



### ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ 3

## Εγκατάσταση-Εφαρμογή-Πιστοποίηση φωτοχημικών μοντέλων για το Λεκανοπέδιο Αθηνών

**Τίτλος Έργου :** “Αξιολόγηση Φωτοχημικών Μοντέλων των Αιωρούμενων Σωματιδίων και του Όζοντος στο Λεκανοπέδιο Αθηνών με χρήση αισθητήρων DOAS και τεχνικής LIDAR και συσχέτισή τους με δείκτες υγείας”

<b>Κωδικός Έργου :</b>	<b>05B-NON-EU-349 [ΟΠΣ: 96δ]</b>
<b>Ανάδοχος :</b>	ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ II
<b>Επιστημονικός Υπεύθυνος :</b>	Δρ. Ιωάννης ΖΙΩΜΑΣ Καθηγητής
<b>Δράση :</b>	«Συνεργασίες με Ε&Τ οργανισμούς χωρών εκτός Ευρώπης - 2005» (Φάση Β)
<b>Θεματικός Τομέας :</b>	Περιβαλλοντικές και Διαστημικές Τεχνολογίες
<b>Αρμόδια Διεύθυνση ΓΓΕΤ :</b>	Διεύθυνση Διεθνούς Ε&Τ Συνεργασίας Τμήμα Διακρατικών Σχέσεων
<b>Αρμόδιος Χειριστής ΓΓΕΤ :</b>	B. ΚΕΡΑΣΙΩΤΗ

**ΜΑΡΤΙΟΣ 2008**

---

**ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ 3: Εγκατάσταση-Εφαρμογή-Πιστοποίηση φωτοχημικών μοντέλων για το Λεκανοπέδιο Αθηνών****Συντονιστής: ΠΚ (40%), Συνεργάτες: ΕΜΠ (30%), ΕΑΑ (10%), ΕΟΗΣΙ (20%)****Περίληψη**

Στα πλαίσια του Παραδοτέου 3 πραγματοποιήθηκε, αρχικά, η εγκατάσταση του υπολογιστικού συστήματος που αποτελείται από το μετεωρολογικό μοντέλο μέσης κλίμακας MM5 και το φωτοχημικό μοντέλο περιφερειακής κλίμακας CAMx. Το υπολογιστικό σύστημα αυτό χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων αέριων και σωματιδιακών ρύπων και για τη μελέτη της ποιότητας του αέρα στην Ευρύτερη Περιοχή της Αθήνας (ΕΠΑ), η οποία συνδέεται με την υγεία των κατοίκων του Λεκανοπεδίου. Προκειμένου η εφαρμογή του CAMx να είναι δυνατή, έγινε υπολογισμός των πεδίων των κυριότερων ανθρωπογενών εκπομπών ρύπων (CO, NOx, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> και NMVOCs) στην ΕΠΑ, ενώ παράλληλα χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο υπολογισμού των βιογενών NMVOCs εκπομπών. Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή και η αξιολόγηση (πιστοποίηση) της επίδοσης του συστήματος των μοντέλων MM5-CAMx στην Ευρύτερη Περιοχή της Αθήνας (ΕΠΑ). Η αξιολόγηση αφορούσε στο όζον και στα αιωρούμενα σωματίδια (PM<sub>10</sub>) και περιελάμβανε τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του φωτοχημικού μοντέλου CAMx με μετρήσεις που προήλθαν από το δίκτυο μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης της περιοχής Αθηνών που λειτουργεί υπό την ευθύνη του ΥΠΕΧΩΔΕ.

**ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ 3: Εγκατάσταση-Εφαρμογή-Πιστοποίηση φωτοχημικών μοντέλων για το Λεκανοπέδιο Αθηνών**

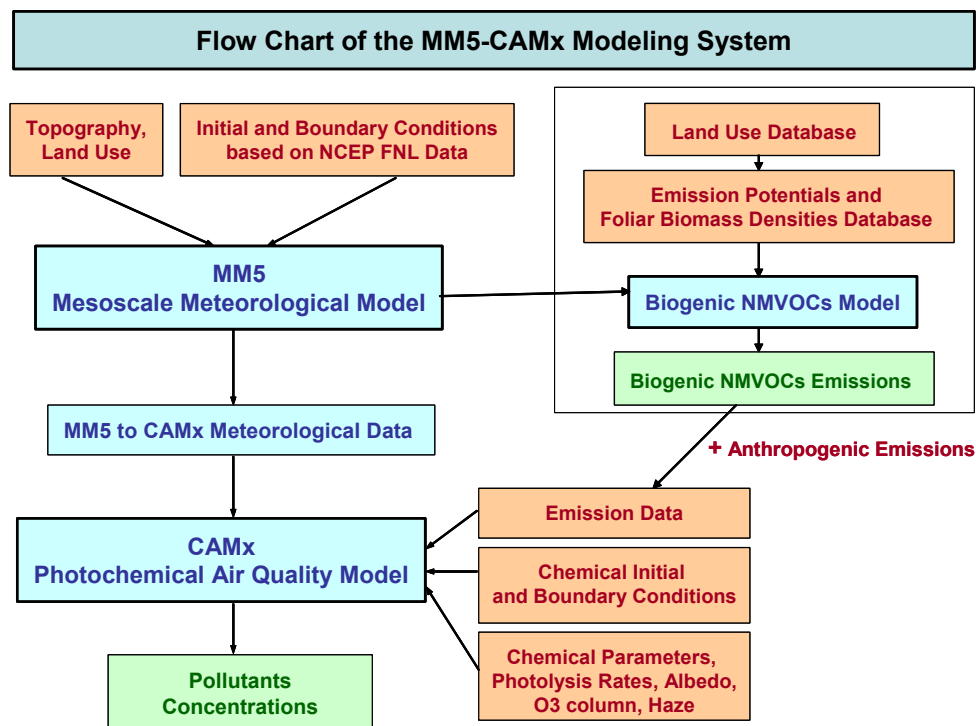
Στη συνέχεια περιγράφονται οι Φάσεις ολοκλήρωσης του Παραδοτέου 3:

**Φάση 1: Εγκατάσταση του συστήματος μοντέλων MM5-CAMx και ορισμός των περιοχών εφαρμογής του συστήματος**

Το υπολογιστικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη της ποιότητας της ατμόσφαιρας στην ΕΠΑ στο πλαίσιο του παρόντος ερευνητικού έργου αποτελείται από τα παρακάτω αριθμητικά μοντέλα:

- το αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης και ανάλυσης καιρού PSU/NCAR mesoscale model MM5 (version 3.7) (Grell *et al.*, 1994), μοντέλο περιορισμένης περιοχής, μη υδροστατικό, του οποίου η κατακόρυφη δομή βασίζεται σε επίπεδα σ που ακολουθούν την τοπογραφία και το οποίο έχει σχεδιαστεί για την προσομοίωση και πρόγνωση της μέσης και περιφερειακής κλίμακας ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας, και ,τέλος,
- το φωτοχημικό μοντέλο Comprehensive Air quality Model with extensions (CAMx version 4.40) (ENVIRON, 2006), το οποίο είναι ένα τρισδιάστατο φωτοχημικό μοντέλο κυψελίδων τύπου Euler, που υπολογίζει τις συγκεντρώσεις των αερίων και σωματιδιακών ρύπων, προσομοιώνοντας εκείνες τις φυσικές και χημικές διεργασίες της ατμόσφαιρας, που επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων σε αστική και περιφερειακή κλίμακα.

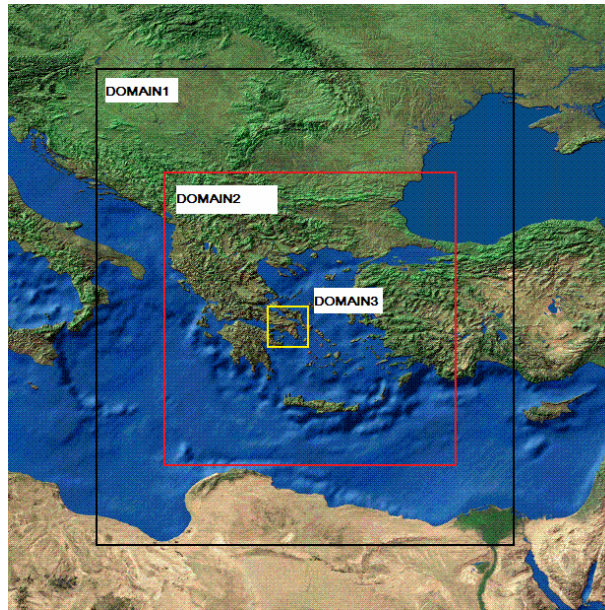
Το διάγραμμα ροής του συστήματος φαίνεται στην Εικόνα 3.1.



**Εικόνα 3.1.** Διάγραμμα ροής του υπολογιστικού συστήματος MM5-CAMx.

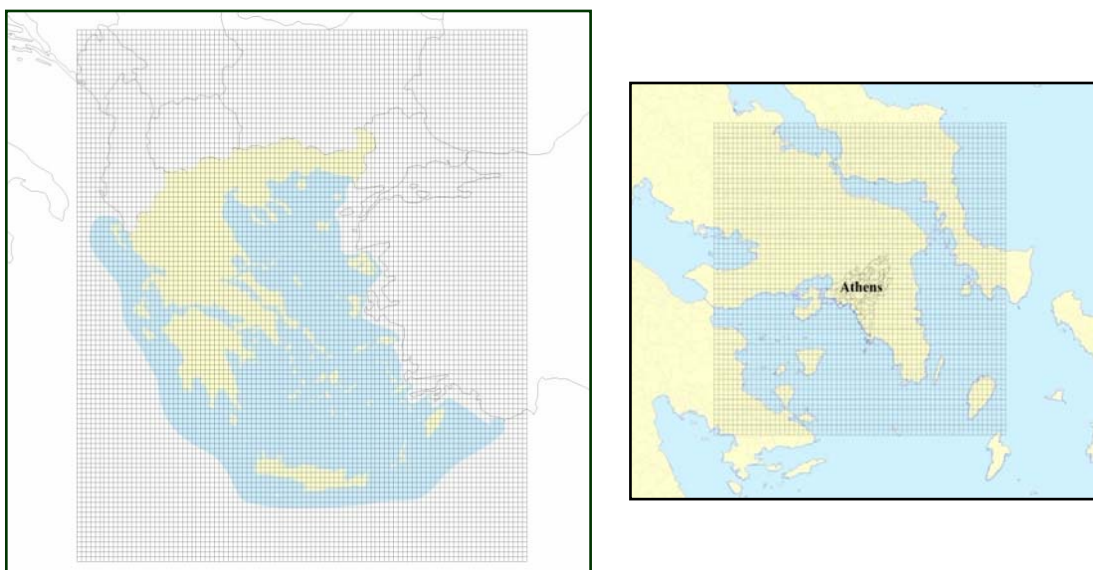
Το μοντέλο MM5 εφαρμόζεται για τρία πλέγματα (Εικόνα 3.2) σε προβολή Lambert Conic Conformal. Το πρώτο πλέγμα (60x 60 κυψελίδες) καλύπτει ένα τμήμα των Βαλκανίων, έχει χωρική ανάλυση 30 km και χρησιμοποιείται κυρίως για την αρχική παρεμβολή σ' αυτό των μετεωρολογικών δεδομένων εισόδου που έχουν χωρική ανάλυση 100 km. Το δεύτερο πλέγμα (120 X 120 κυψελίδες) έχει υψηλότερη χωρική ανάλυση (10 km) και καλύπτει όλη την

Ελλάδα. Το τρίτο πλέγμα (110 X 110 κυψελίδες) εστιάζει στην ΕΠΑ και έχει χωρική ανάλυση 2 km. Όλα τα πλέγματα έχουν κατακόρυφη δομή αποτελούμενη από 33 επίπεδα σ και εκτείνονται μέχρι τα 100 mbar περίπου.



**Εικόνα 3.2.** Περιοχές εφαρμογής του μοντέλου MM5.

Το μοντέλο CAMx εφαρμόζεται για δύο επάλληλα πλέγματα (Εικόνα 3.3), που έχουν την ίδια προβολή και χωρική ανάλυση με τα αντίστοιχα του MM5. Το πλέγμα που καλύπτει την Ελλάδα αποτελείται από 98 x 108 κυψελίδες, ενώ αυτό της Αθήνας από 62 x 62 κυψελίδες. Κατακορύφως, τα πλέγματα εκτείνονται έως τα 6.5 km από τη μέση στάθμη της θάλασσας (ΜΣΘ) και αποτελούνται από 15 στρώματα που έχουν υψηλότερη ανάλυση κοντά στο έδαφος. Το ύψος του πρώτου στρώματος είναι 20 m περίπου.



**Εικόνα 3.3.** Περιοχές εφαρμογής του μοντέλου CAMx.

## **Φάση 2: Υπολογισμός δεδομένων εισόδου – Δημιουργία αρχείων εισόδου του συστήματος μοντέλων MM5-CAMx**

Για την εφαρμογή του μοντέλου MM5 και τον υπολογισμό των μετεωρολογικών πεδίων, που αποτελούν δεδομένα εισόδου του φωτοχημικού μοντέλου μας, αναπτύσσονται αρχικές και οριακές συνθήκες που βασίζονται στα δεδομένα ανάλυσης του National Center for Environmental Protection (NCEP Global Tropospheric Analyses archive - <http://dss.ucar.edu/datasets/ds083.2/data/>). Τα δεδομένα αυτά έχουν χωρική ανάλυση 1<sup>ο</sup> και με εφαρμογή κατάλληλης μεθόδου παρεμβάλλονται στα πλεγματικά σημεία του πρώτου πλέγματος. Τα πλέγματα 1 και 2 είναι επάλληλα και γι'αυτά το MM5 εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας την επιλογή της αλληλεπίδρασης διπλής κατεύθυνσης (2-way nest simulations). Στη συνέχεια το μοντέλο MM5 εφαρμόζεται για το τρίτο πλέγμα χρησιμοποιώντας αρχικές και οριακές συνθήκες από το πλέγμα της Ελλάδας (πλέγμα 2). Σε όλες τις προσομοιώσεις που πραγματοποιούνται, χρησιμοποιείται ένα μοντέλο πέντε (5) επιπέδων για την παραμετροποίηση των φυσικών διεργασιών κοντά και μέσα στο έδαφος, ενώ η παραμετροποίηση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος έγινε με χρήση του μοντέλου MRF (*Hong and Pan, 1996*).

Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται κατά την εφαρμογή του μοντέλου CAMx αντιπροσωπεύουν συνθήκες καθαρής ατμόσφαιρας. Η περίοδος τριών ημερών θεωρείται ως χρόνος αρχικοποίησης του μοντέλου. Οι ρυθμοί φωτόλυσης υπολογίζονται με εφαρμογή του μοντέλου διάδοσης της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα TUV (*Madronich, 1993*) ενώ ο χημικός μηχανισμός που χρησιμοποιείται για την περιγραφή των χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα είναι ο Carbon Bond Mechanism (CB-IV).

Σημαντικά δεδομένα εισόδου του φωτοχημικού μοντέλου αποτελούν οι ανθρωπογενείς και βιογενείς εκπομπές ο υπολογισμός των οποίων περιγράφεται παρακάτω.

### **Βιογενείς NMVOCs εκπομπές**

Οι βιογενείς πτητικές οργανικές ενώσεις εκτός μεθανίου (BNMVOCs) διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη χημεία της ατμόσφαιρας καθώς αποτελούν κινητήριο μοχλό του φωτοχημικού κύκλου (*Atkinson, 2000*) και επιδρούν στο σχηματισμό αιωρούμενων σωματιδίων (*Fuentes et al., 2001*). Οι εκπομπές των ενώσεων αυτών θα πρέπει συνεπώς να λαμβάνονται υπόψη στις προσομοιώσεις με φωτοχημικά μοντέλα διασποράς.

Οι βιογενείς εκπομπές μπορούν γενικά να κατηγοριοποιηθούν σε εκπομπές: α) ισοπρενίου ( $C_5H_8$ ), β) μονοτερπενίων ( $C_{10}H_x$ ) και γ) λοιπών πτητικών οργανικών ενώσεων ( $C_xH_yO_z$ ). Σε ωριαία βάση, η εκπομπή των ενώσεων αυτών μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση (Guenther et al., 1993):

$$E(\mu\text{grC} / \text{m}^2 \text{h}) = \varepsilon \cdot D \cdot \gamma \quad (3.1)$$

όπου  $\varepsilon$  ( $\mu\text{grC} / \text{gr h}$ ) είναι ο συντελεστής εκπομπής για κάθε χημική ένωση,  $D$  ( $\text{gr} / \text{m}^2$ ) η πυκνότητα βιομάζας του φυλλώματος και  $\gamma$  ένας αδιάστατος διορθωτικός συντελεστής, ο οποίος χρησιμοποιείται για την περιγραφή των βραχυπρόθεσμων επιδράσεων της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας στις εκπομπές. Σύμφωνα με τους Guenther et al., 1993, ο διορθωτικός αυτός συντελεστής για το ισοπρένιο, μπορεί να υπολογιστεί από το γινόμενο δύο παραμέτρων, μίας εξαρτώμενης από τη θερμοκρασία ( $C_T$ ) και μίας εξαρτώμενης από την ακτινοβολία ( $C_L$ ). Σε ό,τι αφορά τις εκπομπές των μονοτερπενίων και των λοιπών πτητικών οργανικών ενώσεων, ο παράγοντας  $\gamma$  υπολογίζεται με βάση μία εμπειρική σχέση ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Εξαιρέση στον παραπάνω κανόνα, αποτελούν ορισμένα είδη βλάστησης για τα οποία έχει αποδειχθεί ότι η εκπομπή των μονοτερπενίων μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά υιοθετώντας τον αλγόριθμο της εκπομπής ισοπρενίου.

Στα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού έργου οι εκπομπές των BNMVOCs υπολογίσθηκαν από την εφαρμογή ενός μοντέλου βιογενών εκπομπών το οποίο έχει ενσωματωθεί στο υπολογιστικό σύστημα των μοντέλων MM5-CAMx (Εικόνα 3.1).

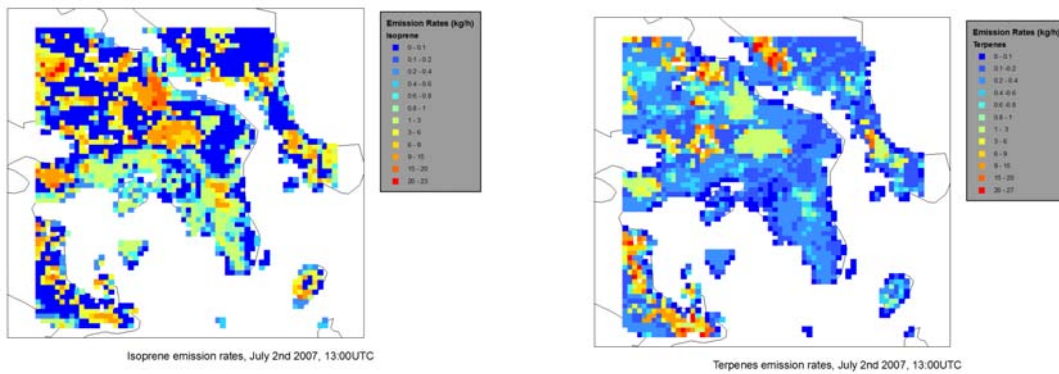
Το μοντέλο υπολογίζει τις εκπομπές των BNMVOCs χρησιμοποιώντας:

- Δεδομένα χρήσης γης (δάση, χαμηλή βλάστηση, καλλιέργειες) που προέρχονται από τη βάση δορυφορικών δεδομένων GLCC (Global Land Cover Characteristics) της Αμερικανικής Γεωλογικής Υπηρεσίας (<http://edcns17.cr.usgs.gov/glcc/>) και έχουν χωρική ανάλυση 1 km,
- Τιμές πυκνότητας φυλλώδους βιομάζας και συντελεστών εκπομπής ανά κατηγορία χρήσεων γης της GLCC βάσης δεδομένων (Symeonidis et al., 2008),
- Μετεωρολογικά δεδομένα (θερμοκρασία και φωτοσυνθετικά ενεργός ακτινοβολία) από το αριθμητικό μετεωρολογικό μοντέλο MM5.

Οι βιογενείς εκπομπές υπολογίζονται σε ωριαία βάση και έχουν την χωρική ανάλυση των περιοχών εφαρμογής του φωτοχημικού μοντέλου CAMx.

Στην Εικόνα 3.4 παρουσιάζονται ενδεικτικά χάρτες των ωριαίων εκπομπών των BNMVOCs για την περιοχή της Αθήνας από την εφαρμογή του μοντέλου των βιογενών εκπομπών.





**Εικόνα 3.4.** Εκπομπές ισοπρενίου (αριστερά) και μονοτερπενίων (δεξιά) στην ΕΠΑ κατά την 2<sup>η</sup> Ιουλίου 2007 στις 13:00 UTC.

### Ανθρωπογενείς εκπομπές

Για την εφαρμογή του φωτοχημικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα ανθρωπογενών εκπομπών των ρύπων NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, NMVOCs (διαχωρισμένοι σε 23 χημικές ενώσεις/ομάδες), CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, CO και PM<sub>10</sub> (οργανικός άνθρακας, ανόργανος άνθρακας, θειικά, νιτρικά και άλλα σωματίδια) (Markakis *et al.*, 2008). Οι εκπομπές έχουν υπολογιστεί για τις περιοχές της Ελλάδας και της ευρύτερη περιοχή της Αθήνας (Εικόνα 3.3) σε πλέγματα ανάλυσης 10 km και 2 km και μεγέθους 98 x 108 και 62 x 62 κυψελίδων, αντίστοιχα. Τα πλέγματα έχουν οριστεί σε προβολικό σύστημα Lambert Conformal Conic. Η απογραφή των εκπομπών έχει έτος αναφοράς το 2003 και αφορά όλες τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες έτσι όπως αυτές έχουν κατηγοριοποιηθεί στο EMEP/CORINAIR emission inventory guidebook (EMEP/CORINAIR, 2006):

SNAP1: Τομέας ενέργειας (σημειακές πηγές)

SNAP2: Κεντρική θέρμανση

SNAP3 και SNAP4: Βιομηχανικός τομέας

SNAP5: Εξόρυξη και διανομή ορυκτών καυσίμων

SNAP6: Χρήση διαλυτών

SNAP7: Οδικές μεταφορές (εκπομπές εξάτμισης από ντιζελοκίνητα και βενζινοκίνητα οχήματα αλλά και εκπομπές εκτός εξάτμισης από τη φθορά ελαστικών και φρένων και τριβής του οδοστρώματος)

SNAP8: Μη-οδικά οχήματα (εκπομπές από σιδηροδρομικές μεταφορές, αγροτικά οχήματα, βιομηχανικά οχήματα, δασικά οχήματα, οικιακά μηχανήματα, σκάφη αναψυχής, αλιευτικά σκάφη, επιβατικά πλοία και ferries και φορτηγά πλοία)

SNAP9: Επεξεργασία και απόρριψη αποβλήτων

SNAP10: Αγροτικός τομέας (κτηνοτροφία και καύση αγροτικών απορριμμάτων).

Οι υπολογισμοί έχουν βασιστεί σε μια πληθώρα πρωτογενών δεδομένων τα οποία έχουν συλλεχθεί από βάσεις δεδομένων τόσο σε εθνικό όσο και σε διεθνές επίπεδο. Πιο αναλυτικά, τα στοιχεία εκπομπών για όλους τους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς της Ελλάδας έχουν προέλθει από την Δ.Ε.Η., ενώ για τον βιομηχανικό τομέα από την έκθεση απογραφής των βιομηχανιών του ΥΠΕΧΩΔΕ για το 2001 και από την Ευρωπαϊκή βάση δεδομένων πηγών εκπομπών ρύπων EPER (<http://ec.europa.eu/environment/ippc/eper/index.htm>). Για τον υπολογισμό των εκπομπών από τις οδικές και μη-οδικές μεταφορές εφαρμόστηκε η μεθοδολογία του EMEP/CORINAIR emission inventory guidebook και για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα οδικών φόρτων, κινήσεων πλοίων και δραστηριότητες οχημάτων (Πίνακας 3.1). Οι ετήσιες εκπομπές για όλες τις υπόλοιπες κατηγορίες πηγών έχουν εξαχθεί από την ευρωπαϊκή βάση δεδομένων εκπομπών του EMEP (σε πλέγμα ανάλυσης 50 km).

**Πίνακας 3.1.** Πρωτογενή δεδομένα για τον υπολογισμό εκπομπών από τον τομέα των μεταφορών (εκτός των οδικών μεταφορών).

Υποκατηγορίες Πηγών	Πρωτογενή δεδομένα
Επιβατικά πλοία/ferries (ανά γραμμή)	Ισχύς μηχανών, στόλος, μήκος γραμμής, ταχύτητα πλεύσης
Αλιευτικά σκάφη (ανά γεωγραφικό διαμέρισμα)	Στόλος, χρόνος λειτουργίας, μεικτό βάρος στόλου
Σκάφη αναψυχής (ανά γεωγραφικό διαμέρισμα)	Στόλος, τυπική απόσταση πλεύσης και ταχύτητα, μεικτό βάρος στόλου
Σιδηροδρομικές μεταφορές (ανά γραμμή)	Δρομολόγια, χρόνος λειτουργίας, ισχύς μηχανής, συντελεστής πληρότητας
Μηχανήματα εκτός δρόμου (ανά γεωγραφικό διαμέρισμα)	
Εναέριες μεταφορές (ανά αεροδρόμιο)	Αριθμός απογειώσεων/προσγειώσεων

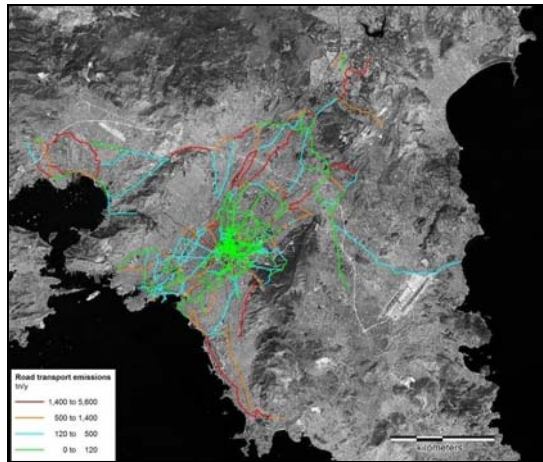
Ειδικά για τις οδικές μεταφορές εφαρμόστηκαν δύο μεθοδολογίες. Η αναλυτική μεθοδολογία της μικροκλίμακας, η οποία περιλαμβάνει υπολογισμούς σε επίπεδο δρόμου (βασισμένους σε οδικούς φόρτους και ταχύτητες κίνησης σε ένα μεγάλο αριθμό τμημάτων του οδικού δικτύου της Αθήνας) αλλά και αυτή της μακροκλίμακας, η οποία περιλαμβάνει υπολογισμούς



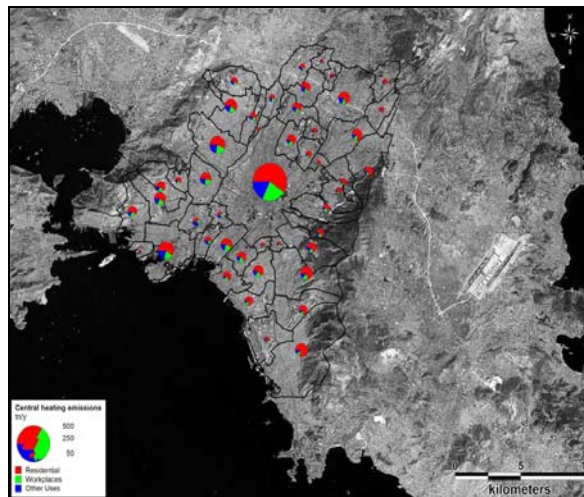
σε τοπικό επίπεδο βασισμένους σε στατιστικά δεδομένα (π.χ. ο στόλος που κυκλοφορεί στην υπό μελέτη περιοχή ανά κατηγορία οχήματος (ΙΧ, Ταξί, Βαρέα οχήματα), η κατανάλωση καύσιμου κ.α.). Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς προήλθαν από κυκλοφοριακή μελέτη του ΥΠΕΧΩΔΕ που πραγματοποιήθηκε το έτος 1998 και περιελάμβανε το εθνικό οδικό δίκτυο της Ελλάδας και ένα μεγάλο μέρος των οδικών δικτύων της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης. Οι συντελεστές εκπομπής υπολογίστηκαν με βάση τις ταχύτητες κίνησης των οχημάτων σύμφωνα με την μεθοδολογία EMEP/CORINAIR.

Οι ετήσιες εκπομπές χωροθετήθηκαν στα πλέγματα αναφοράς είτε σύμφωνα με τις γεωγραφικές συντεταγμένες των πηγών (π.χ. τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας), είτε ακολουθώντας τα πρωτογενή δεδομένα, όπως αυτά περιλαμβάνονταν στις βάσεις δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν (π.χ. οι εκπομπές της κυκλοφορίας τοποθετήθηκαν στα αντίστοιχα οδικά τμήματα στα οποία μετρήθηκαν οι κυκλοφοριακοί φόρτοι) (Εικόνα 3.5), είτε με τη χρήση κατάλληλων χωρικά αναλυμένων «δεικτών» ή στατιστικών στοιχείων (π.χ. οι εκπομπές από τα γεωργικά μηχανήματα χωροθετήθηκαν στις αγροτικές περιοχές όπως αυτές είναι καταγεγραμμένες στην ευρωπαϊκή βάση δεδομένων χρήσεων γης CORINE, οι εκπομπές από την κεντρική θέρμανση χωροθετήθηκαν με βάση διαθέσιμα δεδομένα από απογραφή κτιρίων (οικίες, γραφεία, δημόσια κτίρια) στην Αθήνα (Εικόνα 3.6)). Τόσο η χωροθέτηση των πηγών εκπομπών όσο και οι χάρτες εκπομπών (Εικόνα 3.7) πραγματοποιήθηκαν με εφαρμογή Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS).

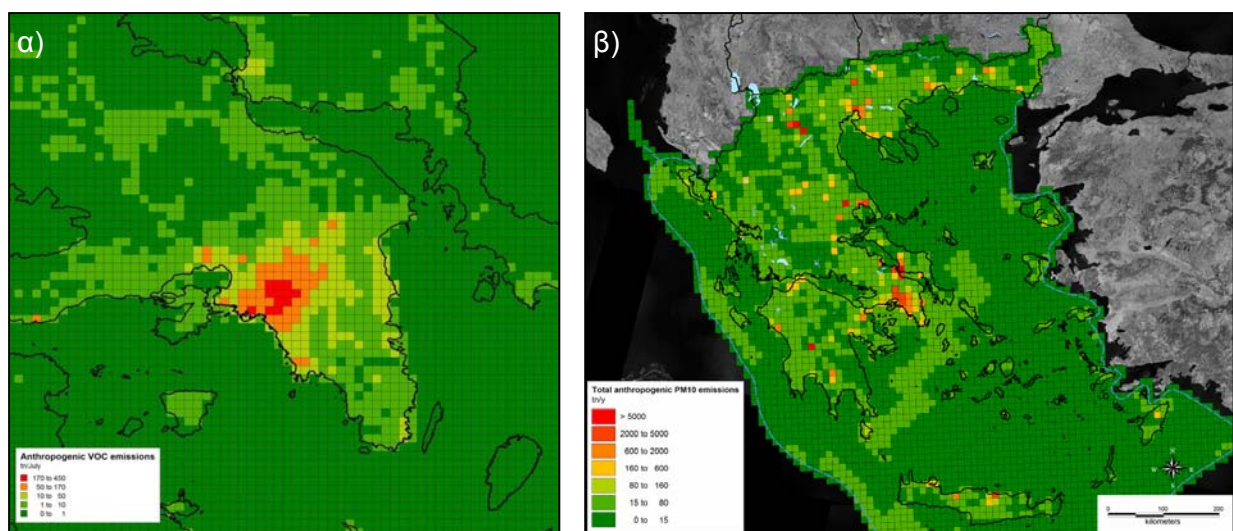
Οι ετήσιες εκπομπές αναλύθηκαν χρονικά χρησιμοποιώντας μηνιαία, εβδομαδιαία και ημερήσια χρονικά προφίλ τα οποία είτε διαμορφώθηκαν σύμφωνα με τη χρονική διακύμανση δραστηριοτήτων ή δεικτών (π.χ. χρονική διακύμανση του δείκτη βιομηχανικής παραγωγής στην Ελλάδα), είτε προήλθαν από διεθνείς μελέτες (π.χ. Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα EUROTRAC - υποπρόγραμμα GENEMIS) (Εικόνα 3.8).



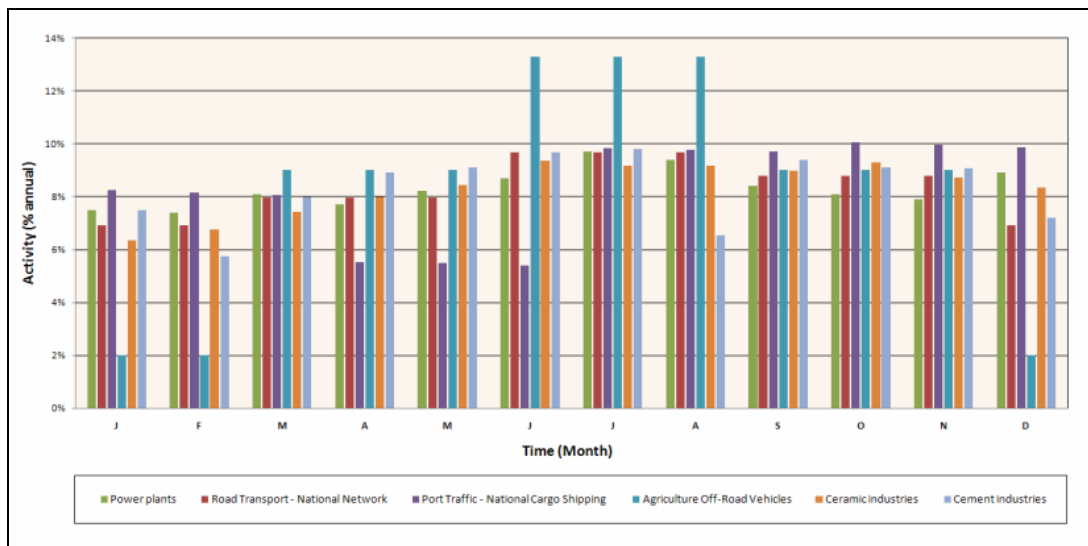
**Εικόνα 3.5** Εκπομπές CO από τις οδικές μεταφορές στο κύριο οδικό κυκλοφοριακό δίκτυο της Αθήνας.



**Εικόνα 3.6** Εκπομπές PM<sub>10</sub> σωματιδίων ανά κατηγορία κτιρίων στην Αθήνα.



**Εικόνα 3.7** α) Ολικές εκπομπές VOCs στην Αθήνα για τον μήνα Ιούλιο, β) Ετήσιες ολικές εκπομπές PM<sub>10</sub> σωματιδίων στην Ελλάδα.

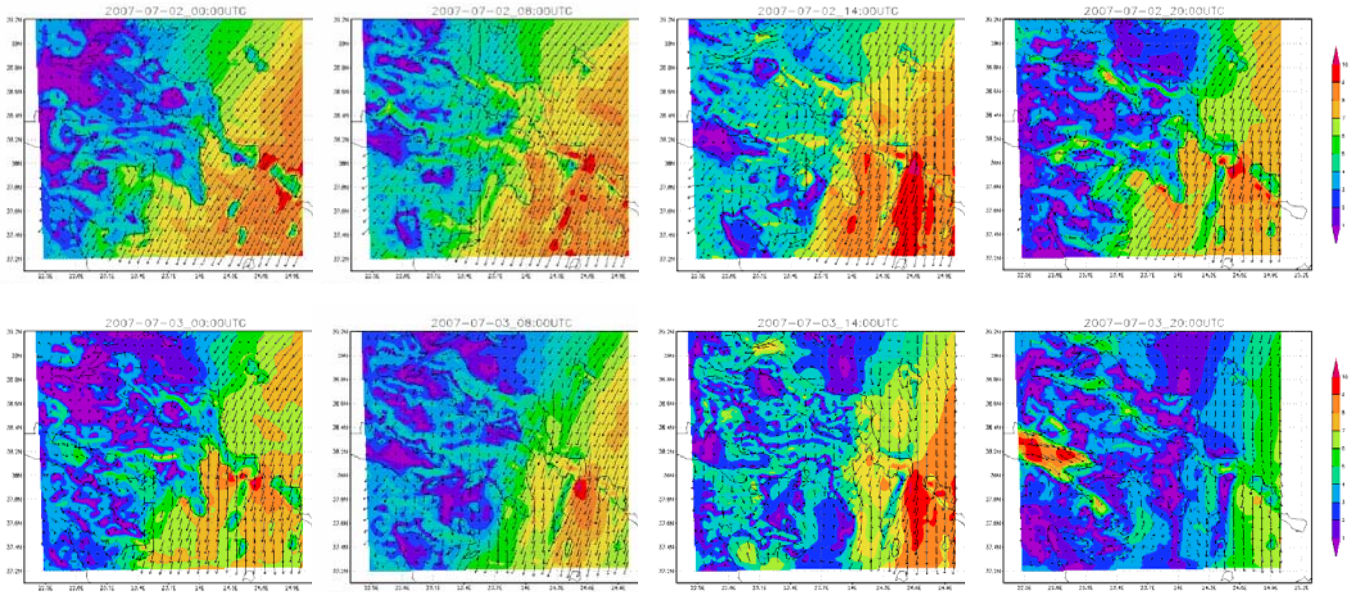


**Εικόνα 3.8** Μηνιαία διακύμανση των εκπομπών διαφόρων κατηγοριών πηγών.

### Φάση 3: Εφαρμογή του συστήματος μοντέλων MM5-CAMx

Το υπολογιστικό σύστημα εφαρμόστηκε σε ειδικές περιπτώσεις (case studies) προκειμένου να υπολογιστούν οι ωριαίες τιμές συγκέντρωσης του όζοντος και των αιωρούμενων PM<sub>10</sub> σωματιδίων στην ΕΠΑ για τα παρακάτω χρονικά διαστήματα: 1) 25-26-27 Ιουνίου, 2) 2-3 Ιουλίου, 3) 23 έως 29 Ιουλίου και 4) 27-28-29 Αυγούστου, του έτους 2007. Στη συνέχεια παρατίθενται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου για τις ημέρες 2 και 3 Ιουλίου 2007, οι οποίες χαρακτηρίζονται από την επικράτηση διαφορετικών μετεωρολογικών συνθηκών. Στην Εικόνα 3.9 παρουσιάζονται τα πεδία ανέμου της 2<sup>ας</sup> και 3<sup>ης</sup> Ιουλίου 2007. Τα πεδία ανέμου την 2<sup>η</sup> Ιουλίου 2007 χαρακτηρίζονται από την παρουσία ανέμων Β-ΒΔ διεύθυνσης, με μέτρια έως ισχυρή ένταση κατά τη διάρκεια της ημέρας στο κεντρικό και ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης. Κατά τη διάρκεια της ημέρας ο άνεμος στην Αθήνα πνέει με ταχύτητα της τάξης των 5 με 8 m/s.

Την 3<sup>η</sup> Ιουλίου 2007, οι άνεμοι στο θαλάσσιο χώρο της περιοχής μελέτης εξακολουθούν να είναι μέτριας έως ισχυρής εντάσεως. Στο μεγαλύτερο μέρος του ηπειρωτικού τμήματος της περιοχής μελέτης όμως, οι άνεμοι είναι μικρότερης έντασης σε σχέση με την προηγούμενη ημέρα και δεν ξεπερνούν τα 5 m/s. Κατά τη διάρκεια των μεσημεριανών ωρών, έχουμε την εμφάνιση συστήματος θαλάσσια αύρας στην περιοχή του Σαρωνικού κόλπου, το οποίο δεν εισχωρεί βαθιά στην ξηρά όπου βρίσκεται το αστικό συγκρότημα της Αθήνας. Το σύστημα αυτό εξακολουθεί να υφίσταται και τις πρώτες βραδινές ώρες οπότε στο σύνολο σχεδόν της περιοχής μελέτης επικρατούν άνεμοι χαμηλής έως και πολύ χαμηλής εντάσεως.

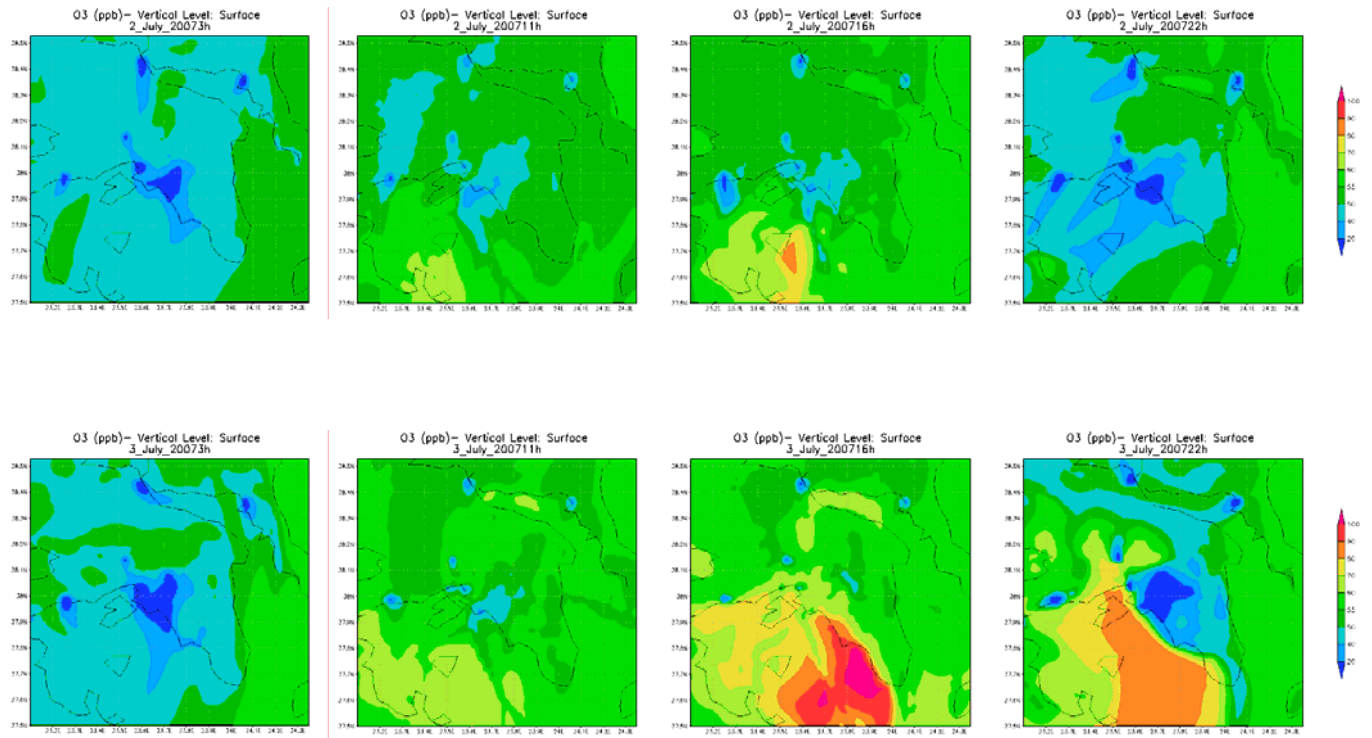


**Εικόνα 3.9.** Πεδία ανέμου της 2<sup>ας</sup> και 3<sup>ης</sup> Ιουλίου 2007 στην ΕΠΑ.

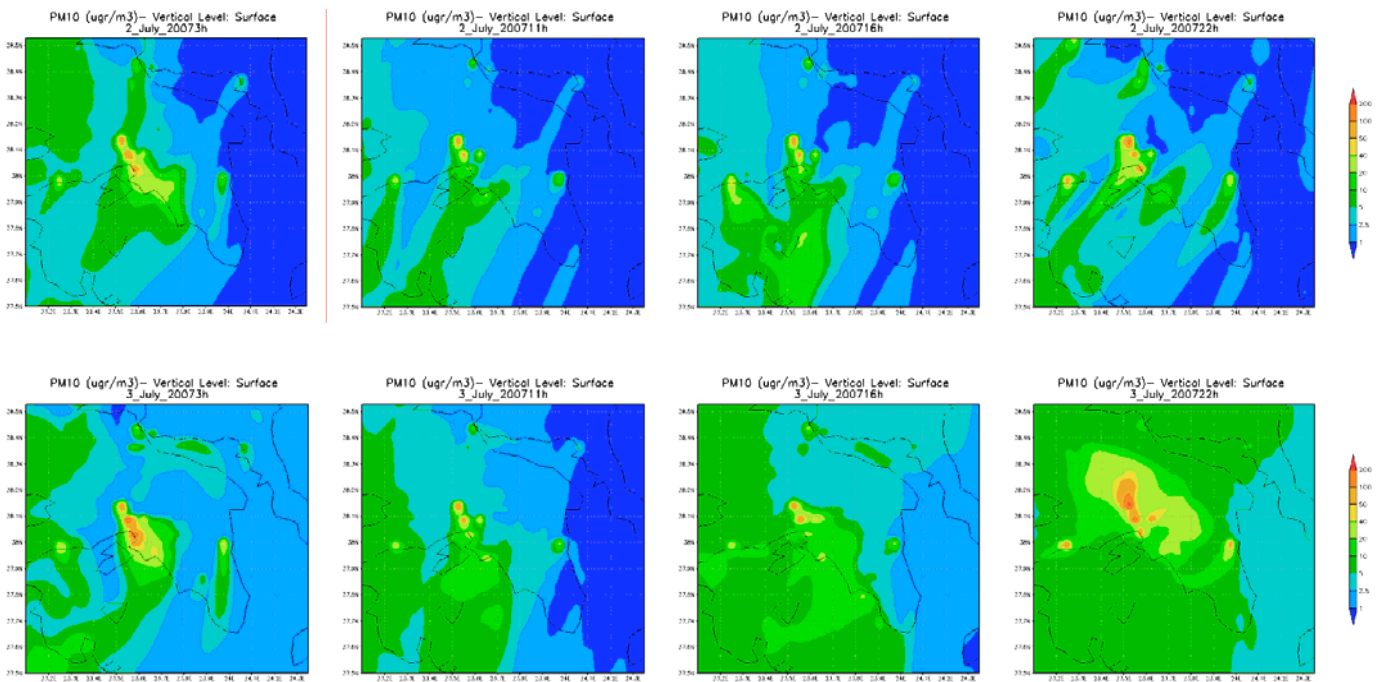
Στην Εικόνα 3.10 παρουσιάζονται οι ωριαίες συγκεντρώσεις όζοντος για την 2<sup>η</sup> και 3<sup>η</sup> Ιουλίου 2007. Οι μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν στις 2 Ιουλίου 2007 επιτρέπουν την καλύτερη διασπορά των αερίων ρύπων με αποτέλεσμα κατά τη διάρκεια της ημέρας στην Αθήνα οι συγκεντρώσεις του όζοντος να κυμαίνονται μεταξύ 40 ppbv και 50 ppbv, ενώ στο νομό Αττικής δεν ξεπερνούν τα 55 ppbv. Η μέγιστη συγκέντρωση όζοντος εμφανίζεται γαί τιw 16:00 και είναι ίση με 82 ppbv, κατά συνέπεια δεν ξεπερνά το όριο των 90 ppbv που ορίζει η νομοθεσία για τις ωριαίες συγκεντρώσεις όζοντος. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις του όζοντος εντοπίζονται νοτίως της Αθήνας, στην περιοχή του Σαρωνικού Κόλπου, και οφείλονται στη φωτοχημική παραγωγή όζοντος εξαιτίας της μεταφοράς των πρωτογενών αερίων ρύπων που εκπέμπονται στην Αθήνα από το σύστημα των ανέμων Β-ΒΔ διεύθυνσης που επικρατεί εκείνη την ημέρα.

Την 3<sup>η</sup> Ιουλίου 2007, οι άνεμοι χαμηλότερης έντασης σε συνδυασμό με το σύστημα της θαλάσσιας αύρας που εμφανίζεται στην περιοχή μελέτης έχουν ως αποτέλεσμα τη μη ευνοϊκή διασπορά των αερίων ρύπων και την πιθανή επανακυκλοφορία τους. Έτσι οι συγκεντρώσεις όζοντος στις 3 Ιουλίου 2007 είναι μεγαλύτερες σε σχέση με εκείνες της προηγούμενης μέρας. Στις 16:00 οι συγκεντρώσεις όζοντος στην Αθήνα κυμαίνονται μεταξύ 60 ppbv και 70 ppbv, ενώ στην περιοχή του Σαρωνικού Κόλπου έχουμε την εμφάνιση των μέγιστων συγκεντρώσεων της 3<sup>ης</sup> Ιουλίου 2007. Στο μεγαλύτερο μέρος του Σαρωνικού Κόλπου οι συγκεντρώσεις όζοντος είναι μεγαλύτερες από το όριο των 90 ppbv και φθάνουν τα 105 ppbv.





Εικόνα 3.10. Ωριαίες συγκεντρώσεις όζοντος την 2<sup>η</sup> και 3<sup>η</sup> Ιουλίου 2007 στην ΕΠΑ.



Εικόνα 3.11. Ωριαίες συγκεντρώσεις των  $PM_{10}$  την 2<sup>η</sup> και 3<sup>η</sup> Ιουλίου 2007 στην ΕΠΑ.

Παρόμοια είναι τα συμπεράσματα και από τη μελέτη των ωριαίων συγκεντρώσεων  $PM_{10}$  στην ΕΠΑ για την ίδια χρονική περίοδο (Εικόνα 3.11). Από την Εικόνα αυτή προκύπτει ότι οι συγκεντρώσεις των  $PM_{10}$  στην Αθήνα στις 16:00 και στις 22:00 της 3<sup>ης</sup> Ιουλίου 2007 είναι περισσότερο από 2 φορές μεγαλύτερες σχέση με τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις της 2<sup>ας</sup> Ιουλίου 2007. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις των  $PM_{10}$  εμφανίζονται κατά τη διάρκεια και των δύο ημερών στη βιομηχανική ζώνη δυτικά του αστικού συγκροτήματος της Αθήνας. Θα πρέπει να σημειωθεί ωστόσο, ότι κατά την εφαρμογή του φωτοχημικού μοντέλου, οι εκπομπές των βιομηχανικών εγκαταστάσεων της βιομηχανικής ζώνης θεωρήθηκαν ως επιφανειακές εξαιτίας της μη διαθεσιμότητας δεδομένων σχετικών με το ύψος των καμινάδων των βιομηχανιών και των φυσικών χαρακτηριστικών των καυσαερίων εξόδου (π.χ. θερμοκρασία, ταχύτητα εκπομπής των καυσαερίων).

#### **Φάση 4: Αξιολόγηση της επίδοσης των φωτοχημικών μοντέλων στο Λεκανοπέδιο Αθηνών**

Προκειμένου να αποτιμηθεί η αξιοπιστία του συστήματος των μοντέλων MM5-CAMx στην προσομοίωση των επιπέδων συγκέντρωσης του όζοντος και των αιωρούμενων σωματιδίων ( $PM_{10}$ ) στην ΕΠΑ, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των ωριαίων συγκεντρώσεων όζοντος και των ημερήσιων συγκεντρώσεων  $PM_{10}$  έτσι όπως αυτές προέκυψαν από τα αποτελέσματα του μοντέλου CAMx για τα χρονικά διαστήματα: 1) 25-26-27 Ιουνίου, 2) 2-3 Ιουλίου, 3) 23 έως 29 Ιουλίου και 4) 27-28-29 Αυγούστου του έτους 2007 με μετρήσεις του δικτύου μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης της περιοχής Αθηνών του ΥΠΕΧΩΔΕ. Στην περιοχή της Αττικής υπάρχουν δεκαεπτά σταθμοί οι θέσεις των οποίων φαίνονται στην Εικόνα 3.12.

Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται οι σταθμοί του ΥΠΕΧΩΔΕ των οποίων οι μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του φωτοχημικού μοντέλου CAMx σε ό,τι αφορά το όζον και τα αιωρούμενα σωματίδια.



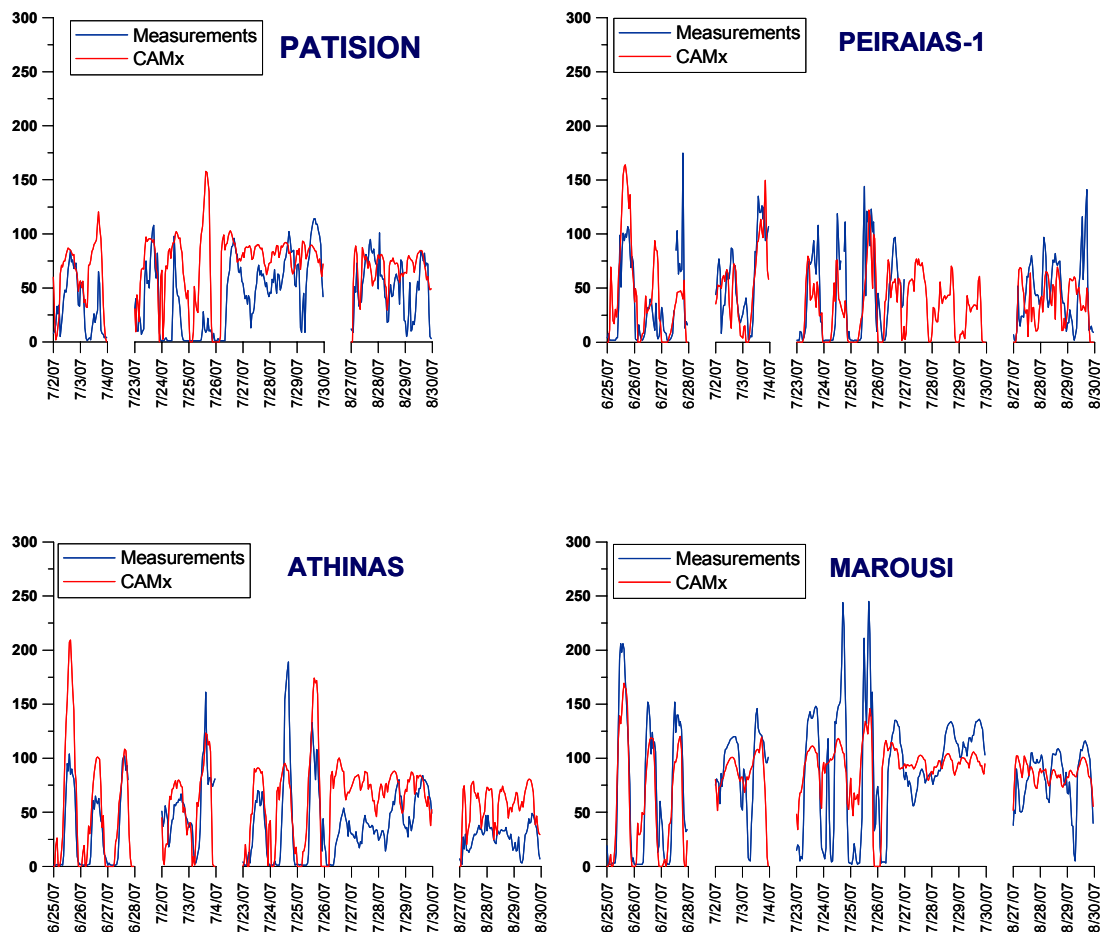


**Εικόνα 3.12** Οι θέσεις των σταθμών μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΥΠΕΧΩΔΕ στην περιοχή της Αττικής.

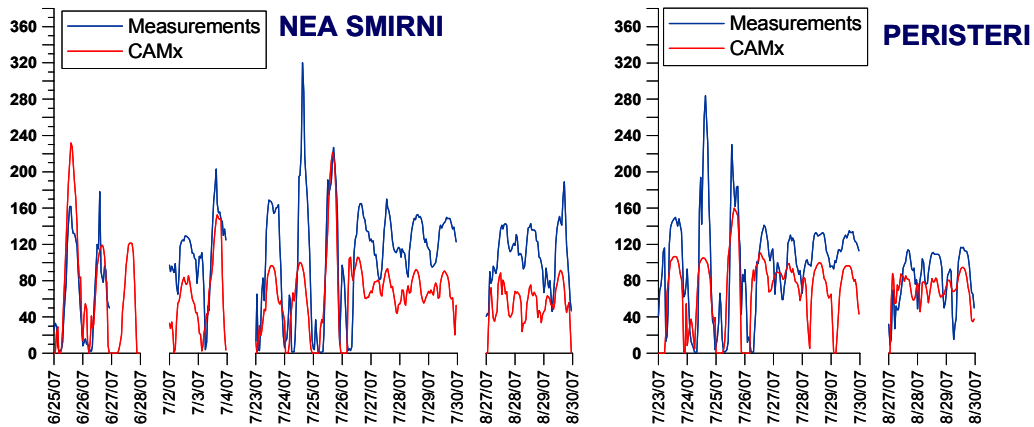
Πίνακας 3.2. Οι σταθμοί των οποίων οι μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της επίδοσης του φωτοχημικού μοντέλου CAMx σε ό,τι αφορά το όζον και τα αιωρούμενα σωματίδια (Πηγή: ΕΑΡΘ-ΥΠΕΧΩΔΕ).

Σταθμός	Χαρακτηρισμός	O <sub>3</sub>	PM <sub>10</sub>
Αθηνάς	Αστικός-Κυκλοφορίας	x	
Αριστοτέλους	Αστικός-Κυκλοφορίας		x
Λυκόβρυση	Περιαστικός	x	x
Μαρούσι	Αστικός-Κυκλοφορίας	x	x
Νέα Σμύρνη	Αστικός-Υποβάθρου	x	
Πατησίων	Αστικός-Κυκλοφορίας	x	
Πειραιάς 1	Αστικός-Κυκλοφορίας	x	x
Περιστερί	Αστικός-Υποβάθρου	x	
Αγ.Παρασκευή	Περιαστικός-Υποβάθρου	x	x
Ελευσίνα	Περιαστικός-Βιομηχανικός	x	
Ζωγράφου	Περιαστικός-Υποβάθρου	x	x
Θρακομακεδόνες	Περιαστικός-Υποβάθρου	x	x

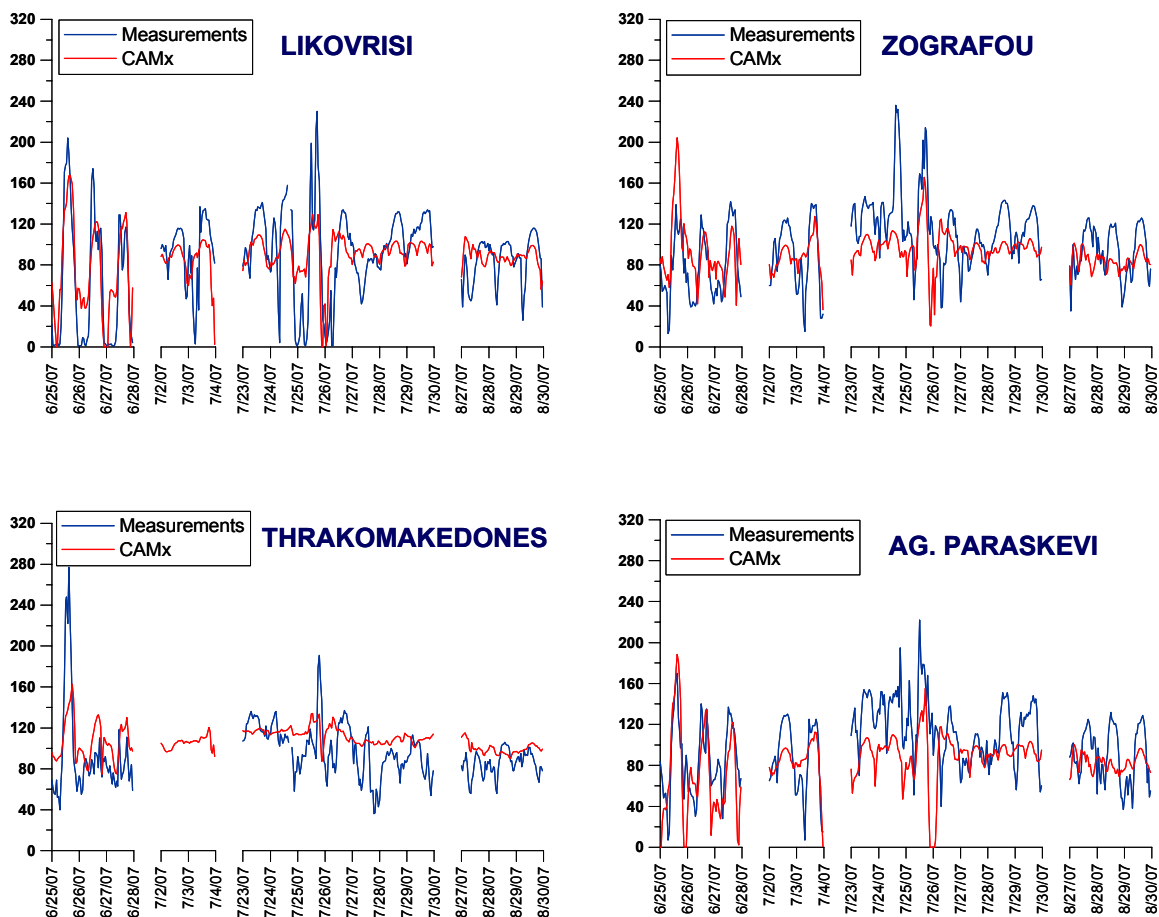
Στις Εικόνες 3.13 έως 3.16 παρουσιάζονται οι ωριαίες συγκεντρώσεις του όζοντος όπως υπολογίστηκαν από το φωτοχημικό μοντέλο CAMx για τις κυψελίδες του πλέγματος στις οποίες είχαν χωροθετηθεί οι σταθμοί μέτρησης και οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις από τους σταθμούς. Από τις Εικόνες 3.13 και 3.14 μπορούμε να διαπιστώσουμε πως η επίδοση του φωτοχημικού μοντέλου στην αναπαραγωγή των επιπέδων συγκέντρωσης του όζοντος στους σταθμούς που χαρακτηρίζονται ως αστικοί είναι αρκετά ικανοποιητική. Στους περισσότερους από τους αστικούς σταθμούς και κατά τη διάρκεια αρκετών ημερών, τα αποτελέσματα του μοντέλου ακολουθούν την ημερήσια πορεία των συγκεντρώσεων του όζοντος, έτσι όπως αυτή προκύπτει από τις μετρήσεις εδάφους. Το φωτοχημικό μοντέλο επιτυγχάνει επίσης τον χρόνο εμφάνισης των μέγιστων συγκεντρώσεων. Από τις Εικόνες 3.15 και 3.16 προκύπτει ότι το μοντέλο μπορεί να αναπαράγει ικανοποιητικά, κυρίως, τα μέσα επίπεδα συγκέντρωσης του όζοντος στους σταθμούς που χαρακτηρίζονται ως περιαστικοί.



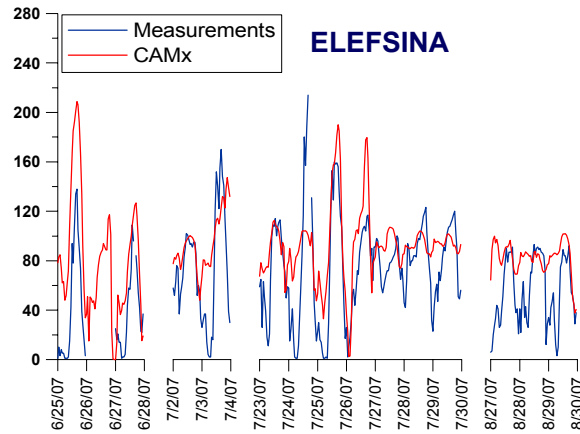
**Εικόνα 3.13** Ωριαίες συγκεντρώσεις όζοντος (σε  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) από το μοντέλο και από τις μετρήσεις στους σταθμούς που χαρακτηρίζονται ως αστικοί-κυκλοφορίας.



**Εικόνα 3.14** Ωριαίες συγκεντρώσεις όζοντος ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) από το μοντέλο και από τις μετρήσεις στους σταθμούς που χαρακτηρίζονται ως αστικοί- υποβάθρου.



**Εικόνα 3.15** Ωριαίες συγκεντρώσεις όζοντος ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) από το μοντέλο και από τις μετρήσεις στους σταθμούς που χαρακτηρίζονται ως περιαστικοί-υποβάθρου.



**Εικόνα 3.16** Ωριαίες συγκεντρώσεις όζοντος ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) από το μοντέλο και από τις μετρήσεις στον σταθμό της Ελευσίνας (περιαστικός-βιομηχανικός).

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων όζοντος του φωτοχημικού μοντέλου CAMx υπολογίστηκαν επίσης οι παρακάτω στατιστικές παράμετροι: α) το μέσο σχετικό σφάλμα (Mean Relative Error, MRE), β) το μέσο σχετικό σφάλμα ανεξάρτητο πρόσημου (Mean Unsigned Relative Error, MURE).

Οι στατιστικές αυτές παράμετροι ορίζονται ως εξής:

$$\text{MRE} = \frac{\sum_{i=0}^N (O_{ij} - S_{ij}) / O_{ij}}{N} \quad (3.2)$$

$$\text{MURE} = \frac{\sum_{i=0}^N |O_{ij} - S_{ij}| / O_{ij}}{N} \quad (3.3)$$

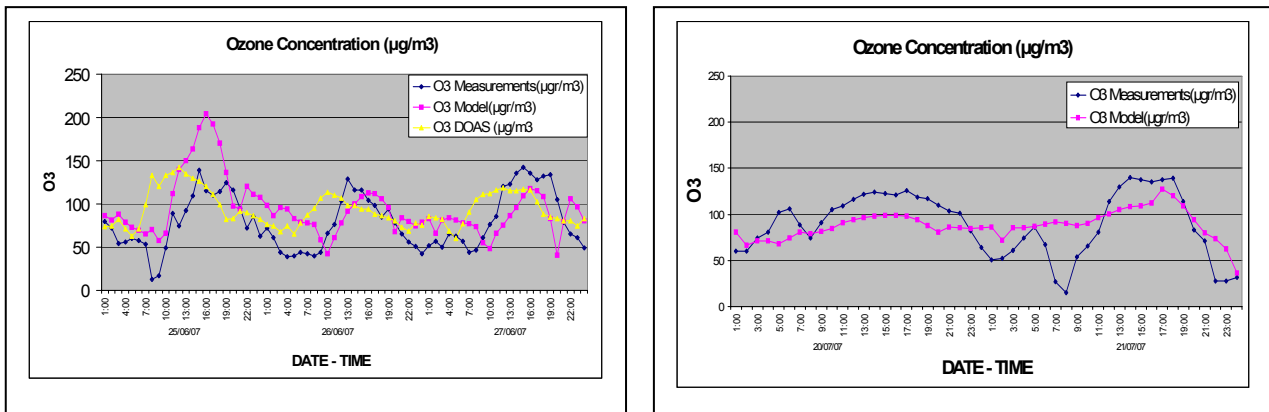
όπου  $O_{ij}$  είναι η μέτρηση υπ' αριθμόν  $i$  του ρύπου  $j$  (στην παρούσα μελέτη όπου  $j$  είναι το όζον) για την οποία η συγκέντρωση του  $j$  είναι μεγαλύτερη από μια συγκέντρωση κατωφλίου,  $S_{ij}$  είναι η αντίστοιχη υπολογιζόμενη τιμή από το μοντέλο, και  $N$  είναι ο αριθμός των ωριαίων μετρήσεων του  $j$  σε κάθε σταθμό μέτρησης για τις οποίες η συγκέντρωση του  $j$  είναι μεγαλύτερη από την τιμή κατωφλίου. Για τις προαναφερθείσες παραμέτρους η Περιβαλλοντική Υπηρεσία των Ηνωμένων Πολιτειών (EPA) έχει προσδιορίσει αποδεκτές οριακές τιμές για τις προσομοιώσεις όζοντος.

Οι τιμές αυτές είναι οι παρακάτω:

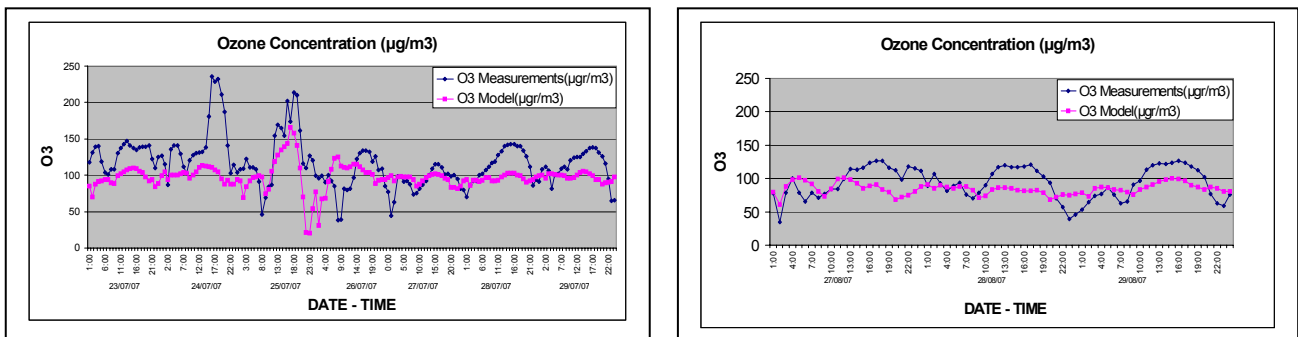
1. Μέσο σχετικό σφάλμα: έως  $\pm 15\%$
2. Μέσο σχετικό σφάλμα ανεξάρτητο πρόσημου: μικρότερο από  $35\%$ .

Προκειμένου να περιορισθεί η επίδραση των χαμηλών συγκεντρώσεων όζοντος, η συγκέντρωση κατωφλίου που επελέγη για τον υπολογισμό των παραπάνω στατιστικών παραμέτρων ήταν τα  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Ακολουθως, στην Εικόνα 3.17 παρουσιάζουμε τη σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων του όζοντος από το δίκτυο της ΕΑΡΘ και του DOAS, και του φωτοχημικού μοντέλου. Παρατηρούμε, γενικά, ότι το μοντέλο CAMx αναπαράγει αρκετά αξιόπιστα τα μέγιστα και τα ελάχιστα των συγκεντρώσεων του όζοντος για την περίοδο 25-27/6/2007 (Εικόνα 3.17, αριστερά), ενώ είναι λιγότερο αξιόπιστο για την περίοδο 20-21/7/2007 (Εικόνα 3.17, δεξιά).



**Εικόνα 3.17** Σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων του όζοντος από το δίκτυο της ΕΑΡΘ και του DOAS, και του φωτοχημικού μοντέλου για την περίοδο 25-27/6/2007 (αριστερά) και 20-21/7/2007 (δεξιά).



**Εικόνα 3.18** Σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων του όζοντος από το δίκτυο της ΕΑΡΘ και του DOAS, και του φωτοχημικού μοντέλου για την περίοδο 24-29/7/2007 (αριστερά) και 27-29/8/2007 (δεξιά).

Στην Εικόνα 3.18, παρατηρούμε, επίσης ότι το μοντέλο CAMx παραμένει και πάλι λιγότερο αξιόπιστο για την περίοδο 24-29/7/2007 (Εικόνα 3.17, δεξιά) και μάλιστα, γενικά υποεκτιμά τις συγκεντρώσεις του όζοντος στην περιοχή του Ζωγράφου

Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται οι τιμές που λαμβάνουν οι στατιστικές παράμετροι ελέγχου της επίδοσης του φωτοχημικού μοντέλου σε κάθε σταθμό μέτρησης, αναφορικά με το όζον. Στην πλειοψηφία των σταθμών, οι στατιστικές παράμετροι παίρνουν ικανοποιητικές τιμές που είναι εντός των αποδεκτών οριακών τιμών ή απέχουν λίγο από αυτές, γεγονός που φανερώνει ότι υπάρχει σχετικά καλή συμφωνία ανάμεσα στις μετρήσεις και στους υπολογισμούς του μοντέλου αναφορικά με το όζον.

Πίνακας 3.3. Στατιστικές παράμετροι ελέγχου της επίδοσης του CAMx αναφορικά με το όζον.

Σταθμός	MRE (%)	MURE (%)
Πατησίων	-3.9	19.2
Πειραιάς 1	25.8	39.1
Αθηνάς	-13.7	36.3
Μαρούσι	11.9	20.2
Νέα Σμύρνη	39.5	44.6
Περιστέρι	31.6	34.3
Λυκόβρυση	8.3	18.8
Ζωγράφου	8.5	22.1
Θρακομακεδόνες	-16.1	22.2
Αγία Παρασκευή	17.8	26.5
Ελευσίνα	-12.7	21.6

Η σύγκριση των ημερήσιων συγκεντρώσεων  $PM_{10}$  από αποτελέσματα του μοντέλου και από τις μετρήσεις δείχνει ότι το μοντέλο υποεκτιμά σημαντικά τις συγκεντρώσεις των  $PM_{10}$  (περίπου κατά 80%). Στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι τιμές των συγκεντρώσεων  $PM_{10}$  από το μοντέλο και από μετρήσεις σε ένα αστικό και σε ένα περιαστικό σταθμό της ΕΠΑ για ορισμένες από τις ημέρες εφαρμογής του συστήματος μοντέλων MM5-CAMx. Η επίδοση του μοντέλου συνδέεται με την πιθανή υποεκτίμηση των ανθρωπογενών  $PM_{10}$  εκπομπών, καθώς και με το γεγονός του ότι οι φυσικές εκπομπές των  $PM_{10}$  δεν ελήφθησαν υπόψη κατά την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων εξαιτίας της απουσίας διαθέσιμων δεδομένων.



Πίνακας 3.4. Ημερήσιες συγκεντρώσεις  $PM_{10}$  ( $\mu g/m^3$ ) από το μοντέλο και από μετρήσεις σε ένα αστικό και σε ένα περιαστικό σταθμό της ΕΠΑ (Πηγή: ΕΑΡΘ-ΥΠΕΧΩΔΕ).

		<b>Αριστοτέλους (Αστικός – Κυκλοφορίας)</b>	<b>Αγ.Παρασκευή (Περιαστικός – Υποβάθρου)</b>
25-06-07	Μετρήσεις	112	82
	Μοντέλο	29	15
26-06-07	Μετρήσεις	111	73
	Μοντέλο	21	10
27-06-07	Μετρήσεις	106	74
	Μοντέλο	27	12
02-07-07	Μετρήσεις	41	21
	Μοντέλο	10	3
03-07-07	Μετρήσεις	54	25
	Μοντέλο	14	6

## **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Σύμφωνα με τα όσα περιγράφηκαν προηγουμένως, το Παραδοτέο 3 έχει πλήρως ολοκληρωθεί καθώς το σύστημα μοντέλων MM5-CAMx έχει εγκατασταθεί και εφαρμοστεί επιτυχώς και τα αποτελέσματα του συστήματος σε ό,τι αφορά τις συγκεντρώσεις όζοντος και των αιωρούμενων  $PM_{10}$  σωματιδίων που μπορούν να αξιολογηθούν και στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν την επίδραση της ποιότητας της ατμόσφαιρας στην υγεία των κατοίκων του Λεκανοπεδίου Αθηνών. Επίσης, τα αποτελέσματα του συστήματος μοντέλων MM5-CAMx για το όζον και τα αιωρούμενα σωματίδια ( $PM_{10}$ ) έχουν αξιολογηθεί συγκρινόμενα με μετρήσεις από το επίγειο δίκτυο μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης της περιοχής Αθηνών του ΥΠΕΧΩΔΕ.

## **Βιβλιογραφία**

1. Atkinson, R., 2000. Atmospheric chemistry of VOCs and NOx. *Atmos. Environ.*, 34, pp. 2063–2101.
2. EMEP/CORINAIR, 2006. Atmospheric Emission Inventory Guidebook, 3rd Edition.

3. ENVIRON, 2006. User's guide CAMx - Comprehensive Air Quality Model with extensions, Version 4.40. ENVIRON International Corporation, 415.899.0700, September 2006.
4. Fuentes, J.D., Hayden, B.P., Garstang, M., Lerdau, M., Fitzjarrald, D., Baldocchi, D.D., Monson, R., Lamb, B., Geron, Ch., 2001. New Directions: VOCs and biosphere-atmosphere feedbacks. *Atmos. Environ.*, 35, pp. 189–191.
5. Grell, G. A., J. Dudhia and D. R. Stauffer, 1994. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). NCAR Technical Note, NCAR/TN-398+STR.
6. Guenther A. B., Zimmerman P. R., Harley P.C., Monson R.K., Fall, R., 1993. Isoprene and monoterpene rate variability: model evaluations and sensitivity analyses. *Journal of Geophysical Research*, 98, pp. 12609-12617.
7. Hong, S.-Y. and H.-L. Pan, 1996: Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a mediumrange forecast model. *Mon. Weather Rev.*, 124, pp. 2322-2339.
8. Madronich, S. 1993. UV radiation in the natural and perturbed atmosphere, in *Environmental Effects of UV (Ultraviolet) Radiation* (M. Tevini, ed.), Lewis Publisher, Boca Raton, pp. 17-69.
9. Markakis, K., Poupkou, A. and Melas, D., 2008. Compilation of a spatially and temporally disaggregated anthropogenic PM10 emission inventory for Greece submitted in *Science of the Total Environment*.
10. Symeonidis, P., Poupkou, A., Gkantou, A., Melas, D., Yay, O.D., Pouspourika, E. and Balis, D., 2008. Development of a computational system for estimating biogenic NMVOCs emissions based on GIS technology. *Atmos. Environ.*, 42, pp. 1777–1789.

Βεβαιώνεται η εκτέλεση του παραπάνω έργου

Αθήνα, 10/03/2008

Ο Επιστημονικός Υπεύθυνος

Δρ. Ιωάννης ΖΙΩΜΑΣ  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.