πρώτη ημέρα οι διαφορές στη θερμοκρασία εδάφους-αέρα, μεταξύ μοντέλου και μετρήσεων έχουν μέση τιμή και μέση τυπική απόκλιση ίση με 1.74 ± 1.14 K, οι οποίες είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές του PaFog. Και πάλι, επίσης, η θερμοκρασία εδάφους υποεκτιμάται τη νύχτα, κατά έως και 4 K, ενώ υπερεκτιμάται την ημέρα, κατά έως και 2 K (Σχήμα 4.1.3β), όπως και στην περίπτωση του PaFog. Η μέγιστη τιμή της ηλιακή ακτινοβολία υπερεκτιμάται και πάλι κατά περίπου 50 W/m^2 , ενώ η υπέρυθρη, κατά την πρώτη ημέρα, υποεκτιμάται με τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της διαφοράς μοντέλου-μετρήσεων να είναι $31.1 \pm 12.3 \text{ W/m}^2$, τιμή πολύ κοντά με την αντίστοιχη από την προσομοίωση του PaFog (Σχήμα 4.1.3γ,δ). Ακόμη, η σχετική υγρασία προσομοιώνεται και πάλι ικανοποιητικά, με τιμές στο 100% κατά τις νυχτερινές ώρες και τιμές στο 82.5% κατά το μεσημέρι της 17/12 (Σχήμα 4.1.3ε), με την πτώση αυτή να προσομοιώνεται καλύτερα από το PaFog. Τέλος, η ορατότητα μειώνεται στα περίπου 300 m, με παράλληλη αύξηση του LWP έως και τα 7.5 g/m^2 , υποδηλώνοντας την ύπαρξη ασθενούς ομίχλης. Η ορατότητα αυξάνεται πάνω από τα 1000 m περίπου στις 10:00 UTC, σηματοδοτώντας και τη διάλυση της ομίχλης. Στην προσομοίωση του MiFog η ομίχλη κατά την πρώτη ημέρα ήταν πιο ασθενής σε σχέση με το PaFog, όμως διαλύθηκε αργότερα.

Τις υπόλοιπες/επόμενες δύο ημέρες τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ελέγχου του MiFog αρχίζουν να αποκλίνουν από εκείνα του PaFog. Η θερμοκρασία εδάφους-αέρα, η ηλιακή ακτινοβολία και η σχετική υγρασία έχουν διακύμανση που συμφωνεί καλύτερα με τις παρατηρήσεις σε σχέση με το PaFog, όμως δεν παύουν να υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις στις μέγιστες και ελάχιστες τιμές. Αντίθετα, η συμφωνία MiFog-μετρήσεων για τη θερμοκρασία εδάφους και την υπέρυθρη ακτινοβολία δε φαίνεται να βελτιώνονται σε σχέση με το PaFog για τη δεύτερη και την τρίτη ημέρα της προσομοίωσης. Τη δεύτερη ημέρα το MiFog εμφανίζει πυκνή ομίχλη, πυκνότερη από το PaFog, με το LWP να φτάνει τα 45 g/m^2 και την ορατότητα να μειώνεται κάτω από 200 m (έναντι 27 g/m^2 και 200-300m, αντίστοιχα). Η πυκνότερη ομίχλη του MiFog τη δεύτερη ημέρα της προσομοίωσης έχει ως αποτέλεσμα και τη μεγαλύτερη εισερχόμενη υπέρυθρη ακτινοβολία στο έδαφος, με τιμές που φτάνουν έως και τα 350 W/m^2 . Μάλιστα, στην περίπτωση του MiFog η ομίχλη διατηρείται και την τρίτη ημέρα της προσομοίωσης, χωρίς να διαλυθεί, όπως στην περίπτωση του PaFog.

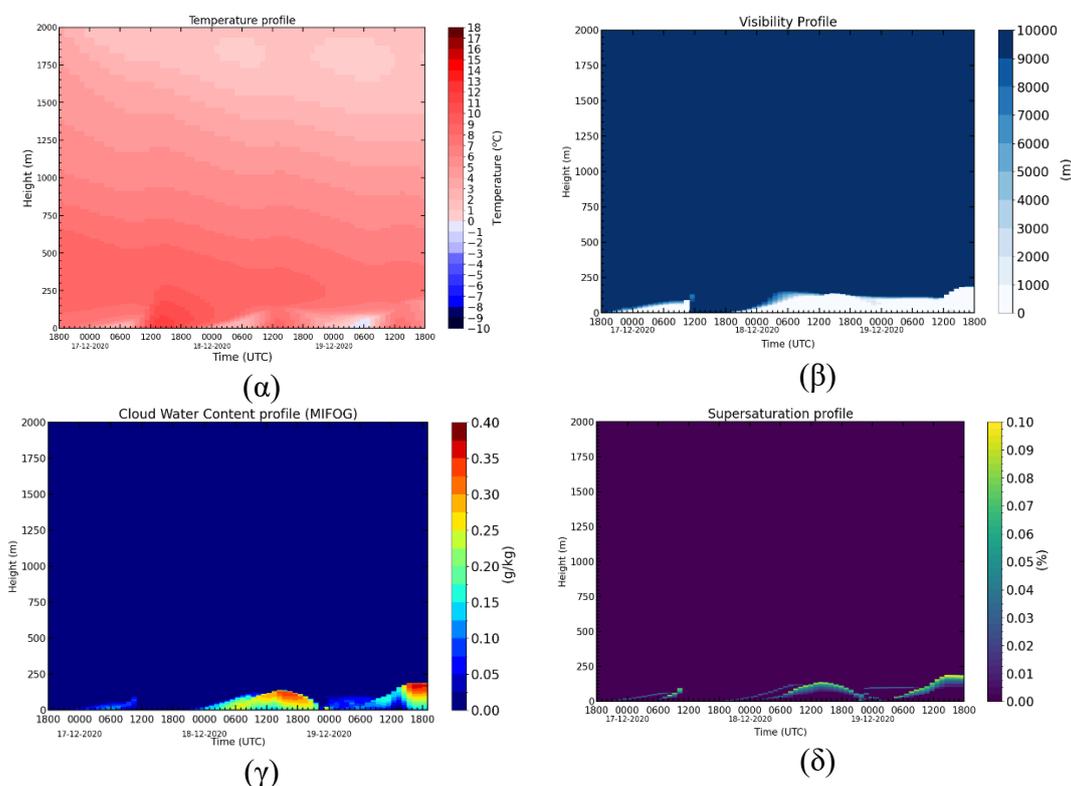


Σχήμα 4.1.3: Χρονική εξέλιξη της προσομοίωσης ελέγχου MiFog (χρωματιστές καμπύλες) και σύγκριση με μετρήσεις του μετεωρολογικού σταθμού (μαύρες καμπύλες) για την περίπτωση επεισοδίου ομίχλης-αιθαλομίχλης την περίοδο 17-19/12/2020. Τα αποτελέσματα του μοντέλου δίνονται για: (α) τη θερμοκρασία στα 2 m, (β) τη θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους, (γ) την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια, (δ) την εισερχόμενη υπέρυθη ακτινοβολία στην επιφάνεια, (ε) τη σχετική υγρασία, (στ) την ορατότητα στα 2 m και (ζ) το περιεχόμενο νερού υγρής φάσης στην ατμοσφαιρική στήλη (LWP).

Στο Σχήμα 4.1.4 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες τομές της ατμόσφαιρας, από το έδαφος (0 m) έως τα 2000 m, για την προσομοίωση ελέγχου του MiFog. Βάσει του Σχήματος 4.1.4α (θερμοκρασιακό προφίλ) παρατηρείται ότι την πρώτη ημέρα (17/12/2020) τις νυχτερινές ώρες αναπτύσσεται επιφανειακή θερμοκρασιακή αναστροφή, με μέγιστο ύψος περίπου στα 100 m, παρομοίως με την προσομοίωση του PaFog. Μέσα σε αυτή μειώνεται η ορατότητα κάτω από τα 1000 m (Σχήμα 4.1.4β) και

δημιουργείται η ομίχλη. Αυτή είναι ασθενής, καθώς συνοδεύεται από χαμηλά ποσά CWC (Σχήμα 4.1.4γ), της τάξης 0.12 g/Kg, ενώ ο υπερκορεσμός (Σχήμα 4.1.4δ) φτάνει περίπου στο 0.06% στο πάνω στρώμα της ομίχλης, τιμή αρκετά μικρότερη σε σχέση με το PaFog η οποία ήταν 0.25%. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο διαφορετικό σχήμα μικροφυσικής που περιέχει κάθε μοντέλο.

Τη δεύτερη ημέρα, στις 18/12, δημιουργείται εκ νέου επιφανειακή θερμοκρασιακή αναστροφή, με ύψος ελαφρώς πάνω από 100 m (Σχήμα 4.1.4α), όπως συνέβη και στην περίπτωση του PaFog. Αυτή η θερμοκρασιακή αναστροφή δε διαλύεται εντελώς τις μεσημβρινές ώρες, όπως συνέβη με το PaFog, με αποτέλεσμα η ομίχλη να εγκλωβίζεται μέσα σε αυτό το στρώμα μέχρι το τέλος της ημέρας (Σχήμα 4.1.4β). Επιπλέον, η ομίχλη είναι πιο πυκνή σε σχέση με την πρώτη ημέρα, με το CWC να φτάνει σε τιμές έως 0.4 g/kg και τον υπερκορεσμό να φτάνει κοντά στο 0.1%. Την τρίτη ημέρα (19/12) η θερμοκρασιακή αναστροφή είναι πιο έντονη από αυτή που εμφανιζόταν τις προηγούμενες μέρες, σε αντίθεση με το PaFog. Η εντονότερη αυτή αναστροφή συντελεί στη μη ανάπτυξη χαμηλού νέφους και συγκράτηση της ομίχλης κοντά στο έδαφος, με το CWC να παίρνει τιμές έως 0.4 g/kg.



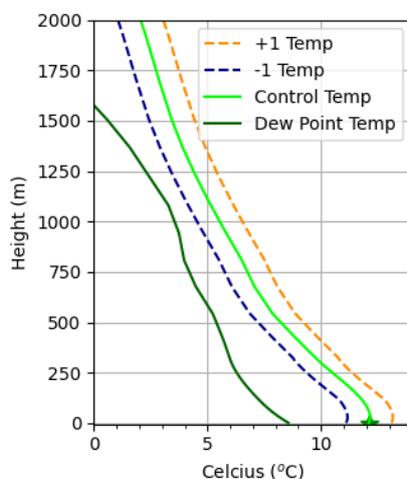
Σχήμα 4.1.4: Χρονική εξέλιξη των κατακόρυφων τομών της ατμόσφαιρας για την προσομοίωση αναφοράς του MiFog. Τα αποτελέσματα δίνονται για: (α) τη θερμοκρασία, (β) την ορατότητα, (γ) το περιεχόμενο υγρού νερού του νέφους (CWC) και (δ) τον υπερκορεσμό.

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω, φαίνεται ότι οι προσομοιώσεις ελέγχου των PaFog και MiFog παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά κατά την πρώτη ημέρα της προσομοίωσης, στις 17/12/2020, τουλάχιστον σε ό,τι αφορά τις μετεωρολογικές παραμέτρους και τις ιδιότητες/παραμέτρους ακτινοβολίας. Ωστόσο, παρατηρούνται μικρές διαφορές στην πυκνότητα και το πάχος της ομίχλης και στα επίπεδα υπερκορεσμού, με το PaFog να

αναπαράγει πυκνότερη και παχύτερη ομίχλη και μικρότερους υπερκορεσμούς από το MiFog. Το PaFog, λόγω των παραμετροποιήσεών του, προσομοιώνει γενικά πιο πυκνές ομίχλες με μεγαλύτερα ποσά LWP και υψηλότερα ποσοστά υπερκορεσμού (Bott, 2021).

4.1.2 Ευαισθησία στο θερμοκρασιακό προφίλ της ατμόσφαιρας

Όπως τονίστηκε παραπάνω, κατά την εκκίνηση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα επανάλυσης MERRA-2 για την εκτίμηση του κατακόρυφου προφίλ της ατμόσφαιρας (θερμοκρασίας, υγρασίας, πίεσης, ανέμου) στα Ιωάννινα. Επιπλέον, εφαρμόστηκε μια συνάρτηση (Εξίσωση 3.1.3) η οποία συγκλίνει το ατμοσφαιρικό προφίλ θερμοκρασίας στις μετρήσεις του μετεωρολογικού Σταθμού. Δεδομένης της αβεβαιότητας που προκαλείται, λόγω της απουσίας καθ' ύψος μετρήσεων της θερμοκρασίας (π.χ. ραδιοβολίσεων) για την εξαγωγή του πραγματικού προφίλ, πραγματοποιήθηκε και παρουσιάζεται στην παρούσα υποενότητα έλεγχος με σκοπό την εξακρίβωση της ευαισθησίας των αποτελεσμάτων του μοντέλου στις αρχικές τιμές του ατμοσφαιρικού θερμοκρασιακού προφίλ που χρησιμοποιήθηκαν. Σε αυτόν τον έλεγχο επιλέχθηκε να γίνει ομοιόμορφη μεταβολή, αύξηση και μείωση της θερμοκρασίας σε όλα τα επίπεδα, δηλαδή μετατόπιση του αρχικού προφίλ της θερμοκρασίας (και της τιμής στα 2m) κατά ± 1 K, διατηρώντας σταθερή την ειδική υγρασία στην ατμόσφαιρα (σταθερή θερμοκρασία σημείου δρόσου για όλες τις προσομοιώσεις, διαφορετική σχετική υγρασία). Αυτό το τεστ ευαισθησίας, το οποίο οπτικοποιείται στο Σχήμα 4.1.5, πραγματοποιήθηκε με το μοντέλο MiFog.



Σχήμα 4.1.5: Θερμοκρασιακά προφίλ. Διακρίνονται τα προφίλ θερμοκρασίας στα οποία η θερμοκρασία αυξήθηκε κατά +1 K (+1 Temp, κίτρινη διακεκομμένη καμπύλη) και μειώθηκε κατά -1 K (-1 Temp, μπλε διακεκομμένη καμπύλη). Με ανοιχτό πράσινο χρώμα διακρίνεται το αρχικό προσαρμοσμένο θερμοκρασιακό προφίλ MERRA-2 και με σκούρο πράσινο χρώμα το προφίλ της θερμοκρασίας του σημείου δρόσου.

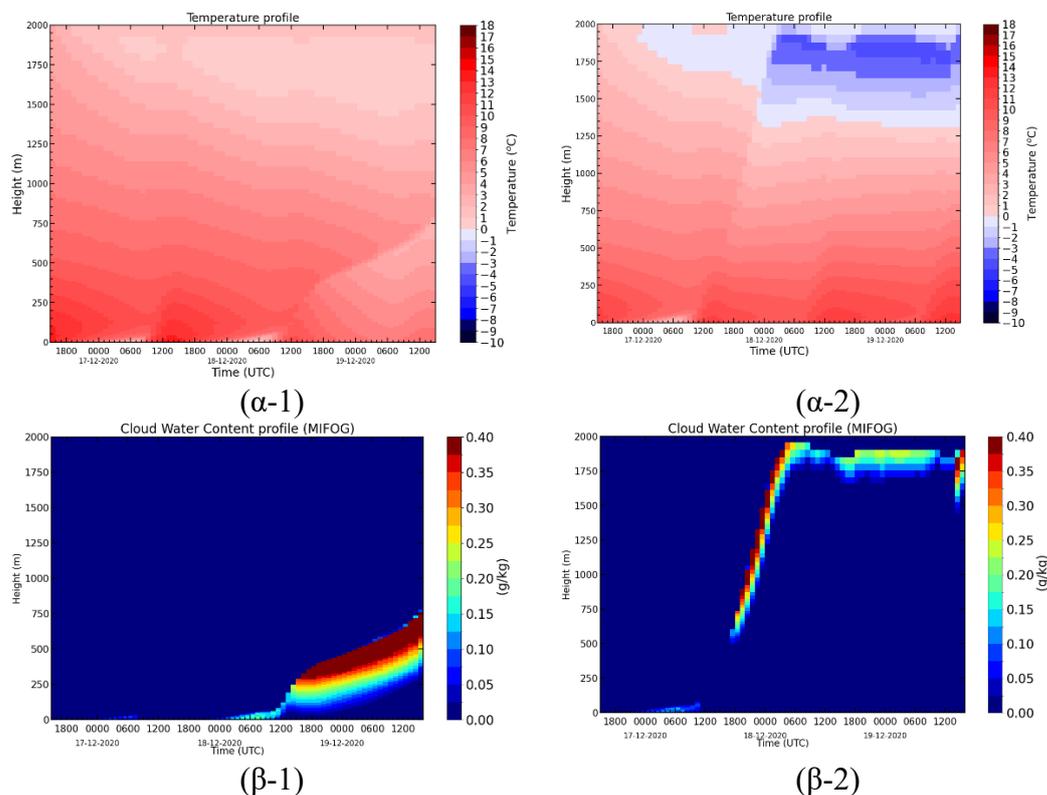
Στο Σχήμα 4.1.6 φαίνονται τα χρονικά μεταβαλλόμενα κατακόρυφα ατμοσφαιρικά προφίλ της θερμοκρασίας και του CWC. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται για χρόνο εκκίνησης του μοντέλου στις 15:00 UTC της 16/12, τρεις ώρες νωρίτερα σε σχέση με την προσομοίωση αναφοράς (18:00 UTC, βλ. Σχήματα 4.1.4 και 4.1.5). Αυτό αποσκοπεί στην αποφυγή εισαγωγής θερμοκρασιών στο θερμοκρασιακό προφίλ οι οποίες είναι μικρότερες από τη θερμοκρασία του σημείου

δρόσου (στην περίπτωση ευαισθησίας με μείωση της θερμοκρασίας) καθώς έτσι δεν ήταν δυνατό να εκτελεστεί η εκκίνηση του μοντέλου. Στα Σχήματα Π.Ε.1 και Π.Ε.2 (παράρτημα Ε) παρατίθεται η προσομοίωση αναφοράς με χρόνο εκκίνησης στις 15:00 UTC. Σε αυτό το σχήμα δεν παρατηρείται μεγάλη απόκλιση των αποτελεσμάτων σε σχέση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της προσομοίωσης αναφοράς των 18:00 UTC για τις τρεις ημέρες προσομοίωσης (Σχήματα 4.1.3 και 4.1.4).

Όσον αφορά στην πρώτη ημέρα προσομοίωσης, για την οποία είναι και πιο αξιόπιστα τα αποτελέσματα του μοντέλου, παρουσιάζεται στις προσομοιώσεις ευαισθησίας, όπως αναμένεται, όμοια επιφανειακή θερμοκρασιακή αναστροφή με αυτή της προσομοίωσης ελέγχου (Σχήματα Π.Ε.1 και Π.Ε.2) με ύψος κοντά στα 100 m. Μέσα στο στρώμα αναστροφής (Σχήμα 4.1.6α) δημιουργείται ομίχλη και στις δύο περιπτώσεις (αύξησης/μείωσης της θερμοκρασίας κατά 1 K), όμως στην περίπτωση της αύξησης της θερμοκρασίας η ομίχλη κατά την πρώτη ημέρα είναι πιο ασθενής σε σχέση με την προσομοίωση αναφοράς και με τη περίπτωση μείωσης της θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα, η περίπτωση με αύξηση της θερμοκρασίας παρουσιάζει ποσά CWC (Σχήμα 4.1.6), τα οποία κυμαίνονται από 0.1-0.15 g/kg, με το μέγιστο LWP (Σχήμα 4.1.7ζ) να είναι κοντά στα 3 g/m², τα οποία είναι μικρότερα σε σχέση τόσο με την προσομοίωση αναφοράς, όσο και με την περίπτωση μείωσης της θερμοκρασίας, στην οποία οι τιμές για το μέγιστο LWP είναι κοντά στα 7g/m² και το CWC κυμαίνεται από 0.1-0.2 g/kg και για τις δύο περιπτώσεις. Η ορατότητα στα 2 m (Σχήμα 4.1.7στ) για την πρώτη ημέρα προσομοίωσης μειώνεται και στις τρεις περιπτώσεις κάτω από 400m, όμως παρατηρούμε ότι για την περίπτωση αύξησης της θερμοκρασίας η πτώση της ορατότητας, κάτω των 1000 m, παρουσιάζεται για μικρότερο χρονικό διάστημα σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις, υποδηλώνοντας ασθενέστερη ομίχλη. Παρομοίως και η σχετική υγρασία (Σχήμα 4.1.7ε) στην προσομοίωση με αύξηση της θερμοκρασίας παίρνει τιμές κοντά στο 100% για λιγότερες ώρες σε σχέση με τις άλλες δύο προσομοιώσεις. Η θερμοκρασία του αέρα στα 2 m (Σχήμα 4.1.7α) για τις προσομοιώσεις με αύξηση και μείωση της θερμοκρασίας έχουν κοινή διακύμανση και παρουσιάζουν ίδια ελάχιστη θερμοκρασία στους 276 K, όμως σε διαφορετική χρονική στιγμή (04:00 UTC για την περίπτωση μείωσης και 06:00 UTC για τη περίπτωση αύξησης της θερμοκρασίας), ενώ παρουσιάζουν διαφορετικές μέγιστες θερμοκρασίες αέρα (στα 2 m) ίσες με 287 και 285 K για την προσομοίωση με αύξηση και μείωση της θερμοκρασίας, αντίστοιχα. Ομοίως κυμαίνονται και οι θερμοκρασίες στην επιφάνεια (Σχήμα 4.1.7β) με τις προσομοιώσεις να παρουσιάζουν ίδια ελάχιστη κοντά στους 276 K ενώ η μέγιστες θερμοκρασίες είναι 288 και 286 K για τη περίπτωση αύξησης και μείωσης της θερμοκρασίας του προφίλ, αντίστοιχα. Η ηλιακή ακτινοβολία (Σχήμα 4.1.7γ) δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις προσομοιώσεις, ενώ οι διαφορές στην υπέρυθη ακτινοβολία (Σχήμα 4.1.7δ) οφείλονται στα διαφορετικά ποσά νεφικού υγροποιημένου νερού της κάθε περίπτωσης.

Τη δεύτερη και τρίτη ημέρα προσομοίωσης (18-19/12) παρατηρούνται μεγάλες αλλαγές ανάμεσα στις προσομοιώσεις. Για την προσομοίωση με μείωση της θερμοκρασίας, στις 18:00 UTC εμφανίζεται χαμηλό νέφος σε ύψος 700 m το οποίο σταδιακά ανυψώνεται κατακόρυφα έως τα 2000 m και συντηρείται έως και το τέλος της προσομοίωσης. Το νέφος αυτό αποκόπτει την ηλιακή ακτινοβολία (Σχήμα 4.1.7γ) σε μεγάλο βαθμό, διότι έχει μεγαλύτερα ποσά CWC που φτάνουν και τα 0.4 g/kg, ενώ εκπέμπει σημαντικά ποσά υπέρυθρης ακτινοβολίας στο έδαφος (Σχήμα 4.1.7δ)

δημιουργώντας μικρό θερμοκρασιακό εύρος για τη θερμοκρασία της επιφάνειας και τη θερμοκρασία αέρα στα 2 m. Αντίθετα, η προσομοίωση με αύξηση της θερμοκρασίας τη δεύτερη ημέρα δημιουργεί ομίχλη η οποία είναι πιο ισχυρή από εκείνη της πρώτης ημέρας. Στην περίπτωση αυτή παρουσιάζεται παρόμοια μείωση της ορατότητας με αυτήν της προσομοίωσης αναφοράς, έως και κάτω από τα 200 m. Παρόλα αυτά, την τρίτη ημέρα (19/12) η ομίχλη μετατρέπεται σε ένα πολύ παχύ χαμηλό νέφος με πάχος περίπου 250 m, το οποίο παρουσιάζει μεγάλα ποσά CWC, πάνω από 0.4 g/kg

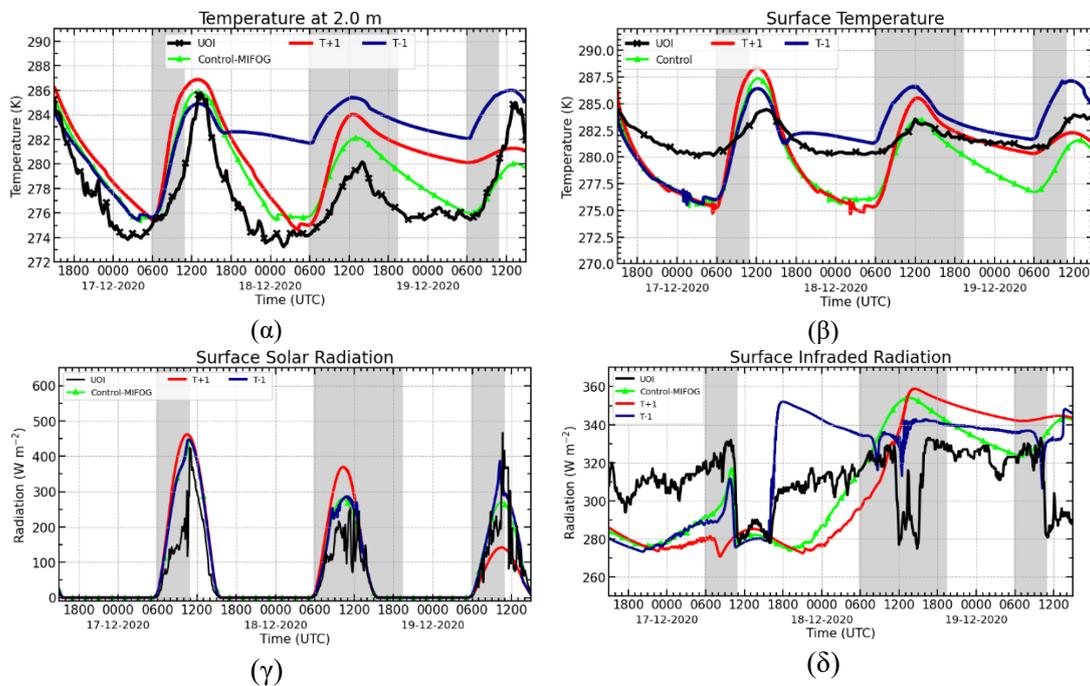


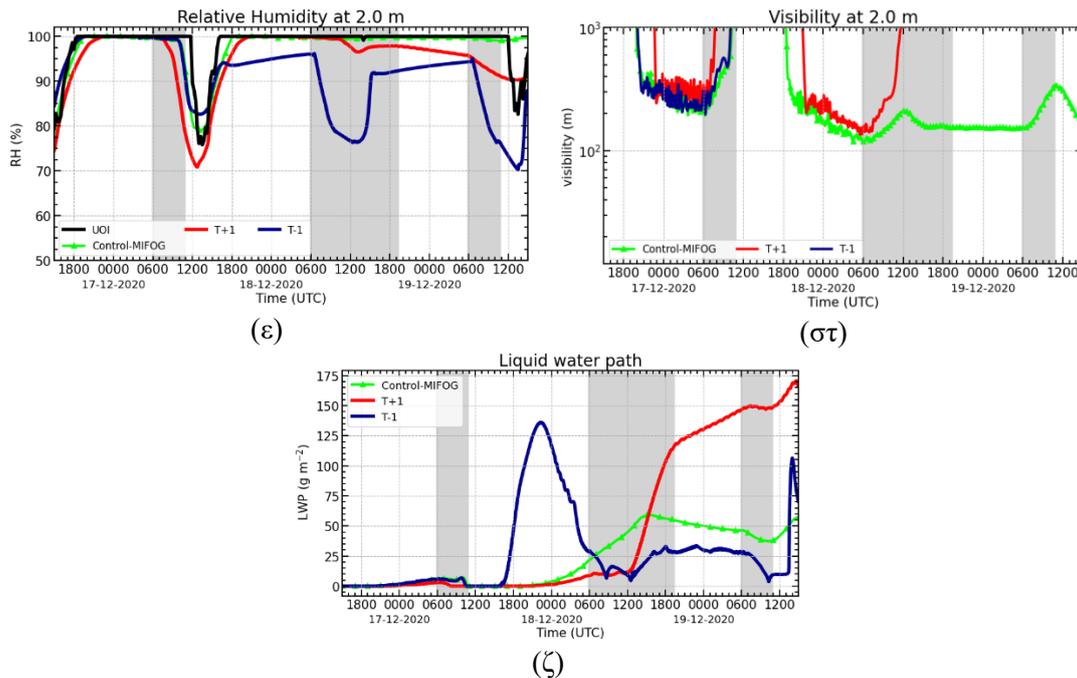
Σχήμα 4.1.6: Χρονικά μεταβαλλόμενες κατακόρυφες διατομές: (α)της θερμοκρασίας και (β) του CWC για τη μελέτη ευαισθησίας στην οποία αυξήθηκε ομοιόμορφα η θερμοκρασία κατά 1 K (αριστερά) και μειώθηκε ομοιόμορφα η θερμοκρασία κατά 1 K (δεξιά).

Από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνουμε πως και στις δύο περιπτώσεις (αύξησης/μείωσης της θερμοκρασίας) εμφανίζεται ομίχλη κατά την πρώτη ημέρα, η οποία δεν είναι το ίδιο πυκνή. Αυτή η διαφορά μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι με αύξηση της θερμοκρασίας και διατήρηση της ίδιας απόλυτης υγρασίας (άρα μείωση της σχετικής υγρασίας), ο αέρας χρειάζεται περισσότερο χρόνο για να γίνει κορεσμένος και έτσι η ομίχλη εμφανίζεται σε μεταγενέστερο χρόνο, καθώς δεν προλαβαίνει να σχηματισθεί (πυκνώσει) καταλλήλως, ενώ διαλύεται και νωρίτερα. Στην περίπτωση της μείωσης της θερμοκρασίας δε σχηματίζεται πιο πυκνή ομίχλη σε σχέση με την προσομοίωση αναφοράς διότι η διαθέσιμη υγρασία στην ατμόσφαιρα παραμένει σταθερή, άρα το ποσό του νερού που μπορεί να υγροποιηθεί είναι το ίδιο.

Επιπρόσθετα, με μεταβολή του θερμοκρασιακού προφίλ της ατμόσφαιρας επηρεάζεται και η ένταση της θερμοκρασιακής αναστροφή που δημιουργείται τις νυχτερινές ώρες. Από τα Σχήμα 4.1.7α,β παρατηρούμε πως η ελάχιστη θερμοκρασία στο έδαφος και στα 2 m είναι περίπου ίδια και στις δύο περιπτώσεις ευαισθησίας, κοντά στους 276 K. Ωστόσο, σε μεγαλύτερα ύψη, πάνω από τα 400 m, εξαιτίας της μεταβολής

του θερμοκρασιακού προφίλ έχουμε διαφορετικές θερμοκρασίες αέρα ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις (Σχήμα Π.Ε.3). Στην περίπτωση μελέτης ευαισθησίας με μείωση της θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού προφίλ, η αναστροφή γίνεται πιο ασθενής (επικρατεί μικρότερη βαθμίδα/διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της βάσης και της κορυφής του στρώματος αναστροφής. Αντίθετα, στην περίπτωση μελέτης ευαισθησίας με αύξηση του ατμοσφαιρικού προφίλ της θερμοκρασίας (και επικράτηση της ίδιας ελάχιστης θερμοκρασίας στο έδαφος) η αναστροφή γίνεται πιο ισχυρή, καθώς η βαθμίδα της θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη από την περίπτωση με μείωση της θερμοκρασίας. Επιπλέον, μέσω της θέρμανσης του εδάφους από την ηλιακή ακτινοβολία και της μεταδιδόμενης θερμότητας στον υπερκείμενο ατμοσφαιρικό αέρα, η αναστροφή στη επιφάνεια αρχίζει να διαλύεται και να μετατοπίζεται σε μεγαλύτερα ύψη. Στην περίπτωση της μείωσης της θερμοκρασίας η θερμοκρασιακή αναστροφή μετατοπίζεται κατά 25 m υψηλότερα σε σχέση με την περίπτωση της αύξησης της θερμοκρασίας (Σχήμα Π.Ε.3). Έτσι, ο συνδυασμός της ασθενέστερης θερμοκρασιακής αναστροφής μαζί με τη μετατόπισή της σε μεγαλύτερο ύψος στην ατμόσφαιρα ευνοεί τη διάχυση των υδρατμών σε μεγαλύτερα ύψη, σε αντίθεση με την περίπτωση αύξησης της θερμοκρασίας, στην οποία η αναστροφή είναι ισχυρή και περιορίζεται σε χαμηλότερα ύψη. Στη περίπτωση με μείωση της θερμοκρασίας οι υδρατμοί συμπυκνώνονται πιο εύκολα, καθώς βρίσκονται πιο κοντά στο σημείο δρόσου και εν τέλει δημιουργείται το χαμηλό νέφος. Αντίθετα, με αύξηση της θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού προφίλ οι υδρατμοί υπό τις επικρατούσες συνθήκες που αναφέρθηκαν δε διαχέονται κατακόρυφα σε μεγάλα ύψη και η υγροποίησή τους, είναι πιο δύσκολη, καθώς βρισκόμαστε σε υψηλότερες θερμοκρασίες και μικρότερες σχετικές υγρασίες





Σχήμα 4.1.7: Χρονική εξέλιξη προσομοιώσεων ευαισθησίας για μεταβολή της θερμοκρασίας: +2 K (κόκκινη), -2 K (μπλε), προσομοίωση ελέγχου (πράσινη) και σύγκριση με μετρήσεις του μετεωρολογικού σταθμού (μαύρες καμπύλες). (α) Θερμοκρασία στα 2 m, (β) θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους, εισερχόμενη (γ) ηλιακή και (δ) υπέρυθη ακτινοβολία στην επιφάνεια, (ε) σχετική υγρασία, (στ) ορατότητα στα 2 m και (ζ) LWP.

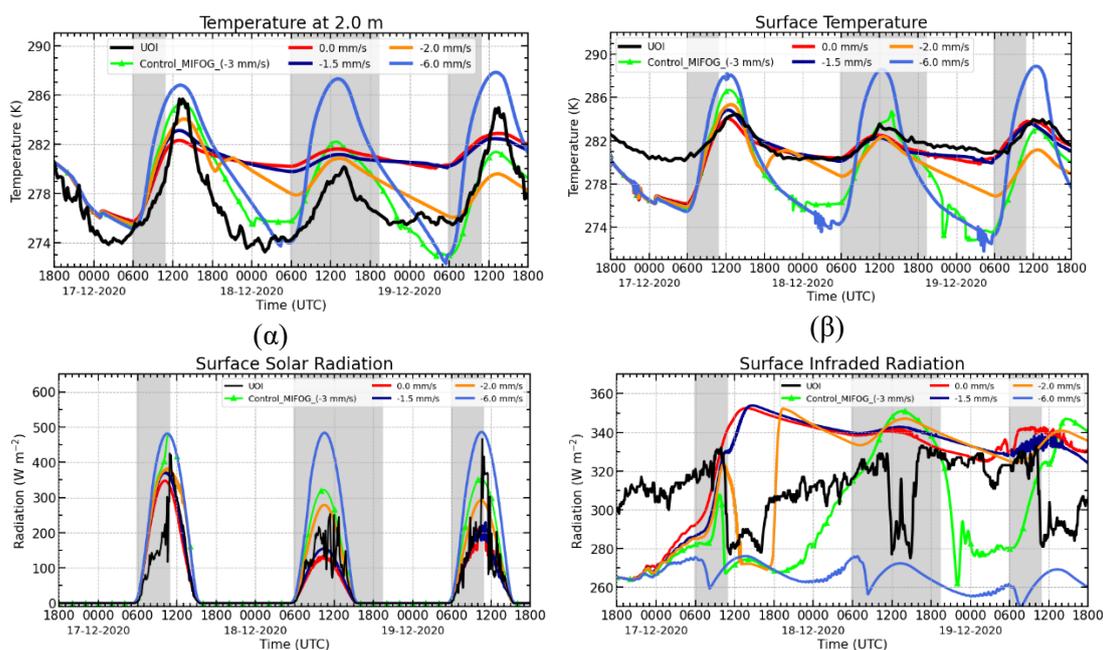
4.1.3 Ευαισθησία στην κατακόρυφη ταχύτητα καθίζησης

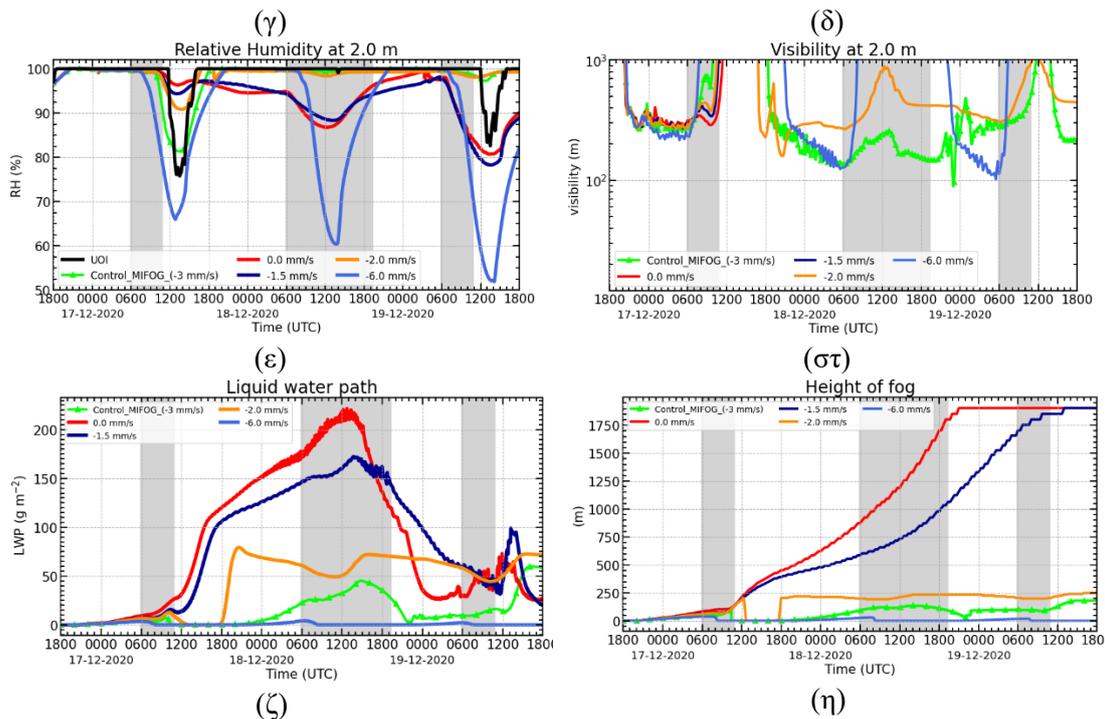
Συνήθως, η δημιουργία ομίχλης ακτινοβολίας (και στα Ιωάννινα) συνοδεύεται από αντικυκλώνες συνθήκες (Houssos et al., 2012). Οι συνθήκες αυτές χαρακτηρίζονται από μεγάλης κλίμακας κατολίσθηση/καθίζηση, δηλαδή καθοδικές κινήσεις του ατμοσφαιρικού αέρα. Σε αυτήν τη μελέτη ευαισθησίας μελετήθηκε η επίδραση της έντασης της κατακόρυφης ταχύτητας αέρα στις ιδιότητες της ομίχλης. Υπενθυμίζεται πως η κατακόρυφη ταχύτητα έχει σταθερό μέτρο μέχρι το ύψος ανάμιξης και μειώνεται γραμμικά, έως ότου μηδενιστεί στο έδαφος, ενώ παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Το ύψος ανάμιξης ορίζεται στα 300 m (Ενότητα 4.1). Όσον αφορά στην κατακόρυφη ταχύτητα, το ύψος στο οποίο αρχίζει η μείωση (300 m) παραμένει σταθερό και ίδιο για όλες τις προσομοιώσεις και καθ' όλη την διάρκειά τους. Στην προσομοίωση ελέγχου η κατακόρυφη ταχύτητα είναι ίση με -3.0 mm/s. Σε αυτή την μελέτη δημιουργήθηκαν προσομοιώσεις με κατακόρυφες ταχύτητές ίσες με: -0.0, -1.5, -2.0, -3.0 (προσομοίωση αναφοράς) και -6.0 mm/s. Χρησιμοποιήσαμε μόνο καταβατικές κατευθύνσεις (αρνητικό πρόσημο) καθώς κατά την διάρκεια αντικυκλωνικών συνθηκών δεν παρουσιάζονται έντονες ανοδικές κινήσεις (convection). Στο Σχήμα 4.1.8 παρουσιάζονται οι χρονικά μεταβαλλόμενες μετεωρολογικές παράμετροι και οι βασικές ιδιότητες της ομίχλης. Οι προσομοιώσεις έχουν γίνει με χρήση του μοντέλου MiFog. Επισημαίνεται ότι σε αυτήν τη μελέτη ευαισθησίας, όπως και στις επόμενες, δεν παρουσιάζονται αποτελέσματα για τις κατακόρυφες διατομές της ατμόσφαιρας, για αποφυγή μεγάλου όγκου των παρουσιαζόμενων αποτελεσμάτων και ευκολότερη αποτίμησή τους.

Με μείωση της έντασης της κατακόρυφης ταχύτητας αέρα παρατηρούμε ότι όλες οι παράμετροι μέχρι περίπου τις 08:00 UTC της πρώτης μέρας δε διαφέρουν ουσιαστικά μεταξύ τους, ενώ όλες οι προσομοιώσεις δημιουργούν ομίχλη με σχετικά μικρές διαφορές στο LWP (Σχήμα 4.1.8ζ) και το πάχος της ομίχλης (Σχήμα 4.1.8η) μέχρι την ώρα αυτή. Ύστερα, οι προσομοιώσεις αποκλίνουν σημαντικά μεταξύ τους, καθώς για μικρές κατακόρυφες ταχύτητες [προσομοιώσεις 0.0 mm/s (κόκκινο) και -1.5 (σκούρο μπλε) mm/s] η ομίχλη που δημιουργείται μετατρέπεται σε χαμηλό νέφος καθώς αυξάνεται σημαντικά το μέγιστο ύψος του νέφους πάνω από τα 1000 m (Σχήμα 4.1.8η), το οποίο επηρεάζει τις θερμοδυναμικές ιδιότητες της ατμόσφαιρας διαφορετικά από ό,τι η ομίχλη. Το χαμηλά νέφη που δημιουργούνται στις 12:00 UTC, από τις παραπάνω δύο προσομοιώσεις εκπέμπουν μεγάλα ποσά υπέρυθρης ακτινοβολίας (Σχήμα 4.1.8δ) στην επιφάνεια της γης μικραίνοντας σημαντικά το θερμοκρασιακό εύρος της θερμοκρασίας εδάφους (Σχήμα 4.1.8β) και του εδάφους-αέρα (Σχήμα 4.1.8α)

Οριακή φαίνεται να είναι η κατάσταση για την προσομοίωση με κατακόρυφη ταχύτητα ίση με -2.0 mm/s. Η ομίχλη, στις 13:00 UTC εξαφανίζεται εντελώς για μερικές ώρες και εμφανίζεται στις 17:00 UTC με πάχος περίπου 200 m (Σχήμα 4.1.8η). Στο πάχος της ομίχλης που δημιουργείται από τις 17:00 UTC έως το τέλος της προσομοίωσης το CWC (Παράρτημα Α, Σχήμα Π.Α.2) δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένο καθ' ύψος, αλλά παίρνει τιμές έως και 0.45 g/kg στο πάνω μέρος αυτής (150-250 m) και τιμές χαμηλότερες των 0.10 g/kg κοντά στην επιφάνεια. Έτσι, στην επιφάνεια η ορατότητα κυμαίνεται ανάμεσα στα 300 και 1000 m, παρά το υψηλό LWP. Τα αποτελέσματα αυτά υποδεικνύουν μια τάση μετατροπής της ομίχλης σε χαμηλό νέφος, ωστόσο η διαδικασία αυτή περιορίζεται από την καθίζηση μεγάλης κλίμακας, η οποία αποτρέπει την πλήρη ανύψωση της ομίχλης.

Από την άλλη πλευρά, η αύξηση της κατακόρυφης ταχύτητας [προσομοίωση 6.0 mm/s (ανοιχτό μπλε)] δεν επιτρέπει την κατακόρυφη ανάπτυξη της ομίχλης, με το ύψος της να φτάνει έως τα μόλις 50 m (Σχήμα 4.1.8η), με αποτέλεσμα η ομίχλη να διαλύεται ωρίτερα και να είναι συνδυασμένη με χαμηλότερο LWP.





Σχήμα 4.1.8: Χρονική εξέλιξη των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης ευαισθησίας για την κατακόρυφη ταχύτητα αέρα: 0.0 mm/s (κόκκινο χρώμα), -1.5mm/s (σκουρό μπλε χρώμα), προσομοίωση ελέγχου: -3.0mm/s (πράσινο χρώμα), -2.0 mm/s (πορτοκαλί χρώμα), -6.0 mm/s (ανοιχτό μπλε χρώμα). Δίνονται αποτελέσματα για: (α) τη θερμοκρασία εδάφους-αέρα, στα 2 m, (β) τη θερμοκρασία εδάφους, (γ) την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος, (δ) την εισερχόμενη υπέρυθη ακτινοβολία στο έδαφος, (ε) τη σχετική υγρασία, (στ) την ορατότητα στα 2 m, (ζ) το LWP, (η) το ύψος (πάχος) ομίχλης. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με διαθέσιμες μετρήσεις του μετεωρολογικού Σταθμού (μαύρες καμπύλες).

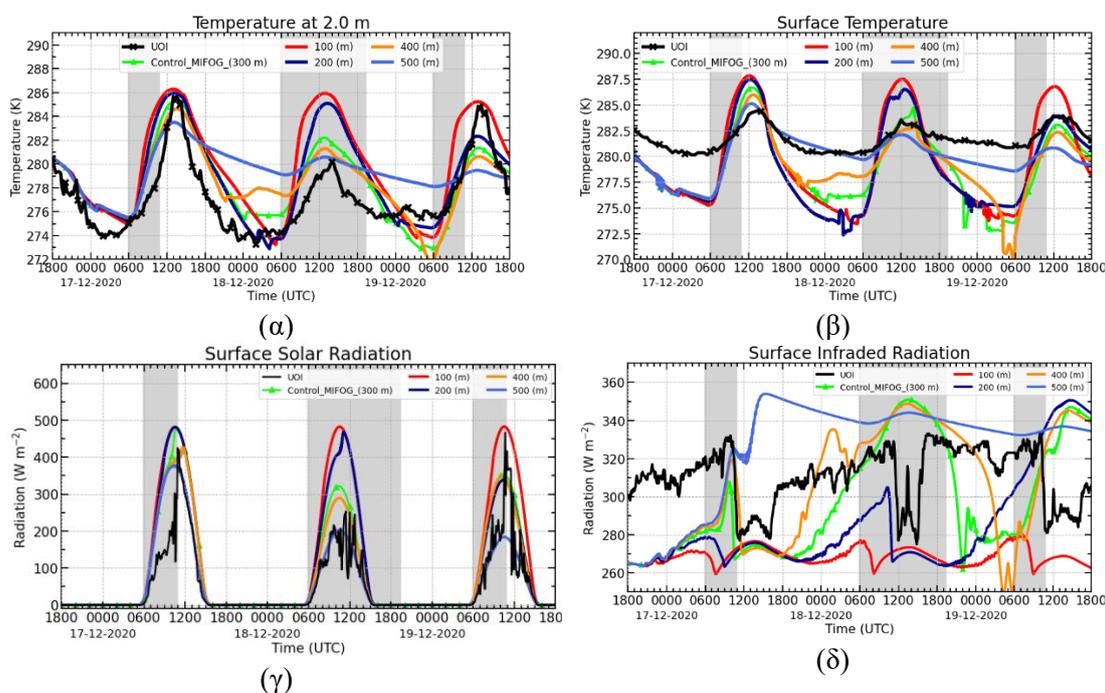
4.1.4 Ευαισθησία στο ύψος ανάμιξης των αερολυμάτων.

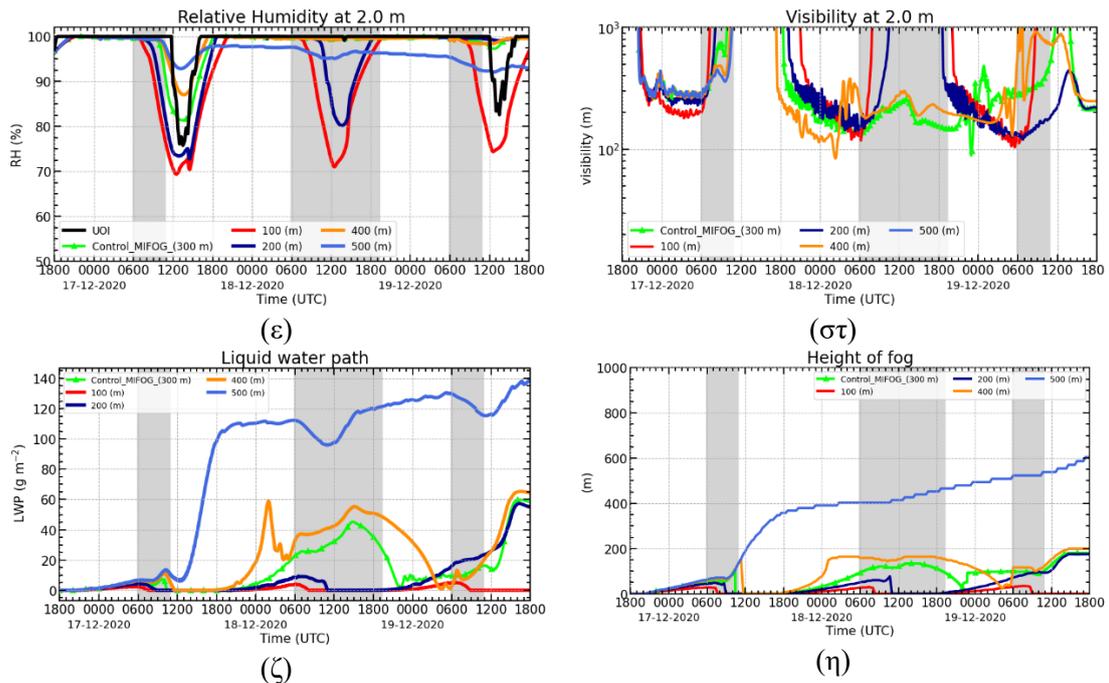
Σε αυτήν τη μελέτη ευαισθησίας διερευνήθηκε η επίδραση του ύψους ανάμιξης στις ιδιότητες της ομίχλης. Η παρούσα μελέτη συνδέεται άμεσα με την προηγούμενη, καθώς ισχυρή κατακόρυφη διάτμηση ανέμου γενικά ευνοεί την ανάμιξη δημιουργώντας περισσότερη τύρβη. Επιπλέον, το ύψος ανάμιξης ορίζει το αρχικό ύψος κάτω από το οποίο εισάγονται (ομοιογενώς, όπως έχει εξηγηθεί) τα αερολύματα στο μοντέλο. Πάνω από αυτό το ύψος η συγκέντρωση των αερολυμάτων έχει τεθεί να μειώνεται κατά 50% σε σχέση με τη δοθείσα τιμή κάτω από αυτό, όπως αναφέρεται στην Ενότητα 4.1. Το ύψος ανάμιξης δε μένει σταθερό στη διάρκεια των προσομοιώσεων, δεδομένου ότι επηρεάζεται από τη δυναμική του μοντέλου. Τις νυχτερινές ώρες μειώνεται και τις πρωινές αυξάνεται, αποτρέποντας ή επιτρέποντας τη διάχυση των αιωρούμενων σωματιδίων, αντίστοιχα. Ένα παράδειγμα που παρουσιάζει αυτήν τη δυναμική παρατίθεται στο Παράρτημα Α (Σχήμα Π.Α.3) όπου φαίνεται η αριθμητική συγκέντρωση των αερολυμάτων καθ' ύψος κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης ελέγχου (17-19/12/2020). Οι προσομοιώσεις της παρούσας μελέτης ευαισθησίας έχουν γίνει με τη χρήση του μοντέλου MiFog, με την προσομοίωση αναφοράς να έχει ύψος ανάμιξης 300 m και την κατακόρυφη ταχύτητα έως αυτό να έχει οριστεί στα 3.0 mm/s Σε αυτήν τη μελέτη ευαισθησίας μεταβάλλαμε το ύψος ανάμιξης σε 100, 200, 400, 500 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους

Αρχικά, όλα τα αποτελέσματα που αφορούν στις μετεωρολογικές παραμέτρους δεν αποκλίνουν μέχρι τις 08:00 UTC της πρώτης ημέρας (δηλαδή για 10 ώρες προσομοίωσης). Ωστόσο, αυτό δεν ισχύει για τις παραμέτρους της ομίχλης, δηλαδή την ορατότητα, το LWP και το ύψος της ομίχλης (Σχήματα 4.1.9στ,ζ,η), καθώς για διαφορετικό ύψος ανάμιξης παρουσιάζονται αποκλίσεις

ύψους ανάμιξης η ομίχλη γίνεται πιο ασθενής, με την ορατότητα για τα χαμηλά ύψη να μην είναι τόσο χαμηλή όπως στις άλλες προσομοιώσεις, να παρουσιάζονται χαμηλά ποσά LWC κάτω του 5 και το πάχος της ομίχλης να μην υπερβαίνει τα 50 m. Έπειτα, μετά τις 09:00 UTC, με τη μείωση του ύψους ανάμιξης [προσομοίωση για ύψη ανάμιξης 100 m (κόκκινο) και 200 m (σκούρο μπλε)] η ομίχλη δεν αναπτύσσεται κατακόρυφα τόσο πολύ όσο στην προσομοίωση αναφοράς. Η ομίχλη για τα μικρότερα αυτά ύψη ανάμιξης έχει μικρό πάχος έως και 50 m (Σχήμα 4.1.9η) και μικρό LWP, περίπου ίσο με 5 g/m^2 (Σχήμα 4.1.9ζ). Παρόλα αυτά, η ορατότητα στα 2 m (Σχήμα 4.1.9στ) είναι ελαφρώς μικρότερη κατά 50 με 100 m σε σχέση με τις υπόλοιπες προσομοιώσεις, ενώ αυξάνεται νωρίτερα, εξαιτίας της γρηγορότερης διάλυσης της ομίχλης.

Με αύξηση του ύψους ανάμιξης κατά 100 και 200 m, δηλαδή για ύψη ανάμιξης 400 και 500 m, τα αποτελέσματα (οι παράμετροι της ομίχλης) είναι σχετικά κοντά με τα αντίστοιχα της προσομοίωσης αναφοράς μέχρι περίπου τις 12:00 UTC (της πρώτης ημέρας, δηλαδή της 17/12/2020). Στη συνέχεια, η ομίχλη της προσομοίωσης με ύψος ανάμιξης 500 m αρχίζει να διαφέρει θεαματικά, καθώς μετατρέπεται σε χαμηλό νέφος, ενώ ως συνέπεια αυτού αρχίζουν να διαφέρουν και οι υπόλοιπες μετεωρολογικές παράμετροι. Αντίθετα, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για ύψος ανάμιξης 400 m (πορτοκαλί καμπύλη) έχουν παρόμοια διακύμανση με την προσομοίωση ελέγχου και μικρότερες διαφορές, μέχρι και την τρίτη ημέρα (19/12/2020).





Σχήμα 4.1.9: Χρονική εξέλιξη των προσομοιώσεων ευαισθησίας για διαφορετικά ύψη ανάμιξης: 100 m (κόκκινη καμπύλη), 200 m (σκούρα μπλε), προσομοίωση ελέγχου στα 300 m (πράσινη), 400 m (πορτοκαλί), 500 m (ανοιχτό μπλε). Δίνονται αποτελέσματα για: (α) τη θερμοκρασία εδάφους-αέρα, στα 2 m, (β) τη θερμοκρασία εδάφους, (γ) την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος, (δ) την εισερχόμενη υπέρυθη ακτινοβολία στο έδαφος, (ε) τη σχετική υγρασία, (στ) την ορατότητα στα 2 m, (ζ) το LWP, (η) το ύψος (πάχος) ομίχλης. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με διαθέσιμες μετρήσεις του μετεωρολογικού Σταθμού (μαύρες καμπύλες).

4.1.5 Ευαισθησία στον τύπο του εδάφους

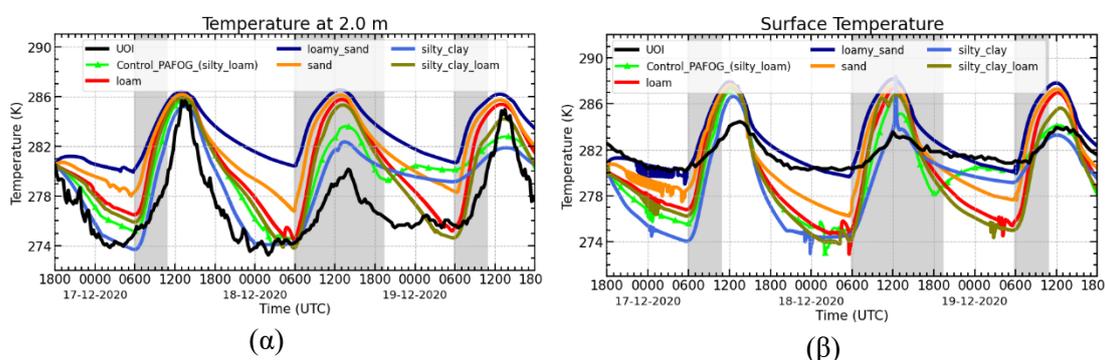
Το έδαφος διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη διαδικασία δημιουργίας της ομίχλης. Οι ροές αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας από το έδαφος προς την ατμόσφαιρα επηρεάζουν τις μετεωρολογικές συνθήκες του επιφανειακού στρώματος, οι οποίες με τη σειρά τους καθορίζουν τις ιδιότητες της ομίχλης.

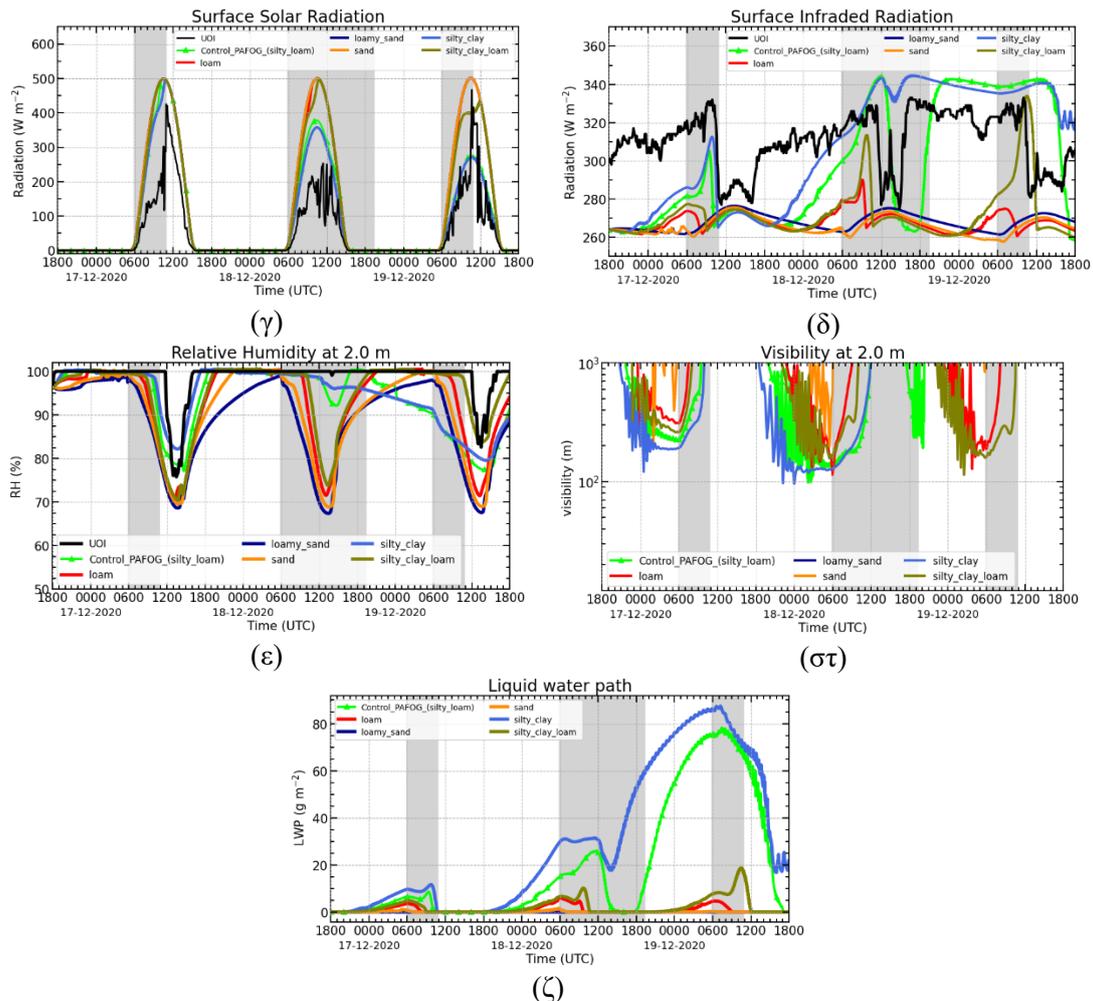
Σε αυτή την μελέτη ευαισθησίας διερευνήθηκε η επίδραση του διαφορετικού τύπου εδάφους στην ομίχλη. Όπως προαναφέρθηκε (Ενότητα 2.2), το μοντέλο παρέχει τη δυνατότητα επιλογής αναμεσα σε δώδεκα διαφορετικούς τύπους εδάφους. Δυστυχώς, ο τύπος του εδάφους στο μετεωρολογικό Σταθμό του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων δεν έχει καθοριστεί έως τώρα (μέσω εδαφολογικής μελέτης), καθιστώντας έτσι αυτήν την μελέτη ευαισθησίας απαραίτητη. Για την προσομοίωση ελέγχου επιλέχθηκε αργιλώδης άργιλος (silty loam), καθώς αυτός ο τύπος ήταν αρχικά προεπιλεγμένος. Οι προσομοιώσεις έγιναν με γρασίδι (ύψους 10cm) και με τη χρήση του μοντέλου PaFog

Παρακάτω έχουν επιλεγεί να παρουσιαστούν έξι τύποι εδάφους, οι οποίοι παρήγαγαν αποτελέσματα που συμφωνούσαν περισσότερο στις μετρούμενες ποσότητες του μετεωρολογικού Σταθμού. Αυτοί είναι: αργιλώδης άμμος (loamy sand, σκούρο μπλε χρώμα), ιλυώδης πηλός (silty clay, ανοιχτό μπλε χρώμα), άμμος (sand, κίτρινο χρώμα), λασπώδης αργιλώδης πηλός (silty clay loam, λαδί χρώμα) και παχύ χρώμα (loam, κόκκινο χρώμα).

Στο Σχήμα 4.1.10 παρατηρούμε πως κάθε τύπος εδάφους παρουσιάζει διαφορετικά αποτελέσματα θερμοκρασίας στα 2 m (Σχήμα 4.1.10α) και στην επιφάνεια του εδάφους (Σχήμα 4.1.10β) από τις πρώτες κίολας ώρες της προσομοίωσης. Οι ελάχιστες θερμοκρασίες των προσομοιώσεων έχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους, με εύρος 6 K. Οι μέγιστες θερμοκρασίες δεν παρουσιάζουν τόσο μεγάλες διαφορές, καθώς κυμαίνονται από 285 έως 287 K. Οι μεγάλες αποκλίσεις στην ελάχιστη θερμοκρασία και οι μικρές αποκλίσεις στην μέγιστη θερμοκρασία οφείλονται στις διαφορετικές ιδιότητες του εδάφους (θερμοχωρητικότητα, μέγιστο ποσό συγκράτησης υγρασίας κ.ά) και στην ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας. Σε αυτή τη μελέτη ευαισθησίας δεν έχουν μελετηθεί σε μεγαλύτερο βαθμό οι παραπάνω παράγοντες καθώς οι τιμές που λαμβάνουν βασίζονται καταλόγους του τμήματος γεωργίας των Η.Π.Α. (Siebert et al., 1992b). Η απόκλιση των αποτελεσμάτων για την ελάχιστη θερμοκρασία δημιουργεί σημαντικές διαφορές και στη σχετική υγρασία (Σχήμα 4.1.10ε). Εξαιτίας της μη ισχυρής ψύξης του εδάφους κατά τις βραδινές ώρες, π.χ. για έδαφος με αργιλώδη άμμο (loam sand) και τη μεγαλύτερη ελάχιστη θερμοκρασία τις βραδινές και πρώτες πρωινές ώρες, η σχετική υγρασία παραμένει σε χαμηλά σχετικά επίπεδα, τα οποία δεν ευνοούν τη δημιουργία ομίχλης. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνεται στα σχήματα 4.1.10στ,ζ, όπου για την προσομοίωση με αργιλώδη άμμο (σκούρα μπλε καμπύλη), τύπο για τον οποίο επικρατεί υψηλή ελάχιστη θερμοκρασία και χαμηλή σχετική υγρασία, δε δημιουργείται ομίχλη, ενώ για άλλους τύπους εδάφους, όπως παχύ χώμα (loam), άμμο (sand) και λασπώδης αργιλώδης πηλός (silty clay loam) η ομίχλη είναι αρκετά ασθενής. Όσον αφορά στις ροές αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας από το έδαφος προς την ατμόσφαιρα παρατηρούνται επίσης σημαντικές διαφορές, καθώς οι μέγιστες τιμές για διαφορετικούς τύπους εδάφους κυμαίνονται μεταξύ 70-90 και 30-50 W/m², αντίστοιχα (Παράρτημα Α, Σχήμα Π.Α.4).

Η προσομοίωση με ιλυώδη πηλό δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με τις μετρήσεις του σταθμού, αφού προσομοιώνει καλύτερα την ελάχιστη, όπως και τη μέγιστη, θερμοκρασία στα 2 m και τη σχετική υγρασία κατά την πρώτη και τη δεύτερη ημέρα της προσομοίωσης. Δημιουργεί την πιο πυκνή ομίχλη, δηλαδή υψηλότερο LWP (Σχήμα 4.1.10ζ) με τιμές έως και 10 g m⁻² και χαμηλότερη ορατότητα (Σχήμα 4.1.10στ) έως και 200 m.





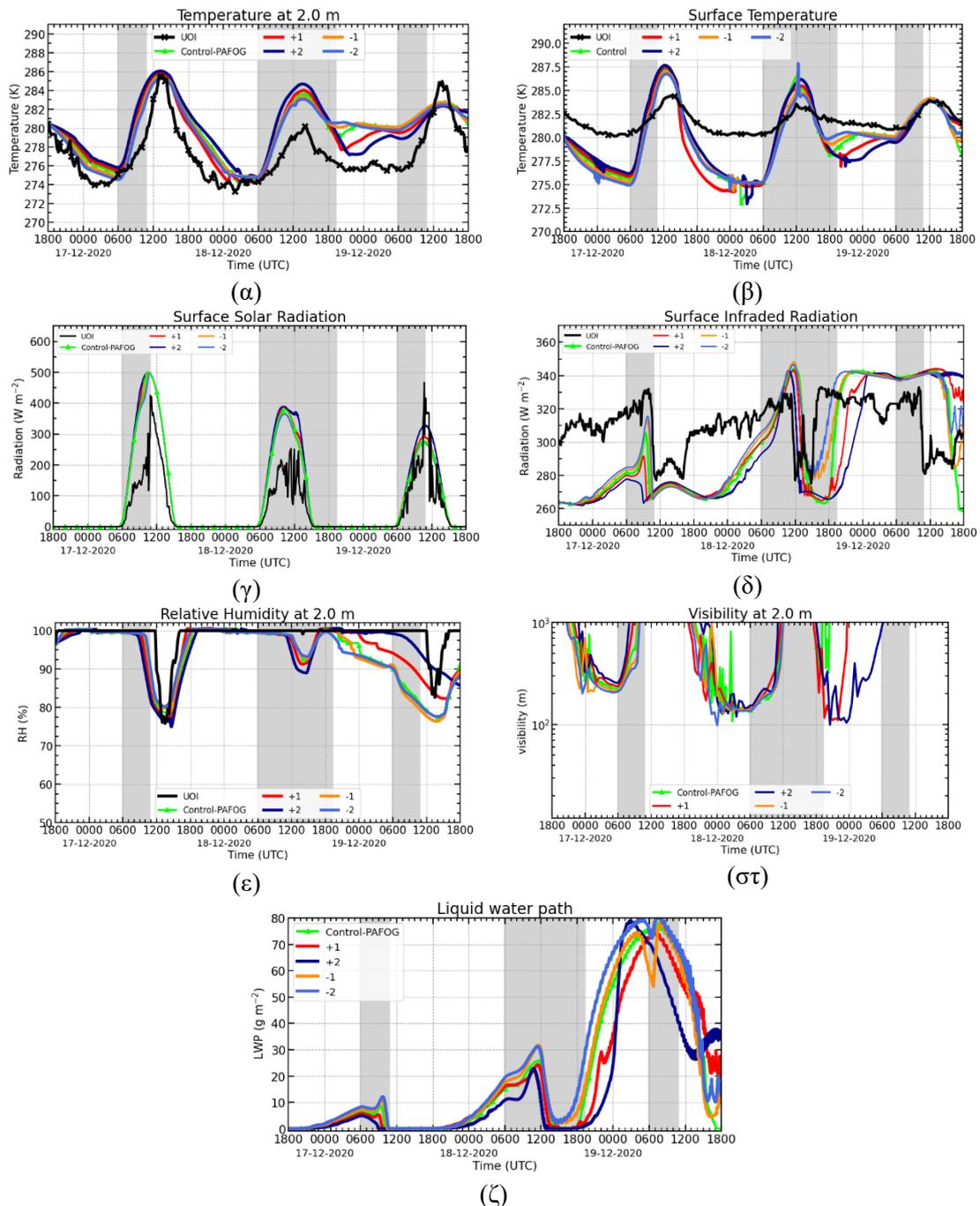
Σχήμα 4.1.10: Χρονική εξέλιξη των προσομοιώσεων ευαισθησίας ανά τύπο του εδάφους: αργιλώδης άμμος (loamy sand, σκούρο μπλε χρώμα), ιλύωδης πηλός (silty clay, ανοιχτό μπλε χρώμα), άμμος (sand, κίτρινο χρώμα), λασπώδης αργιλώδης πηλός (silty clay loam, λαδί χρώμα) και παχύ χόμα (loam, κόκκινο χρώμα). Δίνονται αποτελέσματα για: (α) τη θερμοκρασία εδάφους-αέρα, στα 2 m, (β) τη θερμοκρασία εδάφους, (γ) την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος, (δ) την εισερχόμενη υπέρυθη ακτινοβολία στο έδαφος, (ε) τη σχετική υγρασία, (στ) την ορατότητα στα 2 m και (ζ) το LWP. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με διαθέσιμες μετρήσεις του μετεωρολογικού Σταθμού (μαύρες καμπύλες).

4.1.6 Ευαισθησία στο θερμοκρασιακό προφίλ του υπεδάφους

Σε αυτήν τη μελέτη ευαισθησίας διερευνήθηκε η επίδραση που έχει το θερμοκρασιακό προφίλ του υπεδάφους στις μετεωρολογικές παραμέτρους και τις βασικές ιδιότητες της ομίχλης. Για να πραγματοποιηθεί η μελέτη ευαισθησίας μετατοπίστηκε ομοιόμορφα όλο το προφίλ της θερμοκρασίας υπεδάφους σε μεγαλύτερες ή μικρότερες τιμές κατά ± 1 και ± 2 K. Οι προσομοιώσεις αυτές έγιναν με χρήση του μοντέλου PaFog.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1.11 υποδεικνύουν ότι όλες οι προσομοιώσεις δίνουν παρόμοια αποτελέσματα, ακόμη και την δεύτερη ημέρα προσομοίωσης. Αυτό δείχνει πως το μοντέλο δεν είναι πολύ ευαίσθητο στην μεταβολή της θερμοκρασίας του υπεδάφους, ενώ σημειώνεται ότι

τέτοιου μεγέθους μεταβολές στη θερμοκρασία υπεδάφους (έως 2 K) είναι κοντά στο ανώτατο όριο μεταβολής των τιμών στα διάφορα βάθη, ειδικά αυτά που είναι πιο βαθιά. Ακόμη, θα ήταν πιο ρεαλιστικό αν οι μεταβολές στο θερμοκρασιακό προφίλ του υπεδάφους ήταν μεγαλύτερες για τα μικρότερα βάθη, όμως όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα με τις παρούσες διαταραχές στην θερμοκρασία δεν παρατηρούνται σημαντικές αλλαγές.



Σχήμα 4.1.11: Χρονική εξέλιξη των προσομοιώσεων ευαισθησίας μεταβάλλοντας το προφίλ της θερμοκρασίας του υπεδάφους, κατά +1 (κόκκινο), +2 (σκούρο μπλε), προσομοίωση ελέγχου (πράσινη), -1 (πορτοκαλί), -2 (ανοιχτό μπλε). Δίνονται αποτελέσματα για: (α) τη θερμοκρασία εδάφους-αέρα, στα 2 m, (β) τη θερμοκρασία εδάφους, (γ) την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος, (δ) την εισερχόμενη υπέρυθη ακτινοβολία στο έδαφος, (ε)

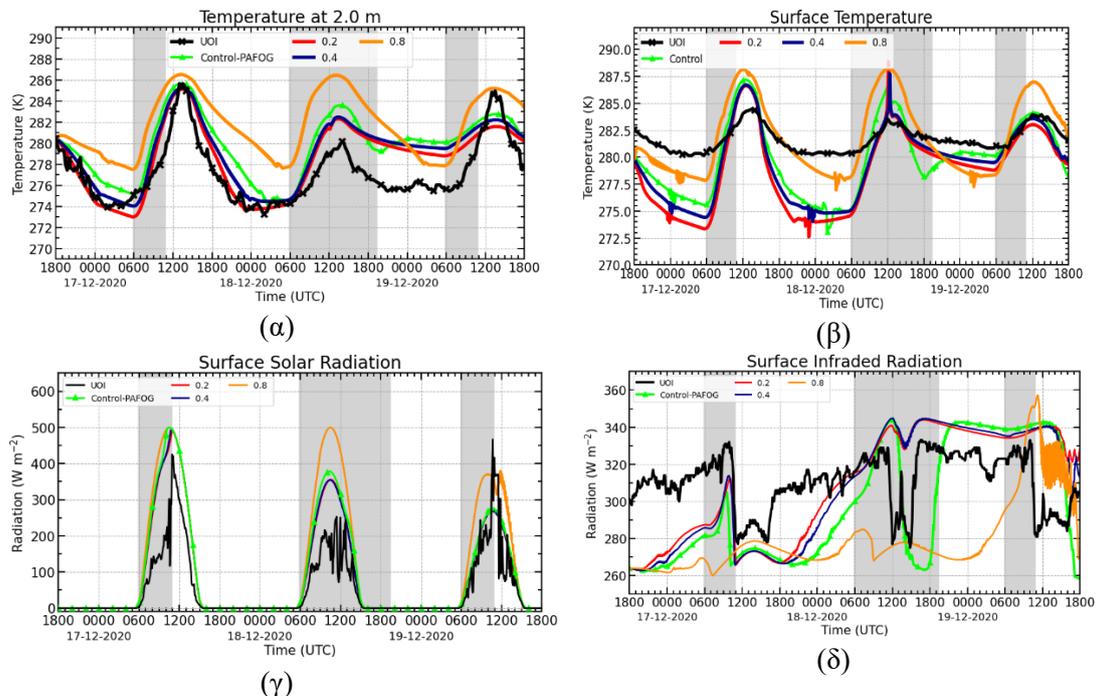
τη σχετική υγρασία, (σ) την ορατότητα στα 2 m και (ζ) το LWP. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με διαθέσιμες μετρήσεις του μετεωρολογικού Σταθμού (μαύρες καμπύλες).

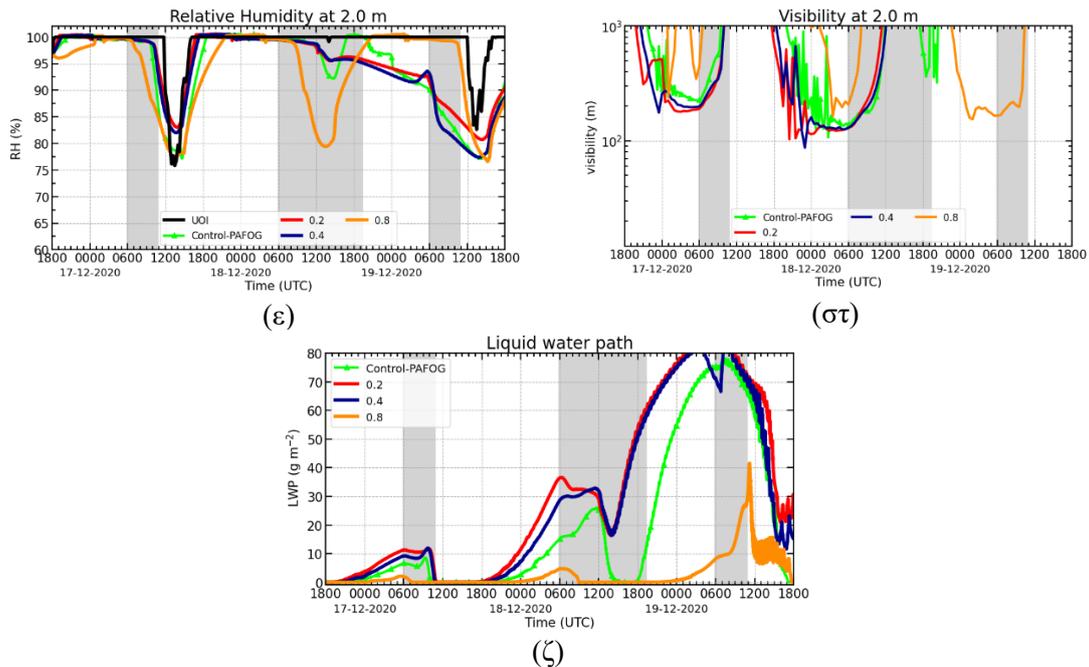
4.1.7 Ευαισθησία στην υγρασία του υπεδάφους

Σε αυτή την μελέτη ευαισθησία παρουσιάζουμε την επίδραση της υγρασία του υπεδάφους στην δημιουργία ομίχλης. Στις παρακάτω προσομοιώσεις μεταβάλλαμε το ποσοστό περιεκτικότητας νερού που διαθέτει το έδαφος. Υπενθυμίζουμε πως οι τιμές κοντά στο 0 συμβολίζουν ξηρό έδαφος ενώ αντίθετα κοντά στο 1 υγρό. Η προσομοίωση ελέγχου είχε ποσοστό υγρασίας στο 0.5 ως προεπιλεγμένη τιμή, καθώς δεν υπήρχαν δεδομένα υγρασίας του υπεδάφους. Οι παραπάνω ποσοστιαίες τιμές αναφέρονται στην ογκομετρική υγρασία του εδάφους με μονάδες όγκος νερού προς τον συνολικό όγκο του εδάφους (m^3/m^3). Η μελέτη αυτή έγινε με χρήση του PaFog

Στο Σχήμα 4.1.12 φαίνεται η μεταβολή των μετεωρολογικών παραμέτρων ανάλογα την υγρασία του εδάφους. Σε αυτό παρατηρούμε πως αυξάνοντας την υγρασία, το έδαφος ψύχεται με μικρότερο ρυθμό (Σχήμα 4.1.12β) με αποτέλεσμα η θερμοκρασία στα 2 m (Σχήμα 4.1.12α) να παρουσιάζει μικρότερη κύμανση και να παρουσιάζει μεγαλύτερες ελάχιστες θερμοκρασίες. Έτσι δημιουργούνται μικρότερα ποσοστά σχετικής υγρασίας που με την σειρά τους δεν ευνοούν την ανάπτυξη ομίχλης. Στα Σχήματα 4.1.12στ,ζ, κατά την πρώτη ημέρα, η προσομοίωση με την μεγαλύτερη υγρασία του υπεδάφους εμφανίζει την τα μικρότερα ποσά LWP, με την ορατότητα να μειώνεται μόνο για λίγες στιγμές.

Αντίθετα, οι προσομοιώσεις με μειωμένη υγρασία υπεδάφους δημιουργούν ελαφρώς χαμηλότερες ελάχιστες θερμοκρασίες στην επιφάνεια και στα 2 m, οι οποίες όμως δεν είναι ικανές να μεταβάλουν σημαντικά την ορατότητα και το LWP σε σχέση με την προσομοίωση αναφοράς.





Σχήμα 4.1.12: Χρονική εξέλιξη των προσομοιώσεων ευαισθησίας μεταβάλλοντας την υγρασία υπεδάφους. Ποσοστά γρασίας 0.2 (κόκκινο), 0.4 (σκούρο μπλε), προσομοίωση ελέγχου (πράσινη), 0.8 (πορτοκαλί Δίνονται αποτελέσματα για: (α) τη θερμοκρασία εδάφους-αέρα, στα 2 m, (β) τη θερμοκρασία εδάφους, (γ) την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος, (δ) την εισερχόμενη υπέρυθη ακτινοβολία στο έδαφος, (ε) τη σχετική υγρασία, (στ) την ορατότητα στα 2 m και (ζ) το LWP. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με διαθέσιμες μετρήσεις του μετεωρολογικού Σταθμού (μαύρες καμπύλες).

4.1.8 Ευαισθησία στο είδος των αερολυμάτων

Η ορθή αρχικοποίηση των παραμέτρων της ατμόσφαιρας και του εδάφους είναι υψίστης σημασίας για την ρεαλιστική προσομοίωση ομίχλης. Εξίσου σημαντική είναι όμως και η αρχικοποίηση των αερολυμάτων καθώς αυτά δρουν ως CCN για το σχηματισμό των σταγόνων της ομίχλης.

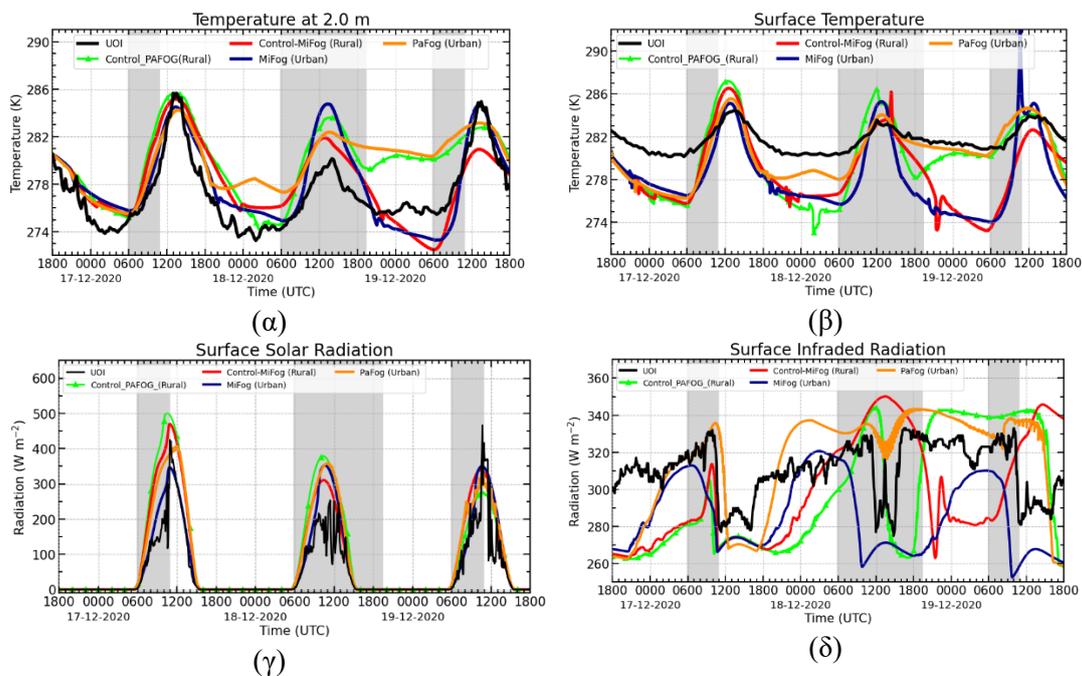
Σε αυτήν τη μελέτη ευαισθησίας διερευνήθηκε η επίδραση των διαφορετικών τύπων αερολυμάτων στις ιδιότητες της ομίχλης, ενώ γίνεται και μία προσπάθεια σύγκρισης μεταξύ του παραμετροποιημένου και του πλήρους σχήματος μικροφυσικής. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται προσομοιώσεις για αερολύματα υπαίθριου και αστικού τύπου για τα δύο μοντέλα παραμετροποιημένης (PaFog) και πλήρους (MiFog) μικροφυσικής. Για λόγους συντομίας, οι ιδιότητες των αερολυμάτων αυτών δεν αναγράφονται εδώ, καθώς έχουν ήδη αναφερθεί στην περιγραφή των μοντέλων, (Ενότητα 2.4).

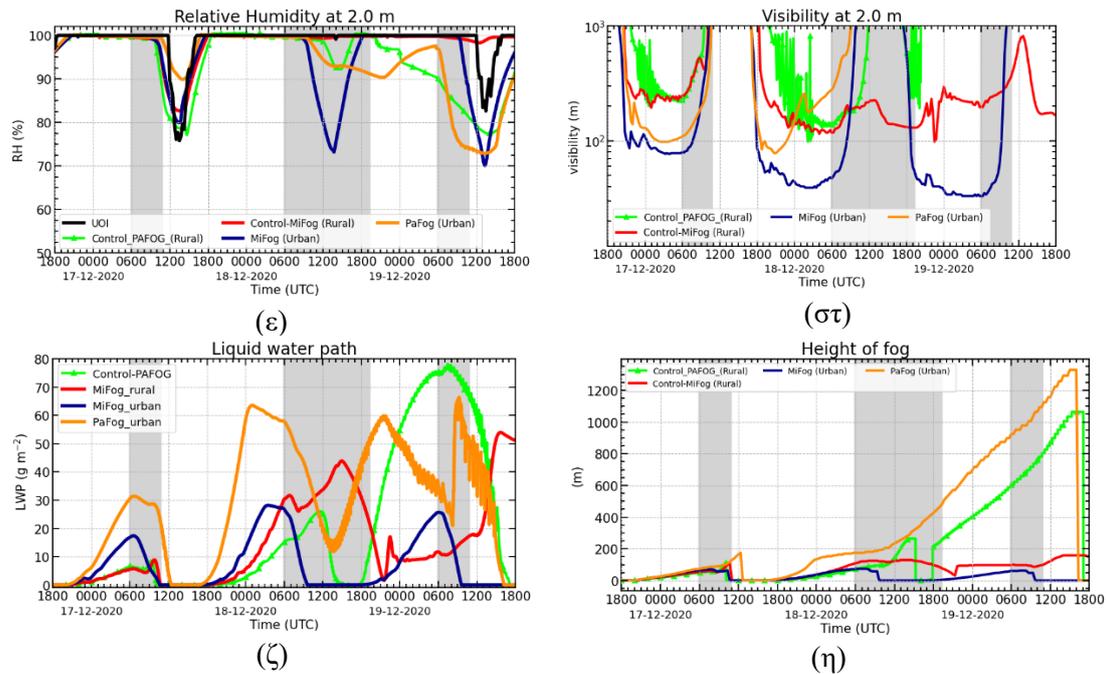
Στο ακόλουθο Σχήμα 4.1.13 παρατηρούμε ότι κατά την πρώτη ημέρα της προσομοίωσης (17/02), οι θερμοκρασίες στην επιφάνεια (Σχήμα 4.1.13β) και στα δύο μέτρα (Σχήμα 4.1.13α) δεν παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ τους, τόσο ως προς τον τύπο των αερολυμάτων όσο και ως προς το είδος του μοντέλου (παραμετροποιημένης και πλήρους μικροφυσικής). Οι μεγαλύτερες διαφορές παρατηρούνται για τις μέγιστες θερμοκρασίες, που όμως πάλι είναι σχετικά μικρές και δεν ξεπερνούν τους 2 K. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρούνται και για τη σχετική υγρασία (Σχήμα 4.1.13ε), όπου καταγράφεται παρόμοια πτώση κατά τις μεσημεριανές ώρες. Ωστόσο, η πτώση αυτή είναι λιγότερο έντονη στην προσομοίωση με αστικά

αερολύματα του PaFog (πορτοκαλί καμπύλη) εξαιτίας της μικρότερης θερμοκρασίας τις μεσημβρινές ώρες στην περίπτωση αυτή (Σχήμα 3.1.13α).

Παρά τις ομοιότητες σε θερμοκρασία και υγρασία, τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης ευαισθησίας δείχνουν ότι το είδος (ο τύπος) των αερολυμάτων δημιουργεί μεγάλες διαφορές όσον αφορά στην ομίχλη. Όντως, στα Σχήματα 4.1.13δ,στ,ζ φαίνεται πως οι προσομοιώσεις με αστικά αερολύματα δημιουργούν υποδεικνύουν ομίχλη με μικρότερες ορατότητες και μεγαλύτερα LWP, καθώς και μεγαλύτερα ποσά κατερχόμενης υπέρυθρης ακτινοβολίας στην επιφάνεια, άρα το σχηματισμό πυκνότερης ομίχλης από ό,τι στην περίπτωση των υπαίθριων αερολυμάτων/CCN. Επιπρόσθετα, οι προσομοιώσεις με αστικά αερολύματα παρουσιάζουν συντομότερο χρόνο δημιουργίας (κατά περίπου 1 ώρα) και πιο καθυστερημένο χρόνο διάλυσης ομίχλης (κατά περίπου 20 λεπτά) σε σχέση με τα υπαίθρια αερολύματα. Ο χρόνος δημιουργίας και διάλυσης της ομίχλης φαίνεται στο Σχήμα 4.1.13στ, στο σημείο όπου η καμπύλη της ορατότητας παίρνει τιμές μεγαλύτερες από 1000 m. Επίσης, όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, οι προσομοιώσεις με αστικά αερολύματα συμφωνούν σε μεγαλύτερο βαθμό με τις παρατηρήσεις από ό,τι με υπαίθρια αερολύματα για παραμέτρους όπως η υπέρυθρη και η ηλιακή ακτινοβολία.

Γενικά, οι προσομοιώσεις μεταξύ MiFog και PaFog παρουσιάζουν αρκετά μεγάλη ομοιότητα για τους αντίστοιχους τύπους αερολυμάτων. Οι περισσότερες μετεωρολογικές παράμετροι είναι όμοιες, παρά τις διαφορές στο σχήμα μικροφυσικής των δύο μοντέλων, τουλάχιστον για την πρώτη ημέρα προσομοίωσης. Όπως δείχτηκε, οι κύριες διαφορές εντοπίζονται κυρίως στις ιδιότητες της ομίχλης. Το PaFog, με τις παραμετροποιήσεις μικροφυσικής, δημιουργεί ομίχλη με μεγαλύτερο ύψος (Σχήμα 4.1.13η), μεγαλύτερα ποσά CWC (πάρτημα Α, Σχήμα Π.Α.5) και μεγαλύτερο LWP (Σχήμα 4.1.13ζ) παρά το γεγονός ότι προσομοιώνει ελαφρώς μεγαλύτερες ορατότητες στα 2 m (Σχήμα 4.1.13στ).





Σχήμα 4.1.13: Χρονική εξέλιξη των προσομοιώσεων ευαισθησίας για τον τύπο αερολυμάτων. Με πράσινο και πορτοκαλί φαίνεται η προσομοίωση ελέγχου με υπαίθρια και αστικά αερολύματα του PaFog αντίστοιχα. Με κόκκινο και μπλε οι προσομοιώσεις MiFog με υπαίθρια και αστικά αερολύματα αντίστοιχα. Δίνονται αποτελέσματα για: (α) τη θερμοκρασία εδάφους-αέρα, στα 2 m, (β) τη θερμοκρασία εδάφους, (γ) την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος, (δ) την εισερχόμενη υπέρυθη ακτινοβολία στο έδαφος, (ε) τη σχετική υγρασία, (στ) την ορατότητα στα 2 m, (ζ) το LWP, (η) το ύψος (πάχος) ομίχλης. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με διαθέσιμες μετρήσεις του μετεωρολογικού Σταθμού (μαύρες καμπύλες).

4.1.9 Ευαισθησία στον αριθμό των αερολυμάτων

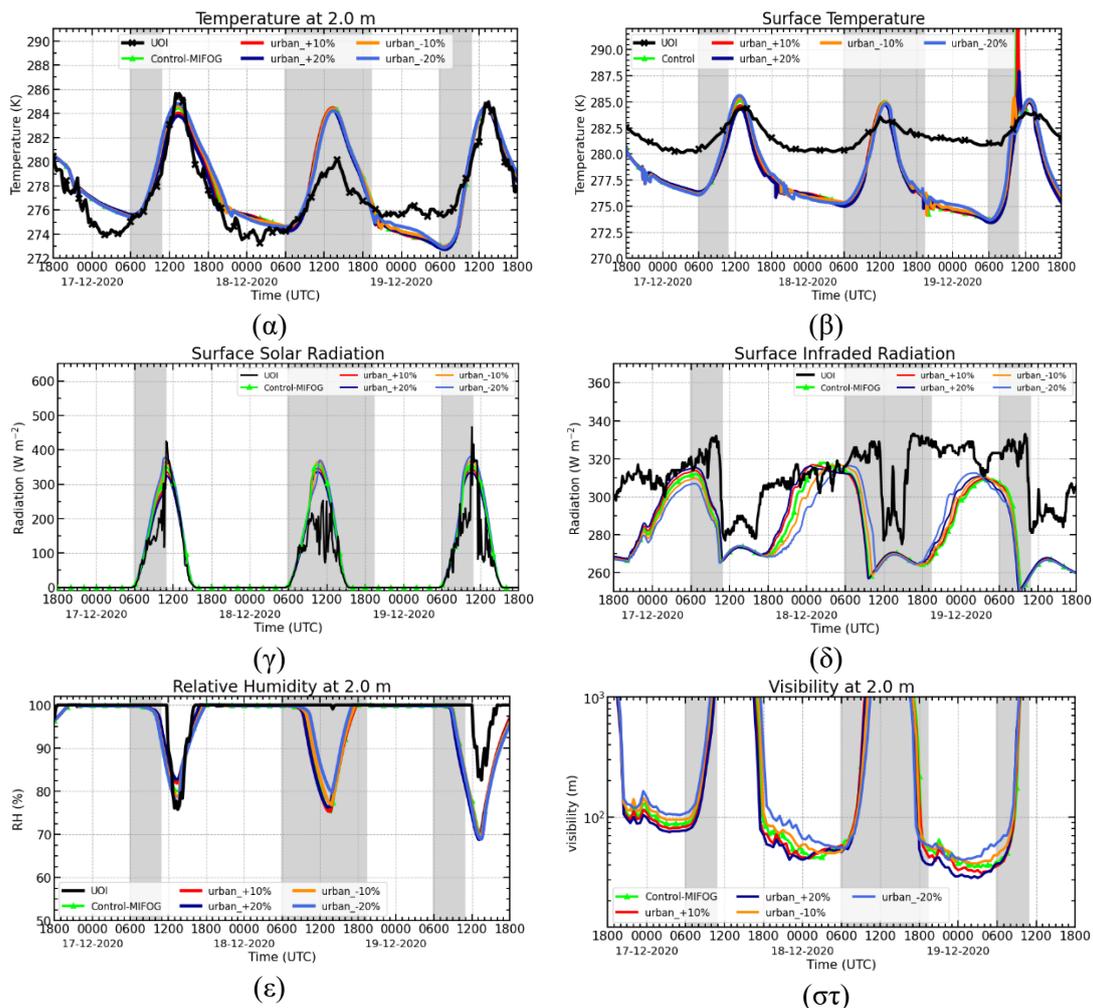
Από την παραπάνω μελέτη ευαισθησίας φαίνεται η σημαντικότητα του ορθού ορισμού του τύπου/είδους των αερολυμάτων. Επισημαίνεται ότι η διαφορετικότητα του τύπου αερολυμάτων συνίσταται σε μεγάλο βαθμό στον αριθμό (τη συγκέντρωση) των αερολυμάτων. Για αυτόν το λόγο, διερευνήθηκε σε μεγαλύτερο βάθος και πιο λεπτομερώς το πώς ο αριθμός των αερολυμάτων επηρεάζει τις ιδιότητες της ομίχλης, καθώς και τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες/παραμέτρους.

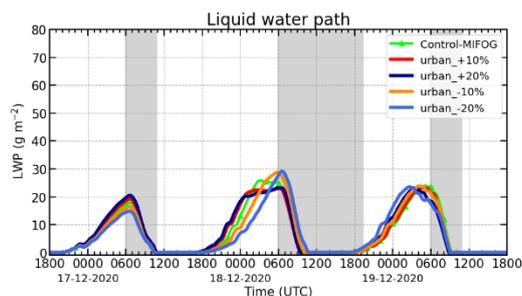
Στην παρούσα, αλλά και στις επόμενες μελέτες ευαισθησίας, η προσομοίωση αναφοράς πραγματοποιείται με χρήση αστικών αερολυμάτων. Η επιλογή αυτή έγινε με στόχο τη ρεαλιστικότερη προσομοίωση του επεισοδίου ομίχλης, καθώς όπως δείχτηκε στην προηγούμενη (Ενότητα 4.1.8) η χρήση αστικών αερολυμάτων/CCN επιτυγχάνει καλύτερη σύγκριση με τις μετρήσεις, για την περίπτωση του επεισοδίου ομίχλης στα Ιωάννινα (που είναι αστικού τύπου περιοχή).

Για τη διερεύνηση του ρόλου του αριθμού των αερολυμάτων αυξήσαμε και μειώσαμε κατά $\pm 10\%$ και $\pm 20\%$ ομοίμορφα όλη την κατανομή μεγεθών των αερολυμάτων που εισάγεται στο MiFog. Με αυτόν τον τρόπο καταφέραμε να αυξήσουμε/μειώσουμε την αριθμητική συγκέντρωση για κάθε προσομοίωση. Η αριθμητική συγκέντρωση για την προσομοίωση αναφοράς είναι $54,380 \text{ \#/cm}^3$, ενώ στις

περιπτώσεις αύξησης και μείωσης του αριθμού οι αντίστοιχες τιμές συγκέντρωσης ήταν 65,256 και 43,504 #/cm³.

Στο Σχήμα 4.1.14 φαίνεται η χρονική εξέλιξη των πέντε (5) προσομοιώσεων, δηλαδή της αναφοράς και των τεσσάρων ευαισθησίας (από δύο για αύξηση και μείωση κατά 10 και 20%). Γενικά, παρατηρούμε πως τα αποτελέσματα δεν παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις και για τις τρεις ημέρες της προσομοίωσης. Ωστόσο, υπάρχουν μερικές μικρές διαφορές, οι οποίες αξίζει να αναφερθούν. Έτσι, βλέπουμε ότι με την αύξηση των αερολυμάτων παρατηρούμε μια ελαφρά μείωση την θερμοκρασίας στα 2 m (Σχήμα 4.1.14α) και της επιφανειακής θερμοκρασίας (εδάφους, Σχήμα 4.1.14β). Αυτή εξηγείται από την ελαφρά μείωση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος (Σχήμα 4.1.14γ) που προκαλείται από τη μεγαλύτερη εξασθένηση λόγω των περισσότερων αερολυμάτων. Η μεταβολή στη θερμοκρασία επάγει διαφορές και στη σχετική υγρασία (Σχήμα 4.1.14ε), καθώς αυτή μειώνεται περισσότερο με την αύξηση του φορτίου αερολυμάτων. Επιπλέον, μικρές αλλά σημαντικές αποκλίσεις παρατηρούνται και για την υπέρυθη ακτινοβολία (Σχήμα 4.1.14δ), την ορατότητα στα 2 m (σχήμα 4.1.14στ) και το LWP (σχήμα 4.1.14ζ). Αυτές οι αποκλίσεις δείχνουν πως με αύξηση των συγκεντρώσεων των αερολυμάτων η ομίχλη γίνεται πιο πυκνή, έχοντας μεγαλύτερο LWP και μικρότερη ορατότητα, συμβάλλοντας στην αύξηση της κατερχόμενης υπέρυθρης ακτινοβολίας.





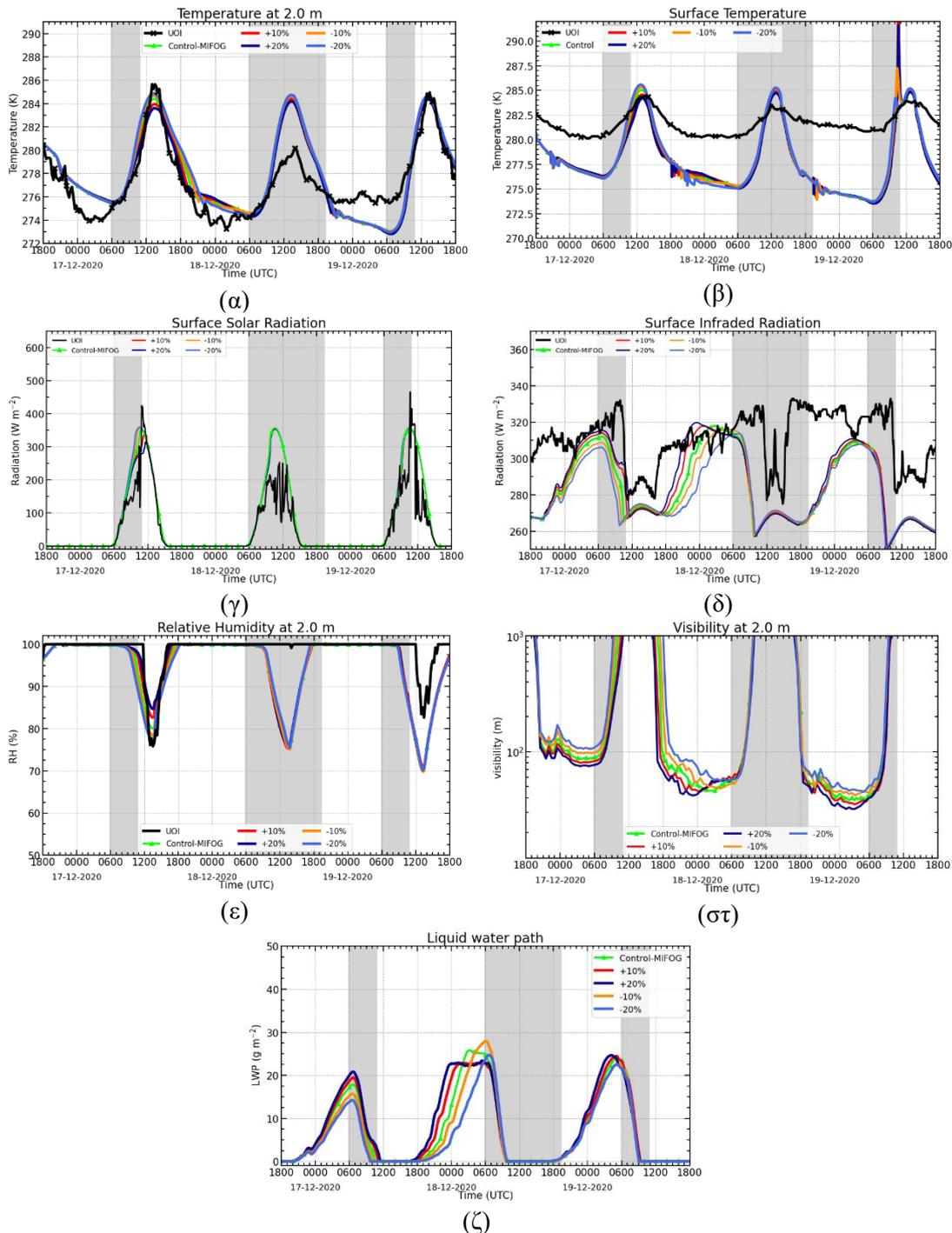
(ζ)

Σχήμα 4.1.14: Χρονική εξέλιξη των προσομοιώσεων ευαισθησίας για τον αριθμό των αερολυμάτων: -20% (ανοιχτό μπλε), -10% (πορτοκαλί), +10% (κόκκινο), +20% (σκούρο μπλε) και με ανοιχτό πράσινο η προσομοίωση αναφοράς. Δίνονται αποτελέσματα για (α) τη θερμοκρασία εδάφους-αέρα στα 2 m, (β) τη θερμοκρασία του εδάφους, (γ) την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος, (δ) την υπέρυθη ακτινοβολία στο έδαφος, (ε) τη σχετική υγρασία, (στ) την ορατότητα στα 2 m, (ζ) το LWP. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με διαθέσιμες μετρήσεις του μετεωρολογικού Σταθμού (μαύρες καμπύλες)

4.1.10 Ευαισθησία στο υδατοδιαλυτό μέρος (ε) των αερολυμάτων

Όσον αφορά στα αερολύματα και την επίδρασή τους στην ομίχλη, εκτός από τον αριθμό (συγκέντρωσή) τους, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η ικανότητά τους να συμπυκνώνουν υδρατμούς (η υγροσκοπικότητά τους) και να δρουν ως CCN. Στο μοντέλο πλήρους φυσικής MiFog η ικανότητα αυτή εισάγεται μέσω του υδατοδιαλυτού μέρους (ε) των αερολυμάτων, το οποίο περιέχεται στον υπολογισμό των καμπύλων Köhler. Το υδατοδιαλυτό αυτό μέρος δεν είναι σταθερό για όλη την κατανομή μεγεθών των αερολυμάτων, αλλά μειώνεται γραμμικά από την αρχή της κατανομής αερολυμάτων, δηλαδή τα μικρότερα αερολύματα, ακτίνας 0.01 μm, έως αυτά με ακτίνες 1 μm. Ύστερα το μέρος αυτό παραμένει σταθερό έως το τέλος της κατανομής, δηλαδή έως τα 10 μm. Οι αρχικές τιμές των τιμών αυτών φαίνονται στον Πίνακα 2.4.2.

Στην παρούσα μελέτη ευαισθησίας μεταβάλαμε τις αρχικές τιμές της υδατοδιαλυτότητας ομοιόμορφα για όλο το φάσμα των αερολυμάτων κατά $\pm 10\%$ και $\pm 20\%$ σε σχέση με τις αρχικές τους τιμές. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνονται στο Σχήμα 4.1.15. Αρχικά, παρατηρούμε πως τα αποτελέσματα δεν αποκλίνουν σημαντικά μεταξύ τους κατά την διάρκεια των τριών ημερών, παρουσιάζοντας μόνο μικρές διαφορές. Οι διαφορές αυτές έχουν να κάνουν κυρίως με την πυκνότητα της ομίχλης. Έτσι, με αύξηση του υδατοδιαλυτού μέρους η ορατότητα στα 2 m μειώνεται (Σχήμα 4.1.15στ), το LWP αυξάνεται (Σχήμα 4.1.15ζ) ενώ τα ποσά της εισερχόμενης υπέρυθρης ακτινοβολίας στο έδαφος (Σχήμα 4.1.15δ) αυξάνονται. Όλα τα παραπάνω υποδηλώνουν πως με αύξηση του υδατοδιαλυτού μέρους των αερολυμάτων/CCN η ομίχλη γίνεται πιο πυκνή, αποτελέσματα που βρίσκονται σε συμφωνία με τη θεωρία. Επίσης, παρατηρείται ότι με την αύξηση του ε, ενώ η ώρα σχηματισμού της ομίχλης είναι παρόμοια, η ώρα διάλυσης διαφέρει, όντας πιο καθυστερημένη κατά 1-2 ώρες περίπου.



Σχήμα 4.1.15: Χρονική εξέλιξη των προσομοιώσεων ευαισθησίας για μεταβολή του υδατοδιαλυτού μέρους (ϵ) των αερολυμάτων: -20% (ανοιχτό μπλε), -10% (πορτοκαλί), +10% (κόκκινο) και +20% (σκούρο μπλε). Δίνονται αποτελέσματα για (α) τη θερμοκρασία εδάφους-αέρα στα 2 m, (β) τη θερμοκρασία του εδάφους, (γ) την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος, (δ) την υπέρυθη ακτινοβολία στο έδαφος, (ε) τη σχετική υγρασία, (στ) την ορατότητα στα 2 m, (ζ) το LWP. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με διαθέσιμες μετρήσεις του μετεωρολογικού Σταθμού (μαύρες καμπύλες)

4.1.11 Ευαισθησία στο χρόνο εκκίνησης

Στα αριθμητικά προγνωστικά μοντέλα εκτός από την αρχικοποίηση των ατμοσφαιρικών, εδαφικών και μικροφυσικών παραμέτρων είναι σημαντική και η ώρα

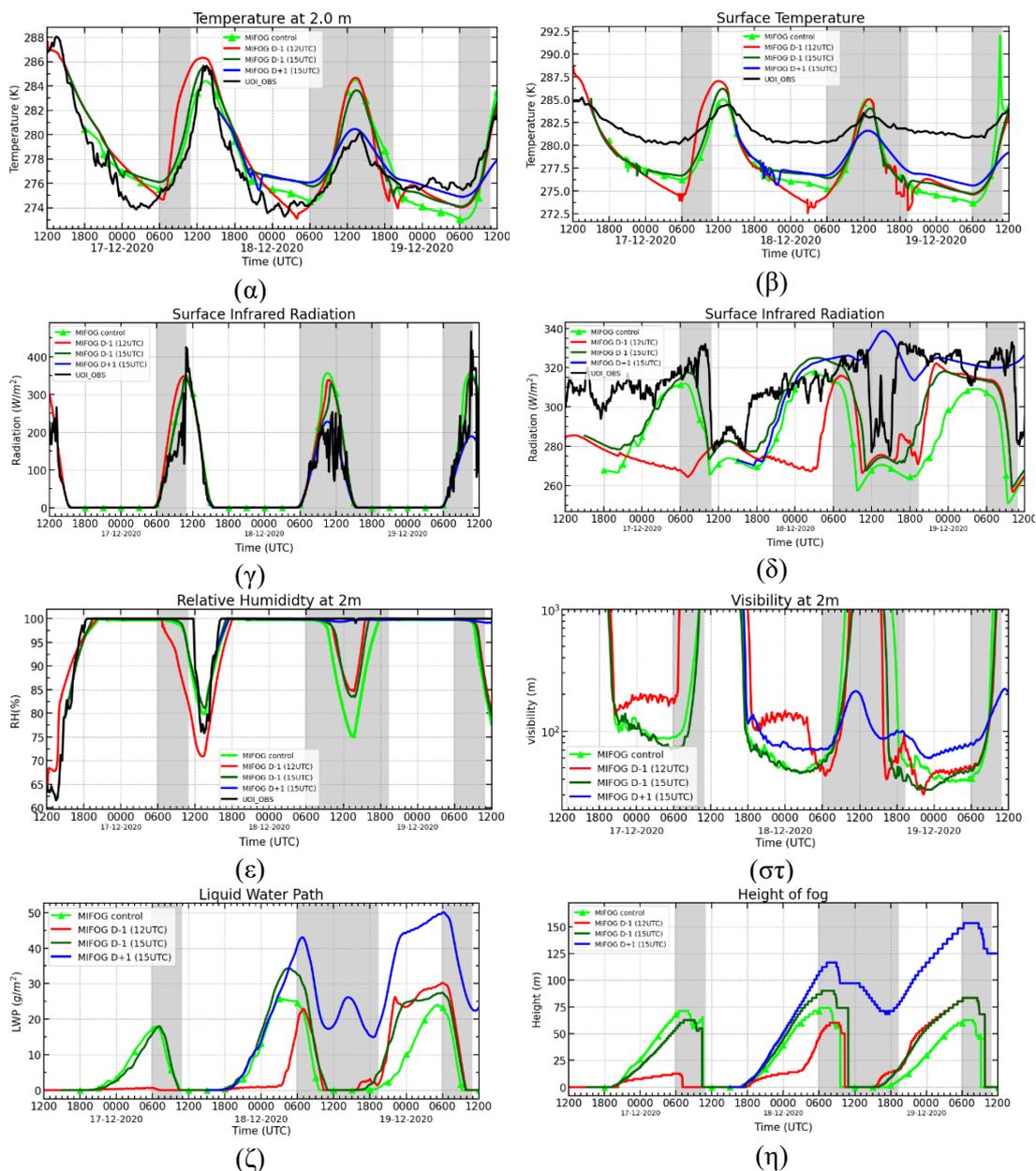
εκκίνησης της προσομοίωσης. Η ανάγκη για ορθή εκκίνηση είναι ακόμα μεγαλύτερη σε μονοδιάστατα αριθμητικά μοντέλα, στα οποία απουσιάζουν οι όροι μεταφοράς. Για να αποφευχθούν διαφοροποιήσεις που υφίστανται οι μετεωρολογικές παράμετροι εξαιτίας των όρων μεταφοράς η εκκίνηση του μοντέλου πρέπει γίνει κοντά στον χρόνο δημιουργίας του φαινομένου.

Στην παρούσα μελέτη, ελλείπει πραγματικών δεδομένων παρατήρησης, δε είναι γνωστός ο ακριβής χρόνος σχηματισμού της ομίχλης, έτσι κρίθηκε απαραίτητο να διερευνηθεί ο χρόνος εκκίνησης του μοντέλου και να εξεταστεί ο βαθμός διαφοροποίησης των αποτελεσμάτων ανάλογα με το χρόνο εκκίνησης. Για να επιτευχθεί αυτό δημιουργήθηκαν τρεις διαφορετικές/νέες προσομοιώσεις για τρεις (3) διαφορετικές ώρες εκκίνησης της προσομοίωσης. Αυτές έχουν τις ίδιες αρχικές συνθήκες όσον αφορά στο ύψος ανάμιξης, την ένταση της κατακόρυφης ταχύτητας του ανέμου, την υγρασία και το είδος του εδάφους. Οι αρχικές συνθήκες που τροποποιήθηκαν, ανάλογα και με βάση την ώρα εκκίνησης, είναι το θερμοκρασιακό και υγρασιακό προφίλ της ατμόσφαιρας και το θερμοκρασιακό προφίλ του υπεδάφους, με βάση τις επικρατούσες για την κάθε ώρα μετεωρολογικές συνθήκες. Τα ατμοσφαιρικά προφίλ (θερμοκρασίας, υγρασίας και έντασης ανέμου) παρουσιάζονται στο παράρτημα Α (Σχήμα Π.Α.7) Σε όλες τις προσομοιώσεις υποθέτουμε πως ο χρόνος ισορροπίας του μοντέλου (spin-up) είναι μηδενικός, καθώς τα αποτελέσματα που εξάγονται από το μοντέλο για την αρχή της προσομοίωσης δεν αποκλίνουν από τις αρχικές συνθήκες που εισήχθησαν.

Η εκκίνηση/αρχικοποίηση της πρώτης προσομοίωσης έγινε στις 12:00 UTC της 16/12/2020 (κόκκινη καμπύλη, D-1_12UTC), της δεύτερης στις 15:00 UTC της 16/12/2020 (σκούρα πράσινη καμπύλη, D-1_15UTC) και της τρίτης στις 15:00 UTC της 17/12/2020 (σκούρα μπλε καμπύλη, D+1_12UTC), ενώ της προσομοίωσης αναφοράς (υπενθυμίζεται) στις 18:00 UTC της 16/12/2020 (ανοιχτή πράσινη καμπύλη, D-1_18UTC). Στο Σχήμα 4.1.16 φαίνονται τα αποτελέσματα των παραπάνω τεσσάρων (4) συνολικά προσομοιώσεων. Γενικά, παρατηρούμε, πως τα αποτελέσματα δεν έχουν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ τους. Για τη θερμοκρασία στα 2 m (Σχήμα 4.1.16α) και στην επιφάνεια (Σχήμα 4.1.16β) παρουσιάζουν αρκετά όμοια χρονική διακύμανση. Οι διαφορές παρουσιάζονται κυρίως στις μέγιστες και ελάχιστες τιμές της θερμοκρασίας, όταν οι προσομοιώσεις αποκλίνουν μεταξύ τους κυρίως κατά 2 K, με τη μεγαλύτερη απόκλιση να παρατηρείται για τη μέγιστη θερμοκρασία το μεσημέρι της 18 και 19/12, όταν είναι περίπου 4 K. Σε ό,τι αφορά στη σχετική υγρασία, παρουσιάζεται και εκεί συνδιακύμανση μεταξύ των προσομοιώσεων, με τις μεγαλύτερες διαφορές να εμφανίζονται τις μεσημβρινές ώρες των παραπάνω ημερών και να οφείλονται στις προαναφερθείσες αποκλίσεις της θερμοκρασίας.

Αντίθετα με τις άλλες μετεωρολογικές παραμέτρους, η ομίχλη παρουσιάζει αρκετές διαφορές ανάλογα με την ώρα εκκίνησης της προσομοίωσης. Αρχικά, η D-1_12UTC (κόκκινη καμπύλη), δηλαδή η πιο πρώιμη προσομοίωση, κατά την πρώτη ημέρα, δε δημιουργεί ισχυρή ομίχλη, έχοντας ορατότητα έως περίπου 200m, LWP 2 g/m² και ύψος/πάχος ομίχλης έως 10-15 μέτρα. Η ασθενής αυτή ομίχλη συνδέεται με σχετικά χαμηλά ποσά υπέρυθρης εισερχόμενης ακτινοβολίας (Σχήμα 4.1.16δ) στο έδαφος. Η αποτυχία της δημιουργίας πυκνής ομίχλης οφείλεται στο γεγονός πως στην προσομοίωση αυτή δε δημιουργήθηκε κατά το πρώτο βράδυ αναστροφή με μεγάλο πάχος (Παράρτημα Α, Σχήμα Π.Α.6). Από τις τελευταίες βραδινές ώρες (προ της

ανατολής του Ήλιου) και ειδικά τις πρώτες πρωινές τα αποτελέσματα συγκλίνουν με αυτά των υπολοίπων προσομοιώσεων. Η προσομοίωση D-1_15UTC (σκούρα πράσινη) ταυτίζεται σε μεγάλο βαθμό με την προσομοίωση αναφοράς, γεγονός που υποδεικνύει ότι η εκκίνηση της προσομοίωσης τρεις ώρες νωρίτερα δεν επηρεάζει ουσιαστικά τα αποτελέσματα. Τέλος, η προσομοίωση D+1_15UTC, δηλαδή κατά 21 ώρες αργότερα από την προσομοίωση αναφοράς, κατά τις πρώτες 12 ώρες εμφανίζει παρόμοια αποτελέσματα με εκείνα της προσομοίωσης αναφοράς, ειδικά ως προς το LWP και το ύψος της ομίχλης, όμως αργότερα παρουσιάζονται μεγάλες διαφορές, καθώς σε αυτήν παρατηρούνται αισθητά μεγαλύτερες τιμές LWP, ενώ η ομίχλη αποκτά μεγαλύτερο ύψος/πάχος, έως και 150 m και δε διαλύεται το μεσημέρι της 18/12.



Σχήμα 4.1.16: Χρονική εξέλιξη των προσομοιώσεων ευαισθησίας στο χρόνο εκκίνησης, για στιγμές εκκίνησης στις 12UTC-16/12 (κόκκινο), στις 15UTC-16/12 (σκούρα πράσινη) και στις 15UTC-17/12 (σκούρο μπλε) και η προσομοίωση αναφοράς (ανοιχτό πράσινο, 18:00 UTC-16/12). Δίνονται αποτελέσματα για: (α) τη θερμοκρασία εδάφους-αέρα, στα 2 m, (β) τη θερμοκρασία εδάφους, (γ) την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος, (δ) την

εισερχόμενη υπέρυθη ακτινοβολία στο έδαφος, (ε) τη σχετική υγρασία, (στ) την ορατότητα στα 2 m, (ζ) το LWP, (η) το ύψος (πάχος) ομίχλης. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με διαθέσιμες μετρήσεις του μετεωρολογικού Σταθμού (μαύρες καμπύλες).

4.2 Βέλτιστη προσομοίωση

Οι παραπάνω μελέτες ευαισθησίας ήταν πολύτιμες για τη δημιουργία μιας περισσότερο (κατά το δυνατό) ρεαλιστικής προσομοίωσης του υπό μελέτη επεισοδίου ομίχλης-αιθαλομίχλης, για την περίοδο 17-19/12/2020. Εξαιτίας της έλλειψης δεδομένων για μερικές παραμέτρους βασιστήκαμε στα αποτελέσματα των μελετών ευαισθησίας, από τις οποίες αντλήσαμε σημαντικές πληροφορίες για το πώς διάφορες παράμετροι επηρεάζουν τις προσομοιώσεις. Έτσι μεταβάλλαμε τις αρχικές συνθήκες, της προσομοίωσης αναφοράς, που περιγράφονται στην Ενότητα 3.3 και 4.1 ανάλογα με το ποια παράμετρος της εκάστοτε μελέτης ευαισθησίας περιέγραφε πιο ικανοποιητικά τις παρατηρήσεις (δεδομένα μετεωρολογικού σταθμού και METAR). Έτσι, δημιουργήθηκε μια τελική τριήμερη προσομοίωση, την οποία ονομάζουμε βέλτιστη, τα αποτελέσματα της οποίας φαίνονται στα σχήματα αυτής της ενότητας. Τα χαρακτηριστικά και τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την προσομοίωση είναι τα εξής: 1) το ατμοσφαιρικό προφίλ θερμοκρασίας και υγρασίας (είναι αυτό που περιγράφηκε στην Ενότητα 3.3, χωρίς να γίνει καμία αλλαγή), 2) η κατακόρυφη ταχύτητα ανέμου, ίση με -3 mm/s , 3) το ύψος ανάμιξης, ίσο με 300 m , με τα αερολύματα (τη συγκέντρωσή τους) πάνω από αυτό να μειώνονται στο -50% , 4) ο τύπος του εδάφους επιλέχθηκε να είναι ο ιλυώδης πηλός (silty clay), 5) το προφίλ θερμοκρασίας του υπεδάφους βασίζεται σε μετρήσεις, οπότε παρέμεινε το ίδιο (αυτό που περιγράφηκε στην ενότητα 4.1, χωρίς να γίνει καμία αλλαγή), 6) η υγρασία του εδάφους από 50% μειώθηκε στο 35% καθώς η αρχική τιμή περιγράφει εδάφη πλούσια σε υγρασία (π.χ. μετά από βροχή), 7) ο τύπος των αερολυμάτων που χρησιμοποιήθηκε είναι ο αστικός χωρίς να έχει γίνει κάποια αλλαγή στον αριθμό ή στην υγροσκοπικότητά τους, δηλαδή ο συνολικός αριθμός και το υδατοδιαλυτό μέρος είναι ίσα με 54.380 και $0.4-0.1$ (όπως περιγράφεται στην ενότητα 2.4.1) και 8) η ώρα εκκίνησης του μοντέλου έγινε στις $15:00 \text{ UTC}$. Επιπλέον, η παρακάτω βέλτιστη προσομοίωση έγινε με συνθήκες ανέφελου ουρανού και με τη χρήση του μοντέλου MiFog. Τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης δίνονται στο Σχήμα 4.2.1.

Κατά την πρώτη ημέρα της προσομοίωσης (17/12/2020) παρατηρούμε πως η θερμοκρασία στα 2 m (Σχήμα 4.2.1α) έχει πολύ καλή συμφωνία με τις παρατηρήσεις, αφού τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζουν ίδια διακύμανση με τις μετρήσεις, ενώ προσομοιώνεται σωστά και η ελάχιστη θερμοκρασία και αρκετά καλά και η μέγιστη (διαφορά/υποεκτίμηση 1.5 K). Η διαφορά αυτή πιθανώς οφείλεται στην υποεκτίμηση από το μοντέλο του μέγιστου της ηλιακής ακτινοβολίας (Σχήμα 4.2.1γ) κατά 100 W/m^2 . Η απόκλιση της μέγιστης θερμοκρασίας δημιουργεί και διαφορές στο ελάχιστο της σχετικής υγρασίας (κατά περίπου 8% , Σχήμα 4.2.1ε) που παρατηρείται τις μεσημβρινές ώρες της πρώτης ημέρας. Όσον αφορά στην επιφανειακή θερμοκρασία (Σχήμα 4.2.1β) παρατηρούμε πως γίνεται μια μεγάλη υποεκτίμηση της ελάχιστης θερμοκρασίας, κατά 5 K , από το μοντέλο. Η μεγάλη υποεκτίμηση, η οποία είναι σε αντίθεση με την καλή συμφωνία για τη θερμοκρασία εδάφους-αέρα, μπορεί να οφείλεται, τουλάχιστον εν μέρει, στα χαμηλότερα ποσά υπέρυθρης ακτινοβολίας που

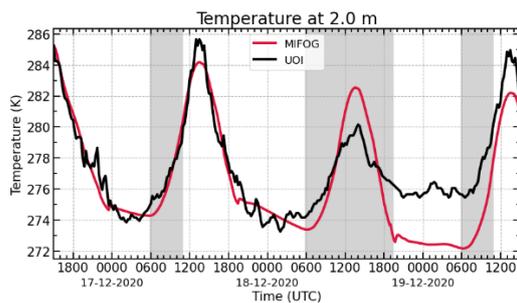
υπολογίζει το μοντέλο, ειδικά κατά τη διάρκεια της νύχτας. Για περίπου 9 ώρες (15:00-00:00 UTC της 16 προς 17/12) η υπέρυθη ακτινοβολία υποεκτιμάται συνεχώς κατά περίπου 25 W/m^2 , γεγονός που συμβάλει στην ψύξη του εδάφους. Όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα (Ενότητα 4.1.2), η υποεκτίμηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας από το μοντέλο μπορεί οφείλεται στην μη ορθή αρχικοποίηση του θερμοκρασιακού προφίλ. Ο ρόλος της υπέρυθρης ακτινοβολίας για τις διαφορές φαίνεται να επιβεβαιώνεται από το γεγονός ότι, αντίθετα, η μέγιστη θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους συμπίπτει με τις μετρήσεις. Η ορατότητα στα 2 m αρχίζει να ελαττώνεται δραματικά κατά τις 18:00 UTC της 17/12/2020, πέφτοντας από τα 1000 στα σχεδόν 100 m, ενώ το LWP, την ίδια ώρα, αρχίζει να αυξάνεται, υποδηλώνοντας την δημιουργία της ομίχλης. Συγκεκριμένα, η ορατότητα μειώνεται έως και τα 70 m, ενώ το LWP αυξάνεται έως 25 g/m^2 τις πρωινές ώρες, λίγο πριν την εμφάνιση της ηλιακής ακτινοβολίας. Επιπλέον, σύμφωνα με το μοντέλο, η ώρα διάλυσης (δηλαδή η στιγμή/ώρα κατά την οποία η ορατότητα αυξάνεται πάνω από τα 1000 m) της ομίχλης την πρώτη ημέρα έγινε στις 10:39 UTC. Η ώρα αυτή συμφωνεί αρκετά με τις παρατηρήσεις των διαθέσιμων METARs, καθώς αυτά αναφέρουν ομίχλη μέχρι τις 10:50 UTC. Ακόμη, η ορατότητα συμφωνεί ικανοποιητικά με τις παρατηρήσεις (μαύρες κουκίδες) κατά την πρώτη ημέρα της προσομοίωσης, καθώς το μοντέλο δίνει τιμές ορατότητας 100 m και λίγο χαμηλότερες, ενώ οι μετρήσεις δείχνουν ορατότητες στα 100 m (όμως, η ανάλυση των αναφορών ορατότητας στα METARs είναι 100 m).

Τις επόμενες δύο ημέρες (18 και 19/12) τα αποτελέσματα του μοντέλου αρχίζουν και αποκλίνουν από τις μετρήσεις/παρατηρήσεις. Η θερμοκρασία στα 2 μέτρα έχει και πάλι συνδιακύμανση με τις μετρήσεις, όμως παρατηρούνται σημαντικές διαφορές στις ελάχιστες και μέγιστες θερμοκρασίες (Σχήμα 4.2.1α), ιδιαίτερα την Τρίτη ημέρα, οι οποίες δε μπορούν να εξηγηθούν από τις διαφορές στην ηλιακή ακτινοβολία (Σχήμα 4.2.1γ). Οι ελάχιστες τιμές της θερμοκρασίας εδάφους (Σχήμα 4.2.1β) παρουσιάζουν ακόμη μεγαλύτερη υποεκτίμηση από το μοντέλο, με το εύρος της απόκλισης να αυξάνεται από 5 στους 8 K. Αντίθετα, οι μέγιστες επιφανειακές θερμοκρασίες συνεχίζουν να βρίσκονται σε αρκετά καλή συμφωνία με τις μετρήσεις. Η σχετική υγρασία τη δεύτερη ημέρα παρουσιάζει την μεγαλύτερη απόκλιση, καθώς το μοντέλο προσομοιώνει μείωσή της κατά τις μεσημβρινές ώρες, ενώ οι μετρήσεις δείχνουν μία ανεπαίσθητη πτώση (στην ουσία διατήρηση σε επίπεδα κορεσμού). Σύμφωνα με την προσομοίωση του μοντέλου η ομίχλη διαλύεται τα μεσημέρια και εμφανίζεται ξανά τις επόμενες δύο ημέρες, με το LWP να αυξάνεται, από 25 σε περίπου 35 g m^{-2} . Από την άλλη πλευρά, το μοντέλο αναπαράγει σταδιακή μείωση της ορατότητας στα 2 m από μέρα σε μέρα, γεγονός που δεν επιβεβαιώνεται από τα METARs, ειδικά για την τρίτη ημέρα (19/12). Την ημέρα αυτή η διάλυση της ομίχλης παρατηρείται στις 10:50 UTC, ενώ το μοντέλο την προβλέπει λίγο πιο νωρίς, στις 10:25 UTC.

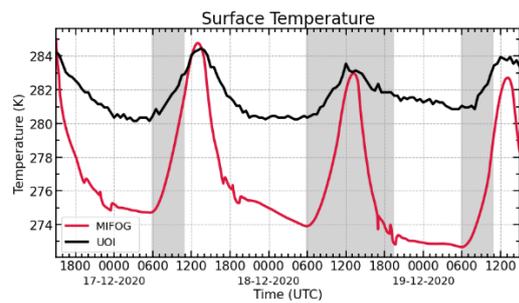
Στο Σχήμα 4.2.2 φαίνονται κατακόρυφες τομές τις ατμόσφαιρας για παραμέτρους σχετικές με την ομίχλη. Στο Σχήμα 4.2.2α διακρίνεται ότι η θερμοκρασιακή αναστροφή έχει σχεδόν σταθερό ύψος κάθε βράδυ, με το πάχος του στρώματος αναστροφής να φτάνει τα 100 m. Στο στρώμα αναστροφής η θερμοκρασία παρουσιάζει σταδιακή μείωση από μέρα σε μέρα, γεγονός που συμβαδίζει με την αντίστοιχη αυξανόμενη υποεκτίμηση της θερμοκρασίας εδάφους-αέρα και εδάφους από το μοντέλο (Σχήματα 4.2.1α,β). Η συγκέντρωση των σταγόνων (Σχήμα 4.2.2γ) στο εσωτερικό της ομίχλης έχει αυξητική τάση και κυμαίνεται από $60 \# \text{ cm}^{-3}$ για την πρώτη ημέρα έως και 100 #

cm⁻³ για την τρίτη, γεγονός που εξηγεί την αντίστοιχη αύξηση του CWC (Σχήμα 4.2.2β) από ημέρα σε ημέρα. Παρά την αυξητική τάση της παρουσίας υγρού νερού και τη μείωση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της ομίχλης, ο υπερκορεσμός παραμένει σταθερός στις τρεις ημέρες και ίσος με 0.06-0.08 %.

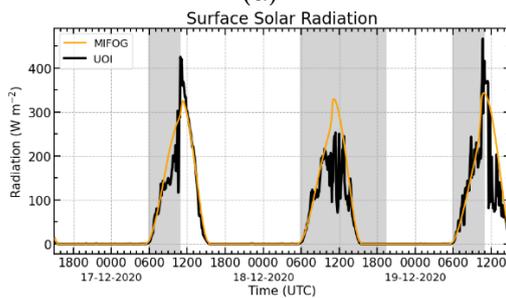
Η αύξηση της συγκέντρωσης των σταγόνων, παρά την διατήρηση ίσων ποσών υπερκορεσμού, μπορεί να εξηγηθεί από τη συσσώρευση αερολυμάτων κοντά στην επιφάνεια (παράρτημα Α, Σχήμα Π.Α.8). Η αυξημένη συγκέντρωση πυρήνων συμπύκνωσης οδηγεί σε εντονότερη ενεργοποίησή τους, με συνθήκες ίδιου υπερκορεσμού, έτσι ο αριθμός των σταγόνων αυξάνεται, δημιουργώντας μεγάλα ποσά CWC και σταδιακά πυκνότερη ομίχλη.



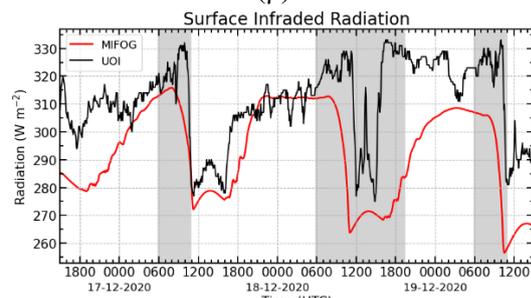
(α)



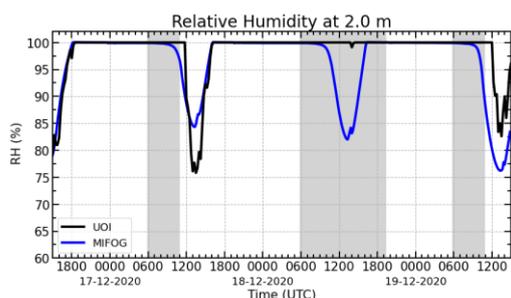
(β)



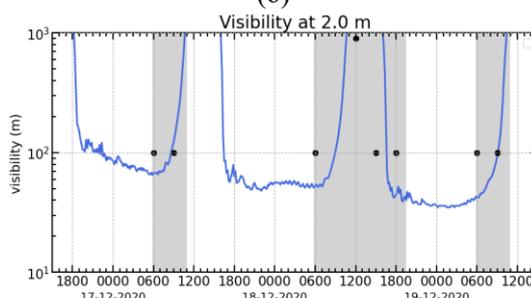
(γ)



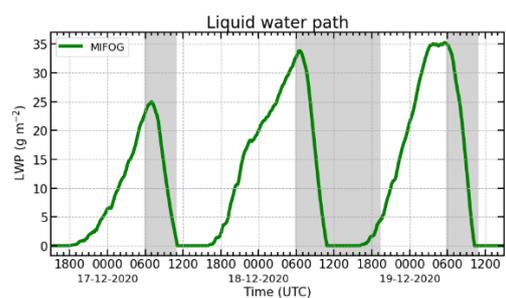
(δ)



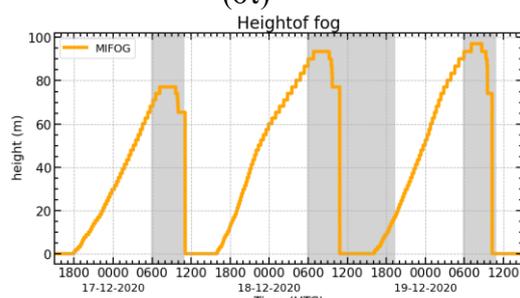
(ε)



(ςτ)

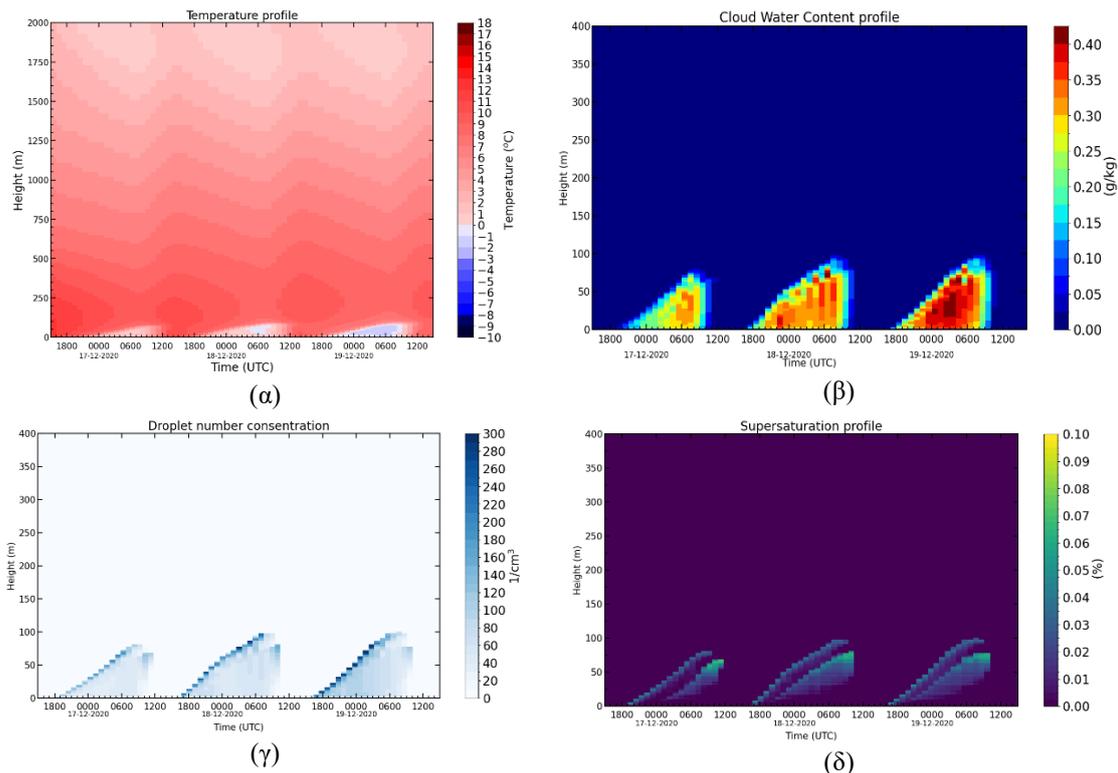


(ζ)



(η)

Σχήμα 4.2.1: Χρονική εξέλιξη της βέλτιστης προσομοίωσης ομίχλης στα Ιωάννινα την περίοδο 17-19/12/2020 με το μοντέλο πλήρους μικροφυσικής MiFog. Με χρωματιστές καμπύλες φαίνονται τα αποτελέσματα του MiFog, ενώ με μαύρες καμπύλες οι παρατηρήσεις/μετρήσεις του μετεωρολογικού σταθμού του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Δίνονται αποτελέσματα για: (α) τη θερμοκρασία εδάφους-αέρα, στα 2 m, (β) τη θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους, (γ) την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος, (δ) την εισερχόμενη υπέρυθη ακτινοβολία στο έδαφος, (ε) τη σχετική υγρασία, (στ) την ορατότητα στα 2 m, (ζ) το LWP και (η) ύψος της ομίχλης. Με γκρι χρώμα υποδεικνύεται η ύπαρξη ομίχλης, όπως έχει αναφερθεί από τα METARs του αεροδρομίου Ιωαννίνων (E.M.Y.), ενώ με μαύρες κουκίδες η ορατότητα που αναφέρεται σε αυτά.



Σχήμα 4.2.2: Χρονική εξέλιξη κατακόρυφων διατομών (α) της θερμοκρασίας, (β) του CWC, (γ) της συγκέντρωσης σταγόνων και (δ) του υπερκορεσμού, της βέλτιστης προσομοίωσης του μοντέλου MiFog για το τριήμερο (17-19/12/2020) επεισόδιο ομίχλης στα Ιωάννινα.

Για την πιο λεπτομερή ποσοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τις μετρήσεις του σταθμού δημιουργήθηκαν διαγράμματα διασποράς (διάχυσης) τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.2.3. Σε αυτά, η τριήμερη προσομοίωση έχει διαχωριστεί ανά ημέρα και έχουν υπολογιστεί στατιστικές παράμετροι για την κάθε μία ξεχωριστά. Πιο συγκεκριμένα συγκρίνονται: (α) η θερμοκρασία στα 2 m και (β) στην επιφάνεια του εδάφους, (γ) η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος, (δ) η εισερχόμενη υπέρυθη ακτινοβολία στο έδαφος και (ε) η σχετική υγρασία. Στη σύγκριση κάθε παραμέτρου αναγράφονται η κλίση και η διατομή της ευθείας των ελαχίστων τετραγώνων, ο συντελεστής συσχέτισης R, το RMSE και το Bias, για την κάθε ημέρα. Με πράσινο, μπλε και κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα (η σύγκριση) για την πρώτη, τη δεύτερη και την τρίτη μέρα, αντίστοιχα. Επισημαίνεται ότι τα διαγράμματα διασποράς κάθε ημέρας περιλαμβάνουν 96 σημεία σύγκρισης (288 για την περίοδο των τριών ημερών).

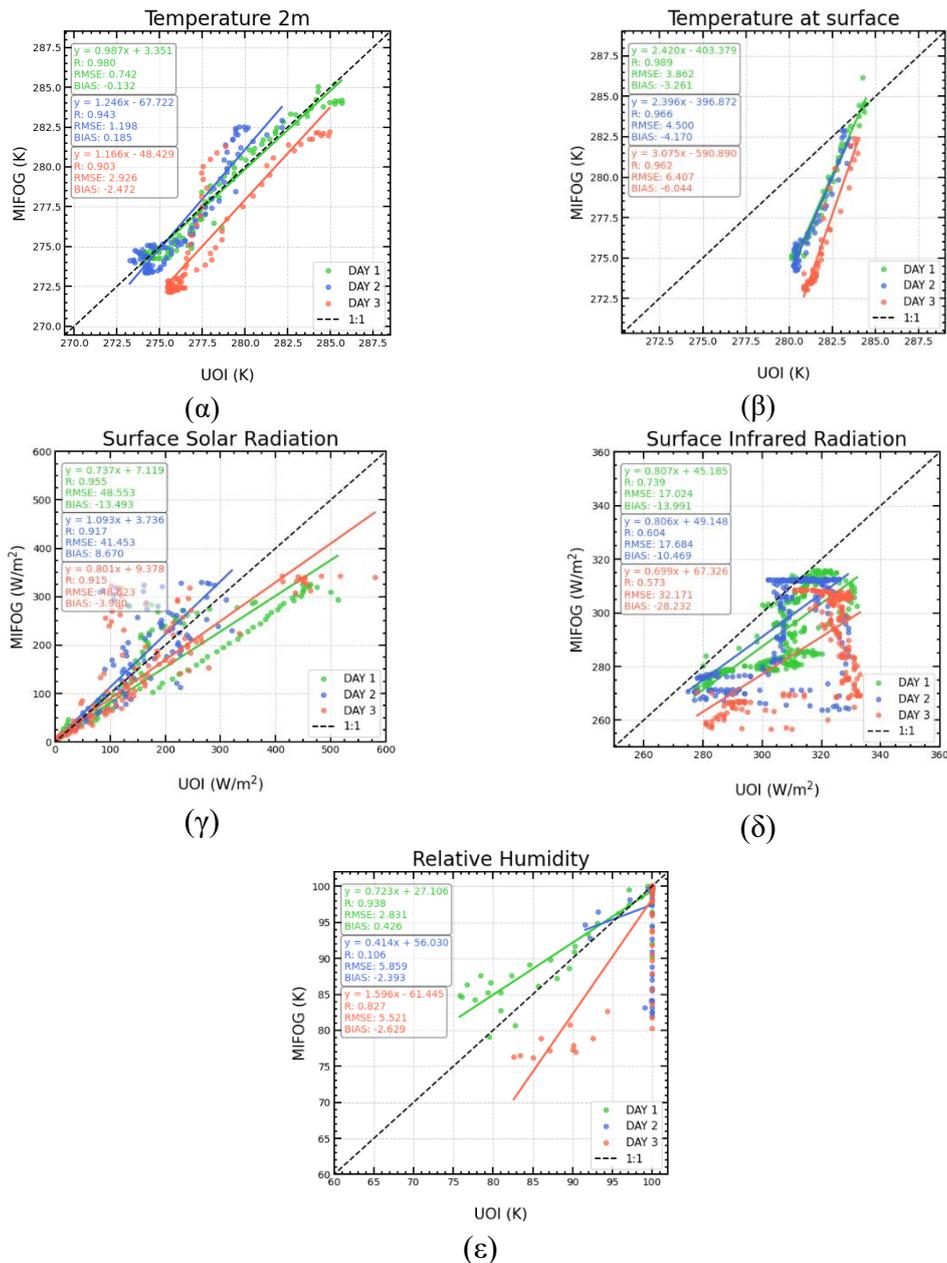
Για την θερμοκρασία στα 2 m (Σχήμα 4.2.3α) παρατηρούμε γενικά καλή συσχέτιση μεταξύ μοντέλου και μετρήσεων. Ιδιαίτερα την πρώτη μέρα έχουμε πολύ καλή συσχέτιση των δύο, με το συντελεστή R να παίρνει την υψηλή τιμή 0.980, την ευθεία ελαχίστων τετραγώνων να έχει κλίση 0.987 και σταθερό όρο 3.351 προσεγγίζοντας πολύ καλά την ευθεία 1:1, το RMSE να έχει μικρή τιμή, ίση με 0.742 και το Bias να είναι επίσης μικρό, ίσο με -0.132 (ελαφρά υποεκτίμηση). Τις υπόλοιπες ημέρες, ειδικά την Τρίτη, παρατηρείται σταδιακή απόκλιση των αποτελεσμάτων.

Για την επιφανειακή θερμοκρασία (εδάφους, Σχήμα 4.2.3β) παρατηρούμε την ίδια καλή γραμμική συσχέτιση μεταξύ του μοντέλου και των παρατηρήσεων, όμως γίνεται μεγάλη υποεκτίμηση από το μοντέλο των μικρών τιμών, που φτάνει τους 5-6 K. Αντίθετα, οι μέγιστες θερμοκρασίες παρουσιάζουν καλή συσχέτιση, αφού συγκλίνουν στην ευθεία 1:1. Την πρώτη ημέρα, ο συντελεστής R είναι πολύ καλός, με τιμή ίση με 0.989, όμως η κλίση της ευθείας ελαχίστων τετραγώνων είναι πολύ μεγάλη, ίση με 2.420, ενώ η διατομή είναι πολύ μεγάλη, ίση με -403.379. Για την πρώτη ημέρα το RMSE έχει τιμές 3.862 και το Bias -3.261, υποδηλώνοντας υποεκτίμηση της επιφανειακής θερμοκρασίας, ενώ τα στατιστικά χειροτερεύουν σταδιακά τη δεύτερη και την τρίτη ημέρα. Για τη θερμοκρασία εδάφους ο αριθμός των σημείων ανά ημέρα είναι $N=48$ (και αθροιστικά 144, για τις τρεις ημέρες).

Η ηλιακή ακτινοβολία (Σχήμα 4.2.3γ) παρουσιάζει πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ μοντέλου και μετρήσεων, με το συντελεστή R να έχει τιμή ίση με 0.955, 0.917 και 0.915 για την πρώτη, δεύτερη και τρίτη ημέρα, αντίστοιχα. Η εξίσωση της γραμμικής παρεμβολής έχει κλίση κυμαινόμενη μεταξύ 0.737 και 1.093 (και συνολικά 0.818 για τις τρεις ημέρες) και διατομή κυμαινόμενη από 3.736 έως 9.378 (και 9.070 συνολικά). Το συνολικό RMSE και το Bias είναι 46.332 και -2.934, με αντίστοιχα εύρη διακύμανσης ανά ημέρα 48.553 – 48.623 και -13.493 - -3.980. Στο διάγραμμα αυτό το σύνολο των σημείων ανά ημέρα είναι $N = 288$ (864 για ολόκληρη την περίοδο).

Η υπέρυθρη ακτινοβολία (Σχήμα 4.2.3δ) είναι εμφανές ότι δεν παρουσιάζει καλή γραμμική συσχέτιση. Την πρώτη ημέρα, ο συντελεστής συσχέτισης R είναι 0.739, η κλίση και ο σταθερός όρος της ευθείας γραμμικής παρεμβολής 0.807 και 45.185, αντίστοιχα. Το RMSE είναι ίσο με 17.024 και το Bias ίσο με -13.991. Όλα τα παραπάνω υποδηλώνουν σημαντική υποεκτίμηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας από το μοντέλο. Τις υπόλοιπες δύο ημέρες τα στατιστικά δεν βελτιώνονται, αντίθετα χειροτερεύουν. Ο αριθμός των σημείων ανά ημέρα είναι $N = 288$ (864 για ολόκληρη την περίοδο).

Τέλος, η σχετική υγρασία την πρώτη ημέρα παρουσιάζει καλή συσχέτιση μεταξύ μετρήσεων και μοντέλου. Ο συντελεστής R είναι ίσος με 0.938, η κλίση και ο σταθερός όρος της ευθείας γραμμικής παρεμβολής είναι 0.723 και 27.106, αντίστοιχα. Το RMSE και το Bias έχουν τιμές για την πρώτη ημέρα ίσες με 2.831 και 0.426, αντίστοιχα. Όλα τα παραπάνω δείχνουν μια μικρή υπερεκτίμηση της σχετικής υγρασίας από το μοντέλο. Τη δεύτερη ημέρα ουσιαστικά δεν υπάρχει συσχέτιση ($R = 0.106$) καθώς, όπως συζητήθηκε στην προηγούμενη υποενότητα, το μοντέλο προβλέπει μείωση της σχετικής υγρασίας τις μεσημβρινές ώρες, η οποία δεν εμφανίζεται στις μετρήσεις, μάλιστα για αυτόν τον λόγο παρουσιάζονται πολλά ακραία σημεία (outliers). Την τρίτη ημέρα η κατάσταση βελτιώνεται εκ νέου, όμως παρατηρείται υποεκτίμηση από το μοντέλο. Το διάγραμμα διασποράς της σχετικής υγρασίας περιλαμβάνει ανά ημέρα 96 σημεία σύγκρισης (και συνολικά 288 για τις τρεις ημέρες).



Σχήμα 4.2.3: Διαγράμματα διασποράς σύγκρισης μεταξύ μοντέλου και μετρήσεων για (α) θερμοκρασία εδάφους-αέρα (2 m) (β) θερμοκρασία εδάφους, (γ) ηλιακή ακτινοβολία (δ) υπέρυθη ακτινοβολία και (ε) σχετική υγρασία στα 2m. Παρέχονται για την κάθε παράμετρο ο γραμμικός συντελεστής συσχέτισης (R), η κλίση και η διατομή της εφαρμοσθείσας ευθείας ελαχίστων τετραγώνων στον πληθυσμό των σημείων, το RMSE και το μέσο Bias.

Στον Πίνακα 4.1 φαίνονται συγκεντρωτικά όλες οι παραπάνω στατιστικές παράμετροι και για τις τρεις ημέρες της προσομοίωσης. Φαίνεται και στον Πίνακα αυτό, όπως συζητήθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο βάσει του Σχήματος 4.2.3, ότι η καλύτερη σύγκριση μεταξύ μοντέλου και μετρήσεων είναι για τη θερμοκρασία εδάφους (στα 2 m) και για την ηλιακή ακτινοβολία, ενώ αντίθετα η χειρότερη σύγκριση είναι για την υπέρυθη ακτινοβολία (SIR).

Πίνακας 4.1: Υπολογισθείσες στατιστικές παράμετροι της σύγκρισης μεταξύ της βέλτιστης προσομοίωσης και των μετρήσεων του σταθμού για όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης (τις τρεις ημέρες 17, 18, 19 Δεκεμβρίου 2020).

	T (2 m)	T (0 m)	SSR	SIR	RH
Κλίση	1.059	2.424	0.818	0.620	0.840
Σταθερός όρος	-17.238	-405.723	9.070	100.713	14.213
R	0.887	0.885	0.915	0.527	0.677
RMSE	1.875	5.040	46.332	23.363	4.927
Bias	-0.806	-4.492	-2.934	-17.564	-1.532

4.3 Μελέτη της επίδρασης των σωματιδίων καύσης βιομάζας στην ομίχλη.

Στην τελευταία αυτή ενότητα της εργασίας μελετούμε την επίδραση που έχουν τα αερολύματα καύσης βιομάζας στην ομίχλη. Υπενθυμίζουμε ότι μία τέτοια μελέτη είναι σημαντική για περιοχές που χαρακτηρίζονται και από τα δύο φαινόμενα, δηλαδή την ομίχλη και τις αυξημένες εκπομπές καύσης βιομάζας, όπως είναι, τουλάχιστον τα τελευταία 15 έτη, το λεκανοπέδιο των Ιωαννίνων. Η μελέτη αυτή επικεντρώνεται σε μία μόνο ημέρα, από τις τρεις της περιόδου μελέτης της προηγούμενης ενότητας (17-19/12/2020), στην 16-17/12/2020. Η επιλογή αυτή αποσκοπεί στη διασφάλιση της μεγαλύτερης δυνατής αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων του μοντέλου. Όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, το μοντέλο εμφανίζει πολύ καλή απόδοση κατά την πρώτη ημέρα της προσομοίωσης, ενώ για τις επόμενες δύο ημέρες παρατηρείται υποβάθμιση της ποιότητας των αποτελεσμάτων. Για τον λόγο αυτό, επιλέχθηκε η μελέτη μόνο της πρώτης ημέρας (17/12) του επεισοδίου ομίχλης-αιθαλομίχλης, καθώς κατά την ημέρα αυτή καταγράφηκε σαφής ώρα διάλυσης της ομίχλης (σύμφωνα με τα δεδομένα METAR στις 12:50 UTC). Αντίθετα, κατά τη δεύτερη ημέρα (18/12) η ομίχλη δεν διαλύθηκε και παρέμεινε έως τις 19/12, γεγονός που θα απαιτούσε προσομοίωση διάρκειας δύο ημερών. Η γνώση της ώρας διάλυσης της ομίχλης εντός της πρώτης ημέρας προσομοίωσης, κατά την οποία τα αποτελέσματα του μοντέλου βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με τις παρατηρήσεις, επιτρέπει την αξιόπιστη διερεύνηση της επίδρασης της έντασης της αιθαλομίχλης στη διάρκεια της ομίχλης. Έτσι, για την διερεύνηση της επίδρασης των σωματιδίων αυτών στην ομίχλη, δημιουργούμε τέσσερεις προσομοιώσεις με την χρήση του μοντέλου MiFog, με την κάθε μια να έχει διαφορετικό σενάριο εκπομπών σωματιδίων. Τα σενάρια αυτά είναι: (1) χωρίς αιθαλομίχλη, (2) ήπια αιθαλομίχλη, (3) έντονη αιθαλομίχλη με φρέσκα αερολύματα και (4) έντονη αιθαλομίχλη με γερασμένα αερολύματα

Η παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκε με το μοντέλο πλήρους μικροφυσικής MiFog, στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν αστικού τύπου αερολύματα. Ο συνολικός αριθμός και η φασματική κατανομή των αερολυμάτων καθορίζονται από την αριθμητική τους κατανομή σε ένα εύρος ακτίνων από 0.01 έως 10 μm . Όσον αφορά στη χημική τους σύσταση, τα σωματίδια αποτελούνται από μίγμα υδατοδιαλυτών αλάτων (υδατοδιαλυτό μέρος ϵ) και αδιάλυτης ουσίας. Στο παρόν μοντέλο η αδιάλυτη ουσία θεωρήθηκε ότι είναι η αιθάλη. Το κλάσμα ϵ δεν είναι σταθερό για όλη την

κατανομή μεγεθών των αερολυμάτων αλλά μειώνεται γραμμικά από 0.4 έως 0.1, για το εύρος μεγεθών αερολυμάτων από 0.01 έως 1 μm . Έτσι, για την προσομοίωση σωματιδίων καύσης βιομάζας, προκειμένου να προσεγγίσουμε την πραγματικότητα, μειώσαμε το διαλυτό μέρος των σωματιδίων. Σύμφωνα με μετρήσεις που έχουν γίνει κατά τη χειμερινή εκστρατεία της PANACEA (Δεκέμβριος 2019 με Φεβρουάριος 2020) βρέθηκε πως το 56% του συνολικού οργανικού άνθρακα είναι υδατοδιαλυτό, τιμή που θεωρείται υψηλή όταν αναφερόμαστε σε σωματίδια καύσης βιομάζας. Το μεγάλο ποσοστό υδατοδιαλυτού οργανικού άνθρακα οφείλεται στη γρήγορη οξειδωσή του μέσω ετερογενών αντιδράσεων (Kaskaoutis et al., 2022). Επισημαίνεται ότι στο παρόν μοντέλο δεν περιλαμβάνονται χημικές αντιδράσεις ή χημική δυναμική, επομένως τα σωματίδια θεωρούνται χημικά αδρανή, δεν οξειδώνονται και άρα δεν αλλάζει το υδατοδιαλυτό τους μέρος. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο δημιουργήθηκαν δύο προσομοιώσεις με φρέσκα και γερασμένα σωματίδια στην περίπτωση της έντονης αιθαλομίχλης. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη μοντελοποίηση των αερολυμάτων, δίνονται στην Ενότητα 2.4.1).

Τα χαρακτηριστικά και η αριθμητική κατανομή μεγεθών των τεσσάρων σεναρίων εκπομπών φαίνονται στον Πίνακα 4.2 και στο Σχήμα 4.3.1.

Το πρώτο σενάριο αντιστοιχεί σε μια χειμερινή μέρα χωρίς αιθαλομίχλη (no smog). Χαρακτηρίζεται από χαμηλές σχετικά εκπομπές σωματιδίων, με συνολική αριθμητική συγκέντρωση 4712 cm^{-3} και συνολική συγκέντρωση μάζας $45\mu\text{g}/\text{m}^3$. Το υδατοδιαλυτό μέρος στην περίπτωση αυτή μειώνεται γραμμικά από 0.6 έως 0.3 για σωματίδια ακτίνας 0.01-1 μm , ενώ μένει σταθερό και ίσο με 0.3 για ακτίνες 1-10 μm .

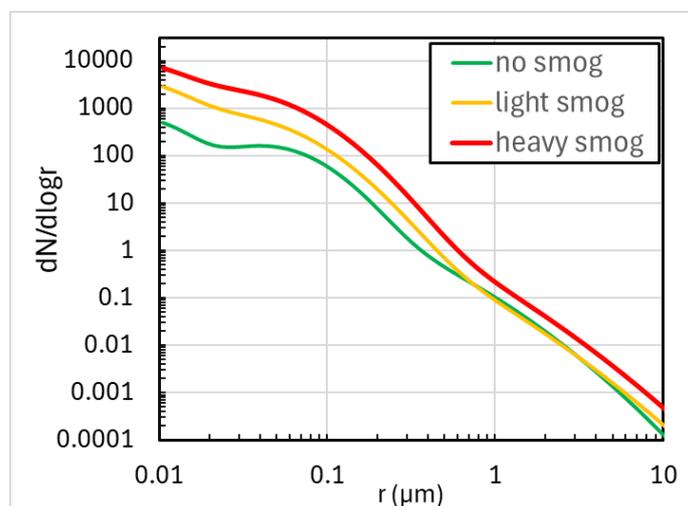
Το δεύτερο σενάριο αντιστοιχεί σε μια χειμερινή ημέρα με ήπια αιθαλομίχλη. Σε αυτήν είναι αυξημένος ο αριθμός των μικρών (λεπτών) αερολυμάτων, εξαιτίας της αυξημένης εκπομπής τους λόγω καύσεων, ενώ ο αριθμός των μεγάλων σωματιδίων παραμένει σταθερός σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο. Η συνολική αριθμητική συγκέντρωση και η συγκέντρωση μάζας του σεναρίου αυτού είναι $22,934\text{ cm}^{-3}$ και $74\mu\text{g}/\text{m}^3$, αντίστοιχα. Το υδατοδιαλυτό μέρος μειώνεται γραμμικά από 0.4 έως 0.1 για σωματίδια ακτίνας 0.01-1 μm ενώ μένει σταθερό και ίσο με 0.1 για ακτίνες 1-10 μm , τιμές μικρότερες του προηγούμενου σεναρίου, ώστε να εξασφαλίζεται η μεγαλύτερη συμμετοχή αιθάλης στο φορτίο των αερολυμάτων.

Το τρίτο σενάριο αντιστοιχεί σε μια χειμερινή ημέρα στην οποία λαμβάνει χώρα έντονη εκπομπή σωματιδίων καύσης βιομάζας. Στην περίπτωση αυτή η αριθμητική συγκέντρωση και η συγκέντρωση μάζας είναι ίσες με $65,256\text{ cm}^{-3}$ και $177\mu\text{g}/\text{m}^3$, αντίστοιχα. Το υδατοδιαλυτό μέρος μειώνεται γραμμικά από 0.3 (τιμή ελαφρώς χαμηλότερη της αντίστοιχης του προηγούμενου σεναρίου) έως 0.1 για σωματίδια ακτίνας 0.01-1 μm ενώ μένει σταθερό και ίσο με 0.1 για ακτίνες 1-10 μm .

Όπως επισημάνθηκε νωρίτερα, τα αερολύματα που προσομοιώνονται με την χρήση του MiFog, είναι χημικά αδρανή και δεν αλλάζουν το υδατοδιαλυτό μέρος τους. Εξαιτίας του γεγονότος ότι οι τιμές του κλάσματος (ϵ) αναφέρονται σε φρέσκα σωματίδια καύσης βιομάζας, δημιουργήσαμε μια τέταρτη προσομοίωση για να δούμε την επίδραση στην ομίχλη των γερασμένων (και άρα οξειδωμένων) σωματιδίων. Αυτό πραγματοποιήθηκε με μία μικρή αύξηση του κλάσματος (ϵ) σε τιμές 0.4 αντί για 0.3. Στα μεγαλύτερα σωματίδια το κλάσμα παρέμεινε σταθερό και ίσο με 0.1, ενώ παράλληλα και η αριθμητική κατανομή μεγεθών παρέμεινε ίδια. Θα πρέπει να τονισθεί ότι η παρουσία γερασμένων αερολυμάτων καύσης βιομάζας είναι αναμενόμενη και

συχνή σε αστικά περιβάλλοντα, στη διάρκεια ωρών ή και ημερών, την ημέρα ή/και τη νύχτα, για παράδειγμα λόγω φωτοχημικών αντιδράσεων (φωτοχημική γήρανση) ή λόγω παρουσίας χημικών στοιχείων όπως οξειδίων του αζώτου (π.χ. ριζών NO_3 και OH^\cdot).

Η επιλογή του υδατοδιαλυτού μέρους των αερολυμάτων για την εκκίνηση του μοντέλου, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, έγινε με βάση τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα Ιωάννινα κατά τη δεύτερη χειμερινή εκστρατεία της PANACEA. Στο πλαίσιο αυτής, η σωματιδιακή μάζα των αερολυμάτων με διάμετρο έως $1 \mu\text{m}$ (PM_{10}) διαχωρίστηκε στα κύρια συστατικά της, δηλαδή σε οργανική ύλη (organic matter), SO_4 , NO_3 , NH_4 και Cl . Με βάση τον προσδιορισμό της συμμετοχής κάθε συστατικού στη συνολική μάζα, υπολογίστηκε και το κλάσμα υδατοδιαλυτότητας (ϵ). Στο παράρτημα (Παράρτημα Β, Σχήμα Π.Β.1) φαίνονται οι μετρήσεις των PM_{10} και ϵ για τη χειμερινή περίοδο της καμπάνιας. Παρουσιάζονται και οι τιμές αυτών για μία ημέρα (25/12/2021) ομίχλης στην οποία δημιουργήθηκε επίσης αιθαλομίχλη. Ακόμη, υπολογίστηκε η μέση ενδοημερήσια διακύμανση του συντελεστή ϵ , ο οποίος κυμαινόταν από 0.2 έως 0.4 (Παράρτημα, Σχήμα Π.Β.2). Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των τιμών του ϵ που εισήχθη στις προσομοιώσεις των παραπάνω σεναρίων. Επίσης, για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των δεδομένων αυτών, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των τιμών PM_{10} μεταξύ των μετρήσεων της PANACEA (όπου χρησιμοποιήθηκε το όργανο ACSM) και του Περιβαλλοντικού Σταθμού της Περιφέρειας Ηπείρου (όπου χρησιμοποιήθηκε το όργανο APDA, Παράρτημα Β, Σχήμα Π.Β.3). Η σύγκριση έδειξε καλή συσχέτιση, με το συντελεστή R να είναι ίσος με 0.861. Παρόλα αυτά, υπάρχουν μερικές διαφορές, οι οποίες εξηγούνται από το ότι τα δύο όργανα (ACSM και APDA) δεν ήταν τοποθετημένα στο ίδιο σημείο, καθώς το ACSM ήταν τοποθετημένο στην Κιάφα (στη θέση του παλιού Περιβαλλοντικού Σταθμού, στον προαύλειο χώρο του 10^{ου} Νηπιαγωγείου Ιωαννίνων), ενώ το APDA βρισκόταν στον Περιβαλλοντικό Σταθμό (Οδός Βηλαρά, προαύλειος χώρος Λυκείου Ζωσιμαίας Σχολής). Επισημαίνεται ότι οι τιμές του ϵ δεν ήταν σταθερές με την πάροδο του χρόνου, σύμφωνα με τις μετρήσεις, σε αντίθεση με αυτές του μοντέλου, οι οποίες διατηρούν την ίδια τιμή σε όλη τη διάρκεια των προσομοιώσεων τα σωματίδια. επίσης, οι μετρήσεις αναφέρουν το υδατοδιαλυτό κλάσμα για το σύνολο της μάζας σωματιδίων με διάμετρο έως $1 \mu\text{m}$. Αντίθετα, η τιμή του ϵ στο μοντέλο είναι φασματική και παίρνει διαφορετική τιμή για κάθε ακτίνα ($r < 1 \mu\text{m}$).



Σχήμα 4.3.1: Αριθμητικές κατανομές μεγέθους αερολυμάτων για τα τρία σενάρια αιθαλομίχλης. Με πράσινο, κίτρινο και κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι κατανομές χωρίς, με ήπια και με έντονη αιθαλομίχλη, αντίστοιχα.

Οι αριθμητικές φασματικές κατανομές που φαίνονται στο Σχήμα 4.3.1, είναι θεωρητικές. Για την αξιοπιστία τους συγκρίθηκαν με μετρήσιμες αντίστοιχες κατανομές (με εύρος 0.005-0.5 μm) που ελήφθησαν στην Αθήνα, κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου (Παράρτημα Β, Σχήμα Π.Β.4). Γενικά, η κατανομή της Αθήνας ταιριάζει με αυτή της ασθενούς αιθαλομίχλης (κίτρινη καμπύλη). Για μεγάλα σωματίδια (0.05-0.5 μm) οι δύο κατανομές συμπίπτουν, ενώ για τα μικρότερα (0.01-0.05 μm) η θεωρητική παρουσιάζει περισσότερα σωματίδια. Επίσης, φαίνεται πως στο εύρος μεγεθών από 0.05 έως 0.5 μm , η κατανομή αποτελείται κυρίως από σωματίδια καύση βιομάζας (καφέ καμπύλη, Σχήμα Π.Β.4)

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά αερολυμάτων (αριθμός, μάζα και υδατοδιαλυτότητα) για τα τέσσερα σενάρια αιθαλομίχλης.

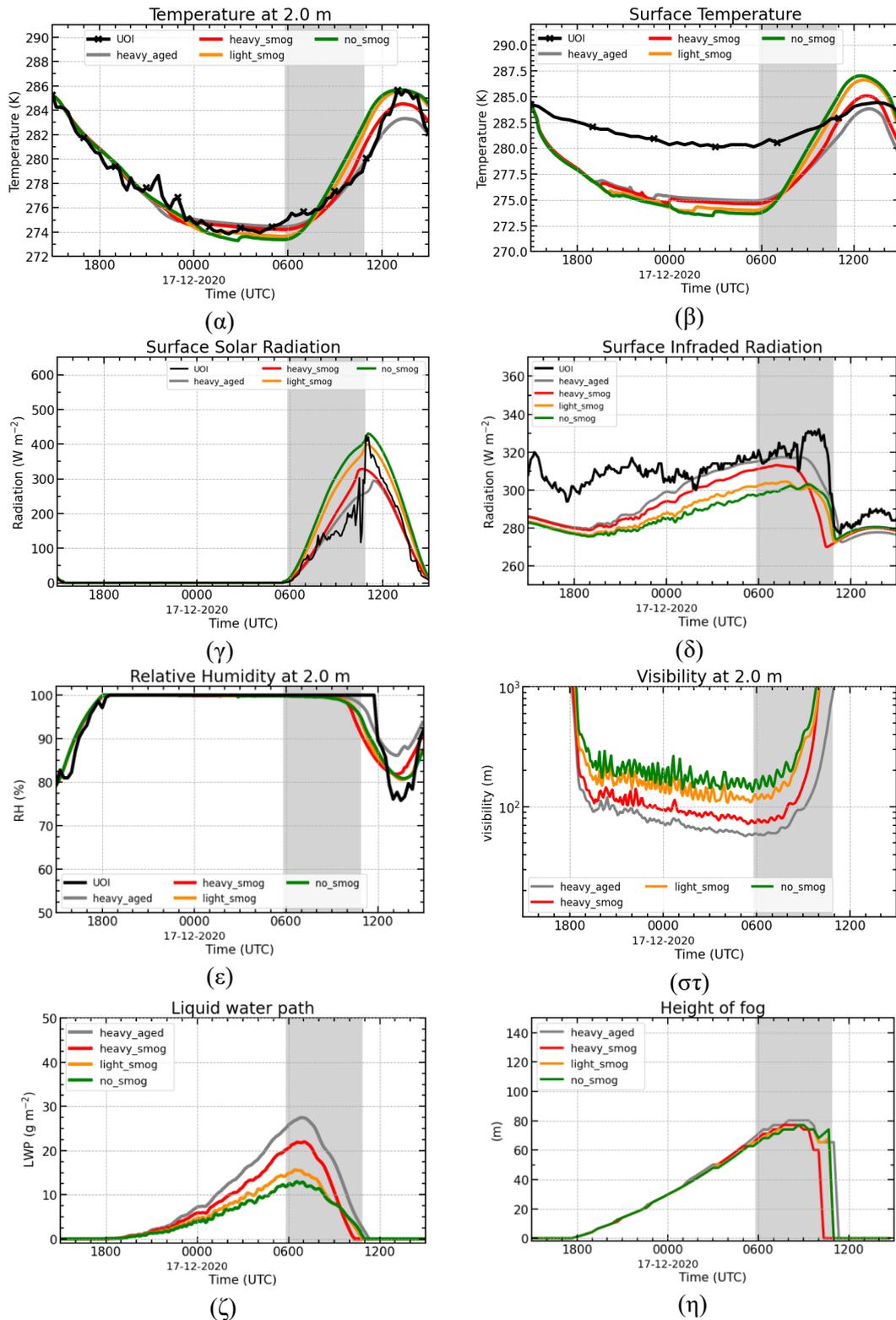
α/α	Χωρίς	Ήπια	Έντονη (φρέσκα)	Έντονη (γερασμένα)
Συνολικός αριθμός (#/cm ³)	4712	22.394	65.256	65.256
Συνολική μάζα (μg/m ³)	45	74	177	177
Υδατοδιαλυτό μέρος (ε)	0.30 – 0.60	0.10 - 0.40	0.10 – 0.30	0.10 – 0.40

Στο Σχήμα 4.3.2 παρουσιάζεται η ενδοημερήσια μεταβολή (από τις 15:00 UTC της 16/12 έως τις 15:00 UTC της 17/12) των βασικών μετεωρολογικών παραμέτρων και της ομίχλης, για τα τέσσερα (4) σενάρια αιθαλομίχλης που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Γενικά, παρατηρείται ότι τόσο για τη θερμοκρασία στα 2 m (Σχήμα 4.3.2α) όσο και αυτήν του εδάφους (Σχήμα 4.3.2β) δεν υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ενώ, όπως παρουσιάστηκε και στην ενότητα 4.2, υπάρχει καλή συμφωνία του μοντέλου με τις μετρήσεις στα 2 m. Καθόλη τη διάρκεια της νύχτας οι θερμοκρασίες των διαφόρων σεναρίων δε διαφέρουν παραπάνω από 2 K. Οι σχετικά μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ των σεναρίων εμφανίζονται για τη μέγιστη θερμοκρασία της 17/12 και είναι κοντά στους 3 K, με το σενάριο της έντονης αιθαλομίχλης με γερασμένα αερολύματα να παρουσιάζει την μικρότερη μέγιστη και το σενάριο χωρίς αιθαλομίχλη τη μεγαλύτερη μέγιστη θερμοκρασία. Οι διαφορές που παρατηρούνται στη (μέγιστη) θερμοκρασία κατά τις μεσημβρινές ώρες, οφείλονται (τουλάχιστον σε μεγάλο βαθμό) στις διαφορές της ηλιακής ακτινοβολίας (Σχήμα 4.3.2γ). Είναι γνωστό ότι τα αερολύματα και τα σταγονίδια της ομίχλης προκαλούν εξασθένηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Επομένως, όταν οι συγκεντρώσεις αυτών είναι μεγαλύτερες προκαλούν μεγαλύτερη εξασθένηση της ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος, οδηγώντας σε μικρότερες θερμοκρασίες. Όντως, φαίνεται στα αποτελέσματα ότι τα σενάρια με μεγαλύτερες συγκεντρώσεις αερολυμάτων (έντονη αιθαλομίχλη) χαρακτηρίζονται από χαμηλότερα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος και μικρότερες θερμοκρασίες. Οι αναφερθείσες διαφορές στην επιφανειακή θερμοκρασία ανάμεσα στα 4 σενάρια επάγουν και αντίστοιχες διαφορές στη σχετική

υγρασία (μικρότερες σχετικές υγρασίες για μεγαλύτερες θερμοκρασίες, Σχήμα 4.3.2ε), οι οποίες όμως δεν είναι μεγάλες, καθώς δεν υπερβαίνουν το 10%.

Βάσει όσων αναφέρθηκαν προηγουμένως (Σχήματα 4.3.2α,β,γ) οι θερμοκρασία και η υγρασία της ατμόσφαιρας δεν παρουσιάζουν διαφορές ανάμεσα στα διάφορα σενάρια τη στιγμή δημιουργίας της ομίχλης (18:00 UTC). Ωστόσο, φαίνεται ότι οι διαφορετικές συνθήκες μικροφυσικής, συγκεκριμένα των αερολυμάτων/CCN, οδηγούν στη δημιουργία ομίχλης με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Η ορατότητα (Σχήμα 4.3.2στ) μετά τις 18:00 UTC μειώνεται σε όλα τα σενάρια. Οι ελάχιστες τιμές της παρατηρούνται κοντά στις 06:00 UTC, λίγο πριν την ανατολή του Ήλιου. Στο σενάριο χωρίς αιθαλομίχλη σχηματίζεται ομίχλη, όμως με τη μεγαλύτερη ορατότητα, με τιμές κοντά στα 200 m (και ελάχιστη τιμή 133 m στις 05:50 UTC). Φαίνεται λοιπόν ότι ομίχλη σχηματίζεται και χωρίς αιθαλομίχλη. Παρόλα αυτά, βέβαια, το γεγονός αυτό δεν υποδεικνύει τη μη ύπαρξη ρόλου των αερολυμάτων στο σχηματισμό της ομίχλης, καθώς και στην περίπτωση απουσίας αιθαλομίχλης (πρώτο σενάριο) υπενθυμίζεται ότι η συνολική συγκέντρωση μάζας είναι $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$, τιμή που είναι υψηλή και συνδέεται βέβαια με την ύπαρξη αερολυμάτων καύσης βιομάζας στο λεκανοπέδιο Ιωαννίνων. Αν η αντίστοιχη τιμή ήταν αρκετά χαμηλότερη, είναι πιθανό να εξασθενούσε ο σχηματισμός ομίχλης, ή και να απουσίαζε εντελώς (αυτό μένει να διερευνηθεί με σχετική μελέτη ευαισθησίας). Αντίθετα, στα δύο σενάρια με ενισχυμένη αιθαλομίχλη (με φρέσκα και γερασμένα αερολύματα) οι τιμές της ορατότητας είναι αισθητά μικρότερες και κυμαίνονται κοντά στα 100 m, με ελάχιστη τιμή στα 57 και 72 m, για τα γερασμένα και φρέσκα αερολύματα, αντίστοιχα. Η περίπτωση με ήπια αιθαλομίχλη παρουσιάζει ενδιάμεσες τιμές ορατότητας, με την ελάχιστη να είναι ίση με 107 m. Όλες οι προσομοιώσεις παρουσιάζουν παρόμοιο κατακόρυφο ύψος/πάχος ομίχλης, το οποίο αυξάνεται σταδιακά έως τη μέγιστη τιμή των 80 m στις 09:00 UTC, Σχήμα 4.3.2η). Παρόλα αυτά, παρουσιάζουν όμως διαφορετικά ποσά LWP (Σχήμα 4.3.2ζ), υποδεικνύοντας πιο πυκνή ομίχλη στην περίπτωση της έντονης αιθαλομίχλης. Όντως, τα σχετικά δύο σενάρια έχουν μέγιστες τιμές που φτάνουν τα 27.5 και 22.5 g/m^2 , για τα γερασμένα και φρέσκα αερολύματα αντίστοιχα. Η ελάχιστη μέγιστη τιμή LWP παρουσιάζεται στο σενάριο χωρίς αιθαλομίχλη, με μέγιστη τιμή στα 12.5 g/m^2 , ενώ στην περίπτωση της ήπιας αιθαλομίχλης το LWP έχει μέγιστη τιμή στα 15 g/m^2 . Αυτές οι διαφορετικές πυκνότητες στην ομίχλη προσδίδουν και διαφορετικά ποσά υπέρυθρης ακτινοβολίας στο έδαφος (Σχήμα 4.3.2δ), με τις πυκνότερες να προσφέρουν τα μεγαλύτερα ποσά.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση μεταξύ των δύο περιπτώσεων έντονης αιθαλομίχλης. Οι δύο περιπτώσεις εμφανίζουν παραπλήσια ποσά LWP, υπέρυθρης ακτινοβολίας και ορατότητας στα 2m. Όμως, η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο περιπτώσεων φαίνεται στην ώρα διάλυσης της ομίχλης. Στην περίπτωση με φρέσκα αερολύματα (χαμηλό ϵ) η ομίχλη διαλύεται στις 10:05 UTC, ενώ στην περίπτωση με γερασμένα αερολύματα η ομίχλη διαλύεται μία ώρα αργότερα στις 11:01 UTC.



Σχήμα 4.3.2: Χρονική εξέλιξη των προσομοιώσεων για τα σενάρια αιθαλομίχλης: χωρίς (πράσινο), ήπιας (πορτοκαλί), έντονης με φρέσκα(κόκκινο) και με γερασμένα(γκρι), την περίοδο 16-17/12/2020. Με μαύρες καμπύλες οι παρατηρήσεις/μετρήσεις του μετεωρολογικού σταθμού του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Δίνονται αποτελέσματα για: (α) τη θερμοκρασία εδάφους-αέρα, στα 2 m, (β) τη θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους, (γ) την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος, (δ) την εισερχόμενη υπέρυθη ακτινοβολία στο έδαφος, (ε) τη σχετική υγρασία, (στ) την ορατότητα στα 2 m, (ζ) το LWP

και (η) ύψος της ομίχλης. Με γκρι χρώμα υποδεικνύεται η ύπαρξη ομίχλης, όπως έχει αναφερθεί από τα METARs του αεροδρομίου Ιωαννίνων (E.M.Y.).

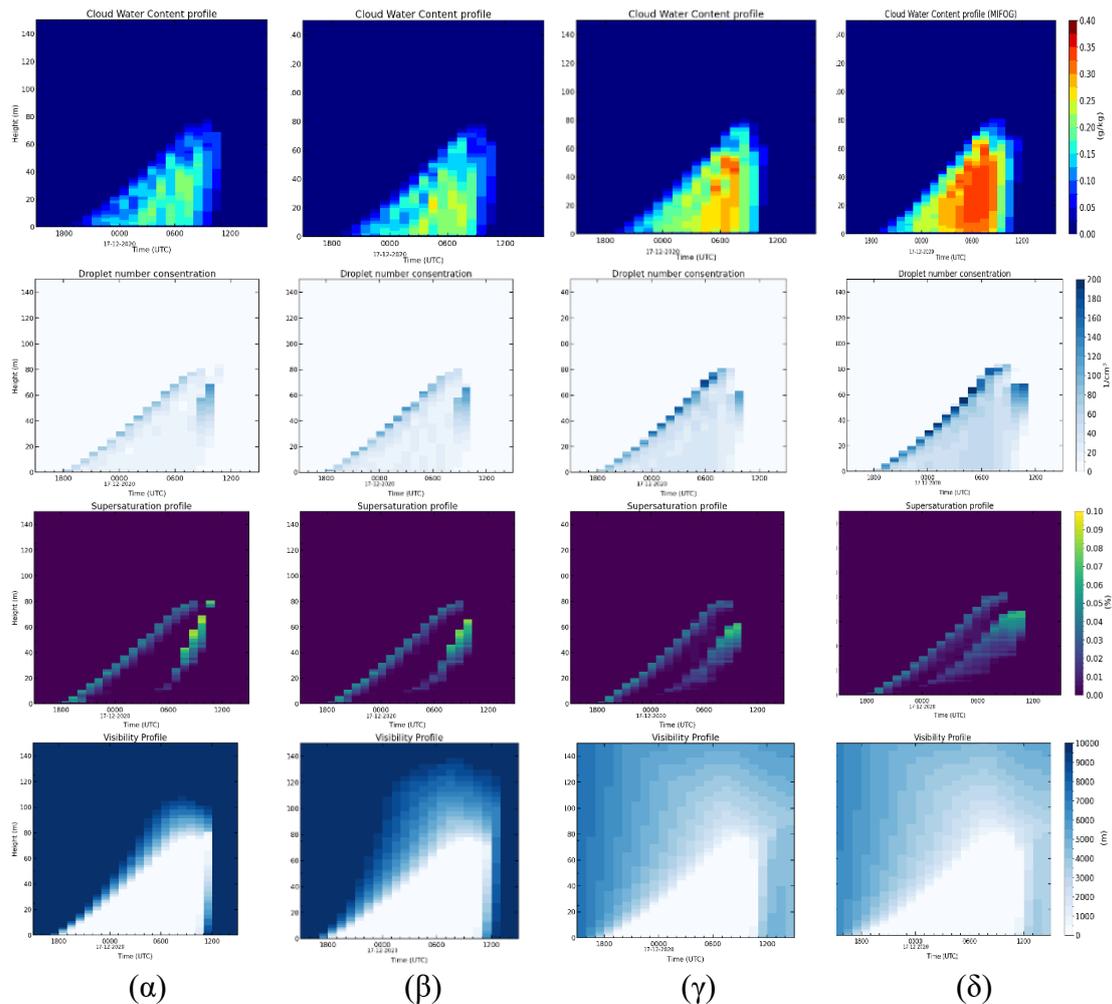
Στο Σχήμα 4.3.3 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες ατμοσφαιρικές τομές του CWC (1^η γραμμή), της συγκέντρωσης σταγόνων (2^η γραμμή), του υπερκορεσμού (3^η γραμμή) και της ορατότητας (4^η γραμμή) για τα τέσσερα σενάρια εκπομπών αερολυμάτων καύσης βιομάζας. Παρατηρούμε πως στην αρχή (έως τις 03:00 UTC), το CWC παίρνει τιμές κάτω από 0.20 g/kg, καθώς πρώτα ενεργοποιούνται τα μεγαλύτερα σε μέγεθος σωματίδια τα οποία είναι όμως λιγότερα. Έπειτα, καθώς η θερμοκρασία του αέρα μειώνεται η ομίχλη πυκνώνει και το CWC αυξάνεται σταδιακά, ενώ παράλληλα η ομίχλη αναπτύσσεται κατακόρυφα. Η αύξηση του CWC δεν είναι ίδια για όλα τα σενάρια αιθαλομίχλης, με αυτά της έντονης αιθαλομίχλης να παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές από 0.35 έως 0.40 g/Kg, ενώ στην περίπτωση χωρίς αιθαλομίχλη ήταν 0.20 – 0.25 g/Kg. Η αύξηση αυτή του CWC παρουσιάζεται σε όλο το πάχος της ομίχλης. Έτσι καθώς το ύψος που αναπτύσσεται η ομίχλη είναι σχεδόν ίδιο (περίπου 80 m) για όλες τις προσομοιώσεις, σε εκείνες όπου το CWC έχει μεγαλύτερες τιμές παρουσιάζεται και μεγαλύτερο LWP.. Η εμφάνιση του υπερκορεσμού, με τιμές έως και 0.05%, στο πάνω μέρος της ομίχλης υποδηλώνει την κατακόρυφη ανάπτυξή της, εξαιτίας της ενεργοποίησης των μεγαλύτερων σωματιδίων. Μετά τις 03:00UTC, παρατηρούνται υπερκορεσμοί και στο μέσο της ομίχλης, οι οποίοι έχουν τιμές από 0.05 - 0.08 % και είναι μεγαλύτεροι από ό,τι στην κορυφή. Με αυτό τον τρόπο ενεργοποιούνται επίσης και μικρότερα σωματίδια, τα οποία επιφέρουν πύκνωση της ομίχλης και αύξηση του CWC. Εδώ παρατηρούμε μια σταδιακή αύξηση του CWC, ξεκινώντας με χαμηλές τιμές για το σενάριο χωρίς αιθαλομίχλη και καταλήγοντας σε μεγάλες τιμές κατά την διάρκεια έντονης αιθαλομίχλης. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη περισσότερων CCN και άρα την δημιουργία περισσότερων σταγόνων οι οποίες επιφέρουν στην ομίχλη νερό. Μεταξύ των δύο περιπτώσεων έντονης αιθαλομίχλης, παρατηρούμε πως με μικρή αύξηση του υδατοδιαλυτού μέρους, για τα φρέσκα αερολύματα καύσης βιομάζας, μεγαλύτερο μέρος της ομίχλης λαμβάνει τιμές CWC πάνω από 0.30 g/kg, αφού ενεργοποιούνται περισσότερα CCN εξαιτίας του μεγαλύτερου υδατοδιαλυτού μέρους. Παρά τις διαφορές του CWC, όλες οι προσομοιώσεις δημιουργούν ομίχλη με χαμηλές ορατότητες. Παρόλα αυτά, διαπιστώνεται ότι στις περιπτώσεις με αυξημένες συγκεντρώσεις αερολυμάτων καύσης βιομάζας, δηλαδή για έντονη αιθαλομίχλη, εκτός από την ξεκάθαρη πτώση της ορατότητας κάτω από τα 1000 m(Σχήμα 4.3.3, 4^η γραμμή) στο εσωτερικό της ομίχλης, παρατηρείται και αισθητή μείωση της ορατότητας πάνω από αυτή. Η μείωση αυτή της ορατότητας δε στοιχειοθετεί την ύπαρξη ομίχλης εκεί, καθώς δεν είναι χαμηλότερη των 1000 m και οφείλεται στην παρουσία υγροποιημένων σωματιδίων (που δεν ορίζονται ως ενεργοποιημένες σταγόνες) και μεγάλων συγκεντρώσεων αερολυμάτων, που συνεισφέρουν στην εξασθένηση της ακτινοβολίας και άρα στη μείωση της ορατότητας.

Χωρίς

Ήπια

Έντονη
(φρέσκα)

Έντονη
(γερασμένα)



Σχήμα 4.3.3: Χρονική εξέλιξη των κατακόρυφων τομών ατμόσφαιρας για το CWC (1^η γραμμή), τη συγκέντρωση σταγονιδίων (2^η γραμμή), του υπερκορεσμού (3^η γραμμή) και της ορατότητας (4^η γραμμή), για τα τέσσερα σενάρια αιθαλομίχλης: (α) χωρίς, (β) ήπια, (γ) έντονη (με φρέσκα) και (δ) έντονη (με γερασμένα) αιθαλομίχλη.

Κεφάλαιο 5^ο Συμπεράσματα και προοπτικές

Συμπεράσματα

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία μελετήθηκε η ομίχλη που δημιουργείται στο λεκανοπέδιο των Ιωαννίνων, καθώς και η επίδραση των σωματιδίων καύσης βιομάζας στις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά της. Η μελέτη αυτών έγινε με τη χρήση, για πρώτη φορά για την περιοχή, αλλά και τον ελληνικό χώρο, των προγνωστικών μονοδιάστατων μοντέλων ομίχλης, με πλήρη και παραμετροποιημένη μικροφυσική, MiFog και PaFog, αντίστοιχα. Τα μοντέλα αυτά είναι κατάλληλα για την προσομοίωση ομίχλης ακτινοβολίας. Για την εγκατάσταση των μοντέλων ήταν απαραίτητη η παροχή οριακών αρχικών συνθηκών, με δεδομένα εδάφους, υπεδάφους και κατακόρυφα προφίλ ατμόσφαιρας. Τα δεδομένα εδάφους και υπεδάφους αντλήθηκαν από το μετεωρολογικό Σταθμό του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, ενώ για το

κατακόρυφο προφίλ της ατμόσφαιρας έγινε εκτίμησή του με χρήση δεδομένων επανάλυσης MERRA-2. Η μελέτη επικεντρώθηκε αφενός σε μελέτες ευαισθησίας του μοντέλου και αφετέρου στην προσομοίωση μίας περίπτωσης ενός τριήμερου επεισοδίου ομίχλης που έλαβε χώρα στο λεκανοπέδιο των Ιωαννίνων κατά τη διάρκεια αυξημένων εκπομπών καύσεων βιομάζας και ακραίας αιθαλομίχλης στις 17-19/12/2020. Επίσης, η συζήτηση των αποτελεσμάτων εστίασε κυρίως στην πρώτη ημέρα των προσομοιώσεων.

Αφού πραγματοποιήθηκε η λήψη και η εγκατάσταση των μοντέλων, αρχικά, πραγματοποιήθηκαν μια σειρά από μελέτες ευαισθησίας σε βασικές παραμέτρους του μοντέλου, έτσι ώστε να ελεγχθεί η συμπεριφορά και η διαφοροποίηση και ευαισθησία των αποτελεσμάτων του μοντέλου στη μεταβολή των αρχικών συνθηκών. Τα αποτελέσματα των μοντέλων συγκρίθηκαν με δεδομένα επιφανείας από το μετεωρολογικό σταθμό του πανεπιστημίου Ιωαννίνων και με METARs, που αναφέρουν την ώρα εμφάνισης και διάλυσης της ομίχλης, από το αεροδρόμιο των Ιωαννίνων. Σύμφωνα με αυτές τις μελέτες βρέθηκε ότι:

- Γενικά, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του MiFog και του PaFog, για τις ίδιες αρχικές συνθήκες, δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους κατά τις πρώτες 36 ώρες προσομοίωσης. Το PaFog, το οποίο διαθέτει παραμετροποιημένο (απλοποιημένο) σχήμα μικροφυσικής, έχει την τάση να δημιουργεί πιο πυκνή ομίχλη σε σχέση με τον MiFog.

- Η ορθή αρχικοποίηση του θερμοκρασιακού προφίλ της ατμόσφαιρας διαδραματίζει μεγάλο ρόλο στην εξέλιξη του φαινομένου της ομίχλης. Βρέθηκε ότι με μεταβολή του θερμοκρασιακού προφίλ κατά μόλις ± 1 K παρατηρείται διαφορετική εξέλιξη των φυσικών διεργασιών, καθοδηγούμενη κυρίως από τη μεταβολή της έντασης και του ύψους της θερμοκρασιακής αναστροφής. Ανάλογα με το πόσο ισχυρή είναι η θερμοκρασιακή αναστροφή, αλλά και η γενική θερμοκρασιακή δομή του ΑΟΣ και το ύψος της αναστροφής, η ομίχλη μπορεί να αναπτυχθεί από επιφανειακό σε χαμηλό νέφος, επηρεάζοντας εντελώς διαφορετικά τις μετεωρολογικές παραμέτρους στην επιφάνεια.

- Στην εξέλιξη της ομίχλης ακτινοβολίας σημαντικό ρόλο έχουν οι καθοδικές κινήσεις του αέρα που δημιουργούνται υπό τις επικρατούσες αντικυκλωνικές συνθήκες. Με την αύξηση της έντασης των καθοδικών κινήσεων παρατηρείται καταστολή της ομίχλης, καθώς αυτή δε μπορεί να αναπτυχθεί επαρκώς. Αντίθετα, χωρίς την ύπαρξη καθοδικών κινήσεων η ομίχλη ανυψώνεται και μάλιστα μετατρέπεται σε χαμηλό νέφος, το μεσημέρι της πρώτης ημέρας της προσομοίωσης.

- Καθοριστικό ρόλο παίζει ο σωστός καθορισμός των ιδιοτήτων του εδάφους. Το είδος του εδάφους, καθώς και το ποσοστό υγρασίας που διαθέτει, επηρεάζουν σημαντικά τη θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους, όπως και τη θερμοκρασία εδάφους-αέρα, στα δύο μέτρα πάνω από αυτό, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται διαφορετικές συνθήκες που επηρεάζουν σημαντικά την ομίχλη. Στην παρούσα εργασία βρέθηκε πως για το Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων οι τύποι εδάφους: ιλυώδης πηλός (silty clay) και αργιλώδης άμμος (silty loam), με ογκομετρική υγρασία του εδάφους 35 %

(m^3/m^3), έδιναν τα καλύτερα αποτελέσματα σε επίπεδο θερμοκρασίας εδάφους μετρημένης από το Σταθμό. Από την άλλη πλευρά, βρέθηκε ότι η μεταβολή κατά ± 2 K, του θερμοκρασιακού προφίλ του υπεδάφους δεν επηρέασε σημαντικά την ομίχλη και τις υπόλοιπες μετεωρολογικές παραμέτρους, υποδεικνύοντας σχετικά μικρή ευαισθησία των μοντέλων ομίχλης σε αυτήν την παράμετρο.

- Ο σωστός καθορισμός του τύπου των αερολυμάτων είναι εξίσου μεγάλης σημασίας. Τα αστικά και τα αγροτικά (υπαίθριου τύπου) αερολύματα σχηματίζουν ομίχλη που έχει το ίδιο πάχος, όμως τα πρώτα την καθιστούν πιο πυκνή, με χαμηλότερες ορατότητες στα 2 m και περισσότερο LWP. Η ώρα διάλυσης της ομίχλης επίσης παρουσιάζει διαφορές και στην περίπτωση των αστικού τύπου αερολυμάτων η ομίχλη διαλύεται περίπου μισή ώρα αργότερα σε σχέση με τα αγροτικά αερολύματα. Για αλλαγές στον αριθμό (πληθυσμό) των αερολυμάτων και στο κλάσμα (ϵ) του υδατοδιαλυτού μέρους τους έως και $\pm 20\%$ δεν παρατηρούνται μεγάλες αλλαγές στα αποτελέσματα. Όσον αφορά τον αριθμό των αερολυμάτων, για μεγαλύτερες αλλαγές (τάξη του 1000%), δηλαδή αν μεταβούμε από ρυπασμένο αστικό περιβάλλον με αριθμητική συγκέντρωση αερολυμάτων κοντά στα 50.000 \#/cm^3 σε αγροτικό περιβάλλον όπου η συγκεντρώσεις είναι εξαιρετικά μικρότερες και περίπου ίσες με 5.000 \#/cm^3 (αλλαγή στον τύπο αερολυμάτων του μοντέλου, από αστικά σε αγροτικά αερολύματα) παρατηρούμε και αρκετά μεγάλες διαφορές όσον αφορά τις ιδιότητες της ομίχλης καθώς για μεγαλύτερες αριθμητικές συγκεντρώσεις έχουμε και μεγαλύτερο αριθμό CCN, άρα περισσότερες σταγόνες και CWC που ισοδυναμούν σε πυκνότερη ομίχλη. Το κλάσμα (ϵ) του υδατοδιαλυτού μέρους δεν μπορεί να πάρει το ίδιο μεγάλες αυξομειώσεις όπως ο αριθμός των αερολυμάτων καθώς οι τυπικές του τιμές κυμαίνονται από 0.1 έως 0.9, οπότε και η επίδρασή του είναι μικρότερου βαθμού.

Ύστερα από τις μελέτες ευαισθησίας, δημιουργήθηκε η βέλτιστη τριήμερη προσομοίωση μιας περίπτωσης ομίχλης και ακραίας αιθαλομίχλης για την περίοδο 17, 18 και 19 Δεκεμβρίου 2020. Η προσομοίωση αυτή αξιολογήθηκε με βάση τα δεδομένα του μετεωρολογικού Σταθμού του πανεπιστημίου και δεδομένων ορατότητας από METARs της E.M.Y., για την περιοχή του αεροδρομίου Ιωαννίνων.

Για το σύνολο της τριήμερης προσομοίωσης παρατηρήθηκαν καλοί συντελεστές συσχέτισης μεταξύ μοντέλου και μετρήσεων για τις παραμέτρους της θερμοκρασίας εδάφους-αέρα (στα 2 m, T2) και της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος (SSR). Για τις παραμέτρους αυτές ο συντελεστής συσχέτισης R ήταν 0.887 και 0.915, αντίστοιχα, ενώ επιτύγχαναν μια καλή γραμμική προσαρμογή (κλίση κοντά στο 1) με αντίστοιχες εξισώσεις $y = 1.059x - 17.238$ και $y = 0.818x + 9.070$, αντίστοιχα. Επιπλέον, για την T2 το RMSE ήταν 1.875 (0.68 %) ενώ το Bias -0.806 K (-0.29 %), υποδηλώνοντας μια μικρή υποεκτίμηση της θερμοκρασίας. Ομοίως για την SSR η το RMSE είναι 46.332 W/m^2 (ή 70.09 %) και το Bias -2.934 W/m^2 (ή -4.44%).

Επίσης, καλή γραμμική συσχέτιση βρέθηκε και για την επιφανειακή θερμοκρασία (T0), με συντελεστή συσχέτισης $R = 0.885$, όμως παρατηρούνταν μια συστηματική υποεκτίμηση της ελάχιστης θερμοκρασίας κατά 5-6 K και ένα μεγάλο μέσο Bias ίσο με -4.492 K (ή -1.59 %). Αντίθετα, οι μέγιστες τιμές της θερμοκρασίας παρουσίαζαν καλή συσχέτιση με τις μετρήσεις.

Οι παράμετροι της εισερχόμενης υπέρυθρης ακτινοβολίας στο έδαφος (SIR) και της σχετικής υγρασίας (RH) δεν παρουσίαζαν τόσο καλές συσχετίσεις μεταξύ μοντέλου και μετρήσεων. Οι αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης υπολογίστηκαν ίσοι με 0.527 για την SIR και 0.677 για την RH. Για την SIR παρατηρήθηκε σημαντική υποεκτίμηση κατά τη διάρκεια της νύχτας. Σε αυτήν την υποεκτίμηση μπορεί να οφείλεται και η υποεκτίμηση της ελάχιστης θερμοκρασίας στο έδαφος που παρατηρήθηκε τις βραδινές ώρες, δεδομένου ότι τις ώρες αυτές, καθώς δεν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία, το έδαφος θερμαίνεται μόνο μέσω της SIR. Έτσι, με μείωση των τιμών της το έδαφος ψύχεται πιο έντονα, λόγω εκπομπής υπέρυθρης ακτινοβολίας και σημειώνονται μικρότερες ελάχιστες θερμοκρασίες.

Όσον αφορά στην πρώτη μόνον ημέρα της προσομοίωσης, οι παραπάνω στατιστικές παράμετροι παίρνουν τις βέλτιστες τιμές τους. Συγκεκριμένα, οι παράμετροι T2, SSR, T0 και RH παρουσίαζαν συντελεστή R μεγαλύτερο του 0.9, ενώ η ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης (προσαρμογής) αυτών πλησιάζει αρκετά την 1:1, με εξαίρεση την T0, για την οποία υπάρχει μια σημαντική υποεκτίμηση της ελάχιστης θερμοκρασίας. Ωστόσο, η SIR ακόμη και για την πρώτη ημέρα προσομοίωσης δεν παρουσιάζει τόσο καλή γραμμική συσχέτιση, με το συντελεστή R να είναι ίσος με 0.739. Αυτή η μη καλή γραμμική συσχέτιση της SIR με τις αντίστοιχες μετρήσεις του σταθμού μπορεί να οφείλεται στην μη απόλυτα σωστή αρχικοποίηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας του ατμοσφαιρικού προφίλ. Πάντως, γενικά, τα στατιστικά και η επίδοση του μοντέλου χειροτερεύουν από ημέρα σε ημέρα υποδηλώνοντας αλλοίωση των αποτελεσμάτων για μεγάλους χρόνους προσομοίωσης. Αυτή η αλλοίωση των αποτελεσμάτων συμβαίνει διότι τα μοντέλα που χρησιμοποιήσαμε (MiFog και PaFog) είναι μονοδιάστατα, δηλαδή λύνουν τις φυσικές εξισώσεις μόνο στο κατακόρυφο και οριζοντίως υποθέτουν ομοιογένεια των θερμοδυναμικών παραμέτρων, ενώ παράλληλα δεν περιέχουν όρους οριζόντιας μεταφοράς. Ακόμη, στις παρούσες προσομοιώσεις δεν έχει γίνει εκ νέου εισαγωγή μετρήσεων (nudging), οπότε οι παράμετροι της προσομοίωσης δεν επαναφέρονται στις μετρήσεις του σταθμού. Χωρίς αυτό, τυχόν λάθη και αβεβαιότητες που επέρχονται από τις αρχικές συνθήκες διαδίδονται και πολλαπλασιάζονται κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.

Τέλος, στην παρούσα εργασία αυτή διερευνήθηκε πιο λεπτομερώς η επίδραση της αιθαλομίχλης και της αυξημένης συγκέντρωσης αερολυμάτων καύσης βιομάζας στο σχηματισμό και τις ιδιότητες της ομίχλης. Για να μελετηθεί η παραπάνω επίδραση δημιουργήθηκαν τέσσερα σενάρια διαφορετικών εκπομπών, τα οποία έχουν διαφορετικές αριθμητικές συγκεντρώσεις και υδατοδιαλυτό κλάσμα αερολυμάτων. Αυτά είναι: (1) ένα σενάριο με χαμηλές εκπομπές ή καθόλου αιθαλομίχλη, (2) ένα σενάριο ασθενούς αιθαλομίχλης, με μέτριες εκπομπές, και (3,4) δύο σενάρια έντονης αιθαλομίχλης με αυξημένες εκπομπές, τα οποία διαφέρουν ως προς το υδατοδιαλυτό κλάσμα των αερολυμάτων (ϵ). Η μία περίπτωση (3) της έντονης αιθαλομίχλης, αντιπροσωπεύει φρέσκα σωματίδια καύσης βιομάζας (με χαμηλό ϵ) ενώ η δεύτερη περίπτωση (4) γερασμένα σωματίδια (με υψηλό ϵ) τα οποία είναι ελαφρώς πιο υγροσκοπικά από τα προηγούμενα. Για τα σενάρια αυτά δημιουργήθηκε προσομοίωση μίας ημέρας (16-17/12/2020) και μελετήθηκε η εξέλιξη των μετεωρολογικών παραμέτρων και των ιδιοτήτων της ομίχλης. Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών φαίνεται πως καθώς μεταβαίνουμε σε μία πιο επιβαρυνμένη ατμόσφαιρα με σωματίδια καύσης βιομάζας η ομίχλη γίνεται πιο πυκνή. Για τις

περιπτώσεις έντονης αιθαλομίχλης το LWP φτάνει σε επίπεδα μεγαλύτερα των 20 g/m² ενώ για την περίπτωση χωρίς αιθαλομίχλη η τιμή του ήταν κοντά στα 12.5 g/m² (αύξηση 60%). Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με εκείνα των Shao et al. (2023), οι οποίοι αναφέρουν ότι για την περιοχή του δέλτα του ποταμού Γιάνγκτσε στην Κίνα, το LWP είναι μεγαλύτερο στην περίπτωση στην οποία η ομίχλη περιέχει μεγαλύτερο φορτίο αερολυμάτων (και CCN). Επιπλέον, στις προσομοιώσεις μας η ορατότητα μειώνεται σημαντικά για τις δύο περιπτώσεις έντονης αιθαλομίχλης, φτάνοντας σε επίπεδα χαμηλότερα των 100 m. Αντίθετα, στη περίπτωση χωρίς αιθαλομίχλη τα επίπεδα ορατότητας είναι περίπου στο διπλάσιο, με τις τιμές της να κυμαίνονται γύρω από τα 200 m. Ενδιάμεση είναι η περίπτωση της ασθενούς αιθαλομίχλης, για την οποία το LWP είναι περίπου 15 g/m² και η ορατότητα παίρνει τιμές κοντά στα 150 m. Η πύκνωση της ομίχλης με ισχυροποίηση της αιθαλομίχλης οφείλεται στο γεγονός ότι με περισσότερες/μεγαλύτερες εκπομπές σωματιδίων καύσης βιομάζας υπάρχουν στο επιφανειακό ατμοσφαιρικό στρώμα περισσότερα διαθέσιμα CCN που ενεργοποιούνται και δημιουργούν σταγόνες, παρά το γεγονός ότι τα σωματίδια καύσης βιομάζας είναι λιγότερο υγροσκοπικά. Έτσι δείχνεται ότι μεταξύ των δύο ανταγωνιστικών παραγόντων για το σχηματισμό ομίχλης, τον αριθμό των CCN και την υγροσκοπικότητάς τους, επικρατεί ο πρώτος παράγοντας. Επιπλέον, λόγω του ότι τα ανθρακούχα αερολύματα καύσης βιομάζας είναι καλοί απορροφητές της ηλιακής ακτινοβολίας, η διάλυση της ομίχλης συμβαίνει νωρίτερα στην περίπτωση με φρέσκα σωματίδια (3) σε σχέση με την περίπτωση γερασμένων σωματιδίων (4). Πιο συγκεκριμένα, βρέθηκε ότι η ώρα εξασθένισης της ομίχλης είναι παρόμοια (διαφορές έως 12 λεπτά) για τις περιπτώσεις χωρίς, ήπιας και έντονης με φρέσκα σωματίδια, αιθαλομίχλης. Αντίθετα, η κατάσταση αλλάζει για την περίπτωση της αιθαλομίχλης με γερασμένα σωματίδια, καθώς η ομίχλη διαλύεται περίπου μία ώρα αργότερα, σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις. Όσον αφορά το LWP και το CWC, οι ποσότητες αυτές αυξάνονται μεταβαίνοντας σε επιβαρυμένα από αερολύματα περιβάλλοντα. Ουσιαστικά το υγροποιημένο νερό αυξάνεται με την αύξηση των αερολυμάτων. Παρατηρείται όμως μια διαφορά μεταξύ της περίπτωσης με φρέσκα (3) και με γερασμένα σωματίδια (4), όπου σε αυτές ο αριθμός τους είναι ίσος όμως στην δεύτερη περίπτωση παρουσιάζονται μεγαλύτερα ποσά υγροποιημένου νερού εξαιτίας του μεγαλύτερου υδατοδιαλυτού κλάσματος (ϵ) των αερολυμάτων. Έτσι, οι σταγόνες που δημιουργούνται εξαιτίας των γερασμένων αερολυμάτων είναι περισσότερες σε σχέση με αυτές που δημιουργούνται από τα φρέσκα σωματίδια. Δεδομένης της ισχυρότερης σκέδασης υπό συνθήκες περισσότερων σταγόνων και περισσότερου υγρού νερού, απαιτούνται μεγαλύτερα ποσά ενέργειας, δηλαδή ηλιακής ακτινοβολίας, για την εξάτμιση των σταγόνων αυτών και της ομίχλης. Αυτό είναι σύμφωνο με τους Maalick et al. (2016) όπου στην εργασία έχουν πραγματοποιηθεί προσομοιώσεις για μια ιδεατή τοποθεσία μέσω γεωγραφικών πλατών (45°) για μία τυπική φθινοπωρινή ημέρα, αναφέρουν πως η μεταβολή του αριθμού των CCN επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό την εξέλιξη του φαινομένου της ομίχλης από την ύπαρξη ή όχι σωματιδίων μαύρου άνθρακα (BC). Επιπλέον, αναφέρουν πως όταν στην ομίχλη υπάρχουν σωματίδια BC η διάλυσή της επέρχεται νωρίτερα εξαιτίας απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας και άρα αύξησης της θερμοκρασίας του περιβάλλοντα αέρα και μείωσης της σχετικής υγρασίας.

Μελλοντικές προοπτικές

Στο πλαίσιο της συνέχισης της παρούσας μελέτης παρατίθενται ορισμένες ιδέες και προοπτικές για μελλοντική διερεύνηση. Αρχικά, η παροχή μετρήσεων σε κρίσιμες παραμέτρους είναι απαραίτητη για την ορθή αρχικοποίηση, εκκίνηση και αξιολόγηση των μοντέλων. Έτσι, η πρόσφατη εγκατάσταση (τον Οκτώβριο του 2025) του καινούργιου αυτόματου μετεωρολογικού σταθμού και ενός ορατόμετρου στο Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων θα προσφέρει για πρώτη φορά μετρήσεις ορατότητας και νέες μετρήσεις υγρασίας και θερμοκρασίας του εδάφους σε μεγαλύτερη ανάλυση (σε 9 επίπεδα στο υπέδαφος αντί για 4) από τον παλιό Σταθμό, οι οποίες είναι εξαιρετικά χρήσιμες για την αρχικοποίηση και την αξιολόγηση του μοντέλου ομίχλης. Με την χρήση αυτών των παραμέτρων σε μελλοντικές προσομοιώσεις ομίχλης μπορεί να γίνει εκκίνηση του μοντέλου με περισσότερη και ακριβέστερη πληροφορία, ενώ θα είναι γνωστή η ακριβής ώρα δημιουργίας και διάλυσης της ομίχλης και μπορούν να αξιολογηθούν καλύτερα και σωστότερα τα αποτελέσματα της ορατότητας του μοντέλου. Αυτό επισημαίνεται διότι λόγω του έντονου τοπικού χαρακτήρα της ομίχλης, ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο όπως το λεκανοπέδιο των Ιωαννίνων, είναι σημαντικό να υπάρχει σύμπτωση της περιοχής για την οποία εκτελούνται οι προσομοιώσεις του μοντέλου και της περιοχής μετρήσεων της ορατότητας, γεγονός που στην παρούσα εργασία δεν ήταν εφικτό καθώς οι προσομοιώσεις έγιναν για το Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, ενώ η ορατότητα αναφέρονταν στο αεροδρόμιο Ιωαννίνων, σε μία ευθεία απόσταση ίση με 9 km. Βέβαια, όπως αποδείχτηκε και από τις εκτελεσθείσες μελέτες ευαισθησίας του μοντέλου, εκτός από τα παραπάνω θα ήταν εξαιρετικά χρήσιμη η γνώση και διαθεσιμότητα από μετρήσεις του κατακόρυφου θερμοκρασιακού και υγρασιακού προφίλ της ατμόσφαιρας, τουλάχιστον για το επιφανειακό στρώμα, έστω το κατώτερο, μέσα στο οποίο λαμβάνει μέρος το φαινόμενο της ομίχλης (ιδιαίτερα ακτινοβολίας). Αυτό μπορεί να εξασφαλισθεί με δύο τρόπους. Πρώτον με την εγκατάσταση/ανάπτυξη ενός μετεωρολογικού πύργου και δεύτερον με τη χρήση ραδιοβολίσεων. Η χρήση δεδομένων μετεωρολογικού πύργου έχει αποδειχτεί εξαιρετικά χρήσιμη για τη βελτίωση της επίδοσης των μοντέλων ομίχλης. Για παράδειγμα, τέτοιου είδους μελέτες έδειξαν ότι στην Κορέα με χρήση δεδομένων από μετεωρολογικό πύργο ύψους 300 m, οι προσομοιώσεις ομίχλης βελτιώθηκαν σημαντικά καθώς η δομή της θερμοκρασίας και της υγρασίας καθ' ύψος περιγραφόταν λεπτομερώς από σχετικές μετρήσεις (Kim et al., 2020). Επισημαίνεται ότι στο Μετεωρολογικό Σταθμό του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων υπάρχει από τη δεκαετία του 1980 αρθρωτός μετεωρολογικός πύργος ύψους 30 m, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σκοπό αυτό. Η χρήση τέτοιων μετρήσεων για διάφορα ύψη πάνω από το έδαφος θα είναι χρήσιμη τόσο για την αρχικοποίηση του μοντέλου όσο και για τη διερεύνηση της δομής της ομίχλης. Ακόμη, το κατακόρυφο ατμοσφαιρικό προφίλ μπορεί να εκτιμηθεί με χρήση άλλων δεδομένων επανανάλυσης, τα οποία προσφέρουν μεγαλύτερη χωρική ανάλυση τόσο οριζόντια όσο και κατακόρυφη. Ένα τέτοιο προϊόν είναι τα δεδομένα CERRA και CERRA-Land, τα οποία διαθέτουν κατακόρυφη ανάλυση από 15 m (για ύψος 15 m πάνω από το έδαφος) έως 100 m για ύψη έως και 500 m (πάνω από το έδαφος).

Απαραίτητη είναι η διεξαγωγή επιπλέον μελετών ευαισθησίας σε άλλες σημαντικές παραμέτρους όπως το ατμοσφαιρικό προφίλ της υγρασίας, το μέγεθος της μείωσης των αερολυμάτων πάνω από το στρώμα ανάμιξης και μελέτη της επίδραση των νεφών στην ομίχλη. Ακόμη, μπορεί να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου για διαφορετικές πηγές δεδομένων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην δημιουργία του κατακόρυφου προφίλ (π.χ. σύγκριση μεταξύ δεδομένων επανάλυσης MERRA-2 και ERA-5)

Επιπλέον, μπορεί να γίνει εγκατάσταση και τρέξιμο των μοντέλων ομίχλης για περιοχές όπου τα παραπάνω δεδομένα είναι διαθέσιμα και να δημιουργηθεί μια καθημερινή πρόγνωση ομίχλης. Μια τέτοια εφαρμογή θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιοχές με συχνά επεισόδια ομίχλης, συμβάλλοντας στην αποφυγή ατυχημάτων, κυρίως σε αεροδρόμια και οδικά δίκτυα. Μία κλασική τέτοια περίπτωση είναι το αεροδρόμιο Μακεδονία της Θεσσαλονίκης, στο οποίο υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα ραδιοβολίσεων, ενώ είναι συχνό το φαινόμενο της ομίχλης (Stolaki et al., 2009, 2011) με έντονες επιπτώσεις (καθυστερήσεις και ακυρώσεις) στις πτήσεις αεροσκαφών. Ακόμη, μελλοντικά θα μπορούσε να τρέξει το μοντέλο και για το αεροδρόμιο Ιωαννίνων, με την προϋπόθεση εγκατάστασης αισθητήρων στον πύργο του αεροδρομίου για την καταγραφή των κατακόρυφων προφίλ θερμοκρασίας και υγρασίας.

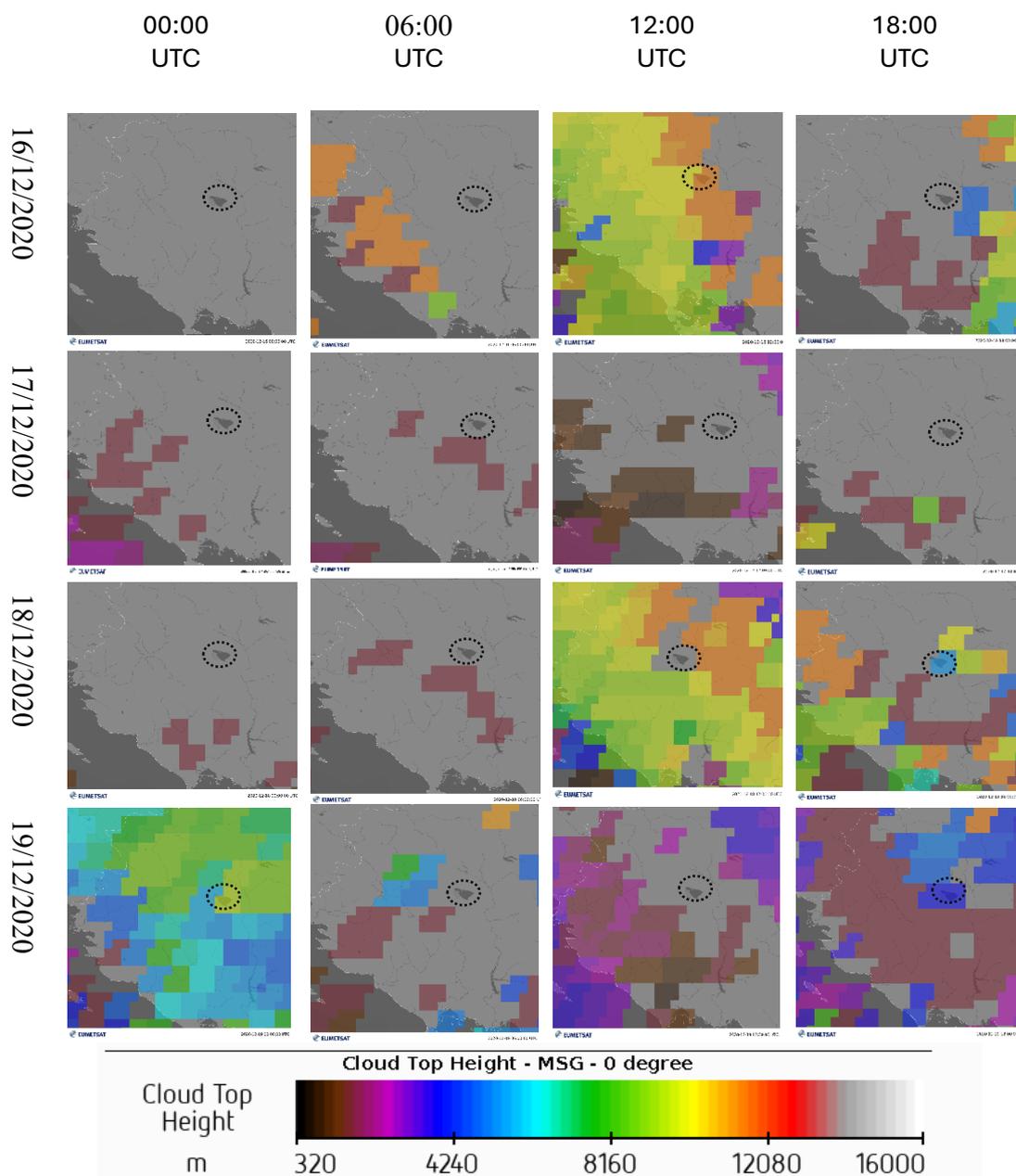
Επιπρόσθετα, για τη δημιουργία ενός συστήματος καθημερινής πρόγνωσης ομίχλης σημαντική είναι η σύζευξη του PaFog ή του MiFog με ένα αριθμητικό μοντέλο καιρού μέσης κλίμακας (π.χ. WRF). Τα δύο μοντέλα ομίχλης είναι μονοδιάστατα και υποθέτουν οριζόντια ομοιογένεια των θερμοδυναμικών παραμέτρων. Με την σύζευξη τους με ένα τρισδιάστατο μοντέλο θα παρέχονται οι όροι μεταφοράς και θα μπορεί να πραγματοποιηθεί πρόγνωση ομίχλης για μεγαλύτερα διαστήματα παρουσιάζοντας καλύτερα αποτελέσματα για μεγαλύτερη διάρκεια προσομοίωσης. Τέτοιου είδους σύζευξη έχει πραγματοποιηθεί σε άλλες περιοχές όπως στην Κορέα, την Αραβική χερσόνησο, και την Ελβετία (Kim et al., 2020; Bartok et al., 2012; Müller et al., 2005).

Τέλος, για την ακριβέστερη εκτίμηση της επίδρασης των σωματιδίων καύσης βιομάζας στην ομίχλη απαραίτητες είναι επιπλέον μετρήσεις, για παράδειγμα αριθμητικών συγκεντρώσεων CCN και της χημικής τους σύστασης και ειδικά υγροσκοπικότητας, οι οποίες θα έχουν μάλιστα μεγάλη διάρκεια, δηλαδή για όλη τη διάρκεια του χειμώνα, με σκοπό τη συστηματική προσομοίωση και μελέτη των επεισοδίων ομίχλης-αιθαλομίχλης. Η διαθεσιμότητα των παραπάνω μετρήσεων/παραμέτρων μπορεί να εξασφαλισθεί είτε με την εγκατάσταση καινούργιων οργάνων, είτε με τη συμμετοχή σε μελλοντικές ερευνητικές εκστρατείες (όπως της PANACEA). Οι μετρήσεις αυτές πρέπει να εστιάζουν στην καταγραφή αφενός ολόκληρης της αριθμητικής κατανομής αερολυμάτων και αφετέρου στον προσδιορισμό του υδατοδιαλυτού κλάσματος των σωματιδίων για ένα φάσμα μεγεθών.

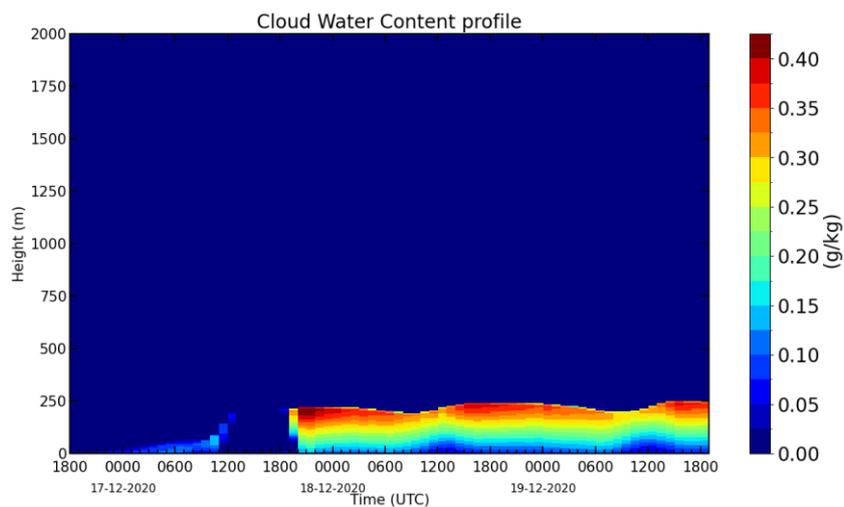
Επιπλέον, η ενημέρωση του κώδικα του μοντέλου για την περιγραφή ρεαλιστικότερων φυσικών διεργασιών μπορεί να αποτελέσει παράγοντα βελτίωσης των προσομοιώσεων. Αλλαγές όπως η προσθήκη εκθετικής μείωσης, της συγκέντρωσης των αερολυμάτων πάνω από το ύψος αναστροφής. Στην παρούσα έκδοση του μοντέλου, παρουσιάζεται ασυνεχής πτώση στο ύψος αναστροφής, μειούμενη απότομα στο 20% της αρχικής. . Επιπλέον, η ενσωμάτωση ενός απλού σχήματος χημείας στο MiFog, το οποίο θα περιγράφει βασικές χημικές διεργασίες με

τις οποίες θα μπορεί να μεταβάλλεται χρονικά το υδατοδιαλυτό μέρος των αερολυμάτων, θα μπορούσε να προσφέρει χρήσιμη γνώση στο πώς η οξείδωση των σωματιδίων καύσεων βιομάζας επηρεάζουν την ομίχλη.

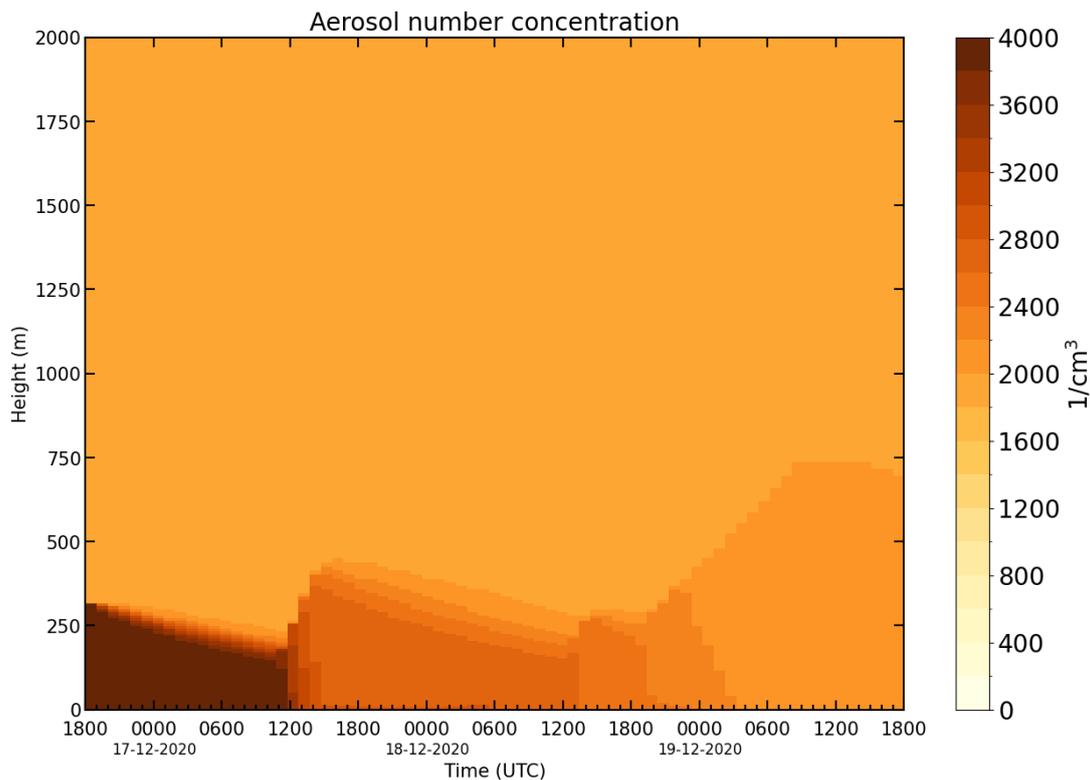
Παράρτημα Α



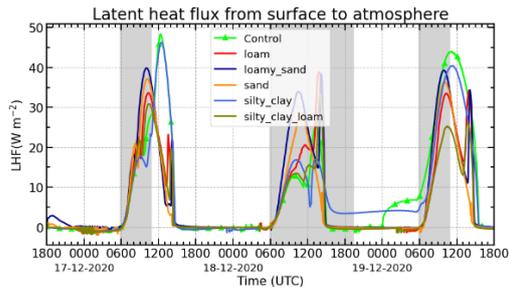
Σχήμα Π.Α.1: Εικόνες ύψους νεφών από το δορυφόρο MSG (Meteosat Second Generation) πάνω από την περιοχή της Ηπείρου κατά τις ημέρες προσομοίωσης, από τις 16 έως τις 19 Δεκεμβρίου 2020, στις ώρες 00, 06, 12, 18 UTC. Παρατηρούνται νέφη ακριβώς πάνω από το λεκανοπέδιο των Ιωαννίνων κατά τις βραδινές ώρες της 18^{ης} και ειδικά της 19^{ης} Δεκεμβρίου 2020.



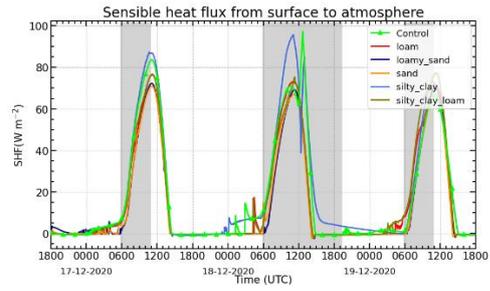
Σχήμα Π.Α.2: Κατακόρυφη κατανομή του CWC, για τη μελέτη ευαισθησίας κατακόρυφης ταχύτητας αέρα έντασης ίσης με -2.0 mm/s.



Σχήμα Π.Α.3: Κατακόρυφη κατανομή της αριθμητικής συγκέντρωσης αερολυμάτων (σε $\#/cm^3$). Διακρίνεται η μεταβολή του ύψους ανάμιξης των αερολυμάτων (στρώματος ανάμιξης) με την πάροδο του χρόνου.

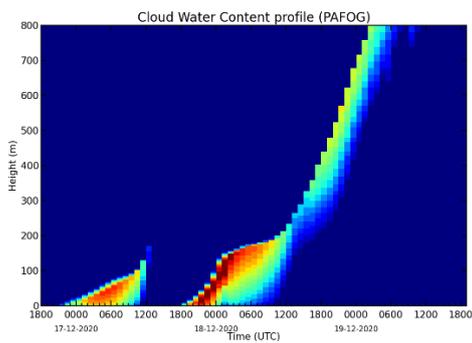


(α)

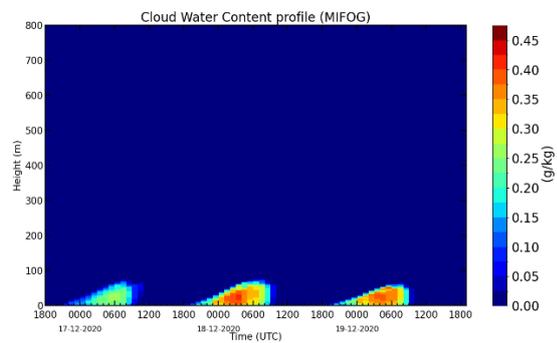


(β)

Σχήμα Π.Α.4: Χρονική εξέλιξη των ροών (α) λανθάνουσας και (β) αισθητής θερμότητας, για τις προσομοιώσεις με διαφορετικό τύπο εδάφους.

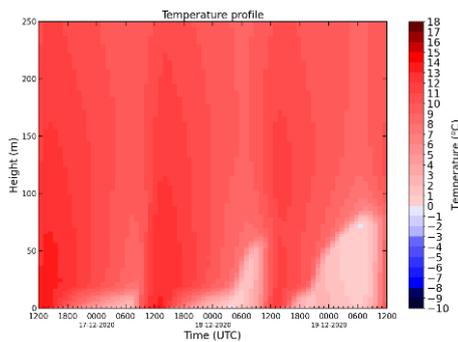


(α)

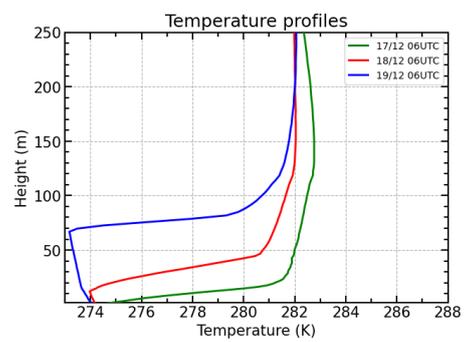


(β)

Σχήμα Π.Α.5: Χρονική μεταβολή της κατακόρυφης διατομής CWC προσομοιώσεων με αστικά αερολύματα για τα μοντέλα (α) PaFog και (β) MiFog.



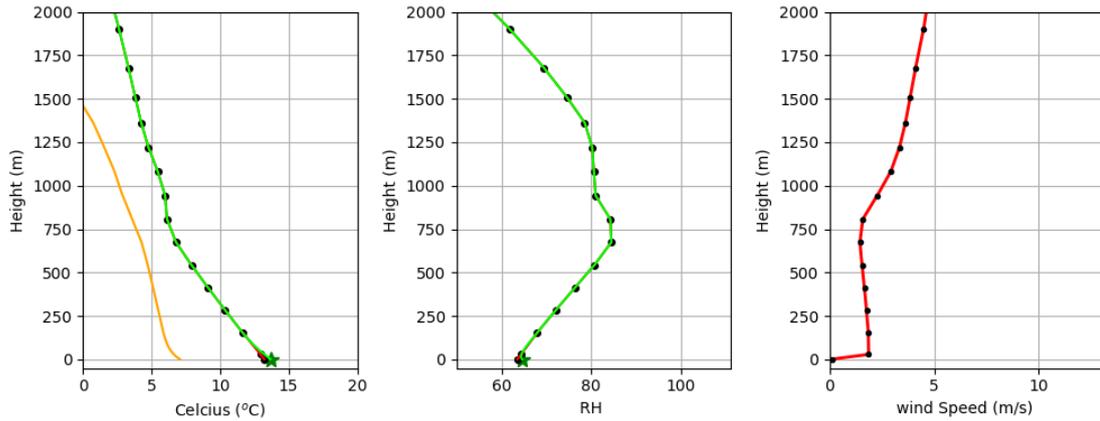
(α)



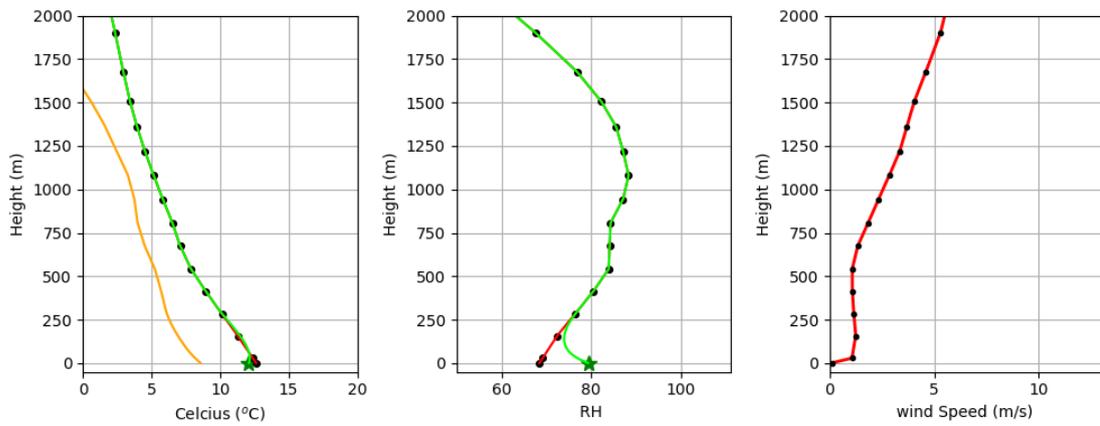
(β)

Σχήμα Π.Α.6: Κατακόρυφο προφίλ θερμοκρασίας της προσομοίωσης D-1_12UTC ελέγχου ευαισθησίας του μοντέλου MiFog στην ώρα εκκίνησης. (α) Χρονική μεταβολή της διατομής του θερμοκρασιακού προφίλ. (β) Κατακόρυφο θερμοκρασιακό προφίλ στις 06:00UTC κάθε ημέρας προσομοίωσης.

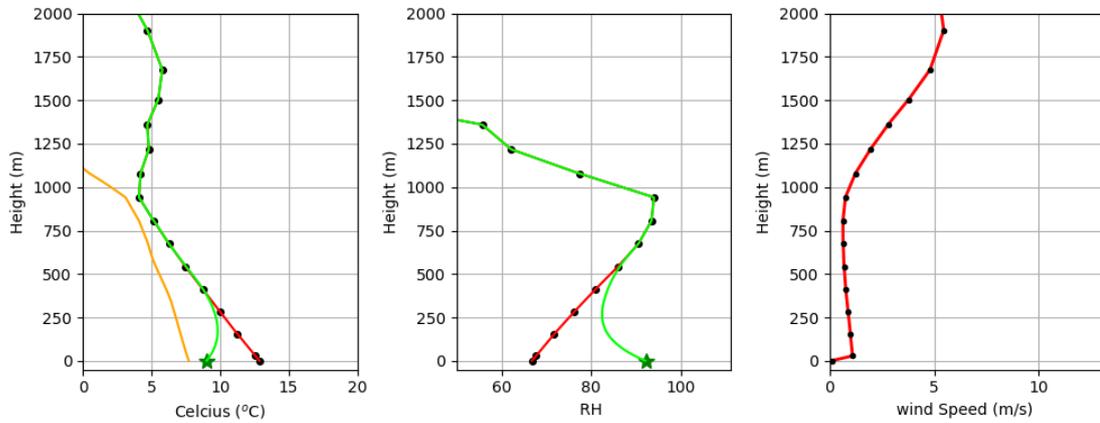
(α) 16/12/2020 – 12:00 UTC



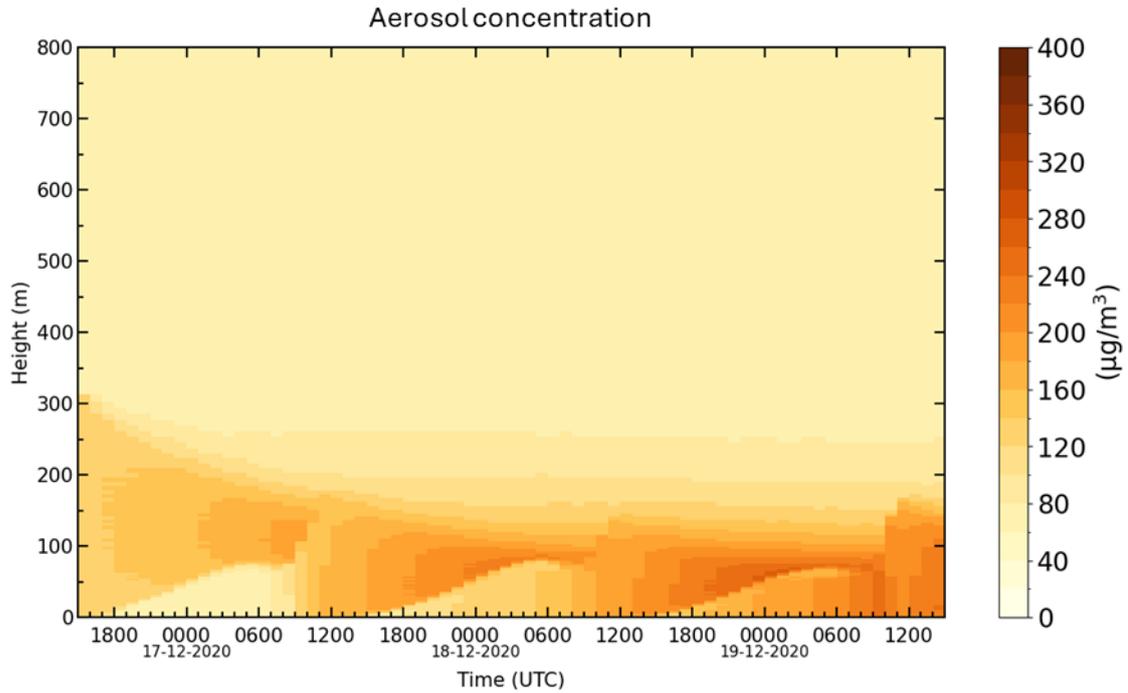
(β) 16/12/2020 – 15:00 UTC



(γ) 17/12/2020 – 15:00 UTC

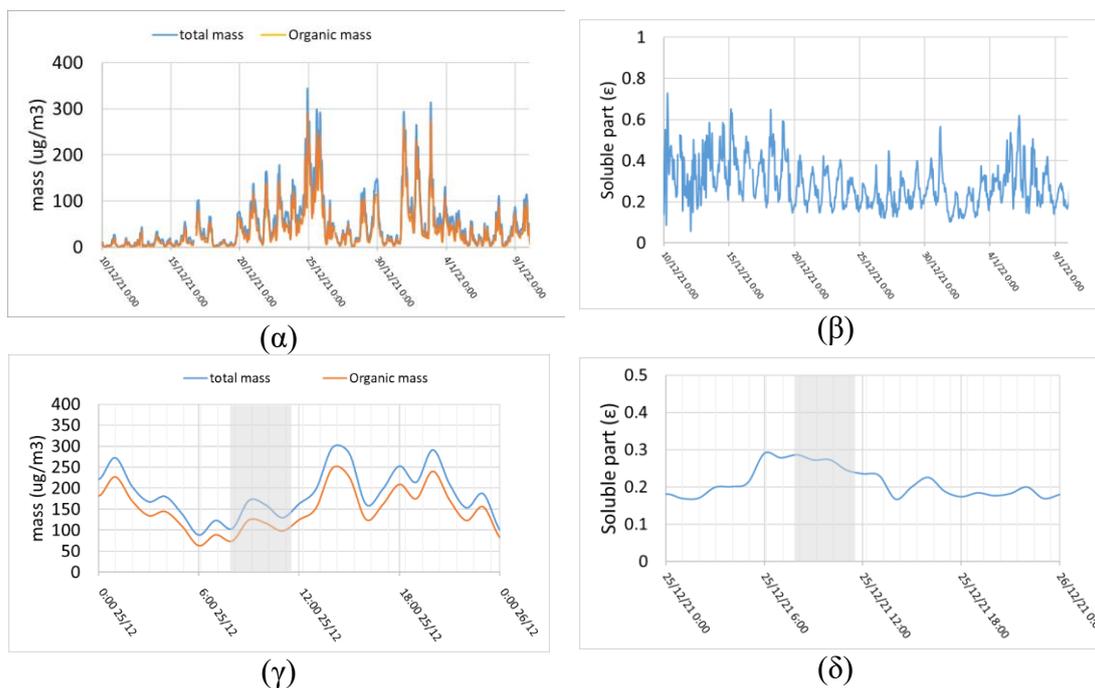


Σχήμα Π.Α.7: Κατακόρυφα προφίλ θερμοκρασίας (°C), σχετικής υγρασίας (RH, σε %) και ταχύτητας ανέμου (m/s) στις (α) 12:00 UTC της 16/12/2020, (β) 15:00 UTC της 16/12/2020 και (γ) 15:00 UTC της 17/12/2020.

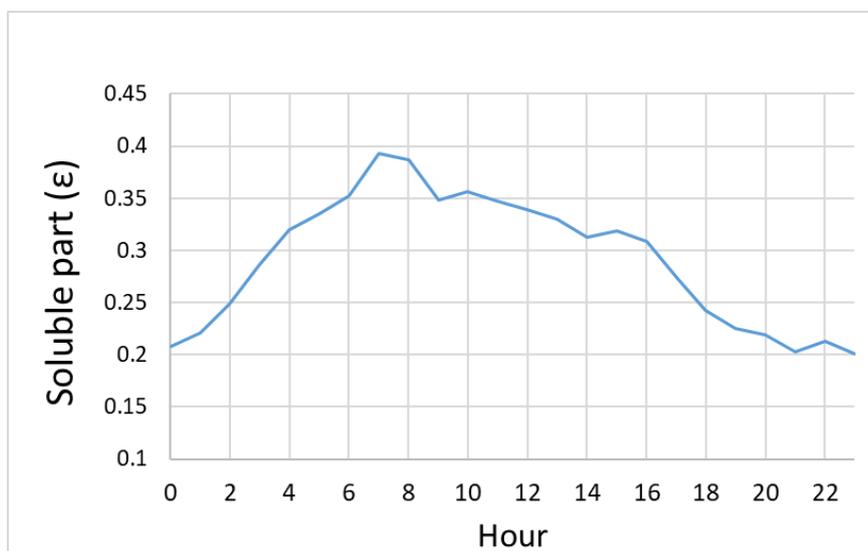


Σχήμα Π.Α.8: Χρονική εξέλιξη της κατακόρυφης κατανομής της συγκέντρωσης μάζας των ξηρών σωματιδίων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης από τις 17 έως τις 29 Δεκεμβρίου 2020 στα Ιωάννινα. Η συγκέντρωση μειώνεται δραστικά με την εμφάνιση της ομίχλης καθώς τα σωματίδια που ενεργοποιούνται θεωρούνται πλέον σταγόνες.

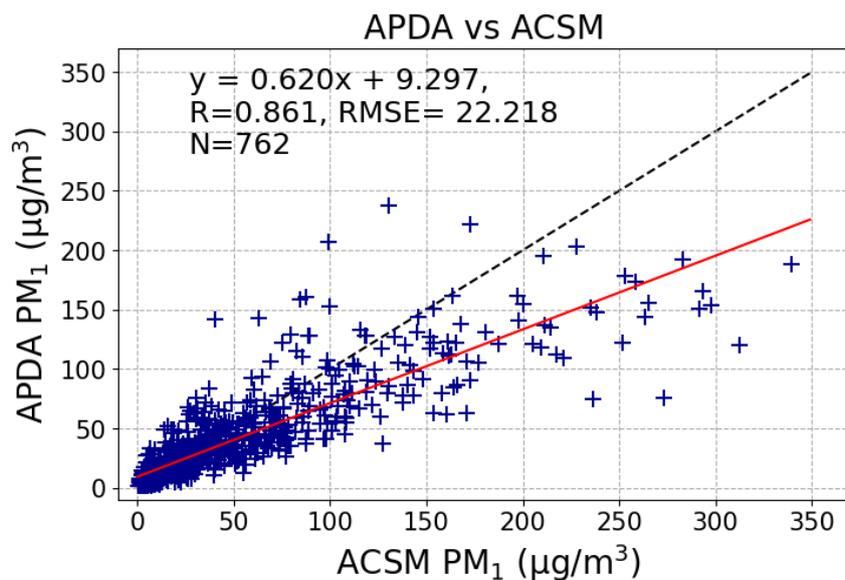
Παράρτημα Β



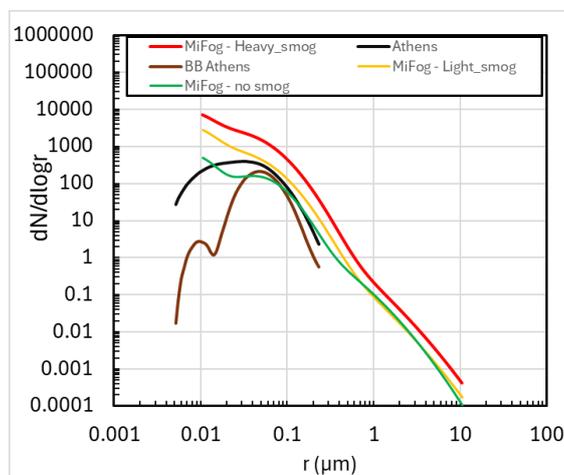
Σχήμα Π.Β.1: Χρονική μεταβολή της συνολικής μάζας PM1 (μπλε) και μάζας οργανικής ύλης (πορτοκαλί) για την περίοδο (α) της συνολικής χειμερινής εκστρατείας της PANACEA 2021-2022, από τις 7/12/2021 έως τις 10/01/2022 και (γ) για μια ημέρα συνύπαρξης ομίχλης και αιθαλομίχλης, την 25^η Δεκεμβρίου 2021. Ομοίως, στο (β) παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή του υδατοδιαλυτού μέρους (ϵ) των σωματιδίων για όλη την περίοδο της χειμερινής εκστρατείας της PANACEA 2021-2022 και (δ) για το επεισόδιο ομίχλης αιθαλομίχλης στις 25/12/2021.



Σχήμα Π.Β.2: Μέση ενδοημερήσια μεταβολή του υδατοδιαλυτού μέρους (ϵ) των αερολυμάτων από τις μετρήσεις της PANACEA, για την περίοδο μελέτης 7/12/2021 έως τις 10/01/2022.



Σχήμα Π.Β.3: Σύγκριση μετρήσεων PM1 των οργάνων APDA (Περιβαλλοντικός σταθμός) και ACSM (Πανεπιστήμιο) κατά τη διάρκεια της χειμερινής εκστρατείας της PANACEA 2021-2022.



Σχήμα Π.Β.4: Φασματικές αριθμητικές κατανομές (συγκεντρώσεις) αερολυμάτων. Με πράσινο, κίτρινο και κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται οι θεωρητικές κατανομές για τα τρία σενάρια αιθαλομίχλης: χωρίς, ασθενής και ισχυρή, αντίστοιχα. Με μαύρο και καφέ χρώμα απεικονίζονται οι μετρηθείσες κατανομές συνολικών σωματιδίων και σωματιδίων καύσης βιομάζας, αντίστοιχα, για ένα επεισόδιο αιθαλομίχλης στην Αθήνα

Παράρτημα Γ

```
&ctrl
! default values for namelist CTRL

! directories
inpdir = './inp/'           ! input directory
outdir = './out/'          ! output directory
plodir = './out/'          ! NETCDF output directory

! main control
lplo   = .true.             ! switch for netcdf output
llan   = .true.             ! switch for lanfex demistify plot output
lmet   = .true.             ! switch for meteorology output
lmic   = .true.             ! type of microphysics calculation, true: MiFog, false: PaFog
lrad   = .true.             ! switch for radiation output
lsur   = .true.             ! switch for surface output
lten   = .true.             ! switch for tendency output
ltur   = .true.             ! switch for turbulence output
lcoal  = .true.             ! switch for coalescence
lsnow  = .false.            ! switch for snow surface
frac_cld = 0                ! fractional cloudiness, values between 0 and 4
isurf  = 1                  ! surface type
                                ! 0: constant temperature, 1: bare soil, 2: canopy

! timing and geography
lstmax = 72                 ! forecast duration [h]
lst    = 18                 ! starting time hour
iday   = 16                 ! starting time day
imonth = 12                 ! starting time month
iyear  = 2020               ! starting time year
alat   = 39.66              ! latitude [deg]
alon   = 20.85              ! longitude [deg]
izstat = 0                  ! station height [m]

! model grid
nf     = 149                ! number of cloud layers
np     = 150                ! number of prognostic layers
nel    = 100                ! number of equidistant prognostic layers < np
ns     = 20                 ! number of soil layers
nka    = 70                 ! number of aerosol bins in mistra
nkt    = 70                 ! number of water bins in mistra
detamin = 10.               ! grid spacing of equidistant microphysics grid
etawl  = 2000.              ! height of prognostic grid, maximum is 2500 m
dzbw0  = 0.001              ! minimum grid space of soil grid [m]
```

```

zbw1 = 1. ! maximum depth of soil grid [m]

! meteorological data
prof = 0 ! atmospheric input profile 0: no, 1:read file
xt0 = 283.15 ! surface temperature [K]
xt2 = 288.15 ! 2m temperature [K]
xtau0 = 13. ! 2m dew point temperature [C]
xmlw = 8.5d-03 ! constant specific humidity below inversion [kg/kg]
xmli = 4.d-03 ! constant specific humidity above inversion [kg/kg]
ts_obs = 0 ! forcing surface temperature 0: no, 1: yes
zinv = 300. ! height of inversion layer [m]
dtinv = 6. ! inversion strength [C]
ipp = 1000 ! surface pressure [hPa]
wmin = 0.0 ! minimum strength of subsidence [m/s]
wmax = -0.003 ! maximum strength of subsidence [m/s]
ug = 4.0 ! geostrophic wind [m/s]

! soil and vegetation data
isoil0 = 4 ! soil type 1..12
! 1: sand, 2: loamy sand, 3: sandy loam, 4: silty loam, 5: loam, 6: sandy clay loam,
! 7: silty clay loam, 8: clay loam, 9:sandy clay, 10: silty clay, 11: clay, 12: peat
! 1: Sand, 2: lehmiger Sand, 3: sandiger Lehm, 4: schluffiger Lehm, 5: Lehm, 6: sandiger Lehm,
! 7: schluffiger Lehm, 8: Lehm, 9: sandiger Ton, 10: schluffiger Ton, 11: Ton, 12: Torf
mtype = 0.5 ! soil moisture 0.0 (dry) - 1.0 (wet)
ttype = 1 ! input initial soil profiles 0: no, 1: tb, 2: tb and eb
tb0 = 283.15 ! constant temperature at lower boundary of soil
hca = 0.10 ! canopy height [m]
sigm = 0.85 ! shielding factor
xlai = 2.00 ! leaf area index, sigma*xlai
wlm = 0.20 ! liquid water storage capacity of foliage [kg/m**2]
wl = 0.00 ! initial value of liquid water on the foliage [kg/m**2]
rc = 200.00 ! initial value of minimum stomata resistance [s/m]
alb = -1. ! user specified albedo -1.: use internal default
egr = -1. ! user specified emissivity -1.: use internal default
z0g = 0.01 ! user specified roughness -1.: use internal default

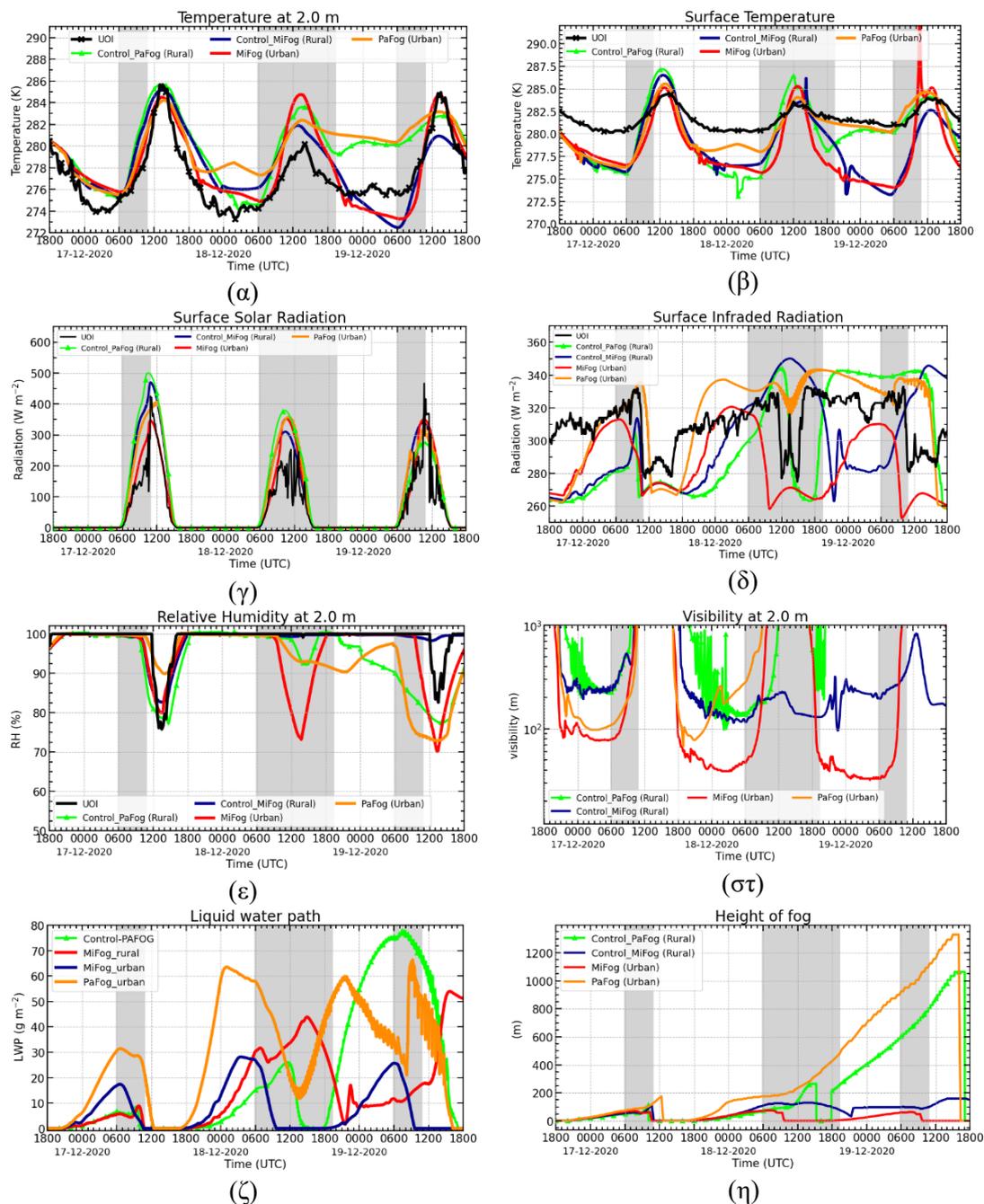
! aerosol and droplet data
iaertyp = 1 ! aerosol type
! 1:rural, 2:urban, 3:maritime, 4: background
aerfrac = 0.5 ! fraction of aerosols above inversion layer
aereh = 5. ! aerosol refill volume height (m)
aereh = 5. ! aerosol refill volume height (m)
aertf = 24. ! aerosol refill time (h)
ffna = -1. ! aerosol number concentration [1/cm**3]
! -1.: use internal default value depending on aerosol type
! rural aerosols taken from mifog with rn exceeding:
! .011: 3926, .012: 3508, .013: 3142, .014: 2829, .016: 2568, .017: 2351, .019: 2170, .021: 2015
! .024: 1876, .026: 1746, .029: 1619, .032: 1490, .035: 1359, .039: 1224, .043: 1088, .047: 952
! .052: 820, .058: 694, .064: 578, .071: 472, .078: 378, .086: 297, .095: 230, .106: 174
xkc = -1. ! parameter of nucleation equation
! -1.: use internal default value depending on aerosol type
sigc = 0.2 ! standard deviation of droplet distribution

/

```

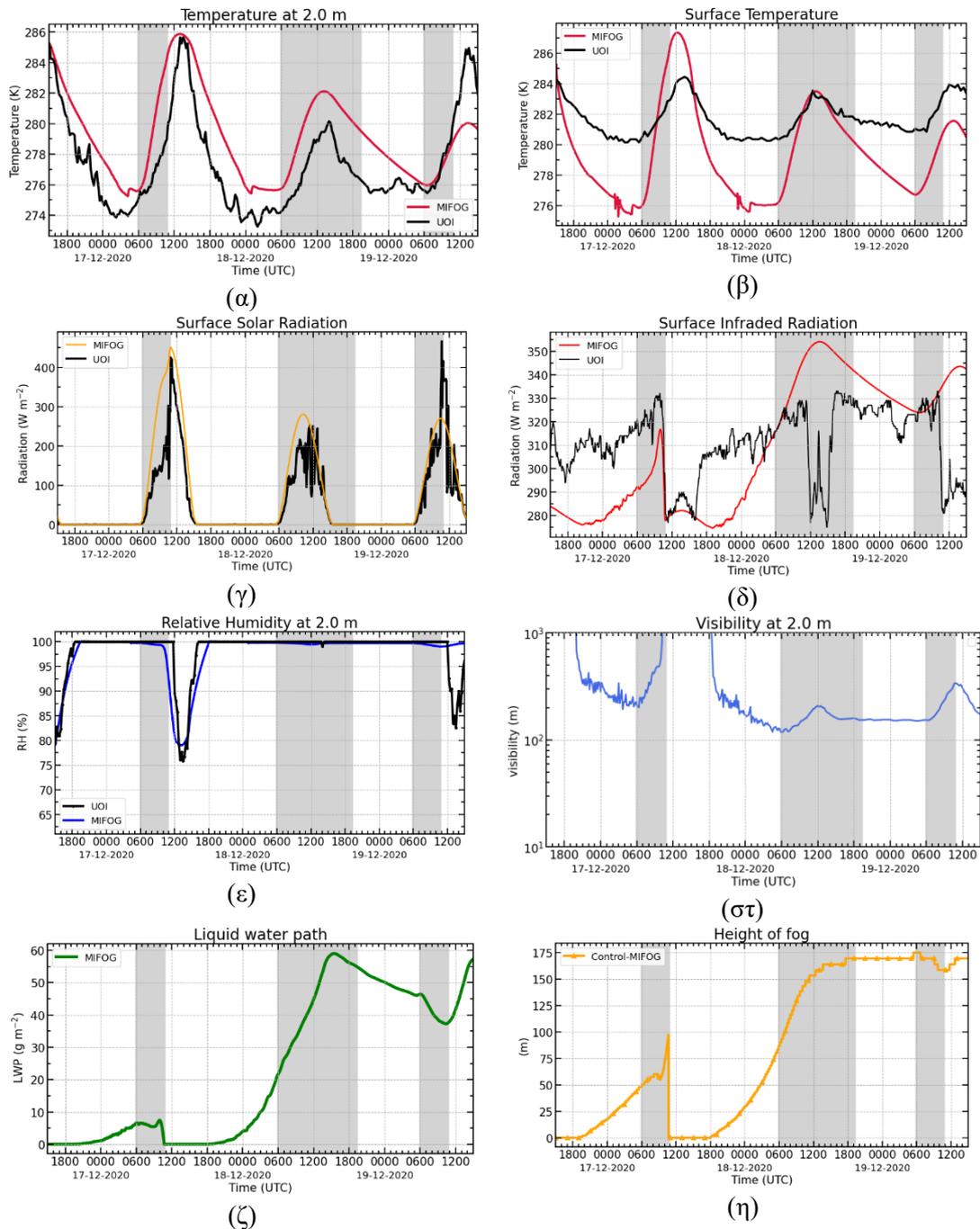
Σχήμα Π.Γ.1: Τα δεδομένα εισόδου των μοντέλων MiFog και PaFog που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων αναφοράς τους.

Παράρτημα Δ

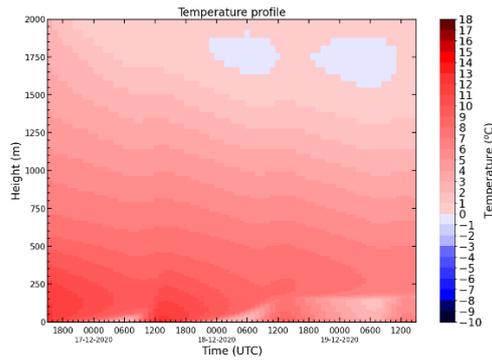


Σχήμα Π.4.1: Χρονική εξέλιξη των προσομοιώσεων ευαισθησίας για τον τύπο αερολυμάτων. Με πράσινο και πορτοκαλί φαίνεται η προσομοίωση ελέγχου με υπαίθρια και αστικά αερολύματα του PaFog αντίστοιχα. Με κόκκινο και μπλε οι προσομοιώσεις MiFog με υπαίθρια και αστικά αερολύματα αντίστοιχα. Δίνονται αποτελέσματα για: (α) τη θερμοκρασία εδάφους-αέρα, στα 2 m, (β) τη θερμοκρασία εδάφους, (γ) την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος, (δ) την εισερχόμενη υπέρυθρη ακτινοβολία στο έδαφος, (ε) τη σχετική υγρασία, (σ) την ορατότητα στα 2 m, (ζ) το LWP, (η) το ύψος (πάχος) ομίχλης. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με διαθέσιμες μετρήσεις του μετεωρολογικού Σταθμού (μαύρες καμπύλες)..

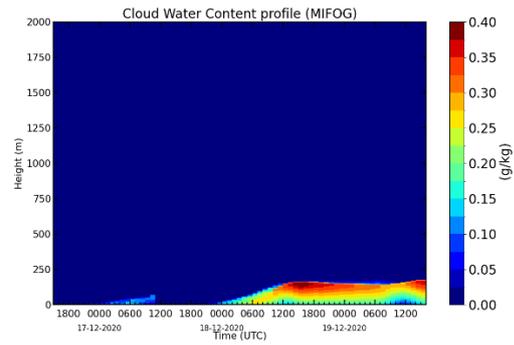
Παράρτημα Ε



Σχήμα Π.Ε.1 Προσομοίωση ελέγχου για την μελέτη ευαισθησίας του θερμοκρασιακού προφίλ, με ώρα εκκίνησης 15:00 UTC. Δίνονται αποτελέσματα για: (α) τη θερμοκρασία εδάφους-αέρα, στα 2 m, (β) τη θερμοκρασία εδάφους, (γ) την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος, (δ) την εισερχόμενη υπέρυθη ακτινοβολία στο έδαφος, (ε) τη σχετική υγρασία, (ςτ) την ορατότητα στα 2 m, (ζ) το LWP, (η) το ύψος (πάχος) ομίχλης. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με διαθέσιμες μετρήσεις του μετεωρολογικού Σταθμού (μαύρες καμπύλες).

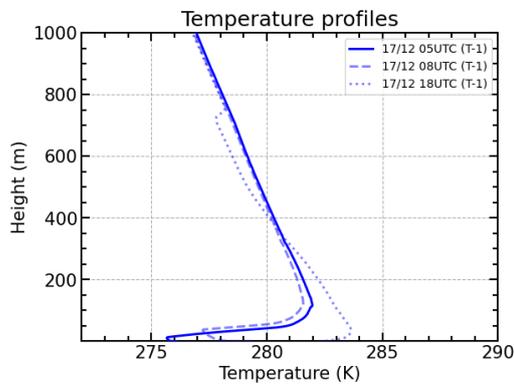


(α)

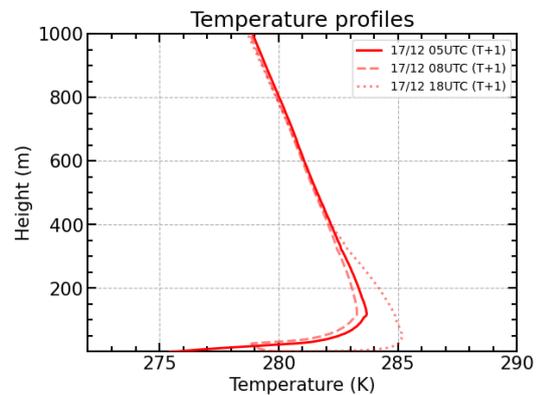


(β)

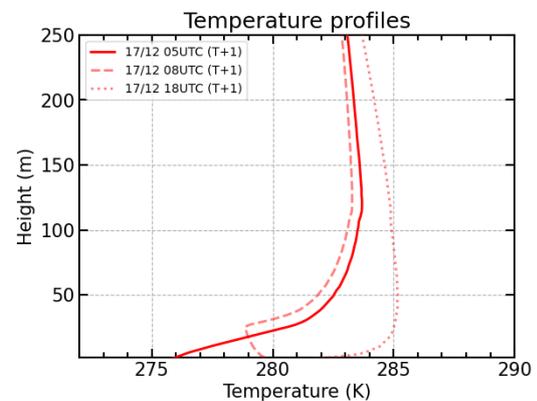
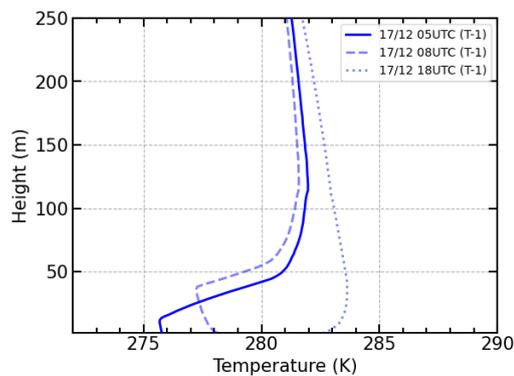
Σχήμα Π.Ε.2: Ατμοσφαιρικά προφίλ (α) θερμοκρασίας και (β) CWC της προσομοίωσης αναφοράς για την ευαισθησία στο θερμοκρασιακό προφίλ (με ώρα εκκίνησης τις 15:00 UTC).



(α)



(β)



Σχήμα Π.Ε.3: Ατμοσφαιρικά προφίλ θερμοκρασίας στις 05:00 (συμπαγής γραμμή), 08:00 (διακεκομμένη γραμμή) και 18:00 (διάστικτη γραμμή) UTC της 17/12/2020 για τις προσομοιώσεις με (α) μείωση και (β) αύξηση της θερμοκρασίας σε όλα τα ύψη κατά 1 K. Τα αποτελέσματα δίνονται για δύο εύρη υψών: 0-1000 m (πάνω) και 0-250 m (κάτω).

Βιβλιογραφία

- Aier, J., Panda, K. K., and Kumar, S.: Impact of Air Pollution on Plant Physiology and Ecosystem Health, *Journal of Chemical Health Risks*, 14, 3167–3173, <https://doi.org/10.52783/jchr.v14.i3.5144>, 2024.
- Anon: The Properties of Atmospheric Aerosol Particles as Functions of the Relative Humidity at Thermodynamic Equilibrium with the Surrounding Moist Air, in: *Advances in Geophysics*, Elsevier, 73–188, [https://doi.org/10.1016/s0065-2687\(08\)60142-9](https://doi.org/10.1016/s0065-2687(08)60142-9), 1976.
- Anon: Cloud Microphysics, in: *International Geophysics*, vol. 104, Academic Press, 47–76, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374266-7.00003-2>, 2014.
- Anthi, A. I. and Cracknell, A. P.: Use of satellite images for fog detection (AVHRR) and forecast of fog dissipation (METEOSAT) over lowland Thessalia, Hellas, *International Journal of Remote Sensing*, 20, 1107–1124, <https://doi.org/10.1080/014311699212876>, 1999.
- Bartok, J., Bott, A., and Gera, M.: Fog Prediction for Road Traffic Safety in a Coastal Desert Region, *Boundary-Layer Meteorol*, 145, 485–506, <https://doi.org/10.1007/s10546-012-9750-5>, 2012.
- Beard, K. V.: Terminal Velocity and Shape of Cloud and Precipitation Drops Aloft, 1976.
- Bendix, J., Eugster, W., and Klemm, O.: Fog – boon or bane?, *Erdkunde*, 65, 229–232, <https://doi.org/10.3112/erdkunde.2011.03.01>, 2011.
- Bolton, D.: The Computation of Equivalent Potential Temperature, 1980.
- Bott, A.: On the influence of the physico-chemical properties of aerosols on the life cycle of radiation fogs, *Boundary-Layer Meteorol*, 56, 1–31, <https://doi.org/10.1007/BF00119960>, 1991.
- Bott, A.: A new method for the solution of the stochastic collection equation in cloud models with spectral aerosol and cloud drop microphysics, *Atmospheric Research*, 59–60, 361–372, [https://doi.org/10.1016/s0169-8095\(01\)00125-9](https://doi.org/10.1016/s0169-8095(01)00125-9), 2001.
- Bott, A.: Comparison of a Spectral Microphysics and a Two-Moment Cloud Scheme: Numerical Simulations of the Cloud-Topped Marine Boundary Layer, *Boundary-Layer Meteorol*, 175, 153–178, <https://doi.org/10.1007/s10546-020-00501-4>, 2020.
- Bott, A.: Comparison of a spectral microphysics and a two-moment cloud scheme: Numerical simulation of a radiation fog event, *Atmospheric Research*, 262, 105787, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105787>, 2021.
- Bott, A. and Trautmann, T.: PAFOG—a new efficient forecast model of radiation fog and low-level stratiform clouds, *Atmospheric Research*, 64, 191–203, [https://doi.org/10.1016/S0169-8095\(02\)00091-1](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(02)00091-1), 2002.

Bott, A., Sievers, U., and Zdunkowski, W.: A Radiation Fog Model with a Detailed Treatment of the Interaction between Radiative Transfer and Fog Microphysics, *J. Atmos. Sci.*, 47, 2153–2166, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1990\)047%253C2153:arfmwa%253E2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1990)047%253C2153:arfmwa%253E2.0.co;2), 1990.

Bott, A., Trautmann, T., and Zdunkowski, W.: A numerical model of the cloud-topped planetary boundary-layer: Radiation, turbulence and spectral microphysics in marine stratus, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 122, 635–667, <https://doi.org/10.1002/qj.49712253105>, 1996.

Brock, G.: *Compendium of Findings on the Effects of Climate Change on Aviation Hazards and Analysis of the Impacts of Climate Change on Aviation Operations*, 2024.

Chaumerliac, N., Richard, E., Pinty, J.-P., and Nickerson, E. C.: Sulfur scavenging in a mesoscale model with quasi-spectral microphysics: Two-dimensional results for continental and maritime clouds, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 92, 3114–3126, <https://doi.org/10.1029/JD092iD03p03114>, 1987.

Clappier, A., Martilli, A., Grossi, P., Thunis, P., Pasi, F., Krueger, B. C., Calpini, B., Graziani, G., and Van Den Bergh, H.: Effect of Sea Breeze on Air Pollution in the Greater Athens Area. Part I: Numerical Simulations and Field Observations, *J. Appl. Meteor.*, 39, 546–562, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2000\)039%253C0546:eosboa%253E2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2000)039%253C0546:eosboa%253E2.0.co;2), 2000.

Conant, W. C., Nenes, A., and Seinfeld, J. H.: Black carbon radiative heating effects on cloud microphysics and implications for the aerosol indirect effect 1. Extended Köhler theory, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107, AAC 23-1-AAC 23-9, <https://doi.org/10.1029/2002JD002094>, 2002.

Davies, R.: *Response of Cloud Supersaturation to Radiative Forcing*, 1985.

Dimitriou, K. and Kassomenos, P.: Estimation of North African dust contribution on PM10 episodes at four continental Greek cities, *Ecological Indicators*, 106, 105530, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105530>, 2019.

Dimitriou, K. and Mihalopoulos, N.: Air Quality Assessment in Six Major Greek Cities with an Emphasis on the Athens Metropolitan Region, *Atmosphere*, 15, 1074, <https://doi.org/10.3390/atmos15091074>, 2024.

Ding, G., Li, R., Li, C., Yang, B., Li, Y., Yu, Q., Geng, X., Yao, Z., Zhang, K., and Wen, J.: Review of ship navigation safety in fog, *J. Navigation*, 77, 436–456, <https://doi.org/10.1017/S0373463324000377>, 2024.

Du, P., Zeng, Z., Zhang, J., Liu, L., Yang, J., Qu, C., Jiang, L., and Liu, S.: Fog Season Risk Assessment for Maritime Transportation Systems Exploiting Himawari-8 Data: A Case Study in Bohai Sea, China, *Remote Sensing*, 13, 3530, <https://doi.org/10.3390/rs13173530>, 2021.

Ezani, E.: Impact of Fog on Human Health, in: *Fog: Formation, Chemistry, Dynamics, Impact and Dissipation*, edited by: Saxena, P., Gupta, A. K., and Sorí, R., Springer Nature Singapore, Singapore, 153–166, https://doi.org/10.1007/978-981-96-4422-3_8, 2025.

Fourtziou, L., Liakakou, E., Stavroulas, I., Theodosi, C., Zampas, P., Psiloglou, B., Sciare, J., Maggos, T., Bairachtari, K., Bougiatioti, A., Gerasopoulos, E., Sarda-Estève, R., Bonnaire, N., and Mihalopoulos, N.: Multi-tracer approach to characterize domestic wood burning in Athens (Greece) during wintertime, *Atmospheric Environment*, 148, 89–101, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.10.011>, 2017.

Gautam, R., Hsu, N. C., Kafatos, M., and Tsay, S.: Influences of winter haze on fog/low cloud over the Indo-Gangetic plains, *J. Geophys. Res.*, 112, <https://doi.org/10.1029/2005jd007036>, 2007.

Gerasopoulos, E., Gratsea, M., Liakakou, E., Lianou, M., Psiloglou, B., Kappos, N., Kambezidis, H., and Mihalopoulos, N.: An Overview of Biomass Burning Impacts on Athens Air Quality and Analysis of Its Increasing Significance, in: *Perspectives on Atmospheric Sciences*, 1111–1116, https://doi.org/10.1007/978-3-319-35095-0_159, 2017.

Gray, E., Gilardoni, S., Baldocchi, D., McDonald, B. C., Facchini, M. C., and Goldstein, A. H.: Impact of Air Pollution Controls on Radiation Fog Frequency in the Central Valley of California, *JGR Atmospheres*, 124, 5889–5905, <https://doi.org/10.1029/2018JD029419>, 2019.

Grossi, P., Thunis, P., Martilli, A., and Clappier, A.: Effect of Sea Breeze on Air Pollution in the Greater Athens Area. Part II: Analysis of Different Emission Scenarios, *J. Appl. Meteor.*, 39, 563–575, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2000\)039%253C0563:eosboa%253E2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2000)039%253C0563:eosboa%253E2.0.co;2), 2000.

Gultepe, I., Isaac, G. A., and Strawbridge, K. B.: Variability of cloud microphysical and optical parameters obtained from aircraft and satellite remote sensing measurements during RACE, *Intl Journal of Climatology*, 21, 507–525, <https://doi.org/10.1002/joc.582>, 2001.

Gultepe, I., Müller, M. D., and Boybeyi, Z.: A New Visibility Parameterization for Warm-Fog Applications in Numerical Weather Prediction Models, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45, 1469–1480, <https://doi.org/10.1175/jam2423.1>, 2006.

Gultepe, I., Tardif, R., Michaelides, S. C., Cermak, J., Bott, A., Bendix, J., Müller, M. D., Pagowski, M., Hansen, B., Ellrod, G., Jacobs, W., Toth, G., and Cober, S. G.: Fog Research: A Review of Past Achievements and Future Perspectives, *Pure appl. geophys.*, 164, 1121–1159, <https://doi.org/10.1007/s00024-007-0211-x>, 2007.

Gultepe, I., Sharman, R., Williams, P. D., Zhou, B., Ellrod, G., Minnis, P., Trier, S., Griffin, S., Yum, Seong. S., Gharabaghi, B., Feltz, W., Temimi, M., Pu, Z., Storer, L. N., Kneringer, P., Weston, M. J., Chuang, H., Thobois, L., Dimri, A. P., Dietz, S. J., França, G. B., Almeida, M. V., and Neto, F. L. A.: A Review of High Impact Weather for Aviation Meteorology, *Pure Appl. Geophys.*, 176, 1869–1921, <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02168-6>, 2019.

Gusten, H.: *PHOTOCHEMICAL FORMATION AND TRANSPORT OF OZONE IN ATHENS, GREECE*, 1988.

Güsten, H., Heinrich, G., Mönnich, E., Weppner, J., Cvitaš, T., Klasinc, L., Varotsos, C. A., and Asimakopoulos, D. N.: Thessaloniki '91 field measurement campaign—II. Ozone formation in the greater Thessaloniki area, *Atmospheric Environment*, 31, 1115–1126, [https://doi.org/10.1016/s1352-2310\(96\)00050-7](https://doi.org/10.1016/s1352-2310(96)00050-7), 1997.

Ha, K.-M.: Dense fog disaster management: Systematic literature review, *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 31, 101400, <https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101400>, 2025.

Hackney, J. D., Linn, W. S., and Avol, E. L.: Potential risks to human respiratory health from “acid fog”: evidence from experimental studies of volunteers., *Environ Health Perspect*, 63, 57–61, <https://doi.org/10.1289/ehp.856357>, 1985.

Hänel, G.: The Properties of Atmospheric Aerosol Particles as Functions of the Relative Humidity at Thermodynamic Equilibrium with the Surrounding Moist Air, in: *Advances in Geophysics*, vol. 19, Elsevier, 73–188, [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(08\)60142-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(08)60142-9), 1976.

Hobbs, P. V.: *Aerosol--cloud--climate interactions*, Academic Press, San Diego, 233 pp., 1993.

Houssos, E. E., Lolis, C. J., and Bartzokas, A.: The main characteristics of atmospheric circulation associated with fog in Greece, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1857–1869, <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1857-2009>, 2009.

Houssos, E. E., Lolis, C. J., Gkikas, A., Hatzianastassiou, N., and Bartzokas, A.: On the atmospheric circulation characteristics associated with fog in Ioannina, north-western Greece, *Intl Journal of Climatology*, 32, 1847–1862, <https://doi.org/10.1002/joc.2399>, 2012.

Jaenicke, R.: Chapter 1 Tropospheric Aerosols, in: *International Geophysics*, vol. 54, Elsevier, 1–31, [https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(08\)60210-7](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(08)60210-7), 1993.

Kaskaoutis, D. G., Grivas, G., Theodosi, C., Tsagkaraki, M., Paraskevopoulou, D., Stavroulas, I., Liakakou, E., Gkikas, A., Hatzianastassiou, N., Wu, C., Gerasopoulos, E., Mihalopoulos, N., Kaskaoutis, D. G., Grivas, G., Theodosi, C., Tsagkaraki, M., Paraskevopoulou, D., Stavroulas, I., Liakakou, E., Gkikas, A., Hatzianastassiou, N., Wu, C., Gerasopoulos, E., and Mihalopoulos, N.: Carbonaceous Aerosols in Contrasting Atmospheric Environments in Greek Cities: Evaluation of the EC-tracer Methods for Secondary Organic Carbon Estimation, *Atmosphere*, 11, <https://doi.org/10.3390/atmos11020161>, 2020.

Kaskaoutis, D. G., Grivas, G., Oikonomou, K., Tavernaraki, P., Papoutsidaki, K., Tsagkaraki, M., Stavroulas, I., Zampas, P., Paraskevopoulou, D., Bougiatioti, A., Liakakou, E., Gavrouzou, M., Dumka, U. C., Hatzianastassiou, N., Sciare, J., Gerasopoulos, E., and Mihalopoulos, N.: Impacts of severe residential wood burning on atmospheric processing, water-soluble organic aerosol and light absorption, in an inland city of Southeastern Europe, *Atmospheric Environment*, 280, 119139, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119139>, 2022.

Kassomenos, P. A., Kelessis, A., Paschalidou, A. K., and Petrakakis, M.: Identification of sources and processes affecting particulate pollution in Thessaloniki, Greece, *Atmospheric Environment*, 45, 7293–7300, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.08.034>, 2011.

Katsouyanni, K.: Health effects of air pollution in southern Europe: are there interacting factors?, *Environ Health Perspect*, 103, 23–27, <https://doi.org/10.1289/ehp.95103s223>, 1995.

- Kelessis, A. G.: Eleven years of primary air-pollutant observations in the city of Thessaloniki, Greece, *Fresenius Environmental Bulletin*, 10, 624–628, 2001.
- Kim, W., Yum, S. S., Hong, J., and Song, J. I.: Improvement of Fog Simulation by the Nudging of Meteorological Tower Data in the WRF and PAFOG Coupled Model, *Atmosphere*, 11, <https://doi.org/10.3390/atmos11030311>, 2020.
- Klemm, O., Ziomas, I. C., Balis, D., Suppan, P., Slemr, J., Romero, R., and Vyras, L. G.: A summer air-pollution study in Athens, Greece, *Atmospheric Environment*, 32, 2071–2087, [https://doi.org/10.1016/s1352-2310\(97\)00424-x](https://doi.org/10.1016/s1352-2310(97)00424-x), 1998.
- Kuang, Y., Xu, W., Tao, J., Luo, B., Liu, L., Xu, H., Xu, W., Xue, B., Zhai, M., Liu, P., and Sun, Y.: Divergent Impacts of Biomass Burning and Fossil Fuel Combustion Aerosols on Fog-Cloud Microphysics and Chemistry: Novel Insights From Advanced Aerosol-Fog Sampling, *Geophysical Research Letters*, 51, e2023GL107147, <https://doi.org/10.1029/2023GL107147>, 2024.
- Lakra, K. and Avishek, K.: A review on factors influencing fog formation, classification, forecasting, detection and impacts, *Rend. Fis. Acc. Lincei*, 33, 319–353, <https://doi.org/10.1007/s12210-022-01060-1>, 2022.
- Leng, C., Zhang, Q., Zhang, D., Xu, C., Cheng, T., Zhang, R., Tao, J., Chen, J., Zha, S., Zhang, Y., Li, X., Kong, L., and Gao, W.: Variations of cloud condensation nuclei (CCN) and aerosol activity during fog–haze episode: a case study from Shanghai, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 12499–12512, <https://doi.org/10.5194/acp-14-12499-2014>, 2014.
- Li, Y., Tasoglou, A., Liangou, A., Cain, K. P., Jahn, L., Gu, P., Kostenidou, E., and Pandis, S. N.: Cloud condensation nuclei activity and hygroscopicity of fresh and aged cooking organic aerosol, *Atmospheric Environment*, 176, 103–109, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.11.035>, 2018.
- Loughlin, P., Trautmann, T., Bott, A., Panhans, W., and Zdunkowski, W.: The effects of different radiation parametrizations on cloud evolution, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 123, 1985–2007, <https://doi.org/10.1256/smsqj.54310>, 1997.
- Maalick, Z., Kühn, T., Korhonen, H., Kokkola, H., Laaksonen, A., and Romakkaniemi, S.: Effect of aerosol concentration and absorbing aerosol on the radiation fog life cycle, *Atmospheric Environment*, 133, 26–33, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.03.018>, 2016.
- Manousakas, M., Eleftheriadis, K., and Papaefthymiou, H.: Characterization of PM10 Sources and Ambient Air Concentration Levels at Megalopolis City (Southern Greece) Located in the Vicinity of Lignite-Fired Plants, *Aerosol Air Qual. Res.*, 13, 804–817, <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.09.0239>, 2013.
- Mishra, S.: Is smog innocuous? Air pollution and cardiovascular disease, *Indian Heart Journal*, 69, 425–429, <https://doi.org/10.1016/j.ihj.2017.07.016>, 2017.
- Mitchell, D., Henschel, J. R., Hetem, R. S., Wassenaar, T. D., Strauss, W. M., Hanrahan, S. A., and Seely, M. K.: Fog and fauna of the Namib Desert: past and future, *Ecosphere*, 11, e02996, <https://doi.org/10.1002/ecs2.2996>, 2020.

- Moussiopoulos, N.: Athenian photochemical smog: intercomparison of simulations (APSYS), background and objectives, *Environmental Software*, 8, 3–8, [https://doi.org/10.1016/0266-9838\(93\)90003-Z](https://doi.org/10.1016/0266-9838(93)90003-Z), 1993.
- Moussiopoulos, N. and Oehler, W.: Numerical simulation of the photochemical air pollution levels in Athens, Greece, *Environmental Software*, 3, 105–109, [https://doi.org/10.1016/0266-9838\(88\)90018-4](https://doi.org/10.1016/0266-9838(88)90018-4), 1988.
- Moussiopoulos, N., Sahm, P., and Kessler, Ch.: Numerical simulation of photochemical smog formation in Athens, Greece—A case study, *Atmospheric Environment*, 29, 3619–3632, [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00199-9](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00199-9), 1995.
- Müller, M., Masbou, M., Bott, A., and Janjic, Z.: Fog prediction in a 3D model with parametrized microphysics, 2005.
- Mutairi, Dr. M. K. A.-: Fog: Its Causes, Types, and Dangers in Saudi Northern Borders (A Climatic Study), *JGES*, <https://doi.org/10.15640/jges.v5n1a5>, 2017.
- Nickerson, E. C., Richard, E., Rosset, R., and Smith, D. R.: The numerical simulation of clouds, rain, and airflow over the Voges and Black Forest Mountains: a Meso-beta model with parameterized microphysics, n.d.
- Nikolaou, K. and Papadakis, N.: Ten years trends of the urban air pollution in Thessaloniki. Part I: The primary pollutants, *Fresenius Environmental Bulletin*, 69–72, 2001.
- Paliatsos, A. G. and Amanatidis, G. T.: Smoke concentrations in Athens, Greece: trends and strong episodes, 1984–1991, *Science of The Total Environment*, 144, 137–144, [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(94\)90434-0](https://doi.org/10.1016/0048-9697(94)90434-0), 1994.
- Pandis, S. N., Seinfeld, J. H., and Pilinis, C.: The smog-fog-smog cycle and acid deposition, *J. Geophys. Res.*, 95, 18489–18500, <https://doi.org/10.1029/JD095iD11p18489>, 1990.
- Papanikolaou, C.-A., Papayannis, A., Mylonaki, M., Foskinis, R., Kokkalis, P., Liakakou, E., Stavroulas, I., Soupiona, O., Hatzianastassiou, N., Gavrouzou, M., Kralli, E., and Anagnou, D.: Vertical Profiling of Fresh Biomass Burning Aerosol Optical Properties over the Greek Urban City of Ioannina, during the PANACEA Winter Campaign, *Atmosphere*, 13, 94, <https://doi.org/10.3390/atmos13010094>, 2022.
- Peng, Y., Abdel-Aty, M., Lee, J., and Zou, Y.: Analysis of the Impact of Fog-Related Reduced Visibility on Traffic Parameters, *J. Transp. Eng., Part A: Systems*, 144, 04017077, <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000094>, 2018.
- Pérez-Díaz, J., Ivanov, O., Peshev, Z., Álvarez-Valenzuela, M., Valiente-Blanco, I., Evgenieva, T., Dreischuh, T., Gueorguiev, O., Todorov, P., and Vaseashta, A.: Fogs: Physical Basis, Characteristic Properties, and Impacts on the Environment and Human Health, *Water*, 9, 807, <https://doi.org/10.3390/w9100807>, 2017.
- Pikridas, M., Tasoglou, A., Florou, K., and Pandis, S. N.: Characterization of the origin of fine particulate matter in a medium size urban area in the Mediterranean, *Atmospheric Environment*, 80, 264–274, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.07.070>, 2013.

Pilinis, C., Kassomenos, P., and Kallos, G.: Modeling of photochemical pollution in Athens, Greece. Application of the RAMS-CALGRID modeling system, *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 27, 353–370, [https://doi.org/10.1016/0957-1272\(93\)90014-W](https://doi.org/10.1016/0957-1272(93)90014-W), 1993.

Pruppacher, H. R. and Klett, J. D.: *Microphysics of Clouds and Precipitation*, Springer Netherlands, Dordrecht, <https://doi.org/10.1007/978-0-306-48100-0>, 2010.

Rappenglück, B., Fabian, P., Kalabokas, P., Viras, L. G., and Ziomas, I. C.: Quasi-continuous measurements of non-methane hydrocarbons (NMHC) in the Greater Athens area during medcaphot-trace, *Atmospheric Environment*, 32, 2103–2121, [https://doi.org/10.1016/s1352-2310\(97\)00430-5](https://doi.org/10.1016/s1352-2310(97)00430-5), 1998.

Shao, N., Lu, C., Jia, X., Wang, Y., Li, Y., Yin, Y., Zhu, B., Zhao, T., Liu, D., Niu, S., Fan, S., Yan, S., and Lv, J.: Radiation fog properties in two consecutive events under polluted and clean conditions in the Yangtze River Delta, China: a simulation study, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 9873–9890, <https://doi.org/10.5194/acp-23-9873-2023>, 2023.

Siebert, J., Sievers, U., and Zdunkowski, W.: A one-dimensional simulation of the interaction between land surface processes and the atmosphere, *Boundary-Layer Meteorol*, 59, 1–34, <https://doi.org/10.1007/BF00120684>, 1992a.

Siebert, J., Bott, A., and Zdunkowski, W.: Influence of a vegetation-soil model on the simulation of radiation fog, *Beitrage zur Physik der Atmosphäre*, 65, 93–106, 1992b.

Sindosi, O. A., Markozannes, G., Rizos, E., and Ntzani, E.: Effects of economic crisis on air quality in Ioannina, Greece, *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 54, 768–781, <https://doi.org/10.1080/10934529.2019.1592534>, 2019.

Sindosi, O. A., Hatzianastassiou, N., Markozannes, G., Rizos, E. C., Ntzani, E., and Bartzokas, A.: PM10 Concentrations in a Provincial City of Inland Greece in the Times of Austerity and Their Relationship with Meteorological and Socioeconomic Conditions, *Water Air Soil Pollut*, 232, 77, <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05008-3>, 2021.

Skourtos, S.: *Air pollution in Greece: An overview*, 1991.

Stavroulas, I., Grivas, G., Michalopoulos, P., Liakakou, E., Bougiatioti, A., Kalkavouras, P., Fameli, K. M., Hatzianastassiou, N., Mihalopoulos, N., Gerasopoulos, E., Stavroulas, I., Grivas, G., Michalopoulos, P., Liakakou, E., Bougiatioti, A., Kalkavouras, P., Fameli, K. M., Hatzianastassiou, N., Mihalopoulos, N., and Gerasopoulos, E.: Field Evaluation of Low-Cost PM Sensors (Purple Air PA-II) Under Variable Urban Air Quality Conditions, in Greece, *Atmosphere*, 11, <https://doi.org/10.3390/atmos11090926>, 2020.

Stolaki, S., Pytharoulis, I., and Karacostas, T.: *A Study of Fog Characteristics Using a Coupled WRF–COBEL Model Over Thessaloniki Airport, Greece*, 2011.

Stolaki, S., Pytharoulis, I., and Karacostas, T.: *A Study of Fog Characteristics Using a Coupled WRF–COBEL Model Over Thessaloniki Airport, Greece*, *Pure Appl. Geophys.*, 169, 961–981, <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0393-0>, 2012.

Stolaki, S. N., Kazadzis, S. A., Foris, D. V., and Karacostas, Th. S.: Fog characteristics at the airport of Thessaloniki, Greece, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1541–1549, <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1541-2009>, 2009.

Stull, R. B.: *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Springer Science & Business Media, 671 pp., 2012.

Theodosi, C., Tsagkaraki, M., Zarnpas, P., Grivas, G., Liakakou, E., Paraskevopoulou, D., Lianou, M., Gerasopoulos, E., and Mihalopoulos, N.: Multi-year chemical composition of the fine-aerosol fraction in Athens, Greece, with emphasis on the contribution of residential heating in wintertime, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 14371–14391, <https://doi.org/10.5194/acp-18-14371-2018>, 2018.

Tsalkani, N., Perros, P., and Toupance, G.: Continuous atmospheric measurements of peroxyacetyl nitrate (Pan) in a Mediterranean site (Athens, g, 1987.

Tsani-Bazaca, E., Glavas, S., and Güsten, H.: Peroxyacetyl nitrate (PAN) concentrations in Athens, Greece, *Atmospheric Environment (1967)*, 22, 2283–2286, [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(88\)90139-4](https://doi.org/10.1016/0004-6981(88)90139-4), 1988.

Twomey, S.: The nuclei of natural cloud formation part II: The supersaturation in natural clouds and the variation of cloud droplet concentration, *Geofisica Pura e Applicata*, 43, 243–249, <https://doi.org/10.1007/BF01993560>, 1959.

Twomey, S. and Wojciechowski, T. A.: *Observations of the Geographical Variation of Cloud Nuclei*, 1969.

Twomey, S. A., Pieprgrass, M., and Wolfe, T. L.: An assessment of the impact of pollution on global cloud albedo, *Tellus B*, 36B, 356–366, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.1984.tb00254.x>, 1984.

Vrekoussis, M., Richter, A., Hilboll, A., Burrows, J. P., Gerasopoulos, E., Lelieveld, J., Barrie, L., Zerefos, C., and Mihalopoulos, N.: Economic crisis detected from space: Air quality observations over Athens/Greece, *Geophysical Research Letters*, 40, 458–463, <https://doi.org/10.1002/grl.50118>, 2013.

Wilkins, E. T.: Air Pollution and the London Fog of December, 1952, *Journal of the Royal Sanitary Institute*, 74, 1–21, <https://doi.org/10.1177/146642405407400101>, 1954.

WMO (Ed.): *International meteorological vocabulary: = Vocabulaire météorologique international*, 2. ed., Secretariat of the WMO, Geneva, 784 pp., 1992.

Wu, Z., Zheng, J., Wang, Y., Shang, D., Du, Z., Zhang, Y., and Hu, M.: Chemical and physical properties of biomass burning aerosols and their CCN activity: A case study in Beijing, China, *Science of The Total Environment*, 579, 1260–1268, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.112>, 2017.

Zhu, Y., Li, Z., Zu, F., Wang, H., Liu, Q., Qi, M., and Wang, Y.: The propagation of fog and its related pollutants in the Central and Eastern China in winter, *Atmospheric Research*, 265, 105914, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105914>, 2022.

Zogou and Stamatelos, A.: Analysis of Data From Ambient PM₁₀ Concentration Monitoring in Volos in the Period 2005-2010, AJEE, 2, 97-108, <https://doi.org/10.5923/j.ajee.20120204.05>, 2012.

Ιστοσελίδες

<https://www.britannica.com/science/smog>, (last access on July 4th, 2025).

<https://view.eumetsat.int/>, (last access on 30th October, 2025).