



ΧΡΗΣΤΟΣ Κ. ΝΤΟΓΡΑΣ Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Η/Υ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΜΕΣΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟ ΚΛΙΜΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΟΧΙΚΟΥ ΚΛΙΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ REGCM3

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ 'ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ, ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ'

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2019

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης





ΧΡΗΣΤΟΣ Κ. ΝΤΟΓΡΑΣ Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Η/Υ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΜΕΣΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟ ΚΛΙΜΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΟΧΙΚΟΥ ΚΛΙΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ REGCM3

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

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 03/07/2019

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Καθηγητής Αναπλ. Καθηγητής Επίκ. Καθηγήτρια

Ζάνης Πρόδρομος, Επιβλέπων Πυθαρούλης Ιωάννης Κατράγκου Ελένη

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

© Χρήστος Κ. Ντόγρας, Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Η/Υ, 2019 Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΜΕΣΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟ ΚΛΙΜΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΟΧΙΚΟΥ ΚΛΙΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ REGCM3 – Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

© Christos K. Ntogras, Electrical and Computer Engineer, 2019 All rights reserved. STUDY OF THE DIRECT EFFECT OF AEROSOL PARTICLES ON REGIONAL CLIMATE USING THE REGIONAL CLIMATIC MODEL REGCM3– *Master Thesis*

Citation:

Ντόγρας Χ. Κ., 2019. – Μελέτη της άμεσης επίδρασης των αιωρούμενων σωματιδίων στο κλίμα περιοχής με τη χρήση του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM3. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., 71 σελ.

Ntogras C. K., 2019. – Study of the direct effect of aerosol particles on regional climate using the regional climatic model RegCM3. Master Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 71 pp.

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

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





2.1 ΤΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	29
2.1.1 Περιγραφή του μοντέλου	29
2.1.1.1 Το πλέγμα	29

2.1.1.2 Σχήμα διάδοσης ακτινοβολίας (Radiative transfer scheme)31
2.1.1.3 Σχήμα νεφών και υετού (Cloud and precipitation scheme)32
2.1.1.4 Σχήμα οριακού στρώματος34
2.1.1.5 Σχήμα εδάφους36
2.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ
2.2.1 Παράμετροι της προσομοίωσης
2.2.2 Δεδομένα αρχικών και οριακών συνθηκών
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ40
3.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΑΙΩΡΗΜΑΤΩΝ40
3.1.1 Επίδραση στην ηλιακή ακτινοβολία40
3.1.2 Μεταβολές στη θερμοκρασία43
3.1.3 Μεταβολές στα γεωδυναμικά ύψη49
3.1.4 Μεταβολές στον άνεμο51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ54
4.1 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ54
4.1.1 Ανακεφαλαίωση παραμέτρων της μελέτης54
4.1.2 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων54
ЕЛЛНNІКН ПЕРІЛНΨН
АГГЛІКН ПЕРІЛНҰН
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ψηφιακή συλλογή

Βιβλιοθήκη



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία έχει ως θέμα τη μελέτη της επίδρασης ανθρωπογενούς προέλευσης ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων στο κλίμα της Ευρώπης, λόγω της παρεμβολής τους στην ηλιακή ακτινοβολία, κατά τη 12ετή περίοδο μεταξύ 1996 και 2007, με χρήση του κλιματικού μοντέλου περιοχής (RCM) RegCM3. Η δομή του παρόντος συγγράμματος, έχει ως ακολούθως.

Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται μία αναφορά στα είδη των αιωρούμενων σωματιδίων που απασχολούν την εργασία και στα φυσικά χαρακτηριστικά τους, που αναμένεται να κρίνουν την επιρροή τους στο κλίμα. Επίσης στον τρόπο με τον οποίο υλοποιείται αυτή η επιρροή.

Στο δεύτερο, γίνεται μία περιγραφή του κυρίου εργαλείου της μελέτης, δηλαδή του κλιματικού μοντέλου περιοχής RegCM3 και του τρόπου με τον οποίο γίνεται η προσομοίωση των αιωρημάτων. Επίσης, δίνονται, εν συντομία, πληροφορίες για τις παραμέτρους που έχουν επιλεγεί για την προσομοίωση και για τα δεδομένα που έχουν χρησιμοποιηθεί ως αρχικές και οριακές συνθήκες.

Στο προτελευταίο κεφάλαιο, παρατίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και στο τελευταίο γίνεται ο σχολιασμός τους και εξάγονται τα τελικά συμπεράσματα.

Εισαγωγή



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΑ ΑΙΩΡΗΜΑΤΑ

1.1.1 Ορισμός του όρου αιωρήματα

Αιωρήματα (aerosols) έχει επικρατήσει να ονομάζονται τα υγρά ή στερεά σωματίδια, διαστάσεων από μερικά νανόμετρα (nm) ως και αρκετές δεκάδες μικρά (μm), που αιωρούνται ελεύθερα μέσα σε ένα αέριο μέσο. Σύμφωνα με τον πιο αυστηρό ορισμό, ο όρος περιγράφει το όλο μίγμα αερίου-σωματιδίων. Παραδείγματα αιωρημάτων της ατμόσφαιρας, είναι τα ακόλουθα

- Σκόνες (dusts), που εισέρχονται στην ατμόσφαιρα ως προϊόντα μηχανικού κατακερματισμού, λόγω τριβής, διάβρωσης, σύνθλιψης κτλ,
- Ομίχλες (fogs), δηλαδή τα ορατά αιωρήματα των διαφόρων φάσεων του νερού,
- Ατμοί (Fumes), τα στερεά παράγωγα συμπύκνωσης,
- Αχλείς, ξηρές & υγρές (hazes & mists), το συνδυασμό ρύπων και σκόνης, με ή χωρίς την παρουσία υδροσταγονιδίων,
- Σωματίδια (particles),
- Αιθαλομίχλη (smog),
- Kaπvoí (smokes),
- Αιθάλη (soot)

1.1.2 Κατηγορίες ατμοσφαιρικών αιωρημάτων

Τα αιωρήματα μπορούν να τοποθετηθούν σε κατηγορίες, ανάλογα με τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται.

Μπορούν να χωριστούν σε πρωτογενή (primary) ή δευτερογενή (secondary), ανάλογα με το αν εκπέμπονται ευρισκόμενα, από τη στιγμή της δημιουργίας τους, στην τελική τους μορφή/σύσταση ή αν αποτελούν το προϊόν διεργασιών που έπονται της εκπομπής των συστατικών τους.

Εισαγωγή

Αν κριτήριο αποτελεί το ύψος όπου συναντώνται στην ατμόσφαιρα, τότε μπορούν να διαιρεθούν σε τροποσφαιρικά και στρατοσφαιρικά. Τα στρατοσφαιρικά αιωρήματα είναι υδατικό διάλυμα θειϊκού οξέος, με συγκέντρωση 60-80%, ανάλογα με τις συνθήκες θερμοκρασίας (Η μικρότερη συγκέντρωση αντιστοιχεί σε θερμοκρασία -80°C και η μεγαλύτερη σε -45°C). Σε αντίθεση με τα στρατοσφαιρικά αιωρήματα, τα τροποσφαιρικά είναι σε μεγάλο βαθμό ανθρώπινης προέλευσης.

Συνεπώς, μπορεί να γίνει ένας επιπλέον διαχωρισμός, ανάλογα με τις περιοχές του πλανήτη στις οποίες συναντώνται, όπως αστικές ή μη, αγροτικές, απομακρυσμένες, ηπειρωτικές και θαλάσσιες. Η προέλευση και η διάρκεια ζωής στην ατμόσφαιρα είναι οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν την τελική κατάταξή τους.

Άλλο, πάρα πολύ σημαντικό κριτήριο κατάταξης, είναι οι διαστάσεις των σωματιδίων των αιωρημάτων. Για τα συνολικά όρια μεγέθους έχει ήδη γίνει λόγος. Πέρα από αυτό, τα αιωρήματα μπορούν να διαχωριστούν σε λεπτόκοκκα (fine) και χονδρόκοκκα (coarse), με κρίσιμο μέγεθος διαχωρισμού τα 2.5μm. Πρέπει να επισημανθεί ότι αυτή η διάκριση κάθε άλλο παρά αυθαίρετη είναι, αφού οι δύο κατηγορίες μεγεθών έχουν διαφορετικές διαδικασίες παραγωγής, διάδοσης και απομάκρυνσης. Επιπλέον, έχουν σημαντικά διαφορετικές φυσικές ή/και χημικές ιδιότητες και –κάτι πολύ σημαντικό για την ανθρωπότητα– διαφορετική επίδραση στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα (Εν συντομία, όσο μικρότερο το μέγεθος, τόσο πιο βαθιά στο αναπνευστικό σύστημα μπορεί να φτάσει κάποιο σωματίδιο και να δημιουργήσει πρόβλημα. Κρίσιμη τιμή είναι τα 10nm).

Για τα τροποσφαιρικά αιωρήματα, σημαντικός παράγοντας είναι η σύσταση. Υπάρχουν τα θειούχα (sulfates), τα ανθρακούχα, οργανικά και ανόργανα (carbonaceous elemental/black/graphitic & organic), η σκόνη (mineral dust), τα άλατα θαλάσσιας προέλευσης (sea salts) και άλλα.

Τέλος, μπορεί να γίνει μία κατάταξη σε σχέση με την προέλευση. Υπάρχουν φυσικά αιωρήματα αλλά και ανθρωπογενή, προέλευσης ηπειρωτικής και θαλάσσιας, ηφαιστειακής, βιολογικής, βιομηχανικής και τα λοιπά.

1.1.3 Κύρια χαρακτηριστικά των αιωρημάτων

Ψηφιακή συλλογή

Βιβλιοθήκη

Η συμπεριφορά των αιωρημάτων και ο τρόπος που αυτά επιδρούν στις διεργασίες του συστήματος ατμόσφαιρας-εδάφους, καθορίζεται από χαρακτηριστικά όπως οι διαστάσεις, οι συγκεντρώσεις και οι φυσικές και χημικές τους ιδιότητες. Στην ακόλουθη παράγραφο, γίνεται λόγος για ιδιότητες που είναι γενικές και κοινές για όλα, ή τουλάχιστον τα περισσότερα, είδη αιωρημάτων. Αναφορά σε συγκεκριμένες ιδιότητες όπως οι χημικές ή οι φυσικές, που εν γένει διαφέρουν, ανάλογα με το είδος του αιωρήματος, θα γίνουν ξεχωριστά και μόνο για τις περιπτώσεις που απασχολούν την παρούσα μελέτη.

1.1.3.1 Φυσικές διαστάσεις

Έχει ήδη αναφερθεί ότι τα ατμοσφαιρικά αιωρήματα έχουν μέγεθος από μερικά nm ως αρκετά μm, καθώς και ότι κρίσιμη διάμετρος, για την κατάταξή τους σε λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα είναι τα 2.5μm. Επίσης ότι το μέγεθος καθορίζει πολλές από τις ιδιότητες των σωματιδίων. Όπως έχει ήδη γίνει εμφανές, κατά την διερεύνηση του μεγέθους των αιωρημάτων, χρησιμοποιείται συνήθως ο όρος «διάμετρος.» Η λέξη διάμετρος παραπέμπει σε σφαιρικά σωματίδια, κάτι που δεν είναι δυνατόν να ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις. Προϋποτίθενται, λοιπόν, κάποιου είδους προσεγγίσεις, όπως αυτές των σφαιρών ίσης διαμέτρου ή ίσου όγκου.

Με μία τέτοιου είδους ταξινόμηση, προκύπτουν για τα αιωρήματα οι ακόλουθες κατηγορίες (modes). Οι πυρήνες (nuclear/nucleation mode), τα σωματίδια Aitken (Aitken mode), η κατηγορία συσσώρευσης (accumulation mode) και η χονδρόκοκκη (coarse mode).

1.1.3.1α Πυρήνες και σωματίδια Aitken

Σύμφωνα με μία θεώρηση, η δεύτερη από αυτές τις κατηγορίες συμπεριλαμβάνει και την πρώτη. Οι πυρήνες έχουν διαστάσεις μικρότερες από 10nm. Πρόκειται συνήθως για μόλις παραχθέντα αιωρήματα, από συμπύκνωση ατμών καύσεων και πυρηνοποίηση ατμοσφαιρικών αερίων (gas phase conversion). Αποτελούν ένα μεταβατικό στάδιο, αφού, μέσω διαφόρων διαδικασιών επαύξησης, εξελίσσονται σε κάποιαν από τις υπόλοιπες κατηγορίες. Μπορούν να κάνουν την εμφάνισή τους σε αστικές περιοχές, εφ'όσον το επιτρέπουν οι καιρικές συνθήκες. Η συνολική τους μάζα και ο όγκος, ως ποσοστό του συνόλου των αιωρημάτων, είναι, σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις, πρακτικά αμελητέα. Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο και με την αριθμητική τους συγκέντρωση/πυκνότητα. Είναι σημαντικό να μην συγχέονται με τους πυρήνες συμπύκνωσης (cloud condensation nuclei), οι οποίοι είναι σαφώς μεγαλύτεροι σε μέγεθος. Ο όρος «πυρηνοποιήση» αναφέρεται στο μηχανισμό με τον οποίο αναπτύσσονται, μετά τη δημιουργία τους. Τα σωματίδια Aitken, περιλαμβάνουν την περιοχή διαμέτρων από 10 έως 100nm. Στα χαρακτηριστικά τους τα σχετικά με την παραγωγή, εξάλειψη, αντιπροσώπευση στη συνολική μάζα, όγκο και συγκέντρωση, μοιάζουν με την κατηγορία των πυρήνων. Σημαντική διαφορά, το γεγονός ότι ορισμένα σωματίδια Aitken μπορούν να λειτουργήσουν και ως πυρήνες συμπύκνωσης.

1.1.3.1β Κατηγορία συσσώρευσης (Accumulation Mode)

Εισαγωγή

Εκεί ανήκουν τα αιωρήματα με διαστάσεις από 100nm μέχρι 2.5μm. Είναι τα μεγαλύτερα λεπτόκοκκα (fine) σωματίδια. Παίρνουν το όνομά τους από το γεγονός ότι οι μηχανισμοί απομάκρυνσης από την ατμόσφαιρα (καταβόθρες), είναι ιδιαίτερα αναποτελεσματικοί λογω των διαστάσεών τους, οπότε μεγάλο μέρος της συνολικής μάζας και της αθροιστικής επιφάνειας του συνόλου των αιωρημάτων τείνει να συσσωρεύεται σε αυτή την ομάδα. Οι αριθμοί τους φθίνουν αργά, μόνο μέσω συσσωμάτωσης (coagulation) για τη δημιουργία νέων σωματιδίων. Είτε εκπέμπονται πρωτογενώς είτε προέρχονται από συνένωση ή επαύξηση μικρότερων σωματιδίων. Είναι από πρωτογενείς εκπομπές, από επαύξηση λόγω συσσωμάτωσης ή επιπλέον συμπύκνωσης επάνω σε ήδη υπάρχοντα σωματίδια (condensation mode) και σε εκείνα που προέρχονται από διεργασίες επαύξησης που συμβαίνουν εντός νεφών (droplet mode).

1.1.3.1γ Κατηγορία χονδρόκοκκων αιωρημάτων (Coarse Mode)

Περιλαμβάνει όλα τα υπόλοιπα αιωρήματα, δηλαδή αυτά με διάμετρο μεγαλύτερη από 2.5μm. Τα σωματίδια αυτής της κατηγορίας οφείλουν την ύπαρξή τους σε διεργασίες μηχανικής φύσεως (πχ διάβρωση, αιώρηση γύρης από βλάστηση και αλάτων από τη θάλασσα κτλ), και συνήθως θεωρούνται σκόνη. Τα αίτια της δημιουργίας μπορεί να είναι είτε φυσικά, είτε να συνδέονται με ανθρώπινες δραστηριότητες. Λόγω της σχετικά μεγάλης μάζας τους, η απομάκρυνση είναι σχετικά ταχεία και πραγματοποιείται υπό την επίδραση της βαρύτητας. Πρόκειται κυρίως για πρωτογενή αιωρήματα, με μικρά ποσοστά από θειούχες και νιτρικές ενώσεις.

1.1.3.2 Συγκεντρώσεις των αιωρημάτων

Ψηφιακή συλλογή

Βιβλιοθήκη

Ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να εκφραστούν οι συγκεντρώσεις των αιωρημάτων, καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Σε κάποιες περιπτώσεις αρκεί μία μέση αριθμητική συγκέντρωση, που περικλείει όλες τις κατηγορίες και όλα τα μεγέθη των αιωρημάτων. Αυτό όμως που απαιτείται σε γενικές γραμμές, είναι μία μαθηματική έκφραση (δηλαδή κάποια συνάρτηση, ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω επεξεργασία ή αξιοποίησή της) που να απεικονίζει τις επί μέρους συγκεντρώσεις των διαφόρων κατηγοριών των αιωρημάτων. Η πιο προφανής τέτοια έκφραση είναι αυτή της κατανομής της αριθμητικής συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων, σαν συνάρτηση κάποιας άλλης παραμέτρου, όπως η διάμετρός τους. Εναλλακτικά, αντί της αριθμητικής συγκέντρωσης, υπάρχουν και άλλες ποσότητες, όπως η συνολική επιφάνεια, μάζα και όγκος των αιωρημάτων, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν (Η πληροφορία για την επιφάνεια, για παράδειγμα, θα μπορούσε να έχει ιδιαίτερη αξία κατά τη μελέτη ορισμένων φυσικών ή χημικών διεργασιών). Αυτού του είδους η αντιμετώπιση, αγνοεί το είδος και τη σύσταση των αιωρημάτων, κάτι που διατηρεί τη γενικότητά της και επιτρέπει τις συγκρίσεις μεταξύ διαφορετικών περιπτώσεων ή περιοχών, πάντα ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής.

Μία απόλυτα ακριβής έκφραση της κατανομής της αριθμητικής συγκέντρωσης ως προς τη διάμετρο, θα ήταν διακριτή συνάρτηση και ως προς την

ανεξάρτητη μεταβλητή (διάμετρος) και ως προς την εξαρτημένη (συγκέντρωση). Θα ήταν διακριτή ως προς τη συγκέντρωση, επειδή ο αριθμός των σωματιδίων σε μία περιοχή δεν μπορεί να είναι παρά ένας ακέραιος αριθμός. Όμως, και η διάμετρος είναι στην ουσία διακριτή ποσότητα, αφού η κάθε μεταβολή της δεν μπορεί να είναι μικρότερη από τη διάμετρο ενός μορίου ή ατόμου. Επιπλέον, μία πλήρης κατανομή θα έπρεπε να περιλαμβάνει πληροφορία για κάθε ένα ξεχωριστό σωματίδιο σε μία περιοχή. Για το λόγω αυτό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκφράσεις κατανομών συγκέντρωσης που περιλαμβάνουν ομαδοποιήσεις.

Εισαγωγή

Οι κατανομές της αριθμητικής συγκέντρωσης μπορεί να περιλαμβάνουν ομαδοποιήσεις, σε σχέση με τις διαμέτρους, ώστε να είναι απλούστερη η μορφή και η



Σχήμα 1.1 Γραφική απεικόνιση διακριτής κατανομής συγκέντρωσης αιωρημάτων διαμέτρου έως 5μm, σε μορφή ιστογράμματος, κάνοντας χρήση 12 ομάδων μεγέθους, οι οποίες εμφανίζονται στη δεξιά μεριά, σε μορφή πίνακα. Στο ένθετο, παρουσιάζεται σε μεγέθυνση η περιοχή έως 0.2μm. Επειδή οι κατηγορίες δεν έχουν το ίδιο εύρος, κάποιες λεπτομέρειες «χάνονται» στην απεικόνιση.(Πηγή: Seinfeld & Pandis 2006)

κατανόησή τους (Σχήμα 1.1). Περιορίζεται έτσι όλη η απαραίτητη πληροφορία στις τιμές των ορίων των διαφόρων ομάδων/κατηγοριών μεγέθους (bin sizes) και στις συγκεντρώσεις τους. Η επιλογή ομάδων με διαφορετικό «εύρος» διαστάσεων μπορεί να οδηγήσει σε παρερμηνεία των αποτελεσμάτων, πρόβλημα που λύνεται με κανονικοποίηση ως προς το «εύρος» (Σχήμα 1.2). Η ομαδοποίηση έχει και το τίμημά της, διότι έτσι χάνεται η πληροφορία για το τί συμβαίνει στο εσωτερικό των ομάδων. Εναλλακτικά, μπορεί να επιλεγούν, ως προσεγγίσεις, συνεχείς συναρτήσεις με μορφές που διευκολύνουν την περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων ή να συμπιεστεί επιπλέον η πληροφορία και να ληφθεί μόνον ένας μικρός αριθμός αντιπροσωπευτικών τιμών της κάθε κατανομής (πχ ροπές).

Ψηφιακή συλλογή

Βιβλιοθήκη



Σχήμα 1.2 Η ίδια διακριτή κατανομή όπως στο Σχήμα 1.1, για μικρότερη περιοχή (ως 2μm), μετά από κανονικοποίηση ως προς το εύρος της κάθε κατηγορίας.(Πηγή: Seinfeld & Pandis 2006)

1.1.3.3 Φύση/Μορφή των αιωρημάτων στην ατμόσφαιρα

Τα αιωρήματα μπορεί να βρίσκονται σε στερεά ή σε υγρή φάση. Η μορφή με την οποία εμφανίζονται, εξαρτάται από τη σύστασή τους, αλλά και από τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Για παράδειγμα, αρκετά από τα αιωρήματα είναι αλατούχες ενώσεις, κυρίως νιτρικές (nitrates) και θειϊκές (sulfates), αλλά και το χλωριούχο νάτριο (NaCl). Πρόκειται για ουσίες που συχνότερα απαντώνται σε στερεά φάση, όμως, στην ατμόσφαιρα, κάτω από τις κατάλληλες συνθήκες σχετικής υγρασίας (Relative Humidity-RH) και –σε μικρότερο βαθμό– θερμοκρασίας, εμφανίζονται ως υδατικά διαλύματα.

Το τί από τα δύο θα συμβεί στην πράξη, εξαρτάται αποκλειστικά από την τιμή της Ελεύθερης Ενέργειας Gibbs (Gibbs Free Energy-GFE). Αυτή ορίζεται από τη σχέση G = U + pV - TS, όπου U η εσωτερική ενέργεια ενός συστήματος, p η πίεση, V ο όγκος του, T η θερμοκρασία και S η εντροπία του. Χρησιμοποιείται αρκετές

φορές ως υποκατάστατο της εσωτερικής ενέργειας ενός συστήματος, γιατί είναι ευκολότερος ο υπολογισμός των μεταβολών της, αφού, για κλειστά συστήματα,

Εισαγωγή

 $dG = -SdT + Vdp (1.1) \qquad \text{kat} \qquad dU = TdS - pdV (1.2)$

Οι μεταβολές της θερμοκρασίας και της πίεσης μπορούν να παρατηρηθούν ευκολότερα από αυτές του όγκου και της εντροπίας και είναι πιο πρακτικές ως ανεξάρτητες μεταβλητές. Έχει αποδειχθεί (Denbigh 1981) ότι η τάση ενός συστήματος να μεγιστοποιήσει την εντροπία του ώστε να έλθει σε ισορροπία, σε συμφωνία με το 20 Νόμο της Θερμοδυναμικής, ισούται με τάση για ελαχιστοποίηση της GFE. Δηλαδή, ένα σύστημα, αν αφεθεί ελεύθερο, υπόκειται σε μεταβολές για τις οποίες ισχύει πάντα $dG \leq 0$. Αυτή η ελαχιστοποίηση αποτελεί το γενεσιουργό αίτιο για κάθε διεργασία μέσα στο σύστημα.

Συμβαίνει να ισχύει ότι η FGE ενός αλατούχου υδατικού διαλύματος ελαττώνεται, καθώς αυξάνει η RH του περιβάλλοντος, αλλά και καθώς το διάλυμα γίνεται αραιότερο. Συνεπώς, για πολύ χαμηλές τιμές σχετικής υγρασίας, η GFE του στερεού άλατος είναι χαμηλότερη αυτής του υδατικού του διαλύματος και τα αιωρήματα παραμένουν σε στερεά φάση. Υπάρχει μία κρίσιμη τιμή της RH (DRH-Deliquescence RH), για την οποία οι τιμές της GFE είναι ίσες. Στο σημείο εκείνο παρατηρείται ακαριαία απορρόφηση από το άλας, μίας ποσότητας νερού, με αποτέλεσμα τη δημιουργία κορεσμένου υδατικού διαλύματος. Ακολούθως, η αραίωση του διαλύματος ευνοείται θερμοδυναμικά, εφ'όσον υπάρχει η διαθέσιμη ποσότητα ύδατος.

Η αντίστροφη διαδικασία είναι πιο περίπλοκη, γιατί προϋποθέτει τη δημιουργία πυρήνων στερεού άλατος, γύρω από τους οποίους θα γίνει η κρυστάλλωση. Είναι μία διαδικασία παραπλήσια της δημιουργίας βροχοσταγόνων ή παγοκρυστάλλων. Όπως και σε εκείνη την περίπτωση, της τελικής μεταβολής προηγείται μία κατάσταση υπερκορεσμού. Για το λόγο αυτό, η αποκρυστάλλωση παρατηρείται σε τιμή σχετικής υγρασίας χαμηλότερη από αυτήν της ενυδάτωσης, που είναι δύσκολο να προσδιοριστεί υπολογιστικά. Για το λόγο αυτό, προτιμάται ο εργαστηριακός προσδιορισμός της. Ονομάζεται ERH (Efflorescence RH).

Υπάρχει μία πληθώρα παραγόντων που μπορεί να επηρεάσει τις τιμές της υγρασίας στις οποίες συμβαίνει η μεταβολή της φάσης. Η παρουσία περισσοτέρων της μίας χημικής ουσίας στο σωματίδιο είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα, που οδηγεί συνήθως σε ελάττωση της DRH. Γενικά, δεν μπορεί να γίνει ασφαλής πρόβλεψη,

ακόμη και για κάποιο «καθαρό» σωματίδιο, ακόμη και αν είναι γνωστή η τιμή της RH, διότι σημασία έχουν και οι προηγούμενες τιμές της (αν πχ η RH παρουσιάζει τάση αύξησης ή μείωσης).

Ψηφιακή συλλογή

Βιβλιοθήκη

Πάντως, υπάρχουν και κάποιες ενώσεις που παρουσιάζουν πολύ ομαλή συμπεριφορά. Είναι αυτές που είναι ιδιαίτερα υδρόφιλες, με ίσως χαρακτηριστικότερη περίπτωση το θειϊκό οξύ (H₂SO₄). Αυτές συμπεριφέρονται σαν να παρουσιάζουν εξαιρετικά χαμηλή τιμή DRH. Εμφανίζονται πάντα με τη μορφή υδατικού διαλύματος, ακόμη και σε εξαιρετικά χαμηλές σχετικές υγρασίες.

Η επίδραση της θερμοκρασίας συνδέεται με την εξάρτηση της μερικής πίεσης των υδρατμών από αυτήν, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι κατά την ενυδάτωση των αιωρημάτων συμβαίνει έκλυση θερμότητας, λόγω της συμπύκνωσης μίας ποσότητας υδρατμών και , συνήθως, απορρόφηση θερμότητας λόγω της διάλυσης μίας ποσότητας άλατος.

Η ποσότητα του ατμοσφαιρικού ύδατος που δεσμεύεται ή απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια όλων αυτών των διεργασιών μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα και συνεπώς η σχετική υγρασία του περιβάλλοντος μπορεί να θεωρηθεί ανεπηρέαστη. Σε διαφορετική περίπτωση, η μελέτη θα καθίστατο πολύ πιο περίπλοκη.

1.1.4 Κύκλος ζωής των αιωρημάτων στην ατμόσφαιρα

Η διάρκεια ζωής των αιωρημάτων στην ατμόσφαιρα είναι ο μέσος χρόνος μεταξύ της εισαγωγής τους και της απομάκρυνσής τους από την ατμόσφαιρα. Η εισαγωγή τους δεν είναι απαραίτητο να ταυτίζεται με τη δημιουργία τους, αφού μπορεί να υφίστανται ήδη, όπως συμβαίνει με τα υλικά που αποσπώνται από το έδαφος μέσω της διαδικασίας της διάβρωσης. Ομοίως, δεν είναι απαραίτητο να είναι το έδαφος η προέλευσή τους, κάτι που ισχύει για τα παράγωγα χημικών αντιδράσεων (Αυτό βέβαια δεν αποκλείει να προέρχονται από το έδαφος τα συστατικά τους). Όσο για την απομάκρυνση, μπορεί να ισοδυναμεί με εξάλειψη, πχ αν είναι τα συστατικά των προαναφερθέντων αντιδράσεων ή απλώς με επιστροφή στην επιφάνεια του εδάφους.

Από τη στιγμή που οι όποιες χημικές αντιδράσεις είναι συνήθως αποκλειστικές για συγκεκριμένες ουσίες, θα γίνει λόγος για τις διεργασίες που

9

σχετίζονται με τις ουσίες που απασχολούν την παρούσα εργασία, στο αντίστοιχο

1.1.5 Οπτικές ιδιότητες των αιωρημάτων

Εισαγωγήθηκη

0

κεφάλαιο.

Οι οπτικές ιδιότητες των σωματιδίων αφορούν την αλληλεπίδρασή τους με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Στις μετεωρολογικές και κλιματικές μελέτες, αυτό σημαίνει την ηλιακή και τη γήινη ακτινοβολία. Η εν λόγω αλληλεπίδραση, μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Τα σωματίδια μπορεί είτε να απορροφήσουν την ακτινοβολία, αυξάνοντας την εσωτερική τους ενέργεια, ουσιαστικά τη θερμοκρασία τους, είτε να την ανακατευθύνουν, ενδεχομένως αλλάζοντας και τα φυσικά της χαρακτηριστικά.

Τα κύρια γνωρίσματα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, είναι το μήκος κύματός της (ή, ισοδύναμα, η συχνότητά της), η ισχύς της και η πόλωσή της. Σε κάποιες περιπτώσεις, αντί για την ισχύ χρησιμοποιείται η επιφανειακή πυκνότητά της, σε μονάδες ισχύος ανά μονάδα επιφανείας (W/m²), ποσότητα που είναι γνωστή και ως ένταση (intensity) ή και ροή (flux) της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Ομοίως μπορεί να γίνει χρήση της φασματικής πυκνότητας ισχύος (ισχύς ανά μονάδα μήκους κύματος). Η πόλωση, που εκφράζει τον προσανατολισμό των διανυσμάτων του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου του κύματος, σε σχέση με τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Το ηλιακό φως είναι επίπεδο κύμα, που σημαίνει ότι τα δύο διανύσματα είναι κάθετα, τόσο ως προς τη διεύθυνση διάδοσης, όσο και μεταξύ τους. Η πόλωσή του όμως δεν είναι γραμμική, που σημαίνει ότι τα δύο διανύσματα δεν διατηρούνται στην ίδια θέση, με τη πάροδο του χρόνου.

Τα σχετικά χαρακτηριστικά των σωματιδίων, είναι το μέγεθος, το σχήμα και η σύστασή του. Λόγω της φύσης της αλληλεπίδρασης, το μέγεθος είναι σημαντικό μόνο σαν συνάρτηση του μήκους κύματος της εμπλεκόμενης ακτινοβολίας. Στην πραγματικότητα, αυτή η σχέση είναι ίσως ο πιο σπουδαίος παράγοντας για το όλο φυσικό φαινόμενο. Εκφράζεται συνήθως ως

$$a = \frac{A}{\lambda}$$
 (1.3)

με Α την επιφάνεια της προβολής του σωματιδίου σε ένα επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας. Είναι τόση η σημασία του μεγέθους στη

σκέδαση, που αποτελεί σημαντικό κριτήριο για τη μέθοδο της θεωρητικής αντιμετώπισης της σκέδασης

Ψηφιακή συλλογή

Βιβλιοθήκη

- Αν α<1 , μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι προσεγγίσεις Rayleigh, Born ή WKB
- Αν α≈1, υπάρχει η θεωρία σκέδασης του Mie (Μόνο για σφαιρικούς σκεδαστές) και η προσέγγιση Φυσικής Οπτικής (Kirchhoff).
- Αν α>1 ισχύουν οι κανόνες της γεωμετρικής σκέδασης, που προέρχονται από τη γεωμετρική οπτική.

Παρακάτω, θα γίνει λόγος για μερικές από αυτές, πιο συγκεκριμένα για τη σκέδαση Rayleigh, για τη σκέδαση Mie και για τη γεωμετρική σκέδαση.

Το σχήμα παύει να παίζει ρόλο αν το σωματίδιο γίνει πολύ μικρό σε σχέση με το μήκος κύματος, δηλαδή στην περιοχή της σκέδασης Rayleigh. Λόγω της φύσης των αιωρημάτων, η παραδοχή ότι είναι σφαιρικά, αποτελεί συνήθως μία αρκετά καλή προσέγγιση για τους υπολογισμούς. Σε αυτή την περίπτωση, η προηγούμενη

μαθηματική έκφραση μπορεί να πάρει τη μορφή $a = \frac{\pi D_p}{\lambda}$ (1.4), με D_p τη διάμετρο.

Η σύσταση είναι αυτή που καθορίζει το δείκτη διάθλασης, ο οποίος αποτελεί συνάρτηση και του μήκους κύματος. Για πρακτικούς λόγους, εκφράζεται συνήθως σαν συνάρτηση του αντίστοιχου δείκτη διάθλασης του περιβάλλοντος μέσου, δηλαδή του αέρα, που ισούται περίπου με τη μονάδα. Σε αντίθεση με τον αέρα, τα περισσότερα υλικά έχουν μιγαδικό δείκτη διάθλασης.

1.1.5.1 Σκέδαση, απορρόφηση και εξάλειψη

Η μεταβολή ορισμένων χαρακτηριστικών της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, κατόπιν αλληλεπίδρασης με διάφορα υλικά σώματα (Σχήμα 1.3), ονομάζεται σκέδαση. Οφείλεται στη διέγερση, από την προσπίπτουσα ακτινοβολία, των ηλεκτρικών φορτίων των ατόμων των σωματιδίων-σκεδαστών. Η σκεδαζόμενη ακτινοβολία εκπέμπεται από το σκεδαστή προς όλες τις κατευθύνσεις, αλλά όχι απαραίτητα με την ίδια ένταση. Ανάλογα με την επίδραση της σκέδασης στη συχνότητα, μπορεί να διακριθεί σε Ελαστική, αν η συχνότητα παραμένει αμετάβλητη

Ημιελαστική, αν παρατηρείται μεταβολή μόνο λόγω φαινομένου Doppler ή διάχυσης συχνοτήτων (Diffusion Broadening)

Ανελαστική, αν η συχνότητα μεταβάλλεται

Εισαγωγή

Στην περίπτωση των σκεδαστών της ατμόσφαιρας, οι σκεδάσεις είναι ελαστικές. Επίσης, πιθανή είναι η επίδραση της σκέδασης στην πόλωση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Το ηλιακό φως δεν είναι πολωμένο –για την ακρίβεια η πόλωσή του είναι τυχαία. Το φως του ουρανού όμως, εξαιτίας των αλλεπάλληλων σκεδάσεων που έχει υποστεί, έχει αποκτήσει πόλωση. Λόγω της αρχής διατήρησης της ενέργειας το άθροισμα ισχύος της σκεδαζόμενης και της απορροφόμενης ακτινοβολίας από ένα σωματίδιο είναι πάντοτε ίσο με το αντίστοιχο ποσό της εξαλειφόμενης από αυτό ακτινοβολίας, δηλαδή

$$P_{ext} = P_{sca} + P_{abs} \ (1.5)$$

Ο ποσοτικός προσδιορισμός της ικανότητας ενός σκεδαστή να επηρεάσει την προσπίπτουσα σε αυτόν ακτινοβολία, γίνεται με τη βοήθεια των διατομών και των συντελεστών σκέδασης, απορρόφησης και εξάλειψης. Η διατομή σκέδασης ορίζεται ως το ποσό της ισχύος που σκεδάζεται ως προς την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας,

$$C_{sca} \left[m^2 \right] = \frac{P_{sca} \left[W \right]}{F_{inc} \left[W/m^2 \right]}$$
(1.6)

Ο δε συντελεστής σκέδασης, που είναι καθαρός αριθμός, υπολογίζεται διαιρώντας τη διατομή σκέδασης με τη φυσική διατομή του σκεδαστή

$$Q_{sca} = \frac{C_{sca}}{A} (1.7)$$

Με αντίστοιχο τρόπο ορίζονται οι διατομές και οι συντελεστές απορρόφησης και εξάλειψης, ενώ, λόγω των παραπάνω σχέσεων, ισχύει ότι

 $C_{ext} = C_{sca} + C_{abs} \quad (1.8) \qquad \qquad \kappa \alpha \iota \qquad Q_{ext} = Q_{sca} + Q_{abs} \quad (1.9)$

Μπορεί τότε να ορισθεί και η έννοια της λευκαύγειας απλής σκέδασης (single scattering albedo - SSA), βάσει του τύπου

$$\omega = \frac{C_{sca}}{C_{ext}} = \frac{Q_{sca}}{Q_{ext}} \quad (1.10)$$

Η ποσότητα που ενδιαφέρει περισσότερο στα προβλήματα της σκέδασης, δεν είναι τόσο η συνολική ακτινοβολία που σκεδάζεται, όσο η ακτινοβολία που

σκεδάζεται προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση, αυτήν του παρατηρητή. Ο προσδιορισμός της γίνεται με χρήση της συνάρτησης φάσης (scattering phase function)

Ψηφιακή συλλογή

Βιβλιοθήκη

$$Ph(\vartheta,\varphi) = \frac{F_{sca}(\vartheta,\varphi)}{P_{sca}} = \frac{F_{sca}(\vartheta,\varphi)}{\int\limits_{0}^{2\pi}\int\limits_{0}^{\pi}F_{sca}(\vartheta,\varphi)\sin\vartheta d\vartheta d\varphi}$$
(1.11)

στην οποία χρησιμοποιούνται σφαιρικές συντεταγμένες. Η συνάρτηση δίνει το αποτέλεσμα ως ποσοστό του συνόλου της σκεδαζόμενης ισχύος και εξαρτάται και από άλλες μεταβλητές, όπως το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και το μέγεθος του σκεδαστή, που δεν αναγράφονται στον τύπο. Το διάγραμμά της (αντίστοιχο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας των κεραιών), δείχνει τον τρόπο με τον οποίο ανακατανέμει ο σκεδαστής την ισχύ της εξαλειφόμενης ακτινοβολίας στο χώρο. Η γωνία θ (Σχήμα 1.4) έχει ιδιαίτερη σημασία, γιατί προσδιορίζει την κατεύθυνση της σκέδασης, ως προς αυτήν της πρόσπτωσης, στην ιδεατή (αλλά υπολογιστικά χρήσιμη) περίπτωση συμμετρικού σκεδαστή, όπως ο σφαιρικός. Ονομάζεται γωνία σκέδασης (scattering angle). Η παράμετρος ασυμμετρίας g (asymmetry parameter) παίρνει τιμή 1 για $\theta=0^\circ$ (πλήρη εμπροσθοσκέδαση) και -1 για $\theta=90^\circ$ (πλήρη οπισθοσκέδαση) και αποτελεί ένδειξη της επικρατέστερης κατεύθυνσης σκέδασης

$$g = \frac{1}{2} \frac{\int_{0}^{\pi} \cos \vartheta F(\vartheta) \sin \vartheta d\vartheta}{\int_{0}^{\pi} F(\vartheta) \sin \vartheta d\vartheta} = \frac{1}{2} \int_{0}^{\pi} \cos \vartheta Ph(\vartheta) \sin \vartheta d\vartheta \quad (1.12)$$

Αλλά δεν είναι άμεσα μετρήσιμη, σε αντίθεση με τον (ημισφαιρικό) λόγο οπισθοσκέδασης (hemispheric backscatter ratio)

$$b = \frac{\int_{\pi/2}^{\pi} Ph(\vartheta)\sin\vartheta d\vartheta}{\int_{0}^{\pi/2} Ph(\vartheta)\sin\vartheta d\vartheta}$$
(1.13)

που μπορεί να μετρηθεί με ένα νεφελόμετρο (nephelometer)



Σχήμα 1.3 Οι τύποι αλληλεπίδρασης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με σκεδαστή. (Πηγή: Seinfeld & Pandis 2006)



Σχήμα 1.4 Η γωνία σκέδασης

1.1.5.1α Προσέγγιση Rayleigh

Στην περίπτωση που ο σκεδαστής είναι πολύ μικρότερος από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, είναι δυνατή η αναλυτική επίλυση του προβλήματος της σκέδασης και προκύπτει ότι αυτή είναι συμμετρική προς τις δύο κατευθύνσεις, εμπρός και πίσω, όπως επίσης ότι και το σχήμα του σκεδαστή είναι σε μεγάλο βαθμό ασήμαντο.

Με την προϋπόθεση πως και ο δείκτης διάθλασης του σκεδαστή είναι ανεξάρτητος του μήκους κύματος, ισχύει ότι

Εισαγωγή

 $Q_{sca} \sim \lambda^{-4}$ (1.14) και $Q_{abs} \sim \lambda^{-1}$ (1.15), που σημαίνει ότι τόσο η απορρόφηση, όσο και η σκέδαση, αλλά κυρίως η τελευταία, αυξάνει πολύ απότομα με τη μείωση του μήκους κύματος. Αυτός είναι ο λόγος που ο ουρανός έχει χρώμα γαλάζιο και που ο ήλιος φαίνεται να έχει χρώμα κιτρινωπό την ημέρα και κόκκινο κατά τη δύση του.

1.1.5.1β Θεωρία Σκέδασης του Mie

Ψηφιακή συλλογή

Βιβλιοθήκη

Γνωστή και ως θεωρία Mie-Lorenz-Debye, είναι το είδος της σκέδασης που μπορεί να περιγράψει την αλληλεπίδραση αρκετών εκ των αιωρημάτων με το ορατό φως. Οι διατομές και οι συντελεστές σκέδασης και εξάλειψης, στην περίπτωση της σκέδασης Mie, δίνονται από αθροίσματα άπειρων όρων. Περιέχουν τους επονομαζόμενους κυματικούς συντελεστές, οι οποίοι προσδιορίζονται με τη βοήθεια των συναρτήσεων Riccati-Bessel, που, με τη σειρά τους υπολογίζονται μέσω των αναδρομικών σφαιρικών συναρτήσεων Bessel, 1ου τύπου. Πιο συγκεκριμένα,

$$Q_{sca}(n,a) = \frac{2}{a^2} \sum_{k=1}^{\infty} (2k+1) \left[\left| \mathbf{a}_k \right|^2 + \left| b_k \right|^2 \right] (1.16)$$
$$Q_{ext}(n,a) = \frac{2}{a^2} \sum_{k=1}^{\infty} (2k+1) \operatorname{Re} \left[\mathbf{a}_k + b_k \right] (1.17)$$

Με τους κυματικούς συντελεστές

$$\mathbf{a}_{k} = \frac{a\psi_{k}'(y)\psi_{k}(a) - y\psi_{k}'(a)\psi_{k}(y)}{a\psi_{k}'(y)\zeta_{k}(a) - y\zeta_{k}'(a)\psi_{k}(y)}$$
(1.18)

και

$$b_{k} = \frac{y\psi'_{k}(y)\psi_{k}(a) - a\psi'_{k}(a)\psi_{k}(y)}{y\psi'_{k}(y)\zeta_{k}(a) - a\zeta'_{k}(a)\psi_{k}(y)}$$
(1.19)

όπου y = an, με n τον κανονικοποιημένο δείκτη διάθλασης του σκεδαστή και α, αυτό της σχέσης (1.3). Οι συναρτήσεις Riccati-Bessel

$$\psi_{k}(z) = \left(\frac{\pi z}{2}\right)^{\frac{1}{2}} J_{k+\frac{1}{2}}(z) \quad (1.20)$$
$$\zeta_{k}(z) = \left(\frac{\pi z}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \left[J_{k+\frac{1}{2}}(z) + i(-1)^{k} J_{-k-\frac{1}{2}}(z)\right] \quad (1.21)$$

και οι συναρτήσεις Bessel 1ου τύπου, i-στης τάξης. Υπολογίζονται αναδρομικά, αφού



$$J_{1/2}(z) = \sqrt{\frac{2}{\pi z}} \sin z \quad (1.22)$$
$$J_{-1/2}(z) = \sqrt{\frac{2}{\pi z}} \cos z \quad (1.23)$$
$$J_{\nu+1}(z) = \frac{2\nu}{z} J_{\nu}(z) - J_{\nu-1}(z) \quad (1.24)$$
$$J_{-\nu}(z) = (-1)^{\nu} J_{\nu}(z) \quad (1.25)$$

1.1.5.1γ Γεωμετρική σκέδαση

Για τη μελέτη της σκέδασης αυτής της κατηγορίας, χρησιμοποιούνται αρχές της γεωμετρικής οπτικής. Γίνεται η παραδοχή ότι το φως διαδίδεται με τη μορφή ακτίνων και προσδιορίζονται οι τροχιές τους. Ουσιαστικά, πρόκειται για τις τροχιές διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Σε μέσα ομογενή, με αμετάβλητο δείκτη διάθλασης, οι τροχιές είναι ευθείες. Αν ο δείκτης διάθλασης μεταβάλλεται τότε είναι καμπύλες. Τέλος, στις οριακές επιφάνειες μεταξύ μέσων με διαφορετικά χαρακτηριστικά, μπορεί να αλλάξει η διεύθυνση διάδοσης, ενός μέρους ή του συνόλου της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και να υποστεί διάθλαση ή/και ανάκλαση.

Επειδή δεν αντιμετωπίζεται η ακτινοβολία ως κύμα, χαρακτηριστικά της όπως η πόλωση και η φάση αγνοούνται και έτσι φαινόμενα όπως η περίθλαση και η συμβολή δεν μπορούν να μελετηθούν. Το σχήμα και ο προσανατολισμός, αν πρόκειται για μη συμμετρικό σκεδαστή, έχουν μεγάλη σημασία.

Πρόκειται για την προσέγγιση που προσφέρεται για τη μελέτη της αλληλεπίδρασης των βροχοσταγόνων με το φως. Σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζεται το «παράδοξο εξάλειψης» (extinction paradox) (Bohren & Huffman 1983), διότι η διατομή εξάλειψης προκύπτει διπλάσια της προβλεπόμενης από τη θεωρία. Πιο πρόσφατες μελέτες (Berg, Sorensen & Chakrabarti 2010) αποδίδουν αυτή τη διαφοροποίηση στο ότι το προσπίπτον κύμα δεν μπορεί να εισχωρήσει καθόλου στο εσωτερικό του σκεδαστή.

1.1.5.2 Συμπεριφορά μέσου που περιέχει σκεδαστές

Ψηφιακή συλλογή

Βιβλιοθήκη

μήμα Γεωλογίας

Αν η απόσταση μεταξύ των σκεδαστών ενός μέσου είναι αρκετά μεγάλη, αυτό θεωρείται αραιό μέσο (tenuous medium), οπότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι αρχές της απλής σκέδασης (single scattering) και το τελικό αποτέλεσμα, δηλαδή το συνολικό πεδίο στο χώρο, να προκύψει με τη βοήθεια της αρχής της υπέρθεσης. Η προσέγγιση του αραιού μέσου μπορεί να εφαρμοστεί για όλες τις περιπτώσεις των ατμοσφαιρικών συνθηκών. Υπενθυμίζεται ότι μέτρα σύγκρισης, για το χαρακτηρισμό των αποστάσεων, είναι τα μεγέθη των σκεδαστών και τα μήκη κύματος της ακτινοβολίας.

Η επίδραση ενός αραιού μέσου (tenuous medium) στη διερχόμενη ακτινοβολία προσδιορίζεται από το νόμο των Beer-Lambert

$$F(z) = e^{-b_{ext}z} F_{inc} \quad (1.26)$$

που δίνει την τιμή της έντασης της ακτινοβολίας, αφού αυτή έχει διατρέξει απόσταση z μέσα στο μέσο, σαν συνάρτηση της αρχικής έντασης F_{inc} . Ο όρος b_{ext} είναι ο συντελεστής εξάλειψης του μέσου. Αν οι σκεδαστές είναι πανομοιότυποι, με διατομή εξάλειψης C_{ext} και το μέσο είναι ομοιόμορφο με αριθμητική πυκνότητα Ν σκεδαστών ανά μονάδα όγκου,

$$b_{ext} = C_{ext} N \left[m^{-1} \right] (1.27)$$

Στην πράξη, ο νόμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε εισάγοντας την έννοια του «μέσου» σκεδαστή, με χαρακτηριστικά που προσδιορίζονται από όλα τα είδη των σκεδαστών που περιέχει τό μέσο, είτε αντιμετωπίζοντας το κάθε –κύριο– είδος σκεδαστών ξεχωριστά και κατόπιν εφαρμόζοντας την αρχή της επαλληλίας. Για τα ατμοσφαιρικά αιωρήματα και το ορατό τμήμα του φάσματος, ο εκθέτης στη σχέση (1.26) είναι γνωστός ως οπτικό βάθος (optical depth). Η τιμή του, για ολόκληρη την ατμόσφαιρα, μπορεί να κυμαίνεται από 0.05 ως και σχεδόν 1, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν και την εγγύτητα σε πηγές αιωρημάτων.

Για σκεδαστές ενός είδους, που οι διαστάσεις τους ακολουθούν αριθμητική κατανομή $n_N(D_p)$, με όρια διαστάσεων $D_{p\min}$ και $D_{p\max}$ (μπορεί να είναι η διάμετρος, αν πρόκειται για σφαιρικούς, ή η κύρια διάσταση, αν έχουν άλλο σχήμα),

$$b_{ext}(\lambda) = \int_{D_{p\min}}^{D_{p\max}} C_{ext}(n,\alpha) n_N(D_p) dD_p \quad (1.28)$$

με λ το μήκος κύματος, n τον κανονικοποιημένο δείκτη διάθλασης και α όπως αυτό ορίζεται στη σχέση (1.3). Χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση κατανομής μάζας, $n_m(D_p) = m_p n_N(D_p) = \rho_p V_p n_N(D_p)$, και αντικαθιστώντας τη διατομή εξάλειψης σύμφωνα με την (1.8), η (1.28) γίνεται

Εισαγωγή

$$b_{ext}(\lambda) = \int_{D_{p\min}}^{D_{p\max}} \frac{A_p}{\rho_p V_p} Q_{ext}(n,\alpha) n_m (D_p) dD_p = \int_{D_{p\min}}^{D_{p\max}} E_{ext}(n,D_p,\lambda) n_m (D_p) dD_p \quad (1.29)$$



Σχήμα 1.5 Η απόδοση σκέδασης μάζας, σαν συνάρτηση της διαμέτρου του σκεδαστή. Περιλαμβάνονται και περιπτώσεις με τις οποίες ασχολείται η παρούσα εργασία, όπως ο άνθρακας και το θειϊκό αμμώνιο. (Πηγή: Seinfeld & Pandis 2006)

Η ποσότητα $E_{ext}(n, D_p, \lambda)$ έχει επικρατήσει να εκφράζεται σε [m²/gr] και ονομάζεται φασματική απόδοση εξάλειψης μάζας (spectral mass extinction efficiency). Με αντίστοιχο τρόπο εκφράζονται οι αποδόσεις απορρόφησης και σκέδασης, $E_{abs}(n, D_p, \lambda)$ και $E_{sca}(n, D_p, \lambda)$. Αν οι σκεδαστές είναι σφαιρικοί, όπως ισχύει για τη θεωρία Mie, που χρησιμοποιείται για τη μελέτη των ιδιοτήτων των αιωρημάτων, τότε

$$E_{ext}(n, D_p, \lambda) = \frac{3}{2\rho_p D_p} Q_{ext}(n, a) \quad (1.30)$$



Σχήμα 1.6 Σκέδαση (a-d) και Απορρόφηση (e-h) μάζας, ως προς τη διάμετρο, για 3 περιπτώσεις μιγαδικού δείκτη διάθλασης.(Πηγή: Seinfeld & Pandis 2006)

$$E_{abs}(n, D_p, \lambda) = \frac{3}{2\rho_p D_p} Q_{abs}(n, a) \quad (1.31)$$
$$E_{sca}(n, D_p, \lambda) = \frac{3}{2\rho_p D_p} Q_{sca}(n, a) \quad (1.32)$$

Στο Σχήμα 1.5 παρουσιάζονται γραφικά οι τιμές τους για ορισμένα είδη σκεδαστών και στο Σχήμα 1.6 η εξάρτησή τους από το δείκτη διάθλασης

1.1.6 Χημική σύσταση σκεδαστών της προσομοίωσης

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η εργασία ασχολείται με την επίδραση στο κλίμα της Ευρώπης, ανθρωπογενών αιωρημάτων, λαμβάνοντας υπ'όψιν την άμεση

επίδρασή τους (direct effect) στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Τα συστατικά των αιωρημάτων που συμπεριλαμβάνονται στη θεώρηση του περιοχικού μοντέλου RegCM3, που αποτέλεσε το κύριο εργαλείο μελέτης, είναι οι θειούχες ενώσεις και οι ανθρακούχες, οργανικές και ανόργανες.

1.1.6.1 Θειούχες Ενώσεις

Εισαγωγή

Η εισαγωγή του θείου στην ατμόσφαιρα γίνεται, κυρίως με τη μορφή του διοξειδίου του θείου (SO₂), κυρίως ανθρώπινης προέλευσης. Αυτό, συμμετέχει σε αντιδράσεις αέριας και υγρής φάσης (gas and aqueous phase reactions), οπότε το θείο μεταπίπτει από την κατάσταση οξείδωσης (oxidation state) 4 (S(IV)), χαρακτηριστική



Σχήμα 1.7 Οι διαφορετικές μορφές της θειϊκής ρίζας, κατά Pauling. (Πηγή: Seinfeld & Pandis 2006)

για το SO₂, στην κατάσταση 6 (S(VI)), αυτή της θειϊκής ρίζας, SO_4^{2-} (Σχήμα 1.7). Οι ενώσεις που την περιέχουν είναι το θειϊκό οξύ και τα άλατά του (sulfates).

Οι αντιδράσεις αέριας φάσης δεν είναι τόσο σημαντικές, σε σχέση με αυτές της υγρής φάσης. Εμπλέκουν, σε γενικές γραμμές, την οξείδωση του SO₂, με επίδραση μοριακού οξυγόνου η της ρίζας υδροξυλίου, αλλά και την οξείδωση του Δι-Μεθυλο-Σουλφιδίου (DMS).

Η οξείδωση του διοξειδίου του θείου ουσιαστικά απαιτεί την ύπαρξη κάποιου καταλύτη, αλλιώς η εξέλιξή της είναι υπερβολικά αργή, σε βαθμό που η συμβολή της να μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

$$2SO_2 + O_2 \xrightarrow{Cat} 2SO_3 (1.33)$$

Η μετατροπή, υπό την επίδραση του υδροξυλίου, γίνεται σε 3 στάδια. Αυτή είναι η σημαντικότερη αντίδραση μετατροπής του διοξειδίου του θείου, που συμβαίνει σε αέρια φάση. Έχοντας ως γνώμονα τις τυπικές ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις του υδροξυλίου, ο χρόνος ζωής του SO₂ (για την ακρίβεια ο χρόνος εξάντλησης των αρχικών αποθεμάτων του) είναι περίπου μία εβδομάδα. Για την εκτίμηση αυτή, αγνοούνται όλες οι υπόλοιπες διεργασίες που εμπλέκουν το διοξείδιο του θείου. Χαρακτηριστικά, μόνο οι διεργασίες ξηρής εναπόθεσης (με ταχύτητα καθίζησης 1cm/sec, θεωρώντας στρώμα ανάμιξης εύρους 1km) μπορούν να περιορίσουν το μέσο χρόνο ζωής του στη μία μόνο ημέρα.

Ψηφιακή συλλογή

Βιβλιοθήκη

$$SO_{2} + OH \cdot + M \rightarrow HOSO_{2} \cdot + M \quad (i)$$

$$HOSO_{2} \cdot + O_{2} \rightarrow HO_{2} \cdot + SO_{3} \quad (ii) \quad (1.34)$$

$$SO_{3} + H_{2}O + M \rightarrow H_{2}SO_{4} + M \quad (iii)$$

Οι αντιδράσεις υγρής φάσης (Σχήμα 1.8), συμβαίνουν αφού τα συστατικά τους έχουν είτε υδατοδιαλυθεί, είτε απορροφηθεί στο εσωτερικό των υδροσταγονιδίων των νεφών, της ομίχλης και του υετού. Επειδή δύο παράγοντες που επηρεάζουν τη διαλυτότητα είναι η θερμοκρασία και η οξύτητα, η ταχύτητα διεξαγωγής των περισσοτέρων αντιδράσεων υγρής φάσης εξαρτάται και από αυτούς. Με άλλα λόγια, η συνολική συγκέντρωση κάποιων συστατικών στην ατμόσφαιρα δεν έχει τόση πολλή σημασία, αν αυτά δεν μπορούν να διαλυθούν στο νερό και να αντιδράσεων και άμεσα (ως επιταχυντής) και έμμεσα, ελαττώνοντας τη διαλυτότητα. Συνήθως, η επιρροή που επικρατεί είναι αυτή που συνδέεται με τα διαθέσιμα αποθέματα των αντιδρώντων ουσιών, δηλαδή αυτή που εμπλέκει τη διαλυτότητα.

Από τη διάλυση του SO₂ στο νερό, μπορούν να προκύψουν τρία δυνατά προϊόντα, ανάλογα με τα επίπεδα του pH. Για τιμές μικρότερες του 2, για πολύ μεγάλη οξύτητα, παράγεται αποκλειστικά υδροδιαλυτό SO₂ $(SO_2 \cdot H_2O)$. Στις επικρατέστερες για την ατμόσφαιρα συνθήκες, με pH μεταξύ 2 και 7, το αποτέλεσμα είναι κυρίως HSO_3^- . Για αλκαλικές συνθήκες, με pH υψηλότερο του 7, δημιουργείται, ως επί το πλείστον, SO_3^{2-} .

Το S(IV) μπορεί να οξειδωθεί απευθείας από το μοριακό οξυγόνο (O₂), με την παρουσία του κατάλληλου καταλύτη, όπως ο τρισθενής σίδηρος ή το δισθενές



Η εξάρτηση από το pH είναι σημαντική, ενώ η

συνύπαρξη των καταλυτών επιδρά μη γραμμικά στην επιτάχυνση της αντίδρασης.

$$S(IV) + \frac{1}{2}O_2 \xrightarrow{Mn^{2+}, Fe^{3+}} S(VI)$$
(1.35)



Σχήμα 1.8 Ρυθμός οξείδωσης του S(IV) (υγρής φάσης αντιδράσεις), σε συνάρτηση με το pH, για θερμοκρασία 298Κ. Για pH<5 το υπεροξείδιο είναι ο κύριος οξειδωτής. Από εκεί και μετά, υπερισχύει το όζον. Το NO₂ δεν συμβάλλει σημαντικά στις συνθήκες που ενδιαφέρουν τη μελέτη.(Πηγή: Seinfeld & Pandis 2006)

Η οξείδωση από όζον, περιγράφεται από την αντίδραση,

$$S(IV) + O_3 \rightarrow S(VI) + O_2 \quad (1.36)$$

Η εξέλιξή της είναι αργή όταν τα συστατικά βρίσκονται σε αέρια φάση, αλλά γρήγορη αν πρόκειται για υδατικά διαλύματα.

Η δραστικότητα του υπεροξειδίου του υδρογόνου (H₂O₂) είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από αυτήν του όζοντος, στις αντιδράσεις υγρής φάσης. Επειδή δε, παραμένει ανεπηρέαστη από την ύπαρξη άλλων συστατικών στο διάλυμα και

ισχύει για σχετικά ευρύ φάσμα συνθηκών οξύτητας (pH από 0 ως 8), συνύπαρξη H₂SO₂ και SO₂ σε διάλυμα δεν έχει παρατηρηθεί σε νέφη (Daum et al 1984)

Ψηφιακή συλλογή

Βιβλιοθήκη

 $HSO_{3}^{+}+H_{2}O_{2} \stackrel{\leftarrow}{\rightarrow} SO_{2}OOH^{+}+H_{2}O(i)$ $SO_{2}OOH^{+}+H^{+} \rightarrow H_{2}SO_{4}(ii)$ (1.37)

Η (i) είναι ανεξάρτητη του pH, ενώ η (ii) επιταχύνεται με την αύξηση της οξύτητας. Το υδροξύλιο συμμετέχει και στην οξείδωση της υγρής φάσης, μέσω μίας αρκετά περίπλοκης σειράς αντιδράσεων, η οποία μπορεί να παρασταθεί γραφικά από διάγραμμα του Σχήματος 1.9



Σχήμα 1.9 Διαδικασίες οξείδωσης υγρής φάσης, από το υδροξύλιο. (Πηγή: Seinfeld & Pandis 2006)

Στην περίπτωση των αστικών περιοχών, η συμβολή των οξειδίων του αζώτου (NO_x), λόγω των υψηλών τους συγκεντρώσεων, μπορεί να φτάσει σε αξιόλογα επίπεδα. Τέλος, μία ακόμα σειρά αντιδράσεων που οδηγεί στη μετάβαση από S(IV) σε S(VI), εμπλέκει τη φορμαλδεΰδη (HCHO)

Ο άνθρακας εμφανίζεται στα αιωρήματα με δύο μορφές. Είτε ως αιθάλη, (black/elemental/graphitic carbon), από μόνος του ή ως συστατικό ανόργανων αλάτων, οπότε έχει τη μορφή/δομή του γραφίτη, είτε ως τμήμα οργανικών ενώσεων, οι οποίες περιέχουν και άλλα στοιχεία, όπως υδρογόνο, άζωτο και οξυγόνο.

Η πρώτη κατηγορία αποτελεί το προϊόν ατελών καύσεων και, γενικά, δεν υπόκειται σε χημικές μεταβολές μετά την απελευθέρωσή της στην ατμόσφαιρα. Οι οργανικές ενώσεις του άνθρακα, όμως, ενδέχεται να είναι ιδιαίτερα δραστικές, συνεπώς γίνεται διαχωρισμός μεταξύ του πρωτογενούς οργανικού άνθρακα, του οποίου οι ενώσεις δεν έχουν υποστεί μεταβολές κατόπιν της απομάκρυνσής τους από τις πηγές τους και του δευτερογενούς, που έχει προέλθει από τον πρωτογενή, μετά από διεργασίες, φυσικές ή χημικές, που έχουν λάβει χώρα στην ατμόσφαιρα.

1.1.6.2α Ανόργανος άνθρακας

Εισαγωγή

1.1.6.2 Άνθρακας

Εισάγεται στην ατμόσφαιρα μέσω των ατελών καύσεων ανθρακούχων ενώσεων. Ιδανικά, η πλήρης καύση του άνθρακα παράγει διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Σε συνθήκες ανεπάρκειας οξυγόνου,που ενδέγεται να είναι τοπικές, με αίτια δημιουργίας δυναμικά, μπορεί να προκύψουν και μονοξείδιο του άνθρακα και αιθάλη. Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που ευνοεί την παραγωγή αιθάλης είναι η χαμηλή θερμοκρασία της καύσης. Οι ακριβείς χημικές διαδικασίες που οδηγούν στη δημιουργία αιθάλης δεν είναι πλήρως κατανοητές, αλλά ενδέχεται η όλη ακολουθία να παρουσιάζει ομοιότητες με αυτήν της γένεσης των νεφοσταγονιδίων. Προηγείται η παραγωγή μικροσκοπικών πυρήνων, από τους οποίους, μέσω εναπόθεσης, προκύπτουν τα σωματίδια της αιθάλης. Πρέπει να τονισθεί ότι δεν πρόκειται για σωματίδια καθαρού άνθρακα. Περιέχουν διάφορες προσμίζεις, ανάλογα με το είδος του καυσίμου και τις ιδιαίτερες συνθήκες που επικρατούν. Η ποσότητα της αιθάλης που θα παραχθεί τελικά, δεν μπορεί να προβλεφθεί από το είδος του καυσίμου, διότι σημαντικότερο ρόλο παίζει ο αριθμός των αρχικών πυρήνων άνθρακα (Harris & Weiner 1983a,b). Αυτός, φαίνεται να συνδέεται με την παραγωγή ακετυλενίου (C_2H_2) (Harris & Weiner 1983a) και

πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAH) (McKinnon & Howard 1990).

Η αιθάλη στην ατμόσφαιρα εμφανίζεται με τη μορφή συσσωματωμάτων (agglomerates), ακαθόριστου σχήματος, των οποίων οι συστατικές μονάδες παρουσιάζουν μεγάλη ομοιογένεια, όντας περίπου σφαιρικές σε σχήμα και έχοντας διάμετρο έως 20-30nm. Τα ίδια τα συσσωματώματα μπορεί να έχουν διαστάσεις ως και μερικά μm. Όλες οι καύσεις μπορούν να αποτλέσουν πηγή αιθάλης, υπό προϋποθέσεις. Μεγαλύτερη συμβολή στις αστικές περιοχές είναι αυτή των κινητήρων εσωτερικής καύσεως, ιδίως τύπου Diesel. Αλλού, υπερέχει αυτή των καύσεων βιομάζας. Οι συγκεντρώσεις της αιθάλης στην ατμόσφαιρα παρουσιάζουν σημαντική κύμανση, με τα ελάχιστα να παρατηρούνται σε περιοχές μακριά από κέντρα έντονης ανθρώπινης δραστηριότητας, ιδίως επάνω από τους ωκεανούς, όπου δεν ξεπερνούν τα μερικά ngm⁻³(Clarke 1989). Στα μεγάλα αστικά κέντρα, μπορεί να φτάσουν και τα 20 mgm^{-3} . Τα μεγέθη των σωματιδίων καλύπτουν το φάσμα από μερικές δεκάδες nm ως περίπου 5 μm. Σε περιοχές με έντονο πρόβλημα ρύπανσης, έχουν παρατηρηθεί μέγιστα συγκεντρώσεων στις διαστάσεις 5-120nm (που αντιστοιχούν στα μεγέθη εκπομπής) και 0.5-1μm (που αντιστοιχούν στις διαστάσεις των προϊόντων επαύξησης). Αμφότερα, ανήκουν στην κατηγορία σωματιδίων PM10.

1.1.6.2β Οργανικός άνθρακας

Ψηφιακή συλλογή

Βιβλιοθήκη

Με τον όρο «οργανικός άνθρακας» (organic carbon, OC), καλύπτεται η ποσότητα του άνθρακα που συναντάται σε ένα ευρύ φάσμα οργανικών ενώσεων που αποτελούν ατμοσφαιρικά αιωρήματα. Εξαιτίας και των ιδιαιτεροτήτων των διαφόρων μεθόδων μέτρησης, είναι δυνατόν να γίνεται αναφορά, είτε στη συνολική μάζα των ενώσεων, είτε αποκλειστικά στη μάζα του άνθρακα, που αποτελεί ένα μόνο από τα συστατικά τους. Οι συγκεντρώσεις του οργανικού άνθρακα εξαρτώνται από τα επίπεδα ρύπανσης των περιοχών και έχουν βρεθεί να κυμαίνονται από 2-3µgm⁻³ ως 20µgm⁻³. Το Βόρειο Ημισφαίριο του πλανήτη, τείνει να εμφανίζει υψηλότερες συγκεντρώσεις, εξαιτίας της συγκέντρωσης του ανθρώπινου πληθυσμού εκεί.

Λόγω του μεγάλου πλήθους και της ποικιλίας των οργανικών ατμοσφαιρικών ενώσεων του άνθρακα, γίνεται ο προαναφερθείς διαχωρισμός, σε πρωτογενή και δευτερογενή άνθρακα. Η διαφορά, όπως έχει επισημανθεί, έγκειται στο γεγονός ότι ο δευτερογενής άνθρακας έχει υποστεί χημικές μεταβολές και αλλαγή φάσης κατά τη διάρκεια της παραμονής του στην ατμόσφαιρα. Η αναγνώριση/ταυτοποίηση των ενώσεων του άνθρακα γίνεται σε μεγάλο βαθμό με τη χρήση ιχνηθετών (chemical tracers).

Εισαγωγή

Οι κύριες πηγές του πρωτεύοντος οργανικού άνθρακα είναι οι ίδιες με αυτές του ανόργανου, δηλαδή οι καύσεις. Υπάρχει δε μία δυσκολία στη διάκριση μεταξύ των δύο, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Συνήθως επιτυγχάνεται με τη χρήση διαγραμμάτων, που απεικονίζουν τη σχέση μεταξύ των συγκεντρώσεων των δύο τύπων. Οι διαστάσεις των σωματιδίων για τα προϊόντα καύσεως, από πηγές όπως οι μηχανές εσωτερικής καύσεως, οι καυστήρες και οι ανοικτές εστίες, είναι περίπου 0.1-0.2μm (Hildemann et al 1991b).

Ο δευτερεύων άνθρακας δεν έχει συγκεκριμένες πηγές, με την κλασική έννοια. Οι θέσεις και οι χρονικές στιγμές που παράγεται, και άρα συναντάται στις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις, εξαρτώνται από το επίπεδο της φωτοχημικής δραστηριότητας στην ατμόσφαιρα. Παράγεται από τη συμπύκνωση αερίων προϊόντων οξείδωσης οργανικών ουσιών. Η οξείδωση γίνεται από την υδροξυλική ρίζα (OH⁻), το όζον (O₃) και τη νιτρική ρίζα (NO⁻₃). Η συμπύκνωση συμβαίνει όταν η τάση κορεσμού των ατμών ξεπεραστεί, ώστε να διατηρηθεί η ισορροπία των συγκεντρώσεων των φάσεων της εκάστοτε ουσίας. Επιπλέον αντιδράσεις, μετά τη συμπύκνωση, μπορούν να περιορίσουν την πτητικότητα και να επιμηκύνουν το χρόνο ζωής ενός αιωρήματος. Έχει παρατηρηθεί κάτι τέτοιο με την προσθήκη οξυγόνου και αζώτου σε ενώσεις (Seinfeld & Pankow 2003). Πιο αναλυτικά, τρία είναι τα βήματα της δημιουργίας των δευτερευόντων οργανικών αιωρημάτων (secondary organic aerosols, SOA).

- Χημικές αντιδράσεις μετατροπής πρωτευόντων πτητικών οργανικών ενώσεων (volatile organic compounds, VOCs) στα συστατικά των SOA, οι οποίες λαμβάνουν χώρα στην αέρια φάση.
- Μετάβαση από την αέρια στη σωματιδιακή, υγρή ή στερεή, φάση (particulate phase).
- 3. Αντιδράσεις «σταθεροποίησης», στην σωματιδιακή φάση.

Υπάρχουν κάποιες πτητικές οργανικές ενώσεις που έχει παρατηρηθεί ότι δεν συμμετέχουν στην παραγωγή αιωρημάτων. Αυτές είναι τα αλκάνια με λιγότερα από 6 άτομα άνθρακα και τα αλκένια, με εξαίρεση το ισοπρένιο (5 άνθρακες και 2 διπλοί δεσμοί). Η παρουσία πολλών ατόμων άνθρακα στο μόριο μίας ένωσης, καθώς και η ύπαρξη διπλών δεσμών (άνθρακα) φαίνεται να επηρεάζει ευνοϊκά την παραγωγή αιωρημάτων. Το ίδιο ισχύει και για την περίπτωση συνύπαρξης της μεθυλικής ρίζας

Ψηφιακή συλλογή

Βιβλιοθήκη

 (CH_3) με διπλούς δεσμούς (Keywood et al 2004). Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, οι κυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες είναι οι πιο σημαντικοί συντελεστές παραγωγής SOA (Pandis et al 1992). Οι χημικές αντιδράσεις μετατροπής των δευτερευόντων οργανικών αιωρημάτων δεν παύουν με το πέρας της οξείδωσής τους, όμως η φύση τους και οι ακριβείς μηχανισμοί τους δεν είναι σαφείς (Barsanti & Pankow 2004-2005), (Tong et al 2006).

Η παρουσία ενώσεων όπως οι νιτρικές (NO_x), που αντιδρούν και «καταναλώνουν» ποσότητες των διαθέσιμων συστατικών και οι γενικότερες συνθήκες (θερμοκρασία, διαθεσιμότητα ηλιακού φωτός, υγρασία), επηρεάζουν την ταχύτητα των αντιδράσεων και την ποσότητα των προϊόντων. Το είδος της επίδρασης μπορεί να είναι αυξητικό ή περιοριστικό. Για κάθε συνδυασμό συστατικώνπροπομπών και συγκεντρώσεων, υπάρχει μία βέλτιστη περιοχή συνθηκών, για την παραγωγή SOA (Strader et al 1999).

1.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΙΩΡΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΚΑΙΜΑ

1.2.1 Μηχανισμοί επίδρασης αιωρημάτων στο κλίμα

Ο πιο προφανής τρόπος με τον οποίο μπορούν να επιδράσουν τα αιωρήματα στο κλίμα έχει ήδη περιγραφεί στην παράγραφο 1.1.5. Τα ατμοσφαιρικά αιωρήματα, ευρισκόμενα ανάμεσα στο άνω όριο της ατμόσφαιρας και το έδαφος, αλληλεπιδρούν με την ηλιακή ακτινοβολία, πριν αυτή φτάσει στο δεύτερο, και έτσι μπορούν να μεταβάλουν το ενεργειακό ισοζύγιο, τόσο στην επιφάνεια, όσο και στα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας, ανάλογα με τις οπτικές τους ιδιότητες. Ενδεικτικά, αν τα αιωρήματα παρουσιάζουν αμελητέα απορροφητική τάση, αλλά ισχυρή σκεδαστική, δεν θερμαίνονται τα ίδια ώστε να επηρεάσουν το ενεργειακό ισοζύγιο στο στρώμα της ατμόσφαιρας όπου συναντώνται, αλλά ανακατευθύνουν την ηλιακή ακτινοβολία, ώστε μπορούν να επηρεάσουν το ενεργειακό ισοζύγιο στο έδαφος.

Πέρα από αυτού του είδους την επίδραση, που ονομάζεται άμεση (direct aerosol effect), τα αιωρήματα μπορούν να επηρεάσουν το κλίμα και με άλλους τρόπους. Καθότι μπορούν να λειτουργήσουν ως πυρήνες συμπύκνωσης υδρατμών, μπορούν να επηρεάσουν, μεταξύ άλλων, τα οπτικά χαρακτηριστικά των νεφών (Twomey 1977) σε μία περιοχή (indirect aerosol effect). Σε αντίθεση με την πρώτη κατηγορία επιδράσεων, αυτές που ανήκουν στη δεύτερη κατηγορία, δεν απασχόλησαν καθόλου την παρούσα μελέτη, καθότι δεν συμπεριλαμβάνονται ανάμεσα στα φαινόμενα που αντιμετωπίζονται από το κύριο εργαλείο της, το κλιματικό μοντέλο περιοχής που περιγράφεται πιο αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

1.2.2 Προηγούμενες μελέτες παρόμοιου περιεχομένου

Εισαγωγή

Μία μελέτη μακράς χρονικής περιόδου (άνω του αιώνα) (Roeckner et al. 1999), που αφορούσε το σύνολο του πλανήτη, βρήκε, για την περιοχή της Ευρώπης, αρνητική επίδραση των αιωρημάτων στη θερμοκρασία, χωρίς χωρική ταύτιση των θέσεων των μεγίστων συγκεντρώσεων των αιωρημάτων με τις μεταβολές αυτές.

Μελέτη που αποσκοπούσε στην εξακρίβωση της επίπτωσης της ανάλυσης ενός μοντέλου περιοχής στα αποτελέσματα της έμμεσης επίδρασης των θειούχων αιωρημάτων (indirect sulfate forcing) (Ekman & Rodhe 2002), βρήκε γενικά αρνητικές επιδράσεις στη θερμοκρασία (έως περίπου -0.4°C) στο μεγαλύτερο μέρος της Ευρώπης. Ενώ στην προσομοίωση υψηλής ανάλυσης η ταύτιση χωρικά των μεταβολών της ακτινοβολίας με αυτές της θερμοκρασίας ήταν καλή, κάτι τέτοιο δεν ίσχυε στην περίπτωση της προσομοίωσης χαμηλότερης ανάλυσης. Πάντως οι χωρικές μέσες τιμές βρέθηκαν γενικά σύμφωνες και στις δύο περιπτώσεις.

Μελέτη μεμονωμένων περιπτώσεων σε πολύ υψηλή ανάλυση, για περιοχή της Γερμανίας (Vogel et al. 2009), βρήκε αρνητική επίδραση των αιωρημάτων, τόσο στην ακτινοβολία (κατά μέσο όρο περίπου -6Wm⁻²), όσο και στη θερμοκρασία (-0.1°C).

Ενώ για την περιοχή της Ανατολικής Ασίας, έχουν αναφερθεί αποτελέσματα (Giorgi et al. 2003) με μεταβολές θερμοκρασίας από -0.1 ως -0.7°C, οφειλόμενες σε ανθρωπογενείς και θειούχες ενώσεις



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

2.1 ΤΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1.1 Περιγραφή του μοντέλου

Το πρόγραμμα προσομοίωσης (μοντέλο) κλιματικών φαινομένων περιοχικής κλίμακας (Regional Climate Model) RegCM, του οποίου η τρίτη έκδοση χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της εργασίας, αποτελεί προσαρμογή του μετεωρολογικού μοντέλου μέσης κλίμακας (Mesoscale Model), του Πολιτειακού Πανεπιστημίου της Πενσυλβάνια (Pennsylvania State University), προσαρμοσμένου στις απαιτήσεις της προσομοίωσης κλιματικών φαινομένων. Πιο συγκεκριμένα, ο κορμός των δυναμικών εξισώσεων της έκδοσης 3.1 (RegCM-3.1), προέρχεται από την υδροστατική έκδοση του MM5 (Grell et al 1994). Συνεπώς, πρόκειται για ένα υδροστατικό μοντέλο πεπερασμένων διαφορών, που κάνει χρήση της κατακόρυφης μεταβλητής σίγμα.

Η προσομοίωση των υπολοίπων φυσικών διεργασιών διεξάγεται παραμετρικά, κάνοντας χρήση τμημάτων λογισμικού, τόσο από το MM5, όσο και από το κλιματικό μοντέλο του Εθνικού Κέντρου Ατμοσφαιρικών Ερευνών των ΗΠΑ (NCAR Community Climate Model).

2.1.1.1 Το πλέγμα

Το οριζόντιο πλέγμα είναι τύπου Arakawa-Lamb B. Τα διανυσματικά μεγέθη ορίζονται στις γωνίες του κάθε κελιού και παριστάνονται στο Σχήμα 2.1 με σημεία τελείας (dot points), ενώ τα αλγεβρικά στο κέντρο του, όπου παριστάνονται με σημεία σταυρού (cross points). Για την κατακόρυφη κάλυψη της περιοχής προσομοίωσης, ορίζεται η μεταβλητή σ (sigma), που χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει τα ομώνυμα επίπεδα.

Μεθοδολογία και Δεδομένα

$$\sigma = \frac{p - p_t}{p_s - p_t} \quad (2.1)$$



Σχήμα 2.1 Το οριζόντιο πλέγμα του μοντέλου, τύπου Arakawa-Lamb B. (Πηγή:RegCM Version 3.1 User's Guide, Elguindi et al., 2006)



Σχήμα 2.2 Απεικόνιση της κατακόρυφης διαμόρφωσης των επιφανειών της προσομοίωσης. (Πηγή:RegCM Version 3.1 User's Guide, Elguindi et al., 2006)

όπου οι δείκτες s (surface) και t (top) της πίεσης p, προσδιορίζουν το κατώτατο και το ανώτατο κατακόρυφο επίπεδο της προσομοίωσης, αντίστοιχα. Η μεταβλητή σίγμα είναι αδιάστατη και ορίζει αυτοτελώς το κάθε ένα από τα κατακόρυφα επίπεδα του μοντέλου. Λόγω του τρόπου ορισμού της, σε οποιοδήποτε σημείο της περιοχής προσομοίωσης, και στις 3 διαστάσεις, ισχύει ότι $0 \le \sigma \le 1$. Δεν υπάρχει κανένας περιορισμός στη διανομή των επιπέδων προσομοίωσης, η οποία δεν είναι απαραίτητο να είναι ομοιόμορφη. Η δε μορφή των επιπέδων είναι τέτοια ώστε, στα χαμηλότερα ύψη, ακολουθούν το ανάγλυφο του εδάφους, ενώ ψηλότερα εξομαλύνονται.

Ψηφιακή συλλογή

Βιβλιοθήκη

Στο σχήμα 2.2 σημειώνονται και ποια φυσικά μεγέθη προσομοιώνονται στα ίδια τα επίπεδα σίγμα και αυτά που προσομοιώνονται στο ενδιάμεσο μεταξύ δύο διαδοχικών επιπέδων, ανάλογα με το είδος της μεταβλητής. Η w ή ω (omega), που παίρνει τιμές στα επίπεδα σίγμα είναι η κατακόρυφη ταχύτητα του ανέμου. Τα υπόλοιπα μεγέθη προσομοιώνονται στα ενδιάμεσα των επιπέδων.

2.1.1.2 Σχήμα διάδοσης ακτινοβολίας (Radiative transfer scheme)

Χρησιμοποιείται αυτό από το CCM3 (Kiehl et al 1996), που αποτελεί εξέλιξη του σχήματος που περιλαμβανόταν στα RegCM2 και CCM2 (Breglieb et al 1992). Πρόκειται για σχήμα που χρησιμοποιεί την προσέγγιση δ-Eddington και συνυπολογίζει τις επιδράσεις των εξής συστατικών της ατμόσφαιρας : H₂O, O₃, O₂, CO₂, NO₂, CH₄, CFCs. Η περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που καλύπτεται, είναι από 200nm ως 5μm.

Σχετικά με τα νέφη, γίνεται η θεώρηση ότι οι οπτικές τους ιδιότητες καθορίζονται από την κατανομή μεγέθους των υδροσταγονιδίων (cloud drop size distribution) και από την περιεκτικότητα τους σε νερό (liquid water content) (Slingo 1989). Ενδεικτικά, σε αυτό, το οπτικό βάθος των νεφών καθορίζεται από μία σχέση της μορφής

$$\tau_i = LWP\left(\frac{1}{a_i} + \frac{b_i}{r_e}\right) \quad (2.2)$$

όπου re είναι η ισοδύναμη ακτίνα μίας υδροσταγόνας του νέφους (equal drop radius), που προκύπτει από τον υπολογισμό του τύπου



$$r_e = \frac{\int_{0}^{\infty} n(r)r^3 dr}{\int_{0}^{\infty} n(r)r^2 dr} \quad (2.3)$$

Ο όρος

$$LWP = \int_{cloudbase}^{cloudtop} LWCdz \quad (2.4)$$

εκφράζει την ποσότητα του ύδατος που περιέχεται σε μία στήλη του νέφους, με LWC [grm⁻³] το υδατικό περιεχόμενο του νέφους και z [m] την κατακόρυφη συντεταγμένη. Οι παράμετροι α και b προέρχονται από πίνακες με τους δείκτες i να καθορίζουν την περιοχή του μήκους κύματος της ακτινοβολίας στην οποία αναφέρεται η εκάστοτε τιμή του οπτικού βάθους (Slingo 1989).

Η αντιμετώπιση των αιωρημάτων συμβαίνει ξεχωριστά από το υπόλοιπο σχήμα της ακτινοβολίας, πριν από τη διεξαγωγή του κάθε υπολογιστικού βήματος.

2.1.1.3 Σχήμα νεφών και υετού (Cloud and precipitation scheme)

Το γενικό σχήμα υετού που χρησιμοποιείται είναι το SUBEX (Subgrid Explicit Moisture Scheme) (Pal et al 2000), το οποίο συσχετίζει το ποσοστό της νεφοκάλυψης σε κάθε κελί της προσομοίωσης με την τιμή της σχετικής υγρασίας και



Σχήμα 2.3 Ποσοστό νεφοκάλυψης, σαν συνάρτηση της σχετικής υγρασίας, σύμφωνα με το σχήμα SUBEX. (Πηγή:Pal et al., 2000)

την εμφάνιση του υετού με το υδατικό περιεχόμενο των νεφών (Sundqvist et al 1989) (Σγήμα 2.3).

Ψηφιακή συλλογή

Βιβλιοθήκη

$$FC = \sqrt{\frac{RH - RH_{\min}}{RH_{\max} - RH_{\min}}} \quad (2.5)$$

Στην (2.5), FC είναι το ποσοστό νεφοκάλυψης ενός κελιού, RH η τιμή της σχετικής υγρασίας με τους δείκτες min και max, που λαμβάνονται από πίνακες, να προσδιορίζουν τις οριακές τιμές σχετικής υγρασίας, στις οποίες ξεκινά η δημιουργία νεφών και καλύπτεται πλήρως το κελί, αντίστοιχα.

Για τις περιπτώσεις της κατακόρυφης μεταφοράς, το μοντέλο RegCM3 έχει τρεις διαθέσιμες επιλογές σχημάτων. Το σχήμα MIT-Emanuel, το τροποποιημένο σχήμα Kuo και το σχήμα Grell, με διαθέσιμες τις τροποποιήσεις είτε κατά Arakawa και Schubert, είτε κατά Fritsch και Chappell. Επειδή στη συγκεκριμένη μελέτη επελέγη το τελευταίο (Grell τροποποιημένο κατά Fritsch-Chappell), θα γίνει λόγος μόνο για αυτό.



Σχήμα 2.4 Σχηματική παράσταση των κατακόρυφων ρευμάτων, όπως αυτά ορίζονται κατά το σχήμα Grell. (Πηγή: Grell et al., 1994)

Το σχήμα Grell, προσομοιώνει κάθε νέφος ορίζοντας ένα ζεύγος κατακόρυφων ρευμάτων, ενός ανοδικού (updraft) και ενός καθοδικού (downdraft) (Σχήμα 2.4). Το καθένα υφίσταται ανεξάρτητα από το άλλο και επίσης δεν έχουν καμία επαφή με το περιβάλλον, εκτός από την κορυφή και τη βάση του κάθε ρεύματος. Φαινόμενα που συνυπολογίζονται είναι η συμπύκνωση κατά την ανοδική κίνηση και η εξάτμιση κατά την καθοδική, με τις αντίστοιχες επιδράσεις στα επίπεδα υγρασίας και θερμοκρασίας. Για την αύξηση της ακρίβειας των υπολογισμών, η

διαθέσιμη ενέργεια για τις ανοδικές κινήσεις των αερίων μαζών, συνδέεται με το επίπεδο αστάθειας της ατμόσφαιρας. Η δημιουργία υετού απομακρύνει ποσότητα υδρατμών από το νέφος, εξαρτώμενη από τη διαφορά μεταξύ της συμπύκνωσης και της εξάτμισης εντός του νέφους και ταυτόχρονα ελαττώνει τη ενέργεια που είναι διαθέσιμη για περαιτέρω ανοδικές κινήσεις, περιορίζοντας την ατμοσφαιρική αστάθεια.

2.1.1.4 Σχήμα οριακού στρώματος

Μεθοδολογία και Δεδομένα

Για το σχήμα του οριακού στρώματος (atmospheric boundary layer) χρησιμοποιείται η θεώρηση κατά Holtslag et al (1990). Ενδεικτικά, οι κατακόρυφες μεταβολές της δυνητικής θερμοκρασίας θ και της ειδικής υγρασίας q υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\partial}{\partial z} K_H \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} - \gamma_\theta \right)$$
(2.6)
$$\frac{dq}{dt} = \frac{\partial}{\partial z} K_H \left(\frac{\partial q}{\partial z} - \gamma_q \right)$$
(2.7)

Στις οποίες, με z συμβολίζεται το ύψος σε μέτρα, με KH ο συντελεστής διάχυσης θερμότητας των στροβίλων, ενώ οι όροι γ_θ και γ_q αποτελούν τις (αντίστροφες) κατακόρυφες βαθμίδες των αντίστοιχων μεταβλητών.

Το ύψος του οριακού στρώματος (h) υπολογίζεται αναδρομικά, από έναν τύπο της μορφής

$$h = \frac{Ri_c[u^2(h) + v^2(h)]}{\frac{g}{T_0}[\theta_v(h) - \theta_s]}$$
(2.8)

στον οποίον Ri_c είναι μια κρίσιμη τιμή του αριθμού Richardson για το οριακό στρώμα, u και v οι τιμές των οριζοντίων συνιστωσών τις ταχύτητας του ανέμου στην κορυφή του οριακού στρώματος, σε ύψος (z=h), g/T_0 είναι ο συντελεστής της άνωσης (buoyancy parameter), ενώ με θ_v παριστάνεται η εικονική δυνητική θερμοκρασία στην κορυφή του στρώματος και με θ_s μία ενδεικτική τιμή της κοντά στην επιφάνεια του εδάφους (z=s). Λόγω του ενδεχομένου να προκύψει πολύ μικρή τιμή για το h, συνηθίζεται να τίθεται μία ελάχιστη δυνατή τιμή, είτε σταθερή (πχ 50m), είτε μεταβλητή, όπως παρακάτω

Μεθοδολογία και Δεδομένα

$$h_{min} = 0.07 \frac{u_*}{|f|}$$
 (2.9)

Ψηφιακή συλλογή

Βιβλιοθήκη

Γμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

με f η παράμετρος Coriolis και με u_{*} η ταχύτητα τριβής (friction velocity), που εξαρτάται από το χαρακτήρα του αναγλύφου μιας περιοχής και την ταχύτητα του ανέμου σε διαφορετικά ύψη εντός του οριακού στρώματος. Ο κρίσιμος αριθμός Richardson ορίζεται με βάση τα χαρακτηριστικά του μοντέλου και, πιο συγκεκριμένα, από την κατακόρυφη διακριτοποίηση του (vertical resolution). Τιμές που έχουν προταθεί είναι 0.5, για χαμηλές αναλύσεις (Troen & Mahrt 1986) και 0.25 για υψηλές (Holtslag et al 1990).

Η δυνητική θερμοκρασία στο έδαφος, θ_s , για ευσταθείς συνθήκες (μήκος Obukhov $L \ge 0$), λαμβάνεται ίση με $\theta_s = \theta_v(z_1)$ και για ασταθείς συνθήκες

(L<0) είναι $\theta_s = \theta_v(z_1) + C \frac{\overline{w_{\theta_o}}}{w_s}$, με τον δεύτερο όρο να εκφράζει τα ανοδικά θερμικά ρεύματα στη βάση του οριακού στρώματος. Ενώ z_1 είναι το χαμηλότερο από τα επίπεδα προσομοίωσης του μοντέλου.

Οι συνθήκες ευστάθειας, επηρεάζουν και τη νεφογένεση, στο οριακό στρώμα. Αν ισχύει ότι , τότε το ποσοστό της νεφοκάλυψης, επί τοις εκατό, δίνεται από τη σχέση

$$N_{L} = \begin{cases} \frac{\left(RH_{\%} - 80\right)^{2}}{4}, RH_{\%} > 80\\ 0, RH_{\%} \le 80 \end{cases}$$
(2.10)

Ως σχετική υγρασία, επί τοις εκατό, λαμβάνεται η μέγιστη τιμή, ανάμεσα στα επίπεδα του μοντέλου, που βρίσκονται εντός του ΑΟΣ και σε ύψος μεγαλύτερο από 50m. Αν h/L<0, τότε

$$N_{L} = \begin{cases} a_{0} + a_{1} R H_{LCL} + a_{2} R H_{LCL}^{2}, R H_{LCL} > 57\% \\ 0, R H_{LCL} \le 57\% \end{cases}$$
(2.11)

όπου $\alpha_0 = -0.74$, $\alpha_1 = -1.257$ και $\alpha_2 = -0.022644$. RH_{LCL} είναι η σχετική υγρασία στη στάθμη αυθόρμητης κατακόρυφης μεταφοράς (Lifting Condensation Level). Τέλος, η ύπαρξη ομίχλης καθορίζεται από την επίτευξη κορεσμού (*RH*>100%) στο χαμηλότερο επίπεδο του μοντέλου.

Τέλος, η προσομοίωση των φυσικών χαρακτηριστικών του εδάφους γίνεται από το σχήμα BATS1e (Biosphere-AtmosphereTransfer Scheme version 1e) (Dickinson et al 1993). Το BATS χρησιμοποιεί 18 κατηγορίες για τη χρήση γης, που προέρχονται από συνδυασμό των μεθοδολογιών και αποτελεσμάτων των (Olson et al 1983), (Matthews 1983, 1984) και (Wilson 1984). Για τη βελτίωση της ακρίβειας σε περιοχές με περίπλοκη τοπογραφία το RegCM προσθέτει δύο ακόμη κατηγορίες, για περιπτώσεις μικτής χρήσης γης, όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 2.1 (Giorgi et al 2003a).

Μεθοδολογία και Δεδομένα

2.1.1.5 Σχήμα εδάφους

Ορίζονται 17 τύποι υφής (texture) για το έδαφος και 8 διαφορετικές αποχρώσεις, που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του σε σχέση με το ισοζύγιο ακτινοβολίας. Η λευκαύγεια (albedo) ορίζεται σε δύο περιοχές του φάσματος, την ορατή λ<0.7μm και την υπέρυθρη λ>0.7μm, τόσο για το έδαφος όσο και για τα φυλλώματα (Πίνακας 2.2). Για την κάθε κυψέλη της προσομοίωσης, η τελική λευκαύγεια εξαρτάται από το είδος και το ποσοστό της φυτοκάλυψης, τον τύπο του εδάφους και το περιεχόμενο υγρασίας του.

Πίνακας 2.1 Κατηγορίες χρήσης γης, στο RegCM3. Οι δύο τελευταίες περιγράφουν μικτή χρήση γης. (Πηγή: Elguindi et al, 2006)

1.	Crop/mixed farming
2.	Short grass
3.	Evergreen needleleaf tree
4.	Deciduous needleleaf tree
5.	Deciduous broadleaf tree
б.	Evergreen broadleaf tree
7.	Tall grass
8.	Desert
9.	Tundra
10.	Irrigated Crop
11.	Semi-desert
12.	Ice cap/glacier
13.	Bog or marsh
14.	Inland water
15.	Ocean
16.	Evergreen shrub
17.	Deciduous shrub
18.	Mixed Woodland
19.	Forest/Field mosaic
20.	Water and Land mixture

Ορίζονται τρία διαφορετικά κατακόρυφα στρώματα, όχι διαδοχικά, αλλά επικαλυπτόμενα. Η επιφανειακή ζώνη (surface zone) εκτείνεται από την επιφάνεια μέχρι το βάθος των 10 εκατοστών, η ριζική (root zone) από την επιφάνεια ως το

βάθος των 1 με 2 μέτρων και η τελευταία, η συνολική (total soil zone) έως το βάθος των τριων μέτρων. Τα φυσικά χαρακτηριστικά του εδάφους θεωρούνται αμετάβλητα με το βάθος.

Απόχρωση εδάφους	Λευκαύγεια ξηρού εδάφους		Λευκαύγεια κορεσμένου εδάφους	
	$\lambda < 0.7 \mu m$	λ≥0.7µm	$\lambda < 0.7 \mu m$	λ≥0.7µm
(ανοικτό) 1	0.23	0.46	0.12	0.24
2	0.22	0.44	0.11	0.22
3	0.20	0.40	0.10	0.20
4	0.18	0.36	0.09	0.18
5	0.16	0.32	0.08	0.16
6	0.14	0.28	0.07	0.14
7	0.12	0.24	0.06	0.12
(σκούρο) 8	0.10	0.20	0.05	0.10

Πίνακας 2.2 Τιμές λευκαύγειας εδάφους. (Πηγή:Dickinson et al., 1993)

Ψηφιακή συλλογή

Βιβλιοθήκη



Σχήμα 2.5 Σχηματική παράσταση των προσομοιούμενων διεργασιών από το σχήμα εδάφους BATS1e. (Πηγή:Dickinson et al., 1993)

Η θερμοκρασία κοντά στο έδαφος εξαρτάται από τη θερμοκρασία στο χαμηλότερο επίπεδο προσομοίωσης του μοντέλου και τη θερμοκρασία στην επιφάνεια, είτε πρόκειται για φυλλώματα, γυμνό έδαφος ή υδάτινη επιφάνεια.

Η θερμοκρασία του εδάφους υπολογίζεται προγνωστικά κατά Deardorff (1978) και αυτή των φυλλωμάτων διαγνωστικά, μέσω των ροών αισθητής, ακτινοβολούμενης και λανθάνουσας θερμότητας, όπου συμπεριλαμβάνεται και η επιρροή της τραχύτητας του εδάφους και της κατάστασης ευστάθειας του επιφανειακού ατμοσφαιρικού στρώματος.

Η επιφανειακή απορροή εκφράζεται ως ποσοστό του υετού και εξαρτάται από το βαθμό κορεσμού του υγρού εδάφους. Τα χαρακτηριστικά του εδάφους που επηρεάζουν τις υδρολογικές διεργασίες ορίζονται παραμετρικά, για τον κάθε τύπο του.

2.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Μεθοδολογία και Δεδομένα

2.2.1 Παράμετροι της προσομοίωσης

Για την προσομοίωση ορίστηκε οριζόντιο πλέγμα 96 (x) επί 104 (y) σημείων, με 18 κατακόρυφα επίπεδα, κατανεμημένα από την επιφάνεια ως την ισοβαρική επιφάνεια των 50hPa. Η ανάλυση ήταν 50x50km. Το κεντρικό σημείο του πλέγματος τοποθετήθηκε στις 50 μοίρες βορείου πλάτους (50°N) και 13 μοίρες ανατολικού μήκους (13°E). Για την απεικόνιση επιλέχθηκε η προβολή Lambert (Conic) Conformal, με παραλλήλους αναφοράς (standard/true parallels), δηλαδή μηδενικής παραμόρφωσης, στις 30 μοίρες βόρεια (30°N) και στις 60 μοίρες βόρεια (60°N).

2.2.2 Δεδομένα αρχικών και οριακών συνθηκών

Τα δεδομένα για τη χρήση γης και την τοπογραφία, ήταν ευκρίνειας 3'x3' προερχόμενα από τη βάση δεδομένων του σχήματος BATS και τα δεδομένα για τις θερμοκρασίες της θαλάσσιας επιφάνειας από τη βάση δεδομένων NOAA Optimal Interpolation Sea Surface Temperature Weekly means (OISST Weekly) με ανάλυση 1°x1°. Τα δυναμικά δεδομένα προήλθαν από τη βάση reanalysis NCEP-DOE AMIP-II (Kanamitsu et al. 2002). Τέλος, τα δεδομένα για τα αιωρήματα προήλθαν από τη βάση δεδομένων Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR) για την περίπτωση του SO₂, με εκπομπές ανθρακούχων αιωρημάτων, οργανικών (OC) και ανόργανων (BC) υπολογισμένες με βάση τη μεθοδολογία κατά Cooke et al. (2002). Και στις 2 περιπτώσεις, η ανάλυση ήταν 1°x1° και οι εκπομπές αντιπροσωπευτικές για το έτος 2000. Τελικά, καθώς το μοντέλο προβλέπει την οξείδωση το SO₂ σε SO₄²⁻, υπήρχαν 6 είδη αιωρημάτων, με υδρόφιλες και υδρόφοβες εκδοχές του κάθε τύπου ανθρακούχου αιωρήματος, όλα ανθρωπογενούς προέλευσης.

Ψηφιακή συλλογή

Βιβλιοθήκη

Τα παραπάνω δεδομένα τροφοδοτήθηκαν σε δύο προσομοιώσεις, μία που λειτούργησε ως αναφορά (Control Run - Ct), χωρίς την ενσωμάτωση (στους υπολογισμούς των υπολοίπων σχημάτων του μοντέλου) της επίδρασης των αιωρημάτων στην ακτινοβολία και μία που ενσωματώθηκε κανονικά η επίδραση των ατμοσφαιρικών αιωρημάτων στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (Feedback Run - Fb). Οι όποιες μεταβολές παρουσιάζονται στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων, αποτελούν τις διαφοροποιήσεις μεταξύ των δύο (Fb-Ct). Και στις δύο περιπτώσεις, το χρονικό διάστημα προσομοίωσης ήταν η δωδεκαετία μεταξύ 1996 και 2007.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

3.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΑΙΩΡΗΜΑΤΩΝ

3.1.1 Επίδραση στην ηλιακή ακτινοβολία

Η επίδραση των ατμοσφαιρικών αιωρημάτων στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, αποτυπώνεται στις τιμές του οπτικού τους βάθους (Aerosol Optical Depth) (Σχήμα 3.1) και στις τιμές της ποσότητας RF_{TOA} (Radiative Forcing at Top Of Atmosphere) (Σχήμα 3.2), ενώ η συνολική επίδρασή της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία, στις τιμές της ποσότητας RF_{Surface}(Radative Forcing at earth's Surface) (Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.1 Μέσο ετήσιο οπτικό βάθος αιωρημάτων για τη χρονική περίοδο 1996-2007



Σχήμα 3.2 Μέσο ετήσιο ${\rm RF}_{_{\rm TOA}}\,[{\rm Wm}^{\text{-2}}]$ για τη χρονική περίοδο 1996-2007



Σχήμα 3.3 Μέσο ετήσιο $\mathrm{RF}_{\mathrm{Surface}}[\mathrm{Wm}^{\text{-2}}]$ για τη χρονική περίοδο 1996-2007.

Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσης μελέτης με στοιχεία από παρατηρήσεις και προηγούμενες παρόμοιες μελέτες, ορίζονται τρεις υποπεριοχές της ευρύτερης περιοχής προσομοίωσης, οι οποίες παρουσιάζονται στο σχήμα 3.4. Η πρώτη εξ αυτών βρίσκεται στη Νοτιοδυτική Ευρώπη, η δεύτερη στη Νοτιοανατολική Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

και η τρίτη στην Κεντρική-Ανατολική Ευρώπη. Στον πίνακα 3.1, παρουσιάζονται οι ποσότητες που περιγράφηκαν προηγουμένως, όπως προκύπτουν από την παρούσα μελέτη, προηγούμενες μελέτες και από στοιχεία δορυφορικών παρατηρήσεων.



Σχήμα 3.4 Οι υποπεριοχές της προσομοίωσης.

		000000000000000000000000000000000000000	epieren erieger inne	g on at ploody on foldy.
Περιοχή	RegCM3 AOD	MODIS AOD	$RegCM3 \ RF_{TOA} \left[W/m^2 \right]$	
	(1996-2007)	(2000-2007)	(1996-2007)	
	Προσομοίωσης	0.18	0.16	-6.6
	Υποπεριοχή 1 (ΝΔ)	0.07	0.11	-3
	Υποπεριοχή 2 (NA)	0.48	0.17	-14.3
	Υποπεριοχή 3 (Κ-Α)	0.80	0.19	-23.4

Πίνακας 3.1 Σύγκριση με δορυφορικά δεδομένα. Όλες οι τιμές είναι μέσες ετήσιες

Τα δεδομένα από τις δορυφορικές παρατηρήσεις, προέρχονται από τους αισθητήρες MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer) των δορυφόρων Terra (EOS-AM1) και Aqua (EOS-PM1), για την περίοδο των ετών 2000-2007. Τα συγκεκριμένα όργανα θεωρούνται αρκετά αξιόπιστα, καθώς παρουσιάζουν ικανοποιητική ταύτιση με δεδομένα του δικτύου επιφανείας AERONET για την ευρύτερη περιοχή της λεκάνης της Μεσογείου (Papadimas et al. 2009), ενώ η γενική αξιοπιστία των μετρήσεών τους επάνω από ξηρά έχει επίσης ελεγχθεί (Levy et al. 2010).

Από τα στοιχεία που παρατίθενται στον πίνακα 3.1, μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα. Ενώ η μέση τιμή του οπτικού βάθους (AOD) για ολόκληρη την

περιοχή δεν διαφέρει κατά πολύ από την τιμή των δορυφορικών μετρήσεων, οι αποκλίσεις για όλες τις υποπεριοχές είναι σημαντικές, ειδικά για την περίπτωση της Κεντρικής Ευρώπης, όπου συναντώνται και οι περισσότερες πηγές των ανθρωπογενών αιωρημάτων των τύπων που μελετώνται. Μόνο στην Υποπεριοχή 1 παρατηρείται υποεκτίμηση του οπτικού βάθους, που ενδέχεται να οφείλεται στην επίδραση φυσικής προέλευσης αιωρημάτων, όπως σκόνης, ή στο γεγονός της εγγύτητας στα όρια της περιοχής προσομοίωσης. Οι ενεργειακές μεταβολές στην κορυφή της ατμόσφαιρας φέρουν όλες αρνητικό πρόσημο, λόγω της σκίασης (dimming) της οφειλόμενης στα αιωρήματα.

Συγκριτικά, προηγούμενες μελέτες προσομοίωσης, έχουν αναφέρει ετήσιες τιμές οπτικού βάθους για την περιοχή της Ευρώπης, οφειλόμενες σε θειούχα αιωρήματα συνολικά, που κυμαίνονται μεταξύ 0.5 και 1, με τιμές RF_{TOA} από -1 ως -10 W/m² (Takemura et al 2002). Για την περίπτωση αποκλειστικά ανθρωπογενών θειούχων αιωρημάτων, έχουν αναφερθεί τιμές από 0.1 ως 0.6 και -1 ως -5 W/m², αντίστοιχα (Jacobson et al 2001). Για τον ίδιο τύπο αιωρημάτων, στην περιοχή της Ανατολικής Ασίας, έχουν παραχθεί τιμές οπτικού βάθους από 0.15 ως 0.70 και ακρότατες τιμές RF_{TOA} που φτάνουν τα -15 W/m², για την θερινή περίοδο (Quian et al 2001).

3.1.2 Μεταβολές στη θερμοκρασία

Ψηφιακή συλλογή

Βιβλιοθήκη

Η μέση ετήσια διαφοροποίηση της θερμοκρασίας για τα 12 έτη της προσομοίωσης (1996-2007), σε διάφορα επίπεδα από την επιφάνεια του εδάφους (T2m, T850hPa, T500hPa), ανάμεσα στην προσομοίωση αναφοράς (Control Run) και την προσομοίωση της επίδρασης των αιωρημάτων (Aerosol Feedback Run), παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα.

Στο σχήμα 3.5, όπου εμφανίζεται η μέση ετήσια διαφοροποίηση θερμοκρασίας στα 2 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους (T2m), παρατηρείται μία γενική αρνητική τάση (-0.1° ως -0.2° C), για το μεγαλύτερο τμήμα της Ηπειρωτικής Ευρώπης. Νοτίως του 50ου βορείου παραλλήλου (50° N), συναντάται ένα κέντρο ελαχίστων τιμών, στην περιοχή της Βαλκανικής Χερσονήσου. Αντιθέτως, κυρίως στο βόρειο άκρο της ηπείρου, βορείως του 55ου βορείου παραλλήλου (55° N), παρατηρείται μία θετική τάση, έως 0.1° C.

Παρουσίαση Αποτελεσμάτων



Σχήμα 3.5 Μέση ετήσια θερμοκρασία [°C], στα 2 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους (T2m). Με χρώμα παρουσιάζονται οι μεταβολές (Fb-Ct) λόγω των αιωρημάτων, με τις ισοθερμοκρασιακές οι τιμες αναφοράς, ενώ με τη σκίαση σημειώνονται οι περιοχές όπου η διαφοροποίηση της θερμοκρασίας έχει βρεθεί να είναι στατιστικά σημαντική, στο επίπεδο σημαντικότητας του 90% (2-tailed paired t-test).

Στο σχήμα 3.6, όπου παρατίθενται οι διαφορές της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας σε ισοβαρικές επιφάνειες υψηλότερα στην τροπόσφαιρα, οι αποκλίσεις, είτε θετικές είτε αρνητικές, είναι ασθενέστερες κατ'απόλυτη τιμή, σε σχέση με αυτές κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.

Πιο συγκεκριμένα, στην ισοβαρική των 850hPa, η διακύμανση είναι μεταξύ -0.1 ως 0.1 °C, ενώ σε αυτήν των 500hPa είναι μεταξύ -0.06 και 0.06 °C. Όμως, η μορφή των δύο ανωμαλιών, είναι πιο ξεκάθαρη. Τα δύο κέντρα, θετικών και αρνητικών αποκλίσεων, παρουσιάζουν τη μορφή διπόλου, μία μορφή που επαναλαμβάνεται και στο διάγραμμα των γεωδυναμικών υψών. Οι περιοχές όπου οι μεταβολές είναι στατιστικά σημαντικές, είναι πιο περιορισμένες, σε σχέση με τη θερμοκρασία στα 2 μέτρα (T2m). Πάντως, περιλαμβάνουν το νότιο κέντρο του διπόλου, στη Βαλκανική, και στις δύο ισοβαρικές επιφάνειες.

Τέλος, στα σχήματα 3.7 ως 3.9, παρουσιάζονται διαφορές της θερμοκρασίας για τη θερμή και την ψυχρή εποχή του έτους. Ως θερμή εποχή του έτους, λαμβάνεται



(β)



Σχήμα 3.6 Μέση ετήσια θερμοκρασία [°C], στην ισοβαρική επιφάνεια των 850hPa (a) και 500hPa (β). Με χρώμα παρουσιάζονται οι μεταβολές (Fb-Ct) λόγω των αιωρημάτων, με τις ισοθερμοκρασιακές οι τιμες αναφοράς, ενώ με τη σκίαση σημειώνονται οι περιοχές όπου η διαφοροποίηση της θερμοκρασίας έχει βρεθεί να είναι στατιστικά σημαντική, στο επίπεδο σημαντικότητας του 90% (2-tailed paired t-test).





Σχήμα 3.7 Μέση θερμοκρασία [°C], στα 2 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους (T2m), για την ψυχρή (a) και τη θερμή (β) εποχή του έτους. Με χρώμα παρουσιάζονται οι μεταβολές (Fb-Ct) λόγω των αιωρημάτων, με τις ισοθερμοκρασιακές οι τιμες αναφοράς, ενώ με τη σκίαση σημειώνονται οι περιοχές όπου η διαφοροποίηση της θερμοκρασίας έχει βρεθεί να είναι στατιστικά σημαντική,στο επίπεδο σημαντικότητας του 90% (2-tailed paired t-test).





Σχήμα 3.8 Μέση θερμοκρασία [°C], στην ισοβαρική επιφάνεια των 850hPa, για την ψυχρή (α) και τη θερμή (β) εποχή του έτους. Με χρώμα παρουσιάζονται οι μεταβολές (Fb-Ct) λόγω των αιωρημάτων, με τις ισοθερμοκρασιακές οι τιμες αναφοράς, ενώ με τη σκίαση σημειώνονται οι περιοχές όπου η διαφοροποίηση της θερμοκρασίας έχει βρεθεί να είναι στατιστικά σημαντική,στο επίπεδο σημαντικότητας του 90% (2-tailed paired t-test).





Σχήμα 3.9 Μέση θερμοκρασία [°C], στην ισοβαρική επιφάνεια των 500hPa, για την ψυχρή (α) και τη θερμή (β) εποχή του έτους. Με χρώμα παρουσιάζονται οι μεταβολές (Fb-Ct) λόγω των αιωρημάτων, με τις ισοθερμοκρασιακές οι τιμες αναφοράς, ενώ με τη σκίαση σημειώνονται οι περιοχές όπου η διαφοροποίηση της θερμοκρασίας έχει βρεθεί να είναι στατιστικά σημαντική,στο επίπεδο σημαντικότητας του 90% (2-tailed paired t-test).

αυτή μεταξύ Μαΐου και Σεπτεμβρίου και ως ψυχρή αυτή μεταξύ Νοεμβρίου και Μαρτίου. Οι μήνες Απρίλιος και Οκτώβριος παραλείπονται, ως μεταβατικοί. Στις εποχιακές απεικονίσεις, η διπολική δομή εμφανίζεται πιο αμυδρά σε αυτές των ψυχρών περιόδων του έτους. Εμφανίζεται μεν πιο έντονα στις θερμές περιόδους, αλλά μετατοπισμένη ή με αλλοιωμένη μορφή.

3.1.3 Μεταβολές στα γεωδυναμικά ύψη

Ψηφιακή συλλογή

Βιβλιοθήκη

Το γεγονός πως υπάρχει μία ασυμφωνία ανάμεσα στη χωρική κατανομή των μεταβολών της θερμοκρασίας και σε αυτή των μεταβολών της ακτινοβολίας, όπως αυτή αποτυπώνεται μέσω του οπτικού βάθους των αιωρημάτων και του RF_{τοΑ}, μπορεί να αναζητηθεί σε μεταβολές της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας. Για τη διερεύνηση αυτής της πιθανότητας, παρουσιάζεται στα σχήματα 3.10 και 3.11, η μεταβολή στο γεωδυναμικό ύψος της ισοβαρικής επιφάνειας των 500hPa, σε γεωδυναμικά μέτρα (gpm).



Σχήμα 3.10 Μέσο ετήσιο γεωδυναμικό ύψος [gpm] της ισοβαρικής επιφάνειας των 500hPa.Με χρώμα παρουσιάζονται οι μεταβολές (Fb-Ct) λόγω των αιωρημάτων, με τις ισοϋψείς οι τιμές αναφοράς, ενώ με τη σκίαση σημειώνονται οι περιοχές όπου η διαφοροποίηση του γεωδυναμικού ύψους έχει βρεθεί να είναι στατιστικά σημαντική, στο επίπεδο σημαντικότητας του 90% (2-tailed paired t-test).





Σχήμα 3.11 Μέσο γεωδυναμικό ύψος [gpm] της ισοβαρικής επιφάνειας των 500hPa, για την ψυχρή (a) και τη θερμή (β) εποχή του έτους. Με χρώμα παρουσιάζονται οι μεταβολές (Fb-Ct) λόγω των αιωρημάτων, με τις ισοϋψείς οι τιμές αναφοράς, ενώ με τη σκίαση σημειώνονται οι περιοχές όπου η διαφοροποίηση του γεωδυναμικού ύψους έχει βρεθεί να είναι στατιστικά σημαντική,στο επίπεδο σημαντικότητας του 90% (2-tailed paired t-test).

Στην απεικόνιση της μέσης ετήσιας μεταβολής του γεωδυναμικού ύψους, εμφανίζεται και πάλι η μορφή του διπόλου που υπήρχε και στα σχήματα της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας. Με βάση το σχήμα αυτό, μπορεί η επίδραση των ατμοσφαιρικών αιωρημάτων να θεωρηθεί ως ισοδύναμη με τη δημιουργία δύο ανωμαλιών, μίας κυκλωνικής, στην περιοχή της Βαλκανικής στη Νοτιοανατολική Ευρώπη και μίας αντικυκλωνικής, στην περιοχή της Βορειοανατολικής Ευρώπης και της Βαλτικής θάλασσας. Περαιτέρω επιβεβαίωση της θεώρησης αυτής, θα αναζητηθεί στις μεταβολές των συνιστωσών του ανέμου. Στο σχήμα 3.11, μορφή διπόλου εμφανίζεται στην περίπτωση του διαγράμματος μεταβολών της θερμής περιόδου, όμως το κέντρο των αρνητικών μεταβολών είναι μετατοπισμένο σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Στο διάγραμμα για την ψυχρή περίοδο δεν υπάρχει πλέον το δίπολο.

3.1.4 Μεταβολές στον άνεμο

Ψηφιακή συλλογή

Βιβλιοθήκη

Στο σχήμα 3.12 παρουσιάζονται οι διαφορές στις μέσες ετήσιες τιμές της ζωνικής (u) και της μεσημβρινής (v) συνιστώσας του ανέμου αντίστοιχα, στην ισοβαρική επιφάνεια των 500hPa. Οι μεταβολές του ζωνικού ανέμου, στην περιοχή μεταξύ του 45ου και του 55ου βορείου παραλλήλου (45°N-55°N), είναι αρνητικές, έως και -0.25 ms⁻¹ και στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο 90%. Σε συνδυασμό με τις θετικές μεταβολές νοτίως του 40ου παραλλήλου (40°N) και βορείως του 60ου παραλλήλου (60°N), μπορεί το όλο φαινόμενο να θεωρηθεί ισοδύναμο με την επίδραση, στην ατμοσφαιρική κυκλοφορία, δύο κέντρων, ενός αντικυκλωνικού, περίπου στο ύψος του 55ου παραλλήλου (55°N) και ενός κυκλωνικού στο ύψος του 45ου παραλλήλου (45°N). Η μορφή αυτή της κυκλοφορίας φαίνεται να διατηρείται και στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο σχήμα 3.13, όπου εμφανίζεται η μεταβολή στην ταχύτητα του οριζοντίου ανέμου ($\sqrt{u^2+v^2}$). Και η απεικόνιση των μεταβολών του μεσημβρινού ανέμου (Σχήμα

3.12β) παρουσιάζει ίχνη της ύπαρξης των δύο προαναφερθέντων ανωμαλιών, αν και δεν υπάρχει στατιστική σημαντικότητα. Επιπλέον, η σχετική ενίσχυση των βορείων ανέμων που παρατηρείται παραπλεύρως της περιοχής της Βαλκανικής, ενδέχεται να





Σχήμα 3.12 Μέσος ετήσιος ζωνικός (u) (a) και μεσημβρινός (v) (β) άνεμος [ms⁻¹], στην ισοβαρική επιφάνεια των 500hPa. Με χρώμα παρουσιάζονται οι μεταβολές (Fb-Ct) λόγω των αιωρημάτων, με τις ισοταχείς οι τιμές αναφοράς, ενώ με τη σκίαση σημειώνονται οι περιοχές όπου η διαφοροποίηση του γεωδυναμικού ύψους έχει βρεθεί να είναι στατιστικά σημαντική,στο επίπεδο σημαντικότητας του 90% (2-tailed paired t-test).



Σχήμα 3.13 Μέσος ετήσιος οριζόντιος ($\sqrt{u^2 + v^2}$) άνεμος [ms⁻¹], στην ισοβαρική επιφάνεια των 250hPa. Με χρώμα παρουσιάζονται οι μεταβολές (Fb-Ct) λόγω των αιωρημάτων, με τις ισοταχείς οι τιμές αναφοράς, ενώ με τη σκίαση σημειώνονται οι περιοχές όπου η διαφοροποίηση του γεωδυναμικού ύψους έχει βρεθεί να είναι στατιστικά σημαντική,στο επίπεδο σημαντικότητας του 90% (2-tailed paired t-test).

συμβάλλει στις θερμοκρασιακές μεταβολές, μέσω μεταφοράς ψυχρότερων αερίων μαζών, από βορειότερα.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

4.1 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

4.1.1 Ανακεφαλαίωση παραμέτρων της μελέτης

Μελετήθηκε η επίδραση των ανθρωπογενών ατμοσφαιρικών αιωρημάτων, ανθρακούχων και θειούχων, σε συγκεκριμένες κλιματικές παραμέτρους, στην ευρύτερη περιοχή της Ευρώπης. Αυτό πραγματοποιήθηκε με χρήση του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM3, με προσθήκη ενός απλοποιημένου σχήματος ατμοσφαιρικής χημείας, για τη 12ετή περίοδο μεταξύ 1996-2007. Τα δεδομένα εισόδου για τις κλιματικές παραμέτρους προήλθαν από τις βάσεις δεδομένων reanalysis NCEP-DOE-AMIP-II (Kanamitsu et al 2002) και NOAA OISST v2. Τα στοιχεία εκπομπών για τα αιωρήματα ήταν αντιπροσωπευτικά για το έτος 2000 και προερχόμενα από τη βάση δεδομένων EDGAR (για τα θειούχα) και υπολογισμένα βάσει της μεθοδολογίας των (Cooke et al 2002). Διεξήχθησαν δύο κύκλοι προσομοιώσεων, ένας κύκλος αναφοράς και ένας κύκλος στον οποίο ενσωματώθηκε και άμεση επίδραση των αιωρημάτων (direct aerosol effect/feedback) στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (shortwave solar radiation).

4.1.2 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Οι τιμές του οπτικού βάθους των αιωρημάτων (Aerosol Optical Depth) παρουσίασαν αύξηση στην Κεντρική και Ανατολική Ευρώπη, μεγαλύτερη των παρατηρούμενων στην πραγματικότητα. Συνυπολογίζοντας το γεγονός ότι η ανωτέρω περιοχή συγκεντρώνει την πλειοψηφία των πηγών των ανθρωπογενών αιωρημάτων, συμπεραίνεται μία τάση του μοντέλου να υπερεκτιμά την επίδραση των αιωρημάτων

στην ηλιακή ακτινοβολία. Από τις τιμές της λευκαύγειας απλής σκέδασης (Single Scattering Albedo), που βρέθηκαν να είναι πολύ κοντά στη μονάδα, φαίνεται ότι η κύρια συμβολή είναι αυτή των θειούχων αιωρημάτων, καθώς τα ανθρακούχα δρουν κυρίως απορροφητικά.

Ψηφιακή συλλογή

Βιβλιοθήκη

Οι μέσες ετήσιες μεταβολές στη θερμοκρασία ήταν γενικά περιορισμένες και πιο έντονες κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, με κύμανση από -0.2°C ως 0.1°C. Πιο αξιοσημείωτα γνωρίσματα των μεταβολών ήταν ο κυρίως αρνητικός τους χαρακτήρας νοτίως του 50ου βορείου παραλλήλου (50°N), ιδίως στην περιοχή της Βαλκανικής, όπως και ο κυρίως θετικός χαρακτήρας τους βορείως του 55ου βορείου παραλλήλου (55° N), στη Βορειοανατολική Ευρώπη και τη Βαλτική θάλασσα. Το ζεύγος αυτό των ανωμαλιών, που μπορεί να παρομοιασθεί και με ένα δίπολο, είχε πιο έντονη μορφή, ως προς το εύρος των διαφορών θερμοκρασίας, πλησίον του εδάφους. Αυτή η μορφή αλλοιωνόταν και μετατοπιζόταν, μαζί με τον περιορισμό του εύρους των μεταβολών, στα ανώτερα τροποσφαιρικά στρώματα.

Κατά τα λοιπά, η γενική επίδραση στη θερμοκρασία βρέθηκε να είναι αρνητική, στο μεγαλύτερο τμήμα της ηπείρου, με τις μεταβολές να είναι στατιστικά σημαντικές σε σημαντικό τμήμα αυτής, κοντά στο έδαφος, κάτι που δεν διατηρήθηκε στα υψηλότερα επίπεδα.

Αν και οι περιοχές των πιο αξιοσημείωτων μεταβολών της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας δεν βρέθηκαν να παρουσιάζουν χωρική ταύτιση με τις αντίστοιχες μεταβολές της ακτινοβολίας (RF_{TOA}), είχαν εντούτοις εμφανή ομοιότητα με τις εξάρσεις της μεταβολής του μέσου ετήσιου γεωδυναμικού ύψους της ισοβαρικής επιφάνειας των 500hPa. Οι αυξημένες ή μειωμένες (αντίστοιχα) ανοδικές κινήσεις ατμοσφαιρικών μαζών που συνεπάγονται αυτού του γεγονότος, θα μπορούσαν να αποτελέσουν μίαν εξήγηση των θερμοκρασιακών μεταβολών.

Περαιτέρω εξήγηση, μπορεί να αναζητηθεί στις μεταβολές του ανέμου. Οι μεταβολές του ζωνικού ανέμου (συνιστώσα u) στα 500 hPa, βρέθηκαν να είναι σύμφωνες με την ύπαρξη ζεύγους ανωμαλιών, κυκλωνικής και αντικυκλωνικής φύσης αντίστοιχα, στη Βαλκανική και στη Βορειοανατολική Ευρώπη. Οι μεταβολές του μεσημβρινού ανέμου (συνιστώσα v), προέκυψαν τέτοιες, ώστε να αντιστοιχούν σε αυξημένη ροή ψυχρότερων μαζών από το βορρά, περιφερειακά της Βαλκανικής, που θα μπορούσε να οδηγήσει σε μειωμένες παρατηρούμενες θερμοκρασίες, λόγω μεταφοράς ψυχρότερων αερίων μαζών. Σε σχέση με τις φυσικές διεργασίες που ενδέχεται να οφείλονται στις μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας και να οδηγούν στις παρατηρούμενες μεταβολές της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας (και, τελικά, της θερμοκρασίας), μπορεί να γίνει το εξής σχόλιο. Λόγω του εντοπισμού των ανθρωπογενών ατμοσφαιρικών αιωρημάτων κυρίως εντός του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος (atmospheric boundary layer), αναμένονται (Yu et al, 2002) μεταβολές στη διαστρωμάτωση της τροπόσφαιρας, εξαιτίας των διαδικασιών απορρόφησης και, κυρίως, χωρικής ανακατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας (υπενθυμίζεται η γενικά σκεδαστική φύση των αιωρημάτων), που δημιουργούν ανωμαλίες ενεργειακής φύσεως.

Συμπερασματα

Επιπλέον, λόγω των μεταβολών στην ατμοσφαιρική κυκλοφορία, που προκαλεί μεταβολές στη θερμοκρασιακή βαθμίδα κατά μήκος των μεσημβρινών, αναμένονται επιδράσεις στον κατακόρυφο διατμητικό (θερμικό) άνεμο (vertical wind shear - thermal wind), κατά τη ζωνική συνιστώσα. Με αποτέλεσμα μεταβολές στην κατακόρυφη και οριζόντια ατμοσφαιρική ροή.

Το γεγονός ότι οι έλεγχοι της στατιστικής σημαντικότητας έδωσαν οριακά αποτελέσματα, παρά το ότι οι τιμές του οπτικού βάθους και οι μεταβολές στην ηλιακή ακτινοβολία ήταν υπερεκτιμημένες από το μοντέλο, μαρτυρά τη γενικά μικρή εξάρτηση μεγεθών όπως η θερμοκρασία από την άμεση επίδραση των ατμοσφαιρικών αιωρημάτων στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (direct shortwave effect).



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας ήταν η μελέτη της επίδρασης των ανθρωπογενών ατμοσφαιρικών αιωρημάτων, ανθρακούχων και θειούχων, στη θερμοκρασία, στην περιοχή της Ευρώπης. Για το σκοπό αυτό, υλοποιήθηκαν δύο προσομοιώσεις που κάλυπταν τη χρονική περίοδο 1996-2007, με και χωρίς την επίδραση των ανθρωπογενών αιωρημάτων, και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων. Διαπιστώθηκε σχετικά μικρή διαφοροποίηση μεταξύ των δύο περιπτώσεων, με περιορισμένη στατιστική σημαντικότητα και χωρική κατανομή που σχετιζόταν περισσότερο με δυναμικές μεταβολές στη γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας στην περιοχή μελέτης και λιγότερο με την επίδραση των αιωρημάτων στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Αυτή η τελευταία διαπίστωση, παρά την υπερεκτίμηση της προαναφερθείσας επίδρασης των αιωρημάτων στην ακτινοβολία, συγκριτικά με δεδομένα παρατηρήσεων, οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η συμβολή των ανθρωπογενών αιωρημάτων είναι σχετικά μικρή σε σχέση με άλλες αιτίες μεταβολής του κλίματος και λαμβάνει χώρα μέσω πιο περίπλοκων φυσικών μηχανισμών.



ΑΓΓΛΙΚΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ

The purpose of the study was the investigation of the direct effect of anthropogenic carbon and sulphur compounds, in the form of atmospheric aerosols, on temperatures, in the general European region. To that end, two sets of simulations were performed, covering the 1996-2007 time period, one accounting for the effect of the aerosols and one to act as control. The observed differences were small and of limited statistical significance, while their spatial distribution was more consistent with the dynamical changes to the general atmospheric circulation in the area, rather than the changes to the incident shortwave solar radiation. This last information, despite the overestimation of the aforementioned radiation changes, relative to observational data, led to the conclusion that the direct effect of athropogenic aerosols on temperature in Europe is limited, when compared to other climate altering causes, and occurs through more complex dynamic processes.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Barsanti, K. C. & Pankow, J. F. 2004. Thermodynamics of the formation of atmospheric organic particulate matter by accretion reactions—Part 1: Aldehydes and ketones, Atmospheric Environment, 38, 4371–4382.
- Barsanti, K. C. & Pankow, J. F. 2004. Thermodynamics of the formation of atmospheric organic particulate matter by accretion reactions—Part 2. Dialdehydes, methylglyoxal, and diketones, *Atmospheric Environment*, 39, 6597–6607.
- Berg, M. J., Sorensen, C. M. and Chakrabarti A., 2010. Explanation of the patterns in Mie scattering. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 111, 782–794.
- Bohren, C. F. & Huffman, D. R., 1983. Absorption and scattering of light by small particles. Wiley, New York.
- Briegleb, B. P. 1992. Delta-Eddington approximation for solar radiation in the NCAR community climate model, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 97, 7603–7612.
- Clarke, A. D., 1989. Aerosol light absorption by soot in remote environments, *Aerosol Science and Technology*, 10, 161–171.
- Cooke, W.F., Ramaswamy, V., Kasibhatla, P., 2002. A general circulation model study of the global carbonaceous aerosol distribution. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 107, 4279. doi:10.1029/2001JD001274
- Daum, P. H., Kelly, T. J., Schwartz, S. E. and Newman, L., 1984. Measurements of the chemical composition of stratiform clouds. Atmospheric Environment, 18, 2671–2684.
- Deardorff, J. W. 1978. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation, *Journal of Geophysical*

Research, 83, 1889-1903

Βιβλιογραφία

Denbigh, K., 1981. The Principles of Chemical Equilibrium, 4th ed., Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.

- Dickinson, R. E., Henderson-Sellers, A. & Kennedy, P. J. 1993. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR community climate model, Technical Note NCAR/TN-387+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado.
- Ekman, A. M. L. & Rodhe, H. 2003. Regional temperture response due to indirect sulfate aerosol forcing: impact of model resolution. *Climate Dynamics*, 21, 1–10.
- Elguindi, N., Bi, X., Giorgi, F., Nagarajan, B., Pal, J., Solmon, F., Rauscher, S. & Zakey, A. 2006. RegCM Version 3.1 User's Guide. Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italy.
- Giorgi, F., Bi, X. & Qian, Y. 2003. Indirect versus direct effects of anthropogenic sulfate on the climate of east Asia as simulated with a regional coupled climate-chemistry/aerosol model. *Climatic Change*, 58, 345–376.
- Grell, G. A., Dudhia, J. and Stauffer D. R. 1994: Description of the fifth generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), Technical Note TN-398+STR, NCAR, Boulder, Colorado.
- Harris, S. J. & Weiner, A. M., 1983a. Surface growth of soot particles in premixed ethylene/air flames. *Combustion Science and Technology*, 31, 155–167.
- Harris, S. J. & Weiner, A. M., 1983b. Determination of the rate constant for soot surface growth. *Combustion Science and Technology*, 32, 267–275.
- Hildemann, L. M., Markowski, G. R., Jones, M. C. & Cass, G. R. 1991b. Submicrometer aerosol mass distributions of emissions from boilers, fireplaces, automobiles, diesel trucks, and meat cooking operations, *Aerosol Science and Technology*, 14, 138–152.
- Holtslag, A. A. M., de Bruijn, E. I. F. & Pan, H.-L. 1990. A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting, *Monthly Weather Review*, 118, 1561–1575.
- Jacobson, M. Z. 2001. Global direct radiative forcing due to multicomponent anthropogenic and natural aerosols. *Journal of Geophysical Research*, 106,1551–1568.

Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S. K., Hnilo, J. J., Fiorino, M., Potter, G. L., 2002. NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83, 1631–1643.

Ψηφιακή συλλογή

Βιβλιοθήκη

- Keywood, M. D., Varutbangkul, V., Bahreini, R., Flagan, R. C. & Seinfeld, J. H. 2004. Secondary organic aerosol formation from the ozonolysis of cycloalkenes and related compounds, *Environmental Science and Technology*, 38, 4157–4164.
- Kiehl, J. T., Hack, J. J., Bonan, G. B., Boville, B. A., Briegleb, B. P., Williamson, D.
 & Rasch, P. 1996. Description of the NCAR community climate model (CCM3), Technical Note NCAR/TN-420+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado.
- Matthews, E., 1983. Global vegetation and land use: New high resolution data bases for climate studies. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 22, 474–487.
- Matthews, E., 1984. Prescription of land-surface boundary conditions in GISS GCMII and Vegetation, land-use and seasonal albedo data sets: Documentation of archived data tape. NASA Technical Memos 86096 and 86107, NASA, Goddard Institute for Space Studies, New York, NY, 20 pp. and 9 pp.
- McKinnon, J. T. & Howard, J. B, 1990. Application of soot formation model—effects of chlorine. *Combustion Science and Technology*, 74, 175–197.
- Olson, J. S., Watts, J. A. & Allison, L. J., 1983. Carbon in live vegetation of major world ecosystems U.S. Department of Energy, DOE/NBB-0037, No. TR004, U.S. Department of Energy, Washington, DC, 152 pp.
- Pal, J. S., Small, E. E. & Eltahir, E. A. B., 2000. Simulation of regional-scale water and energy budgets. Representation of subgrid cloud and precipitation processes within RegCM, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 105, 29579–29594.
- Pandis, S. N., Harley, R. H., Cass, G. R. & Seinfeld, J. H. 1992. Secondary organic aerosol formation and transport, *Atmospheric Environment*, 26A, 2269–2282.
- Qian, Y., Giorgi, F. & Huang, Y., 2001. Regional simulation of anthropogenic sulfur over east Asia and its sensitivity to model parameters. *Tellus B*, 53,171–191.
- Roeckner, E., Bengtsson, L., Feichter, J., Lelieveld, J. & Rodhe, H. 1999. Transient climate change simulations with a coupled atmosphere-ocean GCM including the tropospheric sulfur cycle. *Journal of Climate*, 12, 3004–3032.
- Seinfeld, J. H. & Pankow, J. E. 2003. Organic atmospheric particulate material, Annual Review of Physical Chemistry, 54, 121–140.

Βιβλιογραφία

- Slingo, A. 1989. A gcm parameterization for the shortwave radiative properties of water clouds, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46, 1419–1427.
- Strader R., Lurmann, F. & Pandis, S. N. 1999. Evaluation of secondary organic aerosol formation in winter, *Atmospheric Environment*, 33, 4849–4863.
- Sundqvist, H., Berge, E. & Kristjansson, J. E. 1989. Condensation and cloud parameterization studies with a mesoscale numerical weather prediction model, *Monthly Weather Review*, 117, 1641–1657.
- Takemura, T., Nakajima, T., Dubovik, O., Holben, B. N., Kinne, S. 2002. Singlescatteringalbedo and radiative forcing of various aerosol species with a global three-dimensional model. *Journal of Climate*, 15, 333–352.
- Tong, C., Blanco, M., Goddard III, W. A. & Seinfeld J. H. 2006. Secondary organic aerosolformation by heterogeneous reactions of aldehydes and ketones: A quantum mechanical study, *Environmental Science and Technology*, 40, 2333-2338.
- Troen, I. B. & Mahrt, L. 1986. A simple model of the atmospheric boundary layer: sensitivity to surface evaporation. *Boundary-Layer Meteorology*, 37, 129-148.
- Twomey, S. 1977. The Influence of Pollution on the Shortwave Albedo of Clouds. J Atmos Sci, 34, 1149–1152.
- Vogel, B., Vogel, H., Bäumer, D., Bangert, M., Lundgren, K., Rinke, R. & Stanelle, T. 2009. The comprehensive model system COSMO-ART-radiative impact of aerosol on the state of the atmosphere on the regional scale. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 8661–8680.
- Wilson, M. F., 1984. The construction and use of land surface information in a general circulation climate model. Unpublished Ph.D. thesis, University of Liverpool, United Kingdom, 346 pp.
- Yu, H., Liu, S. C. & Dickinson R. E. 2002. Radiative effects of aerosols on the evolution of the atmospheric boundary layer, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 107, 4142. doi: 10.1029/2001JD000754.
- Zanis, P., 2009. A study on the direct effect of anthropogenic aerosols on near surface temperature over Southeastern Europe during summer 2000 based on regional climate modelling. *Annals of Geophysics*, 27, 3977–3988.

Βιβλιοθήκη - 88 Zanis, P., Ntogras, C., Zakey, A., Pytharoulis, I. & Karakostas, T., 2012. Regional μήμα Ι climate feedback of anthropogenic aerosols over Europe using RegCM3. Climate Research, 52, 267-278.

Ψηφιακή συλλογή