

6^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ : ΔΟΜΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ – ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ 6^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

6.1 Εισαγωγή.....	1
6.2 Εξισώσεις διασποράς ρύπων σε συστήματα Euler και Lagrange.....	4
6.2.1 Μοντέλο Όγκου στο σύστημα συντεταγμένων Euler	6
6.2.2. Τρισδιάστατα Μοντέλα Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης.....	9
6.2.3. Μοντέλα Εσωτερικών χώρων.....	11
6.3 Ατμοσφαιρικά Μοντέλα - Εφαρμογές	12
6.3.1 Μελετούμενη Περίπτωση 1: Εφαρμογή του Eulerian μοντέλου UAM-AERO στην περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου.....	12
6.3.2 Περίοδος Προσομοίωσης	13
6.3.3 Εκπομπές	15
6.3.4 Εφαρμογή του Μοντέλου – Αποτελέσματα	17
6.3.5 Μελετούμενη Περίπτωση 2 – Σταθμός Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας Ξυλοκαμάρας Νομού Χανίων – Υφιστάμενη κατάσταση.....	24
6.3.6. Περιγραφή του μοντέλου.....	25
6.3.7 Αποτελέσματα μελέτης	26
6.4 Στατιστική Μελέτη Ατμοσφαιρικών Μοντέλων	28
6.5. Παραδείγματα και Εφαρμογές	30
Βιβλιογραφία 6 ^{ου} Κεφαλαίου	37

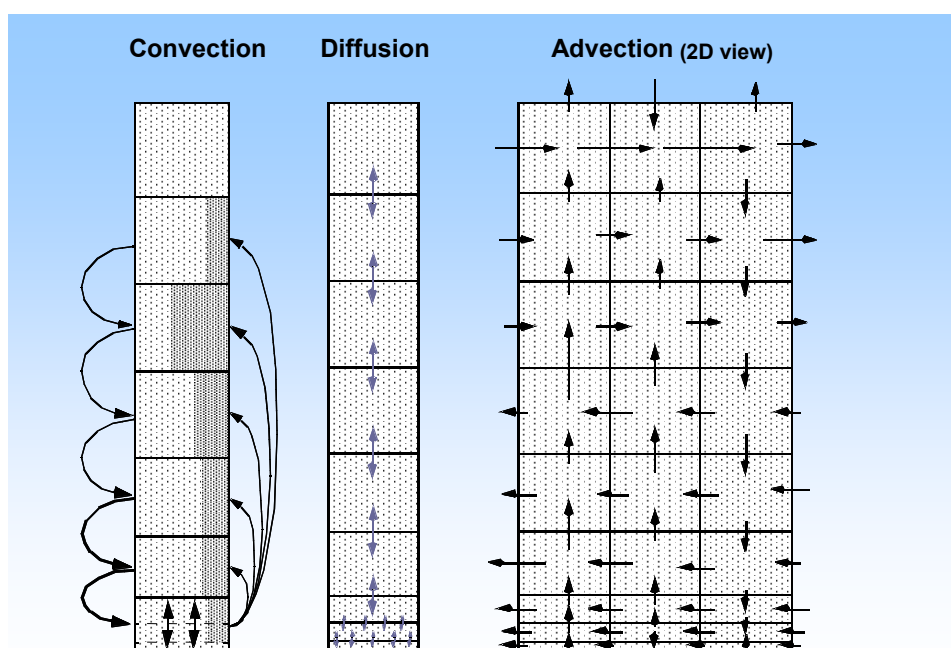
6.1 Εισαγωγή

Η Ατμόσφαιρα είναι ένα δυναμικό φυσικό σύστημα, όπου ένας μεγάλος αριθμός φυσικών και χημικών διεργασιών συμβαίνει ταυτόχρονα. Ένας ολοκληρωμένος τρόπος μελέτης της δυναμικής της Ατμόσφαιρας και της διασποράς των αερίων ρύπων γίνεται με τη βοήθεια ατμοσφαιρικών μοντέλων. Ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο περιγράφει τις διάφορες φυσικές και χημικές διεργασίες που πραγματοποιούνται στην Ατμόσφαιρα και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαφόρων διεργασιών. Φυσικά η εφαρμογή ενός μοντέλου γίνεται ταυτόχρονα με σύγκριση των αποτελεσμάτων του με πειραματικές μετρήσεις και εργαστηριακά αποτελέσματα. Έτσι επιτυγχάνεται πληρέστερη κατανόηση των χημικών αντιδράσεων και χημικών διεργασιών στην Ατμόσφαιρα και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου.

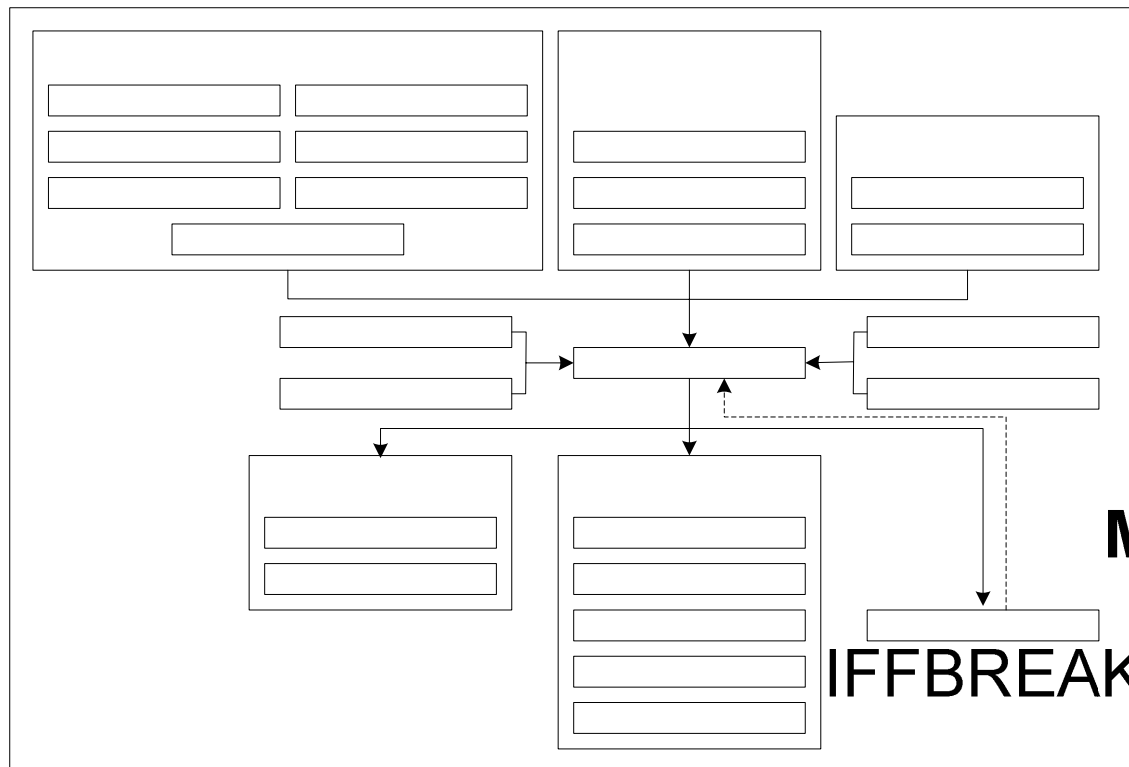
Παρόλο που οι μετρήσεις στην Ατμόσφαιρα ή στο εργαστήριο έχουν πολλούς περιορισμούς και δεν μπορούν να δώσουν μια ολοκληρωμένη εικόνα της δυναμικής της Ατμόσφαιρας, προσφέρουν πολύτιμες πληροφορίες για μεμονωμένες διεργασίες. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να αξιολογηθούν

επίσης στον έλεγχο λειτουργίας του εφαρμοζόμενου ατμοσφαιρικού μοντέλου και να οδηγήσουν στην κατανόηση βασικών φυσικών και χημικών μεταβολών στην Ατμόσφαιρα. Σχηματοποίηση της διασποράς των ρύπων σε σύστημα κυψελίδων μιας και δύο διαστάσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-1 για συμμεταφορά (convection), διάχυση (1-D) (diffusion) και διασπορά (2-D) (advection).

Η κατανόηση της δυναμικής της Ατμόσφαιρας μπορεί να πραγματοποιηθεί με συνδυασμό μετρήσεων και ολοκληρωμένης μοντελοποίησης μέσω ατμοσφαιρικών μοντέλων διασποράς και χημείας. Ένα ολοκληρωμένο ατμοσφαιρικό μοντέλο περιλαμβάνει επιμέρους μοντέλα για την εκπομπή των ρύπων στην Ατμόσφαιρα, μοντέλα για τη διασπορά, τη μετεωρολογία και τέλος περιγραφή των φυσικών και χημικών διεργασιών των αερίων ρύπων. Η δομή ενός ατμοσφαιρικού μοντέλου παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-2. Υπάρχει ένα σύνολο προγραμμάτων στο μοντέλο που επεξεργάζονται τις εκπομπές των διαφόρων χημικών ρύπων καθώς και τις αρχικές και οριακές συνθήκες. Μια άλλη σειρά προγραμμάτων του μοντέλου καθορίζουν τα μετεωρολογικά δεδομένα και τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Το κύριο τμήμα όμως του μοντέλου αποτελείται από την περιγραφή και μοντελοποίηση των φυσικών και χημικών διεργασιών στην Ατμόσφαιρα. Υπάρχει τέλος ένα τμήμα που επεξεργάζεται τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις.



Σχήμα 6-1: Περιγραφή των όρων συμμεταφοράς (convection) και διάχυσης (diffusion) που λαμβάνουν χώρα σε ένα μονοδιάστατο μοντέλο και της διασποράς (advection) σε ένα δισδιάστατο μοντέλο.



Σχήμα 6-2 Περιγραφή της γενικής δομής ενός ατμοσφαιρικού μοντέλου (UAM-AERO)
(Οι επεξηγήσεις της ονοματολογίας των αρχείων δίνεται στο κείμενο).

Το Σχήμα 6-2 αναφέρεται ειδικά στη γενική δομή του μοντέλου UAM-AERO (Lurmann et al., 1997). Από το Σχήμα 6-2 παρατηρούμε, ότι το τμήμα αερίο που περιγράφει τη Μετεωρολογία όπου έχουμε στοιχεία για το ύψος του οριακού στρώματος δίνεται από το αρχείο (DIFFBREAK), το ύψος όλης της περιοχής που μοντελοποιείται δίνεται από το αρχείο (REGIONTOP), η ταχύτητα του ανέμου δίνεται από το αρχείο (WIND), η σχετική υγρασία δίνεται από το αρχείο (WATER), η θερμοκρασία δίνεται από το αρχείο (TEMPERATUR), η ομίχλη που πιθανώς υπάρχει δίνεται από το αρχείο (FOG), ενώ διάφορα άλλα μετεωρολογικά στοιχεία (π.χ. πίεση, γεωγραφικές συντεταγμένες) δίνονται στο αρχείο METSCALARS.

Το τμήμα του μοντέλου που περιγράφει τα στοιχεία της ποιότητας του αέρα περιέχει τρία αρχεία. Ένα αρχείο περιγράφει τις αρχικές συγκεντρώσεις των αερίων ρύπων στο πλέγμα (AIRQUALITY) και τα άλλα δύο τις αρχικές συγκεντρώσεις στα άκρα του πλέγματος (BOUNDARY) και στην κορυφή του (TOPCONC).

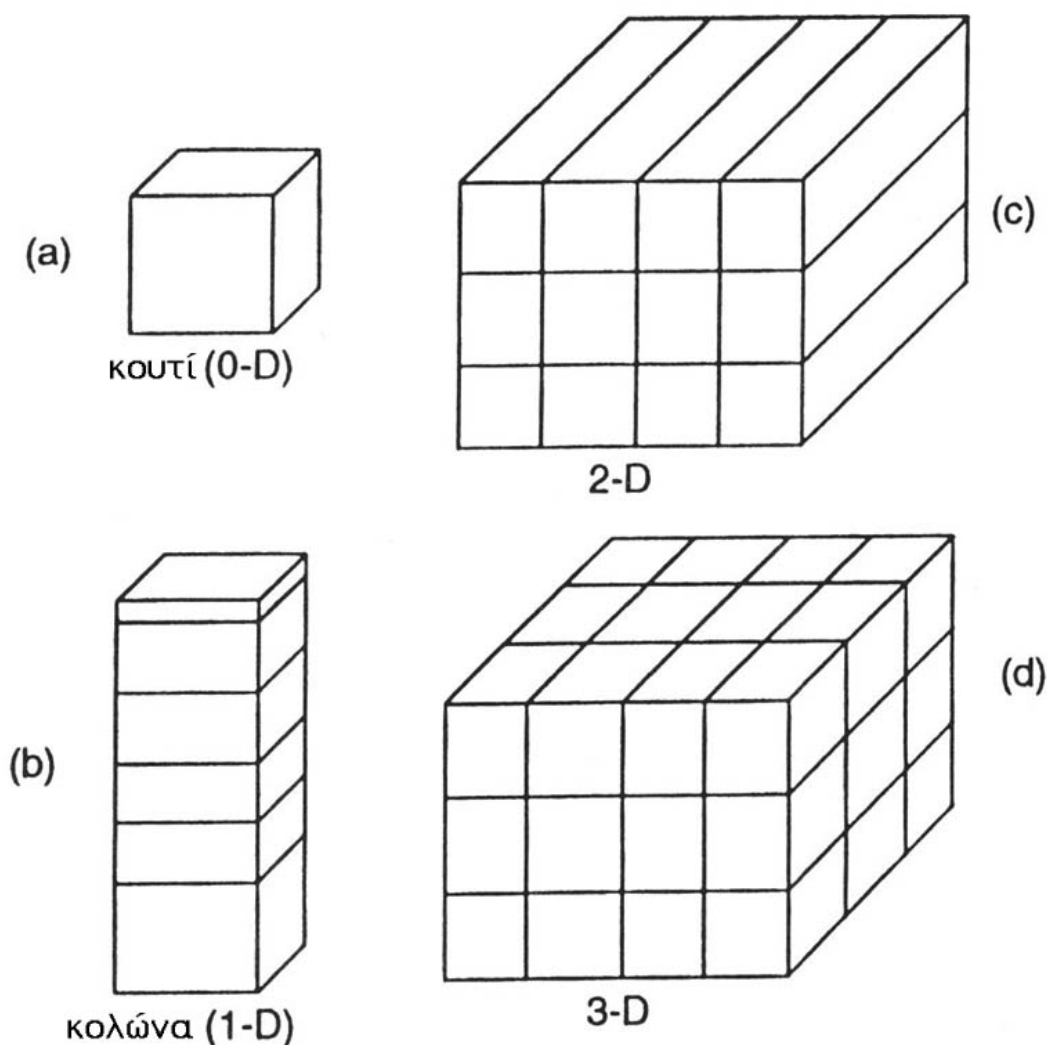
Στη συνέχεια έχουμε το κομμάτι του μοντέλου που δίνει τις εκπομπές από επιφανειακές (EMISSIONS) και σημειακές (PTSOURCE) πηγές. Υπάρχουν επίσης τα αρχεία που καθορίζουν τα θερμοδυναμικά δεδομένα (CHEMPARAM) καθώς και πλήθος άλλων μεταβλητών (SIMCONTROL) που χρειάζονται για την εφαρμογή του μοντέλου.

Τέλος υπάρχουν τα αρχεία που καθορίζουν την τοπογραφία (TERRAIN) και χρήσεις γης (LANDUSE). Όλα τα παραπάνω αρχεία τροφοδοτούν το κύριο

κομμάτι του μοντέλου (UAM-AERO) που επεξεργάζεται όλα τα στοιχεία επιλύοντας ταυτόχρονα τις εξισώσεις που περιγράφουν τη διασπορά και τις φυσικο-χημικές διεργασίες. Από αυτή την επεξεργασία προκύπτουν τα αποτελέσματα του μοντέλου. Έχουμε τρία αρχεία εξόδου. Το πρώτο αρχείο (INSTANT) δίνει κατά τη διάρκεια της μαθηματικής επεξεργασίας μηνύματα σχετικά με την ορθή λειτουργία του μοντέλου. Το δεύτερο αρχείο (DIAGNOSTIC) μας δίνει διαγνωστικά δεδομένα για τα χημικά στοιχεία και τη λειτουργία του μοντέλου. Τέλος τα αρχεία εξόδου (OUTPUTS) μας δίνουν τη δυναμική των συγκεντρώσεων των αερίων ρύπων (AVERAGE) και την εναπόθεση τους στο έδαφος (DEPOSITION).

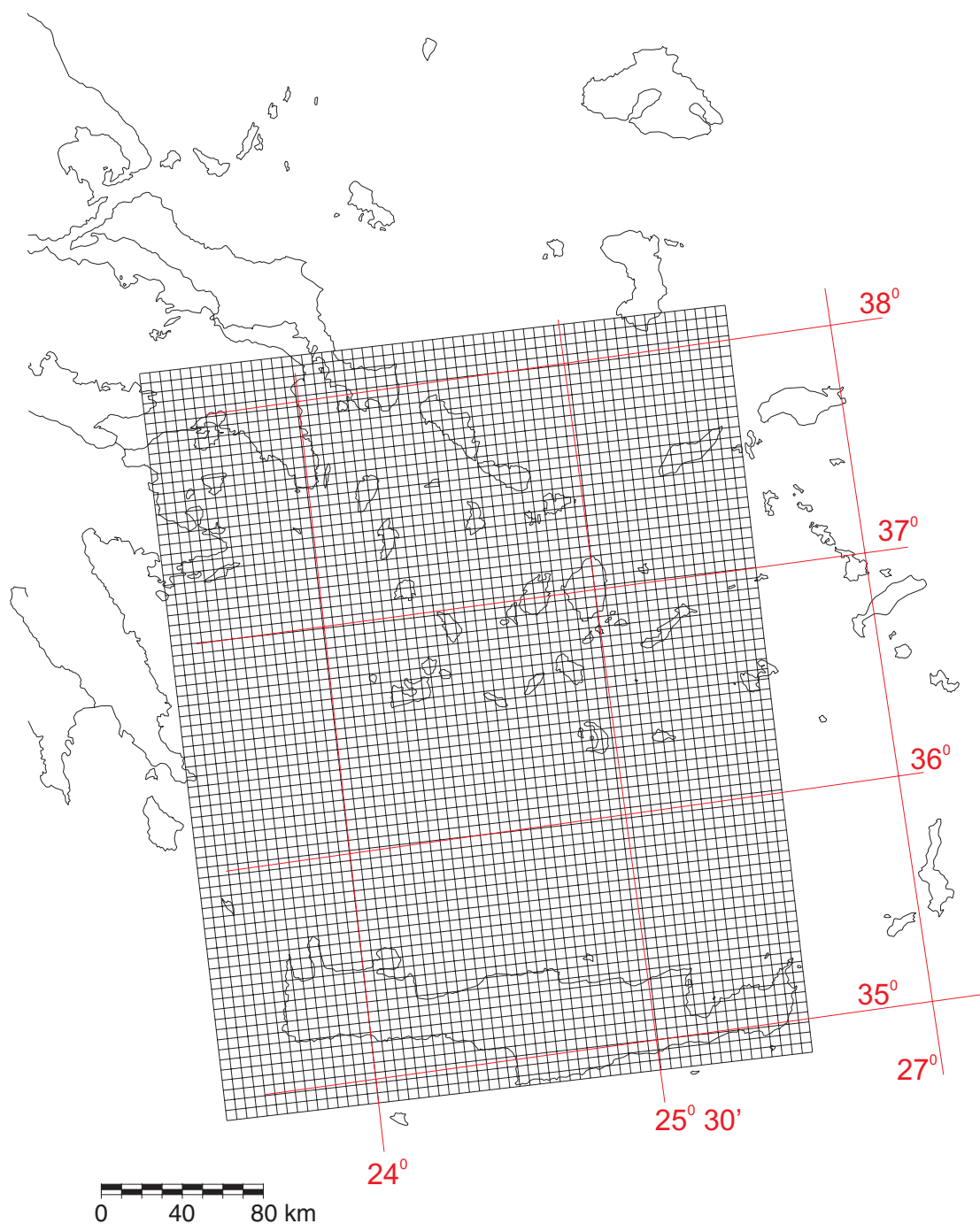
6.2 Εξισώσεις διασποράς ρύπων σε συστήματα Euler και Lagrange

Όπως έχουμε αναφέρει σε προηγούμενες ενότητες, η μοντελοποίηση των ατμοσφαιρικών διεργασιών γίνεται γενικά σε δύο συστήματα συντεταγμένων, στα συστήματα συντεταγμένων του Euler και του Lagrange. Επίσης η περιοχή που θα μελετηθεί μπορεί να είναι μηδενικών διαστάσεων (μοντέλο όγκου), μίας διάστασης, δύο και τριών διαστάσεων (Σχήμα 6-3).

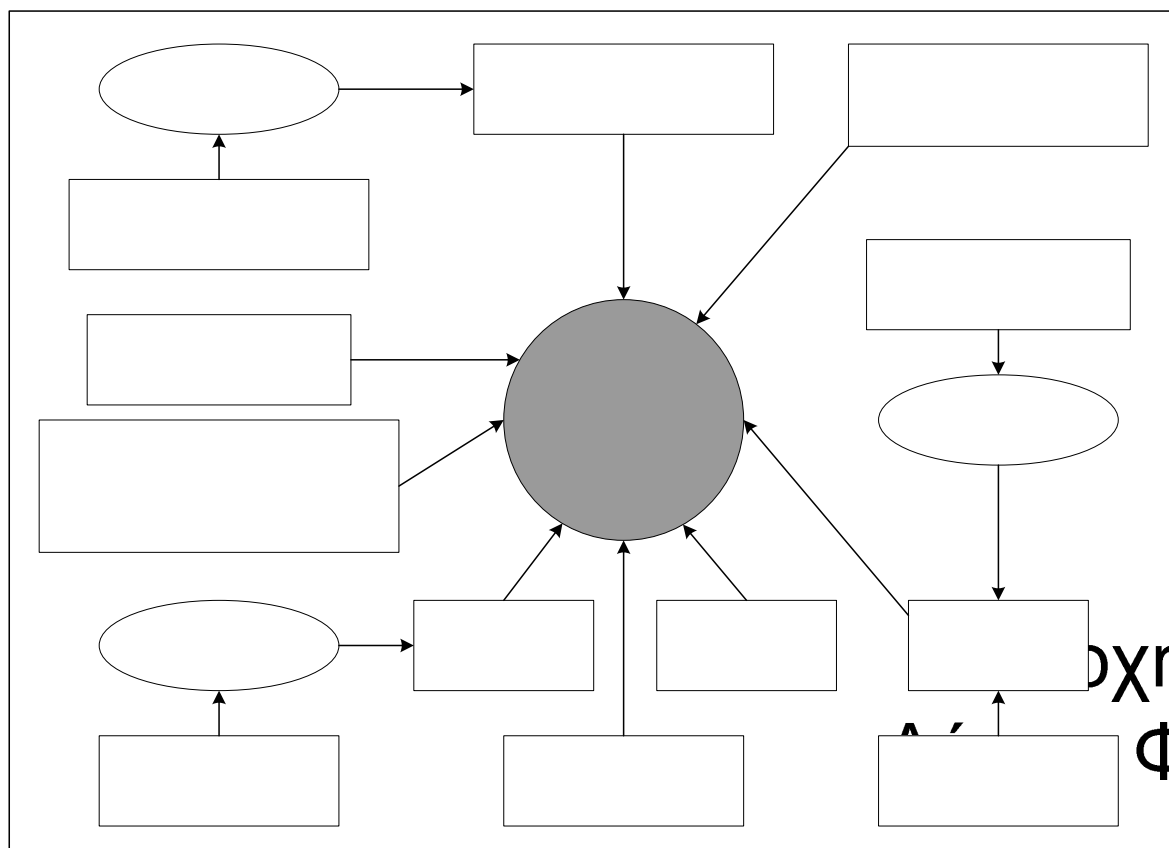


Σχήμα 6-3: Χωρισμός σε πλέγματα (α) μηδενικής διάστασης, (β) μίας διάστασης, (γ) δύο διαστάσεων (δ) τριών διαστάσεων.

Η λύση του προβλήματος της διασποράς των ρύπων με μοντέλα μηδενικών διαστάσεων στο σύστημα του Euler και του Lagrange αναπτύσσεται στη συνέχεια του κεφαλαίου. Επίσης η λύση σε τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων με τις μεθόδους των πεπερασμένων διαφορών αναπτύσσεται στο Παραρτήματα Β του βιβλίου. Στο Σχήμα 6-4 παρουσιάζουμε το χωρισμό της επιφάνειας μιας γεωγραφικής περιοχής με τη μέθοδο των κυψελίδων στο σύστημα συντεταγμένων του Euler.



Σχήμα 6-4: Παράδειγμα χωρισμού σε κυψελίδες μιας περιοχής για προσομοίωση με ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο μέσης κλίμακας.



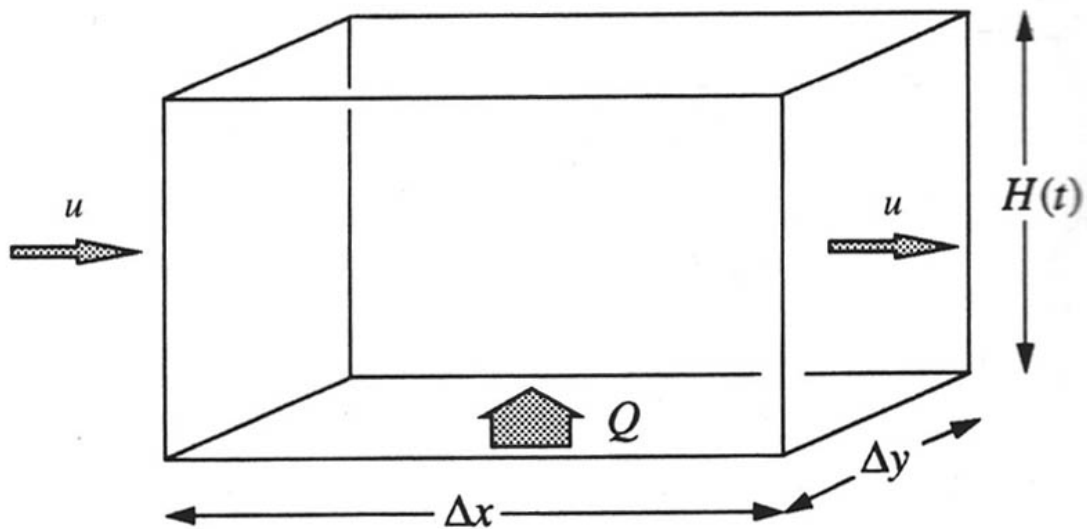
Σχήμα 6-5: Περιγραφή της ατμοσφαιρικής χημείας των αιωρούμενων σωματιδίων (OC: Organic Carbon (Οργανικός Άνθρακας), EC: Elementary Carbon (Στοιχειακός Άνθρακας)).

Ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο περιλαμβάνει εκτός από μοντέλα μεταφοράς και διασποράς λεπτομερή προσομοίωση χημικών αντιδράσεων και δυναμικής των αερίων ρύπων. Στο σχήμα 6-5 περιγράφεται η ατμοσφαιρική χημεία των αιωρούμενων σωματιδίων που περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό χημικών αντιδράσεων και άμεση σύνδεση με το ρυθμό εκπομπών.

Στις επόμενες παραγράφους αναπτύσσουμε την απλούστερη περιγραφή των μοντέλων μιας κυψελίδας στα συστήματα των συντεταγμένων του Euler και του Lagrange.

6.2.1 Μοντέλο Όγκου στο σύστημα συντεταγμένων Euler

Έχουμε έναν όγκο που περιέχει το τμήμα της Ατμόσφαιρας που μεταβάλλεται ύψος $H(t)$ που δηλώνει το ύψος του οριακού στρώματος (Σχήμα 6-6). Στην πραγματικότητα το ύψος αυτό μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του εικοσιτετράωρου και για το λόγο αυτό δηλώνουμε, ότι εξαρτάται άμεσα από το χρόνο. Στον όγκο που έχουμε υπάρχει διατήρηση της μάζας των ρύπων που γράφεται ως εξής για τη συγκέντρωση ρύπου c_i στον όγκο $H \Delta x \Delta y$ (Seinfeld and Pandis, 1999):



Σχήμα 6-6: Μοντέλο Όγκου.

$$\frac{d}{dt}(c_i \Delta x \Delta y H) = Q_i + R_i \Delta x \Delta y H - S_i + u H \Delta y (c_i^o - c_i) \quad (6-1)$$

όπου Q_i είναι ο ρυθμός εκπομπής της μάζας του ρύπου i (Kg h^{-1}), S_i είναι ο ρυθμός απομάκρυνσης του συστατικού i (Kg h^{-1}), R_i είναι ρυθμός παραγωγής ($\text{Kg m}^{-3} \text{h}^{-1}$) λόγω χημικών αντιδράσεων, c_i^o είναι η συγκέντρωση υποβάθρου και u είναι η ταχύτητα του ανέμου που θεωρούμε ότι έχει σταθερή κατεύθυνση. Διάρθρωση της παραπάνω σχέσης με $\Delta x \Delta y$ δίνει:

$$\frac{d}{dt}(c_i H) = q_i + R_i H - s_i + u \frac{H}{\Delta x} (c_i^o - c_i) \quad (6-2)$$

όπου με q_i και s_i συμβολίζουμε τους ρυθμούς εκπομπής και εναπόθεσης ανά μονάδα επιφάνειας ($\text{Kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$). Ο ρυθμός εναπόθεσης μπορεί να εκφραστεί σε σχέση με την ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης των συστατικού i , $v_{d,i}$, και γράφεται ως:

$$s_i = v_{d,i} c_i \quad (6-3)$$

Το αποτέλεσμα είναι η εξίσωση που περιγράφει τη μεταβολή της συγκέντρωσης στην κυψελίδα για σταθερό ύψος του οριακού στρώματος να γραφεί ως :

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{q_i}{H} + R_i - \frac{v_{d,i}}{H} c_i + \frac{u}{\Delta x} (c_i^o - c_i) \quad (6-4)$$

Στη βιβλιογραφία ο λόγος του μήκους της κυψελίδας προς την μέση ταχύτητα του ανέμου κατά την κύρια κατεύθυνση ονομάζεται χρόνος παραμονής τ_r του αερίου ρύπου στην κυψελίδα (residence time) και εκφράζεται ως:

$$\tau_r = \frac{\Delta x}{u} \quad (6-5)$$

Το παραπάνω πρόβλημα γίνεται πιο ενδιαφέρον όταν έχουμε το οριακό στρώμα $H(t)$ να μεταβάλλεται με το χρόνο. Θεωρούμε ότι έχουμε συγκέντρωση c_i^a του ρύπου πάνω από το αρχικό ύψος του οριακού στρώματος H . Υποθέτουμε επίσης ότι μετά χρόνο Δt το ύψος του οριακού στρώματος αυξάνεται από την τιμή H σε $H+\Delta H$, ενώ η συγκέντρωση του ρύπου μεταβάλλεται από c_i σε $c_i+\Delta c_i$. Με βάση τα παραπάνω η διατήρηση της μάζας για το συστατικό i δίνει:

$$(c_i + \Delta c_i)(H + \Delta H) = c_i H + c_i^a \Delta H \quad (6-6)$$

και αφότου παραβλέψουμε τους όρους δεύτερης τάξης έχουμε

$$H \Delta c_i = (c_i^a - c_i) \Delta H \text{ για } \Delta t \rightarrow 0, \quad (6-7)$$

με αποτέλεσμα να προκύπτει ότι: $\frac{dc_i}{dt} = \frac{c_i^a - c_i}{H} \frac{dH}{dt}$

Τελικά η εξίσωση 6-4 στο σύστημα συντεταγμένων του Euler γράφεται ως:

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{q_i}{H(t)} + R_i - \frac{v_{d,i}}{H(t)} c_i + \frac{(c_i^o - c_i)}{\tau_r} \quad \text{για } \frac{dH}{dt} \leq 0 \quad (6-8)$$

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{q_i}{H(t)} + R_i - \frac{v_{d,i}}{H(t)} c_i + \frac{(c_i^o - c_i)}{\tau_r} + \frac{c_i^a - c_i}{H(t)} \frac{dH}{dt} \quad \text{για } \frac{dH}{dt} > 0 \quad (6-9)$$

Μια σημαντική υπόθεση στο σύστημα συντεταγμένων του Lagrange για μία κυψελίδα είναι, ότι δεν υπάρχει μεταφορά κατά την οριζόντια διεύθυνση. Η κυψελίδα στο σύστημα συντεταγμένων του Lagrange συμπεριφέρεται ως σημείο που ακολουθεί την πορεία του ανέμου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι εξισώσεις να έχουν παρόμοια μορφή με τις εξισώσεις στο σύστημα συντεταγμένων του Euler, αλλά χωρίς το τμήμα που περιγράφει τη μεταφορά των ρύπων. Το αποτέλεσμα είναι οι εξισώσεις 6-8 και 6-9 να γράφονται στο σύστημα συντεταγμένων Lagrange ως εξής:

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{q_i}{H(t)} + R_i - \frac{v_{d,i}}{H(t)} c_i \quad \text{για } \frac{dH}{dt} \leq 0 \quad (6-10)$$

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{q_i}{H(t)} + R_i - \frac{v_{d,i}}{H(t)} c_i + \frac{c_i^a - c_i}{H(t)} \frac{dH}{dt} \quad \text{για } \frac{dH}{dt} > 0 \quad (6-11)$$

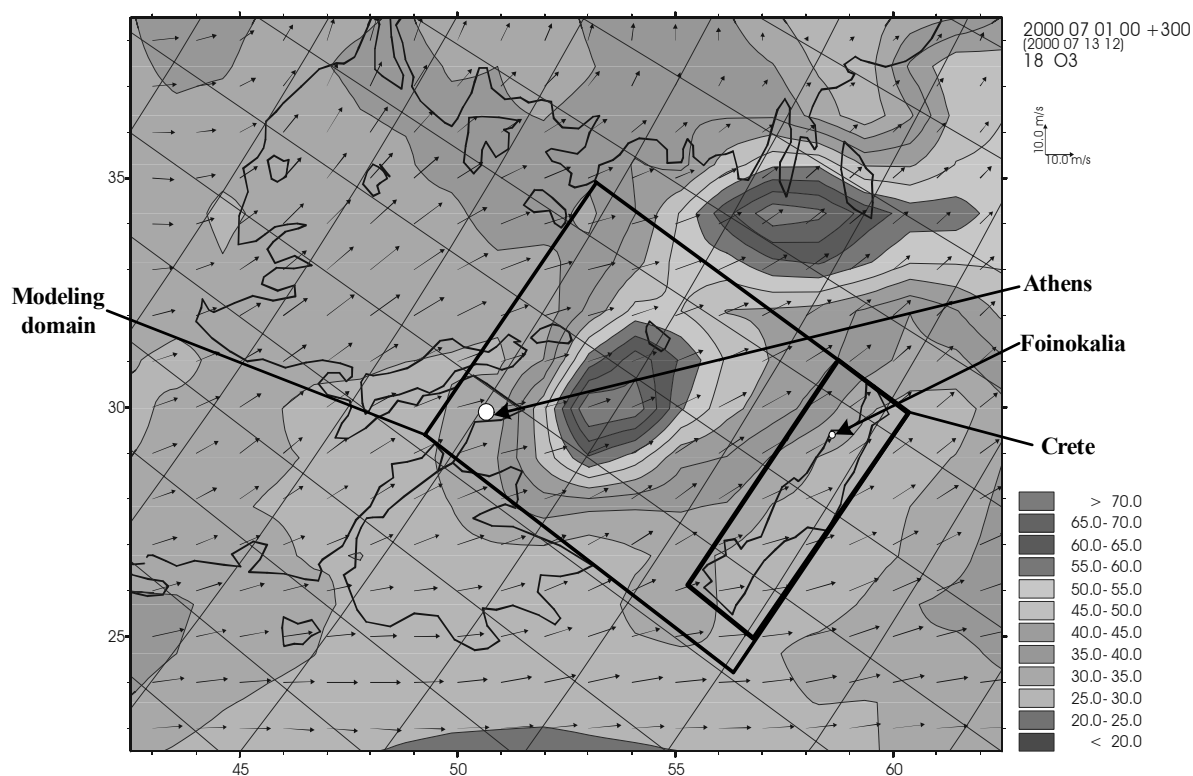
6.2.2. Τρισδιάστατα Μοντέλα Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης

Η γενική μορφή της εξίσωσης διασποράς της συγκέντρωσης ενός ρύπου c_i για ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο χημείας στις τρεις διαστάσεις γράφεται ως:

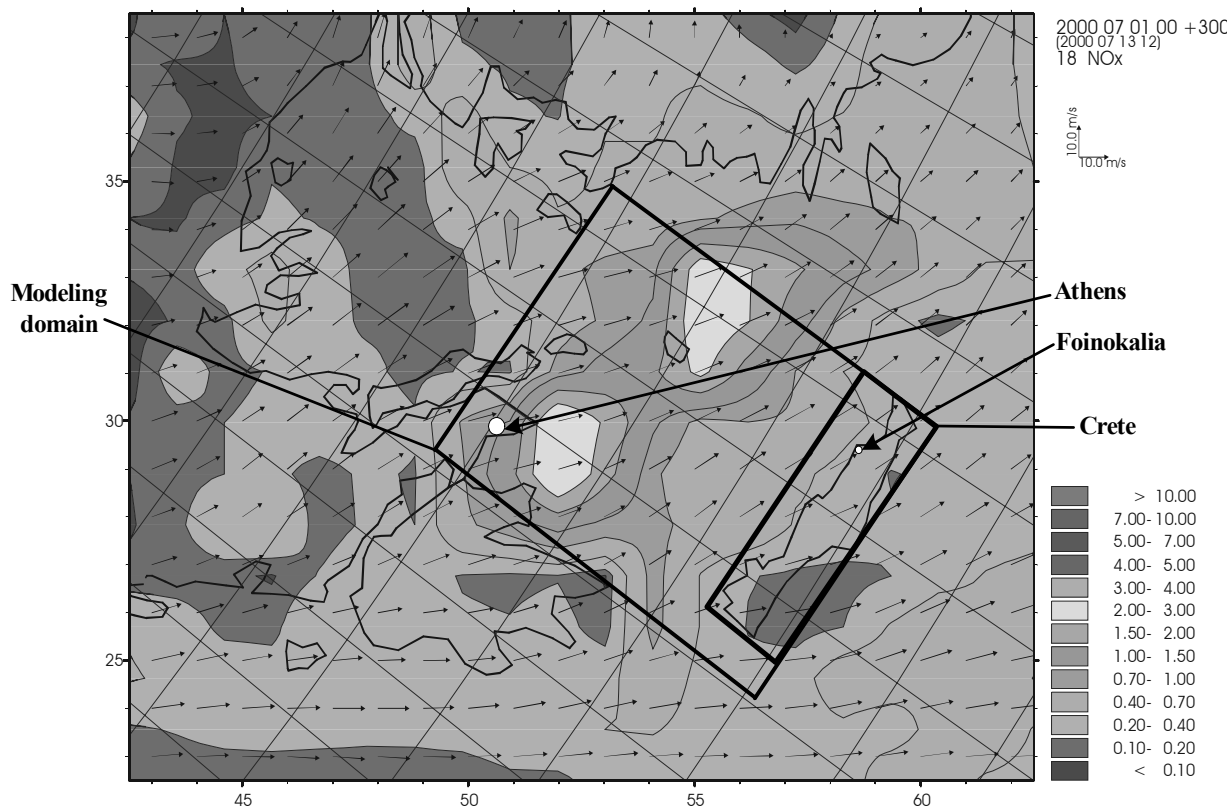
$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + u_x \frac{\partial c_i}{\partial x} + u_y \frac{\partial c_i}{\partial y} + u_z \frac{\partial c_i}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial c_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial c_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial c_i}{\partial z} \right) + R_i(c_1, c_2, \dots, c_n) + E_i(x, y, z, t) - S_i(x, y, z, t)$$

όπου με R_i , E_i και S_i εκφράζουμε τις χημικές αντιδράσεις, εκπομπές και καταβόθρες αντίστοιχα. Η ταχύτητα αναλύθηκε στις τρεις διαστάσεις όπως και οι συντελεστές διάχυσης.

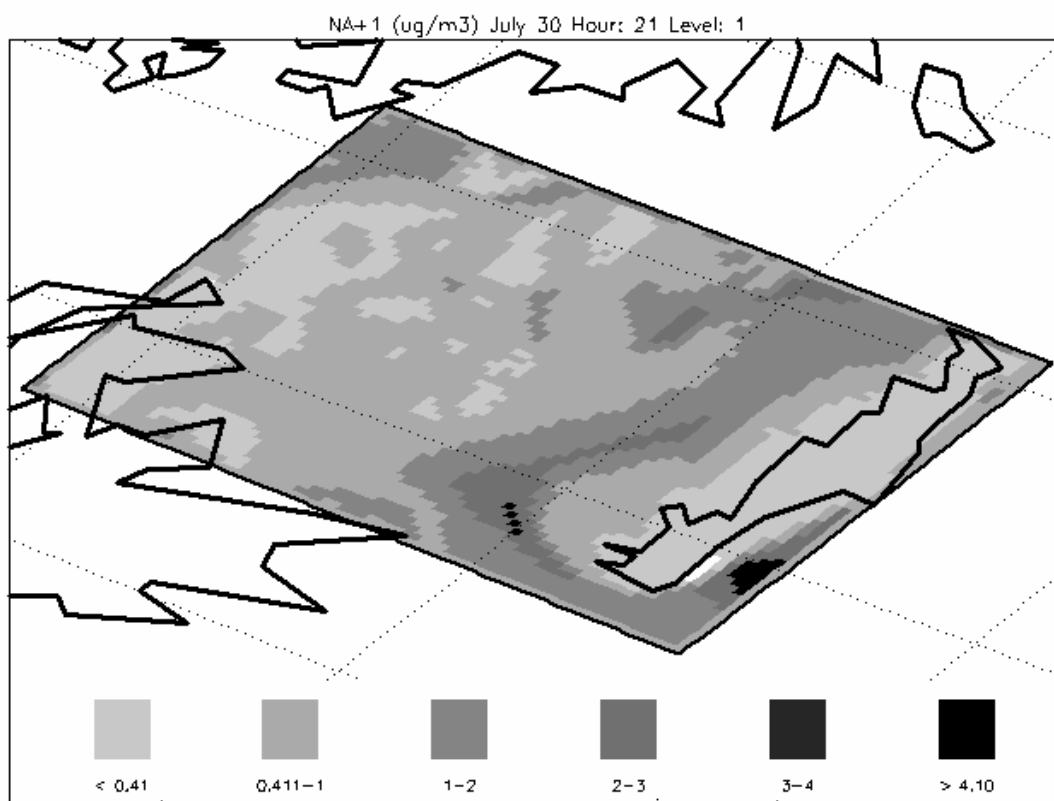
Την παραπάνω εξίσωση τη μελετήσαμε επίσης στο Κεφάλαιο 5. Στα Σχήματα 6-7 μέχρι 6-9 παρουσιάζουμε αποτελέσματα προσομοίωσης της επιφανειακής συγκέντρωσης του όζοντος (O_3), των οξειδίων του αζώτου (NO_x) και του νατρίου (Na) στη σωματιδιακή φάση αντίστοιχα στην νησιωτική περιοχή μεταξύ της ηπειρωτικής Ελλάδος και της Κρήτης κατά τη διάρκεια του Ιουλίου 2000. Φαίνεται καθαρά η αναγκαιότητα της χρησιμοποίησης ενός συστήματος κυψελίδων λόγω της δυναμικής εξέλιξης των χημικών διεργασιών, λόγω των εκπομπών και λόγω της επίδρασης της μετεωρολογίας. Μια λεπτομερής παρουσίαση μερικών εφαρμογών στη διασπορά ρύπων σε Eulerian σύστημα συντεταγμένων με κυψελίδες παρουσιάζεται στη συνέχεια του Κεφαλαίου.



Σχήμα 6-7: Προσομοίωση της συγκέντρωσης του όζοντος στις 1 Ιουλίου 2000 ώρα 18:00 στο επιφανειακό επίπεδο.



Σχήμα 6-8: Προσομοίωση της συγκέντρωσης του NO_x στις 1 Ιουλίου 2000 ώρα 18:00 στο επιφανειακό επίπεδο.



Σχήμα 6-9: Προσομοίωση της συγκέντρωσης του νατρίου στις 30 Ιουλίου 2000 ώρα 21:00 στο επιφανειακό επίπεδο.

6.2.3. Μοντέλα Εσωτερικών χώρων

Ο ρυθμός αύξησης της συγκέντρωσης ενός ρύπου σε όγκο εσωτερικού χώρου ($V \frac{dc}{dt}$) ισούται με τον ρυθμό που ο ρύπος εισέρχεται στον όγκο από το εξωτερικό περιβάλλον ($Q c_a$), σύν τον ρυθμό που οι ρύποι εισάγονται από εσωτερικές πηγές (E), μείον τον ρυθμό που οι ρύποι φεύγουν από τον εσωτερικό όγκο προς το εξωτερικό περιβάλλον ($Q c$) και μείον το ρυθμό με τον οποίο ο ρύπος χάνεται λόγω χημικών αντιδράσεων ($k c V$). Ο συντελεστής του ρυθμού αντιδράσεων συμβολίζεται με k και στον Πίνακα 6-1 δίνονται οι μέσες τιμές των συντελεστών αντιδράσεων για ρύπους που συναντάμε σε εσωτερικούς χώρους.

Υποθέτουμε ότι τα συστατικά μέσα στον όγκο του εσωτερικού χώρου είναι καλά αναμεμιγμένα και γράφουμε την εξίσωση ισορροπίας της μάζας ως συνάρτηση του ρυθμού διείσδυσης από τον εξωτερικό χώρο, τις εσωτερικές πηγές και τις καταβόθρες ως:

$$V \frac{dc}{dt} = Q c_a + E - Q c - k c V \quad (6-12)$$

όπου Q (m^3/s) είναι ο ρυθμός διείσδυσης από τον εξωτερικό χώρο και c_a (g/m^3) είναι η συγκέντρωση των ρύπων στον εξωτερικό χώρο.

Η γενική λύση της εξίσωσης 6-12 εκφράζεται ως:

$$c = \frac{\frac{E}{V} + c_a \frac{Q}{V}}{\frac{Q}{V} + k} \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{Q}{V} + k \right) t \right) \right] + c_o \exp \left[- \left(\frac{Q}{V} + k \right) t \right] \quad (6-13)$$

όπου c_o είναι η αρχική συγκέντρωση του ρύπου στον εσωτερικό χώρο. Η λύση σταθερής κατάστασης της παραπάνω εξίσωσης γράφεται ως εξής:

$$c = \frac{Q c_a + E}{Q + k V} \quad (6-14)$$

Πίνακας 6-1: Συντελεστές μέσων ρυθμών αντιδράσεων για ορισμένους ρύπους.

Ρύποι	k (s^{-1})
CO	0.0
HCHO	1.11×10^{-4}
NO	0.0
NO _x (σαν N)	4.17×10^{-5}
Ραδόνιο	2.11×10^{-6}
SO ₂	6.39×10^{-5}

6.3 Ατμοσφαιρικά Μοντέλα - Εφαρμογές

Ατμοσφαιρικά μοντέλα διασποράς και χημείας έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη μεγάλου αριθμού ατμοσφαιρικών φαινομένων (αστική ρύπανση, βιομηχανικές εκπομπές, τροποσφαιρικό και στρατοσφαιρικό όζον, όξινη βροχή, φυσικό-χημικές μεταβολές σε πλανητικό επίπεδο) για διάφορες χωρικές και χρονικές κλίμακες. Υπάρχει μεγάλος όγκος ερευνών στη βιβλιογραφία (π.χ Seinfeld and Pandis, 1998) αλλά και στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα εξετάσουμε μια συγκεκριμένη εφαρμογή ενός τριδιάστατου Eulerian μοντέλου (Urban Airshed Model-AERO) στον Ελληνικό χώρο.

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε αρχικά τη μεθοδολογία που ακολουθείται στην εφαρμογή ατμοσφαιρικών μοντέλων σε μεσαία κλίμακα σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή. Η εφαρμογή ενός ατμοσφαιρικού μοντέλου περιλαμβάνει μεταξύ άλλων τον ορισμό του πλέγματος, μια λεπτομερή μελέτη των αερίων εκπομπών στην ευρύτερη περιοχή, τον ορισμό των αρχικών και συνοριακών συνθηκών του προβλήματος, την αναλυτική εισαγωγή των μετεωρολογικών δεδομένων (π.χ. διάνυσμα ταχύτητας, τρισδιάστατη κατανομή της ταχύτητας, της σχετικής υγρασίας και της θερμοκρασίας, ύψος οριακού στρώματος, επικάλυψη νεφών), την τοπογραφία περιοχής καθώς και τα δεδομένα για την ηλιακή ακτινοβολία.

Στο πρώτο παράδειγμα θα παρουσιάσουμε την εφαρμογή του Eulerian μοντέλου UAM-AERO στην περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου. Ως δεύτερο παράδειγμα θα εξετάσουμε την εκπομπή και διασπορά αερίων ρύπων από σημειακές πηγές με εφαρμογή στο εργοστάσιο της ΔΕΗ στην Ξυλοκαμάρα του Νομού Χανίων. Στην εφαρμογή αυτή χρησιμοποιούμε ένα Γκαουσιανό μοντέλο για τη διασπορά των ολικών αιωρούμενων σωματιδίων. Τα Γκαουσιανά μοντέλα χρησιμοποιούνται σε περιβαλλοντικές μελέτες και δίνουν προσεγγιστικές λύσεις σε σχέση με τη χρήση των Eulerian μοντέλων με διακριτό πλέγμα όπως παρουσιάζεται στην πρώτη μελετούμενη περίπτωση.

6.3.1 Μελετούμενη Περίπτωση 1: Εφαρμογή του Eulerian μοντέλου UAM-AERO στην περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή θα εξεταστεί η δυναμική ατμοσφαιρικών ρύπων (αερίων και αιωρούμενων σωματιδίων) στη νότιο-ανατολική περιοχή του Αιγαίου. Ρύπανση λόγω φωτοχημικών αερίων και σωματιδίων έχει μελετηθεί διεξοδικά στην Ευρώπη τις τελευταίες δεκαετίες μέσω πολλών εθνικών και διεθνών προσπαθειών (EU, 1996, 1997; Berdowski et al., 1998; EMEP-WHO, 1997).

Επίσης ένας αριθμός μελετών με Eulerian μοντέλα ποιότητας αέρα σε μεσαία και συνοπτική κλίμακα έχει γίνει τα τελευταία χρόνια (Binkowski and Shankar, 1995; Lurmann et al., 1997; Ackermann et al., 1998; Pai et al., 2000). Αλλά υπάρχουν περιορισμένες μελέτες σε μεσαία κλίμακα στη νότια Ευρώπη που εξετάζουν μαζί την ατμοσφαιρική σύσταση/μεταβολή του όζοντος και των σωματιδίων καθώς και άλλων φωτοχημικών ρύπων (Ackermann et al., 1998).

Στο μεγαλύτερο μέρος των πρόσφατων ερευνών οι φωτοχημικοί ρύποι και τα σωματίδια έχουν μελετηθεί ξεχωριστά, παρόλο που είναι γνωστό ότι τα λεπτά σωματίδια άμεσα συνδέονται με τις αέριες συγκεντρώσεις φωτοχημικών αερίων ρύπων (Seinfeld and Pandis, 1998, Pandis et al., 1992). Επομένως αριθμητικές μελέτες μεσαίας κλίμακας και σύγκριση με πειραματικά δεδομένα για το όζον και τα αιωρούμενα σωματίδια στη Μεσόγειο παρέχουν την αναγκαία δομή για τη μελέτη της δυναμικής και αλληλεξάρτησης του όζοντος και των αιωρούμενων σωματιδίων.

Μια λεπτομερής μελέτη της αέριας ρύπανσης πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το UAM-AERO αριθμητικό μοντέλο μεσαίας κλίμακας (Lurmann et al., 1997) που περιλαμβάνει υπορουτίνες για φωτοχημικούς ρύπους και λεπτά σωματίδια. Στο μοντέλο που εφαρμόστηκε χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα από το προγνωστικό μοντέλο RAMS (Pielke et al., 1992). Τα δεδομένα για τις συγκεντρώσεις υποβάθρου από διάφορα χημικά στοιχεία καθώς και οι οριακές συνθήκες υπολογίστηκαν με τη βοήθεια ενός Eulerian μοντέλου (CTM-NILU) (Flatøy et al., 2000). Η περιοχή που εξετάστηκε ήταν στη νότιο-ανατολική πλευρά του Αιγαίου, η οποία περιλάμβανε ένα μικρό μέρος του Ελληνικού νότιο-ανατολικού Ηπειρωτικού χώρου καθώς και το νησί της Κρήτης (Σχήμα 6-10).

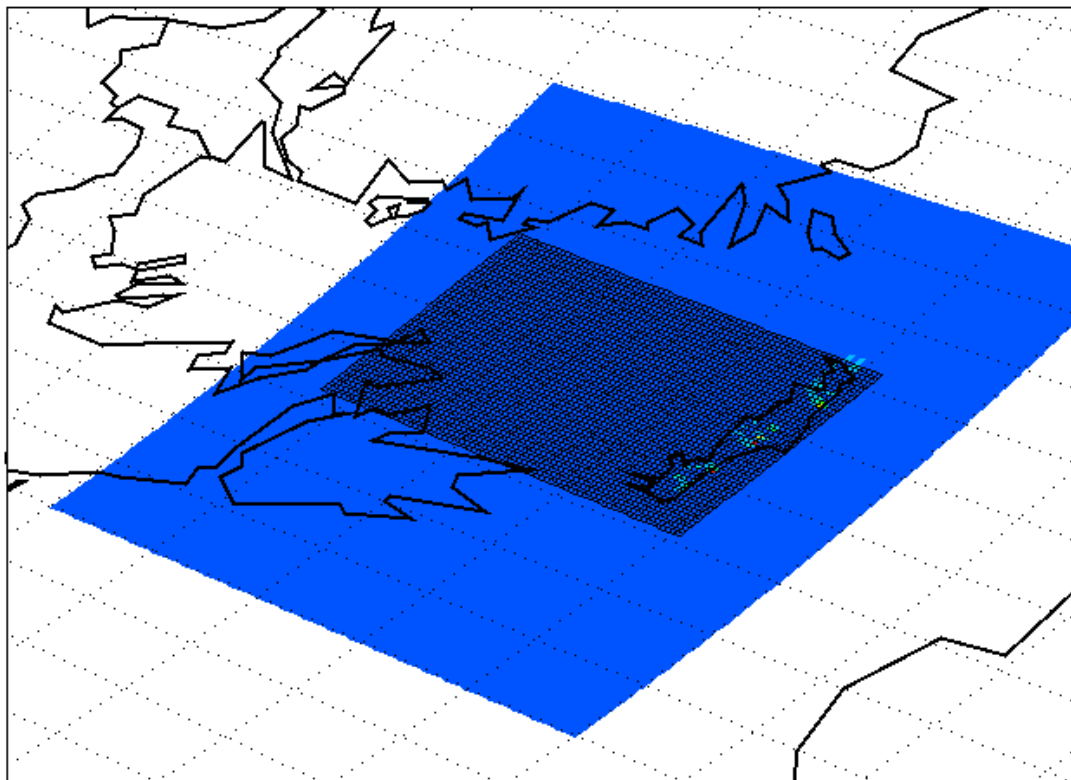
Το σύστημα που περιλαμβάνει το μοντέλο UAM-AERO μαζί με τα μετεωρολογικά δεδομένα εφαρμόστηκε σε δύο διαφορετικές περιόδους. Η πρώτη ήταν από 11 έως 16 Ιουλίου 2000 και η δεύτερη από 25 έως 30 Ιουλίου 2000. Οι εκπομπές βασίστηκαν στα δεδομένα από το EMEP (EMEP-WMO, 1997). Μια πιο λεπτομερής επεξεργασία για βιογενείς εκπομπές, σκόνη από το έδαφος καθώς και εκπομπές χλωρίου και νατρίου από τη θάλασσα πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια καινούργιων μεθοδολογιών, οι οποίες περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 8.

6.3.2 Περίοδος Προσομοίωσης

Δύο χρονικές περίοδοι αναλύθηκαν κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού του 2000, όπως έχει περιγραφεί στη εισαγωγή. Λεπτομερείς εκπομπές σε πλέγμα $5 \times 5 \text{ Km}^2$ υπολογίστηκαν με τη βοήθεια των δεδομένων των εκπομπών που προήλθαν από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό EMEP. Βιογενείς εκπομπές για τερπένια, ισοπρένιο, σκόνη και αλάτι από τη θάλασσα υπολογίστηκαν επίσης σε κυψελίδα $5 \times 5 \text{ Km}^2$, όπως περιγράφεται λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 7.

Ο συνδυασμός των μοντέλων UAM-AERO και RAMS εφαρμόστηκε στη μοντελοποίηση της θερινής περιόδου (Ιούλιος 2000). Πέντε κάθετα επίπεδα χρησιμοποιήθηκαν: δύο κάτω και τρία επάνω από το οριακό στρώμα. Το μοντέλο UAM-AERO επιτρέπει τη χρήση διαφορετικών χημικών μηχανισμών. Ένας από τους μηχανισμούς αυτούς είναι ο δεσμός άνθρακα (CB-IV), όπου οι οργανικές ενώσεις διακρίνονται σύμφωνα με τον τύπο του δεσμού των ατόμων άνθρακα που περιέχουν (C-C). Λαμβάνεται υπόψη ένας αρκετά μεγάλος αριθμός αντιδράσεων, που περιλαμβάνει 47 διαφορετικές ομάδες

χημικών ενώσεων. Η λεπτομερής περιγραφή του μηχανισμού CB-IV δίνεται στο Κεφάλαιο 4.



Σχήμα 6-10: Σύστημα συντεταγμένων για το μοντέλο UAM-AERO που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη.

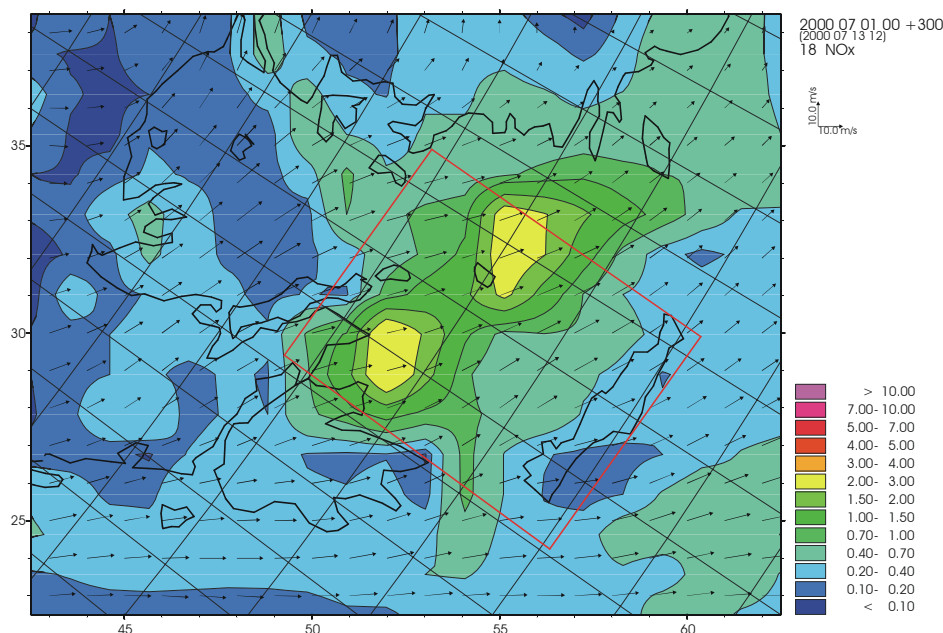
Τα στοιχεία ατμοσφαιρικής ποιότητας εκτός από τα αιωρούμενα σωματίδια (PM_{10}) προήλθαν από τη βάση δεδομένων του EMEP, το μοντέλο CTM-NILU και τους λεπτομερείς κατάλογους απογραφής εκπομπών για τα βιογενή είδη (ισοπρένιο και τερπένια), την επαναιωρημένη σκόνη και το θαλασσινό αλάτι. Ένα παράδειγμα για τις συγκεντρώσεις υποβάθρου των οξειδίων του αζώτου όπως υπολογίζονται από το μοντέλο CTM-NILU παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-11, όπου οι υψηλές συγκεντρώσεις όζοντος υπολογίζονται κατάντη (downwind) της μητροπολιτικής περιοχής της Αθήνας.

Προκειμένου να συμπεριληφθούν οι τιμές υποβάθρου των PM_{10} χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός μετρήσεων και στοιχείων από το EMEP (EMEP/WMO, 1997). Για παράδειγμα η χωρική κατανομή της επαναιωρούμενης σκόνης λόγω της επίδρασης του ανέμου που χρησιμοποιήθηκε δίνεται στο Σχήμα 6-12. Επιπλέον στα δεδομένα ποιότητας αέρα ελήφθησαν υπόψη οι αρχικές τιμές υποβάθρου των αέριων ρύπων. Για τις τιμές στα όρια της περιοχής χρησιμοποιήθηκαν οι ωριαίες τιμές των αέριων ρύπων, που προσδιορίστηκαν και για τα 5 κάθετα στρώματα. Οι ίδιες

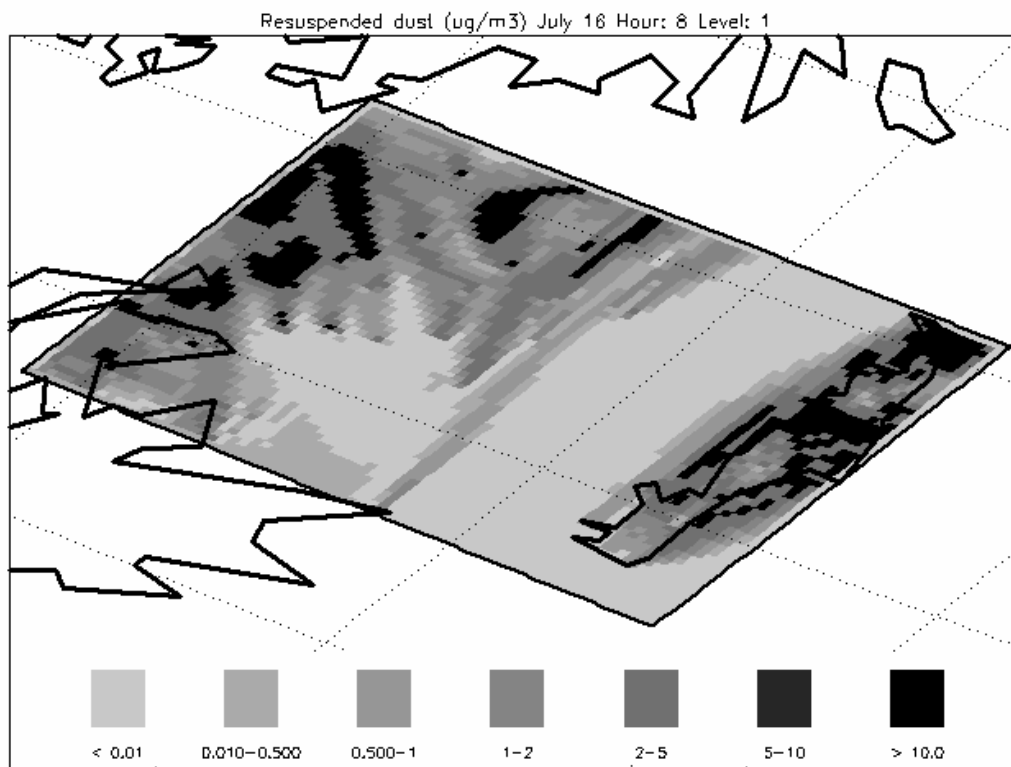
συγκεντρώσεις χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια ολόκληρης της περιόδου μοντελοποίησης.

6.3.3 Εκπομπές

Οι χωρικά διακριτοί ρυθμοί εκπομπής των οξειδίων του αζώτου, του διοξειδίου του θείου, των πτητικών υδρογονανθράκων (NMVOC), του μονοξειδίου του άνθρακα, της αμμωνίας, των PM_{10} καθώς και άλλων χημικών ενώσεων χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισαγωγής στο μοντέλο UAM-AERO σε ωριαία βάση.



Σχήμα 6-11: Αποτελέσματα προσομοίωσης της επιφάνειας συγκέντρωσης οξειδίων του αζώτου σε ένα πλέγμα χρησιμοποιώντας το μοντέλο CTM-NILU.

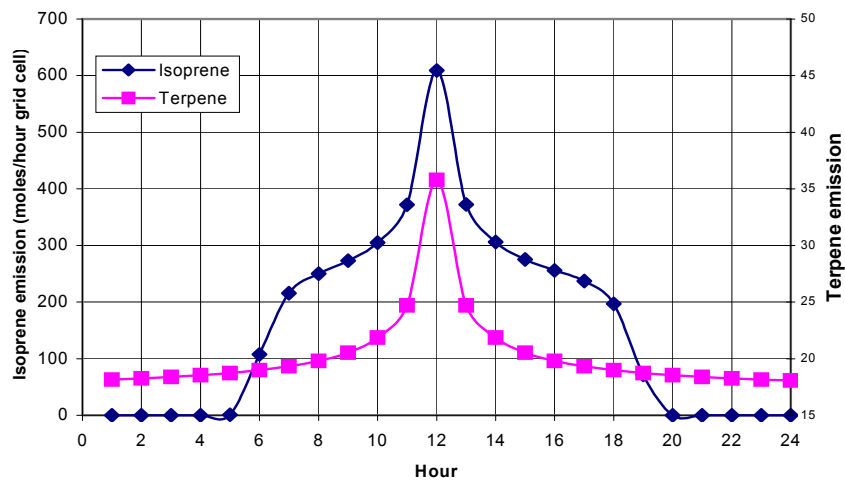


Σχήμα 6-12: Επιφανειακή χωρική κατανομή της επαναιωρούμενης σκόνης την 16^η Ιουλίου στις 08:00π.μ.

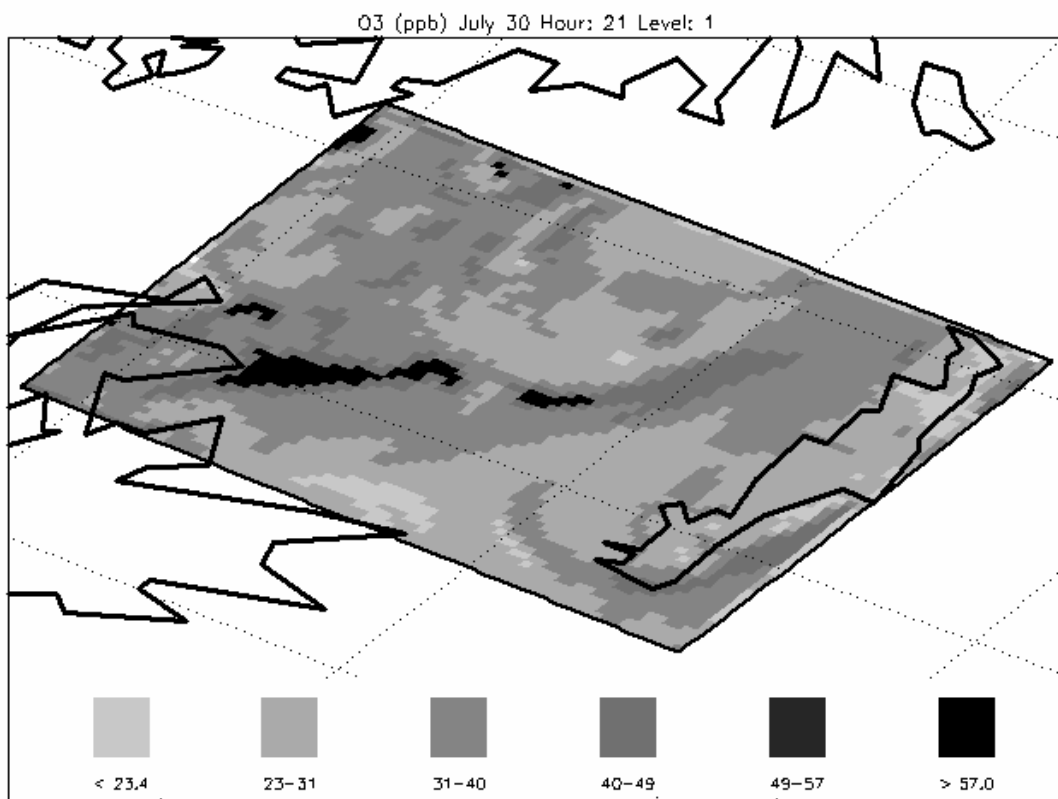
Τα ακόλουθα στοιχεία σχετικά με τα αιωρούμενα σωματίδια και τους πτητικούς οργανικούς υδρογονάνθρακες ελήφθησαν υπόψη κατά την εφαρμογή του μοντέλου.

Γνωρίζουμε ότι τα αιωρούμενα σωματίδια θαλασσινού άλατος διαδραματίζουν έναν σημαντικό ρόλο στην ατμοσφαιρική χημεία και επηρεάζουν σημαντικά τη συγκέντρωση στον αέρα διάφορων ειδών όπως το υδροχλώριο, το θειικό οξύ, και η αμμωνία. Επιπλέον το θαλασσινό αλάτι είναι σημαντικό στο ισοζύγιο ακτινοβολίας. Λεπτομέρειες για τη μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για τον καθορισμό των εκπομπών παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 8.

Επίσης γνωρίζουμε ότι η βιόσφαιρα εκπέμπει στην Ατμόσφαιρα ένα μεγάλο αριθμό πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs), μεταξύ των οποίων το ισοπρένιο και τα μονοτερπένια να κυριαρχούν. Αυτές οι ενώσεις αντιδρούν στην τροπόσφαιρα και διαδραματίζουν ένα σημαντικό ρόλο στην τροποσφαιρική χημεία. Στην παρούσα μελέτη εστιάσαμε κυρίως στις εκπομπές ισοπρενίου και μονοτερπενίου (ή απλώς τερπενίου) στην Ελλάδα (Σχήμα 6-13). Η επιφανειακή κατανομή του όζοντος στην υπό εξέταση περιοχή για την 30^η Ιουλίου 2000 στις 21:00 δίνεται στο Σχήμα 6-14.



Σχήμα 6-13: Εκπομπές ισοπρενίου και τερπενίου (mole ανά ώρα για κάθε κυψελίδα).



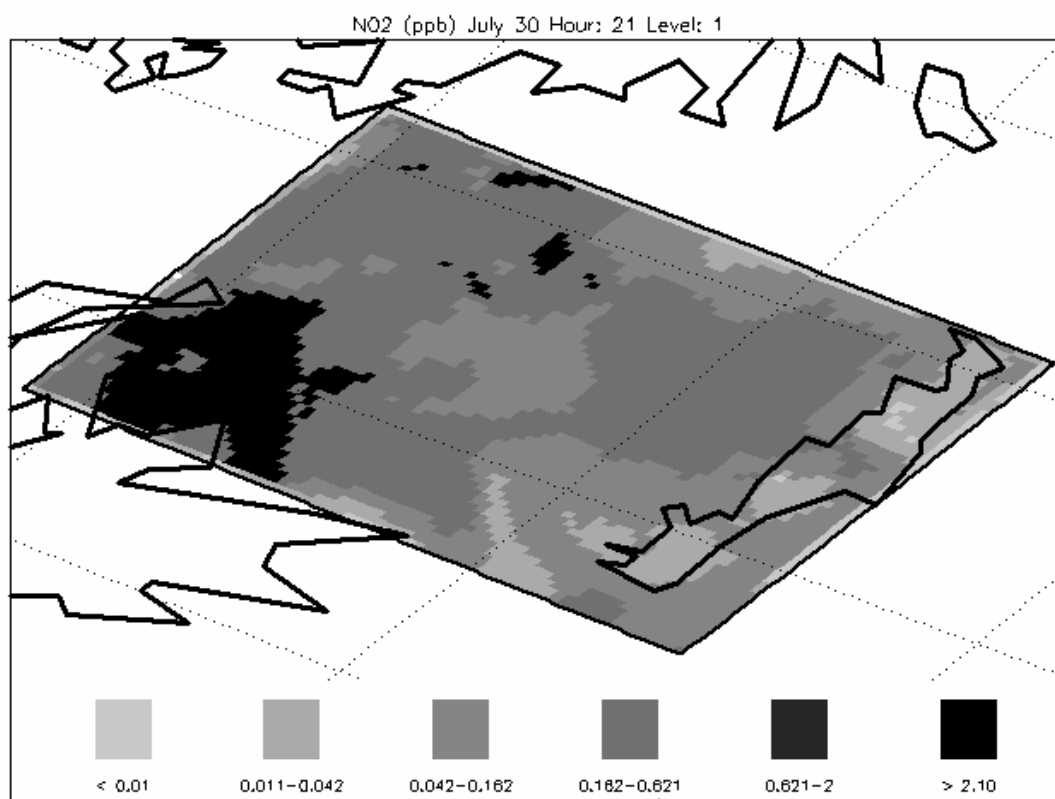
Σχήμα 6-14: Επιφανειακή χωρική κατανομή του όζοντος την 30^η Ιουλίου στις 21:00.

6.3.4 Εφαρμογή του Μοντέλου – Αποτελέσματα

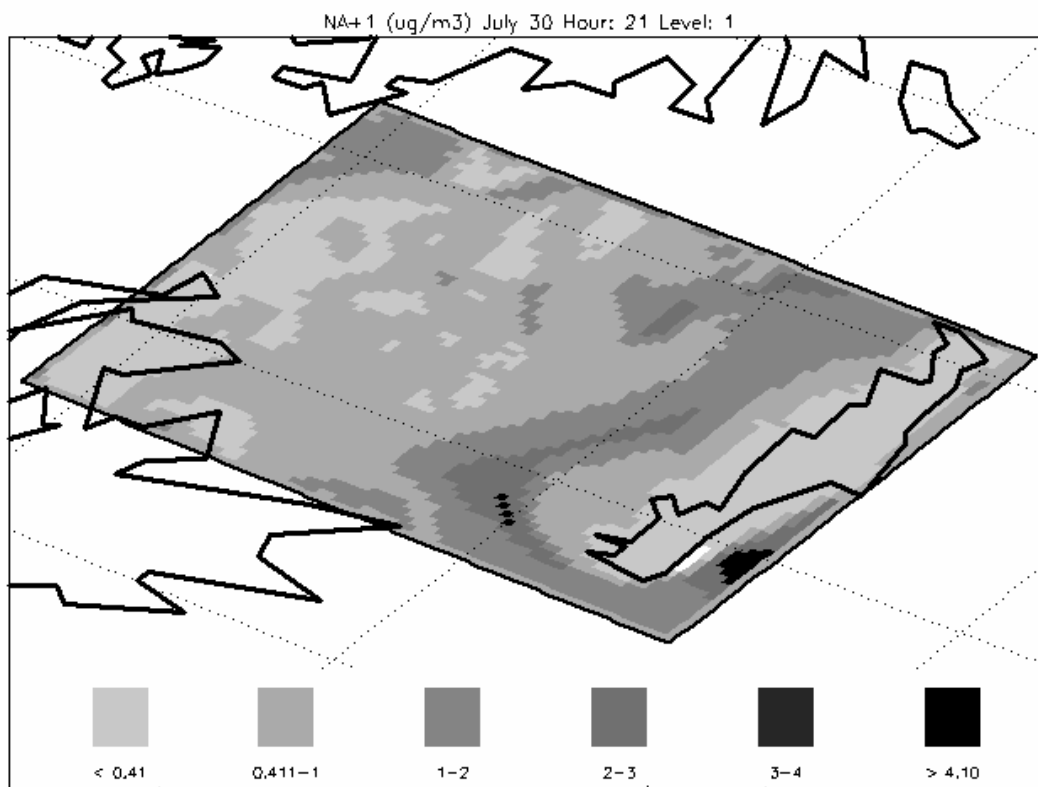
Στην εφαρμογή ενός τρισδιάστατου Eulerian μοντέλου μεγάλη προσπάθεια χρειάζεται για την προετοιμασία των αρχείων εισαγωγής δεδομένων του μοντέλου. Οι ωριαίοι σχηματισμοί διάφορων χημικών ενώσεων ελέγχονται αρχικά αναφορικά με τις μετρήσεις για να εξακριβωθεί εάν τα αποτελέσματα

του μοντέλου είναι λογικά. Τα χωρικά πρότυπα της εκτιμώμενης μέσης ωριαίας συγκέντρωσης του όζοντος, του διοξειδίου του αζώτου, των ιόντων νατρίου και των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} την 30^η Ιουλίου του 2000 παρουσιάζονται στα σχήματα που ακολουθούν (Σχήματα 6-14 μέχρι 6-17). Τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις δείχνουν, ότι η συγκέντρωση του όζοντος παρουσιάζει μια ζώνη υψηλών συγκεντρώσεων που εκτείνεται από τη μητροπολιτική περιοχή της Αθήνας έως τη μέση του Αιγαίου πελάγους και μια στενή περιοχή χαμηλών συγκεντρώσεων στο δυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης και πάνω από την Κρήτη.

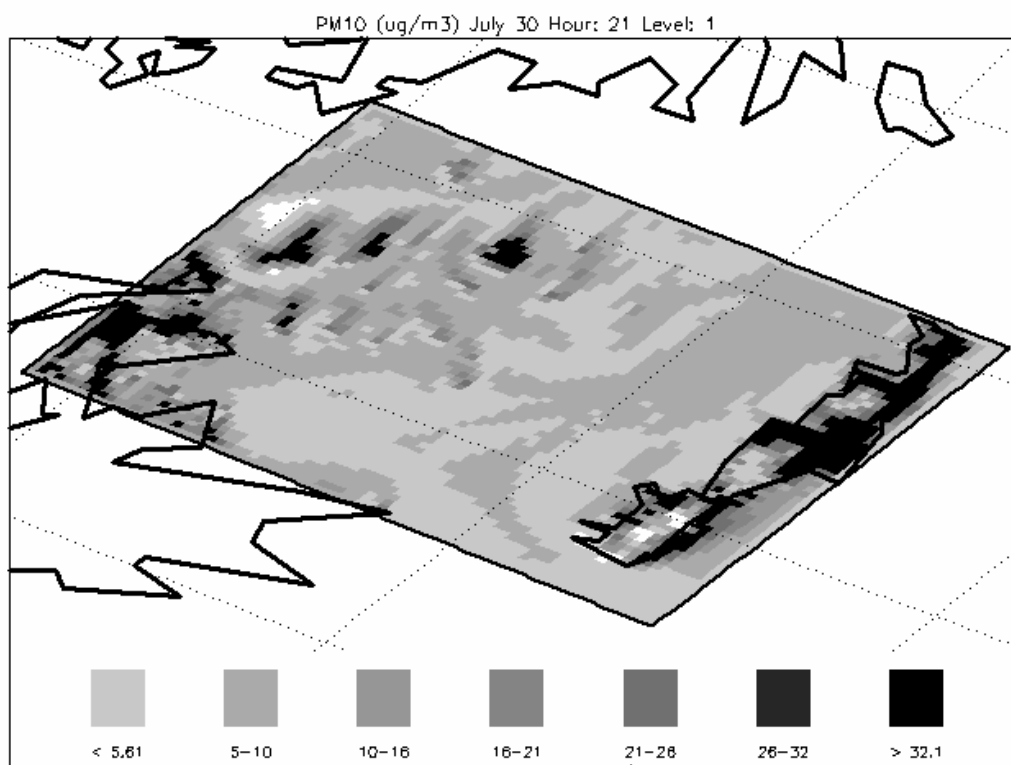
Οι συγκεντρώσεις διοξειδίου του αζώτου είναι επίσης υψηλές πλησίον των Αθηνών με τις υψηλότερες τιμές να παρουσιάζονται στο βόρειο τμήμα της μελετούμενης περιοχής. Οι συγκεντρώσεις ιόντων νατρίου είναι υψηλότερες στις περιοχές με μεγαλύτερη ταχύτητα αέρα στη μέση της μελετούμενης περιοχής και στα νότια της Κρήτης. Η συνολική κατανομή μάζας αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} ακολουθεί τα πρότυπα κατανομής του όζοντος κοντά στην Αθήνα, αλλά η χωρική κατανομή τους εμπλουτίζεται από την παραγωγή θαλάσσιου άλατος και από την περιφερειακή συμβολή (π.χ. σκόνη Σαχάρας).



Σχήμα 6-15: Επιφανειακή χωρική κατανομή του διοξειδίου του αζώτου την 30^η Ιουλίου στις 21:00.



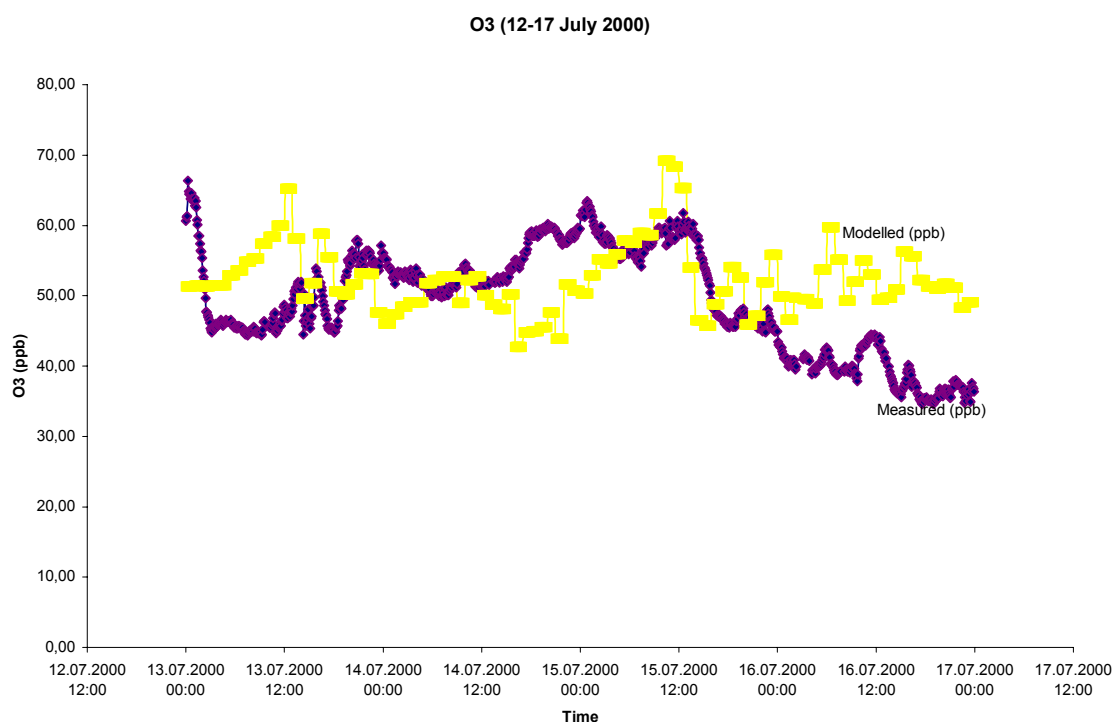
Σχήμα 6-16: Επιφανειακή χωρική κατανομή των ιόντων νατρίου την 30^η Ιουλίου στις 21:00.



Σχήμα 6-17: Επιφανειακή χωρική κατανομή αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ την 30^η Ιουλίου στις 21:00.

Σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των μετρήσεων του όζοντος την περίοδο από 12 έως 17 Ιουλίου 2000 δίνεται στο Σχήμα 6-18. Οι μετρήσεις έγιναν στο βόρειο μέρος του νησιού της Κρήτης, στο σταθμό Φοινοκαλιά (35° 19'N, 25° 40'Ε) (Mihalopoulos κ. α., 1997).

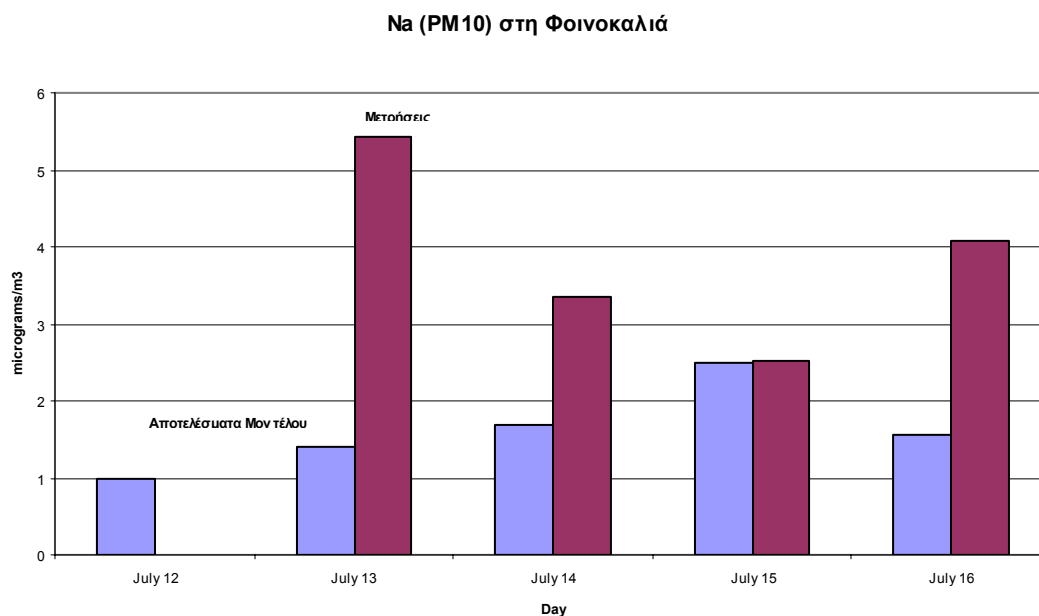
Η σύγκριση κρίθηκε ικανοποιητική λόγω του ότι η μεταβολή των αποτελεσμάτων του μοντέλου παρουσιάζει τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτήν των μετρήσεων. Επίσης η ημερήσια μεταβολή των μετρούμενων συγκεντρώσεων βρέθηκε να συμφωνεί ποιοτικά με τα θεωρητικά αποτελέσματα και με τα αποτελέσματα των μετρήσεων (Bardouki κ. α., 2003).



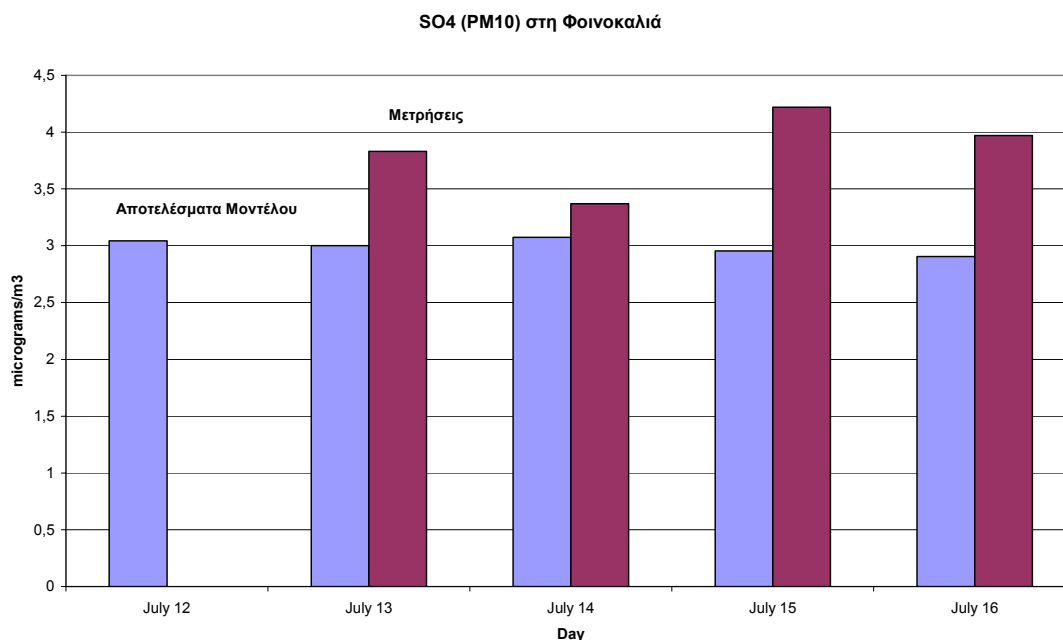
Σχήμα 6-18: Σύγκριση της συγκέντρωσης του όζοντος μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των μετρήσεων στο σταθμό Φοινοκαλιάς στην Κρήτη κατά την περίοδο 12-17 Ιουλίου 2000.

Στα Σχήματα 6-19 έως και 6-21 παρουσιάζονται οι συγκρίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των μετρήσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀. Τα αποτελέσματα του μοντέλου έδειξαν χαμηλότερες τιμές από ότι τα δεδομένα των μετρήσεων των αιωρούμενων σωματιδίων. Μεγάλη αβεβαιότητα παραμένει στους καταλόγους καταγραφής εκπομπών όσον αφορά στο μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων, καθώς επίσης και όσον αφορά τα λεπτομερή δεδομένα των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀. Τα αποτελέσματα του μοντέλου συμφωνούν με τις μετρήσεις όσον αφορά τα θειικά άλατα. Οι συγκεντρώσεις των νιτρικών αλάτων και του νατρίου που υπολογίστηκαν από το μοντέλο είναι έως και 50% χαμηλότερες από αυτές που μετρήθηκαν. Γενικά υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των πειραματικών στοιχείων για εκείνα τα συστατικά, για τα οποία δεν υπάρχουν αξιόπιστα στοιχεία απογραφής εκπομπών. Για την επαναιωρούμενη σκόνη τα αποτελέσματα του μοντέλου

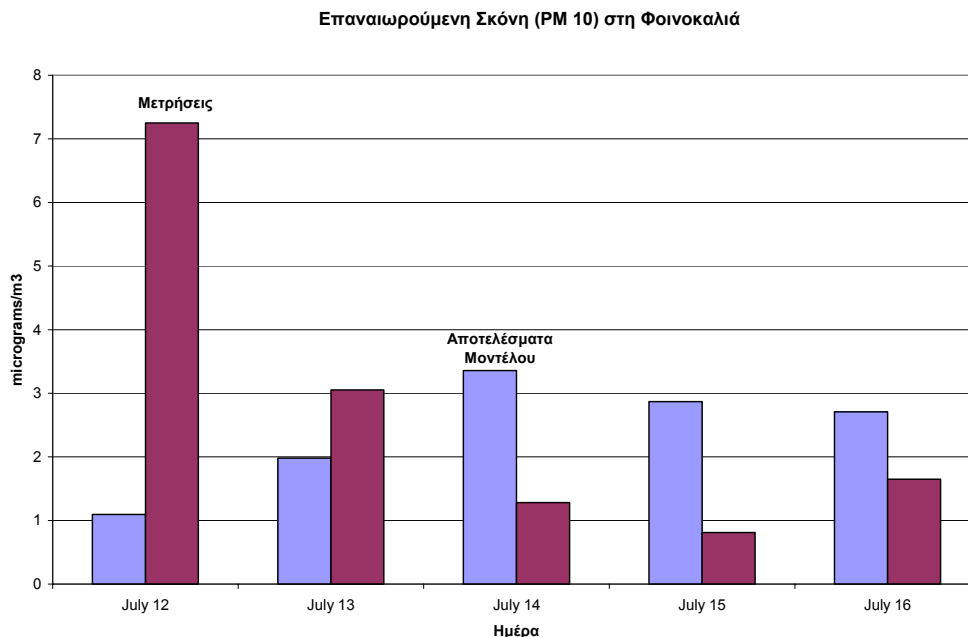
υπερεκτιμούν τα πειραματικά δεδομένα αλλά στις 12 και 13 Ιουλίου υπάρχει υποεκτίμηση τους. Αυτό συμβαίνει λόγω της ύπαρξης επεισοδίου σκόνης από τη Σαχάρα τις ημέρες αυτές και το μοντέλο δεν περιλαμβάνει εκπομπές από σκόνης από τη Σαχάρα.



Σχήμα 6-19: Σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των μετρήσεων του σταθμού Φοινοκαλιάς στην Κρήτη όσον αφορά στη συγκέντρωση ιόντων νατρίου.



Σχήμα 6-20: Σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των μετρήσεων του σταθμού Φοινοκαλιάς στην Κρήτη όσον αφορά στη συγκέντρωση θειικών ιόντων.



Σχήμα 6-21: Σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των μετρήσεων του σταθμού Φοινοκαλιάς στην Κρήτη όσον αφορά στη συγκέντρωση επαναιωρούμενης σκόνης απο το έδαφος.

Από τα αποτελέσματα φαίνεται, ότι το ατμοσφαιρικό μοντέλο UAM-AERO διαμορφώνει μια αποδοτική πλατφόρμα για την προσομοίωση της μεταφοράς και της δυναμικής των αιωρούμενων σωματιδίων και των φωτοχημικών οξειδωτικών. Ιδιαίτερη προσπάθεια καταβλήθηκε για τον προσδιορισμό των καταλόγων απογραφής εκπομπών και των συγκεντρώσεων υποβάθρου αμφοτέρων τόσο των αέριων όσο και των σωματιδιακών ρύπων. Επιπλέον διάφορες μετατροπές εισήχθησαν στο μοντέλο UAM-AERO συμπεριλαμβανομένων και των νέων ενοτήτων για την παραγωγή αλατιού, τερπενίου και ισοπρενίου καθώς και της επαναιωρούμενης σκόνης απο το έδαφος.

Οι μελέτες με το μοντέλο UAM-AERO αποκαλύπτουν τη σπουδαιότητα της δυναμικής των φωτοχημικών οξειδωτικών και των λεπτών αιωρούμενων σωματιδίων στην περιοχή της Μεσογείου. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των μετρήσεων είναι ικανοποιητική, αν και παρατηρήθηκε αδυναμία εκτίμησης των συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ κατά τη θερινή περίοδο. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης δείχνουν, ότι το πλούσιο από την Αθήνα και από άλλες αστικές περιοχές, καθώς επίσης και η μακροχρόνια μεταφορά του συνεισφέρουν στη συνολική μάζα αιωρούμενων σωματιδίων στο μεγαλύτερο τμήμα της ανατολικής Μεσογείου.

Οι αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των μετρήσεων για τα αιωρούμενα σωματίδια οφείλονται κυρίως στις εκπομπές επαναιωρούμενης εδαφικής σκόνης και σκόνης από τη Σαχάρα. Οι τιμές των μετρήσεων δείχνουν, ότι η επαναιώρηση από το έδαφος είναι ένας σημαντικός παράγοντας καθορισμού της κατανομής μεγέθους αερολύματος κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Αυτό το γεγονός, μαζί με την ιδιαίτερη

υποεκτίμηση της επαναιωρούμενης σκόνης από το μοντέλο, καταδεικνύει την ανάγκη για το χημικό προσδιορισμό των αιωρούμενων σωματιδίων, καθώς επίσης και τον καλύτερο προσδιορισμό της επίδρασης της σκόνης της Σαχάρας, των πυρκαγιών των δασών και των εκπομπών επαναιωρούμενης σκόνης στη νότια Ευρώπη.

6.3.5 Μελετούμενη Περίπτωση 2 – Σταθμός Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας Ξυλοκαμάρας Νομού Χανίων – Υφιστάμενη κατάσταση

Στόχος της παρουσιαζόμενης μελέτης ήταν η εκτίμηση των ατμοσφαιρικών εκπομπών της Μονάδας Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας της Ξυλοκαμάρας Χανίων κατά το έτος 1999 (Δαλιακόπουλος κα., 2003). Η εκτίμηση των εκπνευόμενων φορτίων εστιάστηκε στο σωματιδιακό φορτίο των ολικών αιωρούμενων σωματιδίων (TSP). Σε αυτή τη μελέτη εκτιμήθηκαν οι επιπτώσεις της ρύπανσης με ένα μοντέλο γκαουσσιανής διασποράς.

Τα δεδομένα που ελήφθησαν για την παρούσα μελέτη προέρχονται από την «Ετήσια Έκθεση Ποιότητας Περιβάλλοντος για το έτος 1999», η οποία συντάχθηκε από την ΔΕΗ. Ο Σταθμός Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας του Νομού Χανίων έχει σύμφωνα με την Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων που συνέταξε η ΔΕΗ τον Ιούλιο του έτους 1995 συνολική ονομαστική ισχύ δηλαδή των υφιστάμενων και των νέων μονάδων 327 Mwe (1003 MWth) και βρίσκεται στη θέση Ξυλοκαμάρα της Κοινότητας Νεροκούρου του Νομού Χανίων Κρήτης. Η συνολική έκταση του Σταθμού είναι 76 στρέμματα και απέχει 3,5 χιλιόμετρα από το κέντρο της πόλης των Χανίων και από το λιμάνι της Σούδας (Σχήμα 6-22).



Σχήμα 6-22: Χάρτης του Νομού Χανίων στον οποίο φαίνεται η τοποθεσία Νεροκούρου και σε σχετική κλίμακα η απόστασή της από την πόλη των Χανίων.

Ο Σταθμός συνολικά αποτελείται από:

(α) Τους τρεις υφιστάμενους παλιούς Αεριοστροβίλους (Α/Σ) κατά το έτος 1999.

Η ισχύς που αποδίδεται λόγω της παλαιάς τους τεχνολογίας και της φθοράς είναι 51 MWe κατά τους θερινούς μήνες και 61 MWe κατά τους χειμερινούς. Η συνολική θερμική ισχύς των παραπάνω Α/Σ, που έχουν βαθμό απόδοσης 22%, είναι 346 MWth.

(β) Τη Μονάδα Συνδυασμένου Κύκλου

Αποτελείται από δύο Α/Σ (αριθμό 6 και 7) ισχύος 44,3 MWe (συνθήκες ISO) έκαστος και έναν Ατμοστρόβιλο ισχύος 43,7 MWe που λειτουργεί με τον ατμό που παράγεται από τους δύο λέβητες ανάκτησης της θερμότητας των παραγόμενων καυσαερίων από τους Α/Σ. Η συνολική παραγόμενη ισχύς από την εν λόγω μονάδα είναι 132,3 Mwe που ισοδυναμούν με 297,5 MWth για συνολικό βαθμό απόδοσης 44,47%.

6.3.6. Περιγραφή του μοντέλου

Στο σημείο αυτό θα γίνει μια περιληπτική παρουσίαση της χρήσης του μοντέλου γκαουσιανής διασποράς που θα χρησιμοποιηθεί. Η γκαουσιανή εξίσωση πλουμίου υπολογίζει τις συγκεντρώσεις αερίων κατάντη της διεύθυνσης του ανέμου, όταν αυτά εκπέμπονται αδιάλειπτα από κάποια σημειακή πηγή. Το Γκαουσιανό πρόγραμμα υπολογίζει τις βραχυχρόνιες συγκεντρώσεις $C(x,y,z)$ κατάντη της διεύθυνσης του ανέμου, στο επίπεδο της επιφάνειας του εδάφους ή για συγκεκριμένους σημειακούς αποδέκτες σε διάφορες αποστάσεις και για επιλεγμένες μετεωρολογικές συνθήκες. Η βραχυχρόνια επίδραση υπολογίζεται ως εξής (NILU, 1987):

$$C(x,y,z) = \frac{Qe^{-\lambda t}}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-H}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z+H}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \sum_{N=1}^3 \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-H-2nL}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z+H-2nL}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-H+2nL}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z+H+2nL}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \right\} \quad (6-15)$$

όπου σ_y , σ_z οι συντελεστές διασποράς στις διευθύνσεις y , z αντίστοιχα, λ ο συντελεστής υγρής εναπόθεσης, t ο χρόνος, H το ενεργό ύψος, Q ο ρυθμός εκπομπής των αερίων ρύπων, u η μέση ταχύτητα του ανέμου, L το μήκος ανάμιξης και n ο αριθμός των ανακλάσεων ($N=3$) του πλουμίου από το έδαφος.

Είναι γνωστό, ότι η συμμεταφορά του ρύπου κατά τη διεύθυνση της μεταφοράς είναι μεγαλύτερη από τη διάχυση. Υποθέσαμε ότι επικρατούν σταθερές συνθήκες, που σημαίνει ότι όλες οι μεταβλητές και οι παράμετροι είναι σταθεροί με το χρόνο. Λόγω της υπόθεσης που θεωρεί την επίδραση της τύρβης αμελητέα, το γκαουσιανό μοντέλο θα πρέπει να χρησιμοποιείται για μεταφορικές ταχύτητες μεγαλύτερες του 1 m/s. Η χρήση μιας σταθερής μέσης ταχύτητας μεταφοράς και μιας σταθερής διεύθυνσης ανέμου κατά τον αρχικό

χρόνο του μοντέλου υποδηλώνει την υπόθεση ενός στατικού και ομογενούς οριζόντιου πεδίου ανέμων (NILU, 1987).

Το πρόγραμμα λαμβάνει υπόψη την επίδραση του φαινομένου της υγρής εναπόθεσης (downwash) στην καμινάδα, την ύπαρξη κτιρίων, το προφίλ της ταχύτητας του ανέμου, την απόθεση, την τοπογραφία της περιοχής και τη διείσδυση του ρύπου μέσα ένα σταθερό αέριο στρώμα (NILU, 1987).

Τα δεδομένα εισαγωγής που χρησιμοποιούνται είναι τα εξής:

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΜΟΝΑΔΑ	ΕΡΜΗΝΕΙΑ
NV		Αριθμός κλάσεων ανέμου
ZO	m	Ύψος μετεωρολογικών παρατηρήσεων
INT		Μέση συγκέντρωση κυκλικού τομέα
WET	pr.sec	Συντελεστής απομάκρυνσης λόγω βροχόπτωσης
H MIX	m	Ύψος ανάμιξης
RN		Εκθετικό του προφίλ του ανέμου
CZ,PZ		Συντελεστής Διάχυσης (κατακόρυφα)
CY, PY		Συντελεστής Διάχυσης (οριζόντια)
VM	m/sec	Μέση ταχύτητα ανέμου
X	m	Αποστάσεις κατάντη της διεύθυνσης του ανέμου
IH		Επιλογές ανύψωσης πλουμίου
Q	g/sec	Ισχύς (παροχή) της πηγής
HS	m	Ύψος καμινάδας
TG	K	Θερμοκρασία των απαερίων στην καμινάδα
TA	K	Θερμοκρασία περιβάλλοντος
W	m/sec	Ταχύτητα απαερίων στην καμινάδα
D	m	Διάμετρος καμινάδας
HT	m	Υψόμετρο της πηγής
BH	m	Ύψος κτιρίου
BB	m	Πλάτος κτιρίου

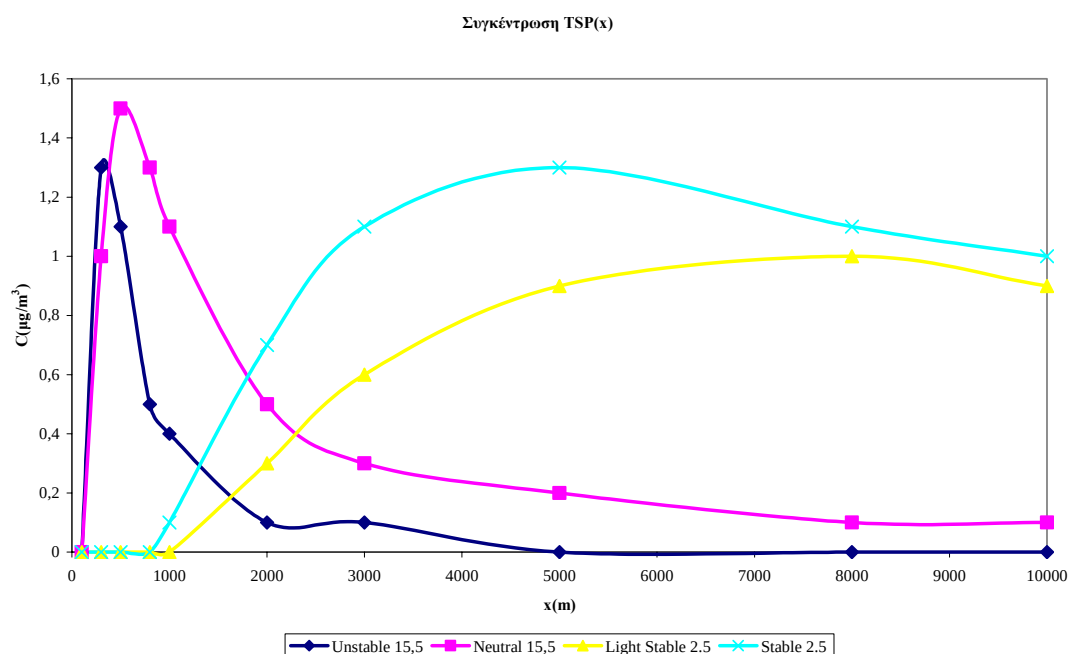
Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα εργασία ελήφθησαν από το μετεωρολογικό σταθμό του Πεδίου Βολής Κρήτης και αφορούν τα ετήσια μετεωρολογικά δεδομένα του Νομού Χανίων. Η κύρια διεύθυνση που μας ενδιέφερε ήταν η νοτιοανατολική και ο άνεμος νοτιοανατολικής κατεύθυνσης με τη μεγαλύτερη ετήσια συχνότητα πνοής να είναι με ταχύτητα 2 Beauford, δηλαδή περίπου 2,2 m/sec.

Πρέπει να τονίσουμε, ότι οι υπολογισμοί για τη διασπορά των ρύπων έγιναν για όλες τις κατευθύνσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-24 και όχι μόνο για τη νοτιοανατολική κατεύθυνση. Η νοτιοανατολική κατεύθυνση όμως είναι σημαντική λόγω της ύπαρξης της αστικής περιοχής των Χανίων στην κατεύθυνση αυτή.

6.3.7 Αποτελέσματα μελέτης

Μετά την εισαγωγή των δεδομένων στο Γκαουσιανό μοντέλο και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων προέκυψαν τα διαγράμματα της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων συναρτήσει της απόστασης από την πηγή που παρουσιάζονται στα Σχήματα 6-23 και 6-24.

Υψηλές συγκεντρώσεις σωματιδιακού φορτίου πλησίον του σταθμού παρουσιάζονται για ουδέτερες και ασταθείς συνθήκες ευστάθειας και υψηλές ταχύτητες ανέμου. Συγκεκριμένα για ουδέτερες συνθήκες και υψηλές ταχύτητες ανέμου παρουσιάζονται σχετικά υψηλές τιμές συγκέντρωσης του σωματιδιακού φορτίου πλησίον του σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζουν μια μέγιστη τιμή $1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ σε απόσταση 500 m, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-23. Συγκριτικά υψηλά επίπεδα συγκεντρώσεων παρουσιάζονται σε απόσταση 4000 – 7000 m από την πηγή σε σταθερές και σχετικά σταθερές συνθήκες και χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Ειδικότερα για σταθερές συνθήκες παρατηρείται σε απόσταση 5000m από τον σταθμό συγκέντρωση σωματιδίων $1,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Επίσης στο Σχήμα 6-24 παρουσιάζονται οι ισοσυγκεντρωτικές καμπύλες πρόβλεψης για τη συγκέντρωση των ολικών αιωρούμενων σωματιδίων για τις ταχύτητες ανέμου με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης.



Σχήμα 6-23: Συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων σωματιδίων συναρτήσει της απόστασης και των συνθηκών ευστάθειας για καθορισμένες ταχύτητες ανέμου (unstable: ασταθής , Neutral: ουδέτερη , Light Stable: ελαφρά ευσταθής , Stable: ευσταθής).



Σχήμα 6-24: Προβλεπόμενη μέση ετήσια συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων σωματιδίων για ταχύτητες ανέμου με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης.

Όπως φαίνεται στα προηγούμενα σχήματα, η πόλη των Χανίων βρίσκεται σε μια περιοχή μέσης συγκέντρωσης ολικών αιωρούμενων σωματιδίων σε ετήσια βάση για τις συχνότερες ταχύτητες όλων των κατευθύνσεων πνοής ανέμου και για σταθερές συνθήκες. Παραταύτα στην περιοχή πνέουν συχνότερα δυτικοί άνεμοι, γεγονός που επιφέρει την απομάκρυνση των ρύπων από τους ευαίσθητους αποδέκτες. Στο σύνολο τους οι εκπομπές αυτές δεν υπερβαίνουν τα ανώτατα επιτρεπτά όρια που έχουν τεθεί από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή Περιβάλλοντος ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ για τις ετήσιες PM_{10} μέσες τιμές των σωματιδίων)

6.4 Στατιστική Μελέτη Ατμοσφαιρικών Μοντέλων

Η αξιολόγηση των ατμοσφαιρικών μοντέλων γίνεται με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με πειραματικές μετρήσεις. Ενώ η στατιστική σύγκριση δε δηλώνει άμεσα το λόγο που τα αποτελέσματα μεταξύ μετρήσεων και μοντέλου δε συμφωνούν, αποτελεί μια ικανότατη μεθοδολογία της αξιολόγησης ενός μοντέλου. Η πιο αποτελεσματική σύγκριση γίνεται με τη ανάλυση σειρών μετρήσεων και μοντέλου στο χώρο και χρόνο.

Για τη στατιστική μελέτη υποθέτουμε ότι έχουμε n σταθμούς μέτρησης που ο καθένας κάνει m μετρήσεις στη διάρκεια που αξιολογούμε το μοντέλο. Συμβολίζουμε επίσης ως $\text{PRED}_{i,j}$ και $\text{OBS}_{i,j}$ αντίστοιχα την προβλεπόμενη από το μοντέλο και την μετρηθείσα συγκέντρωση αντίστοιχα στο σταθμό i το

χρονικό διάστημα j. Ορισμένες χρήσιμες αξιολογήσεις γίνονται βάσει των παρακάτω συγκρίσεων (Seinfeld and Pandis, 1998):

α. Με τη μέση κανονικοποιημένη απόκλιση (Mean Normalized bias, MNB):

$$MNB = \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{PRED_{i,j} - OBS_{i,j}}{OBS_{i,j}} \quad (6-16)$$

β. Με τη μέση απόκλιση (mean bias, MB):

$$MB = \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m PRED_{i,j} - OBS_{i,j} \quad (6-17)$$

γ. Με το μέσο απόλυτο κανονικοποιημένο σφάλμα (mean absolute normalized gross error, MANGE):

$$MANGE = \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{|PRED_{i,j} - OBS_{i,j}|}{OBS_{i,j}} \quad (6-18)$$

δ. Με το μέσο σφάλμα (mean error, ME):

$$ME = \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |PRED_{i,j} - OBS_{i,j}| \quad (6-19)$$

Εκτός από τις παραπάνω συγκρίσεις για την αξιολόγηση ενός μοντέλου μπορούν να γίνουν και διαγνωστικές αναλύσεις βασισμένες σε απλά σενάρια όπως μηδενικές εκπομπές, μηδενική εναπόθεση για να εξεταστεί η ευαισθησία του μοντέλου και η μελέτη ύπαρξης πιθανών αριθμητικών σφαλμάτων.

6.5. Παραδείγματα και Εφαρμογές

Παράδειγμα 1 Χημικά αδρανείς ενώσεις έχουν αρχική συγκέντρωση $c_i(0)$ και εκπέμπονται με ρυθμό $q_i=200 \mu\text{g m}^{-2}\text{h}^{-1}$. Υποθέτοντας ότι η συγκέντρωση υποβάθρου είναι $c_i(0)=1 \mu\text{g m}^{-3}$, υπολογίστε την συγκέντρωση σε σταθερή κατάσταση πάνω από μια πόλη που χαρακτηρίζεται από μέση ταχύτητα ανέμου 3 m s^{-1} . Υποθέστε, ότι η πόλη έχει διαστάσεις $100 \times 100 \text{ Km}^2$ και οριακό στρώμα ύψους 1000 m .

Λόγω του ότι έχουμε χημικά αδρανείς ενώσεις ο όρος που περιγράφει τις χημικές αντιδράσεις είναι ίσος με μηδέν ($R_i=0$). Επίσης υποθέτουμε ότι $\frac{v_{d,i}}{H} c_i \ll \frac{c_i - c_i^o}{\tau_r}$ λόγω του ότι δεν αναφέρεται ότι έχουμε σημαντικές απώλειες λόγω εναπόθεσης.

Επομένως υποθέτουμε ότι η αλλαγή της συγκέντρωσης επηρεάζεται περισσότερο από την μεταφορά (advection) και η εξίσωση διατήρησης της συγκέντρωσης εκφράζεται γενικώς ως:

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{q_i}{H} + R_i - \frac{v_{d,i}}{H} c_i + \frac{u}{\Delta x} (c_i^o - c_i)$$

Επομένως η παραπάνω εξίσωση στη συγκεκριμένη εφαρμογή γράφεται ως:

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{q_i}{H} + \frac{(c_i^o - c_i)}{\tau_r} \quad \text{με } c_i=c_i(0) \text{ } t=0 \text{ που μετά από επαναδιατύπωση}$$

γράφεται ως:

$$\tau_r \frac{dc_i}{dt} + c_i = \left(\frac{q_i \tau_r}{H} + c_i^o \right)$$

Η λύση της παραπάνω εξίσωσης είναι το άθροισμα της γενικής λύσης της ομογενούς και της μερικής λύσης της πλήρους όπου η γενική μορφή της εξίσωσης είναι:

$$\frac{dc_i}{dt} + \frac{c_i}{\tau_r} = \left(\frac{q_i}{H} + \frac{c_i^o}{\tau_r} \right)$$

Για την ομογενή εξίσωση μπορούμε να γράψουμε ότι:

$$\frac{dc_i}{dt} + \frac{c_i}{\tau_r} = 0 \Rightarrow \frac{dc_i}{c_i} = -\frac{dt}{\tau_r} \Rightarrow \int_{c_i(0)}^{c_i} \frac{dc_i}{c_i} = -\int_0^t \frac{dt}{\tau_r}$$

Συνήθεις διαφορικές εξισώσεις της μορφής $\frac{dy}{dx} + P(x)y = Q(x)$ έχουν λύση που γράφεται ως $\mu(x)y = \int \mu(x)Q(x)dx$ όπου $\mu(x) = \exp\left[\int P(x) dx\right]$ με αποτέλεσμα για τη μερική λύση της πλήρους να έχουμε:

$$\frac{dc_i}{dt} + \frac{c_i}{\tau_r} = \left(\frac{q_i}{H} + \frac{c_i^o}{\tau_r}\right) \text{ όπου } \mu = \exp(t/\tau_r).$$

Λόγω του ότι $\mu(x)y = \int \mu(x)Q(x)dx$ η παραπάνω σχέση γράφεται ως

$$\exp\left(\frac{t}{\tau_r}\right)c_i = \int \exp\left(\frac{t}{\tau_r}\right)\left(\frac{q_i}{H} + \frac{c_i^o}{\tau_r}\right)dt \Rightarrow c_i = \left(\frac{q_i}{H} + \frac{c_i^o}{\tau_r}\right)\left[\int \exp\left(\frac{t}{\tau_r}\right)dt\right]\exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right) \Rightarrow$$

$$c_i = \left(\frac{q_i \tau_r}{H} + c_i^o\right)\left(1 + C \exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right)\right)$$

Για την ολική λύση για $t=0$ έχουμε $c_i = c_i(0)$ με αποτέλεσμα η σταθερά C να ισούται με -1. Ως τελική λύση έχουμε:

$$c_i(t) = c_i(0)\exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right) + \left(\frac{q_i \tau_r}{H} + c_i^o\right)\left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right)\right)$$

όπου τ_r είναι ο χρόνος που χρειάζεται για καθαρισμό της περιοχής αφού οι εκπομπές γίνουν μηδέν.

Η συνεισφορά στη συγκέντρωση οφείλεται σε δυο όρους, στην αρχική συγκέντρωση (υπόβαθρου) που φθίνει εκθετικά με χαρακτηριστικό χρόνο τ_r περίπου 10 ώρες και τη συνεισφορά λόγω εκπομπών και μεταφοράς (advection).

Για $t \gg \tau_r \Rightarrow \exp(-t/\tau_r) \cong 0$ με αποτέλεσμα η συγκέντρωση σταθερής κατάστασης να γράφεται ως

$$c_i^{ss} = \frac{q_i \tau_r}{H} + c_i^o \cong \frac{200(\mu g m^{-2} h^{-1})10h}{1000m} + 1 \mu g m^{-3} = 3 \mu g m^{-3}$$

Παράδειγμα 2 SO₂ εκπέμπεται σε αστική περιοχή με ρυθμό 2000 μg m⁻² h⁻¹. Το ύψος ανάμιξης είναι 1000 μέτρα, ο χρόνος παραμονής στην Ατμόσφαιρα είναι 20 h, και το SO₂ αντιδρά με ένα μέσο όρο 3% h⁻¹. Περιοχές γύρω από την αστική περιοχή χαρακτηρίζονται από συγκέντρωση SO₂ ίση με 2 μg m⁻³. Ποια είναι η μέση συγκέντρωση SO₂ στην αστική περιοχή για τις παραπάνω συνθήκες ; Υποθέσετε ότι η ξηρή εναπόθεση του SO₂ έχει μέγεθος 1 cm s⁻¹ και η Ατμόσφαιρα είναι ελεύθερη από σύννεφα και ομίχλη.

Από το μοντέλο όγκου στο σύστημα συντεταγμένων του Euler γνωρίζουμε ότι:

$$\frac{dc_s}{dt} = \frac{q_s}{H} - k c_s - \frac{v_s}{H} c_s + \frac{(c_s^o - c_s)}{\tau_r}$$

Η λύση της παραπάνω συνήθους διαφορικής εξίσωσης δίνει:

$$c_s(t) = \frac{A}{B} + \left(c_s(0) - \frac{A}{B} \right) e^{-Bt}$$

όπου

$$A = \frac{q_s}{H} + \frac{c_s^o}{\tau_r}$$

και

$$B = k + \frac{v_s}{H} + \frac{1}{\tau_r}$$

με

$$(k=0.03 \text{ h}^{-1}), \quad (v_s / H = 0.036 \text{ h}^{-1}), \quad \left(\frac{1}{\tau_r} = 0.05 \text{ h}^{-1} \right), \quad (B=0.116 \text{ h}^{-1}),$$

$$\left(\frac{q_s}{H} = 2 \mu\text{g m}^{-3} \text{ h}^{-1} \right), \quad \left(\frac{c_s^o}{\tau_r} = 0.1 \mu\text{g m}^{-3} \text{ h}^{-1} \right), \quad (A=2.1 \mu\text{g m}^{-3} \text{ h}^{-1}).$$

Για $t \gg 1/B$ η συγκέντρωση προσεγγίζει σταθερή κατάσταση (steady state).

Η μέση συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου που υπολογίζεται με τη μέθοδο του Euler είναι ίση με 18.1 μg m⁻³ μετά την αντικατάσταση όλων των μεταβλητών στη γενική λύση του προβλήματος.

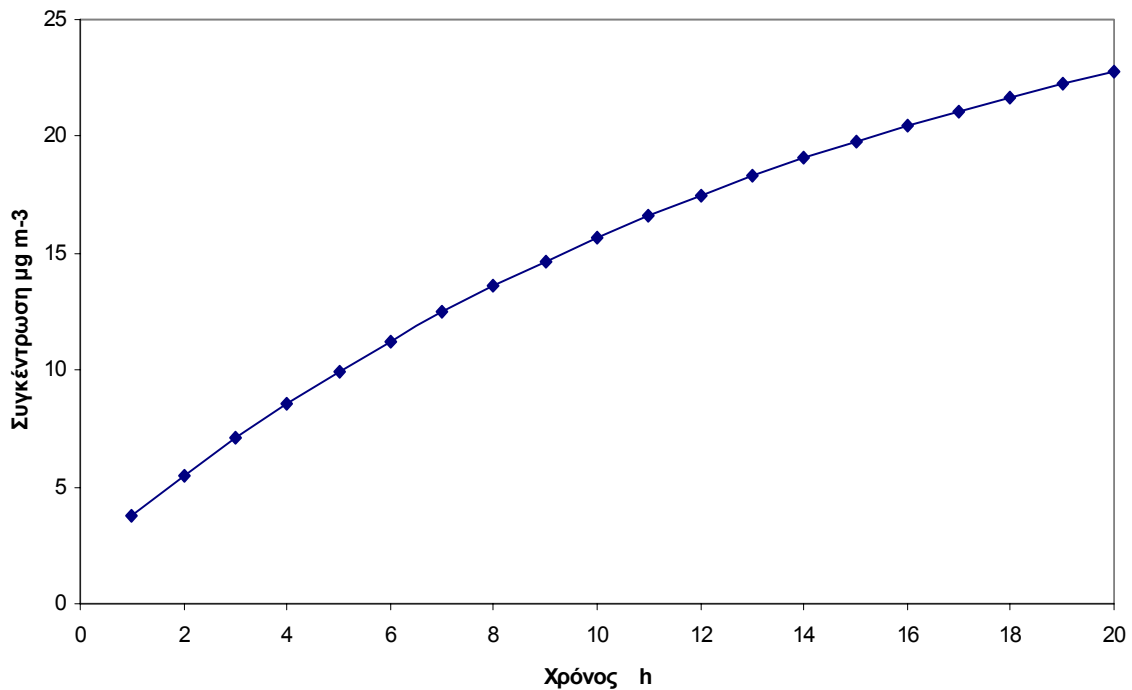
Στην περίπτωση του μοντέλου όγκου Lagrange έχουμε:

$$\frac{dc_s}{dt} = \frac{q_s}{H} - k c_s - \frac{v_s}{H} c_s$$

με λύση

$$c_s(t) = \frac{D}{E} + \left(c_s^o - \frac{D}{E} \right) e^{-Et}$$

όπου $D = \frac{q_s}{H}$, $E = k + \frac{v_d}{H}$, $D = 2 \mu g m^{-3} h^{-1}$ και $\lambda = 0.066 h^{-1}$.



Σχήμα 6-25: Μεταβολή της συγκέντρωσης του SO_2 ως προς το χρόνο.

Στη λύση με τη μέθοδο του Lagrange η συγκέντρωση του ρύπου πλησιάζει στην σταθερή της τιμή σε χρόνο μεγαλύτερο από 33.3 h (Σχήμα 6-25). Η μέση συγκέντρωση του SO_2 που υπολογίζεται με τη μέθοδο του Lagrange είναι ίση με $14.6 \mu g m^{-3}$.

Παράδειγμα 3 Μία συσκευή θέρμανσης που λειτουργεί με κηροζίνη λειτουργεί για μία ώρα σε ένα διαμέρισμα που έχει όγκο 200 m^3 . Η συσκευή εκπέμπει SO_2 με ρυθμό 50 μg/s . Η εξωτερική συγκέντρωση του ρύπου στον αέρα και η αρχική συγκέντρωση στον εσωτερικό χώρο είναι 100 μg/m^3 . Εάν ο ρυθμός διείσδυσης είναι 50 L/s και ο αέρας είναι καλά αναμειγμένος, ποια είναι η συγκέντρωση του SO_2 στον εσωτερικό χώρο στο τέλος της μίας ώρας.

Εφαρμόζοντας την εξίσωση (6-13) έχουμε:

$$c = \frac{\frac{50 \text{ μg/s}}{(200 \text{ m}^3)} + 100 \text{ μg/m}^3 \frac{0.050 \text{ m}^3/\text{s}}{200 \text{ m}^3}}{\frac{0.050 \text{ m}^3/\text{s}}{200 \text{ m}^3} + 6.39 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}} \times \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{0.050 \text{ m}^3/\text{s}}{200 \text{ m}^3} \right) (3600 \text{ s}) \right) \right] + (100 \text{ μg/m}^3) \exp \left[- \left(\frac{0.050 \text{ m}^3/\text{s}}{200 \text{ m}^3} \right) (3600 \text{ s}) \right] = 625.39 \text{ μg/m}^3$$

Παράδειγμα 4 Αναλυτική λύση του υπολογισμού της συγκέντρωσης σε εσωτερικούς χώρους.

Όπως έχουμε μελετήσει στο κεφάλαιο αυτό, η εξίσωση που διέπει την ισορροπία της μάζας σε εσωτερικούς χώρους δίνεται από τη σχέση

$$V \frac{dc}{dt} = Qc_a + E - Qc - kcV$$

Η επίλυση της παραπάνω εξίσωσης παρουσιάζεται στο παράδειγμα αυτό με μια απλή αναλυτική λύση. Θα αναλύσουμε με λεπτομέρεια την αναλυτική λύση της παραπάνω εξίσωσης που ουσιαστικά είναι η εξίσωση (6-13).

Στην αναλυτική λύση η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφεί ως

$$\frac{dc}{dt} + \left(\frac{Q}{V} + k \right) c = \frac{Qc_a + E}{V}$$

Η λύση της παραπάνω εξίσωσης είναι το άθροισμα της γενικής λύσης της ομογενούς και της μερικής λύσης της πλήρους. Για την ομογενή λύση έχουμε

$$\frac{dc}{dt} + \left(\frac{Q}{V} + k \right) c = 0 \Rightarrow \ln c = - \left(\frac{Q}{V} + k \right) t + c_o \text{ όπου } c_o \text{ είναι μια σταθερά με}$$

$$\text{αποτέλεσμα να έχουμε } c = c_o \exp \left[- \left(\frac{Q}{V} + k \right) t \right].$$

$$\text{Για την μερική λύση της πλήρους έχουμε } c = \frac{1}{\mu(t)} \int \mu(t) Q(t) dt \text{ όπου}$$

$P(t) = \frac{Q}{V} + k$, $\mu(t) = \exp\left[\int P(t) dt\right]$ και $Q(t) = \frac{Qc_a + E}{V}$. Ως αποτέλεσμα έχουμε

$$c = \left(\frac{Q}{V}c_a + \frac{E}{V}\right) \left\{ \frac{1}{\frac{Q}{V} + k} + A \exp\left[-\left(\frac{Q}{V} + k\right)t\right] \right\}$$

όπου A είναι μια σταθερά.

Η ολική λύση είναι το άθροισμα των δύο προηγούμενων με αποτέλεσμα να έχουμε

$$c = c_o \exp\left[-\left(\frac{Q}{V} + k\right)t\right] + \left(\frac{Q}{V}c_a + \frac{E}{V}\right) \left\{ \frac{1}{\frac{Q}{V} + k} + A \exp\left[-\left(\frac{Q}{V} + k\right)t\right] \right\}$$

με τις αρχικές συνθήκες ότι για $t=0$ έχουμε $c = c_o$ που δίνει $A = -\frac{1}{\frac{Q}{V} + k}$.

Ασκήσεις

Άσκηση 1

Διοξειδίο του θείου εκπέμπεται σε μία αστική περιοχή με ρυθμό $3 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Η συγκέντρωση της ρίζας του υδροξυλίου μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας ως:

$$[\text{OH}] = [\text{OH}]_{\max} \sin[\pi (t-6) / 12]$$

όπου t είναι ο χρόνος σε ώρες χρησιμοποιώντας το μεσονύκτιο ως αρχικό σημείο. Υποθέστε ότι η συγκέντρωση του $[\text{OH}]$ είναι μηδέν όταν $0 \leq t \leq 6$ και επίσης όταν $18 \leq t \leq 24$. Το ύψος ανάμιξης μεταβάλλεται από 300m κατά τη διάρκεια της νύκτας σε 1000m κατά τη διάρκεια της ημέρας. Υποθέστε ότι για αυτή την περιοχή έχουμε $[\text{OH}]_{\max} = 10^7$ μόρια cm^{-3} και διάρκεια παραμονής 24 h. Επίσης έχουμε συγκέντρωση υποβάθρου διοξειδίου του θείου $0.2 \mu\text{g m}^{-3}$ και συγκέντρωση υποβάθρου για θειικά σωματίδια $1 \mu\text{g m}^{-3}$. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο του Euler μιας κυψελίδας υπολογίστε τα παρακάτω:

- (α) Τη μέση και μέγιστη συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου και των θειικών σωματιδίων
- (β) Το χρόνο κατά τη διάρκεια του οποίου η συγκέντρωση είναι μέγιστη. Ερμηνεύστε τα αποτελέσματα
- (γ) Υποθέστε ότι κατά τη διάρκεια του επεισοδίου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης ο χρόνος έκθεσης αυξάνεται στις 36 ώρες. Υπολογίστε τη μέγιστη συγκέντρωση διοξειδίου του θείου και τη συγκέντρωση των θειικών σωματιδίων κατά τη διάρκεια του επεισοδίου.

Άσκηση 2

Κυψελίδα έχει διαστάσεις $\Delta x=5\text{km}$, $\Delta y=4\text{km}$ και $\Delta z=0.1\text{km}$. Υποθέστε ότι η συγκέντρωση των αερίων στην κυψελίδα είναι $N_1=10^{11} \text{ moles/cm}^3$ και η διανυσματική ταχύτητα στο δυτικό άκρο της κυψελίδας είναι $u_1=+7 \text{ m/s}$. Στο ανατολικό άκρο της κυψελίδας έχουμε αντίστοιχα $N_2=5 \cdot 10^{11} \text{ moles/cm}^3$ και $u_2=+8 \text{ m/s}$. Υποθέστε ότι εξωτερικές πηγές και καταβόθρες καθώς και διασπορά λόγω τύρβης δεν υπάρχουν. Υπολογίστε τη συγκέντρωση N στην κυψελίδα μετά από 60 s, όταν η αρχική συγκέντρωση N είναι η μέση τιμή των N στα δύο άκρα και οι παράμετροι στα άκρα παραμένουν σταθεροί. Υπολογίστε επίσης το χρόνο που η συγκέντρωση N στην κυψελίδα γίνεται μηδέν.

Βιβλιογραφία 6^{ου} Κεφαλαίου

Ackermann, I. J., Hass, H., Memmesheimer, M., Ebel, A., Binkowski, F. S. and Shankar, U. (1998). **Modal aerosol dynamics model for Europe: Development and first applications.** *Atmospheric Environment* **32**, 2981-2999.

Bardouki H., Liakakou H., Economou C., Sciare J., Smolík J., Ždímal V., Eleftheriadis K., Lazaridis M. and Mihalopoulos N. (2003) **Chemical composition of size resolved atmospheric aerosols in the eastern Mediterranean during summer and winter.** *Atmospheric Environment* **37**, 195-208.

Binkowski, F. S. and Shankar, U. (1995). **The regional particulate model 1. Model description and preliminary results.** *Journal of Geophysical Research* **100**, 26191-26209.

Γκέκας, Β. Χρ., Φραντζεσκάκη, Ν. Ε. και Κατσίβελα, Ε. (2002), **Τεχνολογίες Επεξεργασίας Τοξικών και Επικινδύνων Αποβλήτων**, Εκδόσεις Τζιόλα & Υιοί, 2002.

Δαλιακόπουλος, Γ., Νικολοπούλου, Μ. και Φραντζεσκάκη, Ν. (2003), **Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Ξυλοκαμάρας Χανίων.** Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Φεβρουάριος 2003.

Γεντεκάκης, Ι. Β. (1999), **Ατμοσφαιρική Ρύπανση, Επιπτώσεις, Έλεγχος και Εναλλακτικές Τεχνολογίες**, Εκδόσεις Τζιόλα, 1999

EMEP-WMO (1997). **Workshop on Strategies for Monitoring of Regional Air Pollution in relation to the need within EMEP, GAW and other international bodies.** EMEP/CCC-Report 10/97.

Flatøy, F., Ø, Hov and Schlanger, H. (2000). **Chemical forecasts used for measurement flight planning during the POLINAT 2.** *Geophysical Research Letters* **27**, 951-954.

Guenther, B., P. R. Zimmerman, P. C. Harley, R. K. Monson, and R. Fall. (1993). **Isoprene and monoterpene rate variability: Model evaluations and sensitivity analysis.** *J. Geophys. Res.*, Vol. 98, No.10, page 12609-12617.

Lurmann, F. W., Wexler, A. S., Pandis, S. N., Mussara, S., Kumar, N. and Seinfeld, J. H. (1997). **Modelling Urban and Regional Aerosols-II. Application to California's South Coast Air Basin.** *Atmospheric Environment* **31**, 2695-2715.

Mihalopoulos, N Stephanou, E Kanakidou, M Pilitsidis, S Bousquet, P 1997. **Tropospheric aerosol ionic composition in the Eastern Mediterranean region.** *Tellus Ser. B-Chem. Phys. Meteorol.* **49**, 314-326.

Monahan, E. C. D. Spiel, and K. Spiel. 1986, **Oceanic whitecaps**. Reidel.

NILU, (1987), **User's guide for the Gaussian type dispersion models CONCX and CONDEP**, September 1987.

Pai, P., Vijayaraghavan, K. and Seigneur, C. (2000). **Particulate matter modeling in the Los Angeles basin using the SAQM-AERO** *J. Air & Waste Management Association* **50**, 32-42.

Pandis, S. N., Harley, R. A., Cass, G. R., and Seinfeld, J. H. (1992). **Secondary organic aerosol formation and transport**. *Atmospheric Environment* **26A**, 2269-2282.

Pielke, R. A., Cotton, W. R., Walko, R. L., Tremback, C. J., Lyons, W. A., Grasso, L. D., Nicholls, M. E., Moran, M. D., Wesley, D. A., Lee, T. J. and Copeland, J. H. (1992). **A comprehensive Meteorological Modeling System – RAMS**. *Meteorol. Atmos. Phys.* **49**, 69-91.

Seinfeld, J. H. and Pandis, S. N., (1998), **Atmospheric Chemistry and Physics**, John Wiley & Sons.

Simpson, D., A. Guenther, C. N. Hewitt, and R. Steinbrecher. (1995). **Biogenic emissions in Europe**. *J. Geophys. Res.*, Vol. 100, No. D11, page 22875-22890.