



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

**«ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΗΣ
ΦΩΤΟΧΗΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΣΤΗΝ
ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΩΝ ΑΘΗΝΩΝ ΜΕΤΑ ΤΟ 2004»**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΦΑΜΕΛΗ ΚΥΡΙΑΚΗ - ΜΑΡΙΑ

ΦΥΣΙΚΟΣ

ΑΘΗΝΑ, 2015



Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος ΙΙ . Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στον Τομέα Φυσικής Περιβάλλοντος και Μετεωρολογίας του Τμήματος Φυσικής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών σε συνεργασία με το Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Δημοσθένη Ασημακόπουλου.

Προορισμός του εκπαιδευτικού ταξιδιού που ξεκίνησε πριν από περίπου 8 χρόνια με την συνεργασία μου με το Αστεροσκοπείο Αθηνών είναι η ολοκλήρωση της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής.

Ευχαριστώ θερμά τα μέλη της τριμελούς συμβουλευτική επιτροπής τον κο Ασημακόπουλο Δημοσθένη, την κα Κοτρώνη Βασιλική και την κα Ασημακοπούλου Βασιλική που με εμπιστεύτηκαν. Συγκεκριμένα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κο Ασημακόπουλο για την καθοδήγησή του και τις δημιουργικές προτάσεις του, την κα Κοτρώνη για την συνεισφορά της στις μετεωρολογικές προσομοιώσεις και τις συμβουλές της και τέλος την Κική γιατί ήταν πάντα κοντά μου όχι μόνο ως ουσιαστική επιβλέπουσα του διδακτορικού αλλά ως συνεργάτης και φίλη. Την ευχαριστώ γιατί μαζί της μοιράστηκα τις ανησυχίες και τον ενθουσιασμό μου όλα αυτά τα χρόνια.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συναδέλφους μου στο γραφείο Α4 του τομέα Φυσικής Περιβάλλοντος για τις επιστημονικές και μη συζητήσεις που μοιραστήκαμε. Τους παλαιότερους, Μαρία Χατζάκη, Γιώργο Σγουρό και Γιώργο Καταβούτα για τις σημαντικές συμβουλές τους, τους νεότερους και συνοδοιπόρους υποψήφιους διδάκτορες Βασίλη Κωστόπουλο, Νικολέτα Ζιακοπούλου και Δέσποινα Ρίζου, τον Πάνο Ράπτη και την Εύα Τσαϊρίδη για το πάντα ευχάριστο κλίμα στο γραφείο. Αναπόσπαστο κομμάτι της συγκεκριμένης αίθουσας αποτελούσαν οι καθηγητές μας ο κος Ασημακόπουλος, ο κος Χέλμης και η κα Φλόκα τους οποίους και θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά γιατί ήταν πάντα κοντά μας. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω την Δρ. Στέλλα Πατεράκη για την συνεργασία μας και την συνάδελφο Δρ. Βίβιαν Δόριζα για τη συμπαράστασή της.

Το τελικό στάδιο της παρούσας διατριβής ολοκληρώθηκε στο Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στους νέους συναδέλφους μου Άννα Καράλη, Δέσποινα Παρασκευοπούλου, Ελένη Αθανασοπούλου, Μάνο Φλαούντα, Ορέστη Σπάρτερ, Παναγιώτη Κοσμόπουλο και Mike Taylor.

Πολλές ευχαριστίες οφείλω στον κο Σερμπή Δημήτρη από το Κέντρο Διαχείρισης Κυκλοφορίας για την παροχή των δεδομένων κυκλοφοριακού φόρτου, την κα Αναματέρου Ευδοκία από το τμήμα Ποιότητας Αέρα του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών Α.Ε. για τα δεδομένα ποιότητας αέρα, τον κο Σαραντόπουλο Αθανάσιο από την ΕΜΥ, την κα Μαντά Ελένη για χορήγηση δεδομένων από τη ΔΕΗ Α.Ε. και την κα Μορφουλάκη από το Εθνικό Κέντρο Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης του Ελληνικού Ινστιτούτου Μεταφορών για την παροχή των δεδομένων κυκλοφοριακού φόρτου.

Δεν θα μπορούσα να παραλείψω τον άντρα μου, Κωστή, τον οποίο και ευχαριστώ ειλικρινά για την υπομονή του. Ήταν δίπλα μου από την αρχή, υποστηρικτικός και ήρεμος, βοηθώντας με να ξεπεράσω όλες τις δυσκολίες.

Συμπαραστάτες σε όλη την εκπαιδευτική μου πορεία υπήρξαν οι γονείς μου, Πέτρος και Αντιγόνη, η αδερφή μου Πένη και η αδερφική μου φίλη Σοφία. Έκαναν πάντα υπομονή, με στήριζαν και πίστευαν σε μένα. Σε αυτούς αφιερώνω την παρούσα διατριβή και τους ευχαριστώ για όλα.

Φαμέλη Σάντυ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής είναι η διερεύνηση της κατανομής της φωτοχημικής και σωματιδιακής ρύπανσης στην Ευρύτερη Περιοχή των Αθηνών (ΕΠΑ). Σημαντικές αλλαγές στη χρήση γης πραγματοποιήθηκαν στο λεκανοπέδιο της Αττικής μετά το 2004, έτος διοργάνωσης των Ολυμπιακών Αγώνων, λόγω της οικιστικής ανάπτυξης περιοχών, που παλαιότερα χαρακτηρίζονταν ως αγροτικές και των έργων υποδομής που κατασκευάστηκαν (Αττική Οδός, Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών "Ελευθέριος Βενιζέλος", κτλ). Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου χρησιμοποιήθηκε το σύστημα μοντέλων MM5/CAMx με το οποίο μελετήθηκε η διασπορά των ρύπων καθώς και οι παράγοντες που οδηγούν στη διαμόρφωση επεισοδίων ρύπανσης στην ΕΠΑ.

Σε αντίστοιχες αριθμητικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν διαπιστώθηκε η έλλειψη επικαιροποιημένης, ολοκληρωμένης και διαχρονικής βάσης δεδομένων εκπομπών για την ΕΠΑ, αλλά και για την Ελλάδα, διαμορφωμένης με βάση τα σύγχρονα τοπικά χαρακτηριστικά και τις ιδιαιτερότητες της περιοχής. Πιο συγκεκριμένα, η βιβλιογραφική αναδρομή η οποία πραγματοποιήθηκε κατέδειξε παλαιότερες προσπάθειες ερευνητών να δημιουργήσουν τέτοιες βάσεις δεδομένων που όμως είτε (α) ήταν αποτέλεσμα χρονικής και χωρικής τοποθέτησης ετήσιων δεδομένων χαμηλής ανάλυσης ($50 \times 50 \text{ km}^2$) από το πρόγραμμα για την παρακολούθηση και αντιμετώπιση της διασυνοριακής ρύπανσης στην Ευρώπη (EMEP), (β) το έτος αναφοράς ήταν παλαιό (2005) χωρίς επικαιροποιημένα δεδομένα κυκλοφοριακού φόρτου ή και (γ) αποτελούσαν από ετήσιες μόνο εκπομπές των οδικών μεταφορών χωρίς να είναι χρονικά και χωρικά διαχωρισμένες. Η ΕΠΑ αποτελεί μια περιοχή ιδιαίτερου ενδιαφέροντος για τους ερευνητές λόγω των αυξημένων επιπέδων ατμοσφαιρικής ρύπανσης που οφείλονται στα ιδιαίτερα μορφολογικά/τοπογραφικά χαρακτηριστικά, στις μετεωρολογικές συνθήκες και κυρίτερα στη συγκέντρωση πληθώρας ανθρωπογενών δραστηριοτήτων στην περιοχή.

Κρίθηκε επομένως επιτακτική η ανάγκη ύπαρξης και δημιουργίας μιας επικαιροποιημένης βάσης απογραφής εκπομπών για την περιοχή ώστε να μελετηθούν σε βάθος οι παράμετροι που οδηγούν στη διαμόρφωση επεισοδίων ρύπανσης και να προταθούν μέτρα για τον έλεγχό τους. Είναι προφανές ότι το σύστημα των μοντέλων δε θα μπορούσε να εξάγει αξιόπιστα αλλά και αξιοποιήσιμα αποτελέσματα χωρίς την ύπαρξη νέων δεδομένων εισόδου και έτσι η εργασία αυτή αποτέλεσε βασικό πυλώνα της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Πρωταρχικός στόχος επομένως της παρούσας διδακτορικής διατριβής ήταν η λεπτομερής καταγραφή και χωροχρονική αποτύπωση

των εκπομπών για την Ελλάδα και την Ευρύτερη Περιοχή των Αθηνών (ΕΠΑ) σε ωριαία κλίμακα και η δημιουργία της βάσης δεδομένων εκπομπών F.E.I. – GREGAA (Flexible Emission Inventory for GREece and the GAA) η οποία θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τις εφαρμογές με τα φωτοχημικά μοντέλα και με τη βοήθεια της οποίας θα μπορούν να εξαχθούν ποσοτικά και ποιοτικά συμπεράσματα για το είδος των πηγών που συνεισφέρουν στην ποιότητα της ατμόσφαιρας της ΕΠΑ. Στα πλαίσια επομένως της παρούσας διδακτορικής διατριβής αναπτύχθηκε μια πρακτική μεθοδολογία υπολογισμού των εκπομπών για την Ελλάδα και την ΕΠΑ, για τα έτη 2006 έως και 2010, με χρήση τοπικών συντελεστών χρονικού καταμερισμού. Οι εκπομπές κατανεμήθηκαν χωρικά σε δύο πλέγματα, ένα για την Ελλάδα (Πλέγμα 1) με ανάλυση $6 \times 6 \text{ km}^2$ και ένα για την ΕΠΑ (Πλέγμα 2) με ανάλυση $2 \times 2 \text{ km}^2$.

Όσον αφορά στις πηγές, υπολογίστηκαν οι εκπομπές από τις σταθερές πηγές καύσης (οικιακή κατανάλωση για θέρμανση/μαγείρεμα, κατανάλωση στον τριτογενή τομέα παραγωγής), τις μεταφορές (οδικές, θαλάσσιες, αεροπορικές), τα οχήματα εκτός δρόμου, την γεωργία και την κτηνοτροφία. Οι εκπομπές από τη βιομηχανία προήλθαν από τη βάση δεδομένων του Ευρωπαϊκού Μητρώου Έκλυσης και Μεταφοράς Ρύπων (eptr_v5.1) (<http://prtr.ec.europa.eu/>). Η συγκριτική μελέτη της συνεισφοράς των διαφορετικών πηγών στις συνολικές εκπομπές ανέδειξε ότι στις εκπομπές CO τη μεγαλύτερη συνεισφορά κατά τη χρονική περίοδο 2006-2010 έχουν οι οδικές μεταφορές και ακολουθούν οι εκπομπές από τις σταθερές πηγές καύσης. Το ποσοστό που αντιστοιχεί στις οδικές μεταφορές σταδιακά μειώνεται λόγω της μείωσης στην κατανάλωση βενζίνης, την επακόλουθη μείωση των ετήσιων οχηματο-χιλιομέτρων που διανύονται καθώς και στην εισαγωγή των νέων κινητήρων αντιρρυπαντικής τεχνολογίας ενώ το αντίστοιχο ποσοστό των εκπομπών από τις σταθερές πηγές καύσης αυξάνεται λόγω της αυξανόμενης χρήσης βιομάζας ως μέσο θέρμανσης από τα νοικοκυριά. Πολύ σημαντική είναι η δημιουργία περιοχικών χρονικών προφίλ διαχωρισμού των εκπομπών από τις οδικές μεταφορές για την Αττική η οποία πραγματοποιήθηκε με τη ανάπτυξη μεθοδολογίας βασισμένης σε ωριαία δεδομένα κυκλοφοριακού φόρτου από κεντρικούς οδικούς άξονες του λεκανοπεδίου στα πλαίσια συνεργασίας με το Κέντρο Διαχείρισης Κυκλοφορίας της Αττικής. Τα δεδομένα κυκλοφοριακού φόρτου αφορούν στην περίοδο μελέτης 2006-2010 και έδωσαν τη δυνατότητα δημιουργίας πολλαπλών εξειδικευμένων χρονικών συντελεστών ανά έτος, ημέρα και ώρα. Στον τομέα των θαλάσσιων μεταφορών υπερτερούν οι εκπομπές των NOx με αυτές των SOx να ακολουθούν λόγω της χρήσης πετρελαίου ως κύριο καύσιμο. Μεταξύ των λιμανιών οι περισσότερες εκπομπές εκλύονται στον Πειραιά (13.5% και 13.9% επί του συνόλου των εκπομπών NOx και SOx αντίστοιχα για το έτος 2010) καθώς αυτό αποτελεί το μεγαλύτερο επιβατικό και εμπορικό λιμάνι της χώρας. Η βιομηχανική δραστηριότητα

(παραγωγή ενέργειας και κατασκευαστικός τομέας) συνεισφέρει σημαντικά στις συνολικές εκπομπές NO_x και PM₁₀. Οι εκπομπές για το πλέγμα χωρικής ανάλυσης 2x2km² για το έτος 2010 και τους ρύπους CO, NO_x και PM₁₀ είναι 179.81kt, 89.11kt και 7.00kt αντίστοιχα. Η πλειοψηφία των εκπομπών CO προέρχεται από τις οδικές μεταφορές (81.28%) και ακολουθούν οι εκπομπές από τις σταθερές πηγές καύσης (8.32%). Οι εκπομπές NO_x οφείλονται κατά κύριο λόγο στον τομέα των οδικών μεταφορών (46.54%) και της ναυτιλίας (29.32%), ενώ η βιομηχανική δραστηριότητα συνεισφέρει κατά 15.94%. Οι εκπομπές των σωματιδίων PM₁₀ προέρχονται κατά 45.14% από τις σταθερές πηγές καύσης, 24.86% από τις οδικές μεταφορές και κατά 13.00% από τη ναυτιλία.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε φωτοχημική προσομοίωση με την εφαρμογή του συστήματος μοντέλων MM5/CAMx και τη χρήση αφενός λεπτομερούς πλέγματος χωρικής ανάλυσης 2x2km² πάνω από την ΕΠΑ και αφετέρου των εκπομπών που προέκυψαν από την παρούσα διατριβή. Η περίοδος προσομοίωσης διήρκησε από τις 11/6/2010 00.00 UTC ως τις 15/6/2010 00.00 UTC, με τις δύο πρώτες ημέρες να αποτελούν spin-up περίοδο. Οι ήπιες συνοπτικές συνθήκες που επικράτησαν κατά την περίοδο 13-14/06/2010 ευνόησαν την εμφάνιση συστήματος τοπικής κυκλοφορίας (θαλάσσια αύρα) εντός του λεκανοπεδίου Αττικής το οποίο οδήγησε στην εμφάνιση υψηλών συγκεντρώσεων όζοντος και PM₁₀. Γενικά το μετεωρολογικό μοντέλο MM5 κατάφερε να αναπαράγει την επικρατούσα νοτιοδυτική διεύθυνση του ανέμου στο λεκανοπέδιο της Αττικής καθώς και την ανατολική ροή στην Ανατολική Αττική. Όσον αφορά στην ταχύτητα του ανέμου η απόδοση του μοντέλου κρίθηκε πολύ ικανοποιητική.

Το φωτοχημικό μοντέλο CAMx κατάφερε να αναπαράγει τη μεσημεριανή μέγιστη συγκέντρωση όζοντος που καταγράφηκε από τους σταθμούς μέτρησης τόσο ως προς τη χρονική στιγμή εμφάνισης, τη χρονική διάρκεια όσο και ως προς το μέγεθος στους περισσότερους σταθμούς. Το πλούμιο του O₃ κατάφερε να εισχωρήσει στο εσωτερικού του λεκανοπεδίου και να προσεγγίσει ακόμη και τους πιο απομακρυσμένους σταθμούς. Όσον αφορά στα αιωρούμενα σωματίδια PM₁₀, η αριθμητική προσομοίωση δίνει υψηλές συγκεντρώσεις στο κέντρο της αστικής περιοχής του λεκανοπεδίου, στα βορειοανατολικά προάστια, στην Ευρύτερη Περιοχή του Πειραιά και τα νοτιοδυτικά παράλια και τις δύο ημέρες μελέτης. Συνοψίζοντας, το φωτοχημικό μοντέλο CAMx απέδωσε πιο ρεαλιστικά το πεδίο διασποράς των ρύπων στην Αττική, για την περίπτωση νοτιας-νοτιοδυτικής ροής η οποία ευνόησε τη δημιουργία υψηλών επιπέδων όζοντος και PM₁₀. Παλαιότερες μελέτες έδειχναν υποεκτίμηση και αδυναμία αναπαραγωγής της διασποράς των ρύπων σε όλο το υπολογιστικό πεδίο, εξαιτίας της αβεβαιότητας των δεδομένων απογραφής εκπομπών. Συμπερασματικά, η δημιουργία του συστήματος απογραφής εκπομπών με νέα, επίσημα, αξιόπιστα δεδομένα βοήθησε στη βελτιωμένη προσομοίωση των χαρακτηριστικών διασποράς των ρύπων στην ΕΠΑ. Επιπλέον λόγω του υπολογισμού των εκπομπών από

διαφορετικές πηγές η συγκεκριμένη βάση δεδομένων είναι δυνατόν να παρέχει τη διαχρονική μελέτη των χαρακτηριστικών των διαφόρων τύπων πηγών καθώς και να καλύπτει με τη διαρκή ανανέωσή της τις αλλαγές που συντελούνται λόγω των διαφόρων κοινωνικοοικονομικών συνθηκών.

ABSTRACT

"Photochemical and particulate pollution characteristics above the Greater Athens Area after 2004"

The purpose of the present thesis is the study of the photochemical and particulate pollution above the Greater Athens Area (GAA). Significant land use changes took place in the rapidly developed Attica Peninsula after 2004, the year that the Olympic Games took place, due to the residential development of areas previously characterized as rural and the large scale construction works (Attiki Odos highway, Athens International Airport etc). For this reason, the photochemical model CAMx coupled by the meteorological model MM5 were selected in order to investigate the pollutant distribution as well as the factors that lead to the formation of pollution episodes in the GAA.

Previous modeling studies of air pollution above the GAA revealed the lack of an up to date and accurate emission inventory. Even though several efforts were made to construct emission inventories for Greece and the GAA, still there does not exist a spatially and temporally resolved one based on data from relevant authorities and organizations. Therefore, the primary objective of this thesis was to construct an emission inventory in order to examine the emissions trend in Greece and the GAA for the period 2006-2010 on a spatial scale of $6 \times 6 \text{ km}^2$ and $2 \times 2 \text{ km}^2$, respectively and on a temporal scale of 1 hour.

The final database named F.E.I. - GREGAA (Flexible Emission Inventory for GREece and the GAA) was constructed according to the EMEP/EEA Emission Inventory Guidebook 2009 and 2013, as proposed by the European Environment Agency. The emission sources were categorized in 10 types (SNAP levels). The structure of F.E.I. – GREGAA is open so as to insert data updates for all SNAP levels and to be able to study various emissions scenarios and/or different emissions factors depending on current needs. It can be used in applications with photochemical models and contribute to quantitative and qualitative conclusions concerning the type of sources that contribute to the air quality of the GAA.

Regarding the sources, emissions were calculated from stationary combustion sources (domestic consumption for heating/cooking, tertiary sector), transportation (road, navigation and aviation), off-road vehicles, agriculture and livestock. Emissions from industry were provided by the European Registry database Pollutant Release and Transfer (eprtr_v5.1) (<http://prtr.ec.europa.eu/>). The comparative study of the contribution of different sources to the total emissions showed that the road transport and stationary combustion sources contribute most to the CO emissions for the period 2006-2010. The proportion of emissions from stationary combustion sources increased due

to the increasing use of biomass burning in households while the reduction in gasoline consumption followed by the reduction in the annual vehicle-kilometers traveled and the introduction of new clean engine technology led to the reduction of the annual CO road transport emissions. Temporal coefficients (yearly, monthly, daily and hourly profiles) were developed for the GAA with the use of hourly traffic counts provided by the Attica Traffic Management Center for the period 2006 – 2010 highlighting the special characteristics of the GAA traffic. In the maritime transport NO_x and SO_x emissions prevailed thanks to the oil fuel consumption. Most emissions are released in Piraeus since it is the largest passenger and commercial port in the country (13.5% and 13.9% of total NO_x and SO_x respectively in 2010). Industrial activity (energy production and construction sector) contributes significantly to total NO_x and PM₁₀ emissions. CO, NO_x and PM₁₀ emissions for the GAA for the year 2010 were 179.81kt, 89.11kt and 7.00kt respectively. Road transport contributed most to CO emissions (81.28%), while CO emissions from stationary combustion sources were 8.32% of total emissions. NO_x emissions were mainly due to road transport (46.54%) and navigation (65.83%), while industrial activity's contribution was 15.94%. PM₁₀ emissions derived by 45.14% from stationary combustion sources, 24.86% from road transport and 13.00% from navigation.

The meteorological and photochemical simulations were performed with the modeling system MM5/CAMx with the grid nesting method having the new emission inventory as input. The simulation period lasted from 11/6/2010 00.00 UTC until 15/6/2010 00.00 UTC with the first two days used as a spin-up period. The mild synoptic conditions that prevailed during the period 13-14/06/2010 favored the development of sea breeze above the GAA which led to high O₃ and PM₁₀ concentrations. Comparison of CAMx results with measurements provided by the Greek Ministry of Environment revealed a satisfactory agreement especially for the urban and suburban background stations. The model managed to reproduce the afternoon peak ozone concentrations recorded by monitoring stations. The plume of O₃ penetrated the interior of the basin and reached even the most remote stations. Concerning PM₁₀, the numerical simulation revealed high concentrations at the city centre and the southeastern suburbs.

Further work envisaged includes (a) **the in depth study of the dispersion patterns of primary and secondary pollutants above the GAA under different meteorological conditions and segregation of those leading to pollution episodes**, (b) **the detailed mapping of the distribution of pollutants above the area and identification of those with poor air quality and frequent exceedances** and, (c) **for the latter case, the study of the factors contributing to the levels observed** (e.g., regional transport of pollutants and their precursors, local emission sources, etc).

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	25
1.1 Κίνητρο και αντικείμενο της διατριβής	25
1.2 Διάρθρωση της διατριβής	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	36
2.1 Περιοχικά κλιματικά και τοπογραφικά χαρακτηριστικά της Ελλάδας.....	36
2.2 Το Λεκανοπέδιο της Αττικής.....	37
2.2.1 Γενικά στοιχεία για την Αττική.....	37
2.2.2 Περιοχικά κλιματικά και τοπογραφικά χαρακτηριστικά της Αττικής	41
2.2.3 Θερμική Αστική Νησίδα.....	44
2.3 Εξέλιξη ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην Ευρύτερη Περιοχή των Αθηνών	46
2.4 Αναδρομή στα μοντέλα προσομοίωσης ατμοσφαιρικής ρύπανσης	52
2.5 Υπολογιστικές μελέτες για την Αττική	54
2.6 Συμπεράσματα από το κεφάλαιο 2.....	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ	62
3.1 Πεδία απογραφής εκπομπών	62
3.2 Τύποι πηγών	65
3.3 Απογραφή εκπομπών για την Ελλάδα και την Ευρύτερη Περιοχή των Αθηνών	66
3.3.1 Δημιουργία πλεγμάτων	69
3.3.2 Μέθοδος χωρικού καταμερισμού εκπομπών	70
3.4 Πηγές ρύπανσης	81
3.4.1 Σταθερές πηγές καύσης.....	81

3.4.2 Εκπομπές από οδικές μεταφορές.....	93
3.4.3 Εκπομπές από τις αεροπορικές μεταφορές	113
3.4.4 Εκπομπές από τις θαλάσσιες μεταφορές.....	123
3.4.5 Εκπομπές από οχήματα εκτός δρόμου	131
3.4.6 Εκπομπές από τη βιομηχανική δραστηριότητα	134
3.4.7 Εκπομπές από τη γεωργία και την κτηνοτροφία	137
3.5 Συγκριτική μελέτη των εκπομπών για την Ελλάδα και την Αττική.....	143
3.6 Συμπεράσματα από το κεφάλαιο 3	149
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ	153
4.1 Περιγραφή του φωτοχημικού μοντέλου CAMx	153
4.1.1 Αριθμητική προσέγγιση	155
4.1.2 Διαμόρφωση του πλέγματος του CAMx.....	157
4.1.3 Διαχείριση των εκπομπών	160
4.1.4 Χημικοί μηχανισμοί	163
4.1.5 Δεδομένα εισόδου και εξόδου στο CAMx.....	164
4.2 Περιγραφή συνθηκών περιόδου προσομοίωσης	167
4.2.1 Μετεωρολογικές συνθήκες	167
4.2.2 Ποιότητα αέρα	174
4.3 Μεθοδολογία προσομοιώσεων.....	177
4.3.1 Αποτελέσματα μετεωρολογικών προσομοιώσεων	180
4.3.2 Προσομοιώσεις ποιότητας αέρα	187
4.4 Συμπεράσματα από το κεφάλαιο 4	204
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	208

5.1 Συμπεράσματα.....	208
5.1.1 Γενικά συμπεράσματα	209
5.1.2 Συμπεράσματα από τη ανάπτυξη της βάσης δεδομένων εκπομπών	210
5.1.3 Συμπεράσματα από την αριθμητική προσομοίωση	213
5.2 Μελλοντική έρευνα	216
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	219
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΜΗΤΡΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ ..	233
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΧΡΟΝΙΚΟΥ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΠΟ ΤΙΣ ΟΔΙΚΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΤΤΙΚΗ	236
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ	239
Συντομογραφίες	243

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1. Νομός Αττικής (γκρι πλαίσιο), αστικός ιστός (πορτοκαλί πλαίσιο) και βιομηχανικές περιοχές (κίτρινο πλαίσιο).....	38
Σχήμα 2-2. Στατιστικά στοιχεία για την ΕΠΑ ((Πηγή: βάση δεδομένων της Eurostat και Ε.Π.Σ.Ε.).	39
Σχήμα 2-3. Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες ($^{\circ}\text{C}$) για τον μήνα Φεβρουάριο για επιλεγμένες ελληνικές πόλεις (Πηγή: www.meteo.gr).	40
Σχήμα 2-4. Διαχρονική εξέλιξη της ρύπανσης σε επιλεγμένους σταθμούς του ΕΔΠΑΡ για την περίοδο 1990 – 2013.	47
Σχήμα 3-1. Πλέγμα 1 ανάλυσης $6 \times 6 \text{ km}^2$ για την Ελλάδα και Πλέγμα 2 ανάλυσης $2 \times 2 \text{ km}^2$ για την Αττική (οριοθετημένο με μαύρο πλαίσιο).....	69
Σχήμα 3-2. Πυκνότητα πληθυσμού κατανεμημένη σε κελιά πλέγματος $1 \times 1 \text{ km}^2$ (Πηγή: Eurostat, http://epp.eurostat.ec.europa.eu).	71
Σχήμα 3-3. Κατανομή του πληθυσμού που προέκυψε από τη βάση δεδομένων της Eurostat (σχ. 3-1) σε κελιά πλέγματος α) $6 \times 6 \text{ km}^2$ και β) $2 \times 2 \text{ km}^2$	72
Σχήμα 3-4. Αποτύπωση του βαθμού αστικοποίησης α) για την Ελλάδα και β) για το πλέγμα 2.	73
Σχήμα 3-5. Χάρτες χρήσης γης για το πλέγμα 2, χωρικής ανάλυσης $6 \times 6 \text{ km}^2$. Α) παλιά χρήση γης και β) νέα χρήση γης.	75
Σχήμα 3-6. Χάρτες χρήσης γης για το πλέγμα χωρικής ανάλυσης $2 \times 2 \text{ km}^2$. α) παλιά χρήση γης και β) νέα χρήση γης.	76
Σχήμα 3-7. Δυναμικοί γεωγραφικοί χάρτες (shapefiles) για την Ελλάδα (πηγή: OpenStreetMap).	79
Σχήμα 3-8. Αναπαράσταση της διαδικασίας εκπομπής αερίων από μικρές εγκαταστάσεις καύσης (Πηγή: EMEP/EEA E.I. Guidebook 2013).	81
Σχήμα 3-9. Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες ($^{\circ}\text{C}$) για τον μήνα Φεβρουάριο (Πηγή: www.meteo.gr). .	84
Σχήμα 3-10. Πηγές καύσης και τύπος καυσίμου που περιλαμβάνονται στην κατηγορία SNAP 02. (Πηγή: EMEP/EEA E.I. Guidebook 2013).	84
Σχήμα 3-11. Μεθοδολογία χωρικής αποτύπωσης εκπομπών από τον οικιακό και τον τριτογενή τομέα παραγωγής.....	87
Σχήμα 3-12. Μεθοδολογία χωρικής αποτύπωσης εκπομπών από τον αγροτικό τομέα.	87
Σχήμα 3-13. Χωρικά κατανεμημένες εκπομπές (τόννοι) από τις σταθερές πηγές καύσης στο πλέγμα της Ελλάδας και το Πλέγμα 2 για το έτος 2010.	89
Σχήμα 3-14. Ετήσιες εκπομπές από α) τον οικιακό και β) μη-οικιακό τομέα για την Ελλάδα.....	90

Σχήμα 3-15. Ετήσιες εθνικές εκπομπές ανά πηγή (τζάκια = fireplaces, σόμπες = stoves και λέβητες = boilers) για το έτος 2010.....	91
Σχήμα 3-16. Διάκριση επιβατικών αυτοκινήτων ανάλογα με τη χρήση καυσίμων α) στην Ελλάδα και β) στην Αττική. G = Gasoline, D = Diesel	97
Σχήμα 3-17. Ετήσια κατανάλωση καυσίμου από τον τομέα των οδικών μεταφορών για την Ελλάδα (πηγή: Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής). LPG = <i>Liquid Petroleum Gas</i> , CNG = <i>Compressed Natural Gas</i>	98
Σχήμα 3-18. Μεθοδολογία χωρικής αποτύπωσης εκπομπών από τις οδικές μεταφορές.....	99
Σχήμα 3-19. Ετήσιες εκπομπές (τόννοι) για την Ελλάδα και την Αττική για τη χρονική περίοδο 2006 – 2010.	104
Σχήμα 3-20. Εκπομπές (τόννοι) στην Αττική (2010) για κάθε συνθήκη οδήγησης.	105
Σχήμα 3-21. Λόγος VOC/NOx για την Ελλάδα και την Αττική.....	107
Σχήμα 3-22. Α) Επιμερισμός των NMVOCs για την Αττική και β) παρουσίαση των 10 ενώσεων με τις υψηλότερες εκπομπές.....	107
Σχήμα 3-23. Χωρικά κατανεμημένες CO εκπομπές για την Ελλάδα για το έτος 2010- α)αστικές εκπομπές και β) εκπομπές στους αυτοκινητόδρομους.	108
Σχήμα 3-24. Χωρικά κατανεμημένες CO, NOx και PM _{2.5} εκπομπές για την Αττική για το έτος 2010.....	109
Σχήμα 3-25. Χωρικά κατανεμημένες CO και NOx εκπομπές για την Αττική για το έτος 2010.....	109
Σχήμα 3-26. Κυκλοφοριακός φόρτος στην Αττική – μέσες μηνιαίες, ημερήσιες και ωριαίες τιμές για το έτος 2010.....	110
Σχήμα 3-27. Ωριαίες μέσες τιμές CO από την απογραφή εκπομπών και τις μετρήσεις (Σταθμός Πατησίων) για τους μήνες Φεβρουάριο και Ιούνιο (τιμές μόνο για την Παρασκευή).	112
Σχήμα 3-28. Πορεία πτήσης αεροσκάφους (απογείωση-προσγείωση).	113
Σχήμα 3-29. Μεθοδολογία υπολογισμού εκπομπών για κάθε τύπο αεροσκάφους κατά τη διάρκεια του κύκλου LTO.....	116
Σχήμα 3-30. Α) Σύνολο ελληνικών αεροδρομίων και β) χωρική κατανομή των εκπομπών CO από την αεροπορία για το έτος 2010.	116
Σχήμα 3-31. Μεθοδολογία χρονικού καταμερισμού των εκπομπών από την αεροπορία.	117
Σχήμα 3-32. Χρονικά προφίλ (μηνιαία, εβδομαδιαία και ωριαία) κίνησης αεροσκαφών στα αεροδρόμια των Αθηνών και της Ρόδου.	118
Σχήμα 3-33. Χρονική διακύμανση των ετήσιων εκπομπών από την αεροπορία.....	119
Σχήμα 3-34. Α) Ετήσιος αριθμός πτήσεων (εξωτερικού-εσωτερικού) στο σύνολο των ελληνικών αεροδρομίων και β) ετήσια διακύμανση πτήσεων στα 10 μεγαλύτερα ελληνικά αεροδρόμια.	119

Σχήμα 3-35. Χρονική διακύμανση του ετήσιου αριθμού των πτήσεων (εσωτερικού και εξωτερικού) για τα αεροδρόμια της Αθήνας και της Ρόδου.....	121
Σχήμα 3-36. Χρονική διακύμανση των ετήσιων εκπομπών CO και NOx για τα αεροδρόμια της Αθήνας και της Ρόδου.	121
Σχήμα 3-37. Κυριότεροι τύποι αεροσκαφών που προσγειώνονται/απογειώνονται στα αεροδρόμια της Αθήνας και της Ρόδου.	122
Σχήμα 3-38. Μεθοδολογία υπολογισμού εκπομπών από τις θαλάσσιες μεταφορές.	126
Σχήμα 3-39. Ετήσιες εθνικές εκπομπές 6 ρύπων (NOx, PM ₁₀ , PM _{2.5} , NMVOC, CO και SOx) από τις θαλάσσιες μεταφορές για τη χρονική περίοδο 2006 – 2011.	128
Σχήμα 3-40. Ετήσιες εκπομπές στα 15 μεγαλύτερα ελληνικά λιμάνια για τη χρονική περίοδο 2006 – 2011.	129
Σχήμα 3-41. Ετήσια κατανομή αφίξεων ανά τύπο πλοίου σε τρία μεγάλα λιμάνια.....	129
Σχήμα 3-42. Α) Χωρική κατανομή των ετήσιων εκπομπών NOx για το έτος 2010 α) από τη ναυσιπλοΐα και β) τη διεθνή ναυσιπλοΐα.....	130
Σχήμα 3-43. Ετήσιες εκπομπές (τόννοι) από τα οχήματα εκτός δρόμου α) για την περίοδο 2006-2011 για την Ελλάδα και β) για το έτος 2010 για την Ελλάδα και την Αττική.....	133
Σχήμα 3-44. Χωρική κατανομή των ετήσιων εκπομπών NOx από οχήματα εκτός δρόμου για το έτος 2010 στα πλέγματα χωρικής ανάλυσης 6x6km ² και 2x2km ²	133
Σχήμα 3-45. Χωρική κατανομή των βιομηχανικών μονάδων στην Ελλάδα και το πλέγμα 2.	135
Σχήμα 3-46. Ετήσιες εκπομπές (τόννοι) των ρύπων CO, NOx, SOx, PM ₁₀ , NMVOC και NH ₃ από την βιομηχανική δραστηριότητα στην Ελλάδα κατά την περίοδο 2007-2011.....	136
Σχήμα 3-47. Εκπομπές από την κτηνοτροφία κατά τα διάφορα στάδια εκτροφής των ζώων και εκμετάλλευσης των αποβλήτων τους.	137
Σχήμα 3-48. Α) Ετήσια διακύμανση του ζωϊκού πληθυσμού στην Ελλάδα και β) χωρική κατανομή του ζωϊκού πληθυσμού σε γεωγραφικά διαμερίσματα για το έτος 2010.....	139
Σχήμα 3-49. Κατηγορίες χρήσης γης στις οποίες πραγματοποιήθηκε η χωρική κατανομή των ετήσιων εκπομπών από τη διαχείριση της κοπριάς.....	139
Σχήμα 3-50. Μέθοδος χωρικής αποτύπωσης των εκπομπών από τη φυτική παραγωγή.	141
Σχήμα 3-51. Α) Ετήσια διακύμανση των εκπομπών NH ₃ και β) συνολικές εκπομπές NH ₃ από την γεωργία και την κτηνοτροφία για το έτος 2010 χωρικά κατανομημένες στα κελιά του πλέγματος 2.	142
Σχήμα 4-1. Οριζόντια αναπαράσταση του πλέγματος Arakawa C που χρησιμοποιείται από το CAMx (Πηγή: Environ, 2014).	158

Σχήμα 4-2. Σχηματική παρουσίαση του κατακόρυφου πλέγματος και των κυψελίδων του CAMx. Τα δύο χαμηλότερα κύρια επίπεδα χωρίζονται σε τέσσερα ενδιάμεσα στο Fine Grid 1 και τα πέντε χαμηλότερα επίπεδα του Fine Grid 1 χωρίζονται σε εννέα επίπεδα στο Fine Grid 2(Πηγή: Environ, 2014).	159
Σχήμα 4-3. Ένα παράδειγμα οριζόντιου πλέγματος, το οποίο παριστάνει δύο μικρότερα πλέγματα μέσα στο κυρίως πλέγμα διαστάσεων 10 x 10. Το εξωτερικό πλέγμα περιέχει 10 × 12 κελιά και το εσωτερικό πλέγμα περιέχει 6 × 10 κελιά(Πηγή: Environ, 2014).	160
Σχήμα 4-4. Σύστημα μοντελοποίησης MM5 (Πηγή: http://www2.mmm.ucar.edu/mm5).	166
Σχήμα 4-5. Μετεωρολογικοί σταθμοί του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας.	169
Σχήμα 4-6. Χάρτες επιφανείας για την περίοδο 11-14 Ιουνίου 2010.	170
Σχήμα 4-7. Μετεωρολογικές παράμετροι για την περίοδο 11-14 Ιουνίου 2010 στους σταθμούς μέτρησης του δικτύου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, α) σχετική υγρασία, β) ταχύτητα ανέμου και γ) επιφανειακή θερμοκρασία.....	171
Σχήμα 4-8. Διεύθυνση ανέμου στους σταθμούς μέτρησης του δικτύου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας στις 14 και 15 Ιουνίου 2010.	173
Σχήμα 4-9. Ωριαίες συγκεντρώσεις O ₃ οι οποίες μετρήθηκαν από τους σταθμούς του ΠΕΡΠΑ. (Πηγή: ΥΠΕΚΑ, http://www.ypeka.gr/).....	175
Σχήμα 4-12. Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις PM ₁₀ όπως μετρήθηκαν από τους σταθμούς του ΠΕΡΠΑ. (Πηγή: ΥΠΕΚΑ, http://www.ypeka.gr/).....	176
Σχήμα 4-13. Σταθμοί μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΥΠΕΚΑ και του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών "Ελευθέριος Βενιζέλος".	177
Σχήμα 4-14. Σύστημα πλεγμάτων για τιςπροσομοιώσεις.	178
Σχήμα 4-15. Εκπομπές CO και NO _x (tn/h) από τις οδικές, τις θαλάσσιες μεταφορές και τη βιομηχανική δραστηριότητα για τις επιλεγμένες ημερομηνίες.	180
Σχήμα 4-16 Πεδίο διεύθυνσης και ταχύτητας (m/s) ανέμου στις 13-14/06/2010.	184
Σχήμα 4-17. Ωριαία διακύμανση ταχύτητας ανέμου από μετρήσεις στους σταθμούς του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και τα αποτελέσματα του μοντέλου MM5.....	185
Σχήμα 4-18. Ωριαία διακύμανση ταχύτητας ανέμου από μετρήσεις στους σταθμούς της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας και τα αποτελέσματα του μοντέλου MM5.....	186
Σχήμα 4-19. Χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων O ₃ στις 13/06/2010 για το πλέγμα χωρικής ανάλυσης 2x2km ²	195

Σχήμα 4-20. Σύγκριση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης με μετρήσεις O_3 για τις 13/06/2010.	196
Σχήμα 4-21. Χωρική κατανομή συγκεντρώσεων O_3 στις 14/06/2010 για το Πλέγμα 3.	198
Σχήμα 4-22. Σύγκριση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης με μετρήσεις O_3 για τις 14/06/2010.	199
Σχήμα 4-23. Χωρική κατανομή συγκεντρώσεων PM_{10} στις 13-14/06/2010 για το Πλέγμα 3.	202
Σχήμα 4-24. Κατανομή των ωριαίων συγκεντρώσεων PM_{10} που προέκυψαν από την αριθμητική προσομοίωση για την περίοδο 13 και 14 Ιουνίου 2010.	203
Σχήμα 4-25. Σύγκριση των ωριαίων συγκεντρώσεων PM_{10} που προέκυψαν από την αριθμητική προσομοίωση με μετρήσεις από το δίκτυο των σταθμών του αεροδρομίου Αθηνών για την περίοδο 13 και 14 Ιουνίου 2010.	203
Σχήμα Π-1-1. Το Πλέγμα EMEP και τα τρία πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση.	234
Σχήμα Π-1-2. Εκπομπές CO (tonnes) για το έτος 2010 από την καύση για την παραγωγή ενέργειας (SNAP1) και τις οδικές μεταφορές (SNAP7) χωρικά κατανεμημένες στο πλέγμα του EMEP.	235
Σχήμα Π-1-3. Εκπομπές CO (tonnes) για το έτος 2010 από τις οδικές μεταφορές (SNAP7) χωρικά κατανεμημένες στο Πλέγμα 1 της προσομοίωσης.	235

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1. Χημικές ενώσεις που συμπεριλαμβάνονται σε μία απογραφή εκπομπών ανάλογα με τις ανάγκες της μελέτης.....	63
Πίνακας 3-2. Κατηγοριοποίηση πηγών εκπομπών.....	67
Πίνακας 3-3. Φυσικές παράμετροι επιλεγμένων χρήσεων γης (USGS) για την καλοκαιρινή περίοδο του Βόρειου Ημισφαιρίου (15 Απριλίου–15 Οκτωβρίου). (πηγή: MM5v3, user' guide, terrain).	77
Πίνακας 3-4. Πλήθος κελιών ανά κατηγορία χρήσης γης για κάθε πλέγμα χωρικής ανάλυσης 2x2 km ² και 6x6 km ²	78
Πίνακας 3-5. Πηγές δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των εκπομπών από τις σταθερές πηγές καύσης.....	82
Πίνακας 3-6. Κατανάλωση ενέργειας από τον οικιακό τομέα (Πηγή: Ε.Π.Σ.Ε.).	85
Πίνακας 3-7. Κατανάλωση από τον μη-οικιακό τομέα (Πηγή: Odyssee-Mure project, ανάκτηση στις 15-04-2014).....	85
Πίνακας 3-8. Δεδομένα εισόδου που απαιτούνται από το COPERT και πηγές αυτών.	96
Πίνακας 3-9. Σύθεση στόλου οχημάτων για την Ελλάδα για την περίοδο 2006-2010 (αριθμός οχημάτων).....	97
Πίνακας 3-10. Σύθεση στόλου οχημάτων για την Αττική για την περίοδο 2006-2010 (αριθμός οχημάτων).....	97
Πίνακας 3-11. Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες έτους 2006 για την Ελλάδα(Πηγή: Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία).	98
Πίνακας 3-12. Μηνιαίοι χρονικοί συντελεστές για το έτος 2010.....	101
Πίνακας 3-13. Ημερήσιοι χρονικοί συντελεστές για τον Φεβρουάριο του έτους 2010.	101
Πίνακας 3-14. Ημερήσιοι χρονικοί συντελεστές για τον Ιούνιο του έτους 2010.	101
Πίνακας 3-15. Ωριαίοι χρονικοί συντελεστές για την Αττική, Ιούνιος 2010 (UTC).....	101
Πίνακας 3-16. Εκπομπές (τόνοι) ανά τύπο οχήματος για την Αττική για το έτος 2010 και τα ποσοστά συνεισφοράς κάθε τύπου οχήματος στις συνολικές εκπομπές για κάθε ρύπο και το CO ₂	105
Πίνακας 3-17. Στατιστικές παράμετροι από τη σύγκριση των εκπομπών με μετρήσεις στην Αττική για μια τυπική ημέρα της εβδομάδας (Παρασκευή).....	112
Πίνακας 3-18. Ελληνικοί αερολιμένες.	114
Πίνακας 3-19. Συνολικός αριθμός πτήσεων και ετήσιων εκπομπών για το έτος 2012 στα 10 μεγαλύτερα ελληνικά αεροδρόμια.	120
Πίνακας 3-20. Ετήσιος αριθμός αφίξεων πλοίων στα ελληνικά λιμάνια ανά κατηγορία πλοίου.	127

Πίνακας 3-21. Ενώσεις που συμπεριλαμβάνονται στη βάση δεδομένων εκπομπών ανά κατηγορία πηγής.....	143
Πίνακας 3-22. Εκπομπές CO (kilotonnes) για την Ελλάδα.....	145
Πίνακας 3-23. Εκπομπές NO _x (kilotonnes) για την Ελλάδα.	145
Πίνακας 3-24. Εκπομπές PM ₁₀ (kilotonnes) για την Ελλάδα.	145
Πίνακας 3-25. Εκπομπές CO, NO _x και PM ₁₀ (kilotonnes) για την Ελλάδα.(Πηγή: Markakis et al., 2009).	146
Πίνακας 3-26. Εκπομπές CO (kilotonnes) για την Ελλάδα. (Πηγή: WebDab - EMEP emissions database, updated in 2012).	146
Πίνακας 3-27. Εκπομπές NO _x (kilotonnes) για την Ελλάδα. (Πηγή: WebDab - EMEP emissions database, updated in 2012).	146
Πίνακας 3-28. Ετήσιες εκπομπές των ρύπων CO, NO _x και των σωματιδίων PM ₁₀ σε κιλοτόνους για την Αττική.....	148
Πίνακας 4-1. Σύνοψη των μεθόδων που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο CAMx για τις βασικές φυσικές διεργασίες (Πηγή: Environ, 2014).	156
Πίνακας 4-2. Βασικοί χημικοί μηχανισμοί του μοντέλου CAMx.	164
Πίνακας 4-3. Δεδομένα εισόδου του CAMx.	165
Πίνακας 4-4. Στατιστικά μεγέθη από τη σύγκριση των μετρήσεων ταχύτητας ανέμου με τα αποτελέσματα του μοντέλου MM5.....	186
Πίνακας 4-5. Στατιστικά μεγέθη σύγκρισης των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης με μετρήσεις O ₃ για τις 13/06/2010.	200
Πίνακας 4-6. Στατιστικά μεγέθη σύγκρισης των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης με μετρήσεις O ₃ για τις 14/06/2010.	200
Πίνακας 4-7. Σύγκριση αποτελεσμάτων αριθμητικής προσομοίωσης και μετρήσεων.	203
Πίνακας Π-2-1. Μηνιαίοι συντελεστές για το έτος 2010.....	236
Πίνακας Π-2-2. Ημερήσιοι συντελεστές	236
Πίνακας Π-2-3. Ωριαίοι συντελεστές (μόνο για τους μήνες Ιανουάριο και Ιούνιο).....	237

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Κίνητρο και αντικείμενο της διατριβής

Από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα που έχουν προκύψει τις τελευταίες δεκαετίες είναι η φωτοχημική και σωματιδιακή ρύπανση πάνω από αστικές περιοχές. Το παγκόσμιο ενδιαφέρον έχει στραφεί στη μελέτη των συνθηκών που οδηγούν στη δημιουργία επεισοδίων ρύπανσης και στην εύρεση μέτρων καταπολέμησής τους. Οι έρευνες εστιάστηκαν αρχικά στην κατανόηση των φυσικών και χημικών διεργασιών που πραγματοποιούνται μεταξύ πρωτογενών και δευτερογενών ρύπων και στην καταγραφή των συγκεντρώσεών τους. Καθώς όμως το πρόβλημα γινόταν εντονότερο άρχισαν να οργανώνονται πιο ολοκληρωμένες ερευνητικές μελέτες με κύριο στόχο όχι μόνο τη μελέτη των επεισοδίων ρύπανσης σε θεωρητικό και πειραματικό επίπεδο αλλά και την παρουσίαση θεωρητικών σεναρίων για τα μελλοντικά επίπεδα των συγκεντρώσεων των ρύπων και τη λήψη μέτρων για τον περιορισμό τους.

Από τους πιο σημαντικούς στόχους είναι η κατανόηση των συνθηκών που ορίζουν την ποιότητα του αέρα μιας περιοχής. Η ολοένα και αυξανόμενη αστικοποίηση σε συνδυασμό με τη βιομηχανική ανάπτυξη ορισμένων περιοχών έχουν οδηγήσει στην αύξηση των εκπομπών από ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Δεν αρκούν όμως μόνο οι εκπομπές για να υποβαθμιστεί η ποιότητα του αέρα μιας περιοχής. Οι επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες με τη βοήθεια των οποίων γίνεται η μεταφορά και διάχυση των αρχικών ρύπων παίζουν καθοριστικό ρόλο. Με τον όρο μεταφορά εννοείται ο μηχανισμός με τον οποίο μεταφέρονται οι πρωτογενείς ρύποι από μία πηγή σε ένα αποδέκτη ενώ η διάχυση αντιστοιχεί στην αλλαγή του μεγέθους και του σχήματος ενός

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ
Η ρύπανση του περιβάλλοντος λόγω της ανάμειξης του με τον περιβάλλοντα αέρα. Επομένως, πολλές φορές εμφανίζονται προβλήματα ρύπανσης σε περιοχές που βρίσκονται σε μεγάλες αποστάσεις από την πηγή παραγωγής λόγω της επικρατούσας διεύθυνσης και έντασης του ανέμου. Επιπλέον η ίδια η φύση του ρύπου, το αν είναι δηλαδή πρωτογενής ή δευτερογενής, ο χρόνος ζωής του στην ατμόσφαιρα, οι ιδιότητές του και οι μετασχηματισμοί που υφίσταται από τη στιγμή της εκπομπής και κατά τη διάρκεια της μεταφοράς του καθορίζουν τις επιπτώσεις που θα έχει στο περιβάλλον.

Η πόλη των Αθηνών βρίσκεται στην Νοτιο-Ανατολική Μεσόγειο, μια περιοχή με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά όσον αφορά στο είδος και τα επίπεδα ρύπανσης, στις πηγές ρύπανσης, στις κλιματικές συνθήκες και στις κοινωνικο-οικονομικές περιστάσεις. Σύμφωνα με τους Kanakidou et al. (2011) οι παρατηρήσεις επίγειων δεδομένων σε συνδυασμό με δορυφορικά δεδομένα και ατμοσφαιρικά μοντέλα οδήγησαν στο γενικό συμπέρασμα ότι τα επίπεδα του υποβάθρου τροποσφαιρικού O_3 είναι αρκετά υψηλά στην περιοχή κυρίως την άνοιξη και το καλοκαίρι λόγω της μεγάλης κλίμακας και της περιοχικής μεταφοράς αερίων μαζών από την Ευρώπη αλλά και της φωτοχημείας (Gerasopoulos et al., 2005). Η συνεισφορά των φυσικών πηγών στην εμφάνιση των υψηλών συγκεντρώσεων είναι επίσης σημαντική και χρήζει ακριβέστερης μελέτης. Συγκεκριμένα η σκόνη από τη Σαχάρα είναι καθοριστική για τα υψηλά επίπεδα των συγκεντρώσεων PM_{10} που καταγράφονται στην περιοχή (Kallos et al., 2007; Querol et al., 2009a,b) καθώς επίσης και η μεταφερόμενη ρύπανση (Mihalopoulos et al., 2007).

Σύμφωνα με την έκθεση “The European Environment state and outlook, year 2010: synthesis” του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος (EEA, 2010) οι περιβαλλοντικοί παράγοντες που καθορίζουν το καλό βιοτικό επίπεδο μιας περιοχής είναι η καλή ποιότητα της ατμόσφαιρας, τα χαμηλά επίπεδα θορύβου, τα καθαρά και επαρκή υδάτινα αποθέματα, ο σωστός αστικός σχεδιασμός με αρκετούς δημόσιους χώρους και χώρους πρασίνου και ένα ευχάριστο κλίμα. Ωστόσο, ένα σημαντικό ποσοστό του αστικού πληθυσμού των ευρωπαϊκών πόλεων εκτίθεται σε συγκεντρώσεις αερίων ρύπων πολύ υψηλότερες από τα θεσμοθετημένα όρια. Την περίοδο 1997-2008 το συγκεκριμένο ποσοστό κυμάνθηκε μεταξύ 13% και 62% ανάλογα με τις εκπομπές, την πολεοδομική δόμηση της εκάστοτε πόλης η οποία καθορίζει σημαντικά την διάχυση των εκπομπών και τις μετεωρολογικές συνθήκες. Τα αιωρούμενα σωματίδια (PM) και το όζον (O_3) παραμένουν οι πιο προβληματικοί ρύποι καθώς δεν φαίνεται να επηρεάζονται τόσο σημαντικά όσο αναμενόταν από την παρατηρούμενη μείωση των εκπομπών (Guerreiro et al. 2014).

Από το 2009 και μετά στην Ελλάδα διαμορφώθηκε μια νέα οικονομική κατάσταση η οποία επηρέασε σημαντικά τις ανθρώπινες δραστηριότητες και κατ’ επέκταση το μερίδιο των πηγών

ρύπανσης στο σύνολο των εκπομπών οδηγώντας σε μείωση των μετρούμενων συγκεντρώσεων ρύπων (Vrekoussis et al. 2013). Οι οδικές μεταφορές συνεχίζουν να κατέχουν πολύ υψηλό ποσοστό επί του συνόλου των εκπομπών όμως η μείωση του αριθμού των οχημάτων και η απόσυρση των παλαιού τύπου οχημάτων (PRE Euro, Euro 1) για οικονομικούς λόγους επηρέασαν θετικά τις εκπομπές όπως θα παρουσιαστεί και στη συνέχεια της διατριβής. Επιπλέον, λόγω των υψηλών τιμών του πετρελαίου θέρμανσης αυξήθηκε η χρήση βιομάζας (καυσόξυλα, πελλέτες) και σε πολλά νοικοκυριά τα τζάκια αποτέλεσαν την κύρια πηγή θέρμανσης (Slini et al. 2014, Santamouris et al. 2013) δημιουργώντας επιπρόσθετα προβλήματα σωματιδιακής ρύπανσης κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών ιδιαίτερα εντός των αστικών περιοχών. Στην Θεσσαλονίκη παρατηρήθηκε αύξηση των συγκεντρώσεων των PM_{10} (από 30.1 σε 73.1 $\mu g/m^3$) και των $PM_{2.5}$ (από 19.4 σε 62.7 $\mu g/m^3$) από τη θερμή προς την ψυχρή περίοδο για το έτος 2012 σε σύγκριση με το έτος 2011 (Sarigiannis et al. 2014) ενώ μεταξύ των χειμερινών περιόδων 2012 και 2013 οι συγκεντρώσεις των $PM_{2.5}$ αυξήθηκαν κατά 30% (Saffari et al. 2013). Οι συγκεντρώσεις των σωματιδίων φτάνουν τα 150-200 $\mu g/m^3$ κατά τις νυχτερινές ώρες τέτοιων επεισοδίων. Το 90% της μάζας τους αποδίδεται σε οργανικά ιόντα δικαιολογώντας την καύση ξύλου ως μία από της σημαντικότερες πηγές οργανικών αερολυμάτων στην Ευρώπη (Puxbaum et al., 2007) ενώ έχουν μετρηθεί επίσης πολύ υψηλές τιμές μαύρου άνθρακα και βενζο(α)πυρενίου. Στις μεσαίου μεγέθους πόλεις της Καβάλας και της Δράμας οι μέσες μετρούμενες συγκεντρώσεις για την χειμερινή περίοδο των ετών 2012-2014 κυμάνθηκαν από 33-56, 28-47 και 25-44 $\mu g/m^3$ για τα PM_{10} , $PM_{2.5}$ and PM_{1} , αντίστοιχα με τις υψηλότερες τιμές να καταγράφονται μεταξύ 8.00-10.00 LST και 19.00-22.00 LST σχετιζόμενες με την πρωινή κίνηση των οχημάτων και τις βραδινές ανάγκες για οικιακή θέρμανση (Gaidajis et al. 2014).

Στο λεκανοπέδιο της Αττικής, μια περιοχή περίπου 450 km^2 ζει και δραστηριοποιείται το 1/3 του συνολικού πληθυσμού της Ελλάδας (3,827,624 εκατομμύρια κάτοικοι, ΕΛ.ΣΤΑΤ., 2014a), έχουν πραγματοποιηθεί πολλά έργα υποδομής την τελευταία δεκαετία στα οποία συμπεριλαμβάνονται η κατασκευή νέων αυτοκινητόδρομων (Αττική Οδός, Περιφερειακή Υμηττού), η βελτίωση του ήδη υπάρχοντος οδικού δικτύου (διαπλάτυνση και ανακατασκευή της Λεωφόρου Κηφισού), η κατασκευή του Διεθνούς Αεροδρομίου Αθηνών στα Μεσόγεια. Επίσης έχει αλλάξει η δομή των μέσων μεταφοράς είτε με την εισαγωγή νέων μέσων (μετρό, τραμ, προαστιακός σιδηρόδρομος) είτε με την αλλαγή του τύπου καυσίμου στα ήδη υπάρχοντα μέσα (λεωφορεία φυσικού αερίου). Σαν συνέπεια των παραπάνω παρατηρήθηκε μια στροφή του πληθυσμού προς τα νότια προάστια (Ηλιούπολη, Γλυφάδα) της Αθήνας και την ανατολική Αττική (Μεσόγεια) με αποτέλεσμα τη διαμόρφωση περιοχών που παλαιότερα χαρακτηρίζονταν ως αγροτικές σε αστικές αλλά και την πύκνωση/επέκταση ήδη υφισταμένων αστικών περιοχών (δυτικά και ανατολικά προάστια). Οι χρήσεις γης άλλαξαν διαμορφώνοντας κατά αυτό τον τρόπο ένα νέο πεδίο εκπομπών.

Όλα τα παραπάνω έχουν ως συνέπεια η περιοχή να επιβαρύνεται σημαντικά από τις τοπικές πηγές όπως είναι η κίνηση των οχημάτων, οι μικρές και μεσαίες βιομηχανίες, η οικιακή κατανάλωση ορυκτών καυσίμων και βιομάζας αλλά και από απομακρυσμένες περιοχές λόγω της μεταφοράς σωματιδίων και πρόδρομων ενώσεων όζοντος. Η ιδιαίτερη τοπογραφία της Ευρύτερης Περιοχής των Αθηνών (ΕΠΑ) η οποία δεν διευκολύνει τον επαρκή αερισμό της περιοχής καθώς και οι επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες οδηγούν συχνά στην εμφάνιση επεισοδίων ρύπανσης είτε κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού λόγω της έντονης φωτοχημικής δραστηριότητας είτε κατά τους χειμερινούς μήνες λόγω των θερμοκρασιακών αναστροφών (Grivas et al., 2008). Σαν αποτέλεσμα η Αθήνα συγκαταλέγεται στις 10 πιο μολυσμένες ευρωπαϊκές πόλεις (EEA, 2010). Το 2008 κατέλαβε την πέμπτη θέση στις υπερβάσεις της τιμής του ορίου της συγκέντρωσης του όζοντος (για 68 ημέρες σημειώθηκε υπέρβαση της ευρωπαϊκής τιμής στόχου των $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ για τη μέση μέγιστη ημερήσια τιμή 8-ωρου) ενώ η μέση ετήσια συγκέντρωση του διοξειδίου του αζώτου (NO_2) για το ίδιο έτος ήταν $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (όγδοη θέση για την Αθήνα) με το όριο να βρίσκεται στα $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Τις υψηλότερες θέσεις κατείχαν ιταλικές βιομηχανικές πόλεις όπως το Τορίνο, το Μιλάνο και η Μπολόνια. Οι παραπάνω τιμές προέκυψαν από αστικούς σταθμούς υποβάθρου. Οι υπερβάσεις στους αστικούς σταθμούς αναμένεται να ήταν πολύ περισσότερες και ιδιαίτερα στις περιπτώσεις των σταθμών που βρίσκονταν κοντά σε κάποιο πολυσύχναστο δρόμο.

Οι τελευταίες μελέτες του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας έχουν συνδέσει την έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις αέριων ρύπων με την εμφάνιση αναπνευστικών και καρδιαγγειακών προβλημάτων (WHO, 2005, 2006a, 2006b, 2007, 2008). Οι επιπτώσεις στην υγεία σχετίζονται τόσο με την βραχυπρόθεσμη (διάστημα μερικών ωρών ή ημερών) όσο και μακροχρόνια έκθεση (πάνω από μήνες ή χρόνια) σε υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων προκαλώντας περιστατικά όπως ο βήχας, το άσθμα αλλά και τη μείωση του προσδόκιμου ζωής (EEA, 2013a). Τα αποτελέσματα της πρόσφατης έρευνας των Rückerl et al. (2014) υποστήριξαν την υπόθεση ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση μπορεί να επιδεινώσει αθηροσκληρωτικές ασθένειες και να προκαλέσει βλάβη οργάνων σε ευαίσθητους πληθυσμούς.

Επιδημιολογικές μελέτες αποδίδουν τις πιο σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία στην σωματιδιακή ρύπανση. Η πιο πρόσφατη μελέτη του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (WHO, 2013) συνδέει τη μακροχρόνια έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις λεπτών σωματιδίων ($\text{PM}_{2.5}$) με καρδιαγγειακούς και αναπνευστικούς θανάτους, καθώς και την αυξημένη εμφάνιση ασθενειών, όπως είναι οι παιδικές αναπνευστικές παθήσεις. Οι Samoli et al. (2011) διερεύνησαν κατά πόσον τα επεισόδια σκόνης από την Αφρική μπορούν να επιδεινώσουν τις βραχυπρόθεσμες επιπτώσεις στην υγεία που σχετίζονται με τη ρύπανση PM στα αστικά κέντρα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποίησαν καθημερινά δεδομένα ρύπανσης του αέρα και θνησιμότητας για την Αθήνα κατά την περίοδο 2001-

2006 και διαπίστωσαν ότι οι επιπτώσεις των σωματιδίων ήταν σημαντικά υψηλότερες κατά τη διάρκεια επεισοδίων που δεν οφείλονται σε μεταφορά σκόνης από μεγάλες αποστάσεις, όπως η σκόνη της Σαχάρας καθώς τα σωματίδια που σχετίζονται με την κυκλοφορία έχουν πιο τοξικές επιδράσεις. Γενικά η μακροχρόνια έκθεση στην ατμοσφαιρική ρύπανση που σχετίζεται με την κυκλοφορία των οχημάτων στην Αθήνα διαπιστώθηκε ότι επιδρά αρνητικά στην εμφάνιση θανατηφόρων και μη καρδιαγγειακών νόσων κυρίως μεταξύ των γυναικών και των νεότερων ατόμων (Katsoulis et al. 2014). Επομένως η ηλικία των ατόμων που ζουν σε επιβαρυνμένες περιβαλλοντικές συνθήκες καθορίζει σημαντικά τις επιπτώσεις στην υγεία τους. Στατιστικά σημαντική σχέση μεταξύ των νοσοκομειακών εισαγωγών παιδικού άσθματος και των ημερήσιων συγκεντρώσεων PM_{10} διαπιστώθηκε από τους Nastos et al. (2010) σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε για την Αθήνα. Οι Katsouyianni et al. (1995) επισημαίνει ότι οι επιπτώσεις στην υγεία λόγω των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των ρύπων και των φωτοχημικά οξειδωτικών ενώσεων ενισχύονται στην περιοχή της Μεσογείου από τις υψηλές θερμοκρασίες και την υγρασία. Στην Αθήνα 1.25- 2.78 $\mu g PM_{10}$ εισπνέονται από τον πληθυσμό ανά $kg PM_{10}$ που υπάρχει στην αστική ατμόσφαιρα (Kassomenos et al. 2014b).

Η ποιότητα της ατμόσφαιρας στην Αττική καταγράφεται σε καθημερινή βάση από το δίκτυο 14 σταθμών (ωριαίες τιμές για τους αέριους ρύπους και ημερήσιες για τα σωματίδια) του Τμήματος Ποιότητας Ατμόσφαιρας του Υπουργείου Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής καθώς και από ερευνητικά κέντρα και πανεπιστήμια είτε σε καθημερινή βάση είτε κατά τη διάρκεια οργανομένων καμπανιών παρέχοντας λεπτομερή δεδομένα συγκεντρώσεων.

Εκτός των πειραματικών δεδομένων χρησιμοποιούνται μοντέλα με τη βοήθεια των οποίων επιτυγχάνεται η αποτύπωση της διασποράς και διάχυσης των αέριων ρύπων και σωματιδίων στην ευρύτερη περιοχή των περιοχών και δύναται η μελέτη των παραγόντων που συντελούν στα υψηλά επίπεδα συγκεντρώσεων ρύπων. Αρκετές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί για ρύπους όπως το όζον (Pilinis et al., 1993, Kallos et al., 1993, Moussiopoulos et al., 1995, Anagnostopoulos and Bergeles, 1998, Giambanis et al., 1998 and Bossioli et al., 2007). Σύμφωνα με τους παραπάνω ερευνητές οι εκπομπές από την κίνηση των οχημάτων σε συνδυασμό με τους τοπικούς μηχανισμούς μεταφοράς και την έντονη φωτοχημική δραστηριότητα οδηγούν στην εμφάνιση επεισοδίων ρύπανσης τόσο στο κέντρο όσο και στα προάστια των Αθηνών. Ωστόσο η έλλειψη ολοκληρωμένων δεδομένων εισαγωγής καθώς και οι αβεβαιότητες που εισάγονται κατά τις προσομοιώσεις επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα μη επιτρέποντας την ορθή αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης. Στην πρόσφατη αριθμητική μελέτη με το μοντέλο CAMx των Athanasopoulou et al. (2008) και Athanasopoulou et al. (2010) κατά την οποία προστέθηκαν σωματίδια θαλάσσιας προέλευσης στις

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

εκπομπές καθώς και σκόνη από επαναιώρηση διαπιστώθηκε η σημαντική συνεισφορά των συγκεκριμένων εκπομπών στην σωματιδιακή ρύπανση της ΕΠΑ.

Στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης λειτουργεί επιχειρησιακά τριήμερη πρόγνωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας της Αττικής για τους ρύπους O_3 , NO_2 , CO , SO_2 και PM_{10} η οποία προκύπτει από προσομοιώσεις με το σύστημα των μοντέλων MM5/CAMx σε χωρική ανάλυση 2km (<http://lap.physics.auth.gr/forecasting/airquality.htm>). Τα δεδομένα εκπομπών που εισάγονται στο μοντέλο CAMx έχουν προκύψει από το Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Αντίστοιχα 48ωρη πρόγνωση της ποιότητας του αέρα για την περιοχή της Ευρώπης και την βόρειας Αφρικής δίνεται από το Πανεπιστήμιο Αθηνών σε χωρική ανάλυση 0.25° ενώ οι απαιτούμενες εκπομπές παρέχονται από το TNO (Visschedijk and Denier van der Gon 2005), τη βάση δεδομένων του EMEP (εκπομπές από τη ναυτιλία) και την βάση παγκόσμιων δεδομένων εκπομπών GEIA (<http://www.geiacenter.org/>).

Σε όλες τις αριθμητικές μελέτες δίνεται μεγάλη έμφαση στα δεδομένα εκπομπών που εισάγονται στα φωτοχημικά μοντέλα καθώς αποτελούν καθοριστικό παράγοντα των τελικών συγκεντρώσεων. Αρκετές προσπάθειες έχουν πραγματοποιηθεί για τη δημιουργία μιας βάσης δεδομένων εκπομπών χωρίς ωστόσο να παρέχουν ολοκληρωμένες, διαχρονικές, χωρικά και χρονικά κατανεμημένες εκπομπές υπολογιζόμενες από την αρχή με ενημερωμένα δεδομένα.

Πιο αναλυτικά, όσον αφορά στις εκπομπές για την Ελλάδα, η πρώτη ολοκληρωμένη καταγραφή των εκπομπών στον τομέα των οδικών μεταφορών για την Ελλάδα και την περίοδο 1992-2000 αναπτύχθηκε από τους Symeonidis et al. (2003) με τη χρήση του προγράμματος COPERT (Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport) II και αποκάλυψε τις επιπτώσεις από την εισαγωγή των νέων καταλυτικών αυτοκινήτων στην ελληνική αγορά. Η συγκεκριμένη μελέτη εμπλουτίστηκε στη συνέχεια και με τις εκπομπές από τις υπόλοιπες μεταφορές (Symeonidis et al. 2004).

Η Ελλάδα ως μέλος της Σύμβασης για τη Διασυνοριακή Ρύπανση της Ατμόσφαιρας (Long-Range Transboundary Air Pollution –LRTAP- Convention) υποβάλλει επίσημα στοιχεία για τις εθνικές ετήσιες εκπομπές κάθε χρόνο στο Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα Παρακολούθησης και Αξιολόγησης (European Monitoring and Evaluation Programme - EMEP) μέσω της Οικονομικής Επιτροπής των Ηνωμένων Εθνών για την Ευρώπη (United Nations Economic Commission for Europe - UNECE), σε ένα πλέγμα $50 \times 50 km^2$, δεδομένα που είναι ελεύθερα διαθέσιμα στην ηλεκτρονική διεύθυνση www.ceip.at. Οι Aleksandropoulou et al. (2004) χρησιμοποιώντας τα παραπάνω ετήσια δεδομένα ανέπτυξαν μια βάση εκπομπών για την Ελλάδα ($5 \times 5 km^2$) από ανθρωπογενείς και φυσικές πηγές. Ο

χωρικός καταμερισμός των εκπομπών σε κελιά καλύτερης χωρικής ανάλυσης πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια δεδομένων χρήσης γης και πυκνότητας πληθυσμού.

Μια χωρικά ($10 \times 10 \text{ km}^2$) και χρονικά (1-hour) κατανεμημένη απογραφή των ανθρωπογενών εκπομπών των προδρόμων ουσιών του όζοντος (NO_x , NMVOC και CO) για την περιοχή των νότιων Βαλκανίων (συμπεριλαμβανομένης και της ελληνικής επικράτειας) υλοποιήθηκε από τους Ρουρκου et al. (2007) με το 2000 ως έτος αναφοράς. Στη συνέχεια οι Markakis et al. (2010) κατασκεύασαν μια απογραφή των εκπομπών για την Ελλάδα για το έτος 2003 σε πλέγμα $10 \times 10 \text{ km}^2$. Οι κυριότερες ανθρωπογενείς πηγές σε εθνικό επίπεδο διαπιστώθηκε ότι είναι η οδική κυκλοφορία (CO, NMVOCs), η διεθνής ναυσιπλοΐα (NO_x), τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας (SO_x), οι αγροτικές-κτηνοτροφικές δραστηριότητες (NH_3) και η βιομηχανία (PM_{10} και $\text{PM}_{2.5}$, Μαρκάκης 2010). Συγκεκριμένα για τις εκπομπές των οδικών μεταφορών, οι οποίες κατέχουν σημαντικό μερίδιο στο σύνολο των εκπομπών, χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις η bottom-up προσέγγιση που χρησιμοποιεί δεδομένα δραστηριότητας, όπως οι κυκλοφοριακοί φόρτοι και η ταχύτητα βασίζεται σε πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας και η top-down προσέγγιση κατά την οποία χρησιμοποιούνται στατιστικά στοιχεία, όπως είναι η σύνθεση του στόλου και η κατανάλωση καυσίμου. Για την bottom-up προσέγγιση τα δεδομένα συγκεντρώθηκαν για το έτος 1998, στα πλαίσια του προγράμματος «Environmental Inventory System for Transport» (EIST) (Symeonidis et al., 2003) και αφορούν σε ωριαίους κυκλοφοριακούς φόρτους και ταχύτητες για επτά κατηγορίες οχημάτων (επιβατικά αυτοκίνητα, ταξί, ελαφρά επαγγελματικά οχήματα, βαρέα οχήματα, αστικά λεωφορεία, πούλμαν και μοτοσικλέτες) σε 700 οδικά τμήματα του εθνικού οδικού δικτύου της Ελλάδας, 1.001 οδικά τμήματα στην Αθήνα και 1.710 οδικά τμήματα στην πόλη της Θεσσαλονίκης. Οι κυκλοφοριακοί φόρτοι αναφέρονται σε μια τυπική καθημερινή μέρα, και δεν παρέχουν περαιτέρω χρονικές πληροφορίες εκτός από την ωριαία διακύμανση. Τα δεδομένα που απαιτούνταν για την top-down προσέγγιση (στόλος οχημάτων στην Ελλάδα και τα δύο αστικά κέντρα - Αθήνα και Θεσσαλονίκη- ανά τύπο οχήματος και τεχνολογία κινητήρα και η ετήσια κατανάλωση καυσίμων βενζίνης και ντίζελ) συγκεντρώθηκαν επίσης στο πλαίσιο του προγράμματος EIST για το έτος 1998. Καθώς τα συγκεκριμένα δεδομένα αντιστοιχούν σε προγενέστερο έτος πραγματοποιήθηκε επικαιροποίηση αυτών ώστε να είναι αντιπροσωπευτικά για το έτος 2003, με τη χρήση αυξητικών παραγόντων στόλου (ανά τύπο οχήματος και τεχνολογία κινητήρων) βάση προβλέψεων για το στόλο (Kyriakis et al., 1998).

Δεδομένου της έλλειψης μίας ακριβούς και αξιόπιστης απογραφής εκπομπών με λεπτομερείς πληροφορίες για την ετήσια διακύμανση των εκπομπών σε τοπικό επίπεδο, οι Progiou and Ziomas (2012) κατέγραψαν την τάση των ετήσιων εκπομπών από τις οδικές μεταφορές για την Ελλάδα κατά την περίοδο 1990-2009, χωρίς ωστόσο να προχωρήσουν σε χρονική και χωρική

αποτύπωση αυτών σε πλεγματικά κελιά. Στη συγκεκριμένη μελέτη διαπιστώθηκε ότι η ηλικία των οχημάτων και η τεχνολογία του κινητήρα είναι οι κρίσιμες παράμετροι που καθορίζουν την ποσότητα των ρύπων που εκπέμπονται από τα επιβατικά και τα βαρέα οχήματα και αναδείχθηκε η σημαντικότητα απόσυρσης των παλαιών οχημάτων και η ανανέωση του στόλου ως στρατηγική για τη μείωση της ρύπανσης.

Όσον αφορά στην καταγραφή των εκπομπών για την περιοχή της Αττικής, οι Markakis et al. (2010) δημιούργησαν ένα πλέγμα εκπομπών $2 \times 2 \text{ km}^2$ με χρονική ανάλυση 1 ώρας για το έτος 2003. Το μερίδιο των εκπομπών από τις οδικές μεταφορές προς τις συνολικές εκπομπές βρέθηκε να είναι σημαντικά υψηλό στην Αθήνα. Τα επιβατικά αυτοκίνητα και οι μοτοσικλέτες συμβάλλουν σημαντικά στις εκπομπές CO και NMVOC ενώ τα βαρύτερα οχήματα (λεωφορεία, πούλμαν) και τα ντιζελοκίνητα επιβατικά ευθύνονται για την πλειονότητα των εκπομπών NOx. Η ύπαρξη του λιμανιού του Πειραιά επιβαρύνει την περιοχή με εκπομπές NOx και SOx σε ποσοστό 11%. Γενικά διαπιστώθηκε ότι η περιοχή των Αθηνών συνεισφέρει στο 45% των εθνικών CO εκπομπών, στο 46% των NOx, 41% των NMVOC και το 36% των PM₁₀ (Μαρκάκης, 2010).

Με τη χρήση των δεδομένων του EMEP χωρικής ανάλυσης $50 \times 50 \text{ km}^2$, οι Aleksandropoulou et al. (2011) ανέπτυξαν μια απογραφή των εκπομπών για την ΕΠΑ (έτος αναφοράς το 2007, χωρική ανάλυση $1 \times 1 \text{ km}^2$) που δείχνει τη σημασία των οδικών μεταφορών προς CO, NMVOC και των εκπομπών NOx. Οι ετήσιες εκπομπές της οδικής κυκλοφορίας για την ευρύτερη περιοχή της Αθήνας υπολογίστηκαν από τους Progiou and Ziomas (2011) για την περίοδο 1990-2009, ενώ μελετήθηκε η σχέση αυτών με τις συγκεντρώσεις των αέριων ρύπων. Τα επιβατικά οχήματα βρέθηκε ότι συνεισφέρουν σημαντικά στις εκπομπές CO, NMVOCs και ενώ τα βαρέα φορτηγά οχήματα συνδέθηκαν με τις εκπομπές PM₁₀ και NOx. Ωστόσο, οι ετήσιες εκπομπές δεν κατανεμήθηκαν χωρικά σε πλεγματικά κελιά ούτε αναλύθηκαν περεταίρω χρονικά.

Οι εκπομπές χρησιμοποιούνται συχνά ως δεδομένα εισόδου σε φωτοχημικά μοντέλα και έτσι είναι πολύ σημαντικό να είναι αξιόπιστες και τακτικά επικαιροποιημένες καλύπτοντας της ετήσιες διακυμάνσεις των διαφόρων πηγών. Βασική είναι επίσης η υψηλή χωρική και χρονική κατανομή των δεδομένων σε πλεγματικά κελιά (Hanna et al., 2001, Rourkou et al., 2008a, Taghavi et al., 2005 and Coelho et al. 2014). Επιπλέον, πρέπει να γίνεται αξιολόγηση αυτών, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι αντιπροσωπεύουν ορθά τις πραγματικές συνθήκες (Winiwarter et al. 2003).

Η μη ύπαρξη μιας ολοκληρωμένης και διαχρονικής βάσης δεδομένων εκπομπών για την ΕΠΑ διαμορφωμένης με βάση τα τοπικά χαρακτηριστικά και τις ιδιαιτερότητες της περιοχής δεν έχει παρατηρηθεί στην παρούσα βιβλιογραφία και αυτό αποτέλεσε το βασικό κίνητρο της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Στόχος επομένως της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η λεπτομερής καταγραφή και χωροχρονική αποτύπωση των εκπομπών για την Ελλάδα και την Ευρύτερη Περιοχή των Αθηνών σε ωριαία κλίμακα και η δημιουργία της βάσης δεδομένων εκπομπών F.E.I. – GREGAA (Flexible Emission Inventory for GREece and the GAA) η οποία θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τις εφαρμογές με τα φωτοχημικά μοντέλα και με τη βοήθεια της οποίας θα μπορούν να εξαχθούν ποσοτικά και ποιοτικά συμπεράσματα για το είδος των πηγών που συνεισφέρουν στην ποιότητα της ατμόσφαιρας της ΕΠΑ. Επιπλέον λόγω του υπολογισμού των εκπομπών από διαφορετικές πηγές η συγκεκριμένη βάση δεδομένων είναι δυνατόν να παρέχει τη διαχρονική μελέτη των χαρακτηριστικών των διαφόρων τύπων πηγών καθώς και να καλύπτει με τη διαρκή ανανέωση της τις αλλαγές που συντελούνται λόγω των διαφόρων κοινωνικοοικονομικών συνθηκών. Στα πλαίσια επομένως της παρούσης διδακτορικής διατριβής αναπτύχθηκε μια πρακτική μεθοδολογία υπολογισμού των εκπομπών για την Ελλάδα και την ΕΠΑ με χρήση τοπικών συντελεστών χρονικού καταμερισμού των εκπομπών.

Η βάση δεδομένων εκπομπών F.E.I. – GREGAA έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Συλλογή αξιόπιστων, αναλυτικών και όχι στατιστικών δεδομένων για καθοριστικές πηγές όπως είναι ο στόλος των οχημάτων, αεροσκαφών, κ.α.
- Δημιουργία χρονοσειράς δεδομένων. Η απογραφή των εκπομπών ξεκινάει από το έτος 2006 και έχει ολοκληρωθεί μέχρι το 2010 για όλες τις πηγές ενώ για ορισμένες καλύπτονται και τα επόμενα έτη.
- Κατασκευή περιοχικών χρονικών συντελεστών διαχωρισμού για την ΕΠΑ βασισμένων σε πραγματικά δεδομένα ώστε να αποτυπώνεται σωστά η δραστηριότητα της εκάστοτε πηγής.
- Δυνατότητα αλλαγής της χωρικής ανάλυσης του πλέγματος.
- Ευέλικτη βάση δεδομένων καθώς ο υπολογισμός των εκπομπών επιτρέπει τη βελτίωση, την επικαιροποίηση της βάσης καθώς επίσης και τη χρήση αυτής για μελέτη διαφόρων case studies, όπως θα παρουσιαστεί και στη συνέχεια της διατριβής.

Συγκεντρωτικά, το F.E.I. – GREGAA είναι ένα δυναμικό πεδίο απογραφής εκπομπών με στόχο τη χρήση και εκμετάλλευση των δυνατοτήτων του για την άμεση αποτύπωση των εκπομπών.

1.2 Διάρθρωση της διατριβής

Η παρούσα εργασία αποτελείται από 5 κεφάλαια, μια σύντομη περιγραφή των οποίων δίνεται παρακάτω.

- *Κεφάλαιο 1*

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το φαινόμενο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης ως χαρακτηριστικό των αστικών περιοχών και συγκεκριμένα της ΕΠΑ η οποία αποτελεί και το μεγαλύτερο αστικό πλέγμα της Ελλάδας. Δίνεται το κίνητρο, το αντικείμενο και οι στόχοι της παρούσας διατριβής.

- *Κεφάλαιο 2*

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται αναλυτική περιγραφή των γενικών κλιματικών χαρακτηριστικών της Ελλάδας και της Αττικής ειδικότερα. Ιδιαίτερα για το λεκανοπέδιο της Αττικής, γίνεται αναφορά στο φαινόμενο της αστικής θερμνησίδας το οποίο επηρεάζει σημαντικά το κλίμα της περιοχής ενώ πιο λεπτομερώς παρουσιάζεται το φαινόμενο της θαλάσσιας αύρας διότι καθορίζει σημαντικά την ποιότητα του αέρα κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου. Επιπλέον παρουσιάζεται η εξέλιξη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην Ευρύτερη Περιοχή των Αθηνών μέσω των διαφόρων μελετών που έχουν πραγματοποιηθεί για την περιοχή και δίνεται η συσχέτιση των επιπέδων ρύπανσης και ρύπων με την κατανομή πληθυσμού, τις ανθρωπογενείς πηγές και τις χρήσεις γης.

- *Κεφάλαιο 3*

Στο κεφάλαιο τρία αρχικά γίνεται μια γενική εισαγωγή στις μεθόδους απογραφής εκπομπών (πηγές, κατηγορίες, μέθοδοι υπολογισμού, από τις τιμές ανά έτος στις ωριαίες (χρονική διακριτοποίηση). Ακολουθεί η παρουσίαση της μεθοδολογίας (δεδομένα που χρειάστηκαν, κατηγορίες πηγών, τρόπος υπολογισμού) και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν και οδήγησαν τελικά στη δημιουργία μιας βάσης δεδομένων χωρικά και χρονικά καταμερισμένων εκπομπών για την Ελλάδα και την ΕΠΑ.

- *Κεφάλαιο 4*

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται μια σύντομη περιγραφή του συστήματος των μοντέλων MM5/CAMx τα οποία χρησιμοποιούνται στην παρούσα διατριβή. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα (μετεωρολογικά και φωτοχημικά) της αριθμητικής προσομοίωσης κατά την οποία χρησιμοποιείται η νέα βάση δεδομένων εκπομπών ως δεδομένο εισόδου. Αξιολογείται η απόδοση των μοντέλων με

τη χρήση δεδομένων από σταθμούς μέτρησης. Γίνονται συγκρίσεις και δίνονται τα αντίστοιχα συμπεράσματα.

- *Κεφάλαιο 5*

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια σύνοψη των αποτελεσμάτων της παρούσας διατριβής, προκύπτουν τα σημαντικότερα συμπεράσματα από τη δημιουργία της βάσης δεδομένων εκπομπών για την Ελλάδα και την Ευρύτερη Περιοχή των Αθηνών και την αριθμητική προσομοίωση. Επίσης αναφέρονται οι μελλοντικοί στόχοι για την εξέλιξη της συγκεκριμένης μελέτης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

2.1 Περιοχικά κλιματικά και τοπογραφικά χαρακτηριστικά της Ελλάδας

Η Ελλάδα βρίσκεται στην Ανατολική Μεσόγειο και έχει Μεσογειακό κλίμα, δηλαδή ήπιους και βροχερούς χειμώνες, σχετικώς θερμά και ξηρά καλοκαίρια και μεγάλη ηλιοφάνεια σχεδόν όλο το χρόνο. Οι συνοπτικές συνθήκες που επικρατούν καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό την ποιότητα του αέρα και κατά συνέπεια την εμφάνιση επεισοδίων ρύπανσης στα αστικά κέντρα. Η τοπική διεύθυνση του ανέμου επηρεάζεται καθοριστικά από το ανάγλυφο. Στην Ελλάδα η ένταση του ανέμου κυμαίνεται από 0 (νηνεμία) μέχρι 4-5 Beaufort και σπάνια υπερβαίνει τα 8. Το ψυχρό θαλάσσιο ρεύμα που εισέρχεται στο Αιγαίο από τη Μαύρη Θάλασσα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των θερμοκρασιών στα ανατολικά παράλια της Ελλάδας σε σχέση με τα δυτικά, τα οποία επηρεάζονται από το θερμό θαλάσσιο ρεύμα της κεντρικής Μεσογείου. Επιπλέον, η οροσειρά της Πίνδου, που εκτείνεται κάθετα σχεδόν προς την ανατολική κίνηση των κυκλωνικών κυμάτων, διαιρεί τη χώρα στις προσήνεμες περιοχές που εμφανίζουν έντονες βροχοπτώσεις και στις υπήνεμες και ομβροσκιερές ανατολικές περιοχές.

Στον Ελλαδικό χώρο εμφανίζονται επίσης τα κυριότερα είδη των ημερησίων ανέμων: θαλάσσια και απόγεια αύρα, αύρες κοιλάδων και ορέων. Ειδικά η θαλάσσια αύρα επηρεάζει σημαντικά τις κλιματικές συνθήκες των περιοχών στις οποίες πνέει διότι πρώτον, οι αέριες μάζες που μεταφέρει προς τις παράκτιες περιοχές είναι πλούσιες σε υδρατμούς οπότε όταν ανέρχονται και ψύχονται δίνουν ήπιες βροχοπτώσεις και δεύτερον, περιορίζει τον καλοκαιρινό καύσωνα και

αυξάνει την υγρασία, εμφανίζεται όταν ο καιρός είναι αίθριος και δεν πνέουν οι άνεμοι της γενικής κυκλοφορίας. Η έντασή της γίνεται μεγαλύτερη τις πρώτες απογευματινές ώρες.

Άλλα είδη τοπικών ανέμων που δημιουργούνται στον ελλαδικό χώρο είναι οι λίβες, άνεμοι ξηροί και θερμοί οι οποίοι πνέουν στην υπήνεμη πλευρά των βουνοπλαγιών. Ο Βαρδάρης είναι άνεμος ψυχρός που πνέει προς νότο κατά μήκος της κοιλάδας του Αξιού, όταν επικρατεί υψηλό βαρομετρικό στη βαλκανική χερσόνησο και χαμηλές πιέσεις στο Αιγαίο.

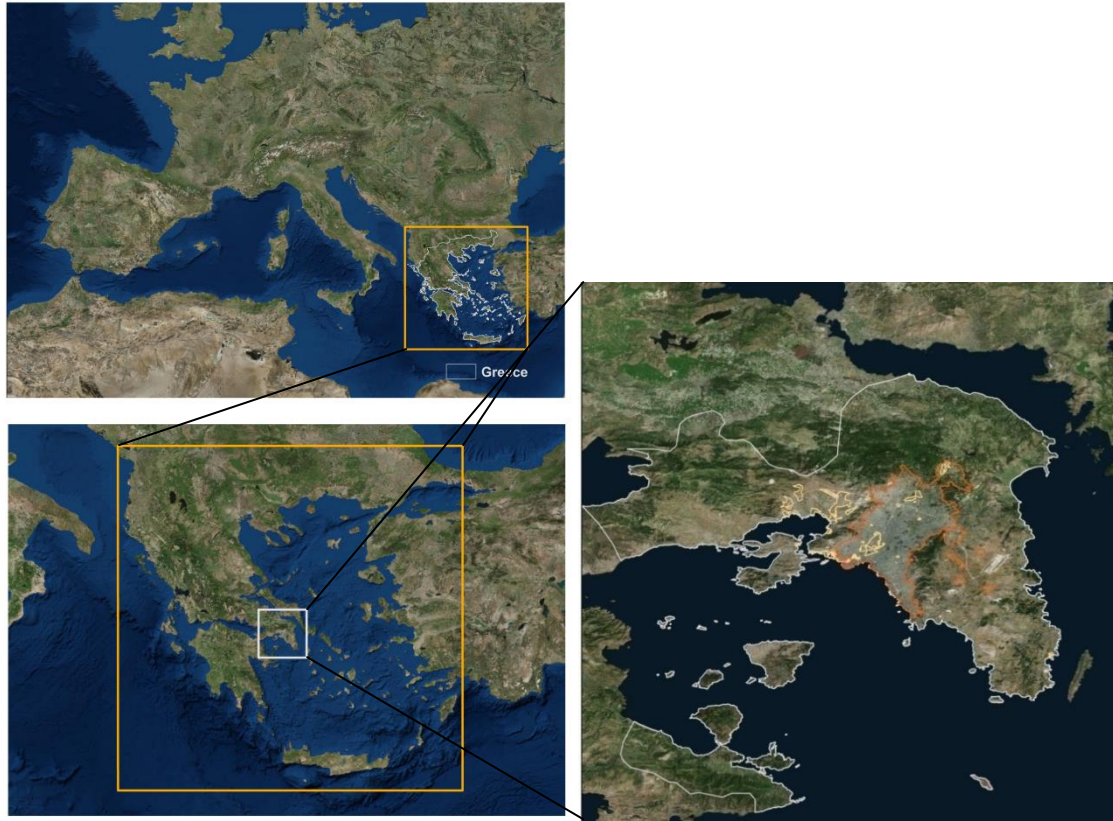
Οι πιο γνωστοί άνεμοι που εμφανίζονται το καλοκαίρι στο Αιγαίο είναι οι Ετησίες, ή κοινώς Μελτέμια. Έχουν ΒΑ- ΒΔ διεύθυνση και δημιουργούνται από το συνδυασμό της επέκτασης του θερινού χαμηλού των Ινδιών και Ιρανικών οροπεδίων προς την ανατολική Μεσόγειο και της επέκτασης του αντικυκλώνα των Αζορών προς την ΝΑ Ευρώπη. Η εμφάνιση των ανέμων αυτών ξεκινά στις αρχές του Μαΐου περίπου (πρόδρομοι) και η ένταση και η συχνότητά τους γίνεται μεγαλύτερη από τα μέσα Ιουλίου μέχρι τα μέσα Σεπτεμβρίου ενώ μειώνεται ως τα τέλη Οκτωβρίου (μετάπωροι). Χαρακτηριστικό των ανέμων αυτών είναι ότι επειδή απομακρύνονται από το σημείο κόρου δεν οδηγούν στη δημιουργία θερμικών καταιγίδων ενώ αντίθετα η ξηρότητα και ο αίθριος καιρός που έπεται της εμφάνισής τους διαμορφώνουν το χερσαίο Μεσογειακό κλίμα της Ελλάδας.

2.2 Το Λεκανοπέδιο της Αττικής

2.2.1 Γενικά στοιχεία για την Αττική

Η Αττική αποτελεί την πιο επιβαρυμένη σε έκταση αστική περιοχή καθώς σε αυτή την περιοχή κατοικεί και δραστηριοποιείται το 1/3 του ελληνικού πληθυσμού. Σύμφωνα με τα ετήσια δεδομένα της Eurostat, ο πληθυσμός της Αττικής αυξανόταν σταδιακά από το 1990 μέχρι το 2009 σε ποσοστό περίπου 1% το έτος κατά την πρώτη δεκαετία και 0.5% τα επόμενα 5 χρόνια ενώ από το 2009 μέχρι το 2013 ο πληθυσμός μειώθηκε κατά 109,202 κατοίκους λόγω του μεταναστευτικού ρεύματος προς τις επαρχιακές περιοχές της Ελλάδας και το εξωτερικό ως συνέπεια της οικονομικής κρίσης που εμφανίστηκε στην χώρα από το 2009. Αποτέλεσμα της πρότερης πληθυσμιακής αύξησης ήταν η επέκταση του αστικού ιστού. Η έκταση των οικισμών στην περιφέρεια της Αττικής από 322.4 km² το 1991 αυξήθηκε σε 543.1 km² το 2000 σύμφωνα την καταγραφή της ΕΛ.ΣΤΑΤ (ΕΛ.ΣΤΑΤ, 2014b). Στο σχήμα 2-1 παρουσιάζεται ο αστικός ιστός όπως είναι σήμερα. Είναι φανερό ότι οι αστικές περιοχές έχουν πυκνώσει ενώ νέοι οικισμοί έχουν δημιουργηθεί προς τα Μεσόγεια και τα βόρεια του λεκανοπεδίου. Σε αυτή τη μετατόπιση του πληθυσμού συντέλεσε και η

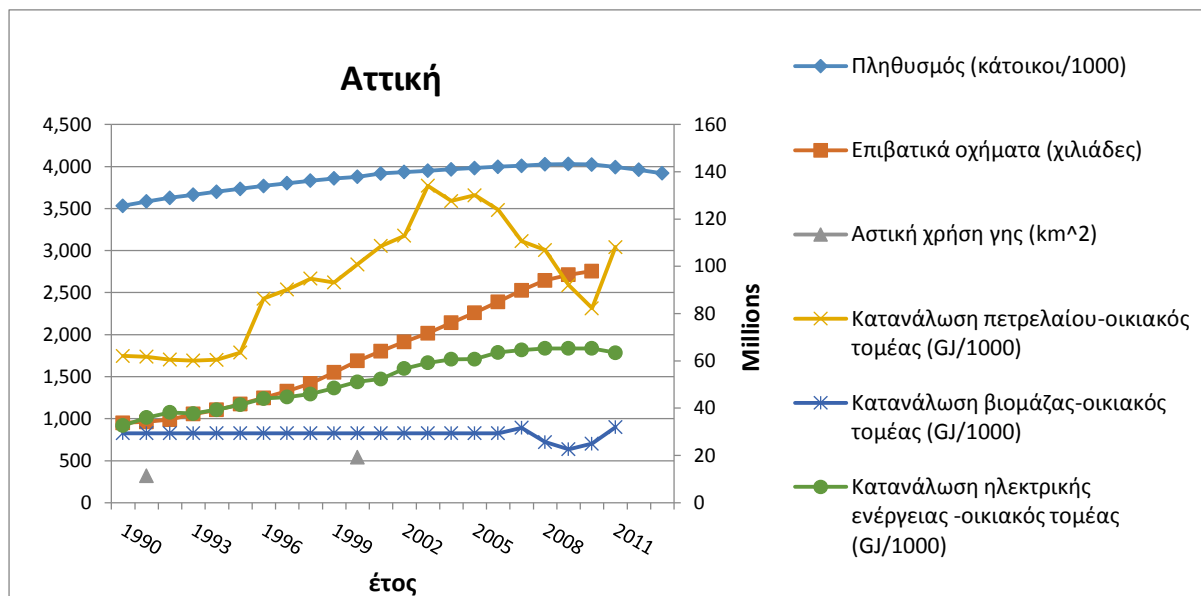
κατασκευή του Διεθνή Αερολιμένα Αθηνών «Ελευθέριος Βενιζέλος» στα Σπάτα και η κατασκευή νέων αυτοκινητόδρομων (π.χ. Αττική οδός).



Σχήμα 2-1. Νομός Αττικής (γκρι πλαίσιο), αστικός ιστός (πορτοκαλί πλαίσιο) και βιομηχανικές περιοχές (κίτρινο πλαίσιο).

Δύο καθοριστικοί παράγοντες για την ποιότητα της ατμόσφαιρας στην Αττική είναι η κίνηση των οχημάτων και η κατανάλωση ενέργειας στον οικιακό τομέα. Στο σχήμα 2-2 φαίνεται ότι η αύξηση του στόλου των επιβατικών οχημάτων στην Αττική την 20ετία 1990-2010 ακολούθησε την πληθυσμιακή μεταβολή. Τα ποσοστά αύξησης ανά έτος ήταν ωστόσο μεγαλύτερα αυτών του πληθυσμού και κυμάνθηκαν περίπου στο 6% ενώ κατά τη διετία 1998-1999 παρουσιάστηκε η μεγαλύτερη ετήσια αύξηση (9.2%). Ιδιαίτερα η εφαρμογή του μέτρου της απόσυρσης και η εμφάνιση των καταλυτικών οχημάτων ενίσχυσαν την αγορά Ι.Χ. την περίοδο 1994-2000 αυξάνοντας τον αριθμό Ι.Χ. οχημάτων ανά οικογένεια. Παρόλο που δεν υπάρχουν στοιχεία από το 2010 και μετά, ήδη φαίνεται στην κατανομή η μείωση του ποσοστού αύξησης σε 1.5% για το έτος 2010. Με τη βοήθεια του σχήματος 2-2 παρατηρείται επίσης ότι το πετρέλαιο αποτελεί το κυρίως καύσιμο στον οικιακό τομέα παραγωγής με ποσοστό 46.5% το 2011 και στη συνέχεια ακολουθεί ο ηλεκτρισμός (27.8% - 2011) και η βιομάζα (14.0% - 2011) ενώ αξιοσημείωτη είναι η σταδιακή

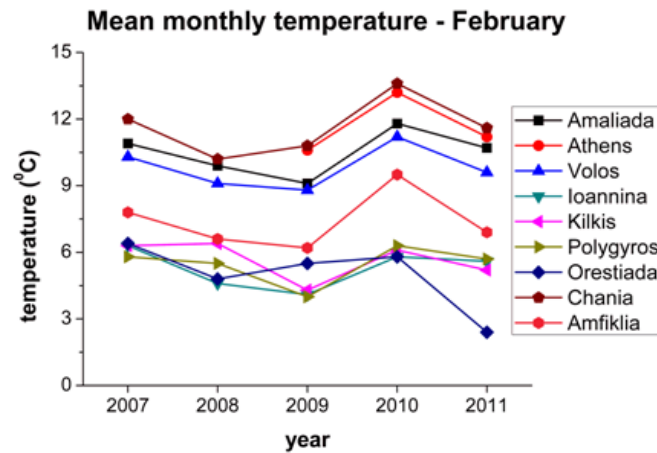
άνοδος στη χρήση φυσικού αερίου από το 2006 και μετά. Επιπλέον ενώ κατά τη μελετώμενη χρονική περίοδο η κατανάλωση πετρελαίου μειώνεται σταδιακά, το 2011 έχουμε 12% αύξηση αυτής σε σχέση με το έτος 2010 γεγονός που οφείλεται στην αύξηση των κρύων ημερών του συγκεκριμένου χειμώνα (Σχ. 2-3) καθώς αντίστοιχη αύξηση παρατηρείται και στην κατανάλωση φυσικού αερίου και ξύλου (15.4% και 8.2% αντίστοιχα) (ανάλυση δεδομένων πίνακα 3-4, Πηγή: Ε.Π.Σ.Ε.).



Σχήμα 2-2. Στατιστικά στοιχεία για την ΕΠΑ (Πηγή: βάση δεδομένων της Eurostat και Ε.Π.Σ.Ε.).

Ένα από τα σημαντικότερα μέτρα που έλαβε το ελληνικό κράτος προκειμένου να αντιμετωπίσει τα υψηλά επίπεδα ρύπων εντός του λεκανοπεδίου ήταν η παροχή κινήτρων ώστε να αντικατασταθεί ο στόλος των Ι.Χ. οχημάτων από νέα οχήματα με καταλυτικούς μετατροπείς στους κινητήρες. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα μέχρι το 1992 περίπου το 25% του στόλου των ελαφρών οχημάτων να διαθέτει καταλυτικό μετατροπέα (Econoμοπουλος 1997). Οι εκπομπές ωστόσο των βενζινοκίνητων οχημάτων με κινητήρα < 2.5 tn δεν επηρεάστηκαν άμεσα. Όπως προκύπτει από την απογραφή του Econομοπουλος (1997), οι ετήσιες εκπομπές του καπνού στην ΕΠΑ ήταν 165tn το 1989 και περιορίστηκαν μόλις σε 147tn το 1992 ενώ οι εκπομπές SO₂, NO_x, CO και VOC από 2,125tn, 13,074tn, 288.8tn και 33,365tn το 1989 έγιναν 2,171tn, 12,286tn, 253.6tn και 31,522tn αντίστοιχα και γενικά η υφιστάμενη κατάσταση της αέριας ρύπανσης παρέμεινε σταθερή κατά την περίοδο αυτή όπως προέκυψε και από τις μετρούμενες συγκεντρώσεις των ρύπων από τους σταθμούς του ΥΠΕΚΑ. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα οφέλη από την καλύτερη τεχνολογία

οχημάτων αντισταθμίστηκαν από την αύξηση του στόλου των οχημάτων και την ακόλουθη μείωση της μέσης ταχύτητας κίνησης αυτών.



Σχήμα 2-3. Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες (°C) για τον μήνα Φεβρουάριο για επιλεγμένες ελληνικές πόλεις (Πηγή: www.meteo.gr).

Εκτός της πολύ υψηλής πυκνότητας πληθυσμού, εντός και περιμετρικά του αστικού ιστού βρίσκονται αρκετές βιομηχανικές περιοχές (Σχ.2-1, οριοθετημένες με πορτοκαλί πλαίσια). Δυτικά βρίσκονται το βιομηχανικό πάρκο Σχιστού ενώ λίγο πιο βόρεια εκτείνονται η ΒΙΠΕ του Θριασίου Πεδίου και η ΒΙΠΕ Δυτικής Αττικής οι οποίες σε συνδυασμό με τα ναυπηγεία του Σκαρμαγκά, τα διυλιστήρια Ασπροπύργου και Ελευσίνας καθώς και τις βιομηχανίες χάλυβα επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα της ατμόσφαιρας των Δυτικών προαστίων κυρίως κατά την εμφάνιση ισχυρών δυτικών ανέμων που επιτρέπουν τη μεταφορά ρύπων. Στα βόρεια εντοπίζονται οι βιομηχανικές ζώνες του Κρουονερίου, της Άνοιξης και του Αγίου Στεφάνου ενώ νοτιότερα συναντάται η βιομηχανική περιοχή της Παιανίας. Διάσπαρτες εντός του αστικού ιστού βρίσκονται οι ΒΙΠΕ Αχαρνών-Δεκελείας, Χελιδονούς – Καλιφτάνη, Λυκόβρυσης, Μεταμόρφωσης, Νέου Φαλήρου, Αγίας Άννης και Κεράμου στις οποίες περιλαμβάνονται πλήθος βιομηχανικών μονάδων. Στο φορτίο των παραπάνω πηγών έρχεται να προστεθεί η ύπαρξη του μεγαλύτερου εμπορικού και επιβατικού λιμανιού της χώρας στον Πειραιά.

2.2.2 Περιοχικά κλιματικά και τοπογραφικά χαρακτηριστικά της Αττικής

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2-1, το λεκανοπέδιο της Αττικής περιβάλλεται από τρεις ορεινούς όγκους, την Πάρνηθα (1413 m), την Πεντέλη (1109 m) και τον Υμηττό (1026 m) στο βόρειο, βορειοανατολικό και ανατολικό τμήμα της αντίστοιχα, δυτικά εκτείνεται η λοφοσειρά του Αιγαλέω με υψόμετρο 468 m ενώ νοτιοδυτικά το λεκανοπέδιο είναι ανοιχτό προς τη θάλασσα.

Οι τυπικές συνοπτικές καιρικές συνθήκες που κυριαρχούν πάνω από την Ανατολική Ελλάδα και στο Αιγαίο Πέλαγος το καλοκαίρι συνδέονται με ένα σύστημα υψηλής πίεσης που καλύπτει την περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου και των Βαλκανίων μέχρι τη Μαύρη Θάλασσα η κορυφογραμμή του οποίου εμφανίζεται πάνω από την Δυτική και Κεντρική Μεσόγειο, ενώ ένα θερμικό χαμηλό είναι πάνω από το οροπέδιο της Ανατολίας. Η ισορροπία μεταξύ των δύο αυτών συστημάτων καθορίζει τις καιρικές συνθήκες πάνω από την Ανατολική Ελλάδα και το Αιγαίο Πέλαγος:

- Όταν το σύστημα υψηλής πίεσης ενισχύεται, εκτείνεται σε μια ανατολική κατεύθυνση με αποτέλεσμα την αποδυνάμωση της βαθμίδας της πίεσης σε όλο το Αιγαίο Πέλαγος. Κατά συνέπεια, η βόρεια ροή είναι αδύναμη επιτρέποντας την εμφάνιση τοπικών συστημάτων κυκλοφορίας (θαλάσσια αύρα) πάνω από την Αττική (Cagariperis, 1951, Kallos et al., 1993, Prezerakos, 1986). Τα τρία τοπικά συστήματα που επικρατούν πάνω από την Αττική είναι:
 - i) Η θαλάσσια αύρα από το Σαρωνικό Κόλπο, η οποία χαρακτηρίζεται από ΝΝΔ διευθύνσεις ανέμου που αναπτύσσονται τις πρωινές ώρες (περίπου στις 11.00 LST). Όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι αρκετά ισχυρή φτάνει στο εσωτερικό του λεκανοπεδίου το μεσημέρι.
 - ii) Η θαλάσσια αύρα που έρχεται από τα Μεσόγεια στα ανατολικά συνήθως χαρακτηρίζεται από ισχυρότερη ταχύτητα ανέμου σε σχέση με την αύρα από τον Σαρωνικό Κόλπο. Ο άνεμος κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι ανατολικός και μετατρέπεται σε δυτικό το βράδυ.
 - iii) Το σύστημα που αναπτύσσεται στο Θριάσιο Πεδίο και έχει δυτική κατεύθυνση.
- Αντίθετα, όταν το σύστημα υψηλής πίεσης εξασθενεί, το θερμό χαμηλό πάνω από την Ανατολία εκτείνεται προς τα δυτικά και η βαθμίδα της πίεσης πάνω από το Αιγαίο γίνεται ισχυρότερη. Στην περίπτωση αυτή, ισχυροί βόρειοι άνεμοι επικρατούν πάνω από το Αιγαίο που ονομάζονται Μελέμια ή Ετησίες. Οι αέριες μάζες συνήθως προέρχονται από την περιοχή της νότιας Ρωσίας και την Κασπία Θάλασσα είναι ξηρές και σχετικά δροσερές,

συμβάλλοντας στη μείωση της επιφανειακής θερμοκρασίας και μετριάζοντας την καλοκαιρινή δυσφορία (Metaxas and Bartzokas, 1994, Kotroni et al. 2001).

Μεταξύ Πάρνηθας και Πεντελικού όρους υπάρχει ένα BBA άνοιγμα από το οποίο διέρχονται ανεμπόδιστα οι BA και BBA άνεμοι και σαρώνουν τους ρύπους του λεκανοπεδίου διασκορπίζοντας τους προς τη θάλασσα. Αυτό συμβαίνει κυρίως κατά το θέρος που πνέουν οι ισχυροί τοπικοί άνεμοι Ετησίες. Στην περίπτωση που οι Ετησίες είναι ασθενείς απλώς μετατοπίζουν τους ρύπους νότια πληττοντας περισσότερο τον Πειραιά και τη Σαλαμίνα. Όταν όμως ο καιρός είναι αίθριος και υπάρχει μικρή βαροβαθμίδα δηλαδή τις ηλιόλουστες καλοκαιρινές μέρες που τα συνοπτικά συστήματα είναι εξασθενημένα ευνοείται η εμφάνιση συστημάτων τοπικής κυκλοφορίας (θαλάσσια αύρα).

Η θαλάσσια αύρα εμφανίζεται στους παράκτιους μετεωρολογικούς σταθμούς Ελληνικό, Πειραιάς και Ελευσίνα περίπου 2.5 ώρες μετά την ανατολή του ηλίου και φτάνει σε αυτούς εσωτερικά του λεκανοπεδίου αργότερα (πλήρης ανάπτυξη περίπου κατά τις 14.00 τοπική ώρα) έχοντας μία μέση 2.57 m/s. Κατά την πλήρη ανάπτυξή της ο άνεμος πνέει με διεύθυνση 180⁰- 190⁰ στους παράκτιους σταθμούς και φτάνει μέχρι το όρος Πάρνηθα 30km από την ακτή όπου και σταματάει λόγω της ύπαρξης του ορεινού όγκου. Στις περιπτώσεις που η ταχύτητα του ανέμου δεν ξεπερνά τα 3.09 m/s στο σταθμό του Ελληνικού η θαλάσσια αύρα είναι ασθενής και δεν κατορθώνει να φτάσει στη Νέα Φιλαδέλφεια και το Τατόι. Το βράδυ εμφανίζεται απόγειος αύρα με διεύθυνση βόρεια βορειοανατολική και μέση ταχύτητα 0.51 m/s (Prezerakos 1986). Η εμφάνιση τοπικών συστημάτων κυκλοφορίας την καλοκαιρινή περίοδο συχνά οδηγεί σε επεισόδια ρύπανσης. (Asimakopoulos et al. 1992, Grossi et al. 2000, Helmis et al. 1995, Kotroni et al. 2004, Melas and Enger 1993, Melas et al. 1998, Moussiopoulos et al. 1995, Ziomas et al. 1995).

Πιο αναλυτικά, οι μετεωρολογικές συνθήκες που συσχετίζονται με την ατμοσφαιρική ρύπανση στην περιοχή των Αθηνών συνδέονται με αντικυκλωνικές συνθήκες κατά τη διάρκεια των οποίων καταγράφονται αναστροφές ακτινοβολίας και υψηλές συγκεντρώσεις SO₂ και καπνού στο αεροδρόμιο του Ελληνικού (Katsoulis, 1988) . Επιπλέον, η ανάλυση και ταξινόμηση κλιματολογικών δεδομένων και δεδομένων ποιότητας ατμόσφαιρας για την ΕΠΑ για την περίοδο 1983-1990 από τους Kallos et al. (1993) υπέδειξε πιο αναλυτικά τις κυριότερες μετεωρολογικές συνθήκες κατά τη διάρκεια των οποίων εμφανίζονται υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων. Αυτές είναι (i) αντικυκλωνικές συνθήκες με μεταφορά θερμών αερίων μαζών και συνθήκες θερμικής ευστάθειας στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, (ii) σύστημα αβαθούς χαμηλού με παράλληλη μεταφορά θερμών αερίων μαζών που οδηγούν σε θερμική ευστάθεια στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, (iii) ασθενής συνοπτική κυκλοφορία με το πέρασμα ψυχρού μετώπου με αίθριο καιρό που ευνοεί τις

θερμοκρασιακές ανατροφές και (iv) αντικυκλωνικό σύστημα με ασθενή βαροβαθμίδα που ευνοεί τη δημιουργία τοπικών ροών (θαλάσσια αύρα). Σύμφωνα με τα αποτελέσματά τους, τα επεισόδια ρύπανσης διαρκούν συνήθως από 2 έως 4 ημέρες και εμφανίζονται καθόλη τη διάρκεια του έτους. Διαπιστώθηκε ότι τα χειρότερα επεισόδια αέριας ρύπανσης στην Αθήνα συμβαίνουν κατά τη διάρκεια ημερών με μια κρίσιμη ισορροπία μεταξύ της συνοπτικής και μέσης κλίμακας κυκλοφορία ή/και κατά τη διάρκεια ημερών με θερμή μεταφορά στην κατώτερη τροπόσφαιρα. Σε αυτό συμφώνησαν και οι Kassomenos et al. (1998) οι οποίοι μελέτησαν την ημερήσια συσχέτιση μεταξύ συνοπτικής κυκλοφορίας και δεικτών ποιότητας αέρα, λαμβάνοντας υπόψη τους ρύπους O_3 , SO_2 , CO, NO_2 και BS, για την περίοδο 1985 – 1995. Κατέδειξαν ότι οι υψηλές συγκεντρώσεις φωτοχημικών ρύπων και SO_2 σχετίζονται στενά με την συνοπτική κυκλοφορία στα 850hPa και μάλιστα ο ανοιχτός αντικυκλώνας οδηγεί σε υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων ενώ ο κλειστός αντικυκλώνας σε επεισόδιο ρύπανσης. Επιπλέον, αναφέρουν ότι οι ρύποι O_3 και NO_2 παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις κατά τη θερμή περίοδο ενώ οι CO και SO_2 κατά την ψυχρή.

Όσον αφορά στη χρήση μετεωρολογικών μοντέλων για την ανάλυση της χρονικής εξέλιξης και των χαρακτηριστικών της θαλάσσιας αύρας κατά τη διάρκεια επεισοδίου ρύπανσης, οι Kallos et al. (1993) χρησιμοποίησαν το μετεωρολογικό μοντέλο RAMS. Με τη βοήθεια του διαπιστώθηκε ότι κατά τις αριθμητικές προσομοιώσεις θα πρέπει τουλάχιστον να καλύπτεται μια μεγάλη περιοχή (τουλάχιστον ένα μέρος της ΒΑ Πελοποννήσου, τον Ισθμό της Κορίνθου και το νότιο τμήμα της Εύβοιας) με ανάλυση πλέγματος λιγότερο από 4km, προκειμένου να επιλύεται η ροή σε κρίσιμες περιοχές και να περιγράφονται πολύ ενδιαφέροντα φαινόμενα, όπως η ανακυκλοφορία των ατμοσφαιρικών ρύπων οπότε ατμοσφαιρικά μοντέλα με δυνατότητα διαδοχικών πλεγμάτων είναι πιο κατάλληλα για τέτοιες προσομοιώσεις. Επίσης διαπίστωσαν ότι η χρήση φωτοχημικών μοντέλων για την περιοχή των Αθηνών είναι πολύ προβληματική, διότι δεν υπάρχει μια ακριβής και λεπτομερή καταγραφή των εκπομπών.

Οι Kotroni et al. (1999) μελέτησαν με τη βοήθεια αριθμητικού μοντέλου ένα καλοκαιρινό επεισόδιο αέριας ρύπανσης στην Αθήνα (6 - 8 Αυγούστου 1994) το οποίο καταγράφηκε από το δίκτυο μέτρησης ποιότητας της ατμόσφαιρας και από ερευνητικό αεροσκάφος διαπιστώνοντας ότι το αστικό πλούμιο της Αθήνας μεταφέρεται στο Σαρωνικό Κόλπο μέχρι την ανατολική ακτή της Πελοποννήσου περίπου 200km μακριά από το κέντρο της πόλης όπως επιβεβαίωσαν και οι παρατηρήσεις του αεροσκάφους.

Με στόχο την εκτίμηση των επιπέδων ποιότητας του αέρα στο αστικό περιβάλλον της Αθήνας και την έγκαιρη προειδοποίηση στο πλαίσιο της προστασίας της δημόσιας υγείας οι Larissi et al. (2010), χρησιμοποίησαν το Δείκτη Ποιότητας Αέρα (Air Quality Index) που υπολογίστηκε από τις

ωριαίες συγκεντρώσεις των ρύπων O_3 , NO_2 , CO , SO_2 και PM_{10} που καταγράφονται από το δίκτυο παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης της Αθήνας, κατά τη διάρκεια της περιόδου 2001-2006. Η χρονική και χωρική κατανομή των μέσων ετήσιων τιμών του AQI μέσα στην ΕΠΑ εξετάστηκε και τα αποτελέσματα αναλύθηκαν λαμβάνοντας υπόψη τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες. Η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου και της κατεύθυνσης του στις τιμές του AQI είναι πολύ σημαντική, μεταξύ των άλλων μετεωρολογικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία αέρα, η σχετική υγρασία, η ηλιοφάνεια και η συνολική ηλιακή ακτινοβολία. Η ανάλυση έδειξε ότι οι υψηλότερες τιμές των AQI, κατά τη θερμή περίοδο του έτους, συνδέονται στενά με την θαλάσσια αύρα σε σχέση με τη βόρεια ροή του ανέμου. Σαν συνέπεια η γνώση των χαρακτηριστικών της θαλάσσιας αύρας πάνω από την ΕΠΑ συμβάλλει σημαντικά στην κατανόηση της ποιότητας του αέρα της περιοχής.

Σε αυτό το πλαίσιο πραγματοποιήθηκε από τους Manrakou et al. (2012) μελέτη για τις επιπτώσεις της θαλάσσιας αύρας στα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης για διαφορετικά συστήματα ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας χρησιμοποιώντας δεδομένα συγκεντρώσεων από 4 σταθμούς του λεκανοπεδίου, μετεωρολογικούς χάρτες εδάφους και μετρήσεις μετεωρολογικών παραμέτρων από δύο παράκτιους σταθμούς. Προέκυψαν δύο τύποι θαλάσσιας αύρας (pure sea breeze-PSB and modified sea breeze-MSB) ενώ η θαλάσσια αύρα διαπιστώθηκε ότι αναπτύσσεται πιο συχνά για υπεράκτιες ροές σε σχέση με τις χερσαίες και τις παράλληλες στην ακτογραμμή ροές. Οι κακές συνθήκες διασποράς των ρύπων συνδέονται με τις pure sea breeze ροές και με τις περιπτώσεις όπου η θαλάσσια αύρα αλληλεπιδρά με μια μέτρια βόρεια ροή κατά τη θερμή περίοδο. Τα επίπεδα των NO_x και O_3 στα βόρεια προάστια της Αθήνας βρέθηκε να είναι σημαντικά υψηλότερα κατά τη διάρκεια των ημερών με θαλάσσια αύρα σε σύγκριση με τις ημέρες που επικρατούν Ετησίες.

2.2.3 Θερμική Αστική Νησίδα

Πέραν των μετεωρολογικών συνθηκών που ευνοούν την εμφάνιση επεισοδίων ρύπανσης, στην περιοχή παρατηρείται το φαινόμενο της αστικής θερμονησίδας, δηλαδή η εμφάνιση θερμοκρασιακών διαφορών μεταξύ της αστικής και της αγροτικής περιοχής. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην επανεκπομπή, κατά τη διάρκεια της νύχτας, της θερμότητας, που απορροφάται κατά τη μέρα, από τα κτίρια, τους δρόμους και τις υπόλοιπες κατασκευές της πόλης. Το αστικό μικροκλίμα εμφανίζει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Μείωση του πραγματικού χρόνου ηλιοφάνειας,
- Μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας ιδιαίτερα της μικρού μήκους κύματος, η οποία δεσμεύεται από το τροποσφαιρικό όζον,
- Μείωση της ταχύτητας του ανέμου λόγω της δόμησης, με αποτέλεσμα τη συχνότερη εμφάνιση νηνεμιών και τη συσσώρευση ρύπων,
- Την αλλαγή της διεύθυνσης του ανέμου λόγω των εμποδίων (κτίρια, κατασκευές, κτλ) που συναντά στην πορεία του,
- Αύξηση της νεφοκάλυψης και των ομιχλών καθώς και αύξηση του υετού,
- Αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας.

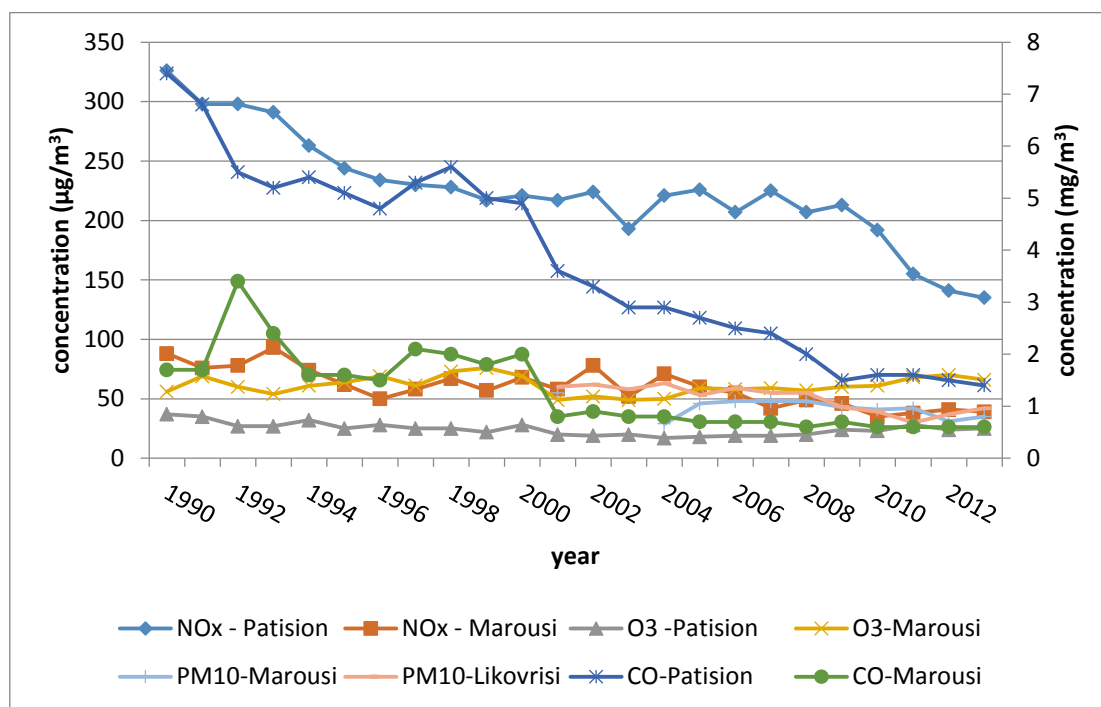
Προκειμένου να συλλάβουν τις δυναμικές και θερμοδυναμικές ανταλλαγές πάνω από την ΕΠΑ οι Martilli et al. (2003) χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο μέσης κλίμακας στο οποίο εισήγαγαν ένα λεπτομερές σχήμα ανταλλαγής με την αστική επιφάνεια βελτιώνοντας τις αριθμητικές προσομοιώσεις. Οι επιπτώσεις της αστικοποίησης στα μετεωρολογικά μοντέλα μελετήθηκαν από τους Dandou et al. (2005), Dandou et.al (2009) αναπτύσσοντας μια νέα αστική παραμετροποίηση με τη βοήθεια του μετεωρολογικού μοντέλου MM5. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μοντέλο μπόρεσε να αναπαράγει ικανοποιητικά την ανάπτυξη της θαλάσσιας αύρας στην περιοχή αναπαράγοντας ωστόσο χαμηλότερες ταχύτητες από τις καταγραφόμενες. Οι Giannaros et al. (2013) μελέτησαν το φαινόμενο της αστικής θερμνησίδας πάνω από την Αθήνα με το μετεωρολογικό μοντέλο WRF και διαπίστωσαν ότι η αστική επιφάνεια είναι πιο ψυχρή από τις γειτονικές περιοχές κατά τη διάρκεια της ημέρας. Χρησιμοποιώντας δορυφορικά δεδομένα επίγειων θερμοκρασιών κατάφεραν να μειώσουν ελαφρώς τις τιμές της θερμοκρασίας. Οι Kotroni et al. (2011) μελέτησαν ένα σημαντικό επεισόδιο καύσωνα στην Αθήνα χρησιμοποιώντας το μοντέλο MM5 και διαπίστωσαν ότι οι αποκλίσεις του μοντέλου από τις μετρούμενες μετεωρολογικές παραμέτρους οφείλονταν εν μέρει στην περιορισμένη, σε σύγκριση με την πραγματική έκταση της αστικής περιοχής στο μοντέλο.

2.3 Εξέλιξη ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην Ευρύτερη Περιοχή των Αθηνών

Σύμφωνα με την έκθεση “The European Environment state and outlook, year 2010” του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος, η Αθήνα συγκαταλέγεται στις 10 πιο μολυσμένες ευρωπαϊκές πόλεις. Το 2008 κατέλαβε την πέμπτη θέση στις υπερβάσεις της τιμής του ορίου της συγκέντρωσης του όζοντος (για 68 ημέρες σημειώθηκε υπέρβαση της ευρωπαϊκής τιμής στόχου των $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ για τη μέση μέγιστη ημερήσια τιμή 8-ωρου) ενώ η μέση ετήσια συγκέντρωση του διοξειδίου του αζώτου (NO_2) για το ίδιο έτος ήταν $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (όγδοη θέση για την Αθήνα) με το όριο να βρίσκεται στα $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Η διεύθυνση ΕΑΡΘ (Τμήμα Ποιότητας Ατμόσφαιρας) του Υπουργείου Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής (ΥΠΕΚΑ) λειτουργεί σταθμούς μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε συνεχή βάση καθ’ όλη τη διάρκεια του 24ώρου στην περιοχή της Αττικής από το 1984 (Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης - ΕΔΠΑΡ). Σύμφωνα με την ετήσια έκθεση ατμοσφαιρικής ρύπανσης για το έτος 2013 (ΥΠΕΚΑ, 2014), η διαχρονική εξέλιξη των τιμών δείχνει ότι, παρόλο που υπάρχουν αυξομειώσεις των μέσων ετήσιων τιμών ρύπανσης από χρόνο σε χρόνο στις διάφορες θέσεις, εμφανίζεται πτωτική τάση ή τάση σταθεροποίησης, ανάλογα με το ρύπο. Η εξέλιξη αυτή μπορεί να αποδοθεί, κυρίως στην τεχνολογική αναβάθμιση του στόλου των Ι.Χ. αυτοκινήτων και των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς (ΜΜΜ), στην εφαρμογή του μέτρου της Κάρτας Ελέγχου Καυσαερίων (ΚΕΚ), στα μέτρα ελέγχου εκπομπής ρύπων από διάφορες πηγές, στη χρήση καυσίμων με καλύτερες τεχνικές προδιαγραφές, στη λειτουργία των μέσων σταθερής τροχιάς, στη διευκόλυνση της κυκλοφορίας των ΜΜΜ, στη διείσδυση του φυσικού αερίου στον οικιακό, βιομηχανικό και τριτογενή τομέα, στην ολοκλήρωση των μεγάλων κυκλοφοριακών έργων κ.λ.π. Στο Σχήμα 2-4 παρουσιάζονται οι μέσες ετήσιες τιμές των ρύπων NO_x , O_3 , PM_{10} και CO για τους σταθμούς Μαρούσι (αστικός-κυκλοφορίας), Πατησίων (αστικός-κυκλοφορίας) και Λυκόβρυση (περιαστικός) του δικτύου μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΥΠΕΚΑ, για την περίοδο 1990 – 2013. Την τελευταία δεκαετία οι τιμές του CO εμφανίζονται αρκετά μειωμένες σε σχέση με την περίοδο 1990-2000 τόσο στο σταθμό του Αμαρουσίου (70% μείωση μεταξύ 2000 και 2013) όσο και στον σταθμό της Πατησίων (71.43% μείωση μεταξύ 2000 και 2013). Σχετικά με τα αιωρούμενα σωματίδια παρατηρήθηκε υπέρβαση της οριακής τιμής των $40 \mu\text{g}/\text{m}_3$ κατά την περίοδο 2005-2011 στον σταθμό του Αμαρουσίου ενώ στο σταθμό της Λυκόβρυσης υπέρβαση παρατηρήθηκε από το 2001 μέχρι το 2009 και το 2013. Οι συγκεντρώσεις των PM_{10} σχετίζονται άμεσα με την κίνηση των οχημάτων, την βιομηχανική δραστηριότητα, τις εκπομπές από την καύση βιομάζας στον οικιακό τομέα αλλά και την μεταφορά σκόνης από την Σαχάρα. Οι συγκεντρώσεις των οξειδίων του αζώτου (NO_x) παρουσιάζουν μια τάση μείωσης η οποία είναι μεγαλύτερη στο σταθμό της Πατησίων

(58.59% η μείωση από το 1990 μέχρι το 2013) ενώ για το όζον υπάρχει μια τάση σταθεροποίησης των τιμών τόσο στο σταθμό της Πατησίων όσο και στο σταθμό του Αμαρουσίου στον οποίο η μέση ετήσια τιμή κυμαίνεται περίπου στα 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



Σχήμα 2-4. Διαχρονική εξέλιξη της ρύπανσης σε επιλεγμένους σταθμούς του ΕΔΠΑΡ για την περίοδο 1990 – 2013.

Οι αναλύσεις των δεδομένων από το δίκτυο σταθμών μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ στην Αττική από τους Kalabokas et al. (1999a, b) για την περίοδο 1987-1997 έδειξαν μια σημαντική πτωτική τάση για σχεδόν όλους τους πρωτογενείς ρύπους. Η σύγκριση μεταξύ των περιόδων 1988-1990 και 1995-1997 έδειξε τη μεγαλύτερη μείωση στο κέντρο της ΕΠΑ της τάξης του 52%, 34%, 26% και 20% για τους ρύπους SO_2 , CO, NO_x και μαύρο καπνό, αντίστοιχα. Οι συγκεντρώσεις των δευτερογενών αερίων ρύπων παρέμειναν ουσιαστικά στα ίδια επίπεδα από το 1990, αν και παρουσίασαν διαφορετικά χαρακτηριστικά (π.χ. όσον αφορά τις τάσεις του όζοντος) σε διαφορετικούς τύπους σταθμών (Hatzianastassiou et al., 2007). Οι παρατηρήσεις των συγκεντρώσεων του όζοντος πριν από το 2000 (Kalabokas and Repapis, 2004) σε τρεις σταθμούς της ΕΠΑ βρέθηκαν να παρουσιάζουν χαρακτηριστική εποχική διακύμανση, με τις χαμηλότερες τιμές να σημειώνονται τον χειμώνα τις απογευματινές ώρες (περίπου 25 ppbv) και τις υψηλότερες το καλοκαίρι (περίπου 60 ppbv).

Η εποχική διακύμανση του O_3 υποβάθρου διαπιστώθηκε και από τον Glavas (1999) σύμφωνα με μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν τη χρονική περίοδο 1996-1997 στην βόρεια

Πελοπόννησο (Αροάνια Όρη). Οι υψηλότερες τιμές καταγράφηκαν την άνοιξη και το καλοκαίρι (μέση τιμή 43 – 48 ppb) ενώ τον Οκτώβριο του 1996 η μέση τιμή ήταν 35 ppb. Οι συγκεκριμένες τιμές προκύπτουν από το τοπικά παραγόμενο O_3 αλλά και από τον μετασχηματισμό των πρόδρομων ουσιών κατά τη μεταφορά τους από ΒΔ και ΒΑ διευθύνσεις προς το σημείο καταγραφής. Πολύ υψηλές συγκεντρώσεις O_3 (70ppb) καταγράφηκαν στις περιπτώσεις που είχαμε μεταφορά αερίων μαζών από τη Β. Αφρική οι οποίες μάλιστα δεν παρουσίαζαν ημερήσια διακύμανση. Αυτές οι τιμές είναι συγκρίσιμες με τις παρατηρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην Φινοκαλιά στη βόρεια Κρήτη την χρονική περίοδο 1997-2004 (Gerasopoulos et al., 2005, 2006) και δείχνουν σημαντική συνεισφορά από μακρινές πηγές λόγω μεταφοράς από μεγάλες αποστάσεις και όχι τοπική παραγωγή με τη βοήθεια της φωτοχημείας. Η ημερήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων του όζοντος φάνερωσε μέση ελάχιστη τιμή 46 ± 11 (34 ± 7 ppbν το Δεκέμβριο και 54 ± 9 ppbν τον Αύγουστο) στις 8.30LST και μέση μέγιστη 50 ± 12 ppbν το απόγευμα (37 ± 7 ppbν το Δεκέμβριο και 59 ± 11 ppbν τον Αύγουστο). Καθόλη τη διάρκεια του έτους η συνεισφορά της τοπικής φωτοχημείας ήταν περιορισμένη καθώς ο χημικός κύκλος του όζοντος συνεισφέρει λιγότερο από 4% σε ετήσια βάση στις μετρούμενες τιμές είτε ως παραγωγή είτε ως καταβόθρα. Ο επικρατέστερος μηχανισμός συνεισφοράς στις καταγεγραμμένες τιμές O_3 είναι η μεταφορά από την ευρωπαϊκή ήπειρο. Γενικά παρατηρήθηκε μείωση της τάξης του 1.64 ± 0.15 ppbν (3.1%) ανά έτος η οποία σχετίζεται με τη μείωση των πρόδρομων ουσιών του O_3 η οποία συνέβη στη δυτική, κεντρική και ανατολική Ευρώπη αλλά και με τις μετεωρολογικές συνθήκες.

Γενικά η συνεισφορά των πρωτογενών εκπομπών στα επίπεδα όζοντος είναι πολύ σημαντική. Η σύγκριση των τιμών του όζοντος μεταξύ καθημερινών και Σαββατοκύριακου για την Αθήνα (Viras 2002) έδειξε ότι παρόλο που οι συγκεντρώσεις των πρόδρομων ουσιών του όζοντος (οξειδία του αζώτου και πτητικές οργανικές ενώσεις) μειώνονται κατά 10-20% τα Σαββατοκύριακα λόγω του περιορισμού των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων και κατ' επέκταση των εκπομπών, η επίδραση στα επίπεδα του όζοντος είναι χαμηλότερη υποδεικνύοντας ότι η μείωση του όζοντος δεν εξαρτάται από τις συγκεντρώσεις των NO_x και $VOCs$ αλλά από τον μεταξύ τους λόγο. Κατά τη δεκαετία 1994-2003 η εμφάνιση επεισοδίων NO_x ρύπανσης εντός του λεκανοπεδίου μειώθηκε μέχρι που τελικά κανένα επεισόδιο δεν καταγράφηκε από τους σταθμούς μέτρησης από το 2000 μέχρι το 2003. Τα περισσότερα επεισόδια εμφανίστηκαν τη χειμερινή και φθινοπωρινή περίοδο και συνδέονταν με αντικυκλωνική κυκλοφορία και ασθενείς ανέμους ΝΔ διευθύνσεων καθώς και με χαμηλές θερμοκρασίες και σταθερές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Η μείωση ωστόσο των επεισοδίων NO_x δεν φάνηκε να επηρεάζει τη συχνότητα των επεισοδίων O_3 (Hatzianastassiou et al. 2007). Οι ιδανικές συνθήκες που θα επιφέρουν σημαντικότερες αλλαγές στα επίπεδα O_3 είναι 30-40% μείωση των $VOCs$ με αντίστοιχη μείωση των NO_x λιγότερο από 10% (Ziomas et al. 1998a).

Οι συγκεντρώσεις NO_x μετρούνται καθημερινά από το ΕΔΠΑΡ με αποτέλεσμα την εύκολη ανάλυση και εξαγωγή συμπερασμάτων για τη χρονική διακύμανσή τους από τους επιστήμονες σε αντίθεση με τα VOCs τις συγκεντρώσεις των οποίων δεν γνωρίζουμε αναλυτικά. Χρονοσειρές συγκεντρώσεων NO₂ που κυμαίνονται από 3 έως 17 έτη (καλύπτοντας την περίοδο 1987-2003) για 11 διαφορετικές τοποθεσίες εντός του λεκανοπεδίου χρησιμοποιήθηκαν από τους Chaloulakou et al. (2008) με στόχο την μελέτη των επιπέδων NO₂ στην Αθήνα, τις επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και την αναζήτηση μεθόδων συμμόρφωσης με τις μέσες ετήσιες τιμές που καθορίζονται από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Ο λόγος που μελετήθηκε το NO₂ είναι γιατί μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ιχνηλάτης των εκπομπών από τις οδικές μεταφορές σε αστικές περιοχές (Lewne et al., 2004) και επηρεάζει σημαντικά την υγεία του ανθρώπου. Για παράδειγμα, άτομα που υποφέρουν από ασθένειες του αναπνευστικού, όπως το άσθμα, είναι πολύ ευαίσθητα σε υψηλές συγκεντρώσεις NO₂. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι, προκειμένου να επιτευχθεί η ετήσια μέση τιμή στόχος της ΕΕ σε όλες τις τοποθεσίες αστικού υποβάθρου της Αθήνας, οι ετήσιες συγκεντρώσεις NO_x θα πρέπει να μειωθούν περίπου στα 60mg/m³, απαιτώντας τη μείωση των εκπομπών NO_x μέχρι και 30% οπότε και θα πρέπει να παρατηρηθεί μια μείωση των εισαγωγών στο νοσοκομείο έως 2.6%.

Οι Mavroidis and Chaloulakou (2011) εξέτασαν τη συμβολή του πρωτογενούς και δευτερογενούς NO₂ στις συγκεντρώσεις NO_x προσφέροντας μια ολοκληρωμένη ανάλυση των μακροπρόθεσμων τάσεων των συγκεντρώσεων NO_x, NO₂ καθώς και της αναλογίας NO₂/NO_x, στον αστικό ιστό της Αθήνας. Η μείωση των συγκεντρώσεων NO₂ στην Αθήνα από το 1987 ακολουθεί βραδύτερο ρυθμό από ότι των NO_x, οδηγώντας σε αύξηση του λόγου NO₂/NO_x, η οποία οφείλεται κυρίως στον αυξημένο δευτερογενή σχηματισμό NO₂ μέσω φωτοχημικών αντιδράσεων στην ατμόσφαιρα καθώς το ποσοστό του πρωτογενούς NO₂ δεν έχει μεταβληθεί σημαντικά μεταξύ 1998 και 2006 λόγω της απαγόρευσης της κίνησης πετρελαιοκίνητων Ι.Χ. οχημάτων εντός του κέντρου της πόλης. Ωστόσο, αυτή η αυξητική τάση είναι πολύ μικρότερη από εκείνες που παρατηρούνται σε αστικές περιοχές άλλων ευρωπαϊκών χωρών. Μία πιθανή αύξηση των πετρελαιοκίνητων Ι.Χ. οχημάτων αναμένεται να αυξήσει τα ποσοστά του πρωτογενούς NO₂.

Τα επίπεδα της σωματιδιακής ρύπανσης στο λεκανοπέδιο καθώς επίσης οι πηγές, η σύσταση και οι επιπτώσεις τους στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία μελετούνται τα τελευταία χρόνια. Μετρήσεις PM₁₀ και PM_{2.5} που πραγματοποιήθηκαν σε πολυσύχναστο δρόμο των Αθηνών από τους Chaloulakou et al. (2003) για ένα έτος (Ιούνιος 1999 – Μάιος 2000) έδειξαν ότι η μέση 24-ωρη τιμή των PM₁₀ ήταν 75.5μg/m³ ενώ για τα PM_{2.5} η αντίστοιχη τιμή ήταν 40.2μg/m³ και σχετίζονται σημαντικά με τις συγκεντρώσεις των CO, BC και των NO_x ενώ οι πηγές εκπομπών (κυρίως οι οδικές μεταφορές) ευθύνονται για τις υψηλές τιμές που καταγράφηκαν κατά την

παραπάνω περίοδο. Εν συνεχεία, οι Grivas et al. (2008) ανέλυσαν τα δεδομένα συγκέντρωσης PM_{10} που συλλέγονται από το δίκτυο σταθμών μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ στην Αττική για την περίοδο από 2001-2004. Οι ημερήσιες συγκεντρώσεις για το σύνολο της περιόδου μελέτης κυμάνθηκαν από 32.3 μέχρι και 60.9 mg/m^3 ενώ η τετραετής μέση συγκέντρωση των PM_{10} παρουσίασε υπέρβαση της ετήσιας οριακής τιμής των 40 mg/m^3 σε πέντε σταθμούς και στις περισσότερες από τις περιοχές ξεπέρασε την ημερήσια οριακή τιμή των 50 mg/m^3 . Γενικά οι αστικοί σταθμοί επηρεάστηκαν από πρωτογενείς διεργασίες καύσης όπως η κίνηση των οχημάτων ενώ η μεταφορά σωματιδίων από γειτονικές επιβαρυμένες περιοχές και ο σχηματισμός των σωματιδίων από πρόδρομους αέριους ρύπους καθόρισαν τις μετρήσεις στους περιφερειακούς σταθμούς. Πολλή σημαντική είναι η διασυννοριακή μεταφορά των σωματιδίων από την έρημο της Σαχάρας και τη Δυτική Μεσόγειο. Προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση των τοπικών πηγών στις συγκεντρώσεις των PM εντός του λεκανοπεδίου πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από το Σεπτέμβριο του 2005 μέχρι τον Αύγουστο του 2006 στο Γουδί και στη Λυκόβρυση συγκρίθηκαν με συγκεντρώσεις από τον σταθμό της Φινοκαλιάς (σταθμός υποβάθρου) και διαπιστώθηκε ότι η τοπικά παραγόμενη Σωματιδιακή Οργανική Μάζα (Particulate Organic Mass-POM) και ο EC συνεισφέρουν σημαντικά στην τοπική συγκέντρωση των σωματιδίων (πάνω από 62% στα PM_{10} , Theodosi et al. 2011). Πέραν των τοπικών πηγών όμως καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας εντός του λεκανοπεδίου παίζει και η μεταφορά αερίων μαζών από απομακρυσμένες περιοχές. Με αυτό το σκοπό οι Markou and Kassomenos (2010) μελέτησαν τη μεταφορά αερίων μαζών σε τρία ύψη (750m, 1500m και 3000m) στην Αθήνα χρησιμοποιώντας οπισθοτροχιές παραγόμενες από το μοντέλο Hysplit με διαφορετικό μήκος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι μικρού μήκους αέριες μάζες (μήκος οπισθοτροχιάς μέχρι τα 1500m) προέρχονται από όλες τις πιθανές κατευθύνσεις ενώ οι μεγαλύτερου μήκους οπισθοτροχιές (με μήκος πάνω από 3000m) προέρχονται κυρίως από τα δυτικά και νότια. Η αύξηση του ύψους μείωνε/αύξανε την εμφάνιση μικρού/μεγάλου μήκους οπισθοτροχιών λόγω της επίδρασης του εδάφους και των ισχυρότερων ανέμων.

Με βάση τα παραπάνω είναι αναγκαία η συστηματική παρακολούθηση της διασποράς των ρύπων η οποία μπορεί να επιτευχθεί με την πραγματοποίηση παράλληλων μετρήσεων σε σημεία κλειδιά του αστικού ιστού και την ταυτόχρονη αριθμητική μελέτη της διασποράς των ρύπων για διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες (Pateraki et al. 2013). Με σκοπό να εξεταστεί η συμπεριφορά των PM_{10} , $PM_{2.5}$ και PM_1 σε διαφορετικούς τύπους περιβάλλοντος και κατά τη διάρκεια διαφορετικών μετεωρολογικών συνθηκών πραγματοποιήθηκε μια εκστρατεία μετρήσεων διάρκειας 127 ημερών η οποία διεξήχθη παράλληλα σε τέσσερις περιοχές του λεκανοπεδίου καλύπτοντας τις περιόδους 29/2-2/5/2008 (1η πειραματική περίοδος) και 4/6-5/8/2008 (2η

πειραματική περίοδος). Τα σημεία μέτρησης επιλέχθηκαν και τοποθετήθηκαν κατά μήκος του κύριου άξονα (ΝΝΔ-BBA) του λεκανοπεδίου ώστε να καλύπτονται διαφορετικές περιβαλλοντικές περιοχές, από αγροτική/παράκτια μέχρι αστική και βιομηχανική. Λαμβάνοντας υπόψη την πιθανή συνεισφορά αερίων μαζών εκτός του λεκανοπεδίου, πρόσθετα στοιχεία αποκτήθηκαν από τους ήδη υπάρχοντες σταθμούς παρακολούθησης του Πειραιά, των Μεσογείων και του Θριασίου Πεδίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στους αστικούς σταθμούς του Πειραιά και του Βοτανικού οι μέσες τιμές σωματιδίων ήταν $33.8 \pm 20.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_{10}), $21.1 \pm 8.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($\text{PM}_{2.5}$) και $24.7 \pm 8.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($\text{PM}_{2.5}$) $19.3 \pm 6.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_1) αντίστοιχα ενώ στον προαστιακό σταθμό της Αγίας Παρασκευής οι μέσες τιμές ήταν $33.2 \pm 22.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_{10}) και $17.7 \pm 6.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($\text{PM}_{2.5}$) και στον αγροτικό σταθμό της Πεντέλης ήταν $37.4 \pm 17.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_{10}) και $26.7 \pm 9.52 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Γενικά οι μετρούμενες τιμές εμφανίζονται χαμηλότερες αυτών που κατέγραψαν οι Chaloulakou et al. (2003) 10 χρόνια πριν. Στη βιομηχανική περιοχή του Θριασίου Πεδίου καταγράφηκαν πολύ υψηλότερες συγκεντρώσεις σωματιδίων, $61.7 \pm 20.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM_{10} στην Μάνδρα και $86.6 \pm 35.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM_{10} στον Ασπρόπυργο. Ανατολικά του λεκανοπεδίου στην περιοχή των Μεσογείων οι συγκεντρώσεις PM_{10} ήταν για την ίδια περίοδο $55.8 \pm 26.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ στο Μαρκόπουλο, $52.8 \pm 25.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ στο Κορωπί, $35.5 \pm 15.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ στα Σπάτα, $40.1 \pm 22.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και $34.1 \pm 17.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ στα Γλυκά Νερά. Οι τοπικές κυκλοφορίες αερίων μαζών αποδείχθηκαν υπεύθυνες για τη μεταφορά σωματιδίων και NO_x από το κέντρο της πόλης στις γειτονικές περιοχές. Η ανάλυση των δεδομένων των μετρήσεων έδειξε ότι οι τοπικές πηγές όπως η κυκλοφορία και η βιομηχανία είναι υπεύθυνες για τα μετρούμενα φορτία των PM, ειδικά στις περιοχές που παρουσιάζουν πολύ υψηλά επίπεδα «pollutant hot spots». Επιπλέον, η συνοπτική κυκλοφορία που συνδέεται με χαμηλές ταχύτητες και νότιες διευθύνσεις ανέμου οδηγεί σε υψηλά επίπεδα ρύπανσης σωματιδίων. Η συνεισφορά της σκόνης από τη Σαχάρα αφορά στην αύξηση της διαμέτρου των σωματιδίων καθώς και στον αριθμό των υπερβάσεων των οριακών τιμών εντός των σταθμών του δικτύου. Η αριθμητική προσέγγιση για μια περίοδο με νότιους ανέμους έδειξε ότι οι πιο επιβαρυνμένες περιοχές σε συγκεντρώσεις PM είναι οι βιομηχανοποιημένες και με έντονη κυκλοφορία περιοχές, σε συμφωνία με τα δεδομένα των μετρήσεων.

Συγκρινόμενα με άλλες πυκνοκατοικημένες ευρωπαϊκές πόλεις (Μαδρίτη και Λονδίνο), τα επίπεδα των PM_{10} και $\text{PM}_{2.5}$ στην Αθήνα εμφανίζονται υψηλότερα τόσο το καλοκαίρι όσο και το χειμώνα (μέσες εποχικές τιμές) σε αστικούς σταθμούς κυκλοφορίας (Πειραιάς για την Αθήνα) για τα έτη 2005 (Μαδρίτη, Λονδίνο) και 2007 (Αθήνα, Kassomenos et al. 2014a). Στους σταθμούς υποβάθρου (Αγία Παρασκευή για την Αθήνα) ωστόσο καταγράφηκαν υψηλότερες συγκεντρώσεις PM_{10} την ψυχρή περίοδο και τη θερμή περίοδο στην Μαδρίτη απ' ότι στην Αθήνα. Γενικά η Αθήνα

και η Μαδρίτη εμφανίζουν υψηλότερες συγκεντρώσεις δημιουργώντας έναν γεωγραφικό διαχωρισμό στα επίπεδα PM μεταξύ Βόρειας και Νότιας Ευρώπης.

2.4 Αναδρομή στα μοντέλα προσομοίωσης ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Με κίνητρο την κατανόηση όλων των παραπάνω παραμέτρων αναπτύχθηκαν από τους ερευνητές μοντέλα προσομοίωσης των μετεωρολογικών συνθηκών, των φυσικών και χημικών διεργασιών τα οποία μπορούν να δώσουν τις συγκεντρώσεις των ρύπων σε καθορισμένες χωρικές και χρονικές κλίμακες. Ο συνεχής εμπλουτισμός αυτών των μοντέλων οδήγησε τελικά στη δημιουργία αριθμητικών μοντέλων τα οποία συνεργάζονται για να αποδώσουν όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά την υπάρχουσα κατάσταση στην κατώτερη τροπόσφαιρα. Πλέον έχουν αναπτυχθεί δύο είδη φωτοχημικών μοντέλων τα Λαγκρανζιανά (Lagrangian) και τα Ουλεριανά (Eulerian). Τα πρώτα έχουν ένα κινούμενο πλαίσιο αναφοράς ενώ τα δεύτερα χρησιμοποιούν πλέγματα πάνω σε ένα σταθερό σύστημα συντεταγμένων αναφορικά με το έδαφος. Τα πρωταρχικά μοντέλα είχαν υιοθετήσει τη Λαγκρανζιανή προσέγγιση για την προσομοίωση του σχηματισμού των ρύπων λόγω της υπολογιστικής απλότητας που διαθέτει. Η συγκεκριμένη προσέγγιση όμως περιγράφει ελλιπώς τις φυσικές διεργασίες οπότε τα πιο σύγχρονα μοντέλα χρησιμοποιούν πλέον τρισδιάστατα Ουλεριανά πλέγματα. Τα πιο διαδεδομένα και ολοκληρωμένα φωτοχημικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται είναι το UAM-V, το CMAQ, το REMSAD, το COSMO-ART και το CAMx.

Η αξιοπιστία των φωτοχημικών μοντέλων ελέγχεται με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με πειραματικά δεδομένα και δορυφορικές παρατηρήσεις έτσι ώστε μέσα από την καταγραφή των διαφορών και των αιτιών που τις προκαλούν να βελτιώνονται διαρκώς με απώτερο σκοπό να χρησιμοποιηθούν ως προγνωστικά εργαλεία για την ποιότητα του αέρα. Οι δυσκολίες που παρουσιάζονται οφείλονται κυρίως στα δεδομένα εισόδου (εκπομπές, μετεωρολογία, αρχικές και οριακές συνθήκες) που χρησιμοποιούνται αλλά και σε ελλείψεις που εμφανίζουν τα ίδια τα μοντέλα για την περιγραφή των χημικών μετασχηματισμών που συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα.

Πιο συγκεκριμένα, η εξάρτηση των φωτοχημικών μοντέλων από τα μετεωρολογικά μοντέλα έχει ως αποτέλεσμα οι αβεβαιότητες των τελευταίων να μεταφέρονται στα πρώτα και να επηρεάζουν τα αποτελέσματά τους (Pirovano et al. 2007, Civerolo et al. 2000). Η αποτύπωση του ανεμολογικού πεδίου, των θερμοκρασιών, της λευκαύγειας και της τραχύτητας του εδάφους μέσω του καθορισμού της χρήσης γης δεν είναι ικανοποιητική από τα μετεωρολογικά μοντέλα κυρίως όταν πρόκειται για σύνθετο έδαφος και διάφορες τροποποιήσεις απαιτούνται ώστε τα δεδομένα

εισόδου να περιλαμβάνουν υβριδικά πεδία προερχόμενα από μετρήσεις και προσομοιώσεις μοντέλων (Jackson et al. 2006, Perez-Roa et al. 2006, Lee et al. 2009). Τα μετεωρολογικά μοντέλα άλλωστε έχουν αναπτυχθεί για να κάνουν πρόγνωση καιρού και όχι να αναπαράγουν τις ασθενείς δυναμικές διεργασίες που χαρακτηρίζουν τα επεισόδια ρύπανσης (Μποσιώλη 2006).

Επιπλέον, όσον αφορά στα δεδομένα εκπομπών, αυτά λαμβάνονται από συστήματα απογραφής εκπομπών (emission inventories) η αβεβαιότητα των οποίων οφείλεται στην έλλειψη ακριβών και αναλυτικών δεδομένων. Για τη δημιουργία ενός συστήματος απογραφής εκπομπών απαιτείται λεπτομερής καταγραφή όλων των πηγών ρύπανσης (σημειακών, γραμμικών και περιοχικών). Όταν αυτό δεν είναι εφικτό τα απαραίτητα δεδομένα προκύπτουν από μετρήσεις σε επιλεγμένες πηγές και στατιστικά δεδομένα. Οι σημειακές πηγές συνήθως περιέχουν δεδομένα από μια βιομηχανική μονάδα σε συνδυασμό με στοιχεία για την τοποθεσία, τον συνολικό όγκο των ρύπων που εκπέμπονται, τις συνθήκες λειτουργίας το ύψος της καμινάδας κ.ά. Στην κατηγορία των περιοχικών πηγών ανήκουν πηγές όπως κεντρική θέρμανση, κατανάλωση καυσίμων από κίνηση οχημάτων σε μικρούς δρόμους ή από άλλες εργασίες κ.ά. Οι γραμμικές πηγές περιλαμβάνουν εκπομπές ρύπων από την κυκλοφορία οχημάτων σε κύριες οδούς. Επίσης εκπομπές από τραίνα και γραμμές πλοίων μπορούν να συμπεριληφθούν. Στη συνέχεια οι εκπομπές τοποθετούνται σε πλεγματικά κελιά συγκεκριμένων διαστάσεων και προβολικού συστήματος με τη βοήθεια κριτηρίων όπως είναι η χρήση γης, ο πληθυσμός μιας πόλης, το μήκος ενός δρόμου, κ.ά. Η χρονική διακριτοποίηση των εκπομπών ακολουθεί τον εποχικό και ημερήσιο κύκλο των πηγών, όπως για παράδειγμα το ωράριο λειτουργίας ενός εργοστασίου, τον κυκλοφοριακό φόρτο των αστικών δρόμων κ.α. Όπως είναι φανερό η ορθή αποτύπωση των εκπομπών πρέπει να βασίζεται σε αξιόπιστα δεδομένα όσον αφορά στο πλήθος, τη θέση και τη δραστηριότητα των πηγών, η συλλογή των οποίων δεν είναι πάντα εύκολο να επιτευχθεί με αποτέλεσμα να γίνεται υποεκτίμηση των πραγματικών εκπομπών. Όσον αφορά στην Ελλάδα έχουν γίνει προσπάθειες αποτύπωσης των εκπομπών σε πλεγματικά κελιά με απώτερο σκοπό τη χρήση τους από φωτοχημικά μοντέλα (Markakis et al. 2010, Sidiropoulos and Tsiligridis 2009, Symeonidis et al. 2008, Poupkou et al. 2007, Aleksandropoulou and Lazaridis 2004, Symeonidis et al. 2004, Symeonidis et al. 2003).

Όσον αφορά στις οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται στα φωτοχημικά μοντέλα θα πρέπει να είναι ορθά επιλεγμένες (Samaali et al. 2007, Tombrou et al. 2009). Προκειμένου να εξαλειφθεί η εξάρτηση από τις οριακές συνθήκες έχει επικρατήσει η χρήση της μεθόδου των πολλαπλών εστιάσεων (nested grids) σύμφωνα με την οποία χρησιμοποιείται εξωτερικό πλέγμα μεγαλύτερων διαστάσεων (μητρικό πλέγμα) για την κάλυψη μεγαλύτερης περιοχής από αυτή του εσωτερικού και κύριου πλέγματος. Στο μητρικό πλέγμα δίνονται συνήθως σταθερές οριακές συνθήκες ενώ με τη διαδοχική εστίαση κατά την προσομοίωση προκύπτουν χωρικά και χρονικά

μεταβαλλόμενες οριακές συνθήκες για το εσωτερικό πλέγμα. Επίσης για μικρής χρονικής διάρκειας προσομοιώσεις χρησιμοποιούνται 2-3 ημέρες που προηγούνται της υπό μελέτη περιόδου ώστε να τροφοδοτήσουν την προσομοίωση με τις απαραίτητες αρχικές συνθήκες για τις συγκεντρώσεις των ρύπων.

Τα φωτοχημικά μοντέλα χρησιμοποιούνται συνεχώς από την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα για τη μελέτη της διασποράς των ρύπων πάνω από αστικές περιοχές κυρίως αλλά και περιοχές σύνθετου εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, μελετώνται:

- Η ικανότητα των μοντέλων να αναπαράγουν τις μετρούμενες συγκεντρώσεις των ρύπων (Martilli et al. 2003, Spyridaki et al. 2006, Αστήθα 2007, Byun et al. 2007, Gaydos et al. 2007, Lei et al. 2007, Yarwood et al. 2008, Borrego et al. 2010, Jorquera and Julio Castro 2010, Fameli et al. 2012).
- Η ευαισθησία των μοντέλων σε διάφορους παράγοντες (δεδομένα εισόδου, χημικοί μηχανισμοί) με στόχο τη βελτίωσή τους για την καλύτερη αναπαραγωγή των εκπομπών από τα μοντέλα (Morris et al. 2006, Bossioli et al. 2007, Feldman et al. 2007, Polymeneas et al. 2007, Cheng et al. 2008, Feldman et al. 2010, Hu et al. 2010, Fameli et al. 2013b).
- Σενάρια εκπομπών για διαμόρφωση στρατηγικής ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Moussiopoulos et al. 2009, Vlachokostas et al. 2009).
- Τα χαρακτηριστικά διασποράς ρύπων πάνω από ευρύτερες αστικές περιοχές (Borrego et al. 2010).
- Η έκθεση του πληθυσμού σε επικίνδυνα επίπεδα ρύπανσης (Castell et al. 2010, Karydis et al. 2010).

Επίσης χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά με μετρήσεις από σταθμούς δικτύου παρακολούθησης ρύπανσης σύμφωνα και με αυτά που προβλέπονται στην Ambient Air Quality Directive (2008/50/EC) - Clean Air Policy Package (18 December 2013).

2.5 Υπολογιστικές μελέτες για την Αττική

Μια πιλοτική μελέτη της φωτοχημικής ρύπανσης διεξήχθη το Μάιο του 1993 στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας από τους Ziomas et al. (1995), στην οποία συμπεριλαμβάνονταν τόσο πειραματικά δεδομένα όσο και αριθμητικά μοντέλα. Υψηλές συγκεντρώσεις όζοντος (περίπου 130

ppb) παρατηρήθηκαν στα βόρεια προάστια της Αθήνας ενώ στο ανατολικό τμήμα της χερσονήσου της Αττικής το χαμηλό όζον (μέγιστη παρατηρούμενη περίπου 70 ppb) και τα επίπεδα NO_x έδειξαν την απουσία πρόδρομων ουσιών στην περιοχή. Σύμφωνα με τις προβλέψεις του τρισδιάστατου μοντέλου μέσης κλίμακας, κατά τη διάρκεια μιας ημέρας επεισοδίου ρύπανσης (22 Μαΐου 1993) το πεδίο του ανέμου πάνω από την Αττική προέκυψε από τον συνδυασμό μιας αδύναμης συνοπτικής ροής και τριών κυττάρων θαλάσσιας αύρας, που αναπτύχθηκαν στον Σαρωνικό Κόλπο, στην κόλπο της Ελευσίνας και στο ανατολικό τμήμα της Αττικής, αντίστοιχα. Για την ίδια ημέρα της εκστρατείας οι συγκεντρώσεις όζοντος, NO_x και PAN εκτιμήθηκαν από το μοντέλο ικανοποιητικά σε σχέση με τις παρατηρήσεις, αν και η απογραφή εκπομπών που χρησιμοποιήθηκε βασίστηκε σε ετήσιες εκπομπές αναδεικνύοντας την ανάγκη ενός λεπτομερούς συστήματος απογραφής εκπομπών.

Μια από τις πιο οργανωμένες και ολοκληρωμένες ως προς τη συλλογή δεδομένων πειραματικές εκστρατείες ήταν το πρόγραμμα MEDCAPHOT – TRACE (The Mediterranean Campaign of Photochemical Tracers-Transport and Chemical Evolution) με τη συμμετοχή 16 ευρωπαϊκών επιστημονικών ομάδων, το οποίο τροφοδότησε με δεδομένα πλήθος ερευνητικών εργασιών. Κατά τη διάρκεια του προγράμματος (20 Αυγούστου- 20 Σεπτεμβρίου 1994) μελετήθηκε η χημική και μετεωρολογική εξέλιξη του όζοντος και άλλων δευτερογενών ρύπων στην περιοχή της Αττικής (Ziomas 1998a). Εκτός από τους σταθμούς που λειτουργούσαν από το υπάρχον δίκτυο παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, 18 νέοι σταθμοί λειτούργησαν στην ΕΠΑ και χρησιμοποιήθηκαν συστήματα DOAS, LIDAR, μετεωρολογικά όργανα και μετρήσεις από αεροσκάφος (ρύπανσης του αέρα και μετεωρολογικών παραμέτρων). Μέτρια επίπεδα ρύπανσης διαπιστώθηκαν ενώ οι υψηλές συγκεντρώσεις των αέριων ενώσεων HCl and HNO που φθάνουν στην πόλη από τον Σαρωνικό Κόλπο οφείλονται στην κακή εξουδετέρωση αυτών πάνω από τη θάλασσα. Αντίθετα, οι αέριες μάζες που προέρχονται από την ενδοχώρα χαρακτηρίζονται από σημαντικά υψηλότερες τιμές NH₄⁺. (Eleftheriadis et al. 1998). Τα αποτελέσματα του προγράμματος χρησιμοποιήθηκαν από τους Svensson (1998), Svensson and Klemm (1998), Clappier et al. (2000), Martilli, et al. (2003) για την πραγματοποίηση αριθμητικών προσομοιώσεων. Στις δύο πρώτες εργασίες έγινε αξιολόγηση ενός φωτοχημικού και μετεωρολογικού μοντέλου για δύο μετεωρολογικά επεισόδια (βόρειος άνεμος, θαλάσσια αύρα) και διαπιστώθηκε ότι τα αποτελέσματα αν και παρουσιάζουν ευαισθησία ως προς το μέγεθος και τη διεύθυνση του ανέμου συμφωνούν σε σημαντικό βαθμό με τις μετρήσεις. Επίσης διαπιστώθηκε ότι το μοντέλο αναπαριστά ικανοποιητικά τα πολύπλοκα πεδία ροής του λεκανοπεδίου και τις κυριότερες διεργασίες που συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα. Η τέταρτη εργασία είχε ως στόχο τη βελτίωση ενός φωτοχημικού ούλεριανού (Eulerian) μοντέλου προκειμένου να αποδίδει καλύτερα τις δυναμικές και θερμοδυναμικές ανταλλαγές στην επιφάνεια και την αξιολόγηση του βελτιωμένου μοντέλου για

την περιοχή της Αθήνας. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν από τους Clappier et al. (2000) συγκρίθηκαν με επίγειες μετρήσεις από lidar και μετρήσεις από αεροσκάφος προκειμένου να εξηγηθεί η επίδραση της θαλάσσιας αύρας στη διαμόρφωση επεισοδίων φωτοχημικής αιθαλομίχλης στην Αθήνα. Η ανάλυση έδειξε ότι οι τρεις επιλεγμένες ημέρες περιλαμβάνουν τα δύο βασικά μοντέλα καλοκαιρινής ροής, καθένα από τα οποία οδηγούν σε πολύ διαφορετικά επίπεδα ρύπανσης. Στις 12 και 13 Σεπτεμβρίου, ένας ισχυρός, βόρειος συνοπτικός άνεμος μειώνει τη διείσδυση της θαλάσσιας αύρας προς το εσωτερικό του λεκανοπεδίου, οπότε οι συγκεντρώσεις του όζοντος στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας παρέμειναν σε χαμηλά επίπεδα. Σε αντίθεση, η ασθενέστερη συνοπτική ροή στις 14 Σεπτεμβρίου επέτρεψε την ανάπτυξη της θαλάσσιας αύρας σε όλο το λεκανοπέδιο οπότε υψηλές συγκεντρώσεις όζοντος βρέθηκαν βόρεια και ανατολικά της πόλης. Τελικά το λεκανοπέδιο χωρίστηκε σε περιοχές όπου καθεμία αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη συμπεριφορά ρύπων. Στη συνέχεια οι Grossi et al., 2000 εστίαστηκαν στη μελέτη του επεισοδίου φωτοχημικής αιθαλομίχλης που παρατηρήθηκε στις 14 Σεπτεμβρίου και συνδέθηκε με την εμφάνιση θαλάσσιας αύρας. Ο στόχος της μελέτης ήταν ο προσδιορισμός των μη γραμμικών διεργασιών που παράγουν υψηλές συγκεντρώσεις όζοντος. Ειδικότερα, η επίδραση των χερσαίων και θαλάσσιων αύρων διερευνήθηκε απομονώνοντας την επίδραση των ημερήσιων και βραδινών εκπομπών στις συγκεντρώσεις όζοντος. Στη συνέχεια απομονώθηκε η επίδραση στις συγκεντρώσεις του όζοντος των δύο κύριων πηγών εκπομπών στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας: της βιομηχανικής περιοχής γύρω από την Ελευσίνα και της αστικής περιοχής της Αθήνας. Τελευταία μελετήθηκε το built-up effect στις συγκεντρώσεις του όζοντος. Από τη μελέτη, προέκυψε ότι η παραγωγή όζοντος είναι ένα φαινόμενο διάρκειας 1 ημέρας. Οι αυξημένες τιμές των φωτοχημικών ρύπων (μέχρι 130 ppb στο επίπεδο του εδάφους) επιτεύχθηκαν κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού αργά το απόγευμα στις πλαγιές των βουνών, στα βόρεια και βορειοανατολικά της πόλης και σχετίζονται κυρίως με τις εκπομπές κατά τη διάρκεια της ημέρας. Παρ' όλα αυτά, η επανακυκλοφορία των παλαιών ρύπων έχει σημαντική επίδραση στις συγκεντρώσεις του όζοντος στο κέντρο της Αθήνας, στο νότιο τμήμα του λεκανοπεδίου, και πάνω από τη θάλασσα, ειδικά κοντά στην Αίγινα. Οι Kleem et al. (1998) κατά τη διάρκεια του ίδιου πειράματος διαπίστωσαν ότι κάτω από ευνοϊκές μετεωρολογικές συνθήκες η θαλάσσια αύρα μπορεί να φτάσει μέχρι τους πρόποδες της Πάρνηθας και της Πεντέλης όπου εμφανίζει ανοδική ροή και εμπλουτίζει την κατώτερη τροπόσφαιρα με υψηλά επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης μέχρι και πάνω από τα 2000m. Τα συγκεκριμένα στρώματα (επίπεδα O_3 πάνω από τα 200 ppb) μπορούν στη συνέχεια να μεταφερθούν σε πολύ μεγάλες αποστάσεις από το κέντρο της πόλης.

Οι εκπομπές ως δεδομένο εισαγωγής στα φωτοχημικά μοντέλα αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για τις προσομοιώσεις οπότε η επίδραση αυτών στις τελικές συγκεντρώσεις μελετάται

συχνά. Οι Varinou et al. (1999) εξέτασαν την ευαισθησία του φωτοχημικού μοντέλου UAM – IV στις εκπομπές που χρησιμοποιούνται ως δεδομένο εισόδου σε αυτό. Πιο συγκεκριμένα, διερευνήθηκε ο ρόλος των διαφόρων κατηγοριών των εκπομπών και ιδιαίτερα των βιογενών στο σχηματισμό τροποσφαιρικού όζοντος σε περιοχές με σημαντικές ανθρωπογενείς πηγές. Η περιοχή ενδιαφέροντος είναι το ΝΑ τμήμα της ελληνικής χερσονήσου, όπου υπάρχουν διάφοροι τύποι ανθρωπογενών και βιογενών πηγών από τις δασικές περιοχές. Χρησιμοποιήθηκαν τρία διαδοχικά πλέγματα χωρικής ανάλυσης 32-8-2 km και πλεγματικά δεδομένα εκπομπών NMVOCs και NOx για την ΕΠΑ σε ωριαία κλίμακα (Moussioropoulos et al., 1995). Οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι υπάρχει μια σημαντική αύξηση των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων του όζοντος σε περιοχές με σημαντικές πηγές πρόδρομων ενώσεων όταν λαμβάνονται υπόψη οι βιογενείς εκπομπές η οποία γίνεται πιο έντονη κατά τη διάρκεια των ημερών με σημαντική τοπική μεταφορά. Πολλή σημαντική κρίθηκε και η αβεβαιότητα που εισάγεται από τα μετεωρολογικά μοντέλα καθώς η επιλογή των κατάλληλων διαστάσεων του εσωτερικού πλέγματος επιτρέπει τη ρεαλιστική αναπαράσταση των μετεωρολογικών παραμέτρων και κατ' επέκταση της μεταφοράς των εκπομπών και των παραγόμενων ρύπων.

Καθώς οι απαιτήσεις για πιο ολοκληρωμένες αριθμητικές προσομοιώσεις γίνονταν εντονότερες διαπιστώθηκε η ανάγκη για προσαρμογές στους κώδικες των μοντέλων ώστε να ανταποκρίνονται στην ελληνική τοπογραφία αλλά και για χρήση τοπικών δεδομένων εισαγωγής.

Μια προγνωστική μελέτη για την ποιότητα του αέρα στην ευρύτερη περιοχή των Αθηνών για το έτος 2004 δημοσιεύτηκε από τους Moussioropoulos et al. (2000). Η πρόβλεψη αφορούσε στα επίπεδα των συγκεντρώσεων των οξειδίων του αζώτου για το 2004, έτος πραγματοποίησης των Ολυμπιακών Αγώνων στην Αθήνα. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα διαφορετικά μοντέλα διασποράς τα οποία προσομοίωσαν δύο επεισόδια που αντιστοιχούσαν σε διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η «τοποθέτηση» των πηγών εκπομπής ρύπων ήταν διαφορετική σε σχέση με την τότε κατάσταση αφού οι συγγραφείς έλαβαν υπόψη τους την λειτουργία του αεροδρομίου καθώς και άλλους παράγοντες οι οποίοι οδήγησαν στη μεγαλύτερη διασπορά των πηγών. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ τους αλλά και με μετρήσεις του έτους 1990 προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Όλα τα μοντέλα υποεκτίμησαν τις μέγιστες συγκεντρώσεις των οξειδίων του αζώτου ενώ έδειξαν μείωση αυτών της τάξης του 35% για το 2004 σε σχέση με το 1990.
- Όλα τα μοντέλα εμφανίζουν εξαιρετική συμφωνία σχετικά με την κατανομή των μέγιστων ωριαίων συγκεντρώσεων των οξειδίων του αζώτου.

- Σε γενικές γραμμές όμως τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συμφώνησαν με τις παρατηρήσεις.

Οι Kioutsioukis et al. (2003, 2005) διενεργώντας ελέγχους ευαισθησίας στα δεδομένα εισόδου φωτοχημικού μοντέλου για την Αθήνα χαρακτήρισαν την περιοχή ως VOC-sensitive και διαπίστωσαν ότι οι συγκεντρώσεις του όζοντος επηρεάζονται σημαντικά από τις οριακές συνθήκες του όζοντος και δευτερευόντως από τις οριακές συνθήκες των NO_x και VOC ενώ οι εκπομπές NO_x αποτελούν τις πιο αναξιόπιστες παραμέτρους.

Οι παράγοντες που οδηγούν στην εμφάνιση πολύ υψηλών συγκεντρώσεων πάνω από την ΕΠΑ μελετήθηκαν από τους Bossioli et al. 2007 με τη βοήθεια πολλαπλών σεναρίων χρησιμοποιώντας το φωτοχημικό μοντέλο UAM με ανάλυση 2x2 km² για την Αττική για το επεισόδιο που καταγράφηκε κατά τη διάρκεια του προγράμματος MEDCAPHOT – TRACE στις 14-15 Σεπτεμβρίου 1994. Στο αρχικό σενάριο στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι εκπομπές από τις οδικές μεταφορές και τη βιομηχανία αναπαράχθηκε η ημερήσια διακύμανση του όζοντος, αλλά υποεκτιμήθηκαν οι μέγιστες ωριαίες συγκεντρώσεις που καταγράφηκαν στους περισσότερους υπήνεμους προαστιακούς σταθμούς. Η ένταξη των βιογενών εκπομπών καθώς και η ορθότερη διακριτοποίηση των ανθρωπογενών εκπομπών NMVOC, σύμφωνα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της Αττικής, οδήγησαν σε μια πιο ρεαλιστική περιγραφή των συνθηκών και ως εκ τούτου καλύτερη αναπαράσταση της παραγωγής όζοντος. Στη συνέχεια μελετήθηκε η επίδραση του αστικού ιστού εισάγοντας ένα απλουστευμένο αστικό μοτίβο στο μετεωρολογικό μοντέλο, το οποίο προκάλεσε τη συσσώρευση των πρωτογενών ρύπων NO_x μέσα στο κέντρο της πόλης και τη συνακόλουθη περιορισμένη οριζόντια μεταφορά τους προς την περιφέρεια της Αττικής. Ωστόσο, η τροποποίηση αυτή, σε συνδυασμό με την ένταξη των βιογενών εκπομπών, ενίσχυσε τις προβλεπόμενες μέγιστες τιμές του όζοντος κατά 20-40% στους προαστιακούς σταθμούς του βόρειου και του ΒΑ τμήματος του λεκανοπεδίου, καθώς αυτές αποτελούν περιοχές με βλάστηση ενώ η αντίστοιχη αύξηση στους αστικούς σταθμούς υποβάθρου και κυκλοφορίας ήταν 10-30%. Επιπλέον, ο διαχωρισμός των ανθρωπογενών εκπομπών NMVOCs οδήγησε σε μια υψηλότερη δραστικότητα των μειγμάτων NMVOC και έτσι σε μια περαιτέρω αύξηση της παραγωγικότητας του όζοντος που κυμαίνονται μεταξύ 1% και 5% στους αστικούς και από 5% έως 15% στους προαστιακούς σταθμούς. Τέλος, οι τιμές του όζοντος υποβάθρου αποδείχθηκαν ως βασικός παράγοντας για την απόδοση του μοντέλου.

Στην ίδια λογική, οι Andropoulos et al. (2008) επέλεξαν δύο σημεία εντός του λεκανοπεδίου (Θρακομακεδόνες και Αγία Παρασκευή) προκειμένου να ελέγξουν τους παράγοντες που

επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις όζοντος σε αυτά. Διαπίστωσαν ότι η διεύθυνση του ανέμου καθώς επίσης και οι εκπομπές είναι καθοριστικοί παράγοντες.

Οι συγκεντρώσεις όζοντος στο επίπεδο του εδάφους υπολογίστηκαν για την Ελλάδα κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου του έτους 2000 χρησιμοποιώντας το φωτοχημικό μοντέλο UAM-V σε συνδυασμό με το μέσης κλίμακας μετεωρολογικό μοντέλο MM5 από τους Ρουρκου et al. (2008a). Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος διαδοχικών πλεγμάτων με 2 πλέγματα χωρικής ανάλυσης 30 και 10km αντίστοιχα, εκ των οποίων το εσωτερικό κάλυπτε την Ελλάδα και μέρος των γειτονικών χωρών. Για τις εκπομπές χρησιμοποιήθηκε σύστημα απογραφής ανθρωπογενών εκπομπών και δεδομένα βιογενών εκπομπών NMVOCs. Στο μεγαλύτερο μέρος της χώρας, τα επίπεδα του όζοντος κυμάνθηκαν από 40 έως 55ppb ενώ στο νότιο Αιγαίο οι τιμές του όζοντος έφτασαν τα 60ppb λόγω της επίδρασης του αστικού νέφους της Αθήνας. Στις περιοχές όπου οι ανθρωπογενείς πυκνότητες εκπομπών ήταν υψηλές, τα μέσα επίπεδα του όζοντος ποικίλουν μεταξύ 20 και 40ppb. Στο μεγαλύτερο μέρος της Ελλάδας, οι προσομοιωμένες μέσες ημερήσιες μέγιστες συγκεντρώσεις όζοντος κυμάνθηκαν από 50 έως 65ppb. Πιο υψηλές συγκεντρώσεις όζοντος (έως 95ppb) κυριάρχησαν πάνω από τα δύο μεγαλύτερα αστικά κέντρα (Αθήνα και Θεσσαλονίκη) και πάνω από τις ηπειρωτικές και θαλάσσιες περιοχές νότια των Αθηνών, λόγω της μεταφοράς ρύπων από το αστικό κέντρο κατά την επικράτηση βορείων ανέμων.

Στη συνέχεια μελετήθηκαν οι επιπτώσεις των ανθρωπογενών εκπομπών από τις θαλάσσιες μεταφορές και από τις χώρες που συνορεύουν με την Ελλάδα στις μέγιστες συγκεντρώσεις όζοντος (Ρουρκου et al., 2008b). Η συνεισφορά των θαλάσσιων εκπομπών στις συγκεντρώσεις του O₃ προέκυψε περίπου γύρω στα 20ppb. Η ακρίβεια των ανθρωπογενών εκπομπών, η χρήση πλέγματος καλύτερης χωρικής ανάλυσης καθώς και η βελτίωση των οριακών συνθηκών θεωρήθηκε ότι θα συμβάλουν στην καλύτερη αποτύπωση των συγκεντρώσεων από το μοντέλο.

Εκτός από το όζον οι μελέτες άρχισαν να εστιάζονται και στα *αιωρούμενα σωματίδια*. Η φωτοχημική και σωματιδιακή ρύπανση στην ανατολική Μεσόγειο μελετήθηκε με το μοντέλο UAM από τους Lazaridis et al. (2004, 2005) και Spyridaki et al. (2006). Η ΕΠΑ συμπεριλαμβανόταν στο εσωτερικό πλέγμα με χωρική ανάλυση 5x5 km² ενώ χρησιμοποιήθηκαν εκπομπές από τη βάση δεδομένων του EMEP σε πλεγματική μορφή και ωριαία κλίμακα. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με μετρήσεις ρύπων έδειξε ικανοποιητική συμφωνία για έναν αριθμό αερίων ρύπων, ωστόσο διαπιστώθηκε ότι το μοντέλο υποεκτιμά τα PM₁₀. Αυτό οφείλεται κυρίως στη σημαντική υποτίμηση των σωματιδιακών εκπομπών που οφείλεται στην έλλειψη δεδομένων από την επαναιώρηση της σκόνης, τις δασικές πυρκαγιές και τη συμβολή από τη μεταφερόμενη σκόνη από τη Σαχάρα.

Η πρόβλεψη επεισοδίων ατμοσφαιρικής ρύπανσης σχετικά με την ερημική σκόνη και φωτοχημικούς ρύπους, όπως το όζον και τα οξείδια του αζώτου (NO_x) μελετήθηκε από τους Astitha et al. (2008) με τη χρήση του φωτοχημικού μοντέλου CAMx. Τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων ήταν ικανοποιητικά συγκρινόμενα με δεδομένα συγκεντρώσεων από σταθμούς εντός του λεκανοπεδίου της Αττικής για ένα επεισόδιο λόγω μεταφοράς σκόνης. Γενικά το μοντέλο υποεκτίμησε τις ωριαίες συγκεντρώσεις όζοντος σε όλους τους σταθμούς ενώ οι τιμές του NO₂ υπερεκτιμήθηκαν ιδιαίτερα τις νυχτερινές ώρες εκτός από το σταθμό της Πατησίων. Οι αποκλίσεις μεταξύ μετρούμενων και υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων αναμένεται να βελτιωθούν χρησιμοποιώντας καλύτερη ανάλυση πλέγματος και πληρέστερο πεδίο εκπομπών. Επίσης είναι πολύ σημαντικός ο διαχωρισμός των ανθρωπογενών και φυσικών πηγών προέλευσης των επεισοδίων ρύπανσης.

2.6 Συμπεράσματα από το κεφάλαιο 2

- Η ποιότητα αέρα ήταν και παραμένει ένα σημαντικό πρόβλημα των μεγάλων αστικών περιοχών στις οποίες συγκεντρώνεται μεγάλος όγκος ανθρωπογενών δραστηριοτήτων όπως κίνηση οχημάτων, χρήση κεντρικής θέρμανσης, καύση βιομάζας, βιομηχανικές περιοχές στα όρια του αστικού πλέγματος.
- Η χρήση και ανάπτυξη αξιόπιστων αριθμητικών μοντέλων είναι ακόμα έντονη καθώς αυτά είναι πολύτιμα εργαλεία για τη βελτίωση της κατανόησης των μηχανισμών διασποράς και χημικών διεργασιών των ρύπων, για την εκτίμηση της έκθεσης του πληθυσμού σε ρύπους επικίνδυνους για την υγεία καθώς και για την υποστήριξη στη χάραξη πολιτικών για τον έλεγχο και τον περιορισμό των πηγών που συμβάλουν στα αυξημένα επίπεδα ρύπανσης.
- Η Ευρύτερη Περιοχή των Αθηνών έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας πολλών Ελλήνων και ξένων ερευνητών λόγω των ιδιαίτερων μορφολογικών/τοπογραφικών και μετεωρολογικών συνθηκών καθώς και λόγω της ύπαρξης αυξημένων εκπομπών ανθρωπογενών ρύπων οι οποίες συχνά οδηγούν στη δημιουργία επεισοδίων ρύπανσης.
- Τα επίπεδα ρύπανσης στην ΕΠΑ σύμφωνα με το ΥΠΕΚΑ παρουσιάζουν σταδιακή μείωση με τάση σταθεροποίησης.

- Οι ρύποι οι οποίοι παρουσιάζουν υψηλά επίπεδα είναι τα αιωρούμενα σωματίδια, το όζον καθώς και νέοι ρύποι όπως PAHs, τους οποίους τα φωτοχημικά μοντέλα είναι σε θέση να προσομοιώνουν για τη μελέτη της διασποράς και της χημικής συμπεριφοράς τους.
- Τα φωτοχημικά μοντέλα είναι χρήσιμα εργαλεία για την υποστήριξη στη χάραξη πολιτικής. Τα αποτελέσματά τους σε μεγάλο βαθμό εξαρτώνται από την ποιότητα και την ακρίβεια των δεδομένων εισόδου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ

3.1 Πεδία απογραφής εκπομπών

Η μελέτη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των εκπομπών και η παρακολούθηση των επιπέδων ρύπανσης με στόχο τη χάραξη περιβαλλοντικών μέτρων που θα συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας ζωής, δημιούργησαν την ανάγκη απογραφής των εκπομπών από διάφορους τύπους πηγών. Τα βασικά ερωτήματα τα οποία πρέπει να απαντηθούν πριν τη δημιουργία ενός πεδίου απογραφής εκπομπών είναι σύμφωνα με τους Pulles and Heslinga:

I. Σκοπός δημιουργίας

Η ανάγκη που πρόκειται να εξυπηρετηθεί καθορίζει το ύψος απογραφής των εκπομπών. Αν για παράδειγμα πρόκειται για επιστημονική μελέτη απαιτείται λεπτομερής καταγραφή ενώ αν η περιβαλλοντική μελέτη αποσκοπεί στη λήψη πολιτικών αποφάσεων π.χ. την επιλογή χώρου για το χτίσιμο αεροδρομίου, πρέπει να είναι ολοκληρωμένη αλλά απλή ώστε να γίνεται κατανοητή.

II. Ταυτότητα ρύπων/αερίων ενώσεων

Το πλήθος και το είδος των ενώσεων για τις οποίες θα υπολογιστούν οι εκπομπές καθορίζεται από την ταυτότητα του πεδίου απογραφής. Γενικά οι ενώσεις έχουν κατηγοριοποιηθεί σε τρεις κατηγορίες αέριοι ρύποι και σωματίδια, αέρια του θερμοκηπίου και μέταλλα (Πίνακας 3-1).

III. Χωρική κάλυψη

Το χωρικό μέγεθος (μία ολόκληρη χώρα, περιφέρεια, πόλη, σημειακή πηγή) αλλά και η περαιτέρω αύξηση της χωρικής ανάλυσης (διαχωρισμός των εθνικών εκπομπών σε πλέγμα κελιών συγκεκριμένων διαστάσεων) είναι καθοριστικά και πρέπει να αποφασιστούν εξ αρχής. Αν πρόκειται για μελέτη σε εθνικό επίπεδο απαιτείται ολοκληρωμένη καταγραφή όλων των πηγών. Για την περίπτωση περιοχικής μελέτης π.χ. περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την λειτουργία ενός εργοστασίου, η καταγραφή γίνεται πιο εστιασμένα συνήθως για έναν τύπο πηγής με όσο το δυνατόν πιο λεπτομερή καταγραφή της δραστηριότητας, των καυσίμων και των αποβλήτων αυτής. Επίσης θα πρέπει να κριθεί αν είναι απαραίτητο οι εκπομπές να χωριστούν χωρικά σε κελιά συγκεκριμένης ανάλυσης η οποία θα καθοριστεί από την τοπογραφία και το είδος της μελέτης.

Πίνακας 3-1. Χημικές ενώσεις που συμπεριλαμβάνονται σε μία απογραφή εκπομπών ανάλογα με τις ανάγκες της μελέτης.

Είδος μελέτης	Είδος χημικής ένωσης	Ενώσεις
Κλιματική αλλαγή	Αέρια του θερμοκηπίου	CO ₂ , N ₂ O, CH ₄ , PFCs, CFCs, SF ₆
Ποιότητα αέρα	Αέριοι ρύποι και σωματίδια	NO _x , SO ₂ , NH ₃ , NMVOC, CO, PM _{2.5} , PM ₁₀
Τοξικές ενώσεις	PAH	Το σύνολο ανεξάρτητων πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων
	PCDD/F	Το σύνολο των πολυχλωριωμένων διβενζο-ρ-διοξινών (polychlorinated dibenzo-pdioxins - PCDD) και πολυχλωριωμένων διβενζοφουρανίων (polychlorinated dibenzofurans - PCDF)
Μέταλλα		Zn, Pb, Cadmium, Copper, Nickel

IV. Χρονική διάρκεια

Συνήθως υπολογίζονται οι ετήσιες εκπομπές λόγω της εύκολης πρόσβασης σε ετήσια δεδομένα (π.χ. κατανάλωση καυσίμου, πληθυσμός, χρήση γης, στόλος οχημάτων, πλοίων, κτλ.). Σε ορισμένες περιπτώσεις όμως απαιτείται καλύτερη χρονική ανάλυση οπότε πρέπει να δημιουργηθούν εποχικές, μηνιαίες ή/και ωριαίες εκπομπές (ΦωτοΧημικά Μοντέλα – ΦΧΜ).

V. Μεθοδολογία

Οι απαντήσεις που θα δοθούν στα παραπάνω ερωτήματα καθορίζουν και τη μεθοδολογία που πρέπει να ακολουθηθεί. Στη βιβλιογραφία συναντώνται δύο προσεγγίσεις γνωστές ως “top-down” και “bottom-up”. Η επιλογή έγκειται στη χωρική κλίμακα των δεδομένων. Σύμφωνα με την πρώτη

προσέγγιση (top-down) η εκτίμηση των εκπομπών πραγματοποιείται αρχικά σε εθνικό επίπεδο. Για κάθε τύπο πηγής υπολογίζονται οι ετήσιες εκπομπές χρησιμοποιώντας γενικευμένες πληροφορίες όπως για παράδειγμα ο ετήσιος στόλος οχημάτων, η κατανάλωση καυσίμου από τον οικιακό τομέα, ο πληθυσμός των οικοσπιτών ζώων κ.ά. Η top-down προσέγγιση χρησιμοποιείται αρκετά συχνά κατά την απογραφή των εκπομπών και γι' αυτό έχει δημιουργηθεί το EMEP/EEA Emission Inventory Guidebook από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος, τα χαρακτηριστικά του οποίου θα αναλυθούν στη συνέχεια. Για παράδειγμα οι οικιακές εκπομπές που οφείλονται στη χρήση ενέργειας για μαγείρεμα και θέρμανση υπολογίζονται βάση της ετήσιας κατανάλωσης καυσίμου ανά είδος πηγής (τζάκια, σόμπες, λέβητες) σε ετήσια και εθνική κλίμακα σύμφωνα με τα υπάρχοντα δεδομένα, η οποία ωστόσο δεν είναι ικανοποιητική στην περίπτωση που οι εκπομπές πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογή με ΦΧΜ. Δεδομένα πυκνότητας πληθυσμού και χρήσης γης απαιτούνται για τον χωρικό διαχωρισμό σε μεγαλύτερη χωρική ανάλυση και μηνιαία, εβδομαδιαία και ωριαία προφίλ δραστηριότητας για τον χρονικό διαχωρισμό των ετήσιων τιμών.

Αντίθετα η bottom-up προσέγγιση χρησιμοποιείται συνήθως για τον υπολογισμό των εκπομπών σε τοπική κλίμακα (π.χ. πόλη, βιομηχανική μονάδα). Η περιοχή ενδιαφέροντος χωρίζεται σε τομείς για καθέναν από τους οποίους συλλέγονται αναλυτικές πληροφορίες. Για παράδειγμα, επιλέγονται ένα συγκρότημα κατοικιών, κάποιοι κεντρικοί οδικοί άξονες, μια χαρακτηριστική βιομηχανική μονάδα σε μια πόλη, των οποίων η δραστηριότητα και οι εκπομπές καταγράφονται. Στη συνέχεια η συγκεκριμένη πληροφορία χρησιμοποιείται για την εξαγωγή των συνολικών εκπομπών από τον εκάστοτε τομέα (οικιακή κατανάλωση, οδικές μεταφορές, βιομηχανική παραγωγή). Η συγκεκριμένη προσέγγιση παρότι μοιάζει πιο ορθή λόγω της άμεσης καταγραφής των εκπομπών από την πηγή είναι χρονοβόρα και δύσκολη λόγω του πλήθους των πηγών όταν πρόκειται για μεγαλύτερης έκτασης περιοχή από τα όρια μιας πόλης.

Τα τελευταία χρόνια η απογραφή των εκπομπών πραγματοποιείται με συνδυασμό των δύο παραπάνω προσεγγίσεων καθώς για κάποιες πηγές είναι δυνατή η εύρεση αναλυτικών δεδομένων ενώ για άλλες είναι αναπόφευκτη η χρήση συγκεντρωτικών δεδομένων. Για παράδειγμα ο υπολογισμός των ωριαίων εκπομπών από τις οδικές μεταφορές γίνεται με ετήσια δεδομένα στόλου οχημάτων και κατανάλωσης καυσίμου (top-down) αλλά τα ωριαία προφίλ εκπομπών μπορούν να εξαχθούν από δεδομένα κυκλοφοριακού φόρτου όταν αυτά είναι διαθέσιμα (bottom-up).

3.2 Τύποι πηγών

Σε γενικές γραμμές διακρίνονται τρεις τύποι πηγών:

- Οι σημειακές πηγές (point sources). Στην συγκεκριμένη κατηγορία περιλαμβάνονται οι στατικές πηγές ικανοποιητικού μεγέθους ώστε να συμπεριλαμβάνονται ξεχωριστά στο πεδίο απογραφής εκπομπών όπως για παράδειγμα μια οργανωμένη βιομηχανική μονάδα παραγωγής ενέργειας. Ως σημειακή πηγή θεωρείται η βιομηχανική μονάδα στο σύνολό της συμπεριλαμβανομένων όλων των εγκαταστάσεων που συνεισφέρουν στις τελικές εκπομπές που τη χαρακτηρίζουν, είτε αυτές προέρχονται από την καμινάδα, είτε είναι αναθυμιάσεις από δραστηριότητες καύσης εντός του κτιρίου. Καθώς δεν υπάρχει συγκεκριμένο κριτήριο χαρακτηρισμού μιας βιομηχανικής μονάδας ως σημειακή πηγή, η επιλογή βασίζεται κατά κύριο λόγο στην ύπαρξη ικανοποιητικών δεδομένων δραστηριότητας αυτής και στο μέγεθος των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλεί η λειτουργία της.
- Οι γραμμικές πηγές. Οι κυριότερες γραμμικές πηγές είναι τα οχήματα, τα πλοία και τα τρένα λόγω του ότι η κίνησή τους κατά μήκος των οδικών αξόνων, των γραμμών πλεύσης και των σιδηροτροχιών επιτρέπει τη συνεχόμενη εκπομπή ενώσεων. Συνήθως είναι ο τύπος πηγών που συνεισφέρει περισσότερο στις συνολικές αστικές εκπομπές ιδιαίτερα στις περιπτώσεις που η πόλη επιβαρύνεται από την ύπαρξη κοντινού λιμανιού, όπως είναι η Αθήνα. Σχετικά με τις σιδηροδρομικές εκπομπές, τα τελευταία χρόνια στην Ελλάδα τείνει να υπερισχύσει η χρήση ηλεκτροκίνητων τρένων των οποίων η λειτουργία δεν επιβαρύνει τις γραμμικές εκπομπές.
- Οι περιοχικές πηγές. Μια επαρχιακή πόλη ή οργανωμένες Βιομηχανικές Περιοχές (ΒΙ.ΠΕ.) για τις οποίες υπάρχουν μόνο συγκεντρωτικά στοιχεία, μπορούν να θεωρηθούν περιοχικές πηγές καθώς λόγω της έκτασης τους δεν ανήκουν στις σημειακές πηγές. Οι εκπομπές κατανέμονται στο σύνολο της πηγής, τα όρια της οποίας προκύπτουν από δεδομένα χρήσης γης. Οι εκπομπές από πλοία κατά την παραμονή τους στο λιμάνι και από τα αεροπλάνα κατά τον κύκλο προσγείωσης – απογείωσης τους ανήκουν επίσης στην συγκεκριμένη κατηγορία.

Οι παραπάνω πηγές εκπομπών έχουν κατηγοριοποιηθεί σε δύο συστήματα:

- Την κατηγοριοποίηση NFR09 (που προτείνεται από την Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC) για την καταγραφή των αερίων του θερμοκηπίου (IPCC, 2006), σύμφωνα με την οποία οι πηγές διακρίνονται σε πέντε κύριες κατηγορίες:

1. Ενέργεια
2. Βιομηχανικές διεργασίες
3. Γεωργία, δασοκομία και άλλες χρήσεις γης
4. Απόβλητα
5. Άλλες πηγές,

οι οποίες στη συνέχεια χωρίζονται σε υποκατηγορίες π.χ. η κατηγορία 1Α περιλαμβάνει τις δραστηριότητες καύσης και χωρίζεται περαιτέρω σε 1Α1 (βιομηχανίες παραγωγής ενέργειας), 1Α2 (μεταποιητική βιομηχανία και κατασκευές), 1Α3 (μεταφορές) κτλ.

- Την κατηγοριοποίηση SNAP η οποία προτάθηκε από την Οικονομική Επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών για την Ευρώπη (United Nations Economic Commission for Europe – UNECE) κατά τη Σύμβαση για τη διασυνοριακή ρύπανση της ατμόσφαιρας (Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution - LRTAP), σύμφωνα με την οποία οι πηγές διακρίνονται σε 10 κατηγορίες όπως αυτές παρουσιάζονται στον πίνακα 3-2 της επόμενης ενότητας.

3.3 Απογραφή εκπομπών για την Ελλάδα και την Ευρύτερη Περιοχή των Αθηνών

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή δημιουργήθηκε ένα πεδίο απογραφής εκπομπών για την Ελλάδα και την Ευρύτερη Περιοχή των Αθηνών (Ε.Π.Α.) σύμφωνα με τη μεθοδολογία EMEP/EEA Emission Inventory Guidebook 2009 και 2013 όπως αυτή προτείνεται από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος. Οι πηγές εκπομπών έχουν κατηγοριοποιηθεί σε 10 βασικούς τύπους – SNAP categories – όπως φαίνονται και στον πίνακα 3-2. Σε κάθε τύπο εμπεριέχονται αρκετές υποκατηγορίες ανάλογα με το πόσο σύνθετη και σημαντική είναι η πηγή που περιγράφεται οδηγώντας στην δημιουργία διαφορετικών μεθοδολογιών ανά υποκατηγορία.

Πίνακας 3-2. Κατηγοριοποίηση πηγών εκπομπών.

Κατηγορία πηγής (SNAP sector)	Περιγραφή πηγής εκπομπών
01	Καύση για παραγωγή ενέργειας (COMBUSTION IN ENERGY AND TRANSFORMATION INDUSTRY)
02	Μη βιομηχανικές μονάδες καύσης (NON-INDUSTRIAL COMBUSTION PLANTS)
03	Καύση στην παραγωγική βιομηχανία (COMBUSTION IN MANUFACTURING INDUSTRY)
04	Μονάδες παραγωγής (PRODUCTION PROCESSES)
05	Εξόρυξη και διανομή ορυκτών καυσίμων (EXTRACTION AND DISTRIBUTION OF FOSSIL FUELS)
06	Διαλυτικά (SOLVENT AND OTHER PRODUCT USE)
07	Οδικές μεταφορές (ROAD TRANSPORT)
08	Άλλες κινητές πηγές ρύπανσης και μηχανές (OTHER MOBILE SOURCES AND MACHINERY)
09	Διαχείριση αποβλήτων και αποκομιδή (WASTE TREATMENT AND DISPOSAL)
10	Γεωργία (AGRICULTURE)

Η δομή του συγκεκριμένου πεδίου απογραφής εκπομπών αποτελείται από τρία βασικά μέρη:

- 1) **Τον υπολογισμό των συνολικών ετήσιων εκπομπών.** Αρχικά υπολογίζονται οι εκπομπές που αντιστοιχούν στην περιοχή μελέτης (Ελλάδα – Ε.Π.Α.) σε ετήσια ή εποχική χρονική κλίμακα, ανάλογα με τα διαθέσιμα δεδομένα, σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_i = \sum_{i,j,k} (EF_{i,j,k} \times A_{j,k}) \quad (3.1)$$

όπου,

E_i είναι η συνολική εκπομπή του ρύπου i ,

$EF_{i,j,k}$ είναι ο συντελεστής εκπομπής του ρύπου i για την πηγή j και το καύσιμο k και

$A_{j,k}$ είναι η δραστηριότητα της πηγής j για το δεδομένο χρονικό διάστημα.

- 2) **Το χωρικό διαχωρισμό των εκπομπών.** Σε αυτό το στάδιο γίνεται η κατανομή των εκπομπών σε κελιά με χρήση αντιπροσωπευτικών για κάθε πηγή συντελεστών κατανομής.

Με τη βοήθεια του προγράμματος ArcView δημιουργούνται θεματικοί χάρτες πάνω στους οποίους «κουμπώνει» ο χάρτης του αντίστοιχου πλέγματος οπότε σε κάθε κελί αντιστοιχίζεται ένας συντελεστής κατανομής βάσει του οποίου γίνεται ο χωρικός διαχωρισμός. Τα δεδομένα με τη χρήση των οποίων προκύπτουν οι συντελεστές καταμερισμού πρόκειται να αναλυθούν στη συνέχεια. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία βασίζεται στη γενική εξίσωση:

$$E_{i,x} = E_i \times (\text{value}_x) / (\text{value}_{\text{tot}}) \quad (3.2)$$

όπου,

$E_{i,x}$ είναι η εκπομπή του ρύπου i στο κελί x ,

E_i είναι η εκπομπή του ρύπου i για το σύνολο του πλέγματος,

value_x είναι το μέρος του συντελεστή κατανομής που αντιστοιχεί στο κελί x

$\text{value}_{\text{tot}}$ είναι η συνολική ποσότητα του συντελεστή για το σύνολο του πλέγματος (Ελλάδα ή Αττική)

- 3) Το χρονικό διαχωρισμό των χωρικά κατανεμημένων εκπομπών.** Στο τελευταίο βήμα οι εκπομπές που έχουν προκύψει από τη χωρική κατανομή με το ArcView μετατρέπονται σε πίνακες ώστε από τις ετήσιες / εποχικές εκπομπές να προκύψουν οι αντίστοιχες ωριαίες. Η συγκεκριμένη διαδικασία πραγματοποιείται με τη βοήθεια του προγράμματος EXCEL, ακολουθώντας την εξίσωση

$$E_{h,i,x} = E_{i,x} \times M_i \times D_i \times H_i \quad (3.3)$$

όπου,

$E_{h,i,x}$ είναι οι ωριαίες εκπομπές του ρύπου i στο κελί x ,

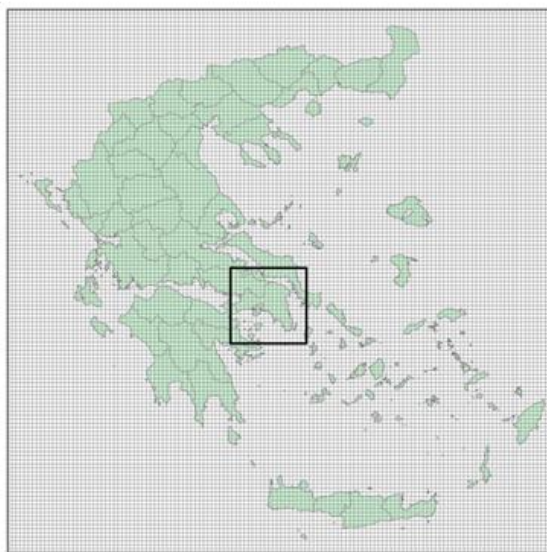
$E_{i,x}$ είναι οι ετήσιες εκπομπές του ρύπου i στο κελί x και

M , D και H είναι οι μηνιαίοι, ημερήσιοι και ωριαίοι συντελεστές διαχωρισμού αντίστοιχα.

3.3.1 Δημιουργία πλεγμάτων

Ένας από τους βασικούς σκοπούς της δημιουργίας μιας βάσης δεδομένων εκπομπών είναι η χρήση της ως δεδομένο εισαγωγής σε φωτοχημικά μοντέλα με τη βοήθεια των οποίων μελετάται η ποιότητα της ατμόσφαιρας σε εθνική και περιοχική κλίμακα. Για το σκοπό αυτό απαιτείται η δημιουργία πλέγματος με όσο το δυνατόν καλύτερη χωρική ανάλυση σε σχέση και με τις ανάγκες το μοντέλου. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής δημιουργήθηκαν δύο πλέγματα σε προβολικό σύστημα Lambert Conformal Conic, ένα για την Ελλάδα (Πλέγμα 1) με ανάλυση 6km και ένα για την Ε.Π.Α. (Πλέγμα 2) με ανάλυση 2km (Σχήμα 3-1) ακολουθώντας τη λογική nesting για περιορισμό του υπολογιστικού λάθους όπως θα εξηγηθεί και στο κεφάλαιο 4.

Το Πλέγμα 1 αποτελείται από 134x134 κελιά εμβαδού 36km² το καθένα και καλύπτει όλη την Ελλάδα και μέρος των γειτονικών χωρών (Αλβανία, Σκόπια, Βουλγαρία, Τουρκία) ενώ το Πλέγμα 2 περιέχει 56 κελιά σε κάθε κατεύθυνση εμβαδού 4 km² το καθένα και καλύπτει την Αττική, μέρος της Βοιωτίας, της Εύβοιας, την θαλάσσια περιοχή του Αργοσαρωνικού και ένα μικρό κομμάτι της βορειοανατολικής Πελοποννήσου.



Σχήμα 3-1. Πλέγμα 1 ανάλυσης 6x6 km² για την Ελλάδα και Πλέγμα 2 ανάλυσης 2x2 km² για την Αττική (οριοθετημένο με μαύρο πλαίσιο).

3.3.2 Μέθοδος χωρικού καταμερισμού εκπομπών

Για τον χωρικό καταμερισμό των ετήσιων δεδομένων σε κελιά πλέγματος συγκεκριμένης ανάλυσης χρησιμοποιούνται συντελεστές καταμερισμού οι οποίοι προκύπτουν από βάσεις γεωγραφικών δεδομένων. Ανάλογα με το είδος της πηγής εκπομπών και τα υπάρχοντα δεδομένα η κατανομή σε κελιά γίνεται σε διαφορετικά επίπεδα. Παρακάτω πρόκειται να παρουσιαστούν οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν στο συγκεκριμένο στάδιο διαμόρφωσης του F.E.I. – GREGAA.

1. Δεδομένα πυκνότητας πληθυσμού – πρόγραμμα GEOSTAT

Το έργο GEOSTAT ξεκίνησε το 2010 από την Eurostat σε συνεργασία με το Ευρωπαϊκό Φόρουμ Γεωστατιστικής (European Forum for GeoStatistics - EFGS) με κύριο στόχο την παροχή στατιστικών και γεωχωρικών πληροφοριών σε μια κοινή πλατφόρμα πληροφόρησης για την ΕΕ . Σε πρώτη φάση ήταν απαραίτητη η δημιουργία κοινής μεθοδολογίας για τη συλλογή και την παραγωγή των χωρικών στατιστικών δεδομένων σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Στατιστικό Σύστημα (European Statistical System, ESS). Στα πλαίσια του έργου “GEOSTAT - representing census data in a European population grid dataset” γεωκωδικοποιήθηκαν τα διάφορα χαρακτηριστικά του πληθυσμού σε ένα σύνολο πλεγματοειδών κελιών ανάλυσης 1km² (πλέγμα Grid_ETRS89-LAEA, όπως ορίζεται από την πρωτοβουλία INSPIRE) χρησιμοποιώντας ως πηγή τα δεδομένα της Απογραφής του 2011 (Σχ.3-2).

Το έργο έχει χωριστεί σε τρεις φάσεις:

GEOSTAT 1A: Κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης, δημιουργήθηκε μία βάση δεδομένων πληθυσμού για το έτος 2006 και αναπτύχθηκε η μεθοδολογία που πρέπει να ακολουθείται για την παραγωγή των ευρωπαϊκών πλεγματοειδών στατιστικών δεδομένων (Eurostat, 2011). Η βάση δεδομένων GEOSTAT 2006 είναι διαθέσιμη από τη Eurostat (http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/gisco_Geographical_information_maps/popups/references/population_distribution_demography).

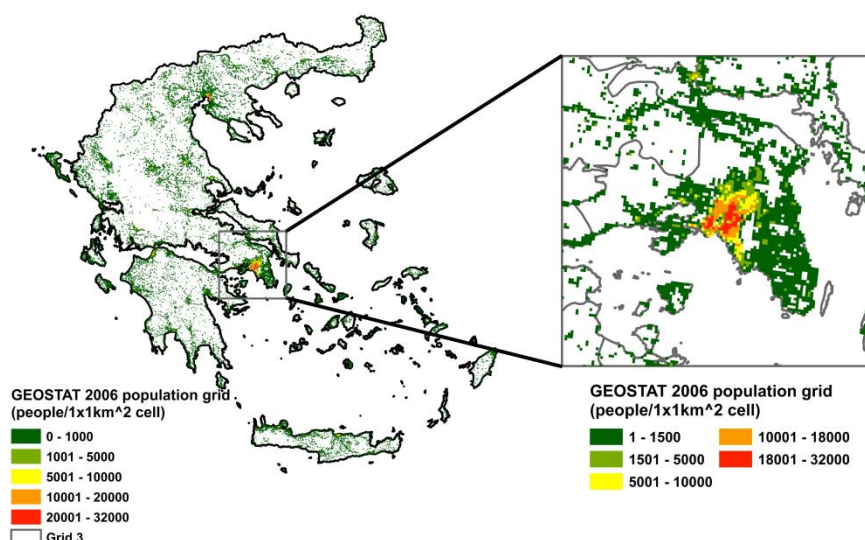
GEOSTAT 1B¹: Κατά τη διάρκεια της δεύτερης φάσης δημιουργήθηκε η βάση πλεγματοειδών δεδομένων για το έτος απογραφής 2011. Η πρώτη έκδοση αυτής περιλαμβάνει δεδομένα από 18

¹ Αυτή η αναλυτική βάση δεδομένων περιέχει δεδομένα πληθυσμού για το έτος 2006 σε πλέγμα 1km². Το σύνολο των δεδομένων έχει παραχθεί από το Αυστριακό Ινστιτούτο Τεχνολογίας (AIT) και καλύπτει την ΕΕ 27 και τις χώρες ΕΖΕΣ (εκτός της Κύπρου, καθώς δεν υπάρχουν διαθέσιμα πληθυσμιακά στοιχεία σε επίπεδο γεωγραφικών διαμερισμάτων – LAU). Τα στοιχεία για τον πληθυσμό πηγή αναφέρονται στο επίπεδο των εθνικών LAU2 (LAU1 για PT).

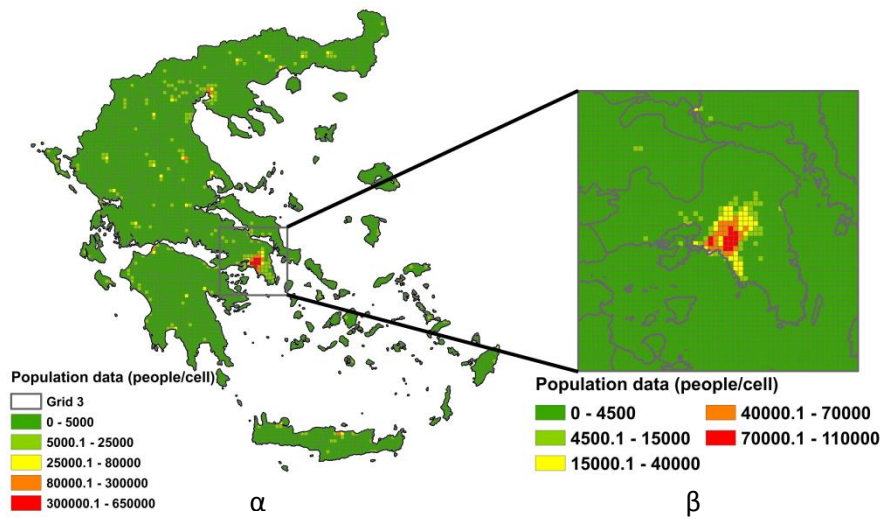
χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης και των χωρών της Ευρωπαϊκής Ζώνης Ελεύθερων Συναλλαγών (ΕΖΕΣ, European Free Trade Association - EFTA), ενώ για τις υπόλοιπες 14 ευρωπαϊκές χώρες (συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας) η βάση συμπληρώθηκε με μοντελοποιημένα δεδομένα από την βάση δεδομένων του Αυστριακού Ινστιτούτου Τεχνολογίας (Austrian Institute for Technology AIT¹) για το έτος 2006. Επιπλέον προέκυψε ένα λεπτομερές εγχειρίδιο για τη δημιουργία πλεγμάτων πληθυσμού από στατιστικά στοιχεία (Eurostat, 2014). Η βάση δεδομένων GEOSTAT 2011 V1 είναι πλέον διαθέσιμη (http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/gisco_Geographical_information_maps/population/references/population_distribution_demography) και τα αποτελέσματα του έργου μπορούν να βρεθούν στην ιστοσελίδα του EFGS (<http://www.efgs.info/front-page/geostat/1B>).

GEOSTAT 1C (σε εξέλιξη): Κατά τη διάρκεια της τρίτης φάσης του έργου πρόκειται να προστεθούν περαιτέρω εθνικά δεδομένα στη βάση GEOSTAT2011 V1. Η δεύτερη εκδοχή (V2) αναμένεται να ετοιμαστεί στις αρχές του 2015.

Η πληθυσμιακή πυκνότητα κατανεμημένη σε κελιά $1 \times 1 \text{ km}^2$ όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3-2 επεξεργάστηκε και μετατράπηκε σε κελιά πλέγματος $6 \times 6 \text{ km}^2$ για την Ελλάδα και $2 \times 2 \text{ km}^2$ για την Αττική και τμήματα της Εύβοιας, της Βοιωτίας και της Πελοποννήσου (Σχ. 3-3). Όσον αφορά στην Ελλάδα οι υψηλότερες τιμές πληθυσμιακής πυκνότητας εμφανίζονται στα αστικά κέντρα των Αθηνών, της Θεσσαλονίκης και του Ηρακλείου (Σχ.3-3, 300,000-650,000 κάτοικοι ανά κελί εμβαδού 36 km^2). Ιδιαίτερα στον αστικό ιστό του λεκανοπεδίου της Αττικής πιο πυκνοκατοικημένα εμφανίζονται τα νοτιοδυτικά, νοτιοανατολικά και ανατολικά προάστια (Σχ.3-3, 70,000-110,000 κάτοικοι ανά κελί εμβαδού 4 km^2).



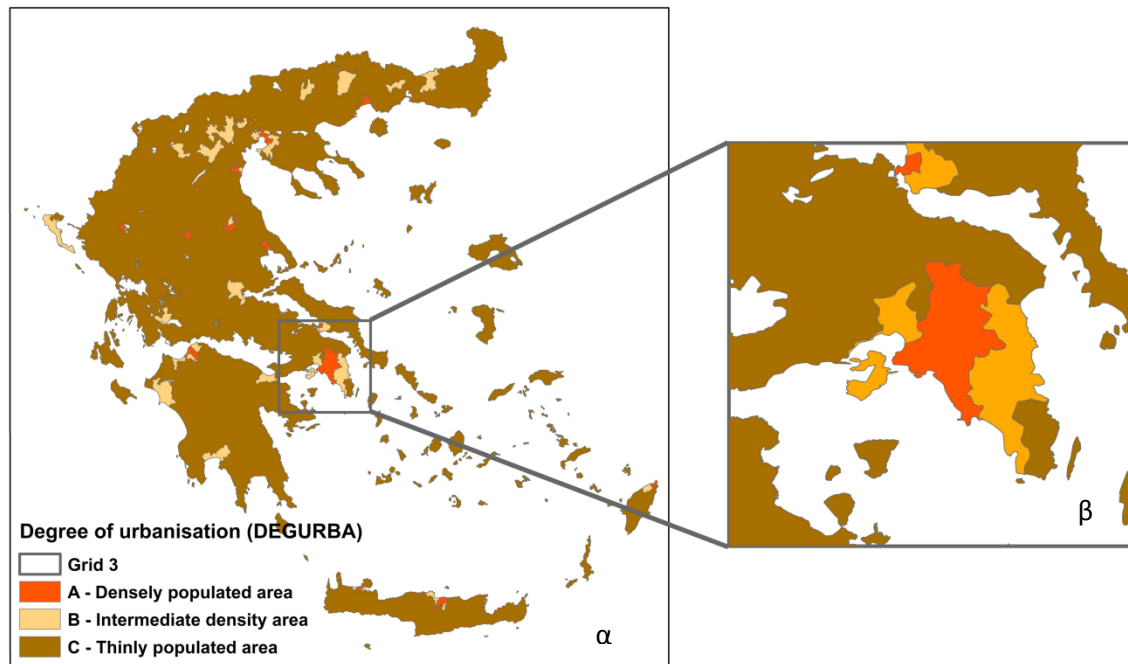
Σχήμα 3-2. Πυκνότητα πληθυσμού κατανεμημένη σε κελιά πλέγματος $1 \times 1 \text{ km}^2$ (Πηγή: Eurostat, <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>).



Σχήμα 3-3. Κατανομή του πληθυσμού που προέκυψε από τη βάση δεδομένων της Eurostat (σχ. 3-1) σε κελιά πλέγματος α) 6x6 km² και β) 2x2 km².

2. Βαθμός αστικοποίησης

Ο βαθμός αστικοποίησης εισήχθη το 1991 από την Eurostat για να δείξει το χαρακτήρα της περιοχής, όπου ζει ο πληθυσμός. Αρχικά δημιουργήθηκαν τρεις τύποι περιοχών: οι πυκνοκατοικημένες, οι ενδιάμεσης πυκνότητας και οι αραιοκατοικημένες περιοχές. Ο παραπάνω ορισμός δινόταν με κριτήριο την σύνοψη/συγκέντρωση/ομαδοποίηση γειτονικών διοικητικών μονάδων (local administrative units level 2, LAU2), για την Ελλάδα αυτές ήταν τα Δημοτικά και Κοινοτικά διαμερίσματα, και τον πληθυσμό αυτών (μέγεθος, πυκνότητα). Οι διοικητικές μονάδες ωστόσο διαφέρουν σημαντικά σε μέγεθος μεταξύ των χωρών με συνέπεια την παραμόρφωση και τη δυσκολία σύγκρισης των αποτελεσμάτων μεταξύ των χωρών με μεγάλα LAU2 και μικρά LAU2.



Σχήμα 3-4. Αποτύπωση του βαθμού αστικοποίησης α) για την Ελλάδα και β) για το πλέγμα 2.

Ωστόσο, το 2010 μια νέα αστική-αγροτική περιφερειακή τυπολογία δημοσιεύθηκε από τη Eurostat η οποία προήλθε από τον Οργανισμό Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (ΟΟΣΑ). Σύμφωνα με αυτή τη μεθοδολογία, οι αγροτικές περιοχές ορίζονται με βάση την πυκνότητα του πληθυσμού στις αγροτικές LAU2 χρησιμοποιώντας κελιά εμβαδού 1km^2 . Η ομοιομορφία των συγκεκριμένων κελιών εξαλείφει τις αβεβαιότητες που δημιουργούσε το διαφορετικό μέγεθος των LAU2 και παρέχει τη δυνατότητα αναθεώρησης του ορισμού των αγροτικών LAU2 και την εναρμόνιση με τον ορισμό των αραιοκατοικημένων περιοχών, όπως χρησιμοποιείται στο βαθμό αστικοποίησης. Επιπλέον η επικαιροποίηση του Urban Audit οδήγησε στην αναθεώρηση των ορίων και του αριθμού των πόλεων βοηθώντας στην εναρμόνιση αυτών με τον ορισμό των πυκνοκατοικημένων περιοχών, όπως χρησιμοποιείται στο βαθμό αστικοποίησης.

Ο βαθμός αστικοποίησης (DEgree of URBAnisation - DEGURBA) που αναπτύχθηκε τελικά από τη Eurostat (Σχ.3-4) βασίζεται σε δεδομένα πληθυσμού πλέγματος 1km^2 , όπως αυτό παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα και περιλαμβάνει μια ταξινόμηση όλων των LAU2 στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες:

(1) Πυκνοκατοικημένη περιοχή (A - Densely populated area), εναλλακτικό όνομα: πόλεις και μεγάλες αστικές περιοχές

- Τουλάχιστον το 50% ζει σε συγκροτήματα (clusters) υψηλής πυκνότητας²

(2) Περιοχή ενδιάμεσης πυκνότητας (B - Intermediate density area), εναλλακτικό όνομα: πόλεις και προάστια ή μικρή αστική περιοχή

- Λιγότερο από το 50% του πληθυσμού ζει σε αγροτικά κελιά³ και

- Λιγότερο από το 50% ζει σε συγκροτήματα υψηλής πυκνότητας

(3) Αραιοκατοικημένη περιοχή (C - Thinly populated area), εναλλακτικό όνομα: αγροτική περιοχή

- Περισσότερο από το 50% του πληθυσμού ζει σε αγροτικά κελιά.

Η ολοκληρωμένη μεθοδολογία βρίσκεται στην ιστοσελίδα της Eurostat (The New Degree of Urbanisation, DEGURBA_Methodology_DG_REGIO.zip)

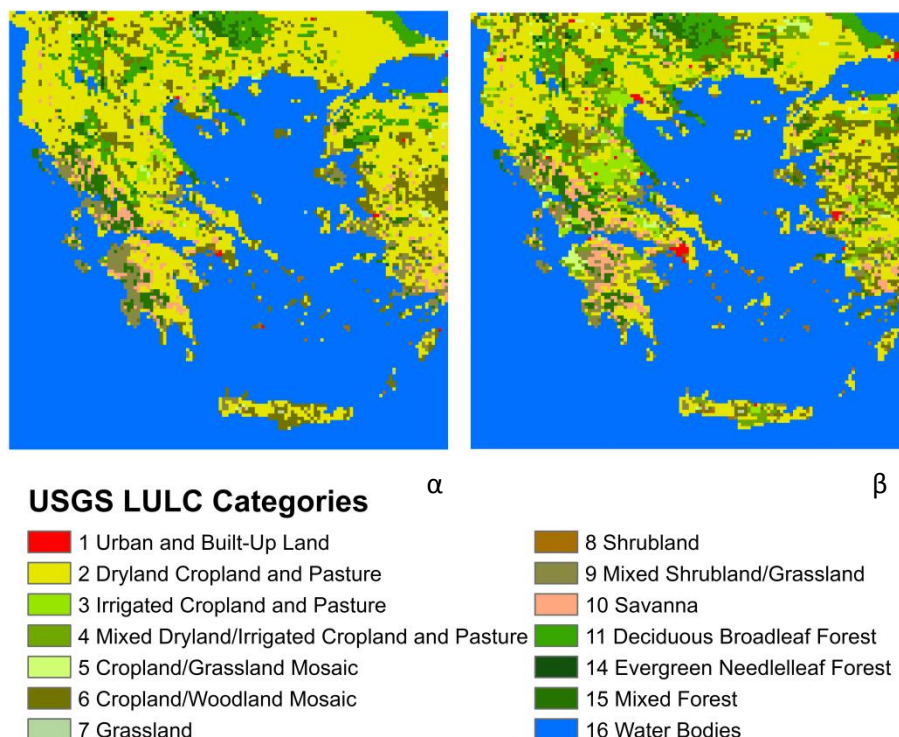
3. Δεδομένα χρήσης γης

Απαραίτητη προϋπόθεση για τον καταμερισμό των εκπομπών είναι η ταξινόμηση των χρήσεων γης στα κελιά των υπολογιστικών πλεγμάτων καθώς και η τοπογραφία τους. Τα δεδομένα αυτά δίνονται συνήθως από μετεωρολογικά μοντέλα όπως το MM5 σε συνδυασμό με τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων με το φωτοχημικό μοντέλο όπως θα εξηγηθεί στο κεφάλαιο 4. Τα δεδομένα χρήσεων γης, όπως δόθηκαν από το MM5, προήλθαν από τη βάση δεδομένων Global Land Use Land Cover -LULC version 2.0 Database του Γεωλογικού Ινστιτούτου των ΗΠΑ (United States Geological Survey). Η συγκεκριμένη βάση παρέχει παγκόσμια δεδομένα χρήσης γης που προκύπτουν από ραδιόμετρο πολύ υψηλής ανάλυσης (1.1 km) – Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)- για το έτος 1992. Το σύστημα ταξινόμησης που χρησιμοποιείται περιλαμβάνει 25 κατηγορίες κάλυψης γης μόνο 14 από τις οποίες περιγράφουν την περιοχή ενδιαφέροντος της παρούσας διατριβής (Πίνακας 3-3). Κάθε κατηγορία

² Αστικό συγκροτήμα γενικά θεωρείται το συνεχόμενο πλέγμα κελιών 1 km² με πυκνότητα τουλάχιστον 300 κατοίκων/ km² και ελάχιστο πληθυσμό 5,000. Συγκροτήματα υψηλής πυκνότητας θεωρείται το συνεχόμενο πλέγμα κελιών 1 km² με πυκνότητα τουλάχιστον 1,500 κατοίκων/ km² και ελάχιστο πληθυσμό 50,000 (εναλλακτικό όνομα: αστικό κέντρο).

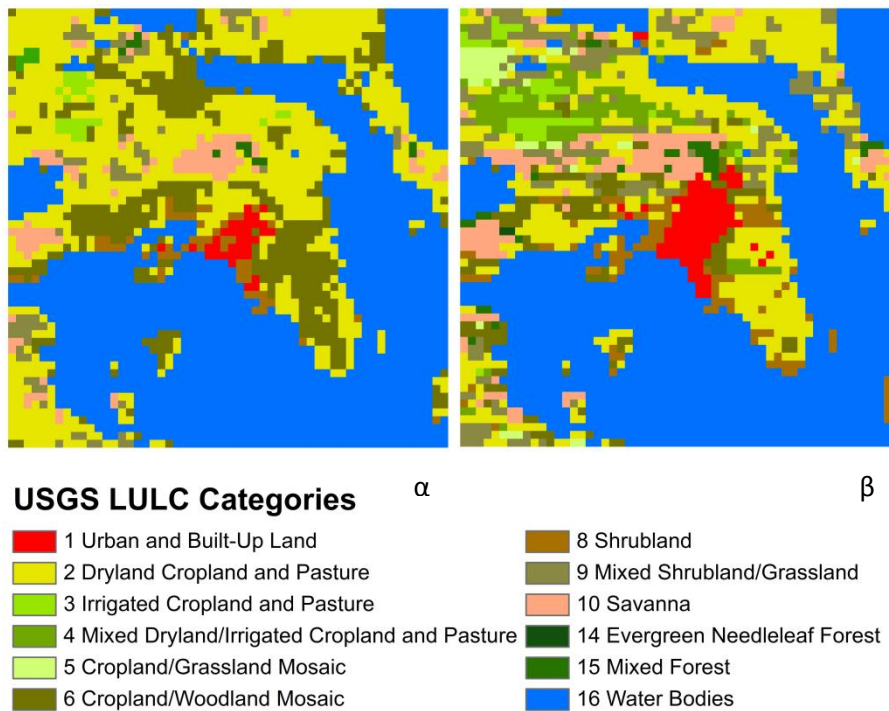
³ Αγροτικά κελιά θεωρούνται εκείνα που βρίσκονται εκτός των αστικών συγκροτημάτων.

χρήσης γης περιγράφεται με πέντε φυσικές παραμέτρους - λευκάγεια, υγρασία, ακτινοβολία, μήκος τραχύτητας και θερμική



Σχήμα 3-5. Χάρτες χρήσης γης για το πλέγμα 2, χωρικής ανάλυσης 6x6 km². Α) παλιά χρήση γης και β) νέα χρήση γης.

αδράνεια - των οποίων οι τιμές για το καλοκαίρι δίνονται στον Πίνακα 3-3. Η οπτικοποίηση των παραπάνω χρήσεων γης με τη βοήθεια του Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών (GIS) ArcView v.10 αποκάλυψε ότι οι αστικές περιοχές ήταν περιορισμένες και επίσης, σχετικά με το Πλέγμα 2, οι αλλαγές στη χρήση γης που πραγματοποιήθηκαν στην Αττική την τελευταία δεκαετία δεν αποτυπώνονταν αποτελεσματικά οπότε κρίθηκε αναγκαία η επικαιροποίηση των δεδομένων χρήσης γης με τη βοήθεια δορυφορικών εικόνων. Για την συγκεκριμένη μελέτη ακολουθήθηκε η μεθοδολογία που προτείνεται από την Αμερικανική Γεωλογική Υπηρεσία (USGS) (Anderson et al., 1976). Πιο συγκεκριμένα, κάθε κελί ελέγχθηκε ξεχωριστά και αποδόθηκε νέα χρήση γης με βάση την κυρίαρχη κατηγορία σε αυτό το κελί όπου αυτό κρίθηκε απαραίτητο. Στην περίπτωση που σε μια περιοχή συναντώνται διαφορετικοί τύποι χρήσης γης συμπεριλαμβανομένης της αστικής, η αστική κατηγορία πλεονεκτεί έναντι των υπολοίπων. Τα αποτελέσματα των αρχικών και των επικαιροποιημένων χρήσεων γης παρουσιάζονται στα σχήματα 3-5 και 3-6.



Σχήμα 3-6. Χάρτες χρήσης γης για το πλέγμα χωρικής ανάλυσης 2x2 km². α) παλιά χρήση γης και β) νέα χρήση γης.

Ο αριθμός των κελιών για κάθε κατηγορία χρήσεων γης παρουσιάζεται στον Πίνακα 3-4. Συγκρίνοντας τα σχήματα του Πλέγματος 1 (6x6 km²) είναι προφανές ότι οι αστικές περιοχές της Αθήνας, της Θεσσαλονίκης, της Κωνσταντινούπολης και της Σμύρνης έχουν επεκταθεί αρκετά. Επιπλέον, οι αυξημένες ανάγκες των γεωργικών προϊόντων έχουν οδηγήσει σε πιο οργανωμένες γεωργικές δραστηριότητες και στην ανάπτυξη αρδευόμενων καλλιεργήσιμων εκτάσεων στην κεντρική και βορειοδυτική Ελλάδα - 26.172 km² καλύφθηκαν από αρδευόμενες καλλιεργήσιμες εκτάσεις το 2010 πολύ περισσότερα από ό, τι το 1992 όπου ήταν μόνο 3.060 km². Επίσης, οι περιοχές με χαμηλή βλάστηση (θάμνοι, γρασίδι) καθώς και οι μικτές δασικές περιοχές στη Δυτική Ελλάδα έχουν αντικατασταθεί από αραιότερη βλάστηση τύπου σαβάνα που έχει επεκταθεί και προς την κεντρική Ελλάδα. Για τις δασικές εκτάσεις δεν παρατηρήθηκε μεγάλη διαφοροποίηση. Σχετικά με τα πεδία χρήσεων γης για το Πλέγμα 2 (Σχ. 3-6), η επικαιροποίηση των δεδομένων έδειξε μεγαλύτερη χωρική έκταση για την αστική ζώνη. Συγκρίνοντας τα επικαιροποιημένα αποτελέσματα μεταξύ της ανάλυσης των 6x6km² και των 2x2 km² παρατηρούμε ότι η υψηλή ανάλυση απεικονίζει τις κατηγορίες χρήσεων γης με μεγαλύτερη ακρίβεια συλλαμβάνοντας τα όρια του αστικού ιστού. Οι AVHRR - LU 2x2 km² χάρτες έδειξαν ότι τα αρχικά 144 km² της περιοχής που καλύπτονταν από τον αστικό ιστό αυξήθηκαν σε 380 km². Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι εξαπλώθηκε ο αστικός ιστός στο λεκανοπέδιο της Αττικής και στο ότι η κατηγορία της αστικής

χρήση γης (κατηγορία 1) παίρνει πάντα το πλεονέκτημα σε σχέση με άλλες κατηγορίες χρήσεων γης όταν εμφανίζονται πολλαπλές καλύψεις γης σε ένα κελί.

Πίνακας 3-3. Φυσικές παράμετροι επιλεγμένων χρήσεων γης (USGS) για την καλοκαιρινή περίοδο του Βόρειου Ημισφαιρίου (15 Απριλίου–15 Οκτωβρίου). (πηγή: MM5v3, user' guide, terrain).

LU	Land use	Albedo	Moisture	Emissivity	Roughness	Thermal Inertia
Value	category	(%)	Avail.(%)	(% at 9 μm)	Length (cm)	(cal cm ⁻² k ⁻¹ s ^{-1/2})
1	Urban	15	10	88	80	0.03
2	Dryland Crop.	17	30	98.5	15	0.04
3	Irrg. Crop. Past.	18	50	98.5	15	0.04
4	Mix. Dry/Irrg.C.P.	18	25	98.5	15	0.04
5	Crop/Grs. Mosaic	18	25	99	14	0.04
6	Cropland/Wood Mosc	16	35	98.5	20	0.04
8	Shrubland	22	10	88	10	0.03
9	Mix. Shrub/Grs.	20	15	90	11	0.03
10	Savanna	20	15	92	15	0.03
11	Decids. Broadlf. Forest	16	30	93	50	0.04
12	Decids. Needlf. Forest	14	30	94	50	0.04
14	Evergrn. Needlf.	12	30	95	50	0.04
15	Mixed Forest	13	30	94	50	0.04
16	Water Bodies	8	100	98	.01	0.06

Τα γύρω βουνά της Αττικής καλύπτονται κυρίως από αειθαλή πλατύφυλλα και βελονοειδή δέντρα τα οποία στον επικαιροποιημένο χάρτη χρήσεων γης περιγράφονται ως μικτά δάση. Ωστόσο, οι μικτές καλλιεργήσιμες/δασικές εκτάσεις (κατηγορία 6) μειώθηκαν κατά περίπου 65 %, ενδεικτικό της συρρίκνωσης των μεταβατικών περιοχών βλάστησης λόγω των συνεχόμενων και εκτεταμένων πυρκαγιών. Εκτός από τις αστικές και δασικές περιοχές το υπόλοιπο της γης χαρακτηρίστηκε ως μη αρδευόμενες καλλιεργήσιμες εκτάσεις, θαμνώδη εδάφη και μικτές μη αρδευόμενες/ αρδευόμενες καλλιεργήσιμες εκτάσεις και βοσκοτόπια. Σε ορισμένες περιοχές οι μη αρδευόμενες καλλιεργήσιμες εκτάσεις είναι δύσκολο να διακριθούν από τους θαμνότοπους λόγω των εποχιακών μεταβολών σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις οπότε απαιτούνται εικόνες όσο το δυνατόν

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ

καλύτερης ανάλυσης. Όσον αφορά τις γεωργικές περιοχές (κατηγορία 3) αυτές βρίσκονται κυρίως στη Βοιωτία και την βορειοανατολική Πελοπόννησο και είναι καλύτερα καθορισμένες στους επικαιροποιημένους χάρτες.

Πίνακας 3-4. Πλήθος κελιών ανά κατηγορία χρήσης γης για κάθε πλέγμα χωρικής ανάλυσης 2x2 km² και 6x6 km².

Κατηγορίες χρήσης γης	2x2 km ² (Πλέγμα 2)		6x6 km ² (Πλέγμα 1)	
	Παλιά χρήση γης	Νέα χρήση γης	Παλιά χρήση γης	Νέα χρήση γης
1	36	95(380km ²)	15	54
2	897	608	4376	3448
3	27	49	85	308
4		134		419
5		50	35	123
6	399	145	945	1024
7			21	18
8	57	122	32	76
9	80	228	536	460
10	104	154	263	349
11	6		712	734
12				
13				
14		2	36	34
15	12	31	468	486
16	1518	1518	10432	10423

Η οριοθέτηση των υδάτινων περιοχών αντιπροσωπεύεται επίσης καλύτερα στους χάρτες υψηλότερης χωρικής ανάλυσης (2x2 km²). Η έκταση των υδάτινων περιοχών (κατηγορία 16) είναι 6.072 km² στην περίπτωση των 2x2 km².

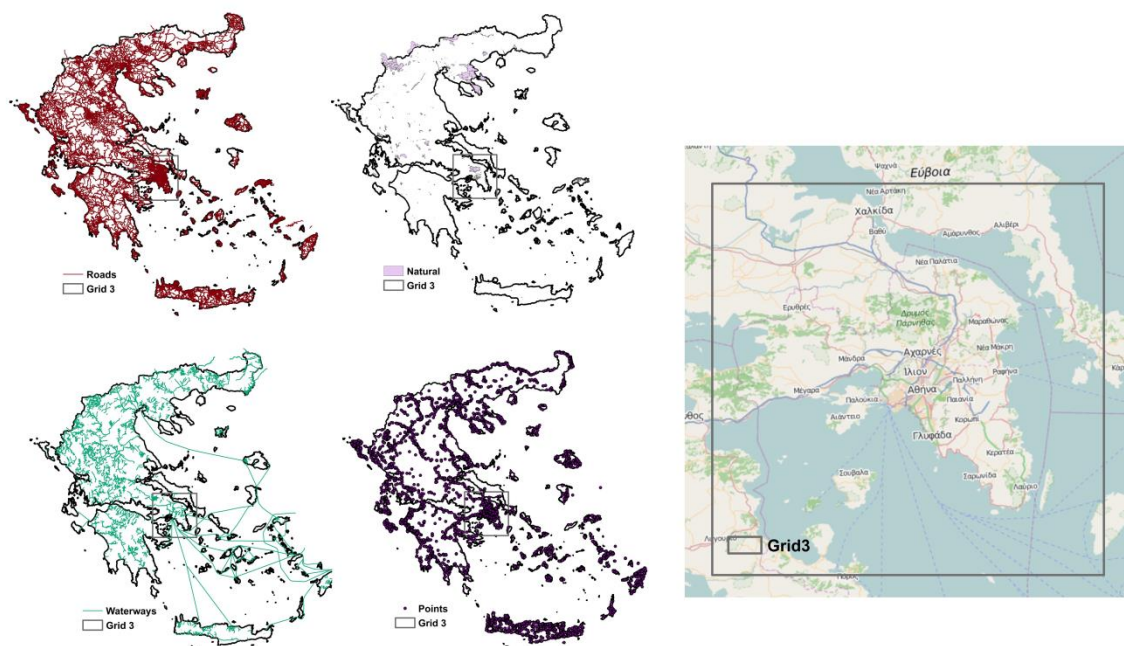
Γενικά συμπεραίνεται ότι η διοργάνωση των Ολυμπιακών Αγώνων του 2004 αποτέλεσε σταθμό για τη διαμόρφωση του νέου αστικού ιστού στο λεκανοπέδιο Αττικής λόγω της πραγματοποίησης πολλών έργων υποδομής, συμπεριλαμβανομένων των νέων αυτοκινητοδρόμων και της κατασκευής του Διεθνούς Αεροδρομίου Αθηνών στα Μεσόγεια. Στα παραπάνω προστέθηκε και η διαμόρφωση περιοχών που παλαιότερα χαρακτηρίζονταν ως αγροτικές σε αστικές αλλά και η

πύκνωση/επέκταση ήδη υφισταμένων αστικών περιοχών. Κατά συνέπεια, παρατηρήθηκε μια στροφή του πληθυσμού προς τα ανατολικά και τα νότια προάστια της Αθήνας.

Συγκεντρωτικά, τα σημαντικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την επικαιροποίηση είναι η επέκταση του αστικού πλέγματος προς τα Μεσόγεια λόγω της βελτίωσης και της εξάπλωσης του οδικού δικτύου, η πύκνωση των δυτικών και νοτιοανατολικών προαστίων της Αθήνας καθώς και η αύξηση των αρδευόμενων καλλιεργειών στη Βοιωτία (Fameli et al., 2011, 2012a).

4. Γεωγραφικοί χάρτες

Για την χωρική αποτύπωση των εκπομπών από τις μεταφορές χρησιμοποιήθηκαν δυναμικοί γεωγραφικοί χάρτες από το έργο OpenStreetMap (OSM) οι οποίοι είναι δυνατόν να εισαχθούν και επεξεργαστούν στο περιβάλλον του ArcMap. Το εν λόγω έργο δημιουργήθηκε το 2004 και αποτελεί ένα πρόγραμμα συνεργασίας με σκοπό τη δημιουργία ενός χάρτη οι πληροφορίες του οποίου θα είναι διαθέσιμες και επεξεργάσιμες από το ευρύ κοινό. Επομένως τα δεδομένα είναι ανοιχτά και σύμφωνα με την άδεια Open Data Commons Open Database License (ODbL) ο καθένας μπορεί να τα αντιγράψει, διανείμει και διαχειριστεί. Η σήμανση στους χάρτες καθώς και η τεκμηρίωση, είναι υπό την άδεια Creative Commons Attribution-ShareAlike 2.0 άδεια (CC BY-SA, <http://www.openstreetmap.org/copyright>).



Σχήμα 3-7. Δυναμικοί γεωγραφικοί χάρτες (shapefiles) για την Ελλάδα (πηγή: OpenStreetMap).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ

Για τις ανάγκες της παρούσης διατριβής τα δεδομένα OSM για την Ελλάδα εξήχθησαν από τον Geofabrik server και περιλαμβάνουν τα απογραφικά όρια σε επίπεδο χώρας, γεωγραφικών διαμερισμάτων και νομών, το οδικό δίκτυο χωρισμένο σε 33 κατηγορίες (π.χ. αυτοκινητόδρομοι, πρωτεύον, δευτερεύον και τριτεύον δίκτυο, αστικοί δρόμοι, κτλ.), το θαλάσσιο και σιδηροδρομικό δίκτυο, σημεία ενδιαφέροντος και σημαντικά κτίρια αλλά και χρήσεις γης, φυσικές περιοχές (π.χ. δάση, πάρκα, κτλ.) όπως αυτά παρουσιάζονται στο Σχ.3-7.

3.4 Πηγές ρύπανσης

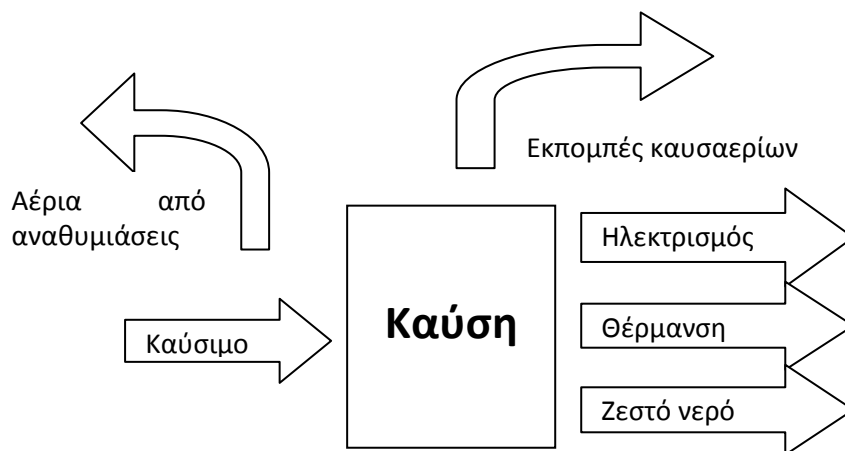
3.4.1 Σταθερές πηγές καύσης

Στην συγκεκριμένη κατηγορία περιλαμβάνονται οι εκπομπές που προέρχονται από τις παρακάτω δραστηριότητες:

- Οικιακή κατανάλωση για θέρμανση/ μαγείρεμα.
- Κατανάλωση στον τριτογενή τομέα παραγωγής (ξενοδοχεία, εστιατόρια και καφετέριες, νοσοκομεία, εκπαίδευση, γραφεία και εμπόριο).
- Γεωργία και δασοκομία.

Οι κυριότεροι ρύποι που προέρχονται από αυτές τις δραστηριότητες είναι: NO_x, CO, PM, SO_x, VOCs, μέταλλα (όπως ο υδράργυρος και το κάδμιο), PAH, PCB, HCB, NH₃ και διοξίνες. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3-8 προέρχονται από τη διαδικασία της καύσης στις σταθερές πηγές για την παραγωγή ζεστού νερού, τη θέρμανση των χώρων και τον ηλεκτρισμό αυτών αλλά και το μαγείρεμα (κυρίως στην οικιακή κατανάλωση). Όσον αφορά στον αγροτικό τομέα η κατανάλωση ενέργειας αναφέρεται κυρίως στη θέρμανση των θερμοκηπίων και το πότισμα των καλλιεργειών.

Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται είναι πετρέλαιο θέρμανσης, φυσικό αέριο, κηροζίνη, υγραέριο, καυσόξυλα και πελλέτες. Η κατανάλωση ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας (από θερμικά ηλιακά συστήματα) δεν περιλαμβάνεται στην συγκεκριμένη κατηγορία καθώς η παραγωγή ενέργειας γίνεται σε απομακρυσμένες πηγές.



Σχήμα 3-8. Αναπαράσταση της διαδικασίας εκπομπής αερίων από μικρές εγκαταστάσεις καύσης (Πηγή: EMEP/EEA E.I. Guidebook 2013).

3.4.1.1 Μεθοδολογία

Για τον υπολογισμό των ετήσιων εκπομπών από σταθερές πηγές καύσης χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία Tier 2 του EMEP/EEA E.I. Guidebook 2013 η οποία βασίζεται στην τεχνολογία των πηγών καύσης. Ο υπολογισμός των ετήσιων εκπομπών E_i γίνεται με βάση τη σχέση:

$$E_i = \sum_{j,k} EF_{i,j,k} \times A_{j,k} \quad (3.4)$$

Όπου

E_i είναι η ετήσια εκπομπή του ρύπου i ,

$EF_{i,j,k}$ είναι ο συντελεστής εκπομπής του ρύπου i για την πηγή j και το καύσιμο k ,

$A_{j,k}$ είναι η ετήσια κατανάλωση καυσίμου k από την πηγή j .

Πίνακας 3-5. Πηγές δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των εκπομπών από τις σταθερές πηγές καύσης.

Δεδομένα	Πηγή
Ετήσια κατανάλωση καυσίμου	Οικιακός τομέας: Ε.Π.Σ.Ε. - ΥΠΕΚΑ Μη-οικιακές εκπομπές: πρόγραμμα Odyssee – Mure
Χωρική αποτύπωση	Πληθυσμιακή πυκνότητα (Eurostat) Χρήση γης (επικαιροποιημένα δεδομένα-παρούσα διατριβή)
Χρονικός καταμερισμός	Μηνιαία, εβδομαδιαία, ωριαία προφίλ (TNO)

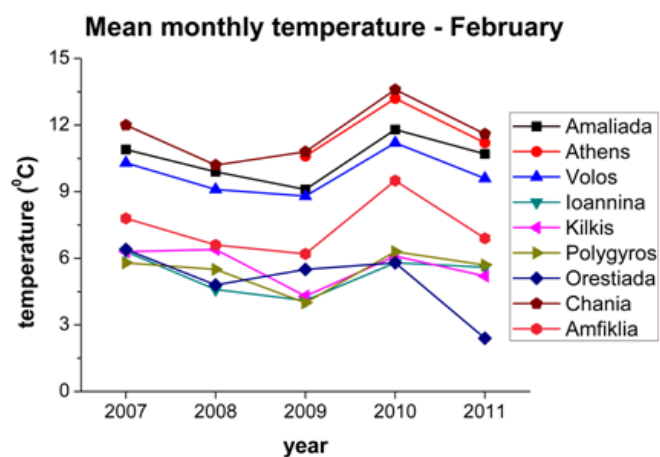
Οι πηγές που αντιστοιχούν στην οικιακή κατανάλωση είναι τα τζάκια (ανοιχτού τύπου και ενεργειακά), οι σόμπες (συμβατικές και ενεργειακές) και οι λέβητες. Για την γεωργία και τον τριτογενή τομέα παραγωγής ως κύριες πηγές καύσης θεωρούνται οι λέβητες πετρελαίου, φυσικού αερίου αλλά και καύσης ξύλου.

Η ετήσια ενεργειακή κατανάλωση ανά τύπο καυσίμου για τον οικιακό τομέα προήλθε από το Εθνικό Πληροφοριακό Σύστημα για την Ενέργεια (Ε.Π.Σ.Ε.) του Υπουργείου Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής (ΥΠΕΚΑ) ενώ για τους υπόλοιπους τομείς χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το πρόγραμμα Odyssee – Mure (Odyssee – Mure project, 2014). Στο συγκεκριμένο πρόγραμμα συμμετέχουν εκπρόσωποι από τα 28 κράτη μέλη της ΕΕ καθώς και η Νορβηγία ενώ στόχος του προγράμματος είναι η παρακολούθηση των τάσεων και των μέτρων ενεργειακής απόδοσης στην Ευρώπη, με τη χρήση δύο συμπληρωματικών βάσεων δεδομένων: την βάση ODYSSEE σχετικά με τους δείκτες ενεργειακής απόδοσης και CO₂, η οποία συμπεριλαμβάνει λεπτομερή στοιχεία για την ενεργειακή κατανάλωση, τις δραστηριότητες και τις σχετικές εκπομπές

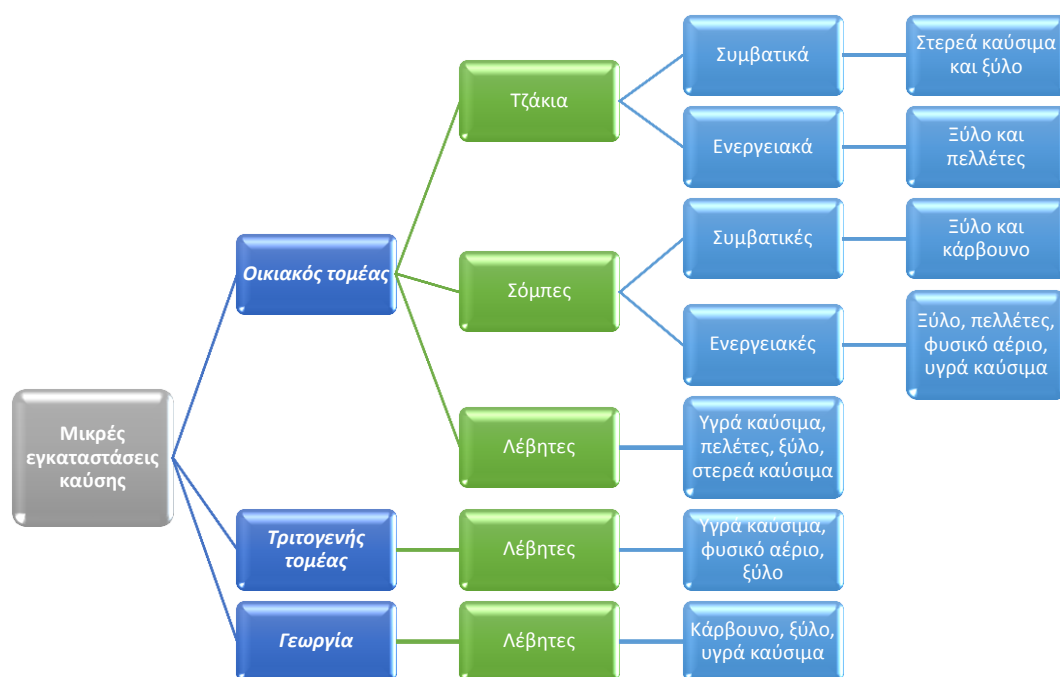
CO₂ για την περίοδο 1990 – 2012 και την βάση MURE η οποία σχετίζεται με τα μέτρα πολιτικής για την ενεργειακή απόδοση, συμπεριλαμβανομένων των επιπτώσεών τους.

Με τη βοήθεια του Πίνακα 3-6 παρατηρείται ότι το πετρέλαιο αποτελεί το κυρίως καύσιμο στον οικιακό τομέα παραγωγής και στην γεωργία ενώ ο ηλεκτρισμός υπερέχει στον τριτογενή τομέα. Συγκρίνοντας την ετήσια ενεργειακή κατανάλωση ανά τύπο καυσίμου και τομέα συμπεραίνουμε ότι αυτή είναι μεγαλύτερη στον οικιακό τομέα για όλα τα είδη καυσίμου. Αξιοσημείωτη είναι η σταδιακή άνοδος στη χρήση φυσικού αερίου στον οικιακό τομέα από το 2006 και μετά (150.4% αύξηση μεταξύ 2006-2011) καθώς και η σημαντική αύξηση στην κατανάλωση ξύλου από τους μη-οικιακούς τομείς. Αναλυτικότερα, το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στον οικιακό τομέα καταλαμβάνει το πετρέλαιο θέρμανσης με ποσοστό 46.5% το 2011 και στη συνέχεια ακολουθεί ο ηλεκτρισμός (27.8% - 2011) και η βιομάζα (14.0% - 2011). Λόγω της οικονομικής κατάστασης στην Ελλάδα έχει αυξηθεί σημαντικά το ποσοστό των νοικοκυριών που χρησιμοποιούν ξύλα και πελλέτες ως καύσιμο για θέρμανση έναντι του πετρελαίου. Συγκεκριμένα στην Βόρεια Ελλάδα η μέση ετήσια κατανάλωση ξύλου (σε κιλά) αυξήθηκε κατά 325% μεταξύ 2011-2012 (Slini et al. 2014). Επιπλέον ενώ κατά τη μελετώμενη χρονική περίοδο η κατανάλωση πετρελαίου μειώνεται σταδιακά (33.9% μείωση μεταξύ 2006-2010), το 2011 έχουμε 32.5% αύξηση αυτής σε σχέση με το έτος 2010 γεγονός που οφείλεται στην αύξηση των κρύων ημερών του συγκεκριμένου χειμώνα (Σχ. 3-9) καθώς αντίστοιχη αύξηση παρατηρείται και στην κατανάλωση φυσικού αερίου και ξύλου (36.5% και 28.0% αντίστοιχα). Σύμφωνα με έρευνα των Santamouris et al. (2013), η οποία διεξήχθη την άνοιξη του 2012 με σκοπό τη διερεύνηση των επιπτώσεων της οικονομικής κρίσης στην κατανάλωση ενέργειας στα ελληνικά νοικοκυριά, διαπιστώθηκε ότι οι κάτοικοι κατανάλωσαν πολύ μικρότερα ποσά ενέργειας τον χειμώνα 2011 – 12 σε σχέση με τον χειμώνα 2010 – 11 παρόλο που ο πρώτος ήταν πολύ πιο οξύς, κυρίως λόγω της ραγδαίας επιδείνωσης της οικονομικής κατάστασης. Μάλιστα η κατανάλωση ήταν κατά 37% χαμηλότερη από την αναμενόμενη. Πιο συγκεκριμένα διαπιστώθηκε ότι τα ¾ των νοικοκυριών ανήκουν σε ομάδες χαμηλού εισοδήματος οι οποίες ζουν σε μικρότερους χώρους και καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια σε σύγκριση με τις ομάδες υψηλού εισοδήματος. Επίσης το 1/3 των ομάδων υψηλού εισοδήματος και το 1/4 των ομάδων χαμηλού εισοδήματος υιοθέτησαν μέτρα περιορισμού της κατανάλωσης μετά τον πρώτο χειμώνα του 2010-11.

Όσον αφορά στους μη-οικιακούς τομείς παρατηρούμε συνεχόμενη μείωση της κατανάλωσης πετρελαίου και αύξηση της κατανάλωσης φυσικού αερίου και ξύλου. Η ηλεκτρική κατανάλωση δεν ακολουθεί σταθερή ετήσια διακύμανση καθώς αυξάνεται κατά τα πρώτα 4 έτη στον τριτογενή τομέα ενώ μετά μειώνεται. Για τη γεωργία παρατηρούνται αυξομειώσεις σε όλη τη χρονική διάρκεια.



Σχήμα 3-9. Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες ($^{\circ}\text{C}$) για τον μήνα Φεβρουάριο (Πηγή: www.meteo.gr).



Σχήμα 3-10. Πηγές καύσης και τύπος καυσίμου που περιλαμβάνονται στην κατηγορία SNAP 02. (Πηγή: ΕΜΕΡ/ΕΕΑ Ε.Ι. Guidebook 2013).

Πίνακας 3-6. Κατανάλωση ενέργειας από τον οικιακό τομέα (Πηγή: Ε.Π.Σ.Ε.).

ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (GJ) – ΟΙΚΙΑΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ										
ΕΤΟΣ	Ηλεκτρισμός	Άνθρακας και Προϊόντα	Πετρέλαιο	LPG	Κηροζίνη	Φυσικό Αέριο	Θερμότητα	Βιομάζα	Γεωθερμία	Ηλιακή Ενέργεια
2006	63,627,200	41,860	121,059,120	2,176,720	586,040	5,818,540	2,344,160	29,385,720	41,860	4,520,880
2007	64,631,840	83,720	108,375,540	2,009,280	293,020	7,409,220	1,716,260	31,688,020	41,860	6,572,020
2008	65,259,740	251,160	104,650,000	2,009,280	293,020	8,706,880	1,841,840	25,702,040	83,720	7,116,200
2009	65,259,740	125,580	90,040,860	1,716,260	293,020	10,716,160	2,051,140	22,604,400	125,580	7,492,940
2010	65,259,740	125,580	80,036,320	2,009,280	251,160	10,674,300	1,925,560	24,990,420	167,440	7,325,500
2011	63,459,760	167,440	106,073,240	1,799,980	251,160	14,567,280	2,260,440	31,981,040	167,440	7,325,500

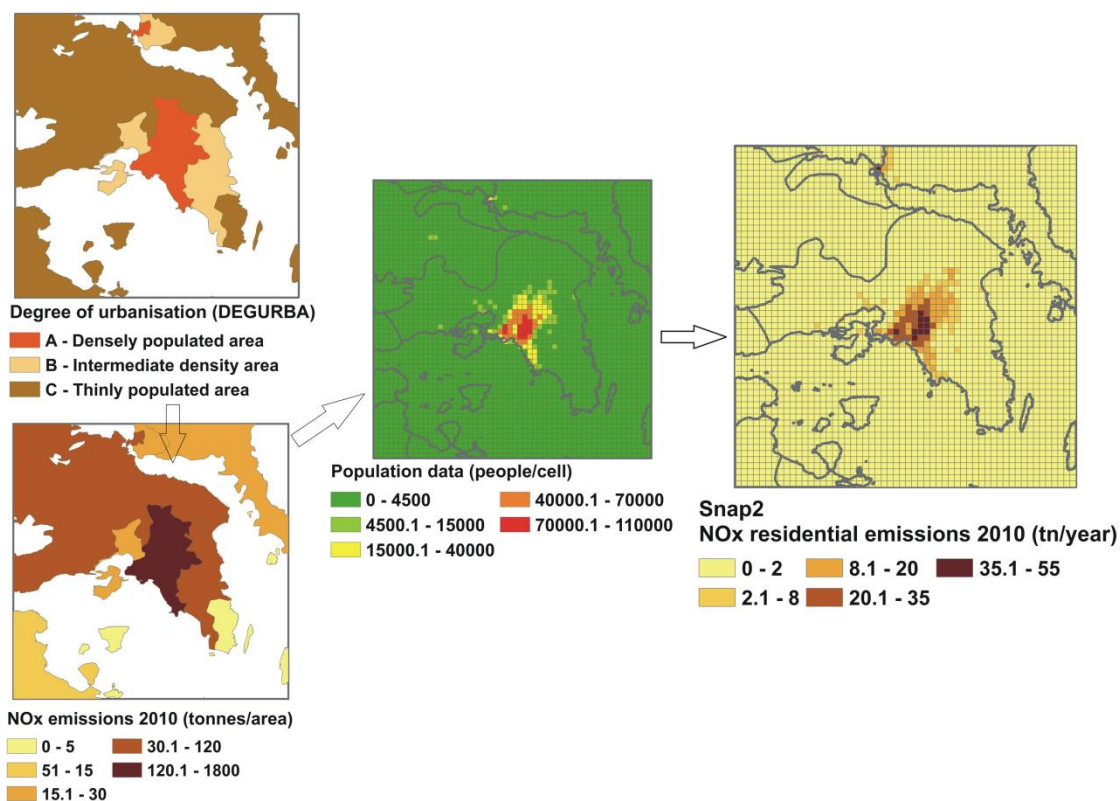
Πίνακας 3-7. Κατανάλωση από τον μη-οικιακό τομέα (Πηγή: Odyssee-Mure project, ανάκτηση στις 15-04-2014).

ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (GJ)							
ΤΡΙΤΟΓΕΝΗΣ ΤΟΜΕΑΣ					ΓΕΩΡΓΙΑ		
ΕΤΟΣ	Ξύλο	Φυσικό αέριο	Υγρά καύσιμα	Ηλεκτρισμός	Ξύλο	Υγρά καύσιμα	Ηλεκτρισμός
2006	293,020	3,767,400	18,878,860	63,920,220.00	669,760	38,469,340	9,795,240
2007	209,300	4,395,300	17,162,600	67,562,040.00	879,060	34,701,940	10,381,280
2008	167,440	5,399,940	16,367,260	70,868,980.00	1,004,640	33,571,720	11,176,620
2009	209,300	6,069,700	12,264,980	71,162,000.00	1,046,500	26,539,240	9,041,760
2010	669,760	5,818,540	10,674,300	64,799,280.00	1,046,500	22,855,560	9,585,940
2011	1,381,380	6,906,900	9,544,080	60,529,560.00	1,590,680		8,999,900

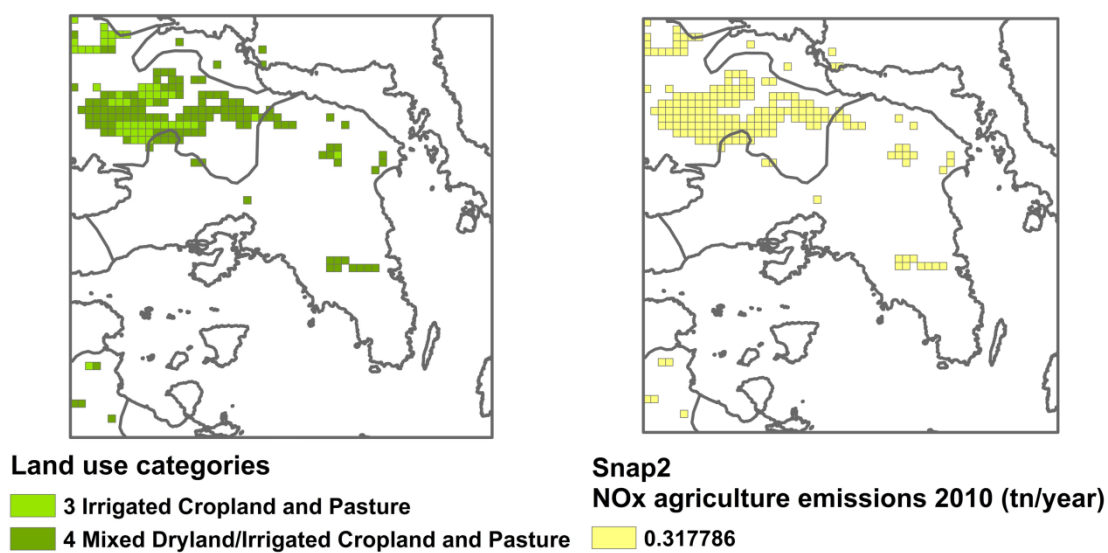
Σύμφωνα με έρευνα της Ελληνικής Στατιστικής Υπηρεσίας (ΕΛ.ΣΤΑΤ.) για την κατανάλωση ενέργειας στα νοικοκυριά για το χρονικό διάστημα Οκτωβρίου 2011 - Σεπτεμβρίου 2012 (ΕΛ.ΣΤΑΤ. 2013), η οποία κάλυπτε όλη την ελληνική επικράτεια, διαπιστώθηκε ότι οι ανάγκες ενός νοικοκυριού για θέρμανση χώρων και μαγείρεμα αποτελούν το 81% της συνολικής ετήσιας καταναλισκόμενης ενέργειάς του ενώ το πετρέλαιο θέρμανσης είναι το κυρίως καύσιμο σε ποσοστό 44.1%. Για το διαχωρισμό των ετήσιων τιμών ενεργειακής κατανάλωσης ανά τύπο καυσίμου στα διάφορα είδη πηγών χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές που αντιστοιχούν στην κατανάλωση πετρελαίου θέρμανσης τοποθετήθηκαν στους λέβητες πετρελαίου σε ποσοστό 49% στις μονοκατοικίες / διώροφα κτίρια που χρησιμοποιούν λέβητες < 50kWht και 51% στις πολυκατοικίες που διαθέτουν μεγαλύτερους λέβητες. Οι ετήσιες τιμές της κηροζίνης και του υγραερίου (Liquid Petroleum Gas - LPG) αντιστοιχήθηκαν στις σόμπες. Η κατανομή της κατανάλωσης φυσικού αερίου έγινε κατά 70.8% στους λέβητες και κατά 29.2% στις σόμπες. Μεγαλύτερο ποσοστό χρησιμοποιήθηκε για τους λέβητες καθώς έχει αυξηθεί η χρήση του φυσικού αερίου στις αστικές περιοχές και κατ' επέκταση στις πολυκατοικίες λόγω της επέκτασης του δικτύου φυσικού αερίου. Ως πηγές καύσης ξύλου και άνθρακα (ή κάρβουνου) χρησιμοποιήθηκαν τα τζάκια (66%), οι ξυλόσομπες (33%) και οι λέβητες ξύλου (1%). Η συγκεκριμένη κατανομή προέκυψε επίσης από την παραπάνω μελέτη της ΕΛ.ΣΤΑΤ. σύμφωνα με την οποία το 10.5% επί του συνόλου των νοικοκυριών διαθέτουν τζάκι ενώ το 5.2 % ξυλόσομπα οπότε η αναλογία 2:1 ανάχθηκε στα παραπάνω ποσοστά – 66% και 33% αντίστοιχα. Ένα μικρό ποσοστό της τάξης του 0.5% αποδόθηκε στην κατανάλωση πελλετών και από τις τρεις πηγές καύσης (0.2% στα τζάκια, 0.2% στις σόμπες και 0.1% στους λέβητες). Η ενεργειακή κατανάλωση από τον μη-οικιακό τομέα κατανεμήθηκε σε λέβητες φυσικού αερίου, πετρελαίου και ξύλου ανάλογα με το είδος καυσίμου και για τον υπολογισμό των ετήσιων εκπομπών χρησιμοποιήθηκαν οι αντίστοιχοι συντελεστές εκπομπής της μεθοδολογίας EMEP/EEA. Στο Σχ. 3-10 παρουσιάζεται το διάγραμμα καταμερισμού της ενεργειακής κατανάλωσης από τις διάφορες πηγές όπως περιγράφηκε παραπάνω.

3.4.1.2 Χωρική και χρονική αποτύπωση των εκπομπών

Η μεθοδολογία για τη χωρική αποτύπωση των εκπομπών για την κατηγορία SNAP2 περιγράφεται στα σχήματα 3-11 και 3-12. Για την χωρική αποτύπωση των οικιακών εκπομπών χρησιμοποιήθηκαν αρχικά ο βαθμός αστικότητας (DEGURBA) και στη συνέχεια δεδομένα πυκνότητας πληθυσμού τα οποία προέκυψαν από τη βάση δεδομένων της Eurostat (Eurostat, 2012) όπως περιγράφεται στην



Σχήμα 3-11. Μεθοδολογία χωρικής αποτύπωσης εκπομπών από τον οικιακό και τον τριτογενή τομέα παραγωγής.



Σχήμα 3-12. Μεθοδολογία χωρικής αποτύπωσης εκπομπών από τον αγροτικό τομέα.

παράγραφο 3.3.2. Πιο αναλυτικά, το 20% των οικιακών εκπομπών από τα τζάκια και τις σόμπες κατανεμήθηκε στις περιοχές που εμφανίζουν βαθμό αστικότητας Α ενώ το υπόλοιπο μέρος αυτών τοποθετήθηκε στις περιοχές με βαθμό αστικότητας Β και C. Οι εκπομπές από τους λέβητες των

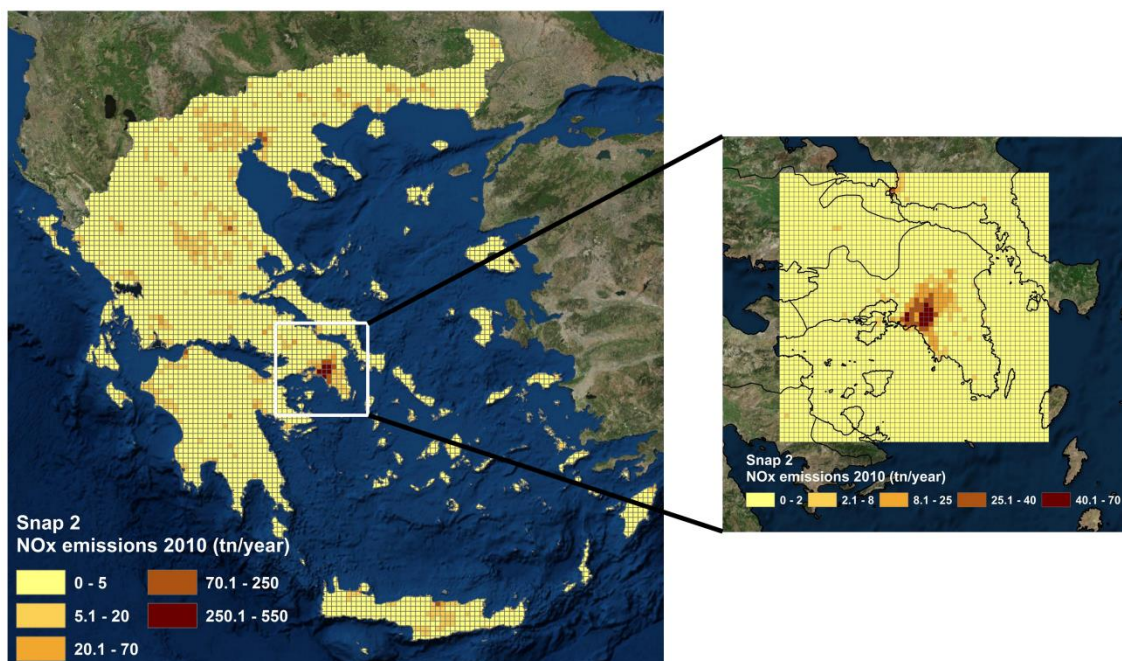
πολυκατοικιών τοποθετήθηκαν μόνο στις περιοχές με αστικότητα Α ενώ οι εκπομπές από τους λέβητες των μονοκατοικιών χωρίστηκαν στις αστικές περιοχές (βαθμός αστικότητας Α και Β) και στις αγροτικές περιοχές (βαθμός αστικότητας C) σε ποσοστό 57% και 43% αντίστοιχα. Στη συνέχεια οι εκπομπές καταμερίστηκαν σε κελιά βάση του πληθυσμού κάθε περιοχής. Οι εκπομπές από τον τριτογενή τομέα παραγωγής κατανεμήθηκαν στα κελιά με κριτήριο τα δεδομένα πυκνότητας πληθυσμού ενώ για τις εκπομπές από τη γεωργία χρησιμοποιήθηκαν τα πεδία χρήσης γης βάση των οποίων οι αντίστοιχες εκπομπές κατανεμήθηκαν ισομερώς στα κελιά με κατηγορία χρήσης γης 3 (αρδευόμενες καλλιέργειες) και 4 (μικτές αρδευόμενες και μη καλλιέργειες) για την Ελλάδα και το πλέγμα 3. Η παραπάνω κατανομή των ετήσιων τιμών παρέχει τη δυνατότητα να είναι γνωστή η τιμή των εκπομπών ανά ρύπο για κάθε κατηγορία πηγής (τζάκια, λέβητες, κτλ) σε κάθε κελί.

Για το χρονικό διαχωρισμό των εκπομπών χρησιμοποιήθηκαν μηνιαίοι, ημερήσιοι και ωριαίοι συντελεστές από το TNO-innovation for life (TNO, 2005) καθώς θεωρήθηκε ότι ανταποκρίνονται ικανοποιητικά στα ελληνικά προφίλ χρονικής διακύμανσης της δραστηριότητας των συγκεκριμένων τύπων πηγών. Σύμφωνα με τα συγκεκριμένα προφίλ μεγαλύτερη βαρύτητα δίνεται στους χειμερινούς μήνες (Νοέμβριος- Φεβρουάριος) λόγω των μεγαλύτερων αναγκών για θέρμανση των κτιρίων ενώ στα ωριαία προφίλ η μεγαλύτερη βαρύτητα δίνεται τις πρωινές ώρες 7.00 – 12.00 LST και τις βραδινές 18.00 – 22.00 LST καθώς στα συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα είναι μεγαλύτερη η κατανάλωση στα νοικοκυριά λόγω των αναγκών για θέρμανση και μαγείρεμα.

3.4.1.3 Αποτελέσματα

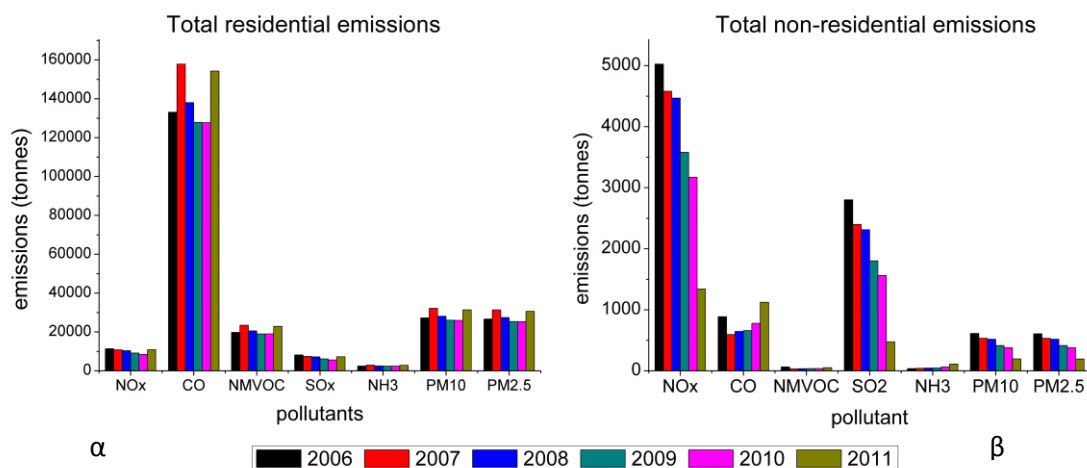
Οι συνολικές ετήσιες εκπομπές από τους τρεις τομείς παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-9. Οι υψηλότερες τιμές αντιστοιχούν στο CO και ακολουθούν τα αιωρούμενα σωματίδια, τα NMVOCs, τα NOx και το SO₂. Πολύ μικρότερες αλλά σημαντικές είναι οι συγκεντρώσεις των πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων γνωστών ως PAHs (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons). Οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες είναι μια ομάδα ενώσεων που σχηματίζονται κατά τη διάρκεια της ατελούς καύσης του άνθρακα, του πετρελαίου, του φυσικού αερίου, του ξύλου, των απορριμμάτων ή άλλων οργανικών ουσιών. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι PAHs προκύπτουν ως μίγμα αρκετών ενώσεων και όχι ως μια ενιαία χημική ουσία. Οι διάφοροι PAHs παράγονται και εμπορικά με σκοπό τη χρήση τους στη βιομηχανική οργανική σύνθεση. Από τη στιγμή που απελευθερώνονται στο υδάτινο περιβάλλον, η απορρόφησή τους από μικροοργανισμούς είναι συχνά αργή, με αποτέλεσμα την συσσώρευση τους σε ιζήματα, εδάφη, υδρόβια και χερσαία φυτά, ψάρια και ασπόνδυλα. Γνωστοί PAHs είναι οι ενώσεις βενζο(α)πυρένιο (benzo[a]pyrene),

φλουορανθένιο (fluoranthene), ναφθαλίνη (naphthalene) ή ανθρακενίο (anthracene). Όσον αφορά την ανθρώπινη υγεία, παρατεταμένη έκθεση σε PAHs μπορεί να έχει βλαβερή επίδραση στον ανθρώπινο οργανισμό λόγω των καρκινογόνων, μεταλλαξιογόνων και τερατογόνων ιδιοτήτων τους (definition source: UNEP-Balkan, Terminology source: <http://glossary.eea.europa.eu>).



Σχήμα 3-13. Χωρικά κατανεμημένες εκπομπές (τόνοι) από τις σταθερές πηγές καύσης στο πλέγμα της Ελλάδας και το Πλέγμα 2 για το έτος 2010.

Χωρίζοντας τα αποτελέσματα σε οικιακές και μη εκπομπές (Σχ. 3-14) παρατηρούμε ότι η πρώτη κατηγορία καθορίζει τις συνολικές εκπομπές. Ειδικά για τους ρύπους CO, NMVOCs και τα σωματίδια (PM_{10} , $PM_{2.5}$) τα ποσοστά που αναλογούν στις οικιακές εκπομπές είναι περίπου 99%, 99% και 97% αντίστοιχα για όλα τα έτη. Για τις εκπομπές των NOx τα αντίστοιχα ποσοστά είναι περίπου 70% υπέρ του οικιακού τομέα για τα έτη 2006 - 2010 ενώ για το έτος 2011 το αντίστοιχο ποσοστό είναι 89%.

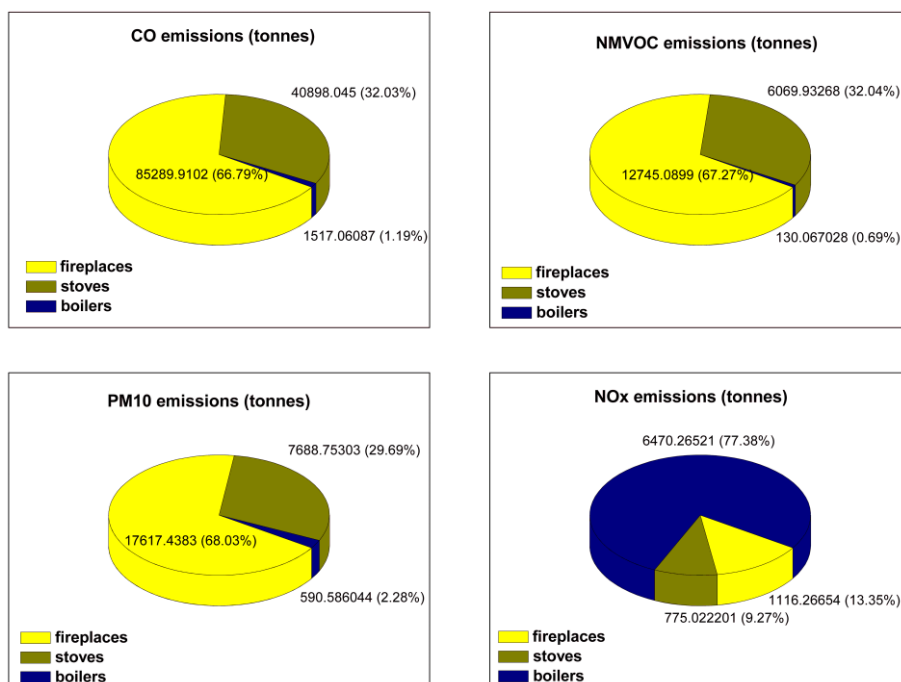


Σχήμα 3-14. Ετήσιες εκπομπές από α) τον οικιακό και β) μη-οικιακό τομέα για την Ελλάδα.

Η περαιτέρω ανάλυση των ετήσιων εκπομπών ανά κατηγορία πηγής (τζάκια, σόμπες, λέβητες) έδειξε τα τζάκια ως την κύρια πηγή για τους ρύπους CO, NMVOCs και για τα PM (Σχ. 3-15) λόγω των πολύ υψηλών τιμών των συντελεστών εκπομπής που συνδέονται με την καύση ξύλου - καύσιμο που χρησιμοποιείται κυρίως στα τζάκια και τις σόμπες - σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους καυσίμου (Πίνακας 3-8). Οι περισσότερες εκπομπές NOx προέρχονται από τους λέβητες και συνδέονται με την υψηλή κατανάλωση πετρελαίου που είναι το κύριο καύσιμο για τη συγκεκριμένη πηγή. Αξίζει να αναφερθεί ότι το 2011 δεν υπήρχαν δεδομένα κατανάλωσης πετρελαίου για την κατηγορία της γεωργίας με αποτέλεσμα οι εκπομπές NOx από τον μη οικιακό τομέα να παρουσιάζουν σημαντική μείωση (58%, Πίνακας 3-9).

Οι εκπομπές εξαρτώνται σημαντικά από το είδος καυσίμου και την τεχνολογία του καυστήρα γι' αυτό και μικρότεροι συντελεστές εκπομπής αποδίδονται στους λέβητες συγκριτικά με τις άλλες δύο πηγές (σόμπες και τζάκια) αλλά και στα ενεργειακά τζάκια και τις σόμπες σε σχέση με τα συμβατικά. Αξίζει να αναφερθεί ότι για τα στερεά καύσιμα, σε γενικές γραμμές οι εκπομπές που οφείλονται στην ατελή καύση είναι πολλές φορές μεγαλύτερες σε μικρές συσκευές από ό, τι σε μεγαλύτερες μονάδες. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για συσκευές στις οποίες η τροφοδότηση καυσίμου γίνεται χειροκίνητα (π.χ. τζάκια) ή/και για ανεπαρκώς ελεγχόμενες αυτόματες εγκαταστάσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ



Σχήμα 3-15. Ετήσιες εθνικές εκπομπές ανά πηγή (τζάκια = fireplaces, σόμπες = stoves και λέβητες = boilers) για το έτος 2010.

Σε γενικές γραμμές, οι εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν φυσικό αέριο και πετρέλαιο ως καύσιμα παράγουν το ίδιο είδος ρύπων με εκείνες που χρησιμοποιούν στερεά καύσιμα, οι ποσότητές τους όμως είναι σημαντικά χαμηλότερες. Ενδεικτικά στον Πίνακα 3-8 αναφέρονται οι συντελεστές εκπομπής που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των ετήσιων εκπομπών από διαφορετικές πηγές.

Πίνακας 3-8. Συντελεστές εκπομπής της προσέγγισης Tier 2 όπως αυτοί περιέχονται στο EMEP/EEA E.I. Guidebook 2013 για την κατηγορία SNAP 02.

Λέβητες					Τζάκια		Σόμπες			
Ρύπος	Μονάδα μέτρησης	Ξύλο	Φυσικό αέριο	Πετρέλαιο	Ξύλο		Ξύλο	Φυσικό αέριο	Υγρά καύσιμα	
					συμβατικά	ενεργειακά	συμβατικές	ενεργειακές		
		EF			EF		EF			
NOx	g/GJ	80	42	69	50	95	50	80	42	34
CO	g/GJ	4000	22	3.7	4000	2000	4000	300	22	111
NMVOC	g/GJ	350	1.8	0.17	600	250	600	10	1.8	1.2
PM10	g/GJ	480	0.2	1.5	840	95	760	29	0.2	2.2

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ

Πίνακας 3-9. Συνολικές εκπομπές (τόνοι) από την κατηγορία SNAP 02.

Συνολικές ετήσιες εκπομπές ανά έτος (τόνοι)						
Ρύπος / έτος	2006	2007	2008	2009	2010	2011
NO_x	16,376	15,356	14,759	12,696	11,533	12,208
CO	133,999	158,439	138,680	128,482	128,482	155,378
NM VOC	19,803	23,461	20,498	18,998	18,983	22,940
SO₂	10,891	9,764	9,469	7,945	7,100	7,713
NH₃	2,448	2,905	2,549	2,365	2,380	2,909
TSP	29,149	34,198	29,901	27,643	27,530	33,040
PM₁₀	27,841	32,648	28,549	26,389	26,276	31,523
PM_{2.5}	27,183	31,869	27,859	25,755	25,643	30,756
Pb	0.98652	1.13088	1.00163	0.92763	0.93909	1.15913
Cd	0.45720	0.54113	0.47375	0.44213	0.44772	0.55236
Hg	0.04364	0.04419	0.04125	0.03673	0.03514	0.04047
As	0.00920	0.01001	0.01001	0.00928	0.00929	0.01161
Cr	0.84678	0.99029	0.87133	0.80919	0.81610	1.00194
Cu	0.23994	0.27214	0.24297	0.22300	0.22363	0.27283
Ni	0.07479	0.08464	0.07545	0.06956	0.07035	0.08676
Se	0.02115	0.02684	0.03541	0.02581	0.02599	0.03286
Zn	18.11082	21.38340	18.74633	17.47665	17.69109	21.81769
PCB	0.00015	0.00012	0.00016	0.00012	0.00011	0.00014
PCDD/F	0.00003	0.00004	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003
Benzo(a)pyrene	6.59217	7.03610	6.37274	5.75974	5.58478	6.88638
Benzo(b)fluoranthene	7.95864	8.17266	7.50807	6.71399	6.38487	8.02435
Benzo(k)fluoranthene	11.08692	10.31501	9.82746	8.55189	7.78598	10.10075
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	7.52994	7.38964	6.89511	6.10172	5.74933	7.20936
HCB	0.00021	0.00024	0.00021	0.00020	0.00020	0.00024

3.4.2 Εκπομπές από οδικές μεταφορές

3.4.2.1 Μεθοδολογία

Οι εκπομπές από τον τομέα των οδικών μεταφορών υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας την προσέγγιση top-down σύμφωνα με την οποία οι εκπομπές υπολογίζονται σε συνολικό επίπεδο για την περιοχή ενδιαφέροντος (Ελλάδα και Ευρύτερη Περιοχή των Αθηνών) και στη συνέχεια καταμερίζονται χωρικά και χρονικά σε κελιά. Στην συγκεκριμένη διατριβή οι υπολογισμοί των ετήσιων εκπομπών πραγματοποιήθηκαν με το μοντέλο COPERT IV v.10 σε εθνικό επίπεδο (Ελλάδα) και σε περιοχικό επίπεδο (ΕΠΑ - Αττική) καλύπτοντας την περίοδο 2006 – 2010. Το COPERT IV είναι ένα λογισμικό φιλικό προς το χρήστη και προτείνεται επίσημα από την UNFCCC (IPCC, 2006) και τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος (EEA). Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται από το εν λόγω μοντέλο επιτρέπει την εκτίμηση των εκπομπών από πέντε κύριες κατηγορίες οχημάτων: επιβατικά αυτοκίνητα (Passenger Cars - PCs), ελαφρά φορτηγά οχήματα (Light Commercial Vehicles - LCVs), βαρέα οχήματα (Heavy Duty Vehicles – HDVs), αστικά λεωφορεία και πούλμαν (ως ενιαία κατηγορία) και δίκυκλα. Οι συγκεκριμένες εκπομπές κατανέμονται ανάλογα με τον τύπο καυσίμου (βενζίνη, πετρέλαιο, LPG, CNG), την τεχνολογία του κινητήρα με βάση τα πρότυπα της Ευρωπαϊκής Ένωσης (PRE ECE, ECE 15/00-01, EURO 1, EURO 2, κλπ.) και τον κυβισμό του κινητήρα (π.χ. <1.4lt, 2.0lt-1.4,> 2.0lt για τα επιβατικά αυτοκίνητα, < 3.5tn ή > 3.5tn για τα επαγγελματικά οχήματα).

Χαρακτηριστικά του μοντέλου

Γενικά οι συνολικές εκπομπές υπολογίζονται με τη βοήθεια της ακόλουθης εξίσωσης, για κάθε κατηγορία οχήματος (EEA, 2013b):

$$E_{total} = E_{hot} + E_{cold} \quad (3.5)$$

όπου

E_{total} είναι οι ετήσιες συνολικές εκπομπές (g) για κάθε ρύπο για την Ελλάδα ή την Αττική,

E_{hot} είναι οι θερμές εκπομπές (g) κατά τη διάρκεια λειτουργίας του οχήματος με ζεστό κινητήρα και

E_{cold} είναι οι ψυχρές εκπομπές (g) κατά τη διάρκεια κίνησης του οχήματος με κρύο κινητήρα (εκκίνηση κινητήρα).

Αφού ο τρόπος λειτουργίας του κινητήρα καθορίζει τις εκπομπές των οχημάτων αυτές διαχωρίζονται από το COPERT ανάλογα με τις συνθήκες οδήγησης σε τρεις κατηγορίες με κριτήριο τον χαρακτηρισμό του δρόμου και την εν δυνάμει ταχύτητα κίνησης κάθε οχήματος σε αυτόν και είναι οι εξής: αστικές εκπομπές (urban emissions), εκπομπές σε επαρχιακούς δρόμους (rural emissions) και εκπομπές σε αυτοκινητόδρομους (highways emissions). Σε καθεμία από αυτές τις κατηγορίες αποδίδεται ένα ποσοστό εκπομπών π.χ. για τα βενζινοκίνητα επιβατικά οχήματα το ποσοστό αυτό είναι 44 % , 42 % και 14 % για οδήγηση σε αστικούς, επαρχιακούς δρόμους και σε αυτοκινητόδρομους αντίστοιχα ενώ για τα βαρέα φορτηγά τα ποσοστά είναι 35%, 35% και 30%. Επιπλέον διαφορετικές ταχύτητες αποδίδονται σε κάθε είδος οχήματος ανάλογα με τις συνθήκες οδήγησης. Για παράδειγμα, όλα τα οχήματα εκτός των δικύκλων θεωρείται ότι κινούνται με μια μέση ταχύτητα των 16km/h, 60km/h και 90km/h σε αστικούς, επαρχιακούς δρόμους και στους αυτοκινητόδρομους αντίστοιχα ενώ για τα δίκυκλα οι αντίστοιχες τιμές είναι 20km/h για τα 2-stroke και 30km/h για τα 4-stroke, 40km/h 2-stroke και 60km/h 4-stroke και 60km/h 4-stroke αντίστοιχα. Τα παραπάνω δεδομένα συλλέχθηκαν από τους Ntziachristos et al. (2008) και παρέχονται από την Emisia SA για την Ελλάδα (www.emisia.com).

Οι θερμές εκπομπές καυσαερίων εξαρτώνται από μια ποικιλία παραγόντων, συμπεριλαμβανομένων της απόστασης που ταξιδεύει κάθε όχημα, της ταχύτητάς του (ή του τύπου του δρόμου), της ηλικίας του, του μέγεθος του κινητήρα και του βάρους του. Ως εκ τούτου, για τον υπολογισμό των θερμών εκπομπών των ρύπων χρησιμοποιείται η εξίσωση:

$$E_{hot;i,k,r} = N_k \times M_{k,r} \times e_{hot;i,k,r} \quad (3.6)$$

όπου,

$E_{hot;i,k,r}$ είναι οι ετήσιες θερμές εκπομπές του ρύπου i (σε g), που παράγονται από τα οχήματα της τεχνολογίας k και κινούνται στους δρόμους του τύπου r,

N_k είναι ο αριθμός των οχημάτων (veh) της τεχνολογίας k σε λειτουργία κατά την υπό εξέταση χρονική περίοδο,

$M_{k,r}$ είναι τα οχηματο-χιλιόμετρα ανά όχημα (km/veh) που διανύονται στους δρόμους του τύπου r από τα οχήματα της τεχνολογίας k,

$e_{hot;i,k,r}$ είναι ο συντελεστής εκπομπών (g/km) για τον ρύπο i , που αφορούν την τεχνολογία των οχημάτων k , που κινούνται στους δρόμους του τύπου r.

Οι ψυχρές εκπομπές αποδίδονται κυρίως στην οδήγηση σε αστικές περιοχές (και δευτερευόντως στην οδήγηση στην επαρχία), καθώς αναμένεται ότι ένας περιορισμένος αριθμός των ταξιδιών

ξεκινάει σε αυτοκινητόδρομους. Οι ψυχρές εκπομπές εισάγονται στον υπολογισμό των συνολικών εκπομπών ως πρόσθετες εκπομπές ανά χιλιόμετρο με τον ακόλουθο τύπο:

$$E_{cold; i, j} = \beta_{i, k} \times N_k \times M_k \times e_{hot; i, k} \times (e^{cold} / e^{hot} |_{i, k} - 1), \quad (3.7)$$

όπου,

$E_{cold; i, k}$ είναι οι ψυχρές εκπομπές του ρύπου i (για το έτος αναφοράς), που παράγονται από οχήματα τεχνολογίας k ,

$\beta_{i, k}$ είναι το κλάσμα της απόστασης που διανύεται με κρύο κινητήρα για τον ρύπο i και οχήματα τεχνολογίας k ,

N_k είναι ο αριθμός των οχημάτων (veh) τεχνολογίας k σε κυκλοφορία,

M_k είναι το σύνολο των χιλιομέτρων ανά όχημα (km/veh) τεχνολογίας k ,

$e^{cold} / e^{hot} |_{i, k}$ είναι το πηλίκιο θερμών/ψυχρών εκπομπών για τον ρύπο i και τα οχήματα τεχνολογίας k .

Η β -παράμετρος εξαρτάται από την θερμοκρασία περιβάλλοντος t_a (για πρακτικούς λόγους, χρησιμοποιείται η μέση μηνιαία θερμοκρασία) και από τη μέση τιμή του μήκους της διαδρομής (l_{trip}). Ως l_{trip} προτείνεται για την Ελλάδα η τιμή των 12.4 km.

Δεδομένα εισόδου – εξόδου

Στον Πίνακα 3-10 παρουσιάζονται τα δεδομένα εισόδου που απαιτούνται για τον υπολογισμό των ετήσιων εκπομπών με το COPERT. Λεπτομερή στοιχεία για τη σύνθεση του στόλου δόθηκαν από το Υπουργείο Μεταφορών για το έτος 2006 για την Ελλάδα. Προκειμένου να κατασκευαστεί ο ετήσιος στόλος με τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται από το COPERT για την περίοδο 2007 - 2010 για την Ελλάδα χρησιμοποιήθηκαν ταξινομήσεις καινούργιων οχημάτων από την Ευρωπαϊκή Ένωση Κατασκευαστών Αυτοκινήτων (ACEA), τον Σύνδεσμο Εισαγωγέων Αντιπροσώπων Αυτοκινήτων (ΣΕΑΑ), την Ελληνική Στατιστική Υπηρεσία και το Διεθνές Συμβούλιο για τις Καθαρές Μεταφορές (ICCT, 2011). Όσον αφορά στην ανάπτυξη του στόλου οχημάτων για την Αττική για το σύνολο της περιόδου (2006-2010) χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα στόλου για κάθε τύπο οχήματος από τη βάση δεδομένων της Eurostat (Stock of vehicles by category and NUTS 2 regions, tran_r_vehst.xls). Η σύνθεση του στόλου των οχημάτων σε εθνικό επίπεδο αναφέρεται στον Πίνακα 3-11 και για την Αττική στον Πίνακα 3-12, ενώ πιο εκτενής ανάλυση για τα επιβατικά οχήματα ανά είδος καυσίμου τόσο για την Ελλάδα όσο και για την Αττική παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-16. Η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία παρείχε τα αναγκαία μηνιαία θερμοκρασιακά προφίλ για το έτος 2006, 12 σταθμών μέτρησης διάσπαρτων στην Ελλάδα, με τη χρήση των οποίων υπολογίστηκαν οι μέσες μηνιαίες τιμές μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας (Πίνακας 3-13). Η ετήσια συνολική

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ

κατανάλωση καυσίμου για κάθε τύπο καυσίμου παρέχεται από το Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής (Σχ. 3-17). Η ετήσια χιλιομετρική απόσταση που διανύεται από κάθε τύπο οχήματος αποτελεί έναν από τους λιγότερο αξιόπιστους παράγοντες καθώς δεν υπάρχουν συγκεκριμένα δεδομένα από κάποια υπηρεσία. Προκειμένου να παραχθούν οι απαιτούμενες τιμές χρησιμοποιήθηκαν πληροφορίες από προηγούμενες μελέτες οι οποίες διορθώθηκαν κατάλληλα λαμβάνοντας υπόψη ότι τα παλαιά οχήματα διανύουν λιγότερα χιλιόμετρα (Symeonidis et al. 2003). Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν ψηφιακοί χάρτες του οδικού δικτύου, από το πρόγραμμα OpenStreetMap 2014, το οποίο είναι χαρτογραφημένο σε 7 κατηγορίες δρόμων. Προκειμένου να αποτυπωθούν οι εκπομπές οι κατηγορίες των δρόμων ενοποιήθηκαν σε 3: α) στο αστικό οδικό δίκτυο, β) στο επαρχιακό δίκτυο των κυρίων και δευτερευουσών οδών και γ) στους αυτοκινητόδρομους (Σχ. 3-18). Στις επτά κατηγορίες δρόμων περιλαμβάνονταν δύο (οι δευτερεύοντες και οι τριτεύοντες δρόμοι) των οποίων ο διαχωρισμός σε αστικούς και επαρχιακούς δρόμους έρχετο περαιτέρω ανάλυσης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν ψηφιακοί χάρτες στους οποίους οι ελληνικές περιφέρειες διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες με κριτήριο την πυκνότητα πληθυσμού και στις περιπτώσεις που ήταν αναγκαίο χρησιμοποιήθηκε δορυφορική εικόνα υψηλής ανάλυσης.

Πίνακας 3-8. Δεδομένα εισόδου που απαιτούνται από το COPERT και πηγές αυτών.

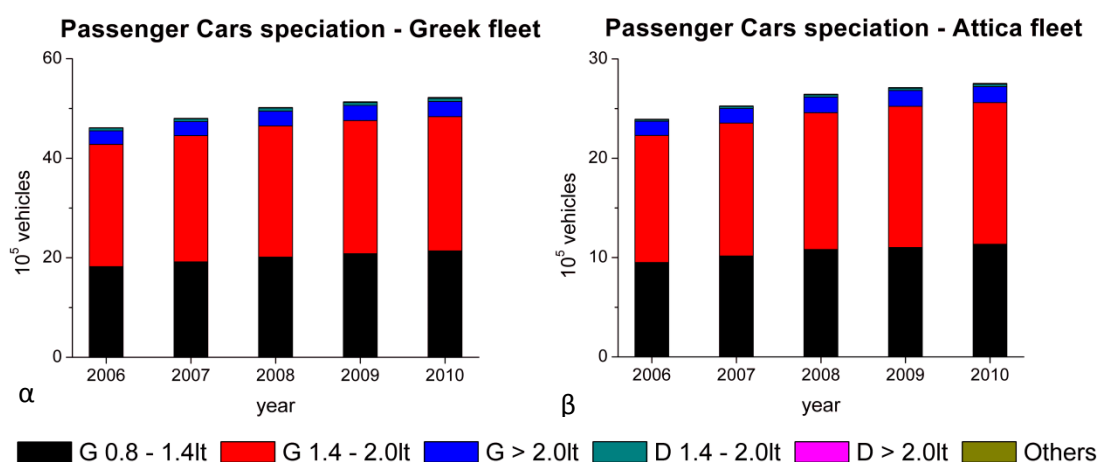
Δεδομένα εισόδου	Πηγή
Στόλος οχημάτων ανά τύπο οχήματος, κυβικά κινητήρα και είδος καυσίμου	Υπουργείο Μεταφορών για το έτος 2006
Ταξινομήσεις νέων οχημάτων	Ευρωπαϊκή Ένωση Κατασκευαστών Αυτοκινήτων (ACEA) Σύνδεσμος Εισαγωγέων Αντιπροσώπων Αυτοκινήτων (ΣΕΑΑ) Ελληνική Στατιστική Υπηρεσία Διεθνές Συμβούλιο για τις Καθαρές Μεταφορές (ICCT, 2011)
Ελάχιστες και μέγιστες μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες	Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία
Ετήσια κατανάλωση καυσίμου	Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής
Οδικό δίκτυο	OpenStreetMap contributors
Κυκλοφοριακοί φόρτοι	Ινστιτούτο Βιώσιμης Κινητικότητας και Δικτύων Μεταφορών (Ι.ΜΕΤ.) Κέντρο Διαχείρισης Κυκλοφορίας Αττικής
Απογραφή πληθυσμού	Eurostat (GEOSTAT population grid)

Πίνακας 3-9. Σύνθεση στόλου οχημάτων για την Ελλάδα για την περίοδο 2006-2010 (αριθμός οχημάτων).

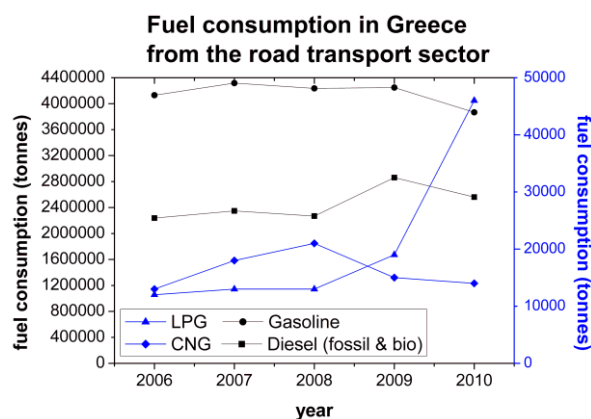
Κατηγορία οχημάτων	2006	2007	2008	2009	2010	2010 %συνεισφορά
Επιβατικά	4,613,207	4,801,453	5,019,133	5,134,955	5,221,868	64.74
Ελαφρά φορτηγά	991,234	1,016,906	1,040,892	1,046,397	1,056,963	13.10
Βαρέα φορτηγά	228,555	238,939	248,466	255,866	261,170	3.24
Λεωφορεία	26,938	27,102	27,186	27,324	27,311	0.34
Δίκυκλα	1,179,719	1,295,217	1,388,607	1,448,851	1,499,133	18.58
Σύνολο	7,039,653	7,379,617	7,724,284	7,913,393	8,066,445	100.00

Πίνακας 3-10. Σύνθεση στόλου οχημάτων για την Αττική για την περίοδο 2006-2010 (αριθμός οχημάτων).

Κατηγορία οχημάτων	2006	2007	2008	2009	2010	2010 %συνεισφορά
Επιβατικά	2,393,379	2,526,432	2,643,889	2,712,217	2,753,705	74.09
Ελαφρά φορτηγά	212,581	218,087	221,501	225,301	224,886	6.05
Βαρέα φορτηγά	49,016	51,243	52,872	55,093	55,565	1.49
Λεωφορεία	12,970	12,584	13,088	12,688	12,681	0.34
Δίκυκλα	593,354	586,287	621,822	647,933	670,060	18.03
Σύνολο	3,261,300	3,394,633	3,553,172	3,653,232	3,716,897	100.00



Σχήμα 3-16. Διάκριση επιβατικών αυτοκινήτων ανάλογα με τη χρήση καυσίμων α) στην Ελλάδα και β) στην Αττική. G = Gasoline, D = Diesel



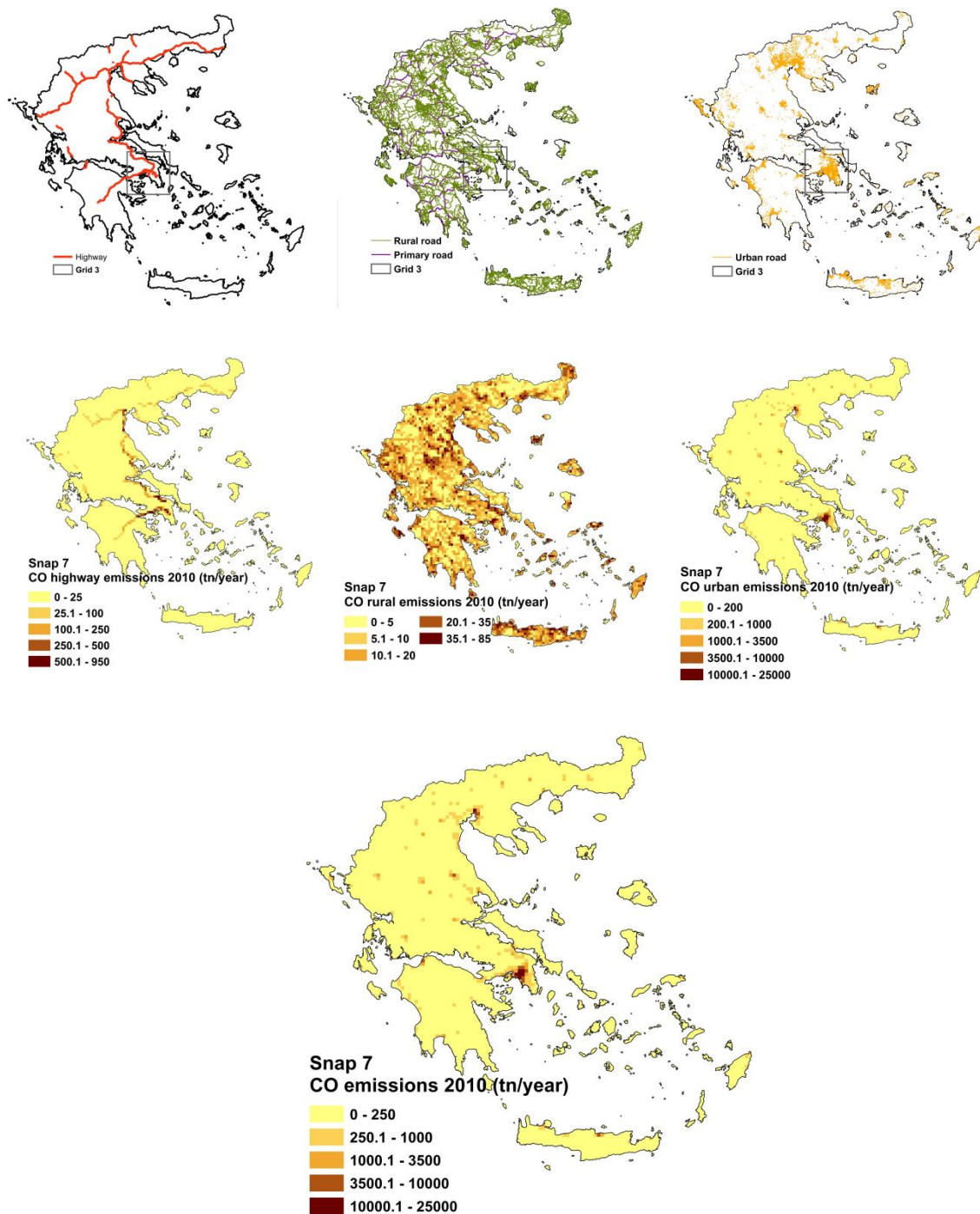
Σχήμα 3-17. Ετήσια κατανάλωση καυσίμου από τον τομέα των οδικών μεταφορών για την Ελλάδα (πηγή: Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής). LPG = *Liquid Petroleum Gas*, CNG = *Compressed Natural Gas*

Πίνακας 3-11. Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες έτους 2006 για την Ελλάδα (Πηγή: Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία).

Μήνας	Μέση ελάχιστη μηνιαία θερμοκρασία (°C)	Μέση μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία (°C)
Ιανουάριος	3.89	9.81
Φεβρουάριος	5.68	12.54
Μάρτιος	7.79	15.39
Απρίλιος	11.21	19.47
Μάιος	14.10	24.65
Ιούνιος	18.52	28.37
Ιούλιος	20.79	29.17
Αύγουστος	21.89	32.28
Σεπτέμβριος	17.92	26.47
Οκτώβριος	14.84	21.45
Νοέμβριος	8.51	16.31
Δεκέμβριος	6.55	13.13

Η μεθοδολογία υπολογισμού των εκπομπών καλύπτει τους ρύπους CO, NO_x, NMVOC, NH₃, SO_x, PM καυσαερίων, τα αέρια CH₄, CO₂, N₂O, PAHs και POPs, τις διοξίνες, τα φουράνια και τα βαρέα μέταλλα που περιέχονται στο καύσιμο (μόλυβδος, αρσενικό, κάδμιο, χαλκός, χρώμιο, υδράργυρος, νικέλιο, σελήνιο και ψευδάργυρος). Οι εκπομπές NO_x διαχωρίζονται περαιτέρω σε NO και NO₂. Τα PM επίσης χωρίζονται σε στοιχειακό και οργανικό άνθρακα ως συνάρτηση της τεχνολογίας των οχημάτων. Το COPERT παρέχει επιπλέον λεπτομερή ανάλυση των κλασμάτων των NMVOCs, η οποία καλύπτει τις ομόλογες σειρές των αλκανίων, αλκενίων, αλκινίων, αλδεΐδων, κετόνων και αρωματικών ενώσεων.

3.4.2.2 Χωρική και χρονική αποτύπωση των εκπομπών



Σχήμα 3-18. Μεθοδολογία χωρικής αποτύπωσης εκπομπών από τις οδικές μεταφορές.

Οι ετήσιες εκπομπές που προέκυψαν από το COPERT IV για τις 3 συνθήκες οδήγησης (αστικές, επαρχιακές και εκπομπές στους αυτοκινητόδρομους) κατανεμήθηκαν χωρικά στο πλέγμα των 6km που καλύπτει την Ελλάδα (Πλέγμα 1) και στο αντίστοιχο των 2km που καλύπτει την Αττική (Πλέγμα

2) με τη βοήθεια του Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών (GIS) ArcView v10 (Σχ. 3-18). Οι αστικές εκπομπές διανεμήθηκαν σε αστικές περιοχές βάσει ψηφιακών χαρτών πυκνότητας πληθυσμού (Eurostat , 2012), σύμφωνα με την εξίσωση

$$E_{i,x} = E_i \frac{pop_{i,x}}{pop_{tot}} \quad (3.8)$$

όπου,

$E_{i,x}$ είναι η εκπομπή ρύπων i στο κελί x

E_i είναι η ετήσια συνολική εκπομπών του ρύπου i

$pop_{i,x}$ είναι ο πληθυσμός στο κελί x

pop_{tot} είναι ο συνολικός πληθυσμός του πλέγματος (Ελλάδα ή Αττική).

Όσον αφορά τις επαρχιακές εκπομπές αυτές κατανεμήθηκαν σε όλο το δίκτυο των κύριων και δευτερευόντων δρόμων ανάλογα με το συνολικό μήκος του οδικού δικτύου ανά κελί. Η κατανομή των εκπομπών στους αυτοκινητόδρομους βασίστηκε σε δεδομένα μέσω ημερήσιων κυκλοφοριακών φόρτων για όλες τις εθνικές οδούς τους οποίους παρέχει το Ελληνικό Ινστιτούτο Μεταφορών (Ι.ΜΕΤ.). Ο χρονικός καταμερισμός των πλεγματικών εκπομπών σε μηνιαία, εβδομαδιαία και ημερήσια κλίμακα επιτεύχθηκε με βάση την εξίσωση:

$$E_{h,i,x} = E_{i,x} \times M_i \times D_i \times H_i \quad (3.9)$$

όπου

$E_{h,i,x}$ είναι οι ωριαίες εκπομπές του ρύπου i στο κελί x ,

$E_{i,x}$ είναι οι ετήσιες εκπομπές του ρύπου i στο κελί x και

M , D και H είναι οι μηνιαίοι, ημερήσιοι και ωριαίοι συντελεστές καταμερισμού, αντίστοιχα.

Για το Πλέγμα 1 (Ελλάδα) χρησιμοποιήθηκαν τα χρονικά προφίλ που προτείνονται από το ΤΝΟ ενώ για το Πλέγμα 2 κατασκευάστηκαν περιοχικά χρονικά προφίλ για την Αττική. Για τη δημιουργία αυτών επιλέχθηκαν ωριαία δεδομένα κυκλοφοριακών φόρτων από διάσπαρτα στους κεντρικούς οδικούς άξονες, σημεία καταγραφής του Κέντρου Διαχείρισης Κυκλοφορίας (ΚΔΚ) της Αττικής για την περίοδο 2006 – 2010 ώστε να καλύπτονται οι κυριότεροι οδικοί άξονες του λεκανοπεδίου, συμπεριλαμβανομένης και της Αττικής Οδού, και ως προς τις δύο κατευθύνσεις κίνησης των οχημάτων. Τα συγκεκριμένα δεδομένα δίνουν τη δυνατότητα δημιουργίας πολλαπλών εξειδικευμένων χρονικών συντελεστών ανά έτος, ημέρα και ώρα όπως αυτοί παρουσιάζονται στους πίνακες 3-14 – 3-17 αναδεικνύοντας τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κίνησης των οχημάτων εντός του λεκανοπεδίου.

Πίνακας 3-12. Μηνιαίοι χρονικοί συντελεστές για το έτος 2010.

Έτος\Μήνας	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2006	0.076754	0.082484	0.080203	0.08256	0.088636	0.089057	0.087234	0.071278	0.087947	0.085749	0.084806	0.083292
2007	0.084134	0.083472	0.085898	0.082952	0.085493	0.087654	0.085677	0.068913	0.08775	0.084622	0.083611	0.079825
2008	0.083312	0.079958	0.083469	0.081179	0.085644	0.08904	0.087509	0.068648	0.086488	0.08573	0.085872	0.083151
2009	0.081469	0.083713	0.082406	0.079972	0.088837	0.089862	0.087585	0.069934	0.086981	0.084917	0.083461	0.080863
2010	0.083305	0.083928	0.083845	0.082865	0.088883	0.089645	0.085298	0.069467	0.0863	0.083411	0.082391	0.080661

Πίνακας 3-13. Ημερήσιοι χρονικοί συντελεστές για τον Φεβρουάριο του έτους 2010.

Ημέρα	Δευτέρα	Τρίτη	Τετάρτη	Πέμπτη	Παρασκευή	Σάββατο	Κυριακή
Συντελεστής	0.138458	0.14741	0.150088	0.150973	0.155675	0.134033	0.123364

Πίνακας 3-14. Ημερήσιοι χρονικοί συντελεστές για τον Ιούνιο του έτους 2010.

Ημέρα	Δευτέρα	Τρίτη	Τετάρτη	Πέμπτη	Παρασκευή	Σάββατο	Κυριακή
Συντελεστής	0.148051	0.146876	0.14915	0.153781	0.153332	0.128939	0.11987

Πίνακας 3-15. Ωριαίοι χρονικοί συντελεστές για την Αττική, Ιούνιος 2010 (UTC).

Ημέρα\Ωρα	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Παρασκευή	0.008331	0.009205	0.017048	0.039355	0.056263	0.056336	0.053624	0.052071	0.051414	0.052462	0.052652	0.054922
Κυριακή	0.026251	0.021153	0.020881	0.022353	0.020909	0.02661	0.035062	0.044105	0.05022	0.051445	0.051796	0.048342
Ημέρα\ώρα	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ

Παρασκευή	0.055477	0.054806	0.056239	0.054761	0.0518	0.049441	0.049439	0.037967	0.031678	0.024928	0.01824	0.011543
Κυριακή	0.044919	0.046423	0.051574	0.054943	0.058518	0.057299	0.056102	0.048485	0.044249	0.044108	0.040602	0.033653

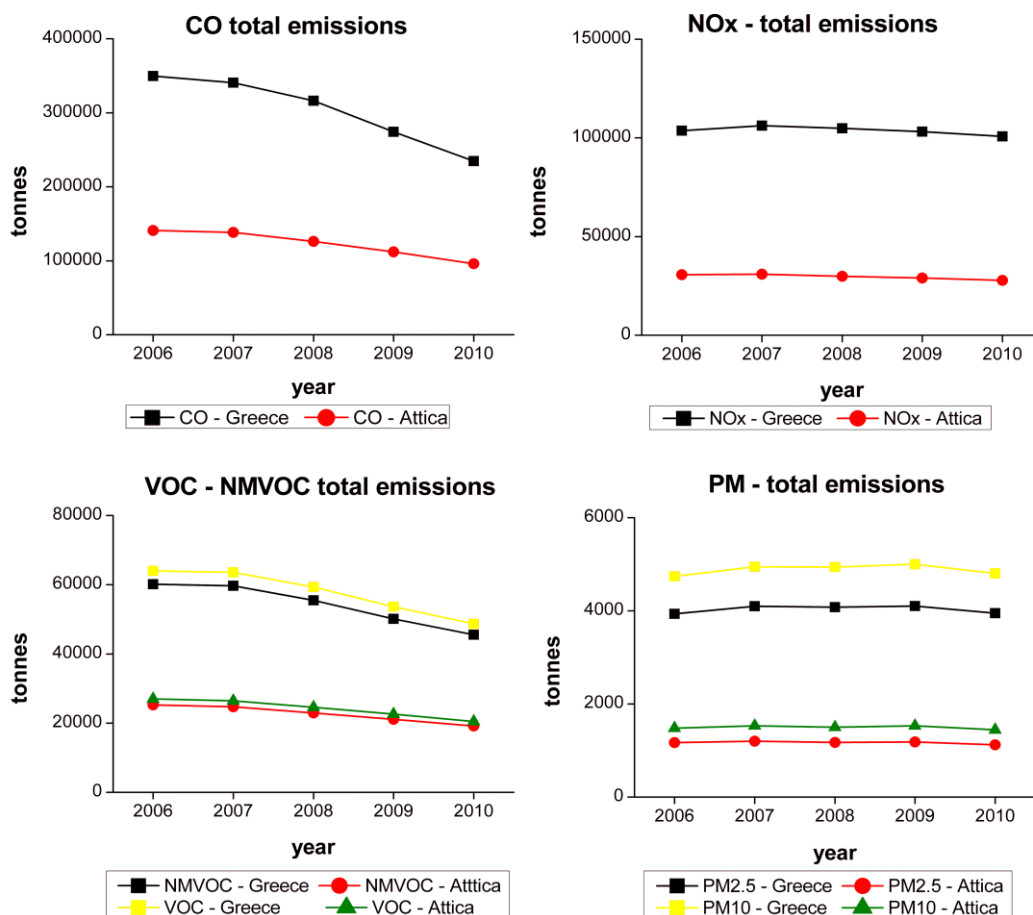
3.4.2.3 Αποτελέσματα

Ετήσιες συνολικές εκπομπές για την Ελλάδα και την Αττική

Η ετήσια διακύμανση των συνολικών εκπομπών για την περίοδο 2006 - 2010 παρουσιάζεται στο σχήμα 3-19 για την Ελλάδα και την Αττική. Η μείωση στην κατανάλωση βενζίνης το 2008 και το 2010 και η επακόλουθη μείωση των ετήσιων οχηματοχιλιομέτρων που διανύονται επηρέασαν τις εκπομπές CO, VOCs και NMVOCs. Το ποσοστό μείωσης για την Ελλάδα κατά την περίοδο 2006 - 2008 ήταν 9.5% για το CO, 7.3% για τα VOCs και 7.7% για τα NMVOCs, ενώ για την περίοδο 2006 - 2010 η μείωση ήταν 32.8%, 24.0% και 24.3%, αντίστοιχα. Επιπλέον, η εισαγωγή των νέων κινητήρων αντιρρυπαντικής τεχνολογίας (τα Euro 4 επιβατικά οχήματα τέθηκαν σε ισχύ το 2005 ενώ τα Euro 5 το 2009) επηρέασε τις εκπομπές CO, VOCs και NMVOCs καθώς το μέρος των οχημάτων με κινητήρες τελευταίας τεχνολογίας συνεχώς αυξάνεται επί του συνολικού στόλου. Οι εκπομπές CO₂ που σχετίζονται με την ετήσια κατανάλωση καυσίμου (Σχήμα 3-17), παρουσιάζοντας αύξηση τα πρώτα 2 έτη (2006-2007), ενώ μείωση της τάξης του 6.5% παρατηρήθηκε για την Ελλάδα από το 2009 στο 2010 σε συνδυασμό με μια μείωση κατά 8.9% στην κατανάλωση βενζίνης και 10.5% στην κατανάλωση πετρελαίου ντίζελ. Αντίθετα, οι τιμές NO_x και PM παρέμειναν σχεδόν σταθερές παρουσιάζοντας μικρή μόνο μείωση κατά την περίοδο 2008-2010 στην Ελλάδα και στην Αττική, 4% και 7% για τα NO_x, 3% και 4% για τα PM, αντίστοιχα, λόγω της αύξησης των πετρελαιοκίνητων επιβατικών οχημάτων (Fameli and Assimakopoulos, 2013a, 2015).

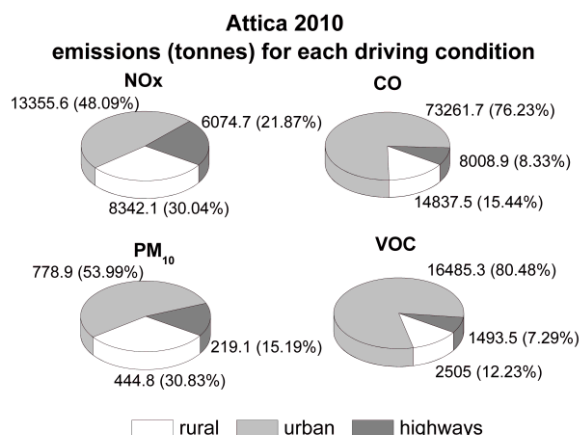
Συγκρίνοντας τις ετήσιες εκπομπές της Ελλάδας με αυτές της Αττικής παρατηρείται ότι περίπου το 40% των εθνικών εκπομπών CO₂, CO, VOC και NMVOC και το 30% των NO_x και των σωματιδίων εκπέμπονται στην Αττική. Η διαφορά αυτή στα ποσοστά οφείλεται στο γεγονός ότι το ήμισυ του εθνικού στόλου των Ι.Χ. οχημάτων (52.8% για το 2010, πηγή: Eurostat), βρίσκεται στην Αττική και αντιστοιχεί στο 74.09% του τοπικού στόλου (Πίνακες 3-11 και 3-12). Ο τύπος καυσίμου που χρησιμοποιείται από τα Ι.Χ. οχήματα είναι κυρίως βενζίνη, η οποία συνδέεται με τις CO, VOC και NMVOC εκπομπές (Ban-Weiss et al., 2008), ενώ τα πετρελαιοκίνητα οχήματα συνεισφέρουν κυρίως στις NO_x και PM εκπομπές. Στην Ελλάδα τα περισσότερα επιβατικά οχήματα, τα δίκυκλα, καθώς και μέρος των ελαφρών επαγγελματικών οχημάτων χρησιμοποιούν βενζίνη, ενώ τα φορτηγά και τα λεωφορεία που ταξιδεύουν σε όλη την Ελλάδα στις εθνικές οδούς, καθώς και το υπόλοιπο των ελαφρών επαγγελματικών οχημάτων και ταξί χρησιμοποιούν ως καύσιμο το πετρέλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ



Σχήμα 3-19. Ετήσιες εκπομπές (τόνοι) για την Ελλάδα και την Αττική για τη χρονική περίοδο 2006 – 2010.

Όσον αφορά στην κατανομή των εκπομπών σύμφωνα με τις συνθήκες οδήγησης στην Αττική, οι αστικές εκπομπές επικρατούν μεταξύ των επαρχιακών και αυτών στους αυτοκινητόδρομους για όλους τους ρύπους ενώ τα PM_{10} και NOx παρουσιάζουν αυξημένα ποσοστά στις δύο τελευταίες κατηγορίες (Σχ.3-20). Οι αστικές εκπομπές αντιστοιχούν σε συνθήκες οδήγησης με χαμηλή ταχύτητα (19km/h) στις οποίες οι μηχανές καταναλώνουν περισσότερα καύσιμα. Ο διπλασιασμός του ποσοστού των σωματιδίων και των NOx στους επαρχιακούς δρόμους και τους αυτοκινητόδρομους οφείλεται στην κίνηση των βαρέων φορτηγών και μέρους των ελαφρών επαγγελματικών οχημάτων.



Σχήμα 3-20. Εκπομπές (τόνοι) στην Αττική (2010) για κάθε συνθήκη οδήγησης.

Πίνακας 3-16. Εκπομπές (τόνοι) ανά τύπο οχήματος για την Αττική για το έτος 2010 και τα ποσοστά συνεισφοράς κάθε τύπου οχήματος στις συνολικές εκπομπές για κάθε ρύπο και το CO₂.

2010	Επιβατικά	Ελαφρά φορτηγά	Βαρέα φορτηγά	Λεωφορεία	Δίκυκλα	Σύνολο
CO	54,332.16	12,866.77	3,633.86	953.25	24,322.06	96,108.09
	56.53%	13.39%	3.78%	0.99%	25.31%	100%
NO_x	5,915.48	2,574.51	14,240.23	4,257.08	785.15	27,772.46
	21.30%	9.27%	51.27%	15.33%	2.83%	100%
VOC	11,909.47	1,841.21	1,147.85	245.97	5,339.27	20,483.77
	58.14%	8.99%	5.60%	1.20%	26.07%	100%
NM_{VOC}	11,253.54	1,785.78	1,045.91	179.30	4,887.01	19,151.54
	58.76%	9.32%	5.46%	0.94%	25.52%	100%
PM_{2.5}	306.36	140.89	493.25	92.97	88.38	1,121.86
	27.31%	12.56%	43.97%	8.29%	7.88%	100%
PM₁₀	512.15	168.60	550.11	106.59	105.41	1,442.86
	35.50%	11.69%	38.13%	7.39%	7.31%	100%
CO₂	5,616,634.00	687,888.80	1,401,237.00	455,946.40	329,631.56	8,491,338.00
	66.15%	8.10%	16.50%	5.37%	3.88%	100%

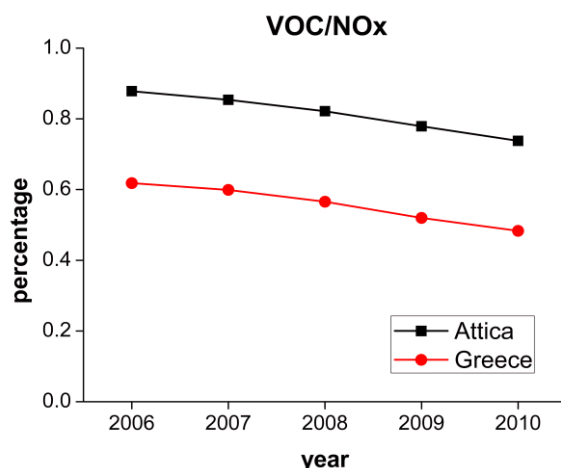
Ο Πίνακας 3-18 δείχνει τις εκπομπές ανά τύπο οχήματος για το έτος 2010 για την Αττική. Είναι προφανές ότι τα επιβατικά οχήματα έχουν τη μεγαλύτερη συμβολή στις οδικές εκπομπές των CO, VOC, NMVOC και CO₂. Περίπου το 25% των εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα προέρχονται από βενζινοκίνητα επιβατικά οχήματα με κυβισμό 1.4-2.0lt αφού αυτή η ομάδα είναι η πιο πολυπληθής μεταξύ των επιβατικών οχημάτων (Σχ. 3-16β). Όσον αφορά την τεχνολογία των κινητήρων, τα Euro 3 βενζινοκίνητα επιβατικά οχήματα θεωρούνται οι μεγαλύτεροι ρυπαντές με συνεισφορά στις εκπομπές CO 11.6% για κυβισμό 0.8 - 1.4lt και 13% για κυβισμό 1.4-2.0lt. Τα πετρελαιοκίνητα επιβατικά οχήματα είναι υπεύθυνα μόνο για το 0.1% των συνολικών εκπομπών CO. Ο ρόλος των δικύκλων είναι επίσης σημαντικός στις CO, VOC και NMVOC εκπομπές (25%, 26.07% και 25.52% αντίστοιχα), δεδομένου ότι είναι πιο οικονομικά και αποδοτικά και, κατά συνέπεια, είναι πολύ

δημοφιλή προς χρήση στις κυκλοφοριακές συνθήκες της Αθήνας. Η κατηγορία των οχημάτων που κυριαρχεί στις εκπομπές NO_x, PM_{2.5} και PM₁₀ είναι τα βαρέα φορτηγά με ποσοστό 51.27%, 43.97% και 38.13% αντίστοιχα για το 2010 (Πίνακας 3-18), το οποίο αποδίδεται στους κινητήρες ντίζελ. Η δεύτερη μεγαλύτερη συνεισφορά σε αυτή την ομάδα των ρύπων προέρχεται από τα επιβατικά οχήματα με ποσοστό 21.3% στα NO_x, 27.31% στα PM_{2.5} και 35.5% στα PM₁₀. Η συμμετοχή των δικύκλων στις εκπομπές NO_x (2.83%), PM_{2.5} (7.88%) και PM₁₀ (7.31%) είναι μικρή. Τα ελαφρά επαγγελματικά οχήματα καταναλώνουν βενζίνη και πετρέλαιο οπότε το ποσοστό των εκπομπών τους δεν έχει ιδιαίτερη διαφοροποίηση μεταξύ των ρύπων, με αυτό των CO₂ και CO να είναι το υψηλότερο (8.10% και 13.39% αντίστοιχα). Τα λεωφορεία συμβάλλουν στα NO_x κατά 15.33% και στα PM κατά 8.29% (PM_{2.5}) και 7.39% (PM₁₀).

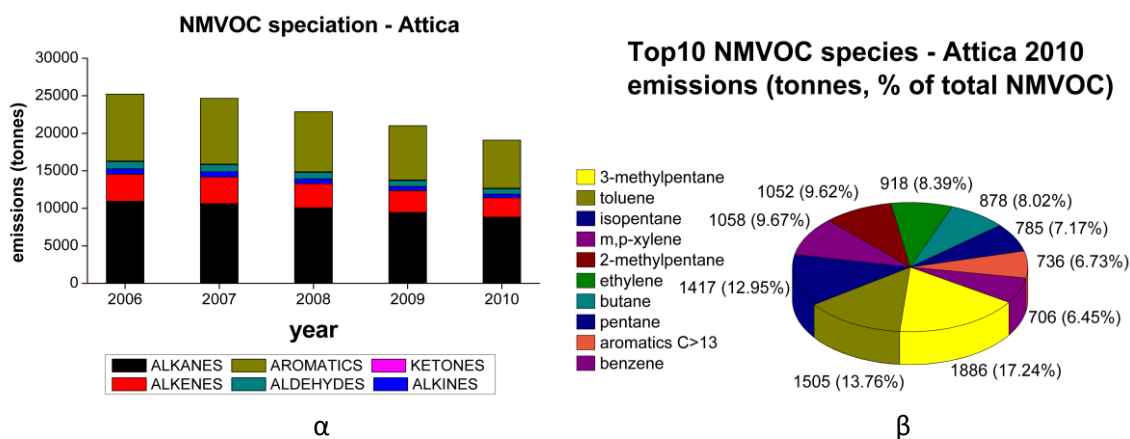
Πρόδρομες ουσίες του όζοντος στην Αττική

Η Αττική είναι η πιο πυκνοκατοικημένη περιοχή της Ελλάδας με αποτέλεσμα να αντιμετωπίζει συχνά επεισόδια ατμοσφαιρικής ρύπανσης, ως συνέπεια της συγκέντρωσης ανθρωπογενών δραστηριοτήτων (κυκλοφορία, οικιακή θέρμανση όπως φάνηκε και παραπάνω), της τοπογραφίας και των μετεωρολογικών συνθηκών. Υψηλές συγκεντρώσεις όζοντος έχουν καταγραφεί από ερευνητικές εργασίες καθώς και από το Εθνικό Δίκτυο για την Παρακολούθηση της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ) του ΥΠΕΚΑ. Επομένως, η μελέτη των προδρόμων ενώσεων του όζοντος, VOC και NO_x, είναι πολύ σημαντική προκειμένου να εξεταστούν τα αίτια εμφάνισης επεισοδίων ρύπανσης (Ziomas et al., 1998b). Όπως φαίνεται στο σχήμα 3-21 οι εκπομπές των NO_x υπερτερούν αυτές των VOC για την Ελλάδα και την Αττική. Ο λόγος VOC/NO_x είναι υψηλότερος για την Αττική δεδομένου ότι το ποσοστό των πετρελαιοκίνητων οχημάτων του τοπικού στόλου είναι χαμηλότερο για την περιοχή αυτή (Πίνακες 3-11 και 3-12).

Σε γενικές γραμμές, η μείωση του λόγου VOC / NO_x που παρατηρείται το χρονικό διάστημα 2006 - 2010 οφείλεται στη μείωση των VOC εκπομπών λόγω των κινητήρων νέας τεχνολογίας και την είσοδο των πετρελαιοκίνητων οχημάτων, (Σχ.3-19γ). Σύμφωνα με τους Kioutsioukis et al. (2005) η αστική περιοχή των Αθηνών χαρακτηρίζεται ως VOC-sensitive. Επομένως η μείωση των VOC έχει μεγαλύτερη επίδραση στο σχηματισμό του όζοντος εντός της Ε.Π.Α. οπότε ότι η μείωση του δείκτη VOC/NO_x θα οδηγήσει σε χαμηλότερες τιμές O₃ (Ziomas et al., 1998b).



Σχήμα 3-21. Λόγος VOC/NOx για την Ελλάδα και την Αττική.



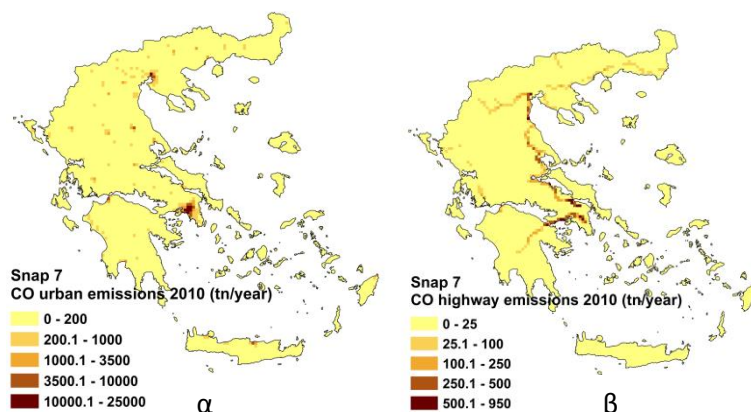
Σχήμα 3-22. Α) Επιμερισμός των NMVOCs για την Αττική και β) παρουσίαση των 10 ενώσεων με τις υψηλότερες εκπομπές.

Η μελέτη των ενώσεων που συνιστούν τα NMVOCs για την Αττική και η δραστηριότητα αυτών είναι πολύ σημαντική. Με τη βοήθεια του σχήματος 3-22 προκύπτει ότι τα αλκάνια επικρατούν των άλλων ομόλογων σειρών (8.834 tn για το 2010) με τους αρωματικούς HC (6.415 tn για το 2010) και τα αλκένια να ακολουθούν (2568 tn για το 2010) (Σχ.3-22α). Σύμφωνα με τον Atkinson (2000) τα αλκάνια ούτε φωτολύνουν ούτε αντιδρούν με το O_3 . Η αντίδρασή τους όμως με τη ρίζα OH είναι σημαντική γιατί οδηγεί στην παραγωγή NO_2 και άρα σε εναλλακτικό τρόπο δημιουργίας O_3 . Μόνο η ομάδα των κυκλοαλκανίων μπορεί να οδηγήσει σε σχηματισμό PM που όμως εμφανίζει χαμηλό ποσοστό (0.63% επί του συνόλου των NMVOC). Οι ενώσεις 3-μεθυλοπεντάνιο, ισοπεντάνιο, 2-μεθυλοπεντάνιο, το βουτάνιο και πεντάνιο είναι οι επικρατούσες μεταξύ των αλκανίων (Σχ.3-22β).

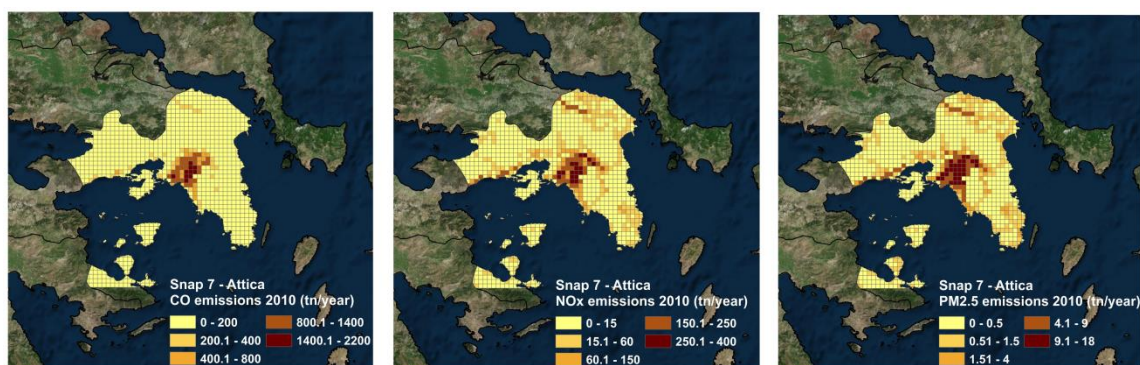
Οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες διαδραματίζουν κυρίαρχο ρόλο στο σχηματισμό των σωματιδίων σε αστικές περιοχές (Atkinson, 2000, Odum et al., 1997). Πιο συγκεκριμένα, οι ενώσεις τολουόλιο, m-ξυλόλιο και βενζόλιο βρίσκονται μεταξύ των κορυφαίων 10 ειδών (Σχ.3-22β). Η επίδρασή τους στην παραγωγή O_3 είναι επίσης πολύ σημαντική ιδιαίτερα στην Αθήνα όπου συμβάλλουν στην αύξηση των συγκεντρώσεων O_3 (Bossioli et al., 2002). Τα αλκένια και οι αλδεΐδες παρά τη μικρότερη συνεισφορά στις συνολικές εκπομπές NMVOC (2568 tn - 732 tn αντίστοιχα) είναι πολύ δραστικές ενώσεις και βοηθούν στη μετατροπή του NO προς NO_2 και κατά συνέπεια στο σχηματισμό O_3 (Pusede et al., 2012). Ειδικά η παρουσία του αιθυλενίου και της φορμαλδεΐδης είναι πολύ σημαντική σε αστικές περιοχές (Jenkin and Clemitshaw, 2000). Το ποσοστό τους στις συνολικές εκπομπές NMVOC είναι 8% (Σχ.3-22β) και 1.63% αντίστοιχα.

Χωρική και χρονική κατανομή

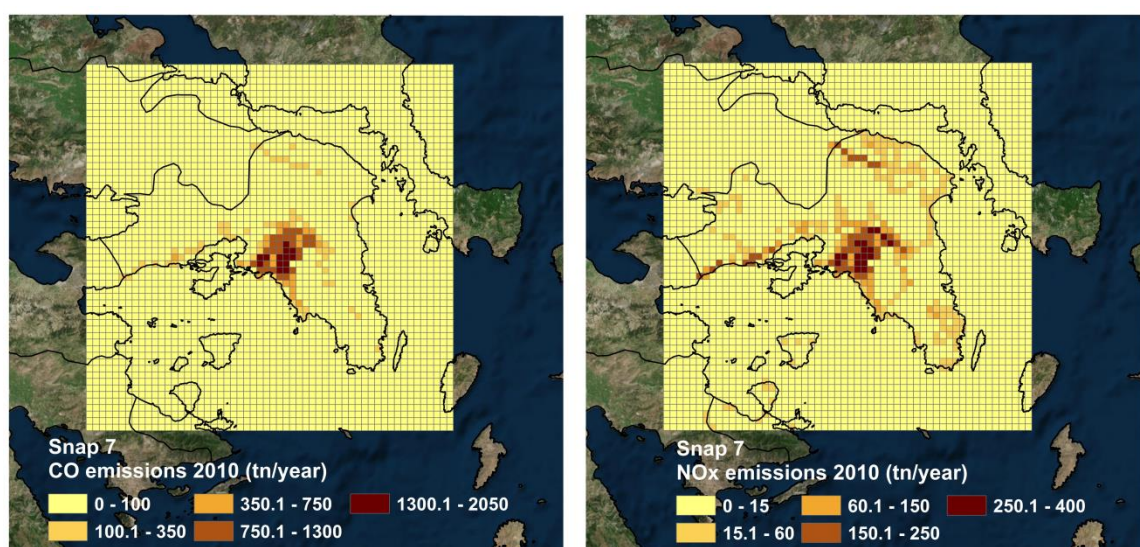
Η χωρική κατανομή των εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα στις εθνικές οδούς για το 2010 (Σχ. 3-23α) αποκάλυψε ότι οι υψηλότερες τιμές βρίσκονται κοντά στο λεκανοπέδιο Αθηνών και στους αυτοκινητόδρομους που συνδέουν τις τρεις μεγαλύτερες πόλεις (Αθήνα, Θεσσαλονίκη και Πάτρα). Στην περίπτωση των αστικών εκπομπών, τα κελιά που αντιπροσωπεύουν υψηλές πυκνότητες πληθυσμού (μεγάλες πόλεις) σχετίζονται με υψηλότερες τιμές (Σχ. 3-23β). Η χωρική κατανομή των συνολικών εκπομπών CO, NO_x , $PM_{2.5}$ και VOC για την Αττική (Σχ. 3-24) έδειξε ότι οι υψηλές τιμές συγκεντρώνονται πάνω από την αστική περιοχή της Αθήνας ενώ υψηλά επίπεδα εκπομπών NO_x και $PM_{2.5}$ έχουν και τα κελιά που βρίσκονται στις τοπικές εθνικές οδούς.



Σχήμα 3-23. Χωρικά κατανεμημένες CO εκπομπές για την Ελλάδα για το έτος 2010- α)αστικές εκπομπές και β) εκπομπές στους αυτοκινητόδρομους.



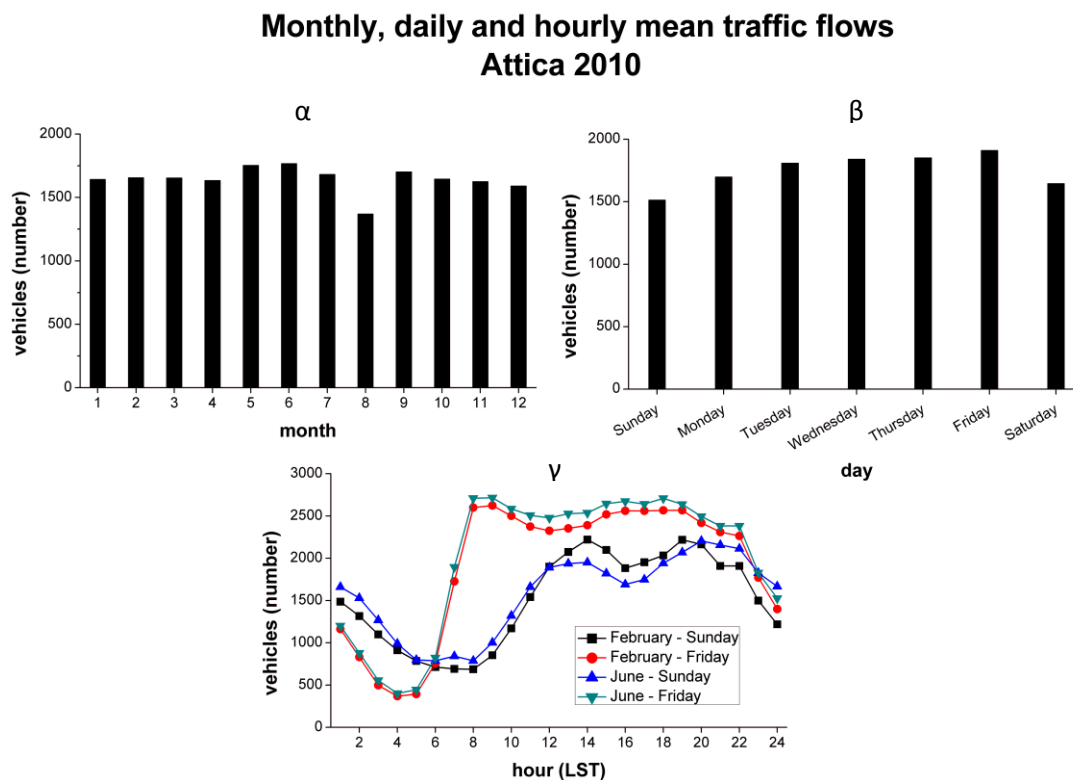
Σχήμα 3-24. Χωρικά κατανεμημένες CO, NO_x και PM_{2.5} εκπομπές για την Αττική για το έτος 2010.



Σχήμα 3-25. Χωρικά κατανεμημένες CO και NO_x εκπομπές για την Αττική για το έτος 2010.

Τα μηνιαία, εβδομαδιαία και ωριαία προφίλ της ροής της κυκλοφορίας φαίνονται στο σχήμα 3-26 για την Αττική για το έτος 2010. Η κυκλοφορία εμφανίζεται πιο πυκνή τους μήνες Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο και Σεπτέμβριο, ενώ τον Αύγουστο έχουμε μείωση αυτής λόγω των καλοκαιρινών διακοπών (Σχ.3-26α). Όσον αφορά στα εβδομαδιαία προφίλ (Σχ.3-26β) υπάρχει μια εμφανής διαφορά μεταξύ των καθημερινών και του Σαββατοκύριακου. Οι υψηλότερες τιμές παρατηρούνται την Παρασκευή σε σύγκριση με τις άλλες καθημερινές. Στο Σχήμα 3-26γ παρουσιάζονται τα ωριαία προφίλ κυκλοφορίας για την Κυριακή και την Παρασκευή, καθώς αυτές αποτελούν τις ημέρες με την λιγότερη και περισσότερη κυκλοφορία, για τους χειμωνιάτικους και καλοκαιρινούς μήνες. Το προφίλ της Παρασκευής και για τους δύο μήνες συσχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με το ωράριο εργασίας παρουσιάζοντας το πρωτεύον μέγιστο το πρωί στις 8.00LST και το δευτερεύον το απόγευμα από τις 16.00LST έως τις 19.00LST δεδομένου ότι η λήξη της βάρδιας διαφέρει ανάλογα

με το είδος της εργασίας. Η χρονική κατανομή των δεδομένων κίνησης είναι αρκετά διαφορετική την Κυριακή, οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται στις 14.00 LST καθώς και το απόγευμα.

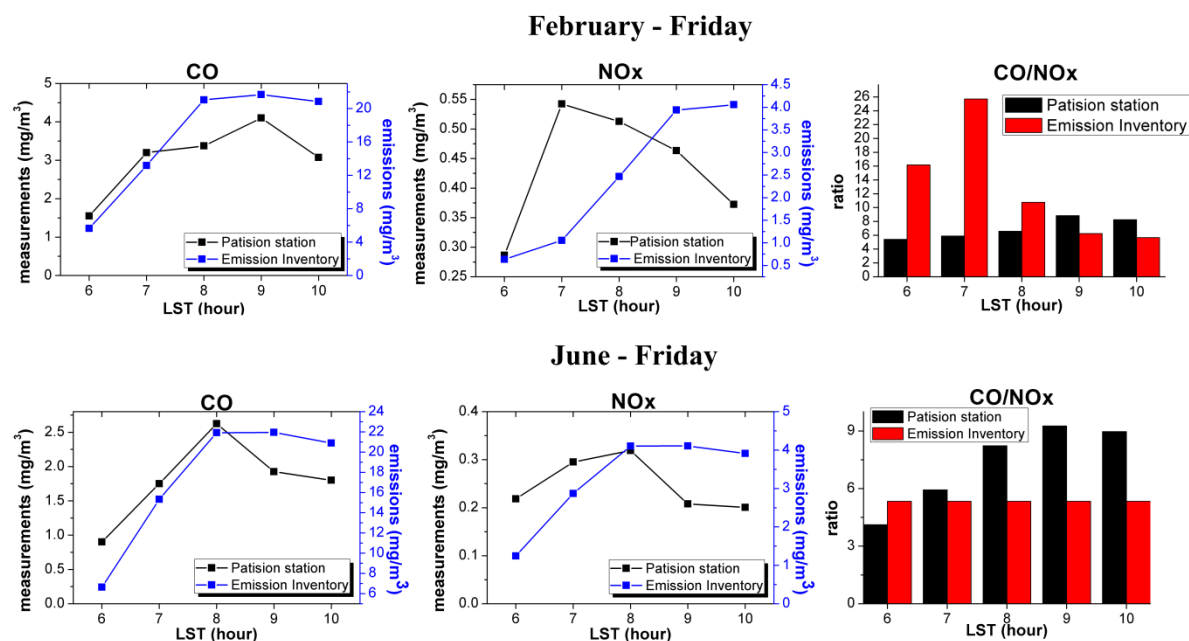


Σχήμα 3-26. Κυκλοφοριακός φόρτος στην Αττική – μέσες μηνιαίες, ημερήσιες και ωριαίες τιμές για το έτος 2010.

Σύμφωνα με τους Funk et al. (2001) και Mellios et al. (2006), μια μέθοδος για τον έλεγχο της απογραφής των εκπομπών από την κίνηση των οχημάτων σε αστικό περιβάλλον είναι η σύγκριση μεταξύ των εκτιμήσεων των εκπομπών με μετρούμενες τιμές συγκεντρώσεων αέριων ρύπων, χρησιμοποιώντας το λόγο CO/NO_x. Αυτή η μέθοδος ελέγχου της απογραφής εκπομπών βασίζεται στην παραδοχή ότι στις αστικές περιοχές, οι συγκεντρώσεις των πρωτογενών ρύπων επηρεάζονται από φρέσκες εκπομπές στην περιοχή που γίνεται η καταγραφή. Ωστόσο, η μεταφορά πρόδρομων ενώσεων, δευτερογενών ρύπων καθώς και η πραγματοποίηση χημικών αντιδράσεων μπορούν επίσης να επηρεάσουν τις συγκεντρώσεις των ρύπων. Η επίδραση αυτών των παραγόντων στη σύγκριση ελαχιστοποιείται, αλλά δεν εξαλείφεται, με την επιλογή σταθμών καταγραφής που βρίσκονται σε περιοχές με υψηλά ποσοστά εκπομπών και με την επιλογή δεδομένων που συλλέγονται όταν οι ταχύτητες του ανέμου είναι χαμηλές και η φωτοχημεία δεν έχει αρχίσει να επιδρά δηλαδή τις πρώτες πρωινές ώρες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, κατά τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο, οι εκπομπές είναι υψηλές ενώ η ταχύτητα του ανέμου, το ύψος ατμοσφαιρικής

ανάμιξης, η θερμοκρασία και χημική δραστηριότητα είναι σε χαμηλά επίπεδα (Funk et al., 2001). Επιπλέον, οι Parrish et al. (2002) έδειξαν ότι οι μετρήσεις των συγκεντρώσεων αέριων ρύπων σε προσεκτικά επιλεγμένες αστικές περιοχές αντικατοπτρίζουν με ακρίβεια τις απόλυτες τιμές και χρονικές τάσεις των λόγων CO/NO_x των εκπομπών από τις οδικές μεταφορές.

Σε συμφωνία με τα παραπάνω, οι ωριαίες εκπομπές CO και NO_x συγκρίθηκαν με ωριαίες μετρήσεις από τον σταθμό της Πατησίων (αστικός κυκλοφορίας), του Δικτύου Παρακολούθησης της Ποιότητας του Αέρα του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής. Η επιλογή του συγκεκριμένου σταθμού βασίστηκε στο γεγονός ότι βρίσκεται στην πολυσύχναστη οδό Πατησίων με αποτέλεσμα να έχει υψηλό βαθμό συσχέτισης με τις εκπομπές από τις οδικές μεταφορές (Kourtidis et al., 1999). Η ημερήσια συσχέτιση μεταξύ των εκπομπών CO και NO_x και των συγκεντρώσεων που μετρήθηκαν υπολογίστηκε για το έτος 2010 και την πρωινή περίοδο 6.00 – 10.00LST για το χειμώνα (Φεβρουάριος) και το καλοκαίρι (Ιούνιος), (Σχήμα 3-27). Χρησιμοποιήθηκαν μέσες ωριαίες τιμές για την Παρασκευή για καθέναν από τους παραπάνω μήνες καθώς κατά τη διάρκεια αυτής της ημέρας παρατηρήθηκαν οι υψηλότερες τιμές κυκλοφοριακού φόρτου. Οι στατιστικές παράμετροι (MB, correlation coefficient and Root Mean Square Error) που υπολογίστηκαν για τις μηνιαίες και ωριαίες τιμές εκπομπών και συγκεντρώσεων (Πίνακας 3-19) αποκάλυψαν μια ικανοποιητική συσχέτιση για το CO. Οι εκπομπές και οι συγκεντρώσεις εμφάνισαν πρωινό μέγιστο στις 9.00LST το Φεβρουάριο και στις 8.00LST τον Ιούνιο. Διαφορές στις τιμές εμφανίστηκαν για τα NO_x, τον Φεβρουάριο, καθώς οι συγκεντρώσεις παρουσίασαν την υψηλότερη τιμή στις 7.00LST η οποία στη συνέχεια μειώθηκε σε αντίθεση με τις εκπομπές που παρουσίασαν την υψηλότερη τιμή στις 9.00LST. Η συσχέτιση μεταξύ εκπομπών και μετρήσεων για τα NO_x τόσο τον Φεβρουάριο όσο και τον Ιούνιο δεν ήταν πολύ καλή. Οι λόγοι CO/NO_x για κάθε μήνα παρουσιάζονται επίσης στο Σχήμα 3-27. Τον Φεβρουάριο ο λόγος των εκπομπών εμφανίστηκε μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο λόγο των μετρήσεων για την περίοδο από 6.00 – 8.00LST (πέντε φορές μεγαλύτερος στις 7.00LST), λόγω των υψηλών εκπομπών CO που αποδόθηκαν το πρωί ενώ αργότερα παρουσίασαν καλύτερη συμφωνία (8.00 - 10.00LST). Ωστόσο, τον Ιούνιο, παρόλο που οι τιμές των λόγων βρίσκονταν πολύ κοντά νωρίς το πρωί μετά από 9.00LST ο λόγος των εκπομπών έγινε σχεδόν ο μισός του αντίστοιχου των μετρήσεων. Σύμφωνα με Funk et al. (2001), αποδεκτό ποσοστό συμφωνίας μεταξύ των τιμών των δύο λόγων θεωρείται το 25%.



Σχήμα 3-27. Ωριαίες μέσες τιμές CO από την απογραφή εκπομπών και τις μετρήσεις (Σταθμός Πατησίων) για τους μήνες Φεβρουάριο και Ιούνιο (τιμές μόνο για την Παρασκευή).

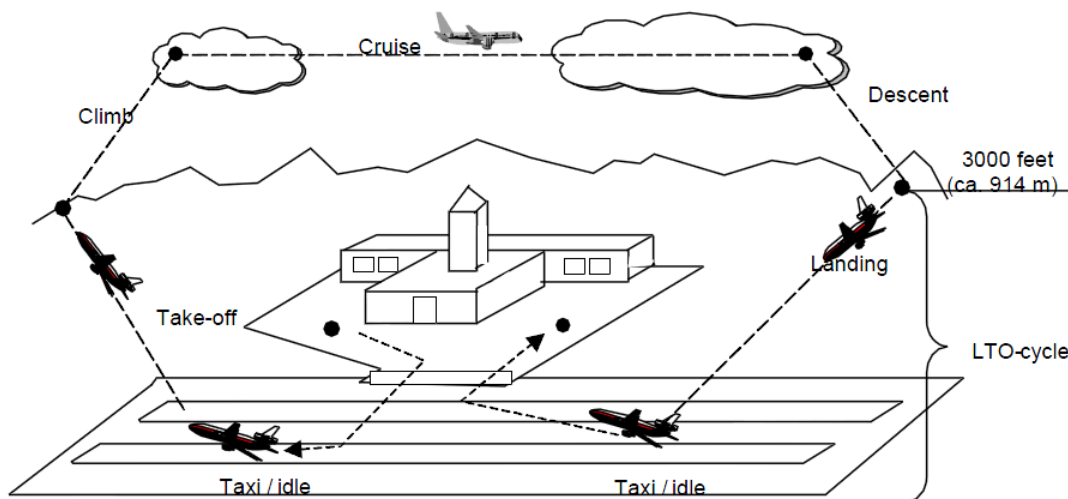
Πίνακας 3-17. Στατιστικές παράμετροι από τη σύγκριση των εκπομπών με μετρήσεις στην Αττική για μια τυπική ημέρα της εβδομάδας (Παρασκευή).

	CO		NO _x	
	Φεβρουάριος	Ιούνιος	Φεβρουάριος	Ιούνιος
R ²	0.765	0.758	0.009	0.018
r	0.875	0.871	0.095	0.134
MB	13.409	15.543	1.995	2.999

3.4.3 Εκπομπές από τις αεροπορικές μεταφορές

Στην συγκεκριμένη κατηγορία περιλαμβάνονται οι εκπομπές που προέρχονται από τη διαδικασία της καύσης στις μηχανές των αεροσκαφών κατά τη διάρκεια του κύκλου προσγείωσης – απογείωσης (LTO cycle) αυτών για τη μεταφορά επιβατών και εμπορευμάτων όπως αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα 3-28. Ως κύκλος προσγείωσης - απογείωσης καθορίζεται από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Πολιτικής Αεροπορίας (International Civil Aviation Organization - ICAO) η πορεία του αεροσκάφους μέχρι τα 3000 ft (914 m).

Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται από τα αεροσκάφη και καθορίζουν επομένως το είδος των εκπομπών είναι τα καύσιμα αεροσκαφών (jet fuels) στα οποία συμπεριλαμβάνονται η κηροζίνη (jet kerosene) και η βενζίνη (jet gasoline). Οι αντίστοιχοι ρύποι που παράγονται είναι οι εξής: CO₂, CO, HC, NO_x και SO₂, η ποσότητα των οποίων εξαρτάται από την περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο.



Σχήμα 3-28. Πορεία πτήσης αεροσκάφους (απογείωση-προσγείωση).

Εντός αεροδρομίου ρύποι εκπέμπονται και από άλλες δραστηριότητες όπως είναι η εξυπηρέτηση των αεροσκαφών (εξοπλισμός υποστήριξης εδάφους απαραίτητος για το χειρισμό του αεροσκάφους κατά τη διάρκεια που είναι ακινητοποιημένο, η κυκλοφορία εντός του ελεγχόμενου χώρου του αερολιμένα, ο ανεφοδιασμός των αεροσκαφών με καύσιμα), αυτές που σχετίζονται με στατικές υποδομές (εγκαταστάσεις που παράγουν ενέργεια για την υποδομή του αεροδρομίου, γεννήτριες έκτακτης ανάγκης, τη συντήρηση αεροσκαφών) οι οποίες όμως θα συμπεριληφθούν σε επόμενες κατηγορίες πηγών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ

Ο υπολογισμός των εκπομπών αφορά στα 39 αεροδρόμια που βρίσκονται στην ελληνική επικράτεια και εξυπηρετούν πτήσεις εσωτερικού ή/και εξωτερικού, τα κυριότερα χαρακτηριστικά των οποίων βρίσκονται στον Πίνακα 3-20. Οι κρατικοί αερολιμένες διακρίνονται με βάση την Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας σε αερολιμένες διεθνών συγκοινωνιών, εσωτερικών συγκοινωνιών και δημοτικούς αερολιμένες (Σχ.3-30).

Πίνακας 3-18. Ελληνικοί αερολιμένες.

	IATA ⁴	ICAO ⁵	Αεροδρόμιο	Περιοχή
1	AGQ	LGAG	Πολιτικό αεροδρόμιο Αγρινίου	Αγρίνιο
2	AOK	LGKP	Κρατικός Αερολιμένας Καρπάθου	Κάρπαθος
3	ATH	LGAV	Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών «Ελευθέριος Βενιζέλος»	Αθήνα
4	AXD	LGAL	Διεθνές Αεροδρόμιο Αλεξανδρούπολης «Δημόκριτος»	Αλεξανδρούπολη
5	CFU	LGKR	Κρατικός Αερολιμένας Κέρκυρας «Ιωάννης Καποδίστριας»	Κέρκυρα
6	CHQ	LGSA	Κρατικός Αερολιμένας Χανίων «Ιωάννης Δασκαλογιάννης»	Χανιά
7	EFL	LGKF	Κρατικός Αερολιμένας Κεφαλονιάς	Κεφαλονιά
8	GPA	LGRX	Αεροδρόμιο Αράξου	Άραξος Αχαΐας
9	HER	LGIR	Κρατικός Αερολιμένας Ηρακλείου «Νίκος Καζαντζάκης»	Ηράκλειο
10	JIK	LGIK	Αεροδρόμιο Ικαρίας	Ικαρία
11	IOA	LGIO	Κρατικός Αερολιμένας Ιωαννίνων "Βασιλεύς Πύρρος"	Ιωάννινα
12	JXH	LGHI	Κρατικός Αερολιμένας Χίου «Όμηρος»	Χίος
13	JMK	LGMK	Κρατικός Αερολιμένας Μυκόνου	Μύκονος
14	JNX	LGNX	Κρατικός Αερολιμένας Νάξου "Απόλλων"	Νάξος
15	JSH	LGST	Δημοτικός Αερολιμένας Σητείας	Σητεία
16	JSI	LGSK	Κρατικός Αερολιμένας Σκιάθου «Αλέξανδρος Παπαδιαμάντης»	Σκιάθος
17	JSY	LGSO	Κρατικός Αερολιμένας Σύρου "Δημήτριος Βικέλας"	Σύρος
18	JTR	LGSR	Κρατικός Αερολιμένας Σαντορίνης	Σαντορίνη
19	JTY	LGPL	Κρατικός Αερολιμένας Αστυπάλαιας	Αστυπάλαια
20	KGS	LGKO	Κρατικός Αερολιμένας Κω "Ιπποκράτης"	Κως
21	KIT	LGKC	Κρατικός Αερολιμένας Κυθήρων	Κύθηρα
22	KLX	LGKL	Αεροδρόμιο Καλαμάτας	Καλαμάτα
23	KSJ	LGKS	Δημοτικός Αερολιμένας Κάσου	Κάσος
24	KSO	LGKA	Κρατικός Αερολιμένας Καστοριάς "Αριστοτέλης"	Καστοριά
25	KVA	LGKV	Αερολιμένας Καβάλας "Μέγας Αλέξανδρος"	Καβάλα
26	KZI	LGKZ	Κρατικός Αερολιμένας Κοζάνης "Φίλιππος"	Κοζάνη
27	KZS	LGKJ	Δημοτικός Αερολιμένας Καστελλόριζου	Καστελλόριζο

⁴ IATA = International Air Transport Association, είναι η Διεθνής Ένωση Αερομεταφορών, ένας διεθνής μη κερδοσκοπικός οργανισμός. Αποτελείται από 240 αεροπορικές εταιρείες-μέλη οι οποίες αντιστοιχούν στο 84% της συνολικής εναέριας κυκλοφορίας. Η IATA παρέχει 3-γράμματος κωδικούς αεροδρομίων (Πηγή: <http://www.iata.org>).

⁵ Ο ICAO παρέχει 4-γράμματος κωδικούς αεροδρομίων

28	LRS	LGLE	Δημοτικός Αερολιμένας Λέρου	Λέρος
29	LXS	LGLM	Κρατικός Αερολιμένας Λήμνου «Ήφαιστος»	Λήμνος
30	MJT	LGMT	Κρατικός Αερολιμένας Μυτιλήνης "Οδυσσέας Ελύτης"	Μυτιλήνη
31	MLO	LGML	Κρατικός Αερολιμένας Μήλου	Μήλος
32	PAS	LGPA	Κρατικός Αερολιμένας Πάρου	Πάρος
33	PVK	LGPZ	Αεροδρόμιο Ακτίου	Άκτιο/Πρέβεζα
34	RHO	LGRP	Κρατικός Αερολιμένας Ρόδου «Διαγόρας»	Ρόδος
35	SKG	LGTS	Αερολιμένας Θεσσαλονίκης "Μακεδονία"	Θεσσαλονίκη
36	SKU	LGTS	Κρατικός Αερολιμένας Σκύρου	Σκύρος
37	SMI	LGSM	Κρατικός Αερολιμένας Σάμου «Αρίσταρχος ο Σάμιος»	Σάμος
38	VOL	LGBL	Κρατικός Αερολιμένας Νέας Αγχιάλου	Νέα Αγχιάλος Μαγνησίας
39	ZTH	LGZA	Κρατικός Αερολιμένας Ζακύνθου "Διονύσιος Σολωμός"	Ζάκυνθος

3.4.3.1 Μεθοδολογία

Για τον υπολογισμό των ετήσιων εκπομπών από την LTO κίνηση των αεροσκαφών χρησιμοποιήθηκε η σχέση:

$$E_{i,total} = \sum EF_{i,j} \times \text{number of flights}_{j,k}$$

Όπου,

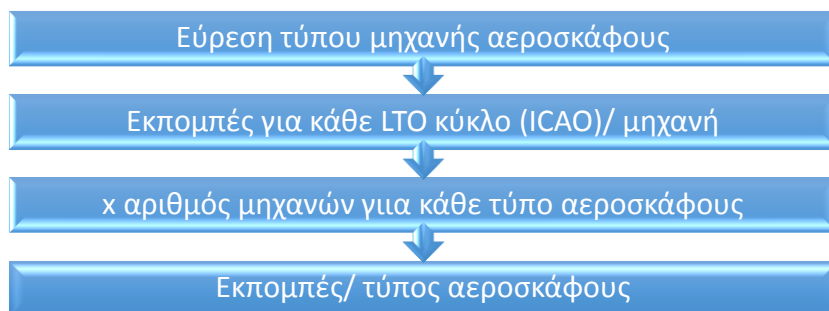
$E_{i,total}$ είναι η ετήσια εκπομπή του ρύπου i από το αεροδρόμιο k και για τον τύπο αεροσκάφους j ,

$EF_{i,j}$ είναι ο συντελεστής εκπομπής για τον ρύπο i και τον τύπο αεροσκάφους j και

$\text{number of flights}_{j,k}$ είναι ο αριθμός των πτήσεων του αεροσκάφους j στο αεροδρόμιο k .

Ο αριθμός των συνολικών εμπορικών πτήσεων (επιβατικές πτήσεις, πτήσεις εμπορευμάτων και ταχυδρομείου) ανά αεροδρόμιο και τύπο αεροσκάφους σε ετήσια κλίμακα προήλθε από την Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας και τη βάση δεδομένων της Eurostat (avia_tf_aca, Eurostat, 2013). Τα δεδομένα περιλαμβάνουν τις πτήσεις εσωτερικού και εξωτερικού ξεχωριστά για τη χρονική περίοδο 2006 - 2012. Οι συντελεστές εκπομπής δίνονται ανά τύπο αεροσκάφους από το EMEP/EEA Guidebook 2013 και αντιστοιχούν στις εκπομπές κατά τον LTO κύκλο. Για τους τύπους αεροσκαφών που δεν υπήρχε ο σχετικός συντελεστής οι εκπομπές ανά κύκλο LTO υπολογίστηκαν με βάση των

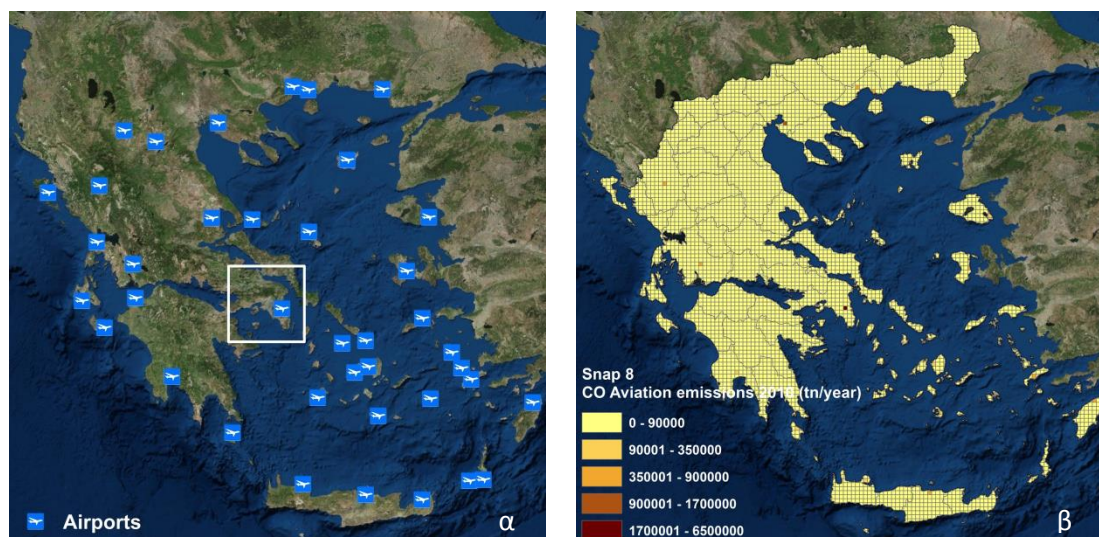
τύπο της μηχανής που έχει ο εκάστοτε τύπος αεροσκάφους, πληροφορία που παρέιχε ο Παγκόσμιος Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας σύμφωνα με το διάγραμμα του σχήματος 3-29.



Σχήμα 3-29. Μεθοδολογία υπολογισμού εκπομπών για κάθε τύπο αεροσκάφους κατά τη διάρκεια του κύκλου LTO.

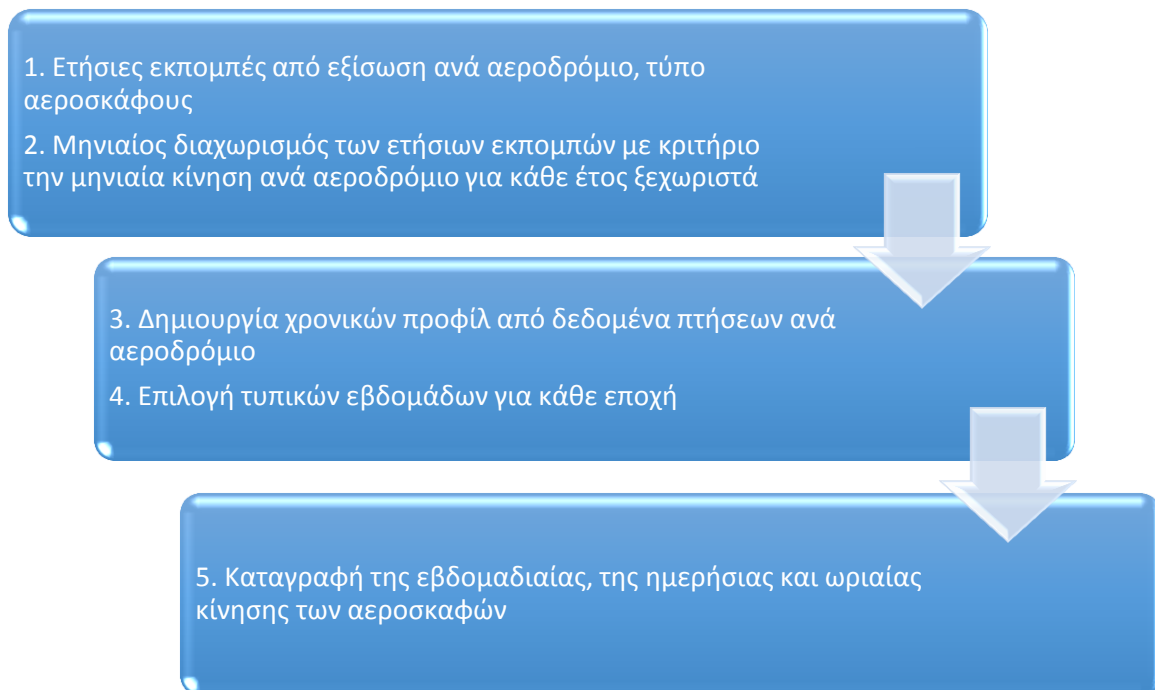
3.4.3.2 Χωρική και χρονική αποτύπωση των εκπομπών

Οι εκπομπές που προέκυψαν με την παραπάνω διαδικασία κατανεμήθηκαν στα κελιά που βρίσκονται τα αντίστοιχα αεροδρόμια. Στην περίπτωση που κάποιο αεροδρόμιο καταλαμβάνει περισσότερα του ενός κελιά η κατανομή των εκπομπών πραγματοποιήθηκε με κριτήριο το εμβαδόν του αεροδρομίου ανά κελί.



Σχήμα 3-30. Α) Σύνολο ελληνικών αεροδρομίων και β) χωρική κατανομή των εκπομπών CO από την αεροπορία για το έτος 2010.

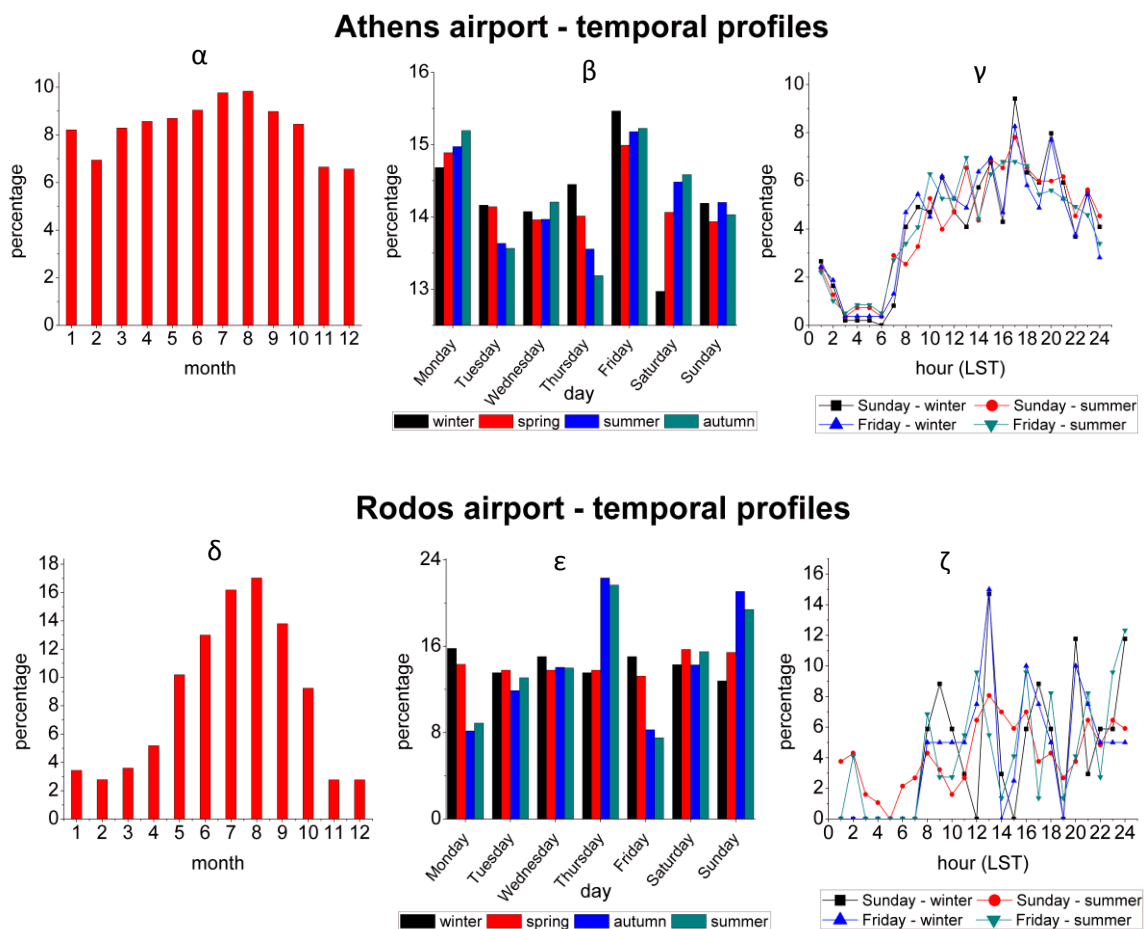
Για τον καταμερισμό των ετήσιων εκπομπών σε ωριαία κλίμακα χρησιμοποιήθηκαν αρχικά τα μηνιαία προφίλ εκπομπών με βάση τον αριθμό των πτήσεων ανά αεροδρόμιο όπως αυτός προέκυψε από τη βάση δεδομένων της Eurostat. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν εβδομαδιαία και ωριαία χρονικά προφίλ για κάθε αεροδρόμιο, έτος και εποχή ξεχωριστά με βάση τον αριθμό των πτήσεων, πληροφορία που προήλθε από ιστορικά δεδομένα καταγραφής πτήσεων (www.flightstats.com). Η μεθοδολογία παρουσιάζεται στο διάγραμμα του σχήματος 3-31. Διαπιστώθηκε ότι η μεταβλητότητα του αριθμού των πτήσεων είναι κυρίως εποχική οπότε για τους μήνες που ανήκουν στην ίδια εποχή χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιοι εβδομαδιαίοι και ωριαίοι συντελεστές. Τα χρονικά προφίλ δύο ενδεικτικών αεροδρομίων - της Αθήνας που είναι το μεγαλύτερο αεροδρόμιο της χώρας και της Ρόδου που αντιπροσωπεύει τις τουριστικές νησιωτικές περιοχές - για το έτος 2010 παρουσιάζονται στο σχήμα 3-32.



Σχήμα 3-31. Μεθοδολογία χρονικού καταμερισμού των εκπομπών από την αεροπορία.

Τα μηνιαία προφίλ φανερώνουν την εποχική μεταβλητότητα των πτήσεων η οποία είναι ιδιαίτερα έντονη στο αεροδρόμιο της Ρόδου, στο οποίο η σταδιακή αύξηση των πτήσεων από την άνοιξη και η κορύφωσή τους τους θερινούς μήνες ακολουθεί την τουριστική κίνηση των νησιωτικών περιοχών. Η κατανομή των πτήσεων είναι πιο ομαλή για το αεροδρόμιο Αθηνών καθόλη τη διάρκεια του έτους με ελάχιστο τους μήνες Φεβρουάριο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο και μέγιστο τους θερινούς μήνες Ιούλιο και Αύγουστο. Οι ημέρες με τη μεγαλύτερη κίνηση στο αεροδρόμιο Αθηνών

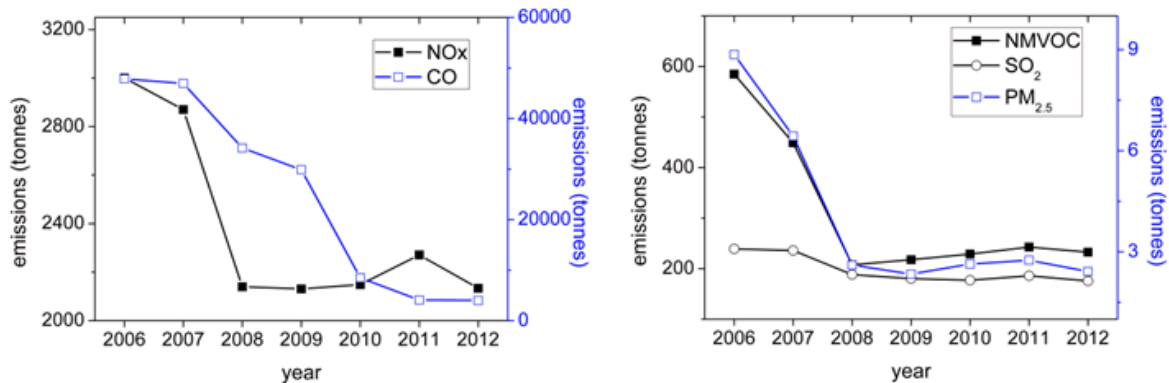
είναι η Δευτέρα και η Παρασκευή ενώ στο αεροδρόμιο της Ρόδου ξεχωρίζουν η Πέμπτη και η Κυριακή των καλοκαιρινών και φθινοπωρινών μηνών. Στο σχήμα 3-32γ παρουσιάζονται τα ημερήσια ωριαία προφίλ για δύο τυπικές ημέρες (Παρασκευή και Κυριακή) τον χειμώνα και το καλοκαίρι όπου και παρατηρείται ομοιομορφία στην κίνηση του αεροδρομίου Αθηνών με αύξηση αυτής τις πρωινές ώρες και σταθεροποίηση μέχρι αργά το βράδυ. Στην ημερήσια κατανομή του αεροδρομίου της Ρόδου (3-32ζ) έχουμε ομοιομορφία στις χειμερινές πτήσεις ανεξαρτήτως ημέρας λόγω της σταθεροποίησης των δρομολογίων τη συγκεκριμένη εποχή (πτήσεις εσωτερικού).



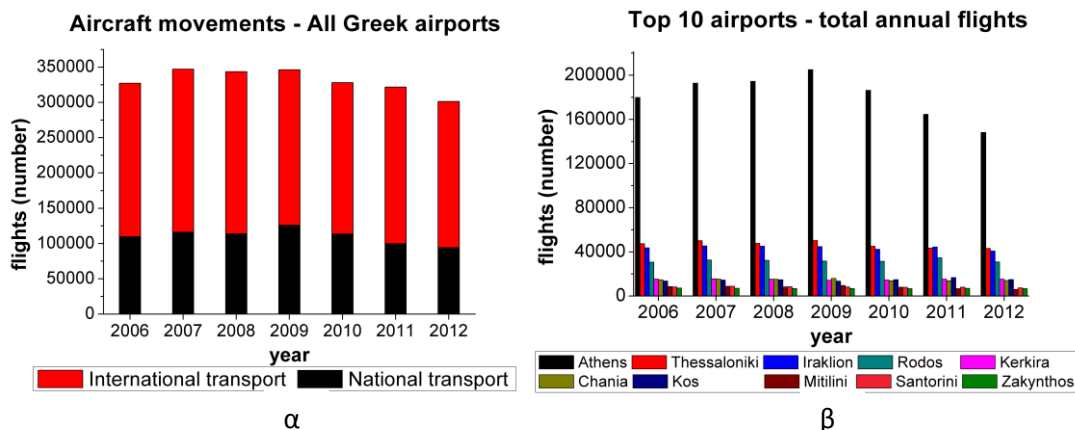
Σχήμα 3-32. Χρονικά προφίλ (μηνιαία, εβδομαδιαία και ωριαία) κίνησης αεροσκαφών στα αεροδρόμια των Αθηνών και της Ρόδου.

3.4.3.3 Αποτελέσματα

Η σύγκριση των ετήσιων τιμών των ρύπων CO, NO_x, NMVOC, SO₂ και PM_{2.5} αναδεικνύει την επικράτηση του CO έναντι των υπολοίπων αλλά και τη μείωση των ετήσιων εκπομπών από το 2007 και μετά (Σχ. 3-33). Η ποσοστιαία διαφορά από το 2006 ως το 2012 ήταν 90% για το CO, 23% για τα NO_x, 47% για τα NMVOCs, 26% για το SO₂ και 65% για τα PM_{2.5}. Οι ρύποι με κριτήριο την ετήσια διακύμανσή τους διακρίνονται σε δύο ομάδες. Η πρώτη περιλαμβάνει το CO και το SO₂, οι εκπομπές των οποίων ακολουθούν μια σταδιακή πτώση από το 2007 και μετά ενώ στη δεύτερη ομάδα των NO_x, NMVOC και PM_{2.5} η μείωση των εκπομπών είναι πολύ πιο απότομη το 2008 και ακολουθεί μια σχετική σταθεροποίηση. Γενικά το 2008 παρατηρήθηκε μείωση του αριθμού των πτήσεων η οποία εντάθηκε μετά το 2009 λόγω συγχωνεύσεων των ελληνικών αεροπορικών εταιριών με συνέπεια την κατάργηση ή συγχώνευση πολλών δρομολογίων (25% μείωση στις εθνικές πτήσεις από το 2009 μέχρι το 2012, σχήμα 3-34). Στον Πίνακα 3-21 παρουσιάζεται η κατανομή των ετήσιων πτήσεων στα 10 μεγαλύτερα ελληνικά αεροδρόμια. Το αεροδρόμιο Αθηνών υπερέρχει σημαντικά των υπολοίπων και καθορίζει το προφίλ του συνολικού αριθμού των πτήσεων.



Σχήμα 3-33. Χρονική διακύμανση των ετήσιων εκπομπών από την αεροπορία.

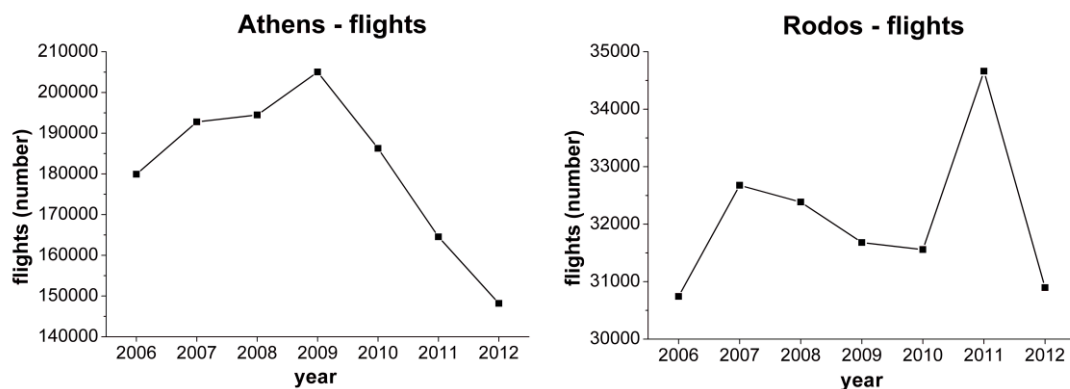


Σχήμα 3-34. Α) Ετήσιος αριθμός πτήσεων (εξωτερικού-εσωτερικού) στο σύνολο των ελληνικών αεροδρομίων και β) ετήσια διακύμανση πτήσεων στα 10 μεγαλύτερα ελληνικά αεροδρόμια.

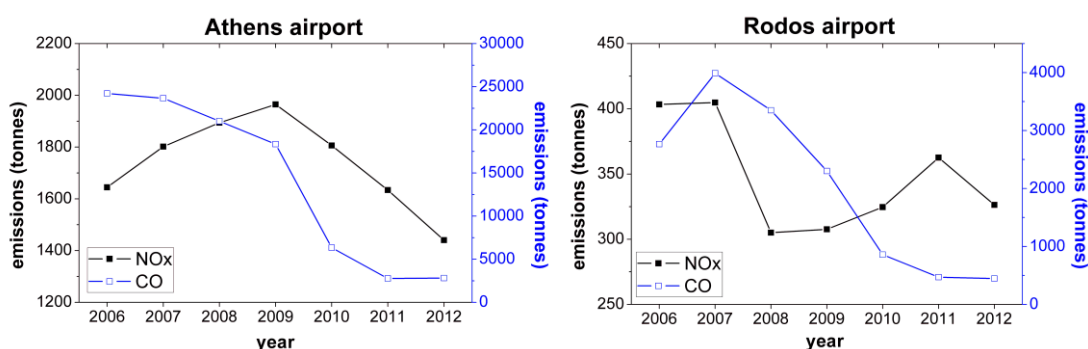
Όσον αφορά στις εκπομπές, η συνεισφορά του στο σύνολο των εκπομπών το έτος 2012 ήταν 40% για τα NO_x, 41% για το CO και 37% για το SO₂, ενώ τα αεροδρόμια της Θεσσαλονίκης, του Ηρακλείου και της Ρόδου ακολούθησαν με ποσοστά 24%, 9% και 7% επί των συνολικών εκπομπών CO για το ίδιο έτος, αντίστοιχα (Πίνακας 3-21). Αναλύοντας την ετήσια κατανομή των πτήσεων (Πίνακας 3-21) και των εκπομπών NO_x και CO για δύο μεγάλα αεροδρόμια (Σχ.3-35) παρατηρούμε μία συνεχή μείωση των εκπομπών CO (με έναρξη το έτος 2007 για το αεροδρόμιο της Ρόδου) η οποία συνδέεται με τη μείωση των πτήσεων εσωτερικού. Οι εκπομπές CO επηρεάζονται κυρίως από τον τύπο του αεροσκάφους. Η συγχώνευση των πτήσεων εσωτερικού προς τα περιφερειακά αεροδρόμια οδήγησε στη χρήση αεροσκαφών μεγαλύτερης χωρητικότητας τα οποία έχουν χαμηλότερες εκπομπές ανά LTO κύκλο. Οι εκπομπές NO_x κατά κανόνα σχετίζονται με τον αριθμό των πτήσεων παρουσιάζοντας αύξηση τα πρώτα τέσσερα έτη για το αεροδρόμιο της Αθήνας, ενώ την περίοδο 2009-2012 παρατηρήθηκε μια μείωση της τάξης του 27% ακολουθούμενη από μείωση 28% του αριθμού των πτήσεων. Όσον αφορά στο αεροδρόμιο της Ρόδου, η αύξηση κατά 11.7% των πτήσεων το 2011 προκάλεσε αύξηση κατά 9.5% των εκπομπών NO_x.

Πίνακας 3-19. Συνολικός αριθμός πτήσεων και ετήσιων εκπομπών για το έτος 2012 στα 10 μεγαλύτερα ελληνικά αεροδρόμια.

Αεροδρόμιο	Πτήσεις	NO _x (tn)	NM _{VOC} (tn)	CO (tn)	SO ₂ (tn)	PM _{2.5} (tn)
Αθήνα	148,198	1,440.39	174.59	2,818.66	104.10	1.42
Θεσσαλονίκη	43,106	403.56	45.95	1,690.76	32.63	0.38
Ηράκλειο	40,858	431.22	45.96	601.49	34.11	0.44
Ρόδος	30,896	326.31	36.21	446.56	25.70	0.24
Κέρκυρα	15,292	162.02	15.65	176.23	13.15	0.17
Κώς	14,972	134.90	13.18	157.76	11.66	0.06
Χανιά	14,120	137.99	13.69	151.63	11.53	0.06
Μυτιλήνη	5,972	42.29	5.18	54.05	3.63	0.09
Σαντορίνη	7,442	69.96	7.32	69.66	5.45	0.05
Ζάκυνθος	6,718	69.12	6.30	103.72	5.72	0.06
Σύνολο αεροδρομίων	301,287	3,573.75	407.20	6,816.12	279.90	3.84



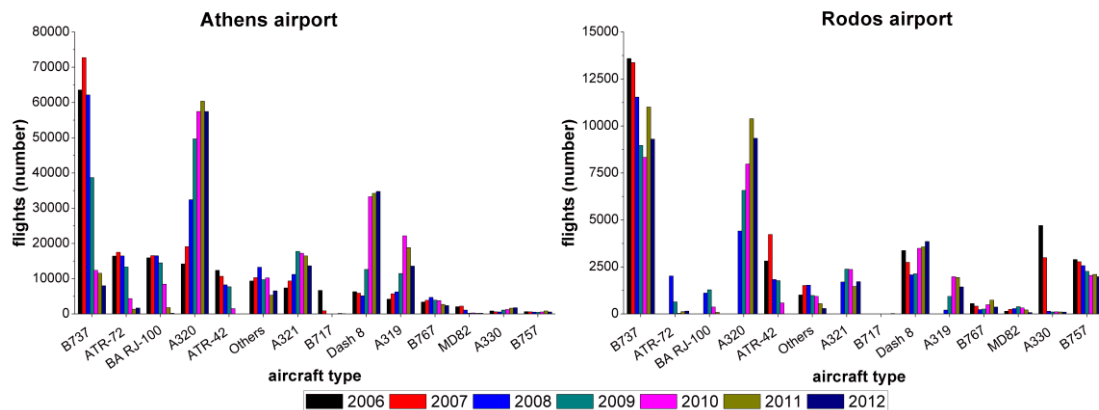
Σχήμα 3-35. Χρονική διακύμανση του ετήσιου αριθμού των πτήσεων (εσωτερικού και εξωτερικού) για τα αεροδρόμια της Αθήνας και της Ρόδου.



Σχήμα 3-36. Χρονική διακύμανση των ετήσιων εκπομπών CO και NOx για τα αεροδρόμια της Αθήνας και της Ρόδου.

Οι πιο δημοφιλείς τύποι των αεροσκαφών που προσγειώνονται/απογειώνονται στα αεροδρόμια της Αθήνας και της Ρόδου αναλύονται στο σχήμα 3-37 και είναι τα Boeing 737 (B737), Airbus 320 (A320) και Dash 8 και για τα δύο αεροδρόμια. Ωστόσο, διαπιστώνεται σημαντική μείωση του αριθμού των πτήσεων B737 από το 2010 σε συνδυασμό με την αύξηση του A320 στο αεροδρόμιο της Αθήνας, ενώ υπάρχει επίσης μια αυξανόμενη τάση στις πτήσεις A320 στο αεροδρόμιο της Ρόδου. Γενικά στα αεροσκάφη A320 αποδίδονται χαμηλότερες εκπομπές CO ανά LTO (5.5285704 tn/LTO) και υψηλότερες εκπομπές NOx (10.764482 tn/LTO) σε σύγκριση με τα αεροσκάφη B737 (CO - 8.003452 tn/LTO, NOx - 9.11925).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ



Σχήμα 3-37. Κυριότεροι τύποι αεροσκαφών που προσγειώνονται/απογειώνονται στα αεροδρόμια της Αθήνας και της Ρόδου.

Η παρούσα μελέτη (Fameli and Assimakopoulos, 2014) έρχεται να συμπληρώσει εκείνη του Tsilingiridis (2009), ο οποίος ανέλυσε την εξέλιξη των εκπομπών των αεροσκαφών στα ελληνικά αεροδρόμια από το 1980 έως το 2005 υπολογίζοντας τις εκπομπές κατά τη διάρκεια του LTO κύκλου για τα 38 πολιτικά αεροδρόμια. Η μεγάλη αύξηση των εκπομπών ακολούθησε την αύξηση της εναέριας κυκλοφορίας - 2.4 φορές περισσότερες πτήσεις πραγματοποιήθηκαν από το 1980 έως το 2006. Το αεροδρόμιο της Αθήνας είχε την υψηλότερη συνεισφορά στο σύνολο της εναέριας κυκλοφορίας, καθώς και στο σύνολο των εκπομπών, αλλά με τάση μείωσης (59.0% το 1980 – 42.2% το 2005). Οι αλλαγές στη σύνθεση του στόλου των αεροσκαφών σε συνδυασμό με τις μεταβολές της συνεισφοράς κάθε αεροδρομίου στο σύνολο της κυκλοφορίας της πολιτικής αεροπορίας επηρέασαν τη συγκέντρωση κάθε ρύπου όπως παρατηρήθηκε και στην παρούσα διατριβή. Οι εκπομπές NO_x παρουσίασαν μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης από αυτό των πτήσεων ενώ οι εκπομπές VOC και CO μικρότερο.

3.4.4 Εκπομπές από τις θαλάσσιες μεταφορές

Στην συγκεκριμένη κατηγορία περιλαμβάνονται οι εκπομπές από τη διεθνή και την εγχώρια ναυσιπλοΐα, την αλιεία, τη στρατιωτική και ποτάμια ναυσιπλοΐα, εκ των οποίων οι δύο τελευταίες δεν συμπεριλαμβάνονται στην παρούσα διατριβή. Ως πηγές θεωρούνται όλοι οι τύποι πλοίων: φορτηγά, επιβατηγά, αλιευτικά και πλοία βοηθητικής ναυτιλίας όπως αυτά παρουσιάζονται στον πίνακα 3-22. Ο επικρατέστερος τύπος μηχανής που χρησιμοποιείται στα πλοία είναι η ντίζελ (99% του παγκόσμιου στόλου) ενώ σε πολύ μικρότερα ποσοστά χρησιμοποιούνται οι τουρμπίνες ατμού (1%) και οι αεριοστρόβιλοι (0.1%). Ο τύπος της μηχανής συνδέεται κυρίως με τους ρύπους CO, VOC, NOx και τα PM. Όσον αφορά στο είδος καυσίμου αυτό διακρίνεται σε μαζούτ (HFO), πετρέλαιο πλοίων (Marine Diesel Oil-MDO) και Marine Gas Oil (MGO) και καθορίζει τις εκπομπές CO₂, SOx, τα βαρέα μέταλλα και τα θειικά σωματίδια.

Λόγω της ιδιαίτερης τοπογραφίας της η Ελλάδα διαθέτει πλήθος ακτοπλοϊκών συγκοινωνιών οι οποίες συνδέουν τα μεγαλύτερα λιμάνια της ηπειρωτικής χώρας με τα νησιά εξυπηρετώντας τους μόνιμους κατοίκους και τους τουρίστες. Έντονη είναι και η δραστηριότητα των εμπορικών λιμανιών της χώρας (π.χ. Πειραιάς, Θεσσαλονίκη, Αλεξανδρούπολη, Βόλος, Πάτρα κ.ά.). Επομένως η ναυτιλία αποτελεί σημαντική πηγή εκπομπών ιδιαίτερα για περιοχές, όπως το λεκανοπέδιο Αθηνών, που βρίσκονται κοντά σε μεγάλα λιμάνια.

3.2.4.1 Μεθοδολογία

Στην παρούσα διατριβή υπολογίστηκαν οι εκπομπές από τις θαλάσσιες μεταφορές σε εποχική κλίμακα για το χρονικό διάστημα 2006 – 2012 για 11 τύπους πλοίων (Πίνακας 3-22) και για τα 85 κυριότερα λιμάνια της χώρας. Οι εκπομπές προέρχονται από την πλεύση, τους ελιγμούς που απαιτούνται για την είσοδο του πλοίου στο λιμάνι και την παραμονή του σε αυτό και από την χρήση τόσο της κύριας όσο και της βοηθητικής μηχανής του πλοίου (Σχ.3-38). Οι εκπομπές διακρίνονται σε εγχώριες όταν το λιμάνι αναχώρησης και άφιξης βρίσκεται εντός της ίδιας χώρας και διεθνείς στην περίπτωση που η άφιξη γίνεται σε λιμάνι διαφορετικής χώρας από αυτή του λιμανιού αναχώρησης. Για τις εκπομπές από τη δεύτερη κατηγορία χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα της διεθνούς ναυσιπλοΐας που παρέχει η βάση εκπομπών του EMEP ενώ οι εγχώριες εκπομπές υπολογίστηκαν αναλυτικά όπως θα περιγραφεί στη συνέχεια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ

Βασικοί παράγοντες για το είδος των εκπομπών είναι το είδος καυσίμου και οι συνθήκες λειτουργίας της μηχανής οι οποίες διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

A) Μηχανές χαμηλής ταχύτητας (Slow Speed Diesel engines – SSD), οι οποίες χρησιμοποιούνται κυρίως για την προώθηση του πλοίου και επομένως συνδέονται με μεγάλη κατανάλωση καυσίμου.

B) Μηχανές μεσαίας ταχύτητας (Medium Speed Diesel engines – MSD), οι οποίες χρησιμοποιούνται επίσης για την προώθηση αλλά και ως βοηθητικές μηχανές.

Γ) Μηχανές υψηλής ταχύτητας (High Speed Diesel engines – HSD) οι οποίες χρησιμοποιούνται είτε ως βοηθητικές μηχανές είτε σε μικρότερα πλοία.

Δ) Τουρμπίνες ατμού (Steam Turbines – ST) οι οποίες έχουν πλέον σχεδόν συνολικά αντικατασταθεί από τις τρεις παραπάνω κατηγορίες.

Ε) Αεριοστρόβιλοι κινητήρες (Gas Turbines – GT) οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι κυρίως στα πολεμικά πλοία ενώ στον εμπορικό στόλο χρησιμοποιούνται βοηθητικά σε συνδυασμό με τους πετρελαιοκινητήρες σε πολύ μικρό ποσοστό.

Ο υπολογισμός των εκπομπών βασίστηκε στη γενική εξίσωση της μεθοδολογίας Tier 2 του EMEP/EEA Guidebook 2009 και 2013:

$$E_i = \sum_m \left(\sum_j FC_{m,j} \times EF_{i,m,j} \right)$$

όπου:

E_i είναι οι ετήσιες εκπομπές σε τόνους,

$FC_{m,j}$ είναι η ποσότητα του καυσίμου m το οποίο χρησιμοποιείται από πλοία με μηχανή τύπου j (σε τόνους),

$EF_{i,m,j}$ είναι ο συντελεστής εκπομπής του ρύπου i για το πλοίο με τύπο μηχανής j και είδος καυσίμου m (παρέχεται από τη μεθοδολογία),

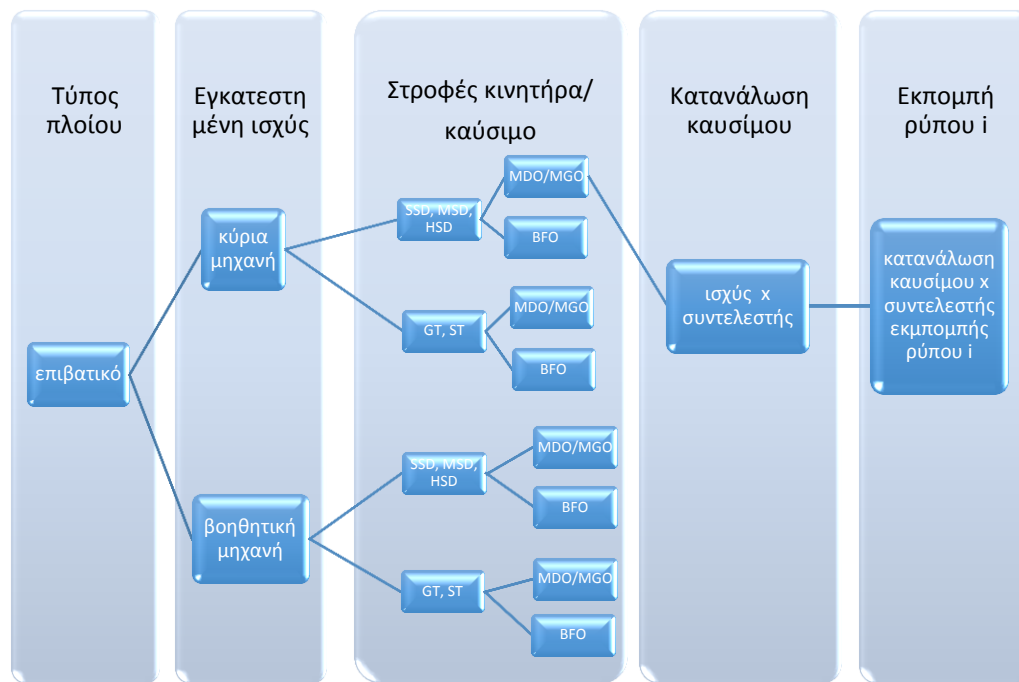
i = ο ρύπος,

j = ο τύπος μηχανής και

m = ο τύπος καυσίμου.

Για την εύρεση της ποσότητας καυσίμου που απαιτείται από κάθε τύπο πλοίου με είδος μηχανής j και χρήση καυσίμου m ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

1. Απόκτηση στατιστικών δεδομένων σχετικά με τις αφίξεις στα κυριότερα ελληνικά λιμάνια ανά τύπο πλοίου, (πηγή: Eurostat- `mar_tf_qm.xls`, δεδομένα σε εποχιακή κλίμακα) και κατηγοριοποίησή τους όπως στον Πίνακα 3-22.
2. Υπολογισμός της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος ανά τύπο σκάφους με βάση τη μεθοδολογία που προτείνεται από το EMEP/EEA Guidebook 2009 και 2013.
3. Διαχωρισμός της συνολικά εγκατεστημένης ισχύος για κάθε τύπο του σκάφους ανά κατηγορία στροφών του κινητήρα και τύπο καυσίμου με βάση τη μεθοδολογία που προτείνεται από το EMEP/EEA Guidebook 2009 και 2013.
4. Υπολογισμός της συνολικά εγκατεστημένης ισχύος ανά κατηγορία στροφών του κινητήρα και καυσίμου ως το άθροισμα των τιμών που υπολογίστηκαν στο βήμα 3 για όλους τους τύπους πλοίων συγκεντρωτικά.
5. Υποθέτοντας ότι η κατανάλωση καυσίμου είναι ανάλογη με τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ υπολογίζεται η κατανάλωση καυσίμου για κάθε κατηγορία στροφών του κινητήρα και καυσίμου με βάση τη μεθοδολογία που προτείνεται από το EMEP/EEA Guidebook 2009 και 2013.
6. Υπολογισμός των εκπομπών ανά ρύπο για κάθε λιμάνι ξεχωριστά σε εποχική κλίμακα.



Σχήμα 3-38. Μεθοδολογία υπολογισμού εκπομπών από τις θαλάσσιες μεταφορές.

Χωρική και χρονική κατανομή

Καθώς στην Ελλάδα η κίνηση των επιβατικών πλοίων είναι πολύ συχνή ο χωρισμός καταμερισμός των εκπομπών πραγματοποιήθηκε με δύο διαφορετικές μεθοδολογίες. Οι εκπομπές των επιβατικών πλοίων κατανεμήθηκαν στις ακτοπλοϊκές γραμμές όπως αυτές έχουν καταγραφεί από το OpenStreetMap στις οποίες έγινε η απαραίτητη συμπλήρωση προκειμένου να καλυφθούν τα δρομολόγια των πλοίων σε όλα τα ελληνικά νησιά, με κριτήριο το λιμάνι άφιξης. Οι εκπομπές που προέρχονται από τις υπόλοιπες κατηγορίες πλοίων κατανεμήθηκαν στις ακτοπλοϊκές ζώνες γύρω από τα αντίστοιχα λιμάνια θεωρώντας τη πιθανότητα να βρίσκονται στις συγκεκριμένες ζώνες σημαντική.

Σχετικά με τον χρονικό καταμερισμό των εκπομπών, αυτές προκύπτουν με βάση τα δεδομένα κίνησης της Eurostat σε εποχική κλίμακα οπότε ακολουθεί ισομερής καταμερισμός σε ωριαία δεδομένα εκπομπών.

Πίνακας 3-20. Ετήσιος αριθμός αφίξεων πλοίων στα ελληνικά λιμάνια ανά κατηγορία πλοίου.

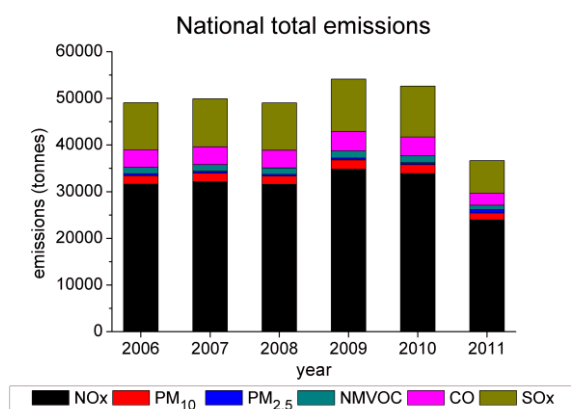
EUROSTAT	Entec types	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
CATEGORIES								
Πλοία υγρού φορτίου (δεξαμενόπλοια)	Tanker	9691	10200	9652	9580	10012	10585	9963
Πλοία ξηρών ομοειδών φορτίων	Dry bulk carriers	6023	5462	4431	3152	2745	2162	1855
Πλοία μεταφοράς εμπορευμ/κιβωτίων	Container	2392	2325	1124	1675	1859	2508	2923
Εξειδικευμένα φορτηγά πλοία	General cargo	9427	19271	3969	2790	2368	1914	2042
Μη-εξειδικευμένα φορτηγά πλοία	Ro-Ro cargo	8777	8690	8663	6672	5952	455872	4569
Πλοία ξηρών γενικών φορτίων	General cargo	4789	5194	3248	2521	1924	2404	4112
Κρουαζιερόπλοια	Passenger	1024	901	3006	4901	1226	4053	891
Επιβατηγά πλοία – εκτός από κρουαζιερόπλοια	Passenger	450902	464914	453508	446291	462827	52783	481214
Αλιευτικά	Fishing	3	10	7	16	0	0	0
Ρυμουλκά	Tugs	108	169	149	70	64	59	55
Διάφορα σκάφη (βυθοκόροι, ερευνητικά σκάφη, κ.α.)	Other	10	7	165	173	121	89	6
Σύνολο		493146	517143	487922	477841	489098	532429	507630

3.4.4.2 Αποτελέσματα

Στον Πίνακα 3-22 παρουσιάζεται ο ετήσιος αριθμός αφίξεων συνολικά σε όλα τα ελληνικά λιμάνια ανά κατηγορία πλοίου. Λόγω των πολυάριθμων ελληνικών νησιών ο αριθμός των επιβατηγών πλοίων είναι πολύ μεγαλύτερος των υπόλοιπων κατηγοριών όπως προκύπτει από τη βάση δεδομένων της Eurostat.

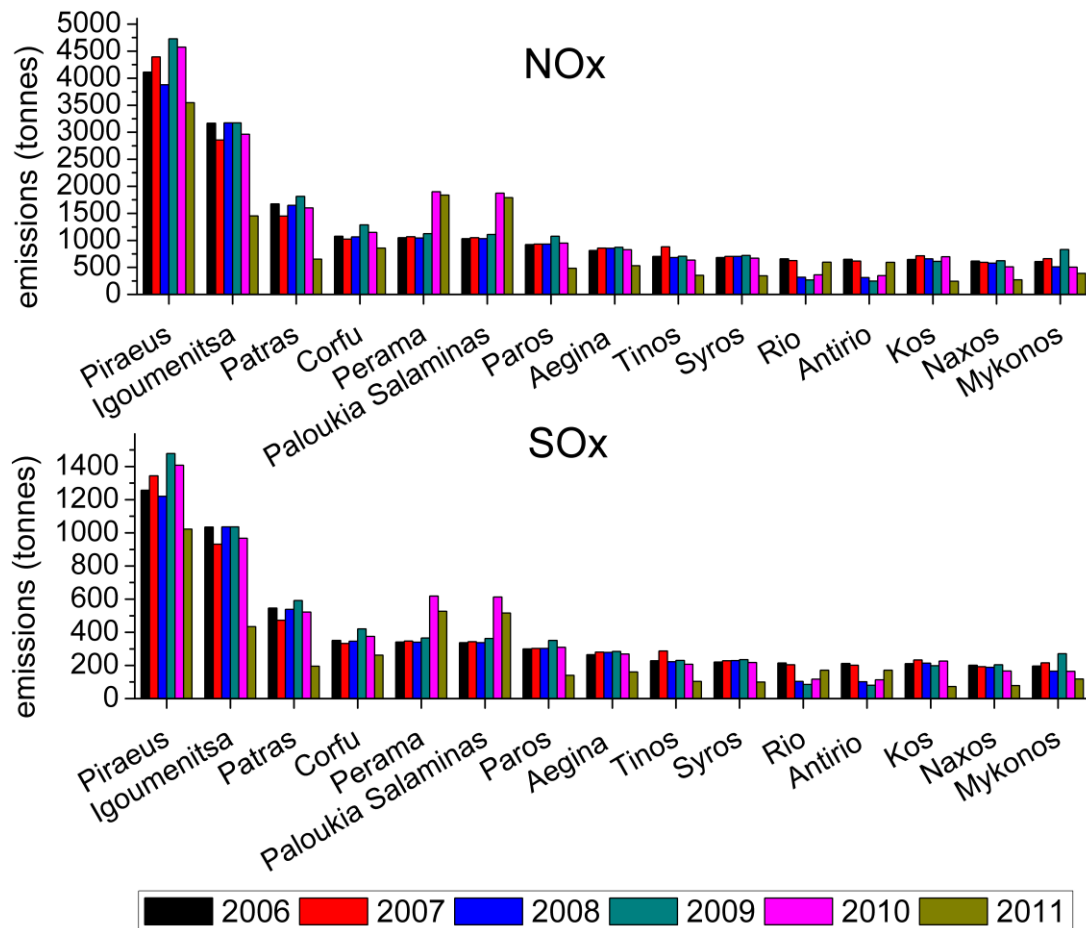
Οι ετήσιες εθνικές εκπομπές για τους ρύπους NO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, NMVOC, CO και SO_x παρουσιάζονται στο σχήμα 3-39. Είναι εμφανές ότι υπερτερούν οι εκπομπές των NO_x με αυτές των SO_x να ακολουθούν λόγω της χρήσης πετρελαίου ως κύριο καύσιμο. Δεν παρατηρείται ιδιαίτερη

διαφοροποίηση στην ετήσια διακύμανση των τιμών με εξαίρεση το έτος 2011 όπου οι εκπομπές μειώθηκαν σε σχέση με το 2010 κατά 9.921 tn για τα NO_x και 3.913 tn για τα SO_x ενώ μικρότερα ήταν τα ποσοστά για τους υπόλοιπους ρύπους.

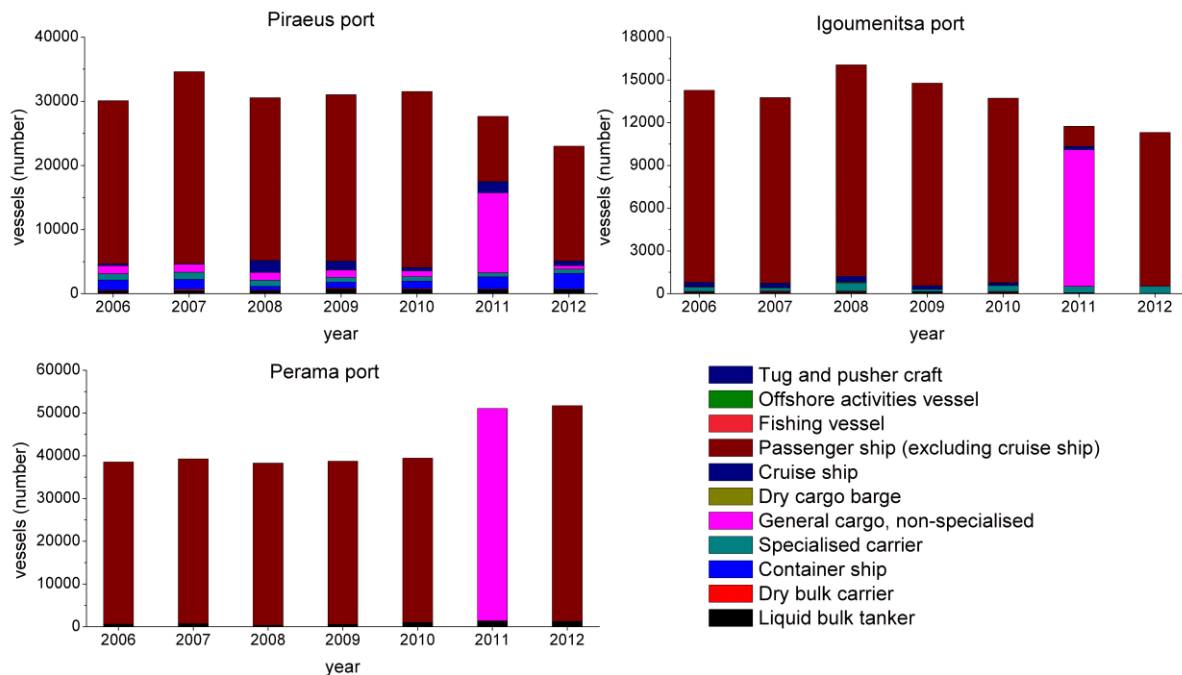


Σχήμα 3-39. Ετήσιες εθνικές εκπομπές 6 ρύπων (NO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, NMVOC, CO και SO_x) από τις θαλάσσιες μεταφορές για τη χρονική περίοδο 2006 – 2011.

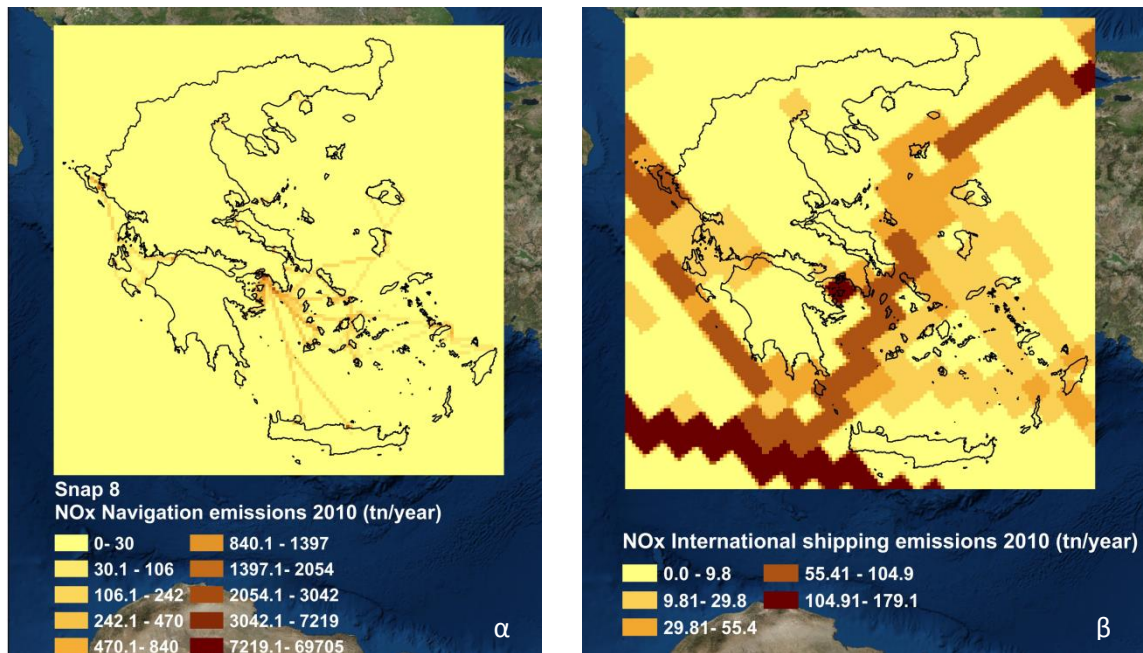
Μεταξύ των λιμανιών οι περισσότερες εκπομπές εκλύονται στον Πειραιά (13.5% και 13.9% επί του συνόλου των εκπομπών NO_x και SO_x αντίστοιχα για το έτος 2010) καθώς αυτό αποτελεί το μεγαλύτερο επιβατικό και εμπορικό λιμάνι της χώρας (Σχ.3-40). Ακολουθούν τα λιμάνια της Ηγουμενίτσας, του Πέραματος και των Παλουκιών Σαλαμίνας με ποσοστά 8.7%, 5.6% και 5.5% επί του συνόλου των εκπομπών NO_x και 8.8% , 5.7% και 5.6% επί του συνόλου των εκπομπών SO_x για το έτος 2010. Καθοριστικός παράγοντας για το ποσοστό των ρύπων και των PM που εκπέμπονται σε κάθε λιμάνι είναι η κίνηση των επιβατικών πλοίων γι' αυτό και τα λιμάνια με την μεγαλύτερη επιβατική κίνηση (Πειραιάς, Πέραμα, Παλούκια Σαλαμίνας και Ηγουμενίτσα) παρουσιάζονται πιο επιβαρυμένα (Σχ.3-41) και ακολουθεί ως βασικός παράγοντας η ισχύς της μηχανής του εκάστοτε πλοίου. Μελέτη των εκπομπών από την κίνηση των πλοίων στο λιμάνι του Πειραιά έχει πραγματοποιηθεί και από τον Tzannatos (2010). Στο Σχήμα 3-42α παρουσιάζονται οι ετήσιες εκπομπές NO_x για το έτος 2010 χωρικά κατανεμημένες στο πλέγμα ανάλυσης 6x6km², οι οποίες όπως είναι φανερό ακολουθούν τις ακτοπλοϊκές γραμμές. Υψηλές τιμές ανά κελί εμφανίζονται στο Σαρωνικό Κόλπο οι οποίες αυξάνονται καθώς πλησιάζουμε προς το λιμάνι του Πειραιά λόγω της πυκνότητας των δρομολογίων που αντιστοιχούν στο συγκεκριμένο λιμάνι. Οι εκπομπές NO_x από τη διεθνή ναυσιπλοΐα παρουσιάζονται στο σχήμα 3-42β η συνεισφορά της οποίας στο σύνολο των εκπομπών είναι σημαντική καθώς ο ελληνικός θαλάσσιος χώρος αποτελεί πέρασμα στην πλεύση των εμπορικών πλοίων από και προς την ανατολική Μεσόγειο και την Μαύρη Θάλασσα.



Σχήμα 3-40. Ετήσιες εκπομπές στα 15 μεγαλύτερα ελληνικά λιμάνια για τη χρονική περίοδο 2006 – 2011.



Σχήμα 3-41. Ετήσια κατανομή αφίξεων ανά τύπο πλοίου σε τρία μεγάλα λιμάνια.



Σχήμα 3-42. Α) Χωρική κατανομή των ετήσιων εκπομπών NOx για το έτος 2010 α) από τη ναυσιπλοΐα και β) τη διεθνή ναυσιπλοΐα.

3.4.5 Εκπομπές από οχήματα εκτός δρόμου

Στην συγκεκριμένη κατηγορία συμπεριλαμβάνονται τα εκτός δρόμου οχήματα που χρησιμοποιούνται:

- Στην βιομηχανία για την μεταφορά εμπορευμάτων εντός των εργοστασίων (π.χ. κλαρκς)
- Στις οικοδομικές εργασίες (μίκτες κονιαμάτων, γερανοί, κομπρεσέρ κ.ά.)
- Στην κατασκευαστική βιομηχανία (οδοστρωτήρες ασφάλτου, εκσκαφείς, μπουλντόζες, γερανοί, γκρέιτερ / ξύστρες οδοστρώματος, κ.ά.)
- Στις γεωργικές και δασοκομικές εργασίες (κυρίως τρακτέρ και θεριστικές μηχανές).

Οι σημαντικότεροι ρύποι και ενώσεις που εκλύονται από τα παραπάνω μηχανήματα είναι οι εξής: SO₂, NO_x, PM, CO₂, CO καθώς και NMVOC οι εκπομπές των οποίων εξαρτώνται κυρίως από τον τύπο του κινητήρα και το είδος του εξοπλισμού. Οι εκπομπές των CO₂ και SO₂ είναι κατά κύριο λόγο ανεξάρτητες από την τεχνολογία του κινητήρα και τον τύπο του εξοπλισμού.

3.4.5.1 Μεθοδολογία

Για τον υπολογισμό των εκπομπών από τα εκτός δρόμου οχήματα χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση Tier-1 της μεθοδολογίας EMEP/EEA E.I. Guidebook 2013 σύμφωνα με την οποία οι εκπομπές υπολογίζονται βάση της ετήσιας κατανάλωσης καυσίμου από τα παραπάνω είδη μηχανημάτων με τη βοήθεια της εξίσωσης:

$$E_{pollutant} = \sum_{fuel\ type} FC_{fuel\ type} \times EF_{pollutant, fuel\ type}$$

Όπου $E_{pollutant}$ είναι η εκπομπή του συγκεκριμένου ρύπου,

$FC_{fuel\ type}$ είναι η κατανάλωση καυσίμου για κάθε τύπο καυσίμου (πετρέλαιο, υγραέριο, βενζίνη) και

$EF_{pollutant, fuel\ type}$ είναι ο συντελεστής εκπομπής για τον εκάστοτε ρύπο και είδος καυσίμου.

Τα απαραίτητα δεδομένα κατανάλωσης καυσίμου προέκυψαν από τη βάση δεδομένων της Eurostat (nrg_102a) για την γεωργία/δασοκομία και την βιομηχανία για τη χρονική περίοδο 2006 - 2012. Για

την περίπτωση της βιομηχανίας χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τον κατασκευαστικό τομέα και τη μεταφορά εμπορευμάτων.

Χωρική και χρονική κατανομή

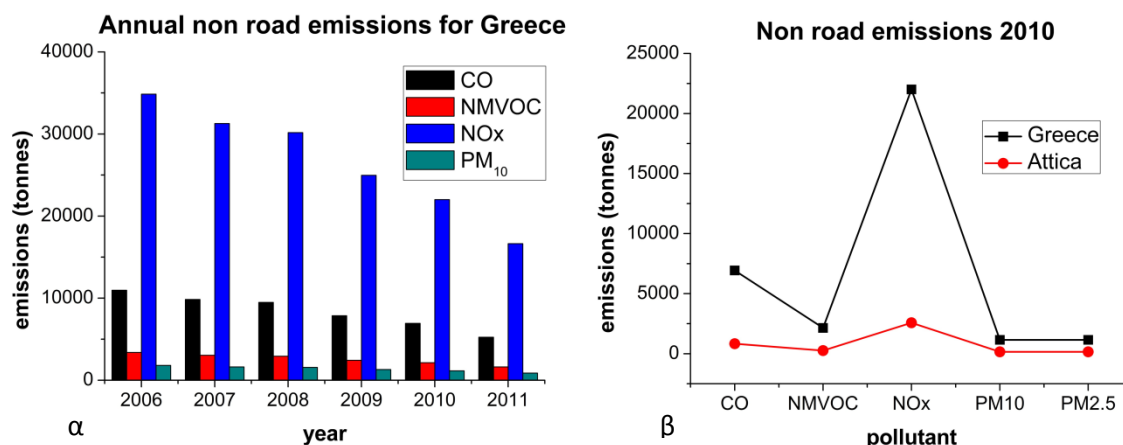
Οι εκπομπές που οφείλονται στη χρήση μηχανημάτων για την πραγματοποίηση αγροτικών εργασιών κατανεμήθηκαν ομοιόμορφα στα κελιά που η χρήση γης έχει καθοριστεί ως αρδευόμενη έκταση (κατηγορία 3) και μικτή αρδευόμενη/μη αρδευόμενη έκταση (κατηγορία 4). Οι εκπομπές από τη δραστηριότητα εντός των βιομηχανικών μονάδων και του κατασκευαστικού τομέα τοποθετήθηκαν στα κελιά που αντιπροσωπεύουν αστικές περιοχές.

Για τον χρονικό καταμερισμό των ετήσιων εκπομπών χρησιμοποιήθηκαν οι συντελεστές που προτείνονται από το TNO για την κατηγορία SNAP8 στην οποία ανήκουν οι συγκεκριμένες εκπομπές.

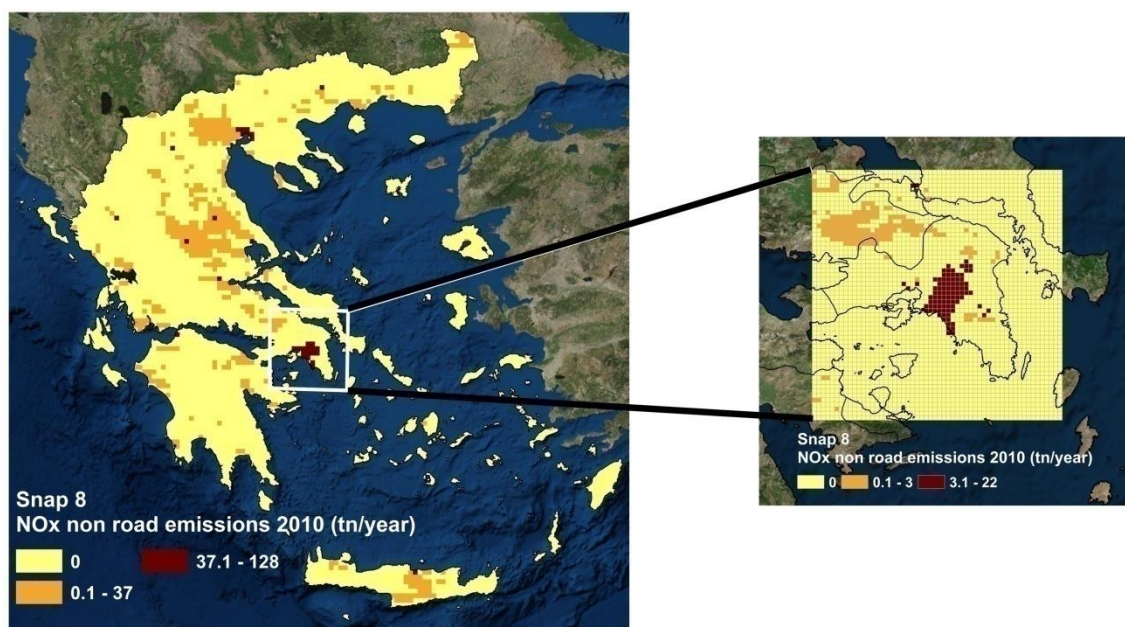
Αποτελέσματα

Όπως προκύπτει από το σχήμα 3-43α οι εκπομπές NO_x υπερσχύουν των υπολοίπων λόγω της χρήσης του πετρελαίου κίνησης ως το κυρίως καύσιμο από τα οχήματα εκτός δρόμου. Ακολουθούν οι εκπομπές CO με πολύ μικρότερο ποσοστό συνεισφοράς στο σύνολο των εκπομπών. Σημαντική είναι η μείωση (περίπου 52%) που διαπιστώνεται από το 2006 μέχρι το 2011 για όλους τους ρύπους η οποία οφείλεται στη συνεχόμενη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου από τα συγκεκριμένα οχήματα. Στην Αττική εκλύεται το 2010 το 11.7% (2,575tn), 12.0% (834tn), 12.2% (262tn) και το 13.6% (156tn) των συνολικών εθνικών εκπομπών NO_x, CO, NMVOC και PM₁₀ αντίστοιχα (Σχ.3-43β). Όσον αφορά στη χωρική κατανομή των εκπομπών, υψηλές τιμές εμφανίζονται στις αστικές περιοχές καθώς στην μικρή έκταση αυτών καταμερίζεται το σύνολο των εκπομπών από τα οχήματα του βιομηχανικού τομέα και των οικοδομικών εργασιών ενώ οι εκπομπές που οφείλονται στα αγροτικά μηχανήματα παρότι περισσότερες κατανέμονται στις αγροτικές περιοχές όλης της χώρας. Ενδεικτικά για το έτος 2010 το 81.4% (17,907tn) επί του συνόλου των εθνικών εκπομπών NO_x από τα εκτός δρόμου οχήματα αντιστοιχεί στις εκπομπές από τις γεωργικές και δασοκομικές εργασίες ενώ μόλις το 18.6% (4,099tn) στις εκπομπές από τα οχήματα του βιομηχανικού τομέα και των οικοδομικών εργασιών. Τα αντίστοιχα ποσοστά για τις εκπομπές NO_x στην Αττική είναι αντίστροφα

λόγω της μικρής έκτασης των αγροτικών περιοχών. Μόλις το 20.4% (525tn) των συνολικών εκπομπών αντιστοιχεί στις εκπομπές από τις γεωργικές και δασοκομικές εργασίες ενώ το 79.6% (2050tn) οφείλεται στις εκπομπές από τα οχήματα του βιομηχανικού τομέα και των οικοδομικών εργασιών.



Σχήμα 3-43. Ετήσιες εκπομπές (τόνοι) από τα οχήματα εκτός δρόμου α) για την περίοδο 2006-2011 για την Ελλάδα και β) για το έτος 2010 για την Ελλάδα και την Αττική.



Σχήμα 3-44. Χωρική κατανομή των ετήσιων εκπομπών NOx από οχήματα εκτός δρόμου για το έτος 2010 στα πλέγματα χωρικής ανάλυσης 6x6km² και 2x2km².

3.4.6 Εκπομπές από τη βιομηχανική δραστηριότητα

Για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα βιομηχανικής δραστηριότητας από τη βάση δεδομένων του Ευρωπαϊκού Μητρώου Έκλυσης και Μεταφοράς Ρύπων (eprtr_v5.1) για την χρονική περίοδο 2007 - 2011(<http://prtr.ec.europa.eu/>). Το Ευρωπαϊκό Μητρώο Έκλυσης και Μεταφοράς Ρύπων (MEMP, European Pollutant Release and Transfer Register, E-PRTR) παρέχει περιβαλλοντικά δεδομένα από βιομηχανικές εγκαταστάσεις σε κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης καθώς και στην Ισλανδία, το Λιχτενστάιν, τη Νορβηγία, τη Σερβία και την Ελβετία. Αντικατέστησε το προηγούμενο ευρωπαϊκό μητρώο ρυπογόνων εκπομπών (European Pollutant Emission Register, EPER).

Το νέο μητρώο περιέχει δεδομένα που αναφέρονται ετησίως από περίπου 28.000 βιομηχανικές εγκαταστάσεις καλύπτοντας 65 τομείς οικονομικής δραστηριότητας σε όλη την Ευρώπη συνοψισμένους στους εξής 9 βιομηχανικούς τομείς:

- ενέργεια
- παραγωγή και επεξεργασία μετάλλων
- βιομηχανία ορυκτών
- χημική βιομηχανία
- διαχείριση αποβλήτων και λυμάτων
- παραγωγή και μεταποίηση χαρτιού και ξύλου
- εντατική κτηνοτροφία και υδατοκαλλιέργεια
- ζωικά και φυτικά προϊόντα του κλάδου τροφίμων και ποτών, και
- άλλες δραστηριότητες

Για κάθε εγκατάσταση, παρέχονται πληροφορίες σχετικά με τα ποσά έκλυσης ρύπων στον αέρα, το νερό και το έδαφος, καθώς και off-site μεταφορές αποβλήτων και ρύπων σε λύματα από έναν κατάλογο 91 βασικών ρύπων ομαδοποιημένων σε επτά κατηγορίες:

- αέρια του θερμοκηπίου
- άλλα αέρια
- βαρέα μέταλλα
- φυτοφάρμακα

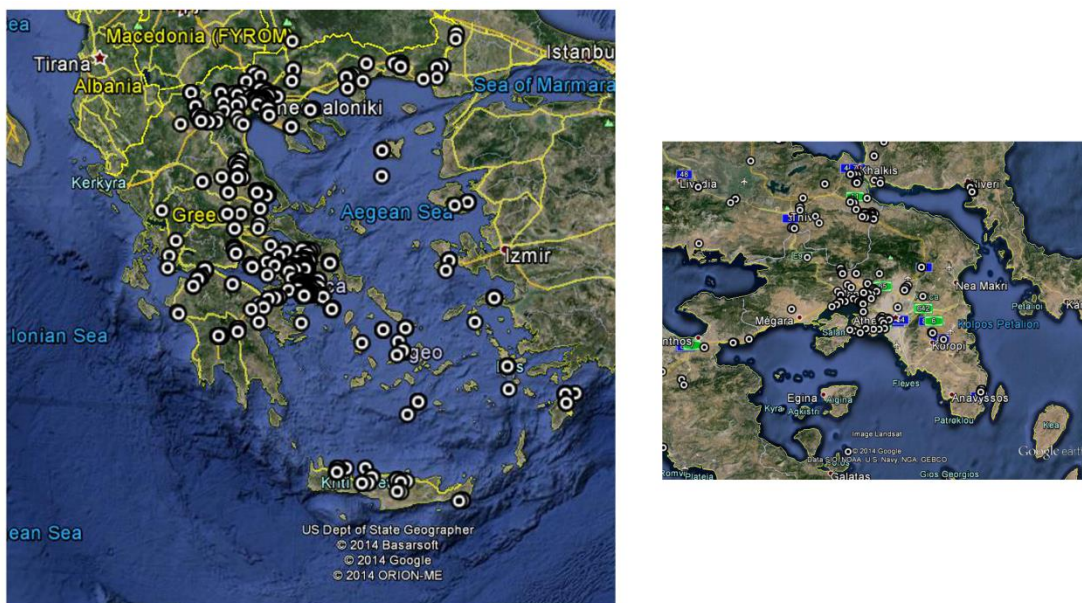
- χλωριωμένες οργανικές ουσίες
- άλλες οργανικές ουσίες
- ανόργανες ουσίες.

Τα δεδομένα υποβάλλονται από τις επιμέρους βιομηχανικές εγκαταστάσεις στις σχετικές αρμόδιες αρχές, σε ετήσια βάση. Οι αντίστοιχες αρχές κάθε χώρας είναι υπεύθυνες για την κατάρτιση και τον έλεγχο της ποιότητας των στοιχείων που υποβάλλονται. Τα δεδομένα στη συνέχεια παρέχονται στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή και τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος για την εκπόνηση και τη διάδοση στην ιστοσελίδα του E-PRTR (<http://prtr.ec.europa.eu/>). Λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τις διαδικασίες υποβολής και το περιεχόμενο είναι διαθέσιμο στο έγγραφο E-MEMP.

Χωρική και χρονική κατανομή

Οι εκπομπές καταμερίστηκαν στα αντίστοιχα κελιά των δύο πλεγμάτων με βάση τις συντεταγμένες κάθε βιομηχανικής μονάδας. Στο Σχήμα 3-45 παρουσιάζονται οι βιομηχανικές μονάδες χωρικά κατανεμημένες στην Ελλάδα και πιο αναλυτικά στην Αττική, τη Βοιωτία, στην Εύβοια και την βορειοανατολική Πελοπόννησο.

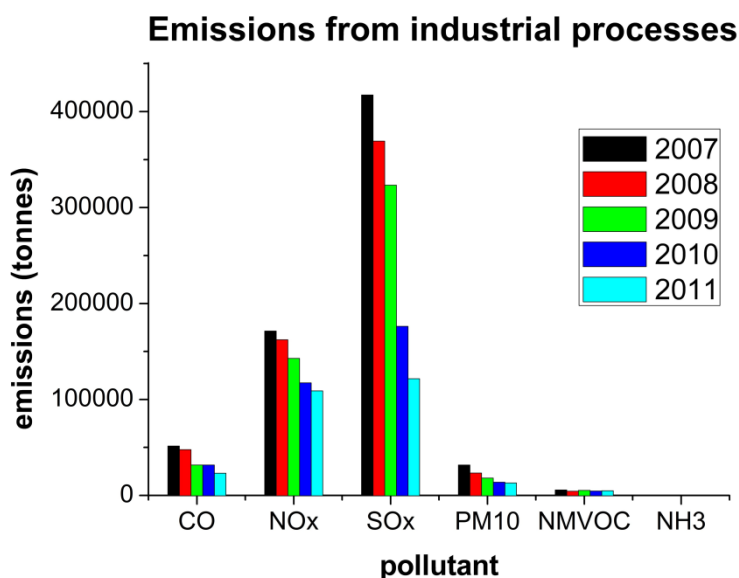
Για τον διαχωρισμό των ετήσιων εκπομπών σε ωριαία κλίμακα χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα δραστηριότητας από το E-PRTR και την ΔΕΗ (ετήσιες εκθέσεις περιβάλλοντος των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ΑΗΣ Λαυρίου και ΑΗΣ Αγίου Γεωργίου Κερατσινίου).



Σχήμα 3-45. Χωρική κατανομή των βιομηχανικών μονάδων στην Ελλάδα και το πλέγμα 2.

Αποτελέσματα

Το μεγαλύτερο μέρος των εκπομπών από τη βιομηχανική δραστηριότητα οφείλεται σε εκπομπές SO_x (417,327tn – 61.56% το 2007) και ακολουθούν σε μικρότερα ποσοστά οι εκπομπές NO_x (171,383tn – 25.28% το 2007), CO (51,470tn – 7.59% το 2007) και PM₁₀ (31,711tn – 4.68% το 2007). Πολύ μικρότερα είναι τα ποσοστά που αντιστοιχούν στις εκπομπές NH₃. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3-46 οι εκπομπές ακολούθησαν πτωτικές τάσεις την περίοδο 2007-2011. Συγκεκριμένα η μεταβολή των εκπομπών SO_x από το 2007 μέχρι το 2011 ήταν 295,670tn (70.85%) ενώ για τις εκπομπές των NO_x σημειώθηκε μείωση κατά 62,450tn (36.44%).



Σχήμα 3-46. Ετήσιες εκπομπές (τόννοι) των ρύπων CO, NO_x, SO_x, PM₁₀, NMVOC και NH₃ από την βιομηχανική δραστηριότητα στην Ελλάδα κατά την περίοδο 2007-2011.

3.4.7 Εκπομπές από τη γεωργία και την κτηνοτροφία

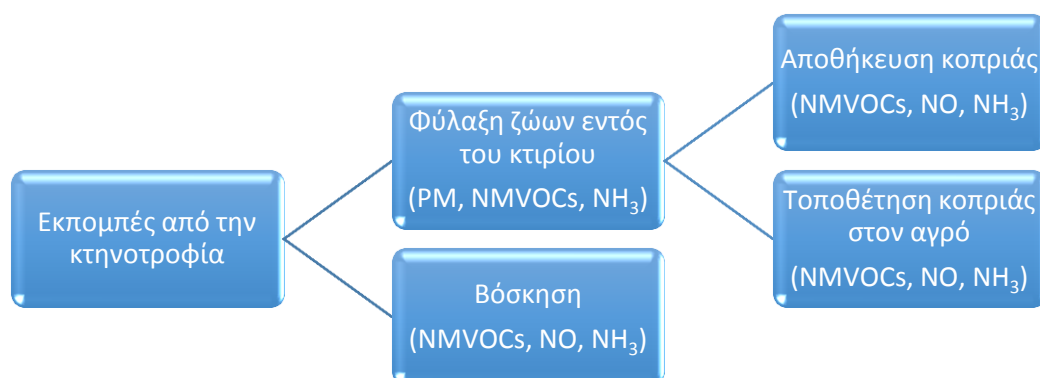
Οι εκπομπές που ανήκουν στην κατηγορία SNAP 10 – Γεωργία προέρχονται από τις εξής 4 πηγές:

- Διαχείριση αποβλήτων της κτηνοτροφικής εκμετάλλευσης (Διαχείριση κοπριάς)
- Φυτική παραγωγή
- Καύση γεωργικών υπολειμμάτων και
- Χρήση φυτοφαρμάκων.

Κάθε πηγή πρόκειται να εξεταστεί ξεχωριστά ακολουθώντας τη μεθοδολογία EMEP/EEA Ε.Ι. Guidebook 2013. Στην παρούσα διατριβή υπολογίστηκαν οι εκπομπές μόνο των δύο πρώτων κατηγοριών.

3.4.7.1 Διαχείριση κοπριάς

Στη συγκεκριμένη πηγή περιλαμβάνονται οι εκπομπές από τα απόβλητα των οικόσιτων ζώων όπως είναι τα βοοειδή, οι χοίροι, τα πρόβατα και τα πουλερικά. Οι ρύποι που εκλύονται από τα περιττώματα των ζώων είτε μέσα και γύρω από το κτίριο που φυλάσσονται είτε στο χώρο βόσκησης είναι κυρίως η αμμωνία (NH_3), το μονοξείδιο του αζώτου (NO) και τα NMVOCs. Επιπλέον προκύπτουν εκπομπές σωματιδίων από τις ζωοτροφές, το τρίχωμα και τα φτερά των ζώων (Σχ.3-47).



Σχήμα 3-47. Εκπομπές από την κτηνοτροφία κατά τα διάφορα στάδια εκτροφής των ζώων και εκμετάλλευσης των αποβλήτων τους.

Το είδος και ο πληθυσμός των εκτρεφόμενων ζώων, ο χώρος σταβλισμού και η ποιότητα της τροφής τους καθορίζουν τη χημική σύσταση των αποβλήτων και κατ' επέκταση την ποσότητα και το είδος των εκπομπών. Ο τρόπος συλλογής και απομάκρυνσης των αποβλήτων από τους χώρους εκτροφής είναι πολύ σημαντικός ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη αξιοποίηση τους. Γενικά προτιμούνται τα στερεά απόβλητα λόγω του εύκολου χειρισμού τους. Οι εκπομπές της αμμωνίας προέρχονται κυρίως από την κτηνοτροφία με τα μεγαλύτερα ποσοστά να αποδίδονται εντός των χώρων σταβλισμού των ζώων και κατά τη διαχείριση των αποβλήτων τους. Μικρότερο είναι το μερίδιο των εκπομπών που προέρχονται από την αποθήκευση της κοπριάς και τη βόσκηση καθώς στη δεύτερη περίπτωση γίνεται άμεση απορρόφηση από το έδαφος.

Μεθοδολογία

Για τον υπολογισμό των ετήσιων εκπομπών από τη διαχείριση των κτηνοτροφικών αποβλήτων χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση Tier 1 της μεθοδολογίας EMEP/EEA E.I. Guidebook 2013 σύμφωνα με την οποία οι εκπομπές προκύπτουν βάση της εξίσωσης:

$$E_{i,j} = AAP_j \times EF_{i,j}$$

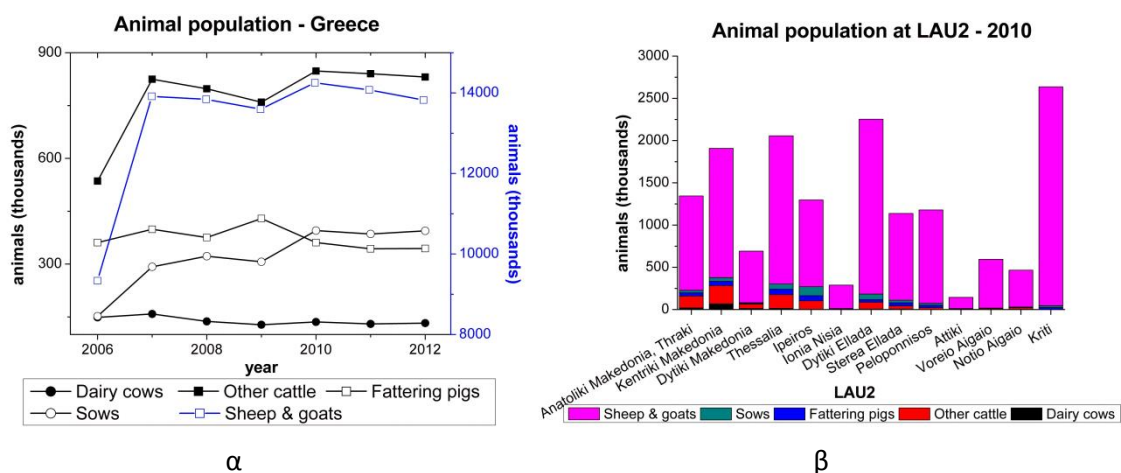
Όπου

$E_{i,j}$ είναι η ετήσια εκπομπή των ρύπου i από το ζώο j ,

AAP_j είναι ο αριθμός των ζώων μιας συγκεκριμένης κατηγορίας που υπάρχουν, κατά μέσο όρο, το έτος μελέτης

$EF_{i,j}$ είναι ο συντελεστής εκπομπής του ρύπου i από το ζώο j .

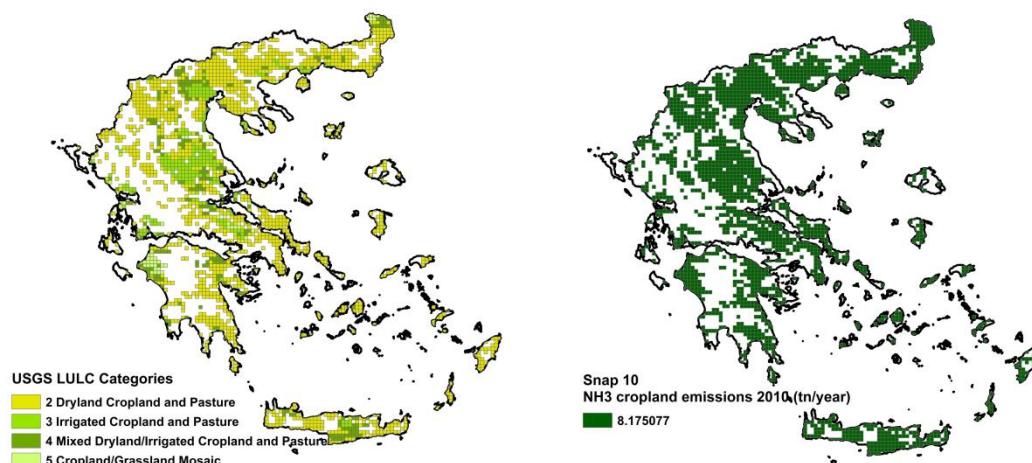
Ο ετήσιος πληθυσμός των ζώων σε κάθε κατηγορία (Σχ.3-48) ανά γεωγραφική περιοχή (γεωγραφικά διαμερίσματα της Ελλάδας) προέκυψε από τη βάση δεδομένων της Eurostat (agr_r_animal.xls) για τη χρονική περίοδο 2007-2012. Για το έτος 2006 χρησιμοποιήθηκαν αντίστοιχα δεδομένα από την ΕΛ.ΣΤΑΤ. Ο στόχος της κατηγοριοποίησης των ζώων σε ομάδες είναι η παρόμοια διαχείριση αυτών κατά τη χρήση των συντελεστών εκπομπής. Επιπλέον για τις κατηγορίες των ζώων που από τη μεθοδολογία προτεινόταν δύο συντελεστές εκπομπής ανάλογα με το είδος της κοπριάς (πολτός ή στερεή κοπριά) επιλέχθηκε η χρήση αυτών που δίνονταν για τη δεύτερη περίπτωση αποβλήτων. Σχετικά με τους συντελεστές εκπομπής υψηλότερες τιμές αποδόθηκαν στα μεγαλόσωμα ζώα (βοοειδή) ενώ από τους τέσσερις ρύπους αποδόθηκαν στην αμμωνία.



Σχήμα 3-48. Α) Ετήσια διακύμανση του ζωϊκού πληθυσμού στην Ελλάδα και β) χωρική κατανομή του ζωϊκού πληθυσμού σε γεωγραφικά διαμερίσματα για το έτος 2010.

Χωρική και χρονική αποτύπωση των εκπομπών

Οι ετήσιες εκπομπές που προέκυψαν από την παραπάνω διαδικασία κατανεμήθηκαν στα κελιά των δύο πλεγμάτων χρησιμοποιώντας τα πεδία χρήσης γης. Οι εκπομπές ισοκαταμερίστηκαν στις αγροτικές εκτάσεις (κατηγορίες χρήσης γης 2, 3 και 4), όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3-49.



Σχήμα 3-49. Κατηγορίες χρήσης γης στις οποίες πραγματοποιήθηκε η χωρική κατανομή των ετήσιων εκπομπών από τη διαχείριση της κοπριάς.

3.4.7.2 Φυτική παραγωγή

Στην συγκεκριμένη κατηγορία περιλαμβάνονται οι εκπομπές των ρύπων NH_3 , NO , NMVOC και PM οι οποίες προέρχονται από την φυτική παραγωγή και τα γεωργικά εδάφη. Πιο αναλυτικά οι πηγές διαχωρίζονται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες:

- Την εφαρμογή λιπάσματος (NH_3)
- Τις διεργασίες των μικροοργανισμών του εδάφους (NO)
- Τις διεργασίες καλλιιεργειών (NH_3 και NMVOC)
- Την καλλιέργεια του εδάφους και τη συγκομιδή των καλλιιεργειών (PM).

Μεθοδολογία

Ο υπολογισμός των εκπομπών πραγματοποιήθηκε με την προσέγγιση Tier-1 του EMEP/EEA E.I. Guidebook 2013. Για τις εκπομπές NH_3 και NO χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση:

$$E_{\text{pollutant}} = AR_{\text{fertilizer applied}} \times EF_{\text{pollutant}}$$

Όπου $E_{\text{pollutant}}$ είναι η εκπομπή του ρύπου

$AR_{\text{fertilizer applied}}$ είναι η ποσότητα N που χρησιμοποιείται

$EF_{\text{pollutant}}$ είναι ο συντελεστής εκπομπής για τον εκάστοτε ρύπο.

Τα απαραίτητα δεδομένα κατανάλωσης φυτοφαρμάκων που περιέχουν άζωτο προέκυψαν από τη βάση δεδομένων της Eurostat (aei_fm_usefert) σε ετήσια κλίμακα για την Ελλάδα.

Για τις εκπομπές των NMVOC και PM χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση:

$$E_{\text{pollutant}} = AR_{\text{area}} \times EF_{\text{pollutant}}$$

Όπου $E_{\text{pollutant}}$ είναι η εκπομπή του ρύπου

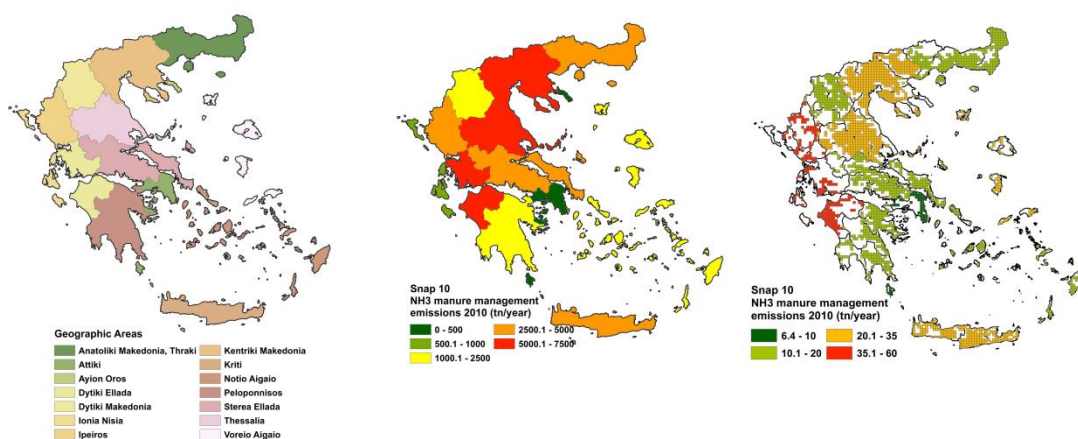
AR_{area} είναι η έκταση της αγροτικής περιοχής και

$EF_{\text{pollutant}}$ είναι ο συντελεστής εκπομπής του εκάστοτε ρύπου.

Τα δεδομένα που αφορούν στην έκταση των αγροτικών περιοχών προέκυψαν από τη βάση δεδομένων της Eurostat και δίνονται ανά γεωγραφικό διαμέρισμα όπως φαίνεται στο σχήμα 3-50.

Χωρική αποτύπωση των εκπομπών

Οι ετήσιες εκπομπές προέκυψαν από την παραπάνω διαδικασία ήδη κατανεμημένες χωρικά σε 13 γεωγραφικά διαμερίσματα. Για την περαιτέρω κατανομή τους στα κελιά των δύο πλεγμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα πεδία χρήσης γης βάσει των οποίων οι εκπομπές ισοκαταμερίστηκαν στις αγροτικές εκτάσεις (κατηγορίες χρήσης γης 2, 3 και 4).



Σχήμα 3-50. Μέθοδος χωρικής αποτύπωσης των εκπομπών από τη φυτική παραγωγή.

Χρονική αποτύπωση των εκπομπών

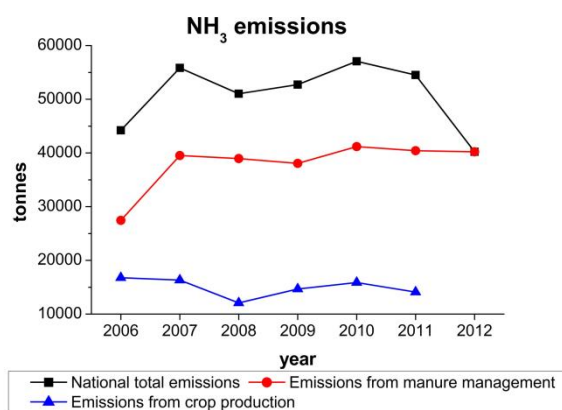
Στη συνέχεια οι ετήσιες χωρικά κατανεμημένες εκπομπές διαχωρίστηκαν ομοιόμορφα χρονικά οπότε προέκυψαν οι τελικές ωριαίες εκπομπές ανά κελί.

3.4.7.3 Αποτελέσματα

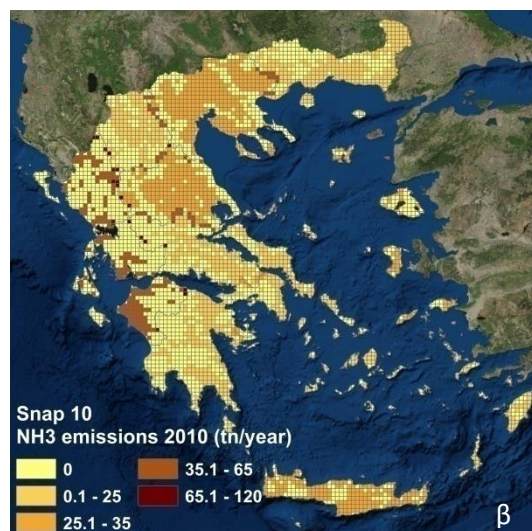
Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι οι εκπομπές της NH_3 υπερτερούν των υπολοίπων εκπομπών ενώ μεταξύ των δύο διεργασιών που μελετήθηκαν η διαχείριση της κοπριάς καθορίζει το σύνολο των εκπομπών NH_3 που προκύπτουν για αυτή την κατηγορία (Σχ. 3-51α). Η ετήσια διακύμανση των εκπομπών ανέδειξε μία αρχική αύξηση αυτών το 2007 ενώ στο επόμενο χρονικό διάστημα 2007-2012 οι ετήσιες εκπομπές παρέμειναν σχεδόν σταθερές (Σχ. 3-51α).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ

Οι χωρικά κατανεμημένες εκπομπές που προέκυψαν από τις δύο παραπάνω διεργασίες αθροίστηκαν και προέκυψε για κάθε έτος η πλεγματική κατανομή εκπομπών του σχήματος 3-51β σύμφωνα με την οποία οι αγροτικές περιοχές της βορειοδυτικής Πελοποννήσου, της Θεσσαλίας και της κεντρικής Μακεδονίας εμφανίζουν τις υψηλότερες τιμές.



α



β

Σχήμα 3-51. Α) Ετήσια διακύμανση των εκπομπών NH₃ και β) συνολικές εκπομπές NH₃ από την γεωργία και την κτηνοτροφία για το έτος 2010 χωρικά κατανεμημένες στα κελιά του πλέγματος 2.

3.5 Συγκριτική μελέτη των εκπομπών για την Ελλάδα και την Αττική

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων εκπομπών για την Ελλάδα και την ΕΠΑ στην οποία συμπεριλαμβάνονται 14 ενώσεις (αέριοι ρύποι, σωματίδια και αέρια του θερμοκηπίου) καλύπτοντας όσο το δυνατόν πληρέστερα το πλήθος των ανθρωπογενών πηγών (Πίνακας 3-23).

Πίνακας 3-21. Ενώσεις που συμπεριλαμβάνονται στη βάση δεδομένων εκπομπών ανά κατηγορία πηγής.

	Οδικές μεταφορές	Αεροπορία	Ναυτιλία	Σταθερές πηγές καύσης	Βιομηχανία	Οχήματα εκτός δρόμου	Γεωργία
CO ₂	✓	✓			✓	✓	
CO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
NMVOCS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
NO _x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PM _{2.5}	✓		✓	✓		✓	✓
PM ₁₀	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
VOC	✓						
CH ₄	✓	✓			✓	✓	
NO	✓						
NO ₂	✓						
N ₂ O	✓				✓	✓	
NH ₃	✓			✓	✓	✓	
Heavy metals	✓			✓	✓		
SO _x		✓	✓	✓	✓		

Στους Πίνακες 3-22 έως 3-24 παρουσιάζονται οι ετήσιες εκπομπές CO, NO_x και PM₁₀ για την Ελλάδα ανά κατηγορία πηγής. Όσον αφορά στις εκπομπές CO τη μεγαλύτερη συνεισφορά στις συνολικές εκπομπές των ετών 2006-2010 έχουν οι οδικές μεταφορές (εύρος συνεισφοράς: 41.2-61.3%) και ακολουθούν οι εκπομπές από τις σταθερές πηγές καύσης (εύρος συνεισφοράς: 23.5-30.5%). Αξίζει να αναφερθεί ότι το ποσοστό που αντιστοιχεί στις οδικές μεταφορές σταδιακά μειώνεται ενώ το αντίστοιχο των εκπομπών από τις σταθερές πηγές καύσης αυξάνεται. Η εξέλιξη αυτή για τις οδικές μεταφορές οφείλεται αφενός στην απόσυρση των Ι.Χ. οχημάτων παλαιάς τεχνολογίας και αφετέρου στην μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και στην προσθήκη στο στόλο οχημάτων με καλύτερη τεχνολογία κινητήρα. Η οικονομική κρίση των τελευταίων ετών επηρέασε αρνητικά τις οικιακές εκπομπές καθώς η αυξανόμενη χρήση βιομάζας ως μέσω θέρμανσης από τα νοικοκυριά οδήγησε στην αύξηση των συνολικών εκπομπών CO.

Σε συμφωνία με τα συμπεράσματα της παρούσας διατριβής, οι Markakis et al. (2009) (πίνακας 3-25) διαπιστώνουν επίσης ότι η κυριότερη πηγή CO στην Ελλάδα είναι οι οδικές μεταφορές (897.5kt σε σύνολο 1,463kt CO για το έτος 2003) ενώ η συνεισφορά των οικιακών εκπομπών ανέρχεται στους 177kt ετησίως (πίνακας 3-25). Οι Progiou and Ziomas (2012) διαπιστώνουν ότι οι ετήσιες εκπομπές CO και NOx από τις οδικές μεταφορές για την Ελλάδα (έτος 2009) είναι 375.15kt και 136.46kt αντίστοιχα. Συγκρίνοντας τα δεδομένα εκπομπών του EMEP για τα έτη 2006-2010 (πίνακας 3-26) παρατηρούμε ότι οι εκπομπές CO καθορίζονται κατά κύριο λόγο από τις οδικές μεταφορές ενώ οι οικιακές εκπομπές κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα με τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής. Αύξηση των οικιακών εκπομπών παρατηρήθηκε το 2007 σε σχέση με το 2006 (EMEP: 5.27kt, διατριβή: 24.44kt) ενώ τα επόμενα έτη (2007-2010) οι εκπομπές μειώθηκαν σε ποσοστό 16.76% (EMEP), 18.91% (διατριβή).

Το είδος καυσίμου έχει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση των συνολικών εκπομπών ανά είδος ρύπου. Η βιομηχανική δραστηριότητα (παραγωγή ενέργειας και κατασκευαστικός τομέας) συνεισφέρει σημαντικά στις συνολικές εκπομπές NOx και PM₁₀ με ποσοστιαίο εύρος 40.5-46.7%, 27.0-33.7% αντίστοιχα (πίνακες 3-23, 3-24). Σχετικά με την ετήσια διακύμανση, οι εκπομπές NOx μειώθηκαν από 171.38kt το 2007 σε 108.93kt το 2011 ενώ οι εκπομπές PM₁₀ από 31.7kt το 2007 έφτασαν στους 13.0kt το 2011. Στις εκπομπές CO το ποσοστό συνεισφοράς στις συνολικές εκπομπές είναι πολύ χαμηλότερο και κυμαίνεται μεταξύ 6.41% (το έτος 2009: 31.72kt) και 8.35% (το έτος 2008: 47.71kt). Χαμηλότερες κατά 34.41kt προέκυψαν το 2007 οι εκπομπές CO στην παρούσα διατριβή σε σχέση με τις εκπομπές από τη βάση WebDab του EMEP ενώ μικρότερη είναι η διαφοροποίηση για τις εκπομπές NOx (8.47kt) και PM₁₀ (5.21kt) για το ίδιο έτος. Οι αντίστοιχες τιμές των Markakis et al. (2009) για τη βιομηχανική δραστηριότητα ήταν 83.2kt για το CO και 168kt για τα NOx.

Η συνεισφορά της εγχώριας ναυτιλίας είναι πολύ μικρή στις εκπομπές CO (0.6-0.96%) ενώ οι εκπομπές NOx παίρνουν τη μέγιστη τιμή το 2009 (34.82kt-10.63% των συνολικών εκπομπών). Αξίζει να αναφερθεί ότι η προσθήκη των εκπομπών από τη διεθνή ναυτιλία αυξάνει σημαντικά το συνολικό ποσό των εκπομπών. Ενδεικτικά το έτος 2010 οι εκπομπές CO, NOx και PM₁₀ από τη διεθνή ναυτιλία ήταν 39.01kt, 358.76kt και 1.63kt αντίστοιχα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ

Πίνακας 3-22. Εκπομπές CO (kilotonnes) για την Ελλάδα.

Έτος	Οδικές μεταφορές	Αεροπορία	Ναυσιπλοΐα (εθνικές εκπομπές)	Σταθερές πηγές καύσης	Βιομηχανία	Οχήματα εκτός δρόμου	Συνολικές εκπομπές
2006	349.55	72.04	3.75	134.00		10.96	570.30
2007	340.75	70.59	3.81	158.44	51.47	9.84	634.89
2008	316.35	55.16	3.76	138.68	47.71	9.49	571.14
2009	274.27	48.22	4.15	128.48	31.72	7.87	494.70
2010	234.80	14.80	4.03	128.48	31.63	6.93	420.67
2011		6.86	2.58	155.38	23.23	5.23	193.28
2012		6.82				0.57	7.38

Πίνακας 3-23. Εκπομπές NOx (kilotonnes) για την Ελλάδα.

Έτος	Οδικές μεταφορές	Αεροπορία	Ναυσιπλοΐα (εθνικές εκπομπές)	Σταθερές πηγές καύσης	Βιομηχανία	Οχήματα εκτός δρόμου	Αγροκτηνοτροφία	Συνολικές εκπομπές
2006	103.61	4.64	31.61	16.38		34.86	5.54	196.6
2007	106.18	4.67	32.14	15.36	171.38	31.28	6.02	367.0
2008	104.90	4.03	31.56	14.76	162.22	30.17	4.10	351.7
2009	103.20	4.10	34.82	12.70	142.82	24.97	4.92	327.5
2010	100.72	3.95	33.87	11.53	117.32	16.64	5.34	289.4
2011		3.90	23.95	12.21	108.93	22.01	4.76	175.8
2012		3.57						3.6

Πίνακας 3-24. Εκπομπές PM₁₀ (kilotonnes) για την Ελλάδα.

Έτος	Οδικές μεταφορές	Ναυσιπλοΐα (εθνικές εκπομπές)	Σταθερές πηγές καύσης	Βιομηχανία	Οχήματα εκτός δρόμου	Αγροκτηνοτροφία	Συνολικές εκπομπές
2006	4.41	1.80	27.84		1.80	0.86	36.72
2007	4.59	1.83	32.65	31.71	1.62	1.25	73.65
2008	4.47	1.78	28.55	23.36	1.56	1.24	60.97
2009	4.71	1.96	26.39	18.09	1.31	1.21	53.68
2010	4.39	1.92	26.28	13.86	1.15	3.80	51.40
2011		1.48	31.52	12.98	0.86	3.80	50.66
2012						3.72	3.73

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ

Πίνακας 3-25. Εκπομπές CO, NO_x και PM₁₀ (kilotonnes) για την Ελλάδα.(Πηγή: Markakis et al., 2009).

Markakis et al. (2009)	Οδικές μεταφορές	Ενέργεια	Ναυσιπλοΐα	Κεντρική θέρμανση	Βιομηχανία	Οχήματα εκτός δρόμου	Αγρο-κτηνοτροφία
CO	897.5	33	53.611	177	50.2	272.9	29.5
NO _x	107.6	118	283.302	11	50	398.3	
PM	11.7	39.9	19.579	17.3	72.2	30.5	6.9

Πίνακας 3-26. Εκπομπές CO (kilotonnes) για την Ελλάδα. (Πηγή: WebDab - EMEP emissions database, updated in 2012).

Έτος	Οδικές μεταφορές	Άλλες μεταφορές	Σταθερές πηγές καύσης	Βιομηχανία	Αγρο-κτηνοτροφία
2006	510.2695	8.74835	108.5649	82.01661	27.63407
2007	446.6227	8.50448	113.831	85.88643	26.92914
2008	397.6691	7.86304	102.1096	82.00502	32.40643
2009	374.8947	10.40476	99.9174	74.59167	31.058.93
2010	317.7823	8.67006	94.74988	74.66987	30.4576

Πίνακας 3-27. Εκπομπές NO_x (kilotonnes) για την Ελλάδα. (Πηγή: WebDab - EMEP emissions database, updated in 2012).

Έτος	Οδικές μεταφορές	Άλλες μεταφορές	Σταθερές πηγές καύσης	Βιομηχανία	Αγρο-κτηνοτροφία
2006	148.6781	46.64676	48.72116	169.2298	1.22591
2007	146.7246	43.99177	43.90548	179.8547	1.20487
2008	141.7181	39.85488	42.15858	168.4954	1.44686
2009	136.199	57.35897	33.8775	152.3677	1.35414
2010	103.5623	46.75378	30.30423	139.2668	1.35896

Στον πίνακα 3-28 παρουσιάζονται για οι εκπομπές για το πλέγμα χωρικής ανάλυσης 2x2km² για το έτος 2010 και τους ρύπους CO, NO_x και PM₁₀ οι οποίες είναι 179.81kt, 89.11kt και 7.00kt αντίστοιχα. Η πλειοψηφία των εκπομπών CO προέρχεται από τις οδικές μεταφορές (81.28%) και ακολουθούν οι εκπομπές από τις σταθερές πηγές καύσης (8.32%). Οι εκπομπές NO_x οφείλονται κατά κύριο λόγο στον τομέα των οδικών μεταφορών (46.54%) και της ναυτιλίας (29.32%), στον οποίο περιλαμβάνονται τα δρομολόγια από την εγχώρια και διεθνή πλεύση όλων των τύπων πλοίων, ενώ η βιομηχανική δραστηριότητα συνεισφέρει κατά 15.94%. Οι εκπομπές των σωματιδίων PM₁₀ προέρχονται κατά 45.14% από τις σταθερές πηγές καύσης, 24.86% από τις οδικές μεταφορές και κατά 13.00% από τη ναυτιλία. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής με των

Μαρκάκης, 2010 και Aleksandropoulou et al., 2011 παρατηρούμε ότι υπάρχει συμφωνία ως προς τις συνολικές εκπομπές CO ανάμεσα στην παρούσα διατριβή και τους Aleksandropoulou et al. (2011) ενώ τα αποτελέσματα του Μαρκάκης (2010) είναι σχεδόν τριπλάσια των υπολοίπων. Μεγάλη διαφοροποίηση υπάρχει στις εκπομπές από τις οδικές μεταφορές και στα οχήματα εκτός δρόμου. Όσον αφορά στις εκπομπές NOx υπάρχει συμφωνία ως προς την συνολική τιμή μεταξύ της διατριβής και του Μαρκάκης, 2010 για τις εκπομπές από τις οδικές μεταφορές, τη ναυτιλία και τις σταθερές πηγές καύσης. Οι Aleksandropoulou et al. (2011) υπολείπονται κατά 17.47kt των εκπομπών NOx της διατριβής για τις οδικές μεταφορές. Αντίθετα σχετικά κοντινές είναι οι τιμές των ετήσιων εκπομπών PM (Διατριβή: 7.00kt, Aleksandropoulou et al., 2011: 12.92kt). Ο Μαρκάκης (2010) αποδίδει μεγάλο μέρος των PM₁₀ εκπομπών στην βιομηχανία (38kt) κάτι που δεν προκύπτει από την παρούσα μελέτη (0.94kt). Τέλος, σύμφωνα με τους Progiou and Ziomas (2011) οι οδικές μεταφορές στην ΕΠΑ το 2009 ήταν 128kt πολύ κοντά στα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ

Πίνακας 3-28. Ετήσιες εκπομπές των ρύπων CO, NOx και των σωματιδίων PM₁₀ σε κιλοτόνους για την Αττική.

Ρύπος	CO			NOx			PM ₁₀		
	Διατριβή	Μαρκάκης, 2010	Aleksandropoulou, 2011	Διατριβή	Μαρκάκης, 2010	Aleksandropoulou, 2011	Διατριβή	Μαρκάκης, 2010	Aleksandropoulou, 2011
Οδικές μεταφορές	145.70	407.60	110.79	41.48	49.10	24.01	1.74	3.10	
Αεροπορία	6.34			1.81					
Ναυσιπλοΐα (εθνική και διεθνής)	3.00	3.80		26.13	21.30		0.91	1.20	
Σταθερές πηγές καύσης	14.93	55.90	25.39	2.57	3.50		3.16	5.50	
Βιομηχανία	8.45	35.00		14.20	35.80		0.94	38.00	
Οχήματα εκτός δρόμου	0.83	71.20		2.58	39.70	15.71	0.16	2.80	
Γεωργία		0.70		0.34			0.09		
Συνολικές εκπομπές	179.25	574.20	151.15	89.11	149.40	68.01	7.00	50.60	12.92

3.6 Συμπεράσματα από το κεφάλαιο 3

- Τα σημαντικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την επικαιροποίηση των δεδομένων χρήσης γης για την Αττική είναι η επέκταση του αστικού πλέγματος προς τα Μεσόγεια λόγω της βελτίωσης και της εξάπλωσης του οδικού δικτύου καθώς και η πύκνωση των δυτικών και νοτιοανατολικών προαστίων της Αθήνας.
- Οι υψηλότερες τιμές εκπομπών από τον οικιακό τομέα αντιστοιχούν στο CO και ακολουθούν τα αιωρούμενα σωματίδια, τα NMVOCs, τα NOx και το SO₂. Πολύ μικρότερες αλλά σημαντικές είναι οι συγκεντρώσεις των πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων γνωστών ως PAHs (Polycyclic aromatic hydrocarbons).
- Η ανάλυση των ετήσιων οικιακών εκπομπών ανά κατηγορία πηγής (τζάκια, σόμπες, λέβητες) επέδειξε τα τζάκια ως την κύρια πηγή για τους ρύπους CO, NMVOCs και για τα PM λόγω των πολύ υψηλών τιμών των συντελεστών εκπομπής που συνδέονται με την καύση ξύλου - καύσιμο που χρησιμοποιείται κυρίως στα τζάκια και τις σόμπες - σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους καυσίμου.
- Η μείωση στην κατανάλωση βενζίνης το 2008 και το 2010 και η επακόλουθη μείωση των ετήσιων οχηματο-χιλιομέτρων που διανύονται επηρέασαν τις εκπομπές CO, VOCs και NMVOCs. Το ποσοστό μείωσης για την Ελλάδα κατά την περίοδο 2006 - 2008 ήταν 9.5% για το CO, 7.3% για τα VOCs και 7.7% για τα NMVOCs, ενώ για την περίοδο 2006 - 2010 η μείωση ήταν 32.8%, 24.0% και 24.3%, αντίστοιχα. Επιπλέον, η εισαγωγή των νέων κινητήρων αντιρρυπαντικής τεχνολογίας (τα Euro 4 επιβατικά οχήματα τέθηκαν σε ισχύ το 2005 ενώ τα Euro 5 το 2009) επηρέασε τις εκπομπές CO, VOCs και NMVOCs καθώς το μέρος των οχημάτων με κινητήρες τελευταίας τεχνολογίας συνεχώς αυξάνεται επί του συνολικού στόλου.
- Το 40% των εθνικών εκπομπών CO₂, CO, VOC και NMVOC και το 30% των NOx και των σωματιδίων από τις οδικές μεταφορές εκπέμπονται στην Αττική.
- Τα επιβατικά οχήματα έχουν τη μεγαλύτερη συμβολή στις οδικές εκπομπές των CO, VOC, NMVOC και CO₂. Περίπου το 25% των εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα προέρχονται από βενζινοκίνητα επιβατικά οχήματα με κυβισμό 1.4-2.0lt.
- Σχετικά με την επίδραση της τεχνολογίας των κινητήρων στις εκπομπές, τα Euro 3 βενζινοκίνητα επιβατικά οχήματα θεωρούνται οι μεγαλύτεροι ρυπαντές με συνεισφορά στις εκπομπές CO 11.6% για κυβισμό 0.8 - 1.4lt και 13% για κυβισμό 1.4-2.0lt.

- Η κυκλοφορία των οχημάτων εντός του λεκανοπεδίου της Αττικής εμφανίζεται πιο πυκνή τους μήνες Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο και Σεπτέμβριο, ενώ τον Αύγουστο έχουμε μείωση αυτής λόγω των καλοκαιρινών διακοπών. Όσον αφορά στα ημερήσια προφίλ υπάρχει εμφανής διαφορά μεταξύ των καθημερινών και του Σαββατοκύριακου.
- Κατασκευάστηκαν περιοχικά χρονικά προφίλ διαχωρισμού των εκπομπών από τις οδικές μεταφορές για την Αττική τα οποία προέκυψαν από ωριαία δεδομένα κυκλοφοριακών φόρτων από κεντρικούς οδικούς άξονες του λεκανοπεδίου και αφορούν την περίοδο μελέτης 2006-2010. Τα συγκεκριμένα δεδομένα δίνουν τη δυνατότητα δημιουργίας πολλαπλών εξειδικευμένων χρονικών συντελεστών ανά έτος, ημέρα και ώρα.
- Όσον αφορά τις εκπομπές από την αεροπορία, η σύγκριση των ετήσιων τιμών των ρύπων CO, NO_x, NMVOC, SO₂ και PM_{2.5} ανέδειξε την επικράτηση του CO έναντι των υπολοίπων αλλά και τη μείωση των ετήσιων εκπομπών από το 2007 και μετά. Η ποσοστιαία διαφορά από το 2006 ως το 2012 ήταν 90% για το CO, 23% για τα NO_x, 47% για τα NMVOCs, 26% για το SO₂ και 65% για τα PM_{2.5}. Γενικά το 2008 παρατηρήθηκε μείωση του αριθμού των πτήσεων η οποία εντάθηκε μετά το 2009 λόγω συγχωνεύσεων των ελληνικών αεροπορικών εταιριών με συνέπεια την κατάργηση ή συγχώνευση πολλών δρομολογίων (25% μείωση στις εθνικές πτήσεις από το 2009 μέχρι το 2012).
- Στον τομέα των θαλάσσιων μεταφορών υπερτερούν οι εκπομπές των NO_x με αυτές των SO_x να ακολουθούν λόγω της χρήσης πετρελαίου ως κύριο καύσιμο.
- Μεταξύ των λιμανιών οι περισσότερες εκπομπές εκλύονται στον Πειραιά (13.5% και 13.9% επί του συνόλου των εκπομπών NO_x και SO_x αντίστοιχα για το έτος 2010) καθώς αυτό αποτελεί το μεγαλύτερο επιβατικό και εμπορικό λιμάνι της χώρας. Ακολουθούν τα λιμάνια της Ηγουμενίτσας, του Περάματος και των Παλουκιών Σαλαμίνας με ποσοστά 8.7%, 5.6% και 5.5% επί του συνόλου των εκπομπών NO_x και 8.8% , 5.7% και 5.6% επί του συνόλου των εκπομπών SO_x για το έτος 2010.
- Καθοριστικός παράγοντας για το ποσοστό των ρύπων και των PM που εκπέμπονται σε κάθε λιμάνι είναι η κίνηση των επιβατικών πλοίων γι' αυτό και τα λιμάνια με την μεγαλύτερη επιβατική κίνηση (Πειραιάς, Πέραμα, Παλούκια Σαλαμίνας και Ηγουμενίτσα) παρουσιάζονται πιο επιβαρυμένα και ακολουθεί ως βασικός παράγοντας η ισχύς της μηχανής του εκάστοτε πλοίου.
- Όσον αφορά τις εκπομπές οι εκπομπές των οχημάτων εκτός δρόμου εκείνες των NO_x υπερσχύουν των υπολοίπων λόγω της χρήσης του πετρελαίου κίνησης ως το κυρίως καύσιμο από τα συγκεκριμένα οχήματα. Ακολουθούν οι εκπομπές CO με πολύ μικρότερο ποσοστό συνεισφοράς στο σύνολο των εκπομπών. Σημαντική είναι η μείωση (περίπου 52%)

που διαπιστώνεται από το 2006 μέχρι το 2011 για όλους τους ρύπους η οποία οφείλεται στη συνεχόμενη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου από τα συγκεκριμένα οχήματα.

- Στην Αττική εκλύεται το 2010 το 11.7% (2,575tn), 12.0% (834tn), 12.2% (262tn) και το 13.6% (156tn) των συνολικών εθνικών εκπομπών NO_x, CO, NMVOC και PM₁₀ αντίστοιχα από τα οχήματα εκτός δρόμου.
- Το μεγαλύτερο μέρος των εκπομπών από τη βιομηχανική δραστηριότητα οφείλεται σε εκπομπές SO_x (417.32ktn – 61.56% το 2007) και ακολουθούν σε μικρότερα ποσοστά οι εκπομπές NO_x (171.38tn – 25.28% το 2007), CO (51.47ktn – 7.59% το 2007) και PM₁₀ (31.71ktn – 4.68% το 2007). Πολύ μικρότερα είναι τα ποσοστά που αντιστοιχούν στις εκπομπές NH₃.
- Οι εκπομπές από τη βιομηχανική δραστηριότητα ακολούθησαν πτωτικές τάσεις την περίοδο 2007-2011. Συγκεκριμένα η μεταβολή των εκπομπών SO_x από το 2007 μέχρι το 2011 ήταν 295,670tn (70.85%) ενώ για τις εκπομπές των NO_x σημειώθηκε μείωση κατά 62,450tn (36.44%). Οι εκπομπές PM₁₀ από 31.7kt το 2007 έφτασαν στους 13.0kt το 2011.
- Οι εκπομπές της NH₃ υπερτερούν των υπολοίπων εκπομπών για την κατηγορία SNAP10 και η διαχείριση της κοπριάς καθορίζει το σύνολο αυτών.
- Η συγκριτική μελέτη της συνεισφοράς των διαφορετικών πηγών στις συνολικές εκπομπές ανέδειξε ότι στις εκπομπές CO τη μεγαλύτερη συνεισφορά στις συνολικές εκπομπές των ετών 2006-2010 έχουν οι οδικές μεταφορές (εύρος συνεισφοράς: 41.2-61.3%) και ακολουθούν οι εκπομπές από τις σταθερές πηγές καύσης (εύρος συνεισφοράς: 23.5-30.5%). Το ποσοστό που αντιστοιχεί στις οδικές μεταφορές σταδιακά μειώνεται ενώ το αντίστοιχο των εκπομπών από τις σταθερές πηγές καύσης αυξάνεται λόγω της αυξανόμενης χρήσης βιομάζας ως μέσω θέρμανσης από τα νοικοκυριά.
- Η βιομηχανική δραστηριότητα (παραγωγή ενέργειας και κατασκευαστικός τομέας) συνεισφέρει σημαντικά στις συνολικές εκπομπές NO_x και PM₁₀ με ποσοστιαίο εύρος 40.5-46.7%, 27.0-33.7% αντίστοιχα. Στις εκπομπές CO το ποσοστό συνεισφοράς στις συνολικές εκπομπές είναι πολύ χαμηλότερο και κυμαίνεται μεταξύ 6.41% (το έτος 2009: 31.72kt) και 8.35% (το έτος 2008: 47.71kt).
- Η συνεισφορά της εγχώριας ναυτιλίας είναι πολύ μικρή στις εκπομπές CO (0.6-0.96%) ενώ οι εκπομπές NO_x παίρνουν τη μέγιστη τιμή το 2009 (34.82kt-10.63% των συνολικών εκπομπών). Η προσθήκη των εκπομπών από τη διεθνή ναυτιλία αυξάνει σημαντικά το συνολικό ποσό των εκπομπών. Ενδεικτικά το έτος 2010 οι εκπομπές CO, NO_x και PM₁₀ από τη διεθνή ναυτιλία ήταν 39.01kt, 358.76kt και 1.63kt αντίστοιχα.

- Οι εκπομπές για το πλέγμα χωρικής ανάλυσης $2 \times 2 \text{ km}^2$ για το έτος 2010 και τους ρύπους CO, NOx και PM₁₀ είναι 179.81kt, 89.11kt και 7.00kt αντίστοιχα. Η πλειοψηφία των εκπομπών CO προέρχεται από τις οδικές μεταφορές (81.28%) και ακολουθούν οι εκπομπές από τις σταθερές πηγές καύσης (8.32%). Οι εκπομπές NOx οφείλονται κατά κύριο λόγο στον τομέα των οδικών μεταφορών (46.54%) και της ναυτιλίας (29.32%), στον οποίο περιλαμβάνονται τα δρομολόγια από την εγχώρια και διεθνή πλεύση όλων των τύπων πλοίων, ενώ η βιομηχανική δραστηριότητα συνεισφέρει κατά 15.94%. Οι εκπομπές των σωματιδίων PM₁₀ προέρχονται κατά 45.14% από τις σταθερές πηγές καύσης, 24.86% από τις οδικές μεταφορές και κατά 13.00% από τη ναυτιλία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

4.1 Περιγραφή του φωτοχημικού μοντέλου CAMx

Το CAMx (Comprehensive Air quality Model with extensions) είναι ένα Ουλεριανό (Eulerian) φωτοχημικό μοντέλο διασποράς αέριων και σωματιδιακών ρύπων (όζον, PM_{2.5}, PM₁₀, VOCs, NOx, υδράργυρος, τοξικά αέρια) με το οποίο μπορούμε να έχουμε ολοκληρωμένη εκτίμηση της αέριας ρύπανσης, σε διάφορες χωρικές κλίμακες, (τοπική έως ηπειρωτική). Πρόκειται για έναν ολοκληρωμένο, ευέλικτο και ελεύθερα διαθέσιμο κώδικα ανεπτυγμένο σε γλώσσα FORTRAN. Οι διαδικασίες της εκπομπής, διασποράς, χημικού μετασχηματισμού και απομάκρυνσης των ρύπων στην τροπόσφαιρα προσομοιώνονται με την επίλυση της εξίσωσης της συνέχειας για κάθε χημικό στοιχείο σε πλέγμα κυψελίδων τριών διαστάσεων. Η Ουλεριανή εξίσωση συνέχειας περιγράφει την χρονική εξάρτηση της μέσης συγκέντρωσης (C_i) κάθε στοιχείου μέσα στον όγκο της κάθε κυψελίδας του πλέγματος ως άθροισμα όλων των φυσικών και χημικών διαδικασιών που γίνονται στον όγκο αυτό. Η εξίσωση αυτή έχει την παρακάτω μαθηματική μορφή:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -\nabla_H \cdot V_H c_i + \left[\frac{\partial(c_i n)}{\partial z} - c_i \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right) \right] + \nabla \cdot \rho K \nabla (c_i / \rho) + \frac{\partial c_i}{\partial t} \Big|_{Chemistry} + \frac{\partial c_i}{\partial t} \Big|_{Emission} + \frac{\partial c_i}{\partial t} \Big|_{Removal}$$

Όπου V_H είναι η οριζόντια συνιστώσα του ανέμου, n ο καθαρός ρυθμός κατακόρυφης εισόδου, h το ύψος του κατακόρυφου επιπέδου, ρ είναι η ατμοσφαιρική πυκνότητα και K ο συντελεστής τυρβώδους διάχυσης. Ο πρώτος όρος στα δεξιά της εξίσωσης εκφράζει την οριζόντια μεταφορά, ο

δεύτερος όρος την καθαρή κατακόρυφη μεταφορά στο χώρο και στον χρόνο, ενώ ο τρίτος αναφέρεται στην τυρβώδη διάχυση. Οι χημικές διεργασίες επεξεργάζονται με την ταυτόχρονη επίλυση μιας ομάδας εξισώσεων χημικών αντιδράσεων καθορισμένων από ειδικούς χημικούς μηχανισμούς. Η απομάκρυνση των ρύπων περιλαμβάνει τόσο την ξηρή όσο και την υγρή εναπόθεση.

Οι προσομοιώσεις είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν σε τρία προβολικά συστήματα: Universal Transverse Mercator, Rotated Polar Stereographic και Lambert Conic Conformal, το τελευταίο εκ των οποίων έχει επιλεγεί για την παρούσα διατριβή. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα να λειτουργήσει σε πλέγμα γεωδαιτικού γεωγραφικού πλάτους-μήκους (geodetic latitude/longitude grid system). Η κατακόρυφη διάρθρωση του πλέγματος καθορίζεται από εξωτερικούς παράγοντες (π.χ. από τα μετεωρολογικά δεδομένα εισόδου), έτσι ώστε τα ύψη των διεπιφανειών των κατακόρυφων στρωμάτων να μπορούν να καθοριστούν αυθαίρετα ως συναρτήσεις του χώρου ή/και του χρόνου. Αυτή η ευελιξία επιλογής των οριζόντιων και κατακόρυφων δομών των κελιών έχει ως αποτέλεσμα το μοντέλο να μπορεί να διαμορφωθεί κατάλληλα ώστε το πλέγμα του να είναι παρόμοιο με το πλέγμα οποιουδήποτε μετεωρολογικού μοντέλου που χρησιμοποιείται για να παρέχει τα δεδομένα εισόδου.

Από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του CAMx είναι η δυνατότητα χρήσης πολλαπλών πλεγμάτων ιδιαίτερα εσωτερικών με στόχο την μελέτη συγκεκριμένων περιοχών ενδιαφέροντος ταυτόχρονα σε μία προσομοίωση. Απαραίτητα προϋπόθεση είναι η χωρική ανάλυση των εσωτερικών πλεγμάτων να αποτελεί κλάσμα της χωρικής ανάλυσης του μητρικού πλέγματος. Επιπλέον παρέχεται η δυνατότητα επιλογής μεταξύ διαφορετικών χημικών μηχανισμών για αέριες και σωματιδιακές ενώσεις (χημεία δεσμού άνθρακα - CB - και χημικός μηχανισμός SAPRC99) οι οποίοι θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Επιπροσθέτως, δίνεται η δυνατότητα χρήσης συμπληρωματικών προγραμμάτων για πιο εστιασμένη μελέτη των παραμέτρων που επιδρούν στις συγκεντρώσεις των ρύπων όπως είναι οι πρόδρομες ενώσεις, συγκεκριμένες περιοχές του πλέγματος (Ozone and Particulate Source Apportionment Technology - OSAT/PSAT) καθώς και για ελέγχους ευαισθησίας των φυσικών και χημικών διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης (Process Analysis tool).

Μερικά από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά που έχει το CAMx είναι:

- Η χρήση πολλαπλών πλεγμάτων. Αρχικά υπάρχει το μητρικό πλέγμα, το οποίο καλύπτει μια μεγαλύτερη περιοχή από αυτή που μας ενδιαφέρει για την οποία δεν απαιτείται

μεγαλύτερη ανάλυση. Μέσα στο μητρικό πλέγμα εισάγονται ένα ή περισσότερα μικρότερης έκτασης και καλύτερης ανάλυσης πλέγματα προκειμένου να μειωθούν οι επιπτώσεις των οριακών συνθηκών στην περιοχή μελέτης (εσωτερικό πλέγμα).

- Η ευελιξία των πλεγμάτων. Ο χρήστης μπορεί να εισάγει/εξάγει κάποιο πλέγμα σε οποιοδήποτε στάδιο της προσομοίωσης. Κατά την επανεκκίνηση, το CAMx έχει την ικανότητα να αναγνωρίζει τις όποιες αλλαγές.
- Διαφορετικοί φωτοχημικοί μηχανισμοί και μηχανισμοί χημείας αέριας φάσης που διαθέτει (όπως SAPRC, CB IV, κα),
- Η επεξεργασία των PM.
- Η χημεία υδραργύρου.
- Η δυνατότητα που παρέχεται στο χρήστη για καθορισμό δικού του χημικού μηχανισμού.
- Η επιλογή της επίλυσης των εξισώσεων της χημικής κινητικής καθώς και της οριζόντιας μεταφοράς.

4.1.1 Αριθμητική προσέγγιση

Τα δεδομένα εισόδου που είναι απαραίτητα για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων με το CAMx αφορούν δεδομένα που καθορίζουν τον χημικό μηχανισμό και περιγράφουν τις φωτοχημικές συνθήκες, τα μετεωρολογικά δεδομένα, τη χρήση γης και τους ρυθμούς εκπομπών καθώς και τις αρχικές και οριακές συνθήκες. Οι αναπαραστάσεις των φυσικών διεργασιών και οι αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης που χρησιμοποιούνται από το μοντέλο για κάθε όρο της εξίσωσης της συνέχειας που αναφέρθηκε προηγουμένως, συνοψίζονται στον πίνακα 4-1.

Η εξίσωση συνέχειας επιλύεται χρονικά μπροστά στο χρόνο από μια σειρά χρονικών βημάτων. Σε κάθε βήμα η εξίσωση συνέχειας αντικαθιστάται από μια μέθοδο διαχωρισμού η οποία υπολογίζει τη συνεισφορά κάθε κύριας διαδικασίας (εκπομπή, διασπορά, διάχυση, χημεία και μεταφορά) στην αλλαγή της συγκέντρωσης σε κάθε κυψέλη του πλέγματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

Πίνακας 4-1. Σύνοψη των μεθόδων που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο CAMx για τις βασικές φυσικές διεργασίες (Πηγή: Environ, 2014).

Διεργασίες	Φυσικά μοντέλα	Αριθμητικές μέθοδοι
Οριζόντια μεταφορά/διάχυση	Εξίσωση συνέχειας κατά Euler με βάση την Κ θεωρία	Bott ή PPM για μεταφορά, αναλυτική (explicit) διάχυση
Κατακόρυφη μεταφορά/διάχυση	Εξίσωση συνέχειας κατά Euler με βάση την Κ θεωρία	Πεπλεγμένη (implicit) μεταφορά και διάχυση
Χημεία αέριας φάσης	Μηχανισμοί Carbon Bond IV ή SAPRC99	Επίλυση με τη χρήση των CMC solver, IEH solver, ή LSODE της ENVIRON
Χημεία αερολυμάτων	Θερμοδυναμική/Χημεία υγρών και ξηρών ανόργανων και οργανικών ουσιών. Στατικό μοντέλο δύο μεγεθών ή εναλλασσόμενο πολλαπλών μεγεθών	RADM-AQ, ISORROPIA, SOAP, CMU sectional model
Ξηρή εναπόθεση	Διαχωρισμένα μοντέλα αντίστασης για αέρια και αερολύματα	Ταχύτητα εναπόθεσης ως επιφανειακή οριακή συνθήκη για κατακόρυφη διάχυση
Υγρή εναπόθεση	Διαχωρισμένα μοντέλα υγρής φάσης για αέρια και αερολύματα	Αναρρόφηση ως συνάρτηση του ρυθμού βροχόπτωσης, του νεφικού περιεχομένου σε νερό, της διαλυτότητας και διάχυσης των αερίων και του μεγέθους των σωματιδίων

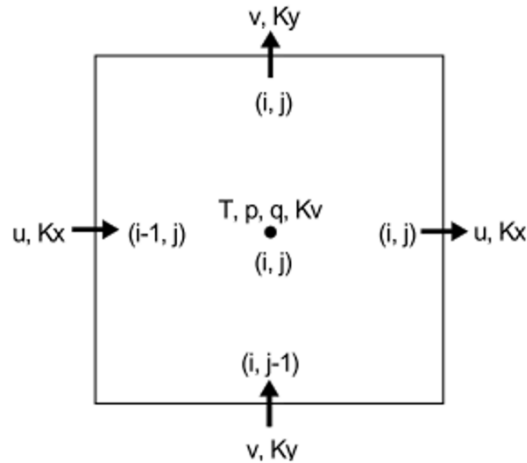
Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης καθορίζεται ένα χρονικό βήμα για το μοντέλο εσωτερικά για το μητρικό πλέγμα. Το χρονικό βήμα προσομοίωσης κυμαίνεται από 5-15 λεπτά για κελί μεγέθους 10-50km, μέχρι 1 λεπτό ή λιγότερο για κελιά μικρότερα από 1-2km. Η πρώτη διεργασία σε κάθε χρονικό βήμα για ένα δεδομένο πλέγμα είναι η εισαγωγή των εκπομπών από όλες τις πηγές. Στη συνέχεια το CAMx εκτελεί οριζόντια και κατακόρυφη μεταφορά, ακολουθούμενη από οριζόντια και κατακόρυφη διάχυση, χημεία και τέλος, υγρή εναπόθεση. Οι αέριες ενώσεις και τα σωματίδια απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα μέσω της εναπόθεσης στο έδαφος. Η ξηρή εναπόθεση αναφέρεται στην άμεση καθίζηση και/ή διάχυση της ουσίας σε διάφορες επιφάνειες και στην επίγεια πρόσληψη αυτής από έμβιους οργανισμούς. Η υγρή εναπόθεση αναφέρεται στην πρόσληψη του υλικού από κάποιο σύννεφο, υδρατμό ή σταγόνα βροχής και στη μετέπειτα μεταφορά του στην επιφάνεια. Η αποτελεσματικότητα με την οποία οι

δύο παραπάνω διεργασίες εναπόθεσης μπορούν να απομακρύνουν τους ρύπους από τον αέρα εξαρτάται από τις φυσικές και χημικές ιδιότητες των ρύπων, τις τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες, το είδος της επιφάνειας επί της οποίας εναποτίθενται, καθώς και τη συχνότητα, τη διάρκεια και την ένταση των βροχοπτώσεων. Η ξηρή εναπόθεση είναι ένας σημαντικός μηχανισμός απομάκρυνσης ουσιών, αλλά δεν αντιμετωπίζεται ως ξεχωριστή διεργασία κατά τη διάρκεια του κάθε χρονικού βήματος. Αντ' αυτού, οι ταχύτητες εναπόθεσης για κάθε χημική ένωση χρησιμοποιούνται ως οι κατώτερη οριακή συνθήκη για την κατακόρυφη διάχυση. Με αυτό τον τρόπο αντιμετωπίζεται η εναπόθεση των ρύπων στο έδαφος για κάθε στήλη κελιών μέσω της διαδικασίας κατακόρυφης ανάμιξης.

4.1.2 Διαμόρφωση του πλέγματος του CAMx

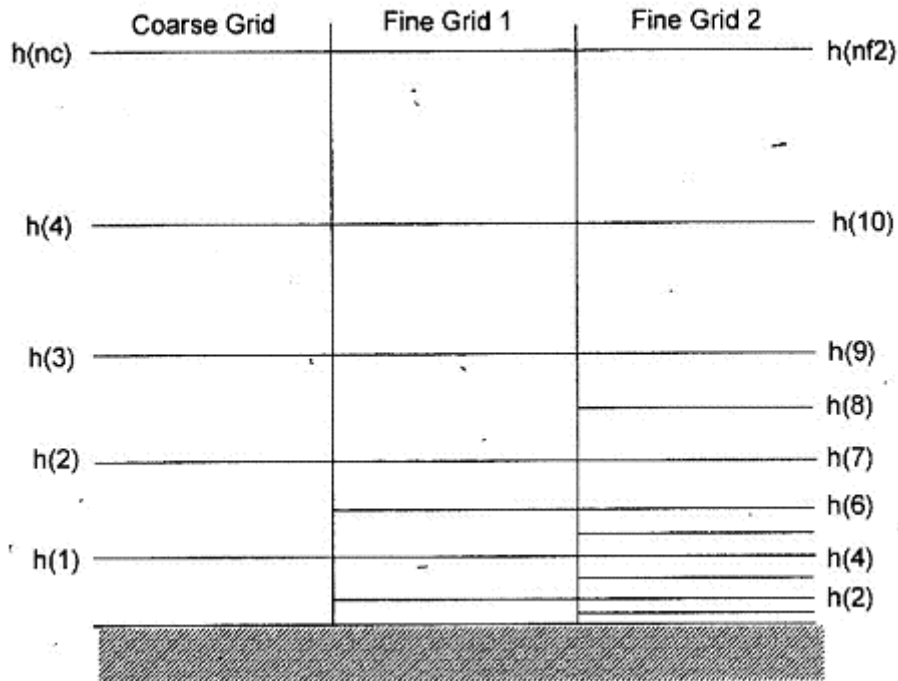
4.1.2.1 Οργάνωση της κυψελίδας του πλέγματος

Το CAMx υπολογίζει τη μέση συγκέντρωση των ρύπων στο κέντρο του όγκου κάθε κελιού. Τα μετεωρολογικά πεδία παρέχονται στο μοντέλο για τον καθορισμό της κατάστασης της ατμόσφαιρας σε κάθε κελί, απαραίτητη διεργασία για τον υπολογισμό των διαδικασιών μεταφοράς, χημείας και απομάκρυνσης. Το μοντέλο κρατά εσωτερικά αυτές τις μεταβλητές σε μια διαμόρφωση πλέγματος γνωστή ως «Arakawa C», όπως αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα 4-1. Μεταβλητές όπως η πίεση, η θερμοκρασία, η τάση ατμών, η συγκέντρωση νεροσταγόνων (cloud water), τοποθετούνται στο κέντρο των κελιών μαζί με την συγκέντρωση των ρύπων και αντιπροσωπεύουν τη μέση κατάσταση του κάθε κελιού. Στο κέντρο επομένως του κελιού το μοντέλο λύνει τις στατικές μεταβλητές, δηλαδή την μέση (average) κατάσταση. Οι συνιστώσες του ανέμου και οι συντελεστές διάχυσης τοποθετούνται στα πλευρικά όρια του κελιού για να περιγράψουν τη μεταφορά μάζας μέσα και έξω από αυτό. Άρα στα πλευρικά όρια τοποθετούνται τα μεγέθη που μεταφέρονται από το ένα κελί στο επόμενο.



Σχήμα 4-1. Οριζόντια αναπαράσταση του πλέγματος Arakawa C που χρησιμοποιείται από το CAMx (Πηγή: Environ, 2014).

Το σχήμα 4-1 περιγράφει επίσης την οριζόντια διάδοση των δεικτών που χρησιμοποιούνται στο CAMx. Κάθε κελί καθορίζεται από τους δείκτες (i, j) , όπου το i παίρνει τιμές από 1 μέχρι n_x (όπου n_x ο αριθμός των κελιών σε διεύθυνση ανατολής-δύσης), ενώ το j παίρνει τιμές από 1 ως n_y (όπου n_y ο αριθμός των κυψελίδων σε διεύθυνση βορρά-νότου). Κατακόρυφα, οι περισσότερες μεταβλητές παρέχονται στη μέση κάθε επιπέδου, η οποία καθορίζεται ως η μισή απόσταση μεταξύ των άκρων των επιπέδων. Οι μεταβλητές, ωστόσο, που περιγράφουν τον ρυθμό μεταφοράς της μάζας κατά μήκος των πλευρικών ορίων των επιπέδων παρέχονται στο κέντρο κάθε κυψελίδας οριζόντια αλλά τοποθετούνται στο πάνω κατακόρυφο όριο του επιπέδου (σχήμα 4-2).

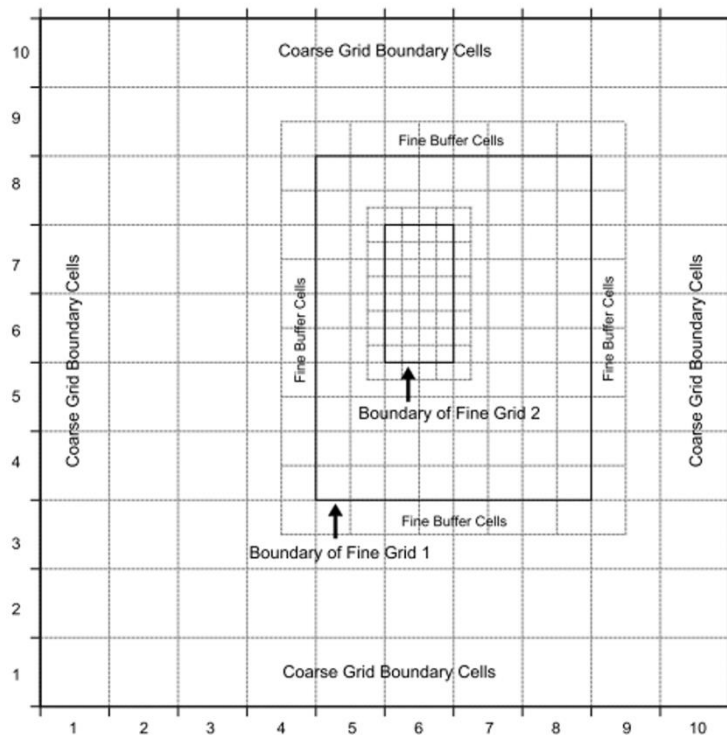


Σχήμα 4-2. Σχηματική παρουσίαση του κατακόρυφου πλέγματος και των κυψελίδων του CAMx. Τα δύο χαμηλότερα κύρια επίπεδα χωρίζονται σε τέσσερα ενδιάμεσα στο Fine Grid 1 και τα πέντε χαμηλότερα επίπεδα του Fine Grid 1 χωρίζονται σε εννέα επίπεδα στο Fine Grid 2 (Πηγή: Environ, 2014).

4.1.2.2 Πλέγμα των κυψελίδων

Το μοντέλο διαθέτει πλέγμα κελιών δύο κατευθύνσεων, που σημαίνει ότι η πληροφορία για τη συγκέντρωση των ρύπων διαδίδεται μέσα και έξω από όλα τα κελιά κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Οποιοσδήποτε αριθμός εσωτερικών πλεγμάτων μπορεί να καθοριστεί σε κάθε ξεχωριστό τρέξιμο του μοντέλου χωρίς να υπάρχει απαραίτητα αναλογία μεταξύ τους σχετικά με τη χωρική ανάλυση αρκεί όλα τα πλέγματα (εξωτερικό/μητρικό και εσωτερικά) να έχουν την ίδια κατακόρυφη δομή και η χωρική ανάλυση του εξωτερικού πλέγματος να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του εκάστοτε εσωτερικού πλέγματος (αναφέρεται ως «meshing factor»).

Δηλαδή κάθε εσωτερικό πλέγμα καθορίζεται από κελιά μικρότερου μεγέθους από το εξωτερικό τα οποία όμως στο σύνολό τους πρέπει να απαρτίζουν ένα κελί εξωτερικού πλέγματος, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4-3. Η εμβέλεια της κύριας σειράς και στήλης κελιών που καθορίζει την έκταση κάθε πλέγματος ορίζεται στο αρχείο run control. Κυψελίδες «buffer» προστίθενται περιμετρικά κάθε πλέγματος για τον καθορισμό των οριακών συνθηκών. Οι κυψελίδες αυτές προστίθενται αυτόματα στο CAMx και δεν χρειάζεται να καθοριστούν από το χρήστη (Σχήμα 4-3).



Σχήμα 4-3. Ένα παράδειγμα οριζόντιου πλέγματος, το οποίο παριστάνει δύο μικρότερα πλέγματα μέσα στο κυρίως πλέγμα διαστάσεων 10 x 10. Το εξωτερικό πλέγμα περιέχει 10×12 κελιά και το εσωτερικό πλέγμα περιέχει 6×10 κελιά (Πηγή: Environ, 2014).

4.1.3 Διαχείριση των εκπομπών

Οι εκπομπές των ρύπων αντιμετωπίζονται με δύο τρόπους μέσα στο CAMx:

- Επιφανειακές (gridded) εκπομπές, οι οποίες εκπέμπονται μέσα στο κατώτερο (επιφανειακό) στρώμα του μοντέλου. Αυτές αντιπροσωπεύουν πηγές που εκπέμπουν κοντά στην επιφάνεια και η εκπομπή των ρύπων δεν είναι τόσο ισχυρή ώστε να φτάσει στα ανώτερα στρώματα του μοντέλου. Τέτοιες είναι οι εκπομπές από σημειακές πηγές με χαμηλή καμινάδα, κινητές πηγές (αυτοκίνητα, φορτηγά, οχήματα εκτός δρόμου), οικιακές πηγές (θέρμανση, μαγείρεμα), επιχειρήσεις (π.χ. φούρνους, καθαριστήρια, βενζινάδικα), βιογενείς εκπομπές και εκπομπές από φυσικά αίτια (π.χ. φωτιές).
- Σημειακές εκπομπές με έντονη ανύψωση πλουμίου (elevated point emissions), οι οποίες μπορεί να εκπέμπονται σε οποιοδήποτε στρώμα του μοντέλου. Εδώ οι ρύποι εκπέμπονται

από ξεχωριστές καμινάδες οι οποίες σχεδόν πάντα συνδέονται με μεγάλες βιομηχανικές μονάδες όπως εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, χυτήρια, διυλιστήρια, μεγάλα εργοστάσια. Η χωρική διανομή αυτών των εκπομπών δίνεται από τις συντεταγμένες της καμινάδας (η τοποθέτηση στο αντίστοιχο κελί γίνεται μέσα στο CAMx). Η ανύψωση του πλουμίου καθορίζεται μέσα στο μοντέλο ως συνάρτηση των χαρακτηριστικών της καμινάδας (ύψος, διάμετρος, ταχύτητα εξόδου και θερμοκρασία) καθώς και των μετεωρολογικών συνθηκών του περιβάλλοντος. Στην συγκεκριμένη κατηγορία συμπεριλαμβάνονται και φυσικές εκπομπές οι οποίες μπορούν να δώσουν ανυψωμένο πλούμιο όπως είναι μεγάλες πυρκαγιές.

Κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις εκπομπών πρέπει να παρέχεται σε ξεχωριστά αρχεία εισόδου στο CAMx.

4.1.4 Βασικές αρχές μεταφοράς

Ο αλγόριθμος μεταφοράς του CAMx βασίζεται στην αρχή διατήρησης μάζας και ορμής, είναι δηλαδή «*mass conservative*» και «*mass consistent*». Ο πρώτος όρος αναφέρεται στην ικανότητα του μοντέλου να υπολογίζει με ακρίβεια όλες τις πηγές και τις καταβόθρες μάζας, χωρίς να υπάρχει κέρδος ή έλλειμμα μάζας κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Το CAMx διατηρεί εσωτερικά τις συγκεντρώσεις κάθε ουσίας ως πυκνότητα ($\mu\text{mol}/\text{m}^3$ για τις αέριες ενώσεις και $\mu\text{g}/\text{m}^3$ για τα αερολύματα). Ο δεύτερος όρος αναφέρεται στην ικανότητα του μοντέλου να μεταφέρει τη μάζα του ρύπου επακριβώς στο πεδίο εισόδου της ατμοσφαιρικής ορμής. Για παράδειγμα ένα μοντέλο που είναι ακριβώς *mass consistent* θα διατηρήσει έναν ενιαίο ρυθμό ανάμειξης ρυπαντών δίνοντας ενιαίες οριακές και αρχικές συνθήκες και μηδενικές πηγές και καταβόθρες. Υπάρχουν ωστόσο διάφορες αιτίες οι οποίες μειώνουν την ικανότητα των μοντέλων ποιότητας αέρα να είναι *mass consistent*, η κυριότερη εκ των οποίων είναι η χρήση δεδομένων εισόδου από μη ελεγμένα μετεωρολογικά μοντέλα. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται προηγμένα μετεωρολογικά μοντέλα όπως τα MM5, RAMS και WRF έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι ασυνέπειες και η μετάφραση των δεδομένων για χρήση από το CAMx να απαιτεί όσο το δυνατόν λιγότερη επεξεργασία. Στην περίπτωση που ο χρήστης χρησιμοποιήσει ως δεδομένα εισόδου για το μοντέλο μετρήσεις από ραδιοβολίσεις θα παρουσιαστούν σημαντικά προβλήματα κατά το τρέξιμο του μοντέλου διότι οι μετρήσεις δεν θα συγχρονίζονται με το μοντέλο.

Αξίζει να αναφερθεί ότι το CAMx διαθέτει μεγάλη ευελιξία η οποία επιτρέπει το πλέγμα του μοντέλου να διαφέρει από εκείνο του μετεωρολογικού μοντέλου όσον αφορά στην ανάλυση και το μέγεθος. Αυτό βέβαια οδηγεί στην εμφάνιση σφαλμάτων, τα οποία το CAMx προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει με τους εξής τρόπους:

- Οι εξισώσεις μεταφοράς γράφονται και λύνονται μέσα και έξω από κάθε κυψελίδα. Τα μετεωρολογικά δεδομένα εισόδου γράφονται σε διαμόρφωση «Arakawa C», η οποία βελτιώνει τον υπολογισμό των αποκλίσεων της ροής της μάζας ενώ παράλληλα εξασφαλίζει τη διατήρηση της μάζας.
- Το CAMx μπορεί να δέχεται μετεωρολογικά πεδία εισόδου (οριζόντιες συνιστώσες ανέμου, πίεση, θερμοκρασία, υγρασία, συντελεστές κατακόρυφης διάχυσης) για κάθε ξεχωριστό πλέγμα, αν αυτά είναι διαθέσιμα από κάποιο μετεωρολογικό μοντέλο. Μ' αυτό τον τρόπο μειώνονται τα λάθη που προκύπτουν λόγω εσωτερικών παρεμβολών από το εξωτερικό/μητρικό στα εσωτερικά πλέγματα.
- Το σημαντικότερο είναι ότι τα πεδία της οριζόντιας ορμής χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν το πεδίο της κατακόρυφης ταχύτητας το οποίο εξισορροπεί την τοπική εξίσωση συνέχειας κάθε ξεχωριστού κελιού. Εφόσον η δομή των κατακόρυφων κελιών καθορίζεται από εξωτερικά δεδομένα εισόδου τα όρια των κατακόρυφων στρωμάτων μπορούν να καθορίζονται ακριβώς ως οποιαδήποτε αυθαίρετη συνάρτηση του χώρου ή/και του χρόνου. Αυτό επιτρέπει το κατακόρυφο πλέγμα των κελιών του CAMx να ταιριάζει με όλες τις δομές των κατακόρυφων στρωμάτων του μετεωρολογικού μοντέλου, είτε αυτές καθορίζονται με όρους φυσικού ύψους πάνω από το έδαφος, είτε ως κανονικοποιημένες συντεταγμένες ύψους σ_z (π.χ. «sigma-z») είτε ως κανονικοποιημένες συντεταγμένες πίεσης σ_p (π.χ. «sigma – p»). Ο συνολικός ρυθμός κατακόρυφης μεταφοράς ονομάζεται ρυθμός κατακόρυφης εισόδου (entrainment rate) η και ορίζεται ως ο συνδυασμός της καθαρής κατακόρυφης ταχύτητας w και της τοπικής χρονικής μεταβολής των διεπιφανειών των κατακόρυφων στρωμάτων:

Το προφίλ της κατακόρυφης ταχύτητας σε κάθε χρονικό βήμα του μοντέλου καθορίζεται από την κατακόρυφη ολοκλήρωση της εξίσωσης συνέχειας:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot \rho V$$

δηλαδή:

$$\rho w(z) = - \int_0^z \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla_H \cdot \rho V_H \right) dz$$

όπου η χρονική μεταβολή της ατμοσφαιρικής πυκνότητας ρ σε κάθε κυψέλη του πλέγματος είναι γνωστή από τα μετεωρολογικά πεδία που εισέρχονται στο μοντέλο. Με αυτή την προσέγγιση δημιουργείται ένα προφίλ κατακόρυφης ταχύτητας που παρέχει ισορροπία μεταξύ της εισερχόμενης τάσης της ατμοσφαιρικής πυκνότητας και της επιλυόμενης οριζόντιας απόκλισης ορμής σε κάθε κυψέλη του πλέγματος, σε κάθε χρονικό βήμα. Αυτή η κατακόρυφη ταχύτητα χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της κατακόρυφης μεταφοράς όλων των ρύπων.

- Ο τέταρτος τρόπος που επιτυγχάνεται η διατήρηση της μάζας είναι ο υπολογισμός της απόκλισης της οριζόντιας ροής ατμοσφαιρικής πυκνότητας με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει συνέπεια με τη διαδικασία οριζόντιας μεταφοράς των ρύπων. Η οριζόντια μεταφορά της ατμοσφαιρικής πυκνότητας μέσα και έξω από μια κυψέλη του πλέγματος ακολουθεί την ίδια εξίσωση με τους ρύπους:

$$\nabla_H \cdot \rho V_H = \frac{m^2}{A_{yz}} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u A_{yz} \rho}{m} \right) + \frac{m^2}{A_{xz}} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v A_{xz} \rho}{m} \right)$$

4.1.4 Χημικοί μηχανισμοί

Οι χημικοί μηχανισμοί που περιλαμβάνει το CAMx βασίζονται στο Δεσμό Άνθρακα 4 (CB4; Gery et al., 1989) και στο SAPRC99 (Carter, 2000). Το μοντέλο υποστηρίζει πέντε μηχανισμούς και ο χρήστης μπορεί να επιλέξει οποιονδήποτε από αυτούς καθώς κάθε ένας συνοδεύεται από το αντίστοιχο αρχείο με τις παραμέτρους που είναι απαραίτητες για τις χημικές αντιδράσεις. Ο βασικός μηχανισμός για τον CB4 είναι ο 3 γι' αυτό και αναφέρεται πρώτος στον πίνακα 4-2. Ο επόμενος είναι ο μηχανισμός 1, ο οποίος περιέχει τις χημικές αντιδράσεις χλωρίου, ενώ ο μηχανισμός 4 είναι ο παραπάνω (μηχανισμός 3) με την προσθήκη της χημείας των αερολυμάτων. Ο μηχανισμός 5 περιλαμβάνει τον χημικό μηχανισμό SAPRC99 και τέλος ο μηχανισμός 10 δίνει στο χρήστη τη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

δυνατότητα να αναπτύξει το δικό του χημικό μηχανισμό, προσθέτοντας χημικές αντιδράσεις της προτίμησής του.

Πίνακας 4-2. Βασικοί χημικοί μηχανισμοί του μοντέλου CAMx.

No	Περιγραφή
3	Χημεία αέριας φάσης βασισμένης στο μηχανισμό CB4 (Gery et. al. 1989) με ανανεωμένη χημεία ισοπρενίου (isoprene chemistry) βασισμένη στον Carter (1996) όπως εφαρμόστηκε για το Ozone Transport Assessment Group (OTAG) (Whitten et. al. 1996). 96 χημικές αντιδράσεις και 37 ουσίες (25 αέρια και 12 ρίζες).
1	Μηχανισμός 3 με χημεία αντιδράσεων χλωρίου (Tanaka et. al. 2000). 110 αντιδράσεις και 48 ουσίες (34 αέρια και 14 ρίζες).
4	Μηχανισμός 3 με την προσθήκη ανόργανων αντιδράσεων αέριας φάσης σημαντικών για περιοχές προσομοίωσης. Αυτός ο μηχανισμός δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης χημείας αερολυμάτων και υδραργύρου περιλαμβάνοντας: σχηματισμό δευτερογενών οργανικών αερολυμάτων από συμπυκνώσιμα αέρια, χημεία υγρής φάσης αερολυμάτων, θερμοδυναμική ανόργανων αερολυμάτων και εξέλιξη μεγέθους αερολυμάτων. 117 αντιδράσεις με 67 ουσίες (37 αέρια, 18 αιωρούμενα σωματίδια, 12 ρίζες).
5	Μηχανισμός SARPC99 αέριας φάσης (Carter, 2000). 211 αντιδράσεις και 74 ουσίες (56 αέρια, 18 ρίζες).
10	Απλός μηχανισμός που καθορίζεται/αναπτύσσεται από το χρήστη του μοντέλου.

4.1.5 Δεδομένα εισόδου και εξόδου στο CAMx

Για τη λειτουργία του μοντέλου CAMx απαιτούνται ορισμένα αρχεία εισόδου, τα οποία διαμορφώνουν κάθε προσομοίωση, καθορίζουν το χημικό μηχανισμό και περιγράφουν τις φωτοχημικές καταστάσεις, τα χαρακτηριστικά του εδάφους, τις αρχικές/οριακές συνθήκες, τους ρυθμούς εκπομπής καθώς και πολλά μετεωρολογικά πεδία για ολόκληρη την περιοχή του μοντέλου. Στον πίνακα 4-3 συνοψίζονται τα δεδομένα εισόδου που απαιτούνται για τη λειτουργία του μοντέλου.

Πίνακας 4-3. Δεδομένα εισόδου του CAMx.

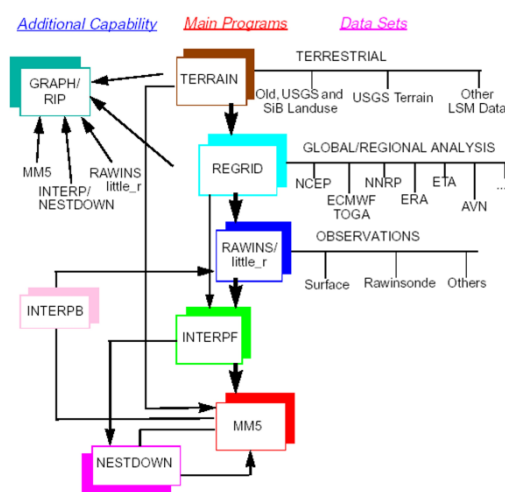
ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ	ΔΕΔΟΜΕΝΑ
<u>Μετεωρολογία</u> Παρέχεται από ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο	3D πεδία πλέγματος: - κατακόρυφη διάρθρωση πλέγματος - οριζόντιες συνιστώσες ανέμου - θερμοκρασία - πίεση - τάση υδρατμών - κατακόρυφοι συντελεστές διάχυσης - σύννεφα/ υετός
<u>Ποιότητα αέρα</u> Λαμβάνονται από μετρήσεις περιβάλλοντος	- αρχικές συνθήκες σε πεδίο πλέγματος - οριακές συνθήκες σε πεδίο πλέγματος - σταθερές χρονικά και χωρικά συγκεντρώσεις
<u>Εκπομπές ρύπων</u> Παρέχονται από μοντέλο υπολογισμού εκπομπών ή σύστημα απογραφής εκπομπών	- υπερυψωμένες σημειακές πηγές - συνδυασμός πηγών σε μορφή πλέγματος - χαμηλού επιπέδου σημειακές πηγές - κινητές πηγές - κινητές- εκτός δρόμου πηγές - βιογενείς πηγές
<u>Γεωγραφικά δεδομένα</u>	- χαρακτηριστικά επιφάνειας σε μορφή πλέγματος - χρήση γης/ κάλυψη βλάστησης - υπεριώδεις λευκαύγεια - κάλυψη χιονιού - μάσκα εδάφους/ νερού - μήκος τραχύτητας - δείκτης ξηρασίας
<u>Ρυθμοί φωτόλυσης</u> Παρέχονται από δορυφορικές μετρήσεις και μοντέλα μεταφοράς ακτινοβολίας	- ιδιότητες ατμοσφαιρικής ακτινοβολίας - κωδικοί θολότητας (haze opacity) σε μορφή πλέγματος - κωδικοί στήλης όζοντος σε μορφή πλέγματος - πίνακας ρυθμών φωτόλυσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

Για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής τα απαραίτητα μετεωρολογικά δεδομένα για την πραγματοποίηση των φωτοχημικών προσομοιώσεων παρήχθησαν από το μετεωρολογικό μοντέλο μέσης κλίμακας MM5 (PSU/NCAR, Dudhia, J., 1993) που υποστηρίζεται από την Mesoscale Prediction Group in the Mesoscale and Microscale Meteorology Division, NCAR (<http://www.mmm.ucar.edu/mm5/>). Το MM5 είναι ένα μη υδροστατικό μοντέλο το οποίο χρησιμοποιεί σύστημα σ-συντεταγμένων και είναι σχεδιασμένο για την πραγματοποίηση αριθμητικών προσομοιώσεων της μέσης κλίμακας ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας με στόχο την πρόγνωση καιρού. Στο σχήμα 4-4 δίνεται μια σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου MM5 με τους επιμέρους αλγορίθμους που περιλαμβάνει. Τα σ-επίπεδα κοντά στο έδαφος ακολουθούν την ορογραφία, ενώ τα υψηλότερα σ-επίπεδα τείνουν να προσεγγίσουν τις ισοβαρικές επιφάνειες. Γενικά τόσο η κατακόρυφη και οριζόντια ανάλυση όσο και το μέγεθος του πλέγματος είναι παράγοντες που μεταβάλλονται ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε προσομοίωσης. Επιπλέον παρέχεται η δυνατότητα προσομοίωσης με τη μέθοδο της διαδοχικής εστίασης.

Σχετικά με τις φυσικές παραμετροποιήσεις που έχουν επιλεγεί για τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής, αυτές περιλαμβάνουν το συνδυασμό του σχήματος Kain-Fritsch (Kain και Fritsch, 1993) για την κατακόρυφη μεταφορά, με το εξαιρετικά αποτελεσματικό και απλοποιημένο μικροφυσικό σχήμα που προτείνεται από τον Schultz (1995) καθώς και το σχήμα MRF (Medium Range Forecast) για το πλανητικό οριακό στρώμα που προτείνονται από τους Hong and Pan (1996). Ο συνδυασμός των δύο πρώτων συστημάτων επιλέχθηκε με βάση τη συγκριτική μελέτη των Kotroni and Lagouvardos (2004) και Mazarakis et al. (2009), ενώ οι Akylas et al. (2007) διαπίστωσαν ότι οι επιχειρησιακές προβλέψεις με το μοντέλο MM5 για την ΕΠΑ παράγονται πιο ικανοποιητικά από το σχήμα MRF.

The MM5 Modeling System Flow Chart



Σχήμα 4-4. Σύστημα μοντελοποίησης MM5 (Πηγή: <http://www2.mmm.ucar.edu/mm5>).

Όσον αφορά στα δεδομένα εξόδου, το μοντέλο CAMx παρέχει τη δυνατότητα επιλογής εμφάνισης των πεδίων συγκέντρωσης είτε σε τρεις διαστάσεις είτε σε δύο διαστάσεις για το επίπεδο της επιφάνειας. Οι συγκεντρώσεις των αέριων ρύπων δίνονται σε ppm ενώ των σωματιδίων σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Τα αρχεία εξόδου, στη συνέχεια οπτικοποιούνται με τη βοήθεια του προγράμματος VERDI 1.5 (CMAS, 2014).

4.2 Περιγραφή συνθηκών περιόδου προσομοίωσης

Η περίοδος προσομοίωσης διήρκησε από τις 11/6/2010 00UTC ως τις 15/6/2010 00UTC, με τις δύο πρώτες ημέρες να αποτελούν spin-up περίοδο. Βασική προϋπόθεση για την επιλογή της συγκεκριμένης περιόδου ήταν η εμφάνιση υψηλών συγκεντρώσεων όζοντος και PM_{10} σε τουλάχιστον δύο σταθμούς μέτρησης για τουλάχιστον δύο συνεχόμενες ώρες και μέρες (Σχ. 4-8, 4-9, 4-10 και 4-11). Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι μετεωρολογικές συνθήκες που επικράτησαν κατά την περίοδο της προσομοίωσης καθώς και η ποιότητα του αέρα που διαμορφώθηκε σύμφωνα με δεδομένα από επίγειους σταθμούς μέτρησης.

4.2.1 Μετεωρολογικές συνθήκες

Κατά τη διάρκεια των τεσσάρων ημερών της περιόδου προσομοίωσης επικράτησαν ήπιες συνοπτικές συνθήκες, με την εμφάνιση υψηλού βαρομετρικού πάνω από την ηπειρωτική κεντρική Ελλάδα στις 11/06/2010 00UTC το οποίο εξασθένησε τις επόμενες μέρες (Σχ.4-6). Για τη μελέτη των μετεωρολογικών συνθηκών κατά την περίοδο προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν ωριαία δεδομένα διεύθυνσης και ταχύτητας ανέμου, σχετικής υγρασίας και θερμοκρασίας από το δίκτυο των σταθμών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (www.meteo.gr) ενώ το ανεμολογικό πεδίο συμπληρώθηκε με δεδομένα διεύθυνσης και ταχύτητας ανέμου από τους σταθμούς Τατόι, Ελληνικό, Νέα Φιλαδέλφεια, Πειραιά και Ελευσίνα της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας το χρονικό βήμα των οποίων ήταν 3 ώρες (Σχ.4-5). Συνολικά σε όλη την περίοδο προσομοίωσης η επιφανειακή θερμοκρασία κυμάνθηκε από 19.6°C ως 36.2°C με την ελάχιστη τιμή να εμφανίζεται στο σταθμό του Μαρκόπουλου (20.9°C , 13/06 6:00LST) ενώ η μέγιστη τιμή (36.2°C) καταγράφηκε στο σταθμό του Θησείου στις 12/06/2010, 14:00LST. Μικρή άνοδος της θερμοκρασίας

παρατηρήθηκε τις δύο τελευταίες ημέρες σε σχέση με τις προηγούμενες (Σχ.4-7). Όσον αφορά στην σχετική υγρασία το εύρος των τιμών ήταν 21% – 77.7%. Οι υψηλότερες τιμές καταγράφηκαν στον σταθμό του Λαυρίου τις νυχτερινές ώρες από τις 13/06/2010 προς τις 14/06/2010 (μέγιστη τιμή 77.7% στις 14/06, 00:00LST) ενώ οι χαμηλότερες στο σταθμό του Θησείου στις 12/06/2010 (Σχ. 4-7).

11-12 Ιουνίου 2010

Από τις παρατηρήσεις προέκυψε ότι κατά την περίοδο 11-12/06/2010 επικράτησε βορειοανατολικός άνεμος με υψηλές ταχύτητες στις περισσότερες περιοχές του λεκανοπεδίου της Αττικής. Ο επικρατών άνεμος στις 11/06/2010 στα νότια του λεκανοπεδίου (Σταθμός: Πειραιάς) ήταν από βόρειες διευθύνσεις τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες με ταχύτητα 8.7 m/s στις 12.00LST και 11.3 m/s στις 15.00 και 18.00LST, ενώ στο κέντρο και τα βορειοανατολικά του λεκανοπεδίου, στους σταθμούς Θησείο και Μαρούσι, επικράτησαν κυρίως βορειοανατολικοί άνεμοι έντασης 7.7m/s και 3.6m/s στις 12.00LST αντίστοιχα. Η ροή του ανέμου στην ανατολική Αττική εμφάνισε επικρατούσα ανατολική βορειοανατολική διεύθυνση στο σταθμό των Σπάτων και ταχύτητα 2.7m/s ενώ στο Μαρκόπουλο η αντίστοιχη επικρατούσα διεύθυνση ήταν βορειοανατολική με ένταση 4.5m/s στις 12.00LST. Βορειοανατολικός άνεμος επικράτησε και στις 12/06/2010 στα κεντρικά και στα βορειοανατολικά προάστια (Θησείο: 5.5m/s ταχύτητα και βορειοανατολική διεύθυνση, Μαρούσι: 2.9m/s ταχύτητα και βορειοανατολική διεύθυνση στις 12.00LST) και τα Μεσόγεια (Μαρκόπουλο: 4.4m/s ταχύτητα και βορειοανατολική διεύθυνση) ενώ στον Πειραιά καταγράφηκε άνεμος νοτιοδυτικής διεύθυνσης και έντασης 5.1 m/s.

13-14 Ιουνίου 2010

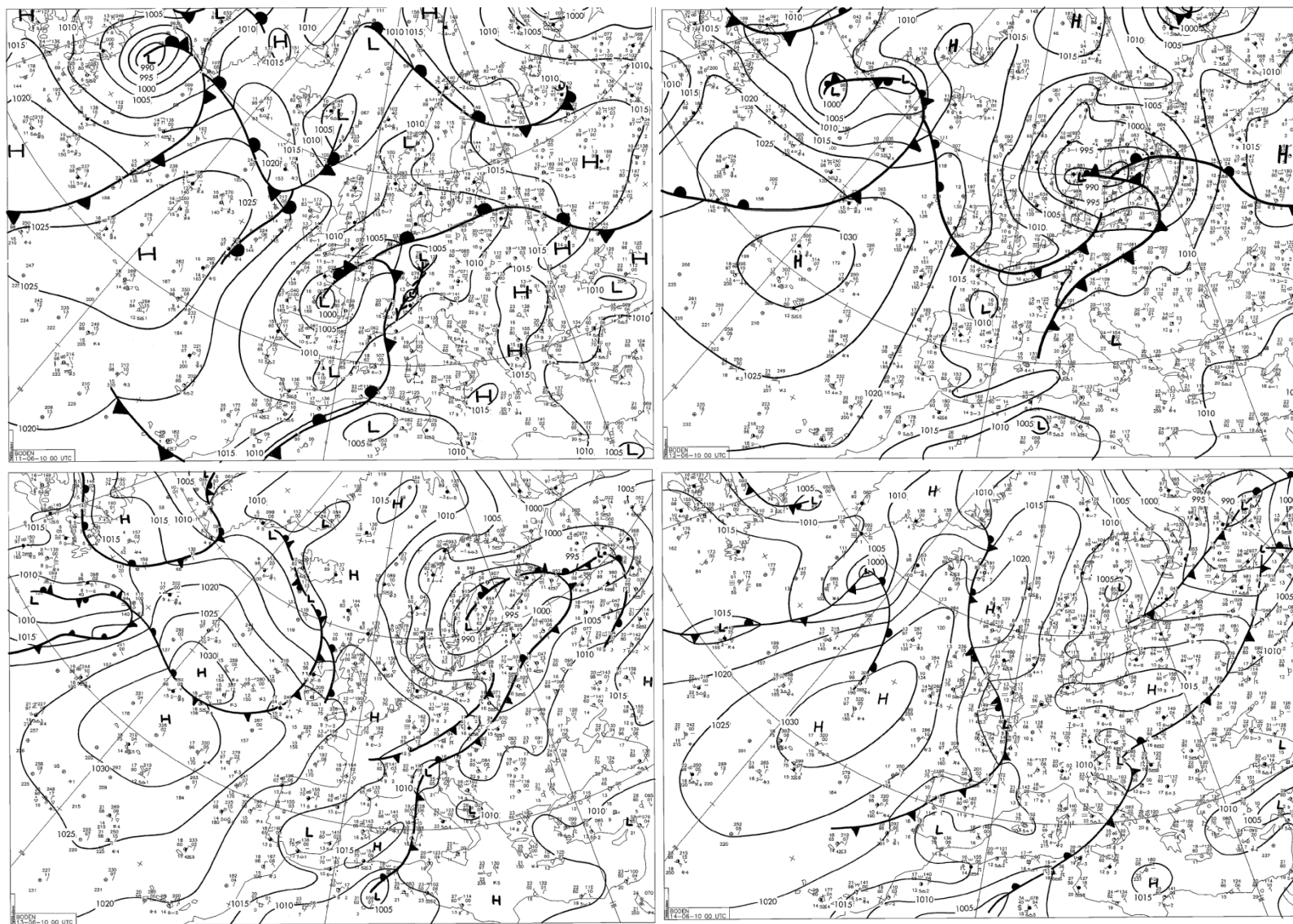
Οι ήπιες συνοπτικές συνθήκες που επικράτησαν κατά την περίοδο 13-14/06/2010 ευνόησαν την εμφάνιση συστήματος τοπικής κυκλοφορίας (θαλάσσια αύρα) εντός του λεκανοπεδίου Αττικής (Σχ.4-6). Σε γενικές γραμμές, στους σταθμούς μέτρησης καταγράφηκαν άνεμοι νότιας διεύθυνσης με μικρότερη ένταση σε σχέση με το προηγούμενο διήμερο (Σχ.4-7). Πιο συγκεκριμένα, η διεύθυνση του ανέμου στον Πειραιά και το Ελληνικό από δυτική στις 13/06/2010, 12.00LST και με ένταση 4.1m/s και 2.1m/s αντίστοιχα, μετατρέπεται σε νοτιοδυτική (Πειραιάς: 2.6 m/s-ένταση, στις 15.00LST) και νότια (Ελληνικό: 2.1m/s ένταση, στις 15.00LST) μικρότερης έντασης (Σχήμα 4-8). Στο κέντρο του λεκανοπεδίου ο άνεμος από νοτιοδυτικός τις νυχτερινές ώρες 13 προς 14/6 μετατρέπεται σε νότιο στις 10:00LST (Αθήνα-Γκάζι) ενώ στους Αμπελόκηπους και το Θησείο η νυχτερινή νοτιοανατολική και βορειοανατολική ροή γίνεται νοτιοανατολική στις 10:00LST στις

11:00LST αντίστοιχα με ένταση που δεν ξεπερνάει τα 3.3m/s. Αλλαγή στη διεύθυνση του ανέμου από βορειοανατολική σε νοτιοδυτική παρατηρείται και βορειότερα (Μαρούσι) στις 10:00LST. Στις 12:00LST επικρατεί νότια νοτιοδυτική ροή εντός του λεκανοπεδίου (Σχ.4-8). Εμφάνιση τοπικού συστήματος κυκλοφορίας εμφανίζεται και στα Μεσόγεια. Η δυτική νυχτερινή κυκλοφορία μετατρέπεται σε ανατολική στα Σπάτα (στις 12:00LST,13/06/2010 και στις 9:00LST,14/06/2010) ενώ στο Μαρκόπουλο επικρατεί νότιος άνεμος στις 13/06 έντασης 3m/s και ανατολικός βορειοανατολικός άνεμος έντασης 1.5m/s τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες στις 14/06 αντίστοιχα ο οποίος μετατρέπεται σε νότιο το απόγευμα (18:00LST). Στα δυτικά του λεκανοπεδίου (Ελευσίνα) η διεύθυνση του ανέμου από βόρεια τις νυχτερινές ώρες γίνεται νοτιοδυτική (12:00-18:00LST) έντασης 2.6 - 4.1m/s.

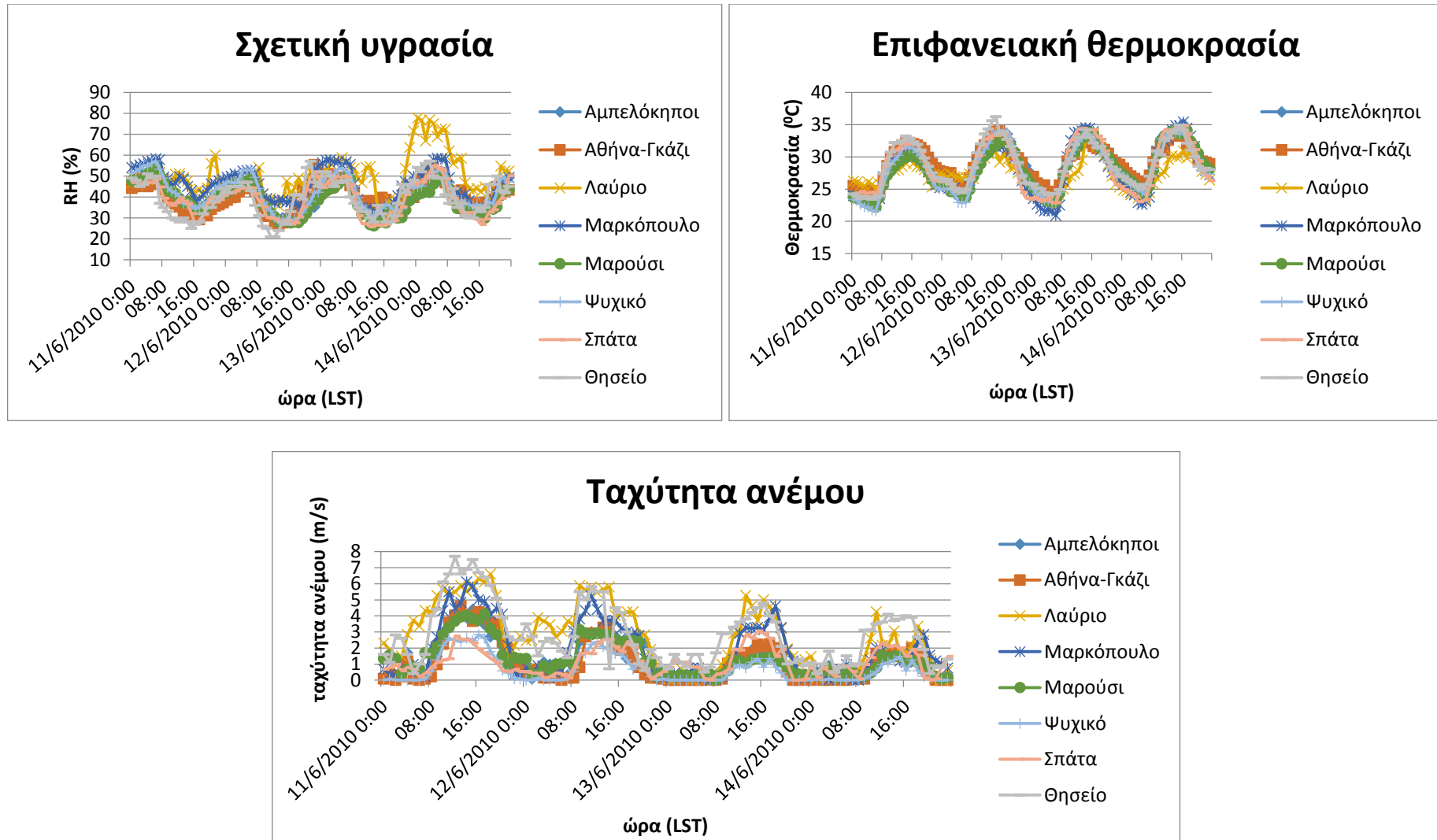


Σχήμα 4-5. Μετεωρολογικοί σταθμοί του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ



Σχήμα 4-6. Χάρτες επιφανείας για την περίοδο 11-14 Ιουνίου 2010.



Σχήμα 4-7. Μετεωρολογικές παράμετροι για την περίοδο 11-14 Ιουνίου 2010 στους σταθμούς μέτρησης του δικτύου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, α) σχετική υγρασία, β) ταχύτητα ανέμου και γ) επιφανειακή θερμοκρασία.

13 / 06 / 2010



6.00 LST



9.00 LST



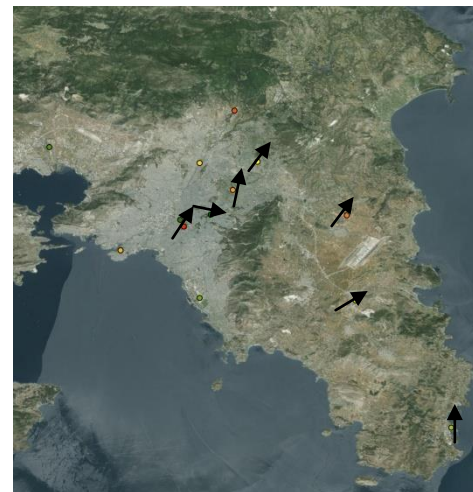
12.00 LST



15.00 LST



18.00 LST



21.00 LST

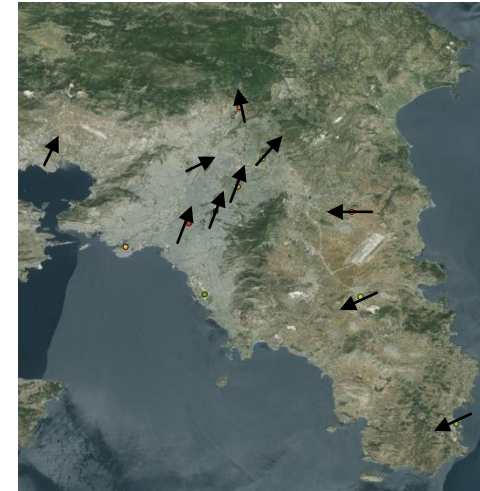
14 / 06 / 2010



6.00 LST



9.00 LST



12.00 LST



15.00 LST



18.00 LST



21.00 LST

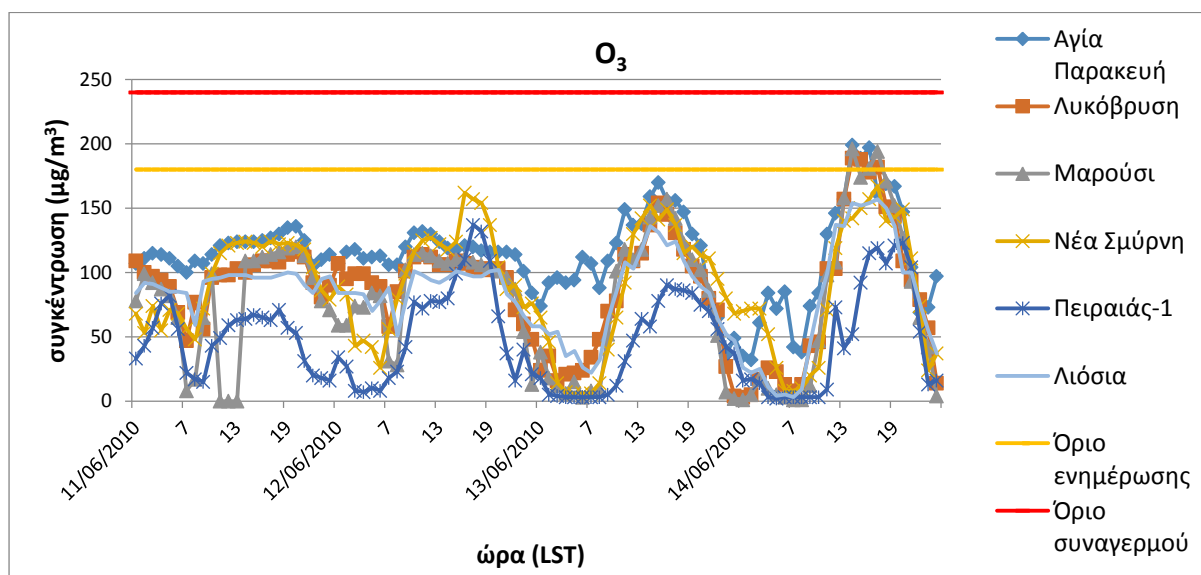
Σχήμα 4-8. Διεύθυνση ανέμου στους σταθμούς μέτρησης του δικτύου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας στις 14 και 15 Ιουνίου 2010.

4.2.2 Ποιότητα αέρα

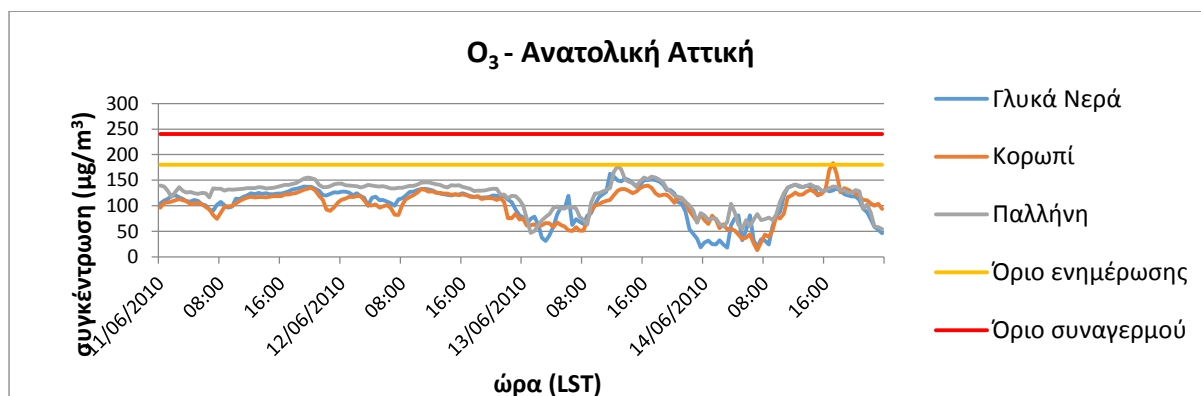
Οι ήπιες συνοπτικές συνθήκες που επικρατούσαν κατά τη διάρκεια της περιόδου προσομοίωσης ευνόησαν την εμφάνιση συστήματος τοπικής κυκλοφορίας (θαλάσσια αύρα) που οδήγησε τελικά στη διαμόρφωση υψηλών συγκεντρώσεων όζοντος στις 14/06/2010 (Σχ.4-9). Ενδεικτική είναι η σταδιακή αύξηση των συγκεντρώσεων όζοντος από τις 11/06/2010 μέχρι και τις 14/06/2010 οπότε και καταγράφονται οι πρώτες υπερβάσεις της τιμής των $180\mu\text{g}/\text{m}^3$ για το όζον (όριο ενημέρωσης, [Οδηγία 2008/50/EK](#)) στους σταθμούς που βρίσκονται στα βορειοανατολικά προάστια. Στις 13/06/2010 παρόλο που επικράτησαν άνεμοι νότιας διεύθυνσης και χαμηλής έντασης δεν σημειώθηκαν υπερβάσεις της τιμής $180\mu\text{g}/\text{m}^3$. Σε αυτό συνέβαλε ο περιορισμός των ανθρώπινων δραστηριοτήτων (π.χ. η κίνηση των οχημάτων) και κατά συνέπεια των εκπομπών εξαιτίας της κυριακάτικης αργίας αναδεικνύοντας τον μεγάλο ρόλο των τοπικών εκπομπών, πέραν των μετεωρολογικών συνθηκών, στην διαμόρφωση των επεισοδίων ρύπανσης εντός του λεκανοπεδίου Αττικής. Στη συνέχεια στις 14/06/2010, στους σταθμούς της Αγίας Παρασκευής, του Αμαρουσίου και της Λυκόβρυσης για το χρονικό διάστημα 14.00-17.00LST οι συγκεντρώσεις όζοντος κυμάνθηκαν από $161\mu\text{g}/\text{m}^3$ (σταθμός: Αγία Παρασκευή, 17.00LST) μέχρι $199\mu\text{g}/\text{m}^3$ (σταθμός: Αγία Παρασκευή, 14.00LST) με τις μέγιστες τιμές να σημειώνονται σε όλους τους σταθμούς στις 14.00LST - $189\mu\text{g}/\text{m}^3$, $196\mu\text{g}/\text{m}^3$ και $199\mu\text{g}/\text{m}^3$ για τη Λυκόβρυση, το Μαρούσι και την Αγία Παρασκευή αντίστοιχα. Υψηλές συγκεντρώσεις όζοντος σημειώθηκαν επίσης στα δυτικά (μέγιστη συγκέντρωση: Περιστερί $148\mu\text{g}/\text{m}^3$, Λιόσια $157\mu\text{g}/\text{m}^3$ στις 17.00LST) και νότια προάστια (μέγιστη συγκέντρωση: Πειραιάς $123\mu\text{g}/\text{m}^3$ στις 20.00LST, Ν.Σμύρνη $167\mu\text{g}/\text{m}^3$ στις 17.00LST) χωρίς ωστόσο να υπάρξει υπέρβαση των $180\mu\text{g}/\text{m}^3$. Στην ανατολική Αττική σημειώθηκαν υψηλές συγκεντρώσεις όζοντος χωρίς υπέρβαση της τιμής των $180\mu\text{g}/\text{m}^3$. Αξίζει να αναφερθεί ότι κατά την διάρκεια του διημέρου 11-12/06/2010 οι συγκεντρώσεις του όζοντος παρέμειναν σε υψηλά επίπεδα ($>100\mu\text{g}/\text{m}^3$) στους σταθμούς Γλυκά Νερά, Παλλήνη και Κορωπί και κατά τη διάρκεια της νύχτας (Σχ.4-10). Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας το όριο για την προστασία της υγείας είναι τα $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ για τη μέση συγκέντρωση 8-ώρου (WHO, 2006a) καθώς διαπιστώθηκε ότι η ημερήσια θνησιμότητα συνδέεται με συγκεντρώσεις O_3 μικρότερες των $120\mu\text{g}/\text{m}^3$ που ήταν το προηγούμενο όριο. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4-11 υπέρβαση της παραπάνω οριακής μέσης τιμής 8-ώρου παρατηρήθηκε σε όλους τους σταθμούς κατά τη διάρκεια του επεισοδίου εκτός από τον σταθμό Πειραιάς1 στις 13/06/2010. Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι δεν παρατηρήθηκε σε κανέναν σταθμό μέτρησης υπέρβαση του ορίου συναγερμού για το όζον ($240\mu\text{g}/\text{m}^3$, [Οδηγία 2008/50/EK](#)).

Όσον αφορά στα PM_{10} στο σχήμα 4-12 παρουσιάζονται οι μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις για τους σταθμούς Αγία Παρασκευή, Λυκόβρυση, Μαρούσι, Ελευσίνα, Θρακομακεδόνες και Κορωπί. Στις 13/06/2010 στους σταθμούς της Λυκόβρυσης και της Ελευσίνας η μέση 24-ωρη συγκέντρωση PM_{10} ήταν $50 \mu g/m^3$ και $55 \mu g/m^3$ αντίστοιχα ενώ αύξηση των τιμών παρατηρήθηκε τις επόμενες ημέρες και στους υπόλοιπους σταθμούς. Ενδεικτικά στις 14/06/2010 καταγράφηκαν τιμές $41 \mu g/m^3$, $50 \mu g/m^3$ και $52 \mu g/m^3$, $31 \mu g/m^3$ και $30 \mu g/m^3$ στους σταθμούς Αγία Παρασκευή, Λυκόβρυση, Μαρούσι, Θρακομακεδόνες και Κορωπί αντίστοιχα.

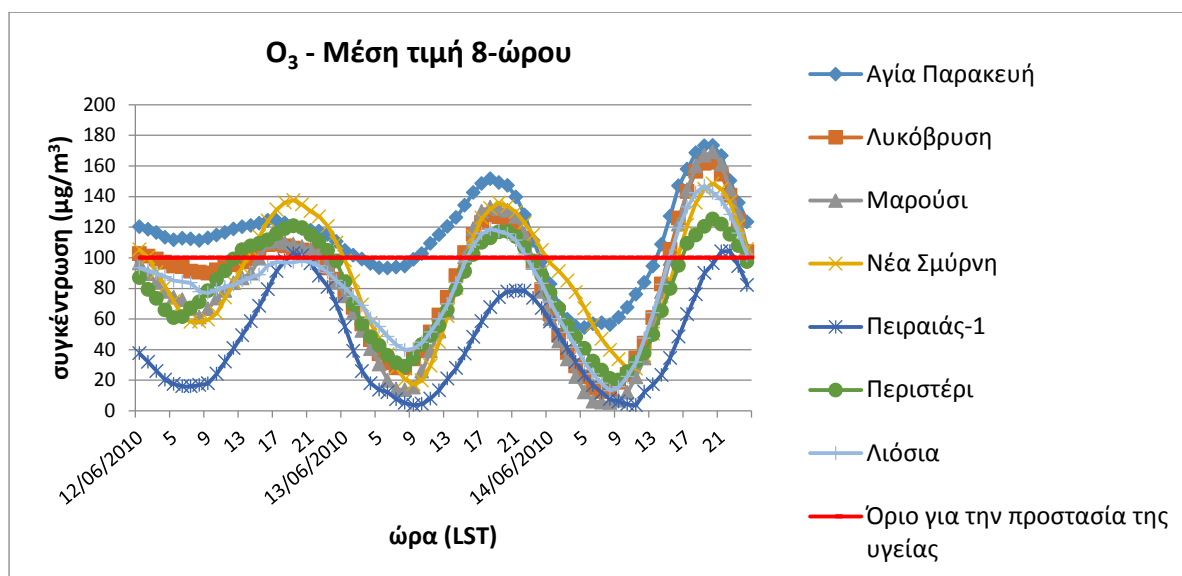
Τα δεδομένα ποιότητας της ατμόσφαιρας προήλθαν από τους σταθμούς μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΥΠΕΚΑ και του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών «Ελευθέριος Βενιζέλος» (Σχ. 4-13).



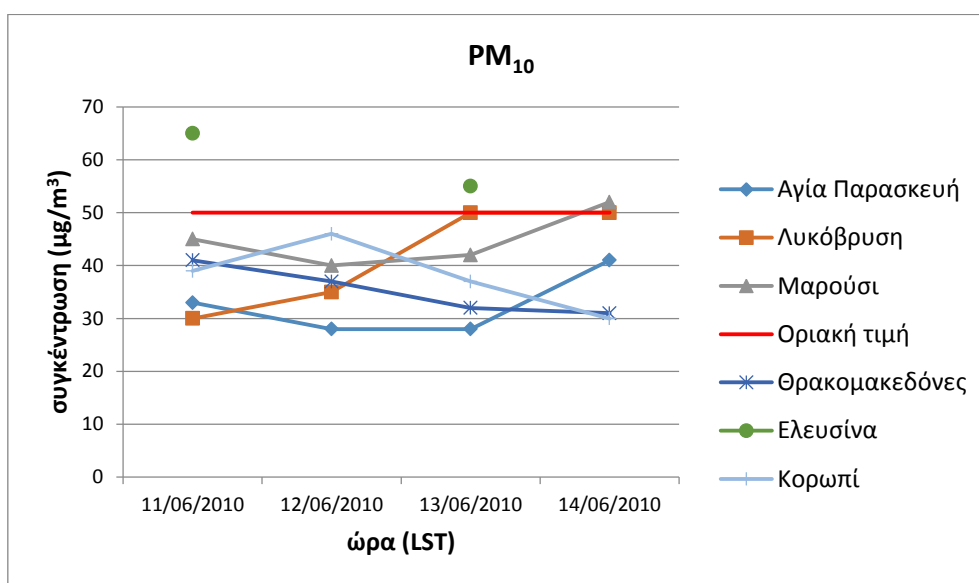
Σχήμα 4-9. Ημερήσιες συγκεντρώσεις O_3 οι οποίες μετρήθηκαν από τους σταθμούς του ΠΕΡΠΑ. (Πηγή: ΥΠΕΚΑ, <http://www.ypeka.gr/>)



Σχήμα 4-10. Ημερήσιες συγκεντρώσεις O_3 οι οποίες μετρήθηκαν από τους σταθμούς του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών «Ελευθέριος Βενιζέλος».



Σχήμα 4-11. Μέση συγκέντρωση 8-ώρου O₃ για τους σταθμούς του ΠΕΡΠΑ. (Πηγή: ΥΠΕΚΑ, <http://www.ypeka.gr/>)



Σχήμα 4-10. Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις PM₁₀ όπως μετρήθηκαν από τους σταθμούς του ΠΕΡΠΑ. (Πηγή: ΥΠΕΚΑ, <http://www.ypeka.gr/>)



Σχήμα 4-11. Σταθμοί μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΥΠΕΚΑ και του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών "Ελευθέριος Βενιζέλος".

4.3 Μεθοδολογία προσομοιώσεων

Για τις μετεωρολογικές προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε το μετεωρολογικό περιοχικό μοντέλο MM5. Οι αρχικές και οριακές συνθήκες προέκυψαν από δεδομένα σε μορφή πλέγματος από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μετεωρολογικών Προγνώσεων Μέσης Κλίμακας (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts –ECMWF, <http://www.ecmwf.int/>) οριζόντιας χωρικής ανάλυσης 0.5 μοιρών και χρονικής ανάλυσης 6-h. Για την ορογραφία και τη χρήση γης χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα που προέκυψαν κατά την παρούσα διδακτορική διατριβή (κεφάλαιο 3).

Για την μετεωρολογική προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν τρία διαδοχικά πλέγματα:

- Το Πλέγμα 1 (εξωτερικό πλέγμα) με 220x180 πλεγματικά σημεία στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις έχοντας 18km χωρική ανάλυση. Καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της Ευρώπης, της Μεσογείου και των ακτών της βόρειας Αφρικής και
- Το Πλέγμα 2 αποτελείται από 166x151 πλεγματικά σημεία στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις έχοντας 6km χωρική ανάλυση. Καλύπτει την ελληνική επικράτεια Αιγαίου και μέρος των γειτονικών χωρών (Αλβανία, Τουρκία, Βουλγαρία) και
- Το Πλέγμα 3 το οποίο αποτελείται από 100x94 πλεγματικά σημεία χωρικής ανάλυσης 2km και καλύπτει την ευρύτερη περιοχή της Αθήνας (Αττική), τμήμα της βορειοανατολικής Πελοποννήσου, τη Βοιωτία, την Εύβοια και τις γειτονικές θαλάσσιες περιοχές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

Στην κατακόρυφη διεύθυνση χρησιμοποιήθηκαν 39 σ-επίπεδα με την κορυφή στα 100hPa. Το ύψος του πρώτου επιπέδου ορίστηκε στα 40m. Τα μετεωρολογικά δεδομένα είχαν χρονική ανάλυση 1 ώρας και περιελάμβαναν τις παρακάτω παραμέτρους: νέφωση, βροχόπτωση, ατμοσφαιρική πίεση, κατακόρυφη διάχυση (k_v), χρήση γης και πεδία ταχυτήτων.

Για τις φωτοχημικές προσομοιώσεις με το μοντέλο CAMx χρησιμοποιήθηκαν τρία πλέγματα σε αντιστοιχία με τα πλέγματα του MM5. Το εξωτερικό (Πλέγμα 1) καλύπτει την κεντρική και νότια Ευρώπη, την Τουρκία και τμήμα της βορείου Αφρικής έχοντας 170x135 κελιά μεγέθους $18 \times 18 \text{ km}^2$, το πρώτο εσωτερικό πλέγμα (Πλέγμα 2) καλύπτει την ελληνική επικράτεια και μέρος των γειτονικών χωρών (Αλβανία, Τουρκία, Βουλγαρία) με χωρική ανάλυση $6 \times 6 \text{ km}^2$ (134×134 κελιά) ενώ το δεύτερο εσωτερικό πλέγμα (Πλέγμα 3) αντιστοιχεί στο πλέγμα του πεδίου εκπομπών που προέκυψε κατά την παρούσα διατριβή και περιλαμβάνει την Αττική, την Βοιωτία, την νότια Εύβοια και την βορειοανατολική Πελοπόννησο με χωρική ανάλυση $2 \times 2 \text{ km}^2$ (56×56 κελιά) (Σχ. 4-14).

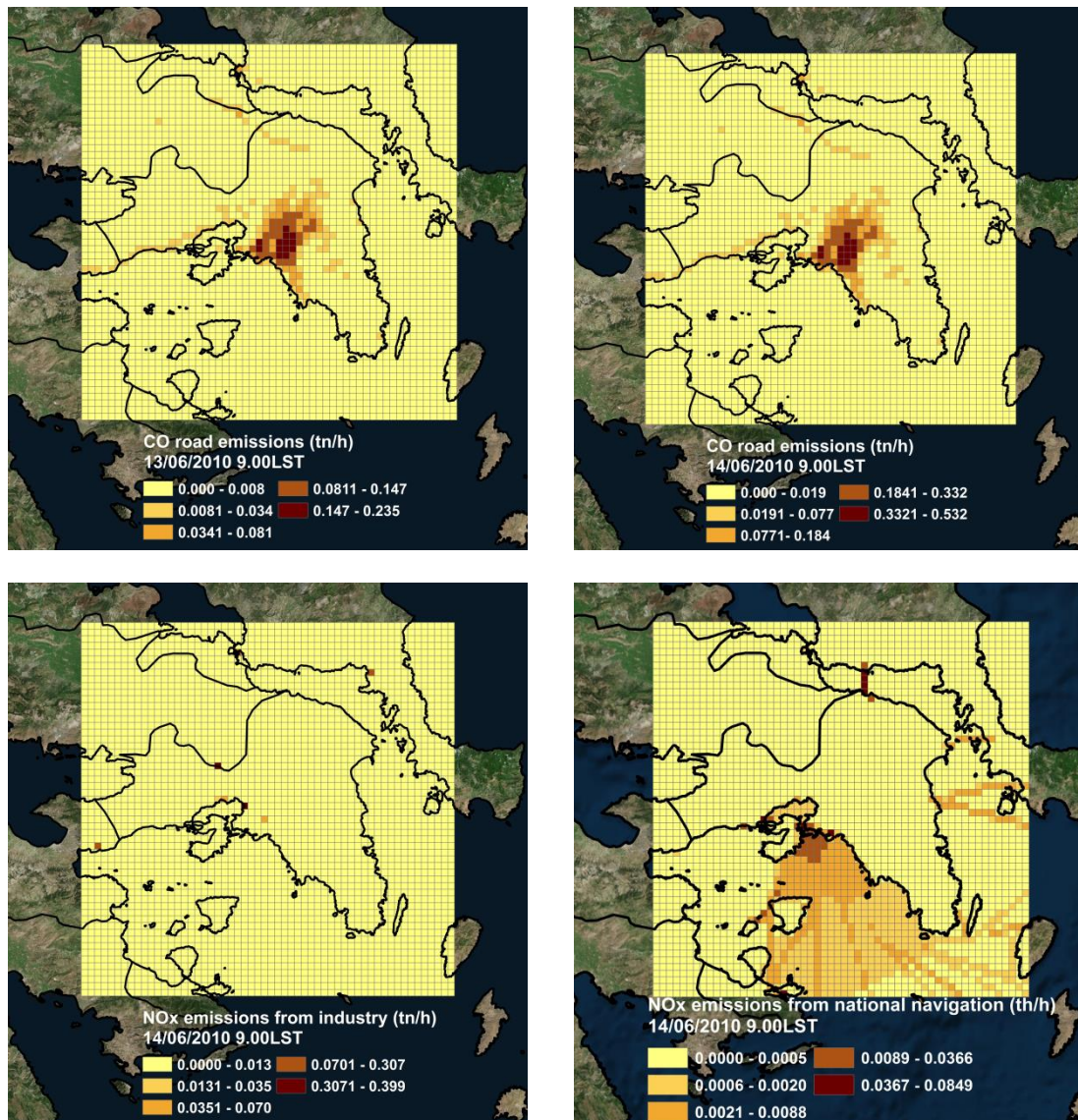


Σχήμα 4-12. Σύστημα πλεγμάτων για τις προσομοιώσεις.

Όσον αφορά στις οριακές, αρχικές συνθήκες (initial and boundary conditions, IC - BC) καθώς και στις σταθερές τιμές άνω ορίου (top concentrations) που απαιτούνταν από το CAMx για το εξωτερικό πλέγμα, αυτές προέκυψαν από προεπεξεργασία κατά την οποία δόθηκαν σταθερές συγκεντρώσεις για τους ρύπους NO, NO₂, O₃, CO, SO₂ προκειμένου να δημιουργηθούν τα αρχεία αρχικών και οριακών συγκεντρώσεων. Οι απαραίτητες τιμές λευκαύγειας, στήλης όζοντος, καθαρότητας ατμόσφαιρας καθώς και οι ρυθμοί φωτόλυσης προέκυψαν από αντίστοιχους προεπεξεργαστές (ahomap και τυν).

Το σύστημα απογραφής εκπομπών που χρησιμοποιήθηκε για το Πλέγμα 1 είναι του έτους 2010 και προέκυψε από τη βάση δεδομένων του EMEP (<http://www.ceip.at/>) για 10 κατηγορίες πηγών και τη διεθνή ναυσιπλοΐα. Τα κελιά εμβαδού 2500km² (50x50 km²) του EMEP μετατράπηκαν σε κελιά εμβαδού 324 km² (18x18 km²) με τη βοήθεια του προγράμματος ArcView v10. Ο χρονικός διαχωρισμός των ετήσιων εκπομπών πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια των μηνιαίων, ημερήσιων και ωριαίων συντελεστών από το TON-innovation for life (TNO, 2005). Στο Παράρτημα 1 περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία για την μετατροπή των εκπομπών του EMEP στη χωρική ανάλυση που απαιτούνταν για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης. Τα δεδομένα εκπομπών για τα δύο εσωτερικά πλέγματα προέκυψαν από το σύστημα απογραφής εκπομπών που αναπτύχθηκε κατά την παρούσα διατριβή. Ενδεικτικά στο σχήμα 4-15 παρουσιάζονται οι εκπομπές CO από τις οδικές μεταφορές στις 9.00LST για τις 13 και 14 Ιουνίου 2010 και οι εκπομπές NOx στις 9.00LST από τη βιομηχανική δραστηριότητα και τις θαλάσσιες μεταφορές στο πλέγμα χωρικής ανάλυσης 2x2km². Όσον αφορά στις εκπομπές από τις οδικές μεταφορές παρατηρείται διαφοροποίηση των τιμών μεταξύ των δύο ημερών λόγω της μειωμένης κίνησης των οχημάτων τις πρωινές ώρες στις 13/06/2010 (Κυριακή) σε σχέση με τις 14/06/2010 (Δευτέρα). Οι εκπομπές από τις θαλάσσιες μεταφορές είναι χωρικά τοποθετημένες στις γραμμές πλεύσης και οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στο λιμάνι του Πειραιά.

Κατά την συγκεκριμένη προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε η έκδοση CAMx v4.40 (ENVIRON, 2014). Ο χημικός μηχανισμός που επιλέχθηκε ήταν ο CB4 ο οποίος περιλαμβάνει 96 αντιδράσεις και 37 χημικές ενώσεις. Ο διαχωρισμός των εκπομπών NMVOCs στα επιμέρους κλάσματα πραγματοποιήθηκε με τη χρήση των συντελεστών που προέκυψαν από την μελέτη των Bossioli et al. 2002.



Σχήμα 4-13. Εκπομπές CO και NOx (tn/h) από τις οδικές, τις θαλάσσιες μεταφορές και τη βιομηχανική δραστηριότητα για τις επιλεγμένες ημερομηνίες.

4.3.1 Αποτελέσματα μετεωρολογικών προσομοιώσεων

Τα ανεμολογικό πεδίο όπως προέκυψε από τις αριθμητικές προσομοιώσεις με το μετεωρολογικό μοντέλο MM5 παρουσιάζεται στο σχήμα 4-16 για τις 13 και 14 Ιουνίου 2010. Κατά τη διάρκεια της πρώτης μέρας (13/06/2010) η αρχική βορειοανατολική ροή του ανέμου (6.00LST) μετατράπηκε σε δυτική εντός του λεκανοπεδίου και στη συνέχεια σε νοτιοδυτική (12.00LST) και νότια, νοτιοδυτική (15.00LST, 18.00LST) μέχρι τις πρώτες βραδινές ώρες. Αλλαγή της διεύθυνσης του ανέμου από δυτική σε νοτιοδυτική παρατηρήθηκε και στους μετεωρολογικούς σταθμούς στον

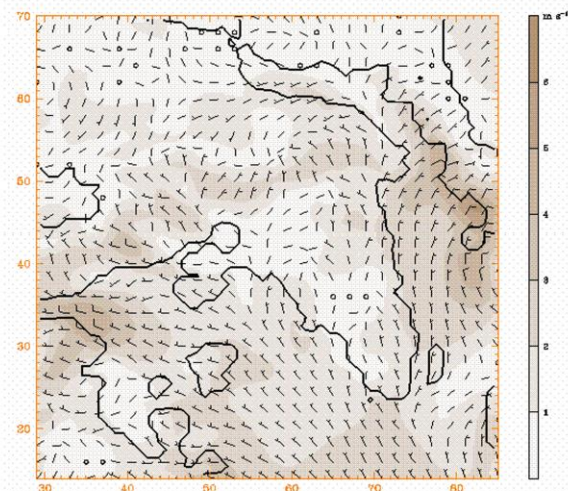
Πειραιά και το Ελληνικό στις 15.00LST ενώ στους σταθμούς που βρίσκονται στο εσωτερικό του λεκανοπεδίου (Αμπελόκηποι, Θησείο, Μαρούσι, Ψυχικό) η διεύθυνση του ανέμου παρέμεινε νότια, νοτιοδυτική από τις πρωινές ώρες (10.00LST) μέχρι αργά το απόγευμα (19.00LST). Αντίστοιχη διάρκεια επικράτησης νοτιοδυτικών ανέμων στο εσωτερικό του λεκανοπεδίου παρατηρήθηκε και από τις προσομοιώσεις των Dandou et al., 2009. Στις ανατολικές περιοχές της Αττικής (Μεσόγεια) η διεύθυνση του ανέμου από βόρεια (9.00LST) άλλαξε σε ανατολική το μεσημέρι (12.00LST) και κατέληξε νοτιοδυτική (18.00LST, 21.00LST) σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων γεγονός που επιβεβαιώνεται και από το σταθμό των Σπάτων. Νοτιότερα ωστόσο ο βόρειος πρωινός άνεμος (9.00LST) μετατράπηκε σε νοτιοδυτικό (12.00LST) καταφέροντας να εισχωρήσει βαθύτερα στην ανατολική Αττική. Η συγκεκριμένη ροή επιβεβαιώνεται από τα δεδομένα του σταθμού στο Μαρκόπουλο στον οποίο καταγράφεται νότιος, νοτιοδυτικός άνεμος μέχρι τις 20.00LST. Στις 14/06/2010 σύμφωνα με τις προσομοιώσεις η θαλάσσια αύρα έχει αναπτυχθεί πλήρως στο λεκανοπέδιο στις 12.00LST και ο άνεμος διατηρεί νότια και νοτιοδυτική διεύθυνση μέχρι τις 18.00LST. Το ανεμολογικό πεδίο εμφανίζει τα ίδια χαρακτηριστικά με την προηγούμενη μέρα και στους σταθμούς μέτρησης. Στην ανατολική Αττική η διεύθυνση του ανέμου μετατρέπεται από βόρεια (6.00LST), βορειοανατολική (9.00LST, 12.00LST) σε ανατολική (15.00LST, 18.00LST) και νοτιοδυτική (21.00LST). Δυτικά του λεκανοπεδίου, στο Θριάσιο Πεδίο, επικρατούν νότιοι άνεμοι από τις 12.00LST μέχρι το βράδυ καθ' όλη τη διάρκεια του διημέρου 13-14/06/2010 όπως επιβεβαιώνεται και από τις μετρήσεις στο σταθμό της Ελευσίνας (Σχ.4-8).

Όσον αφορά στην ταχύτητα του ανέμου, στα σχήματα 4-16 και 4-17 παρουσιάζεται η χρονική διακύμανση των ταχυτήτων στους σταθμούς μέτρησης και των αποτελεσμάτων του μοντέλου MM5 στα αντίστοιχα κελιά για την περίοδο 13-14/06/2010 ενώ στον πίνακα 4-6 παρουσιάζονται τα στατιστικά μεγέθη που προέκυψαν από τη σύγκριση των αριθμητικών τιμών των αποτελεσμάτων. Γενικά ο συντελεστής συσχέτισης- r κυμάνθηκε από 0.072 (σταθμός: Λαύριο) μέχρι 0.963 (σταθμός: Αθήνα-Γκάζι), το συστηματικό σφάλμα-MB πήρε τιμές από -0.078 (σταθμός: Θησείο) μέχρι 1.259 (σταθμός: Αθήνα-Γκάζι). Η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος-RMSE κυμάνθηκε από 0.748 (σταθμός: Μαρούσι) μέχρι 1.632 (σταθμός: Λαύριο) και το κανονικοποιημένο μέσο απόλυτο σφάλμα-NME από 0.571 (σταθμός: Θησείο) μέχρι 1.326 (σταθμός: Λαύριο). Το μοντέλο κατάφερε να αναπαράγει ικανοποιητικά τον ημερήσιο κύκλο των ταχυτήτων στους σταθμούς Αμπελόκηποι, Αθήνα-Γκάζι και Θησείο, οι οποίοι βρίσκονται στο κέντρο του λεκανοπεδίου, υπερεκτιμώντας ωστόσο τις υψηλές τιμές που καταγράφηκαν στους παραπάνω σταθμούς (MB>0) με εξαίρεση το σταθμό του Θησείου για τον οποίο παρατηρήθηκε μικρή υποεκτίμηση των μετρούμενων τιμών (MB<0). Όπως φαίνεται και στον πίνακα 4-6 ο συντελεστής συσχέτισης r παίρνει υψηλές τιμές για τους συγκεκριμένους σταθμούς, με την τιμή $r=0.963$ που

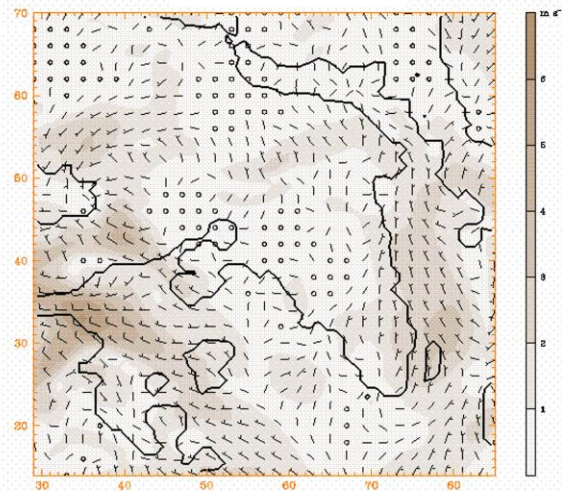
αντιστοιχεί στον σταθμό Αθήνα-Γκάζι στις 14/06/2010 να αποτελεί την υψηλότερη μεταξύ όλων. Στα βορειοανατολικά προάστια η συσχέτιση μεταξύ παρατηρήσεων και μοντέλου είναι ικανοποιητική για τους σταθμούς του Ψυχικού ($r=0.870$ και $r=0.747$ στις 13 και 14 Ιουνίου αντίστοιχα) και του Αμαρουσίου ($r=0.854$ και $r=0.852$ στις 13 και 14 Ιουνίου αντίστοιχα). Το μοντέλο αναπαράγει την ημερήσια διακύμανση της ταχύτητας και στους δύο σταθμούς υπερεκτιμώντας τις μέγιστες τιμές (Σχ.4-17). Στην ανατολική Αττική (Μαρκόπουλο και Σπάτα) η σύγκριση με τις μετρήσεις είναι ικανοποιητική ιδιαίτερα στις 13 Ιουνίου (Μαρκόπουλο: $r=0.707$, Σπάτα: $r=0.763$). Το μοντέλο υπερεκτιμά τις μετρούμενες ταχύτητες ($MB>0$) αναπαράγοντας ικανοποιητικά την ημερήσια διακύμανση. Στο Λαύριο η συσχέτιση μεταξύ μετρήσεων και μοντέλου είναι μικρή. Αυτό οφείλεται στην ιδιαίτερη θέση του σταθμού ο οποίος βρίσκεται πολύ κοντά στην ακτή με αποτέλεσμα να επηρεάζεται σημαντικά από την ροή ανέμου από τη θάλασσα.

Συγκεντρωτικά το μετεωρολογικό μοντέλο κατάφερε να αναπαράγει την επικρατούσα νοτιοδυτική διεύθυνση του ανέμου στο λεκανοπέδιο της Αττικής καθώς και την ανατολική ροή που καταγράφηκε από το σταθμό των Σπάτων στην Ανατολική Αττική κατά τη διάρκεια της ημέρας στις 13 και 14 Ιουνίου 2010. Όσον αφορά στην ταχύτητα του ανέμου η απόδοση του μοντέλου είναι ικανοποιητική για το εσωτερικό του λεκανοπεδίου με το μέγεθος RMSE να κυμαίνεται από 0.799 μέχρι 1.451 (Πίνακας 4-6) στις 14/06/2010 ενώ οι τιμές του συγκεκριμένου στατιστικού μεγέθους στην Ανατολική Αττική κυμάνθηκαν από 0.975 μέχρι 1.537. Στους περισσότερους σταθμούς παρατηρήθηκε υπερεκτίμηση των μετρούμενων ταχυτήτων από το μοντέλο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το ύψος μέτρησης στους σταθμούς διαφέρει από το αντίστοιχο ύψος του κελιού που το μοντέλο δίνει την ταχύτητα αλλά και στο ότι οι μετρήσεις επηρεάζονται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής που είναι τοποθετημένος ο σταθμός (Dandou et al.2009). Επιπλέον, το μοντέλο δεν μπορεί να αποδώσει τις μηδενικές τιμές ταχύτητας που μετρούνται σε κάποιους σταθμούς. Γι' αυτό το λόγο άλλωστε δεν συνηθίζεται να γίνεται έλεγχος ευαισθησίας των μετεωρολογικών μοντέλων για ταχύτητες μικρότερες των 2m/s.

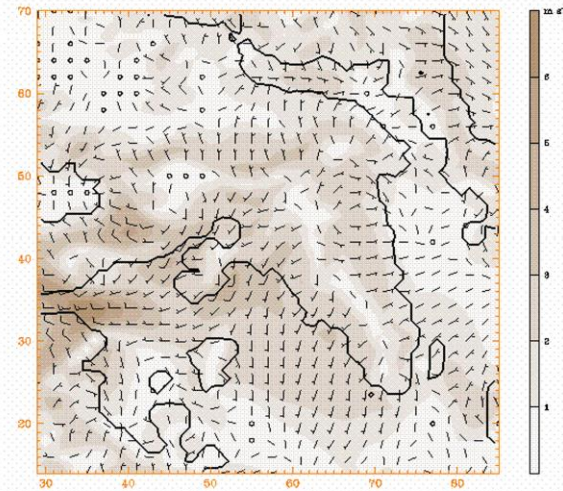
13/06/2010



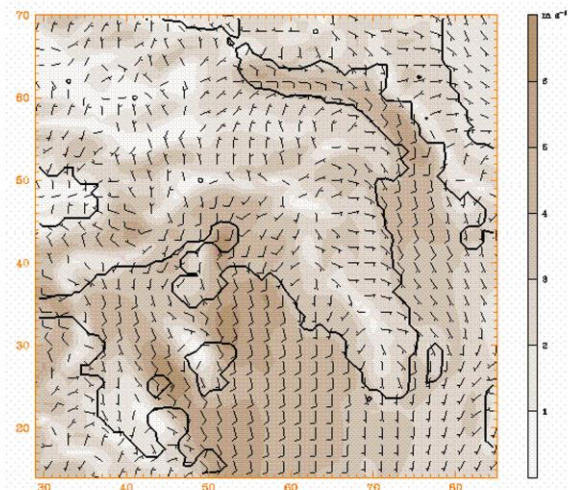
6.00 LST



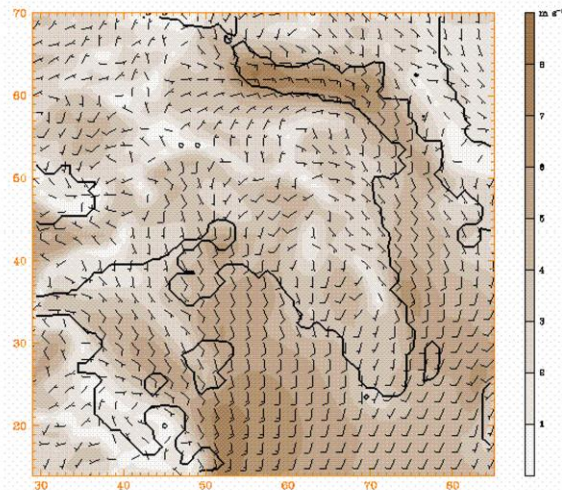
9.00 LST



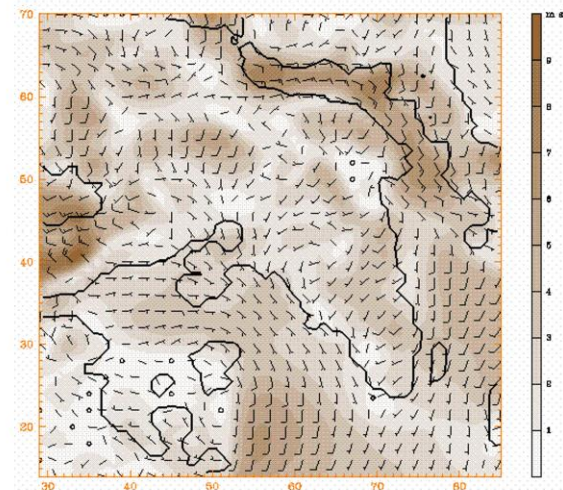
12.00 LST



15.00 LST

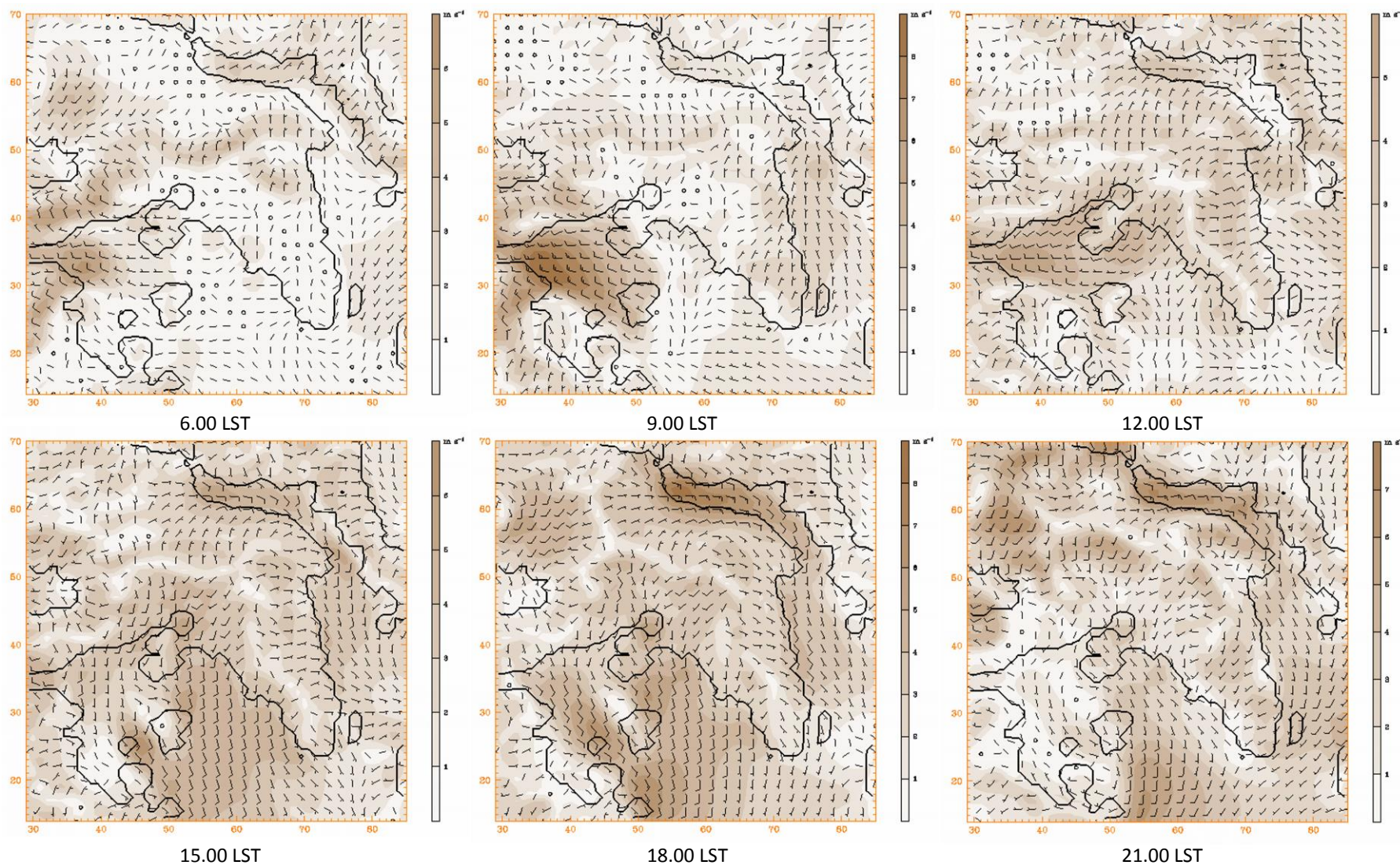


18.00 LST

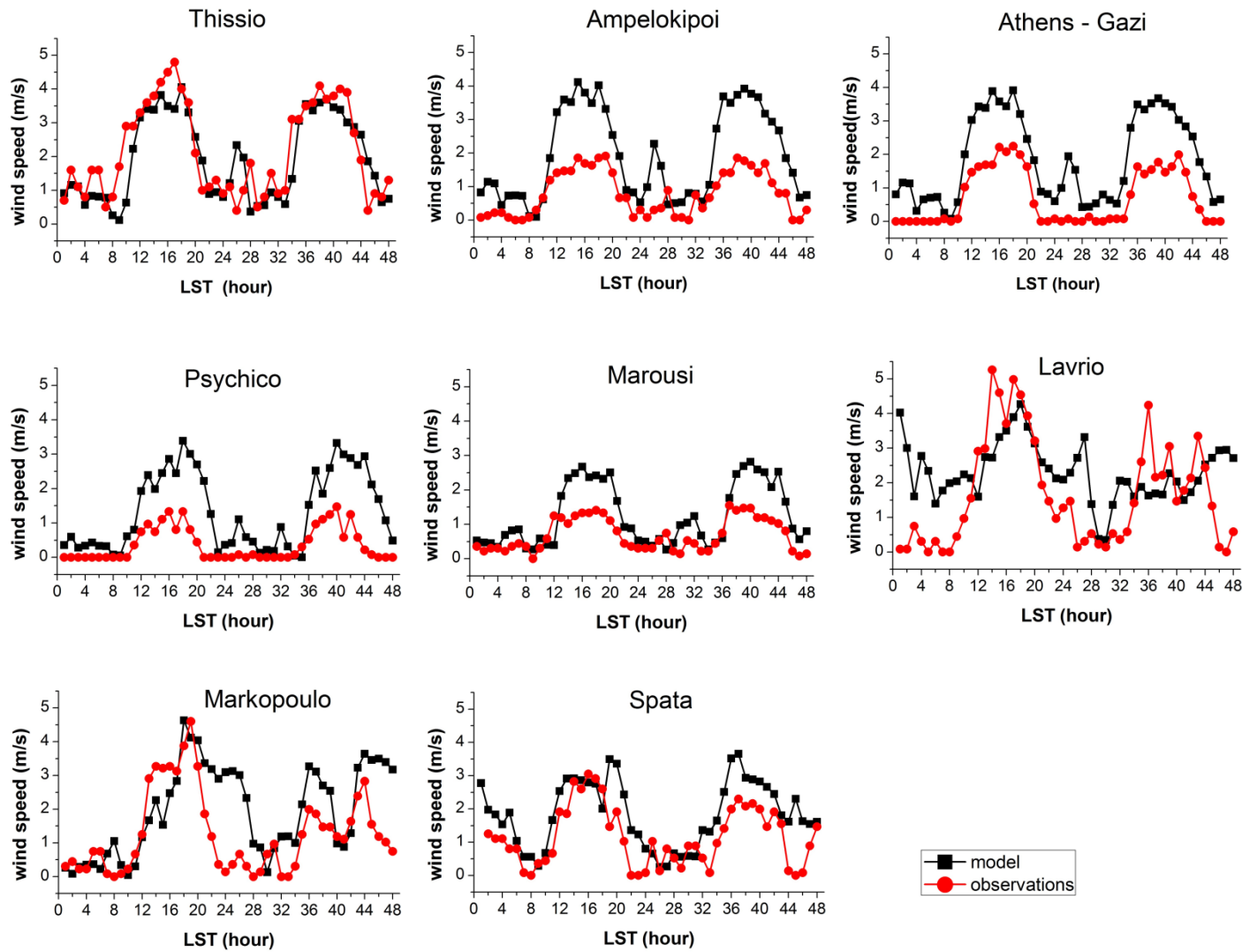


21.00 LST

14/06/2010

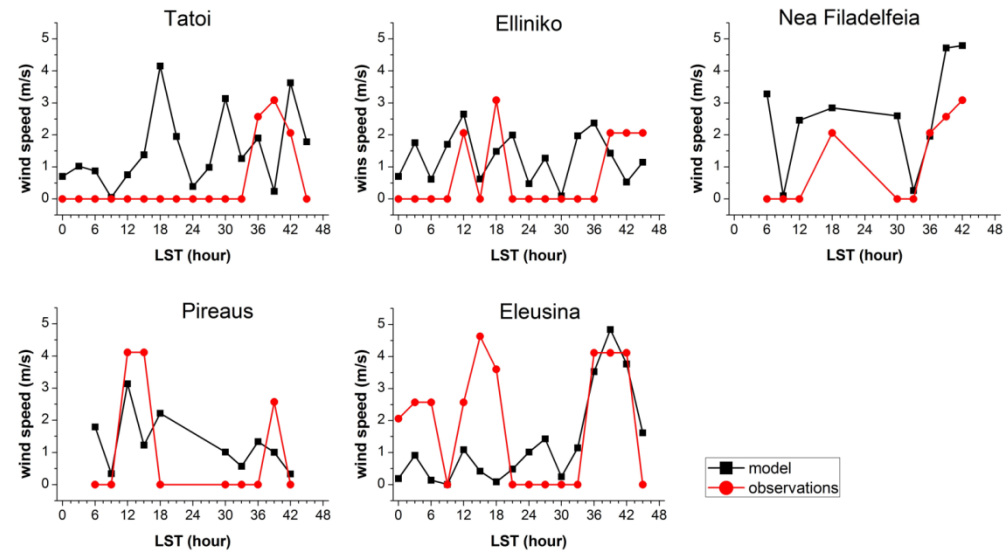


Σχήμα 4-14 Πεδίο διεύθυνσης και ταχύτητας (m/s) ανέμου στις 13-14/06/2010.



Σχήμα 4-15. Ωριαία διακύμανση ταχύτητας ανέμου από μετρήσεις στους σταθμούς του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και τα αποτελέσματα του μοντέλου MM5.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ



Σχήμα 4-16. Ωριαία διακύμανση ταχύτητας ανέμου από μετρήσεις στους σταθμούς της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας και τα αποτελέσματα του μοντέλου MM5.

Πίνακας 4-4. Στατιστικά μεγέθη από τη σύγκριση των μετρήσεων ταχύτητας ανέμου με τα αποτελέσματα του μοντέλου MM5.

Σταθμός	RMSE		NME		MB		r	
	13/06/2010	14/06/2010	13/06/2010	14/06/2010	13/06/2010	14/06/2010	13/06/2010	14/06/2010
Αμπελόκηποι	1.281	1.451	1.051	1.252	1.030	1.217	0.940	0.869
Αθήνα-Γκάζι	1.143	1.390	1.017	1.259	1.017	1.259	0.963	0.927
Θησείο	0.779	0.800	0.571	0.579	-0.411	-0.078	0.877	0.804
Ψυχικό	1.195	1.303	0.947	1.048	0.947	1.020	0.870	0.747
Μαρούσι	0.748	0.799	0.611	0.648	0.519	0.595	0.854	0.852
Λαύριο	1.632	1.537	1.326	1.202	0.705	0.605	0.570	-0.072
Μαρκόπουλο	1.140	1.457	0.836	1.239	0.214	1.117	0.707	0.553
Σπάτα	0.958	0.975	0.780	0.806	0.689	0.679	0.763	0.717

4.3.2 Προσομοιώσεις ποιότητας αέρα

Από τα σχήματα 4-19 και 4-21 φαίνεται ότι το CAMx κατάφερε να αναπαράγει την ημερήσια διακύμανση του όζοντος. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της νύχτας η συγκέντρωσή του παρέμεινε κάτω από τα 40ppb πάνω από το λεκανοπέδιο της Αττικής και για τις δύο ημέρες της προσομοίωσης ενώ άρχισε να αυξάνεται σταδιακά με την έναρξη των φωτοχημικών διεργασιών στην ατμόσφαιρα φτάνοντας τη μέγιστη συγκέντρωση το απόγευμα στις 18.00LST την πρώτη μέρα (13/06/2010) και στις 16.00LST την δεύτερη μέρα (14/06/2010) της προσομοίωσης. Γενικά οι συγκεντρώσεις αυξήθηκαν από τα νοτιοανατολικά της Αττικής και παρέμειναν σε υψηλά επίπεδα μέσα στο λεκανοπέδιο για το χρονικό διάστημα 16.00-19.00LST. Καθώς το όζον είναι φωτοχημικός ρύπος η συγκέντρωσή του άρχισε να μειώνεται μέσα στο λεκανοπέδιο τις νυχτερινές ώρες διατηρώντας ωστόσο υψηλές τιμές στο Σαρωνικό (60-65ppb, 70-75 ppb 23.00LST, στις 13 και 14 Ιουνίου αντίστοιχα). Συγκρίνοντας τα σχήματα 4-19, 4-21 παρατηρούμε επίσης μια διαφοροποίηση στις μέγιστες τιμές εντός του λεκανοπεδίου μεταξύ των δύο ημερών (max O₃: 70ppb στις 13/06-Κυριακή, 80ppb στις 14/06-Δευτέρα) η οποία πιθανότατα οφείλεται στα διαφορετικά επίπεδα εκπομπών που αποδίδονται στις δύο μέρες λόγω κυρίως της μειωμένης κίνησης των οχημάτων την Κυριακή.

Πιο αναλυτικά, στις 14/06/2010 τις πρώτες πρωινές ώρες επικράτησαν πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις O₃ στα νότια και κεντρικά του λεκανοπεδίου (έως 30ppb, στις 6.00LST) ενώ στα βόρεια και βορειοανατολικά προάστια το όζον διατηρήθηκε σε τιμές υποβάθρου (40-50ppb). Αντίστοιχα ήταν και τα επίπεδα όζοντος στον Σαρωνικό Κόλπο, στην ανατολική Αττική και στην θαλάσσια περιοχή γύρω από αυτή όπου δεν παρατηρούνται υψηλές εκπομπές NO_x οι οποίες να λειτουργούν ως καταβόθρες του όζοντος. Η επικράτηση υψηλών συγκεντρώσεων υποβάθρου στις συγκεκριμένες περιοχές την καλοκαιρινή περίοδο επιβεβαιώνεται και από τους Bossioli et al. (2007) και Kalabokas et al. (2012). Στην συνέχεια (9.00LST) παρατηρήθηκε μικρή αύξηση των συγκεντρώσεων O₃ η οποία έγινε μεγαλύτερη με την έναρξη των φωτοχημικών διεργασιών στην ατμόσφαιρα από τις 12.00LST και μετά. Κατά τις νυχτερινές ώρες οι δυτικοί άνεμοι που επικράτησαν στον Σαρωνικό Κόλπο (Σχ.4-16) συντέλεσαν στη μεταφορά των πρόδρομων ενώσεων του όζοντος (NO_x και VOC) στην νοτιοανατολική θαλάσσια περιοχή της Αττικής τροφοδοτώντας τις μεταγενέστερες φωτοχημικές διεργασίες (Varinou et al., 1999, Bossioli et al., 2007) και οδηγώντας στον σχηματισμό όζοντος στην περιοχή (12.00LST, Σχ.4-21). Με τη βοήθεια του νότιου, νοτιοανατολικού ανέμου που επικράτησε στο Σαρωνικό Κόλπο το πλούμιο του O₃ μεταφέρθηκε στη συνέχεια στο εσωτερικό του λεκανοπεδίου και σε συνδυασμό με το όζον που δημιουργήθηκε εντός

του λεκανοπεδίου διαμόρφωσαν τις πολύ υψηλές συγκεντρώσεις που καταγράφηκαν από το δίκτυο των σταθμών μέτρησης στην περιοχή και προέκυψαν από την αριθμητική προσομοίωση. Υψηλές τιμές O_3 εμφανίζονται και στα Μεσόγεια (65-70ppb) τη χρονική περίοδο 15.00-19.00LST. Με τη δύση του ηλίου και τη λήξη των φωτοχημικών διεργασιών οι συγκεντρώσεις του όζοντος στο λεκανοπέδιο μειώθηκαν (23.00LST) ενώ υψηλές παρέμειναν οι τιμές στον Σαρωνικό Κόλπο.

Προκειμένου να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα του CAMx ακολούθησε σύγκριση των ωριαίων πλεγματικών συγκεντρώσεων με μετρήσεις από το δίκτυο των σταθμών του ΥΠΕΚΑ και των σταθμών του Διεθνή Αερολιμένα Αθηνών «Ελευθέριος Βενιζέλος». Είναι σημαντικό το μοντέλο να μπορεί να αναπαράγει τόσο τον ημερήσιο κύκλο του O_3 όσο και τις μέγιστες συγκεντρώσεις που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια επεισοδίων ρύπανσης εντός του λεκανοπεδίου της Αττικής. Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η ημερήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων O_3 για το μοντέλο και τις μετρήσεις. Επίσης γίνεται στατιστική μελέτη με τη βοήθεια στατιστικών μεγεθών όπως ο συντελεστής συσχέτισης (correlation coefficient – r), το συστηματικό σφάλμα (Mean Bias-MB), η τετραγωνική ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error - RMSE), το κανονικοποιημένο μέσο απόλυτο σφάλμα (Normalized Mean Error-NME), το κανονικοποιημένο μέσο συστηματικό σφάλμα (Normalized Mean Bias-NMB), το μέσο κανονικοποιημένο συστηματικό σφάλμα (Mean Normalized Bias Error-MNBE), το μέσο κανονικοποιημένο απόλυτο ακαθάριστο σφάλμα (Mean Normalized Gross Error-MNGE) και οι μέσοι όροι των ωριαίων συγκεντρώσεων από τις παρατηρήσεις και το μοντέλο (Παράρτημα 3), μεγέθη τα οποία θα βοηθήσουν στην αξιολόγηση του μοντέλου ως προς την αναπαραγωγή της υφιστάμενης κατάστασης στην ατμόσφαιρα (EPA, 1991). Τα αποτελέσματα της στατιστικής μελέτης παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για τις 13 και 14 Ιουνίου 2010 στους πίνακες 4-7 και 4-8 αντίστοιχα. Για τον υπολογισμό των στατιστικών μεγεθών MNBE και MNGE χρησιμοποιήθηκε ως κατώφλι η τιμή $120\mu\text{g}/\text{m}^3$ με στόχο να περιοριστεί η επίδραση των χαμηλών συγκεντρώσεων. Για τον σταθμό Πειραιάς-1 δεν υπολογίστηκαν οι τιμές των MNBE και MNGE στις 13/06/2010 καθώς δεν καταγράφηκαν συγκεντρώσεις μεγαλύτερες της τιμής κατωφλίου την συγκεκριμένη ημέρα.

Με τη βοήθεια του σχήματος 4-19 και του πίνακα 4-7 παρατηρούμε ότι το CAMx υπερεκτίμησε τις συγκεντρώσεις του όζοντος στον Πειραιά ($MB = 52.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Η μέση τιμή των μετρούμενων συγκεντρώσεων στον σταθμό ήταν $40.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ενώ η μέση συγκέντρωση της αριθμητικής προσομοίωσης στα συγκεκριμένα κελιά ήταν πολύ υψηλότερη ($92.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Οι τιμές των μεγεθών NMB και NME επιβεβαιώνουν την μεγάλη διαφορά που υπάρχει μεταξύ των τιμών από τις μετρήσεις και των αποτελεσμάτων του μοντέλου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο σταθμός του Πειραιά βρίσκεται σε μια ιδιαίτερα επιβαρυμένη περιοχή όσον αφορά στα πεδία εκπομπών που έχουν εισαχθεί στο μοντέλο λόγω της ύπαρξης του μεγαλύτερου εμπορικού και

επιβατικού λιμανιού της χώρας. Επιπλέον, οι τιμές της ταχύτητας του ανέμου που δίνει το μετεωρολογικό μοντέλο είναι σχετικά χαμηλές (χαμηλότερες σε σχέση με τιμές του σταθμού της ΕΜΥ) δυσχεραίνοντας τη διασπορά των ρύπων. Για την επιβεβαίωση ωστόσο της συγκεκριμένης διαπίστωσης απαιτούνται περισσότερες προσομοιώσεις ώστε να μελετηθεί και η επίδραση διαφορετικών μετεωρολογικών συνθηκών και εκπομπών. Ο συντελεστής συσχέτισης- r ωστόσο παίρνει τιμή ($r = 0.74$). Στο σταθμό της Νέας Σμύρνης (αστικός-υποβάθρου) η στατιστική μελέτη δίνει καλύτερα αποτελέσματα ($r = 0.85$) με το CAMx να υπερεκτιμά τις μετρήσεις τις πρωινές ώρες αλλά να αναπαράγει την ημερήσια διακύμανση σε σημαντικό βαθμό κατά την υπόλοιπη διάρκεια της ημέρας.

Ανάλογη είναι η εικόνα και στα δυτικά προάστια (σταθμός: Περιστέρι), ικανοποιητική συσχέτιση ($r = 0.82$) και υπερεκτίμηση των πρωινών ελάχιστων τιμών. Στα βορειοανατολικά (Αγία Παρασκευή και Μαρούσι) και βόρεια (Λυκόβρυση) προάστια το μοντέλο αναπαρήγαγε τις υψηλές συγκεντρώσεις όζοντος που σημειώθηκαν υπερεκτιμώντας τη μέση τιμή των μετρήσεων κατά $36.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και $31.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ στους σταθμούς Μαρούσι και Λυκόβρυση αντίστοιχα, στους οποίους ο συντελεστής συσχέτισης πήρε τη μεγαλύτερη τιμή ($r = 0.91$) και υποεκτιμώντας τη μέση τιμή των μετρήσεων κατά $3.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ στην Αγία Παρασκευή. Στην ανατολική Αττική δεν υπάρχει μεγάλη διασπορά μεταξύ των μετρήσεων και των αποτελεσμάτων του μοντέλου ($18.20 < \text{NME} < 23.47$) και η επικράτηση τιμών υποβάθρου ($> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ κατά το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα) κατά τις νυχτερινές ώρες αναπαράχθηκε από το μοντέλο. Γενικά τα στατιστικά μεγέθη MNBE και MNGE κυμάνθηκαν εντός των ορίων που έχουν καθοριστεί από την EPA ($\text{MNBE} \leq \pm 15\%$, $\text{MNGE} \leq 35\%$) για όλους τους σταθμούς (Πίνακας 4-7) αποδεικνύοντας ότι η απόδοση του μοντέλου για την συγκεκριμένη μέρα ήταν ικανοποιητική ιδιαίτερα κατά την αναπαραγωγή των υψηλών συγκεντρώσεων όζοντος.

Την επόμενη μέρα (14/06/2010) σημειώθηκε επεισόδιο ρύπανσης ($\text{O}_3 > 180 \mu\text{g}/\text{m}^3$) στα βορειοανατολικά προάστια σύμφωνα με τα δεδομένα των σταθμών (Σχ.4-22) το οποίο το μοντέλο αναπαρήγαγε σε σημαντικό βαθμό ($r = 0.79$, 0.90 και 0.94 στους σταθμούς Αγία Παρασκευή, Μαρούσι και Λυκόβρυση, αντίστοιχα) χωρίς ωστόσο οι τιμές του όζοντος στα αντίστοιχα κελιά να υπερβούν τα $148 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Οι θετικές τιμές του συστηματικού σφάλματος MB στα συγκεκριμένα κελιά υποδηλώνουν κυρίως την υπερεκτίμηση από το μοντέλο των πρωινών συγκεντρώσεων η οποία είναι μεγαλύτερη στο Μαρούσι και τη Λυκόβρυση γεγονός που παρατηρήθηκε στους περισσότερους σταθμούς και στις δύο ημέρες της προσομοίωσης. Προκειμένου να ελεγχθεί η ικανότητα αναπαραγωγής των υψηλών συγκεντρώσεων από το μοντέλο υπολογίστηκαν τα μεγέθη MNBE και MNGE θέτοντας ως όριο κατωφλίου τα $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ έτσι ώστε να εξαιρεθούν τα ζεύγη μετρήσεων-μοντέλου που αντιστοιχούν σε χαμηλές συγκεντρώσεις και διαπιστώθηκε ότι για τους

τρεις προαναφερθέντες σταθμούς και τον Πειραιάς-1 οι τιμές του MNBE απέκλιναν ελάχιστα από τα όρια της EPA ενώ για το MNGE ήταν εντός των ορίων. Το γεγονός ότι οι απόλυτες τιμές των δύο μεγεθών συμπίπτουν για τους παραπάνω τέσσερις σταθμούς δείχνει τη συστηματική υποεκτίμηση ($MNBE < 0$) και υπερεκτίμηση ($MNBE > 0$) των συγκεντρώσεων από το μοντέλο. Στο Περιστέρι και την Νέα Σμύρνη το μοντέλο αναπαρήγαγε τις μέγιστες συγκεντρώσεις ενώ στον Πειραιά και τη δεύτερη μέρα της προσομοίωσης το μοντέλο υπερεκτίμησε τις μετρήσεις τις μεσημεριανές και απογευματινές ώρες. Η μέγιστη διαφορά κατά το χρονικό διάστημα 15.00-20.00LST ήταν $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Στην ανατολική Αττική, όπως και στα βορειοανατολικά προάστια το μοντέλο δίνει υψηλές συγκεντρώσεις τις πρωινές ώρες οι οποίες επιβεβαιώνονται εν μέρει μόνο από τον σταθμό της Παλλήνης. Όσον αφορά στις υψηλές συγκεντρώσεις ($>120 \mu\text{g}/\text{m}^3$) αναπαράγονται ορθά από το μοντέλο και για τους τρεις σταθμούς ($-2.3 < MNBE < 1.00$ και $4.91 < MNGE < 8.05$) (Πίνακας 4-8).

Συνοπτικά το μοντέλο κατάφερε να αναπαράγει τη μεσημεριανή μέγιστη συγκέντρωση όζοντος που καταγράφηκε από τους σταθμούς μέτρησης τόσο ως προς τη χρονική στιγμή εμφάνισης, τη χρονική διάρκεια όσο και ως προς το μέγεθος στους περισσότερους σταθμούς. Σε αντίθεση με την παρούσα εργασία, οι Ρουρκου et al., 2008a παρατήρησαν ότι οι μέγιστες συγκεντρώσεις εμφανίστηκαν καθυστερημένες κατά την προσομοίωση λόγω μη επαρκούς αναπαραγωγής των μετεωρολογικών συνθηκών. Στην παρούσα μελέτη το πλούμιο του O_3 κατάφερε να εισχωρήσει στο εσωτερικού του λεκανοπεδίου και να προσεγγίσει ακόμη και τους πιο απομακρυσμένους σταθμούς γεγονός που δεν παρατηρήθηκε κατά τις προσομοιώσεις των Bossioli et al. (2007). Στα βόρεια, βορειοανατολικά προάστια (Μαρούσι, Αγία Παρασκευή, Λυκόβρυση) ωστόσο παρατηρήθηκε υποεκτίμηση της μέγιστης συγκέντρωσης στις 14/06/2010. Επίσης, πρέπει να αναφερθεί ότι στους σταθμούς Μαρούσι και Λυκόβρυση η ημερήσια διακύμανση ξεκινάει από τιμές υποβάθρου και όχι χαμηλές συγκεντρώσεις όπως προκύπτει από τις μετρήσεις. Όπως φαίνεται στα σχήματα 4-19 και 4-21 το όζον διαλύεται και φτάνει σε επίπεδα μικρότερα των 10ppb τις νυχτερινές ώρες μόνο στα νότια του λεκανοπεδίου ενώ στις υπόλοιπες περιοχές διατηρείται στα $50\text{-}60 \text{ppb}$. Αυτό πιθανότατα να οφείλεται στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου που υπολογίστηκαν από το μετεωρολογικό μοντέλο. Οι Ρουρκου et al. 2008b συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αριθμητικών προσομοιώσεων με δεδομένα σταθμών διαπίστωσαν ότι το μοντέλο υποεκτιμά τις μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις όζοντος στους σταθμούς υποβάθρου της Αττικής, Νέα Σμύρνη και Λυκόβρυση, κατά 16.9ppb και 10.7ppb αντίστοιχα ενώ ικανοποιητική είναι η απόδοση του μοντέλου για τους σταθμούς του Αμαρουσίου και της Γεωπονικής. Γενικά η μέση ημερήσια συγκέντρωση O_3 όπως αυτή προέκυψε από την προσομοίωση κυμάνθηκε από 59ppb στη Νέα Σμύρνη έως 75ppb στη Λυκόβρυση.

Όσον αφορά στα αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} , η αριθμητική προσομοίωση δίνει υψηλές συγκεντρώσεις στο κέντρο της αστικής περιοχής του λεκανοπεδίου, στα βορειοανατολικά προάστια στην Ευρύτερη Περιοχή του Πειραιά και τα νοτιοδυτικά παράλια και τις δύο ημέρες μελέτης (13-14/06/2010, Σχ.4-23). Πιο συγκεκριμένα, στο κέντρο της Αθήνας οι ωριαίες τιμές των συγκεντρώσεων των PM_{10} παρουσίασαν δύο μέγιστα κατά τη διάρκεια της ημέρας ($200\mu g/m^3$) στις 6.00LST και στις 22.00LST. Οι τιμές αυτές οφείλονται στις τοπικές πηγές και κυρίως στην κίνηση των οχημάτων. Η μέση ημερήσια συγκέντρωση είναι $125.08\mu g/m^3$ και $105.29\mu g/m^3$ στις 13 και 14 Ιουνίου αντίστοιχα ενώ οι αντίστοιχες τιμές από τον σταθμό μέτρησης στην Αρτιστοτέλους είναι αρκετά χαμηλότερες ($55\mu g/m^3$ και $67\mu g/m^3$ για τις δύο μέρες της προσομοίωσης αντίστοιχα, πίνακας 4-9).

Στα βορειοανατολικά προάστια οι υψηλές τιμές εμφανίζονται νωρίς το πρωί (Μαρούσι: $104\mu g/m^3$, 13/06 6.00LST) ενώ το μέγιστο παρατηρείται τις νυχτερινές ώρες από 13 προς 14 Ιουνίου (Μαρούσι: $113\mu g/m^3$, 24.00LST, Λυκόβρυση: $113\mu g/m^3$, 2.00LST). Ακολουθεί μείωση των τιμών κατά τη διάρκεια της ημέρας και αύξηση αυτών το επόμενο βράδυ (Μαρούσι: $92\mu g/m^3$, Λυκόβρυση: $58\mu g/m^3$, 22.00LST). Παρόμοια ημερήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων με το Μαρούσι παρουσιάζουν οι τιμές του μοντέλου για την περιοχή της Αγίας Παρασκευής με χαμηλότερες ωστόσο συγκεντρώσεις. Οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται τις βραδινές ώρες και δεν ξεπερνούν τα $100\mu g/m^3$ (Σχ.4-24). Σύμφωνα με τις μετρήσεις των Pateraki et al. (2008, 2013) στην Αγία Παρασκευή την περίοδο 2003-2008, η μέση συγκέντρωση στην περιοχή είναι $34.1 \pm 23.3\mu g/m^3$ ενώ οι μετρήσεις μόνο για το έτος 2008 έδειξαν ότι η μέση συγκέντρωση κυμάνθηκε σε λίγο χαμηλότερα επίπεδα ($33.2 \pm 22.5\mu g/m^3$). Επιπλέον από τη μελέτη των Vardoulakis and Kassomenos (2008) προκύπτει ότι τα επίπεδα των PM_{10} κυμάνθηκαν μεταξύ των τιμών 29.9 και $55.0\mu g/m^3$ την περίοδο 2001-2003. Ο συγκεκριμένος σταθμός χαρακτηρίζεται ως σταθμός υποβάθρου και δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από την κίνηση των οχημάτων και άλλων σταθερών πηγών. Οι τιμές του μοντέλου ωστόσο αντιπροσωπεύουν μια μέση συγκέντρωση στο κέντρο του αντίστοιχου κελιού με αποτέλεσμα να μην μπορεί να αναπαράγει τις ιδιαιτερότητες του συγκεκριμένου σταθμού και να δίνει υψηλότερες τιμές. Συγκρίνοντας τις μέσες τιμές 24ώρου που καταγράφηκαν από το δίκτυο των σταθμών του ΠΕΡΠΑ με τις αντίστοιχες τιμές του μοντέλου (Πίνακας 4-9) παρατηρούμε ότι το μοντέλο υπερεκτίμησε τα σωματίδια στην Αγία Παρασκευή και το Μαρούσι κατά $36.83\mu g/m^3$ και $32.81\mu g/m^3$ στις 13/06/2010 αντίστοιχα ενώ υποεκτίμησε τις συγκεντρώσεις στο σταθμό της Λυκόβρυσης κατά $11.76\mu g/m^3$. Επίσης το μοντέλο δεν υπέδειξε την αύξηση στην 24-ωρη τιμή της συγκέντρωσης που παρατηρήθηκε στους συγκεκριμένους σταθμούς μεταξύ των δύο ημερών (Αγία Παρασκευή: $13\mu g/m^3$ και Μαρούσι: $10\mu g/m^3$). Πιο κοντά στις μετρούμενες τιμές είναι τα αποτελέσματα του CAMx για τις 14 Ιουνίου. Υψηλές εμφανίζονται οι μέσες συγκεντρώσεις των PM_{10}

στην Λυκόβρυση σύμφωνα με τις πειραματικές μετρήσεις των Theodosi et al. (2011) ($59\mu\text{g}/\text{m}^3$) κατά την περίοδο Σεπτέμβριος 2005 - Αύγουστος 2006 λόγω των ιδιαίτερων τοπικών χαρακτηριστικών (άστρωτοι δρόμοι και μη χτισμένες περιοχές) που συνεισφέρουν σημαντικά στα επίπεδα σκόνης. Η μελέτη των δεδομένων ποιότητας αέρα του ΕΔΠΑΡ από τους Grivas et al. (2008) για την περίοδο 2001-2004 απέδωσε μέση συγκέντρωση PM_{10} στο σταθμό της Λυκόβρυσης $60.9 \pm 26.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Επιβαρυμένη εμφανίζεται και η περιοχή του Ασπρόπυργου της βραδινές ώρες λόγω της έντονης βιομηχανικής δραστηριότητας και των ιδιαίτερων πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται από τις μονάδες. Μέγιστη συγκέντρωση στη ΒΙ.ΠΕ. Θριασίου Πεδίου είναι τα $54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ σύμφωνα με το CAMx. Η ύπαρξη των διυλιστηρίων Ασπροπύργου και Ελευσίνας, η Χαλυβουργική Βιομηχανία, τα λατομεία και γενικότερα η ΒΙ.ΠΕ. Θριασίου Πεδίου σε συνδυασμό με την επικράτηση νοτιοδυτικών ανέμων στην περιοχή επιβαρύνουν τις τοπικές εκπομπές στα δυτικά προάστια του λεκανοπεδίου (Λιόσια, Περιστέρι, Αχαρναί) με αιωρούμενα σωματίδια. Οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται τις βραδινές και πρώτες πρωινές ώρες και φτάνουν μέχρι και τα $110\mu\text{g}/\text{m}^3$ (μέγιστη συγκέντρωση στην περιοχή των Λιοσίων στις 13/06/2010, 2.00LST). Υψηλές συγκεντρώσεις PM_{10} στο Θριάσιο Πεδίο έχουν διαπιστωθεί και από την Πατεράκη (2012) οι οποίες μάλιστα είναι οι υψηλότερες που σημειώνονται στην Αττική κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Η μέση ημερήσια συγκέντρωση των PM_{10} στους σταθμούς του Ασπρόπυργου και της Μάνδρας είναι $86.6 \pm 35.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και $61.7 \pm 20.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ αντίστοιχα (Pateraki et al., 2013).

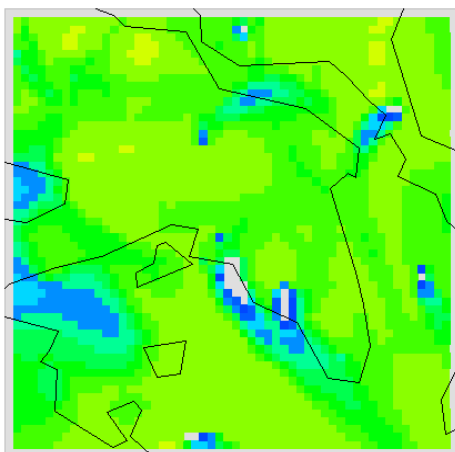
Στα νότια προάστια και κυρίως στον Πειραιά η μέγιστη συγκέντρωση είναι $130\mu\text{g}/\text{m}^3$ (13/06/2010, 6.00LST). Στη συνέχεια τιμές μειώνονται και κυμαίνονται γύρω στα $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ ενώ αύξηση αυτών παρατηρείται το χρονικό διάστημα 22.00-24.00LST ($51\mu\text{g}/\text{m}^3$ στον Πειραιά, στις 23.00LST). Ιδιαίτερα επιβαρυμένη διαπιστώνεται ότι είναι η Ευρύτερη Περιοχή του Πειραιά και από την μελέτη των Grivas et al. (2008), σύμφωνα με την οποία η μέση συγκέντρωση των PM_{10} κατά την περίοδο 2001-2004 είναι $58.8 \pm 20.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Η κατανομή των σωματιδίων στην ανατολική Αττική κατά την περίοδο μελέτης διατηρήθηκε σε μέτριες συγκεντρώσεις. Σύμφωνα με τις μετρήσεις στο σταθμούς του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών «Ελευθέριος Βενιζέλος» στα Γλυκά Νερά και την Παλλήνη η μέση τιμή 24ώρου ήταν $33.21\mu\text{g}/\text{m}^3$, $29.19\mu\text{g}/\text{m}^3$ και $40.80\mu\text{g}/\text{m}^3$, $32.43\mu\text{g}/\text{m}^3$ στις 13 και 14 Ιουνίου αντίστοιχα (Πίνακας 4-9). Γενικά το μοντέλο αναπαρήγαγε σε ικανοποιητικό βαθμό τη μέση τιμή των μετρήσεων υπερεκτιμώντας τη μέγιστη ωριαία συγκέντρωση στα Γλυκά Νερά κατά τη διάρκεια των νυχτερινών ωρών. Υποεκτίμηση των πειραματικών τιμών διαπιστώθηκε από τους Im et al. (2014), οι οποίοι διαπίστωσαν ότι η υποεκτίμηση είναι πολύ μεγαλύτερη για τους αστικούς σταθμούς της

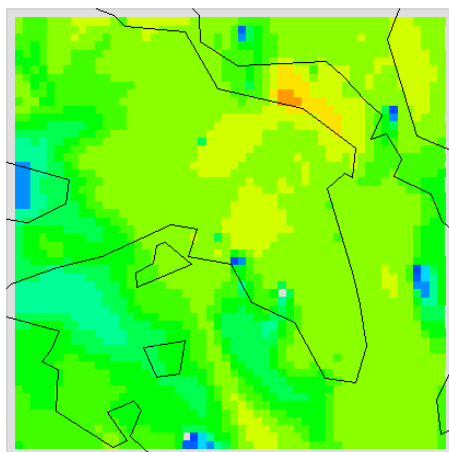
Αθήνας σε σχέση με τον σταθμό υποβάθρου της Φινοκαλιάς στην Κρήτη γεγονός που πιθανότατα οφείλεται στα αστικά σωματίδια που προκύπτουν κατά την επαναιώρηση της σκόνης. Στα ίδια συμπεράσματα σχετικά με τη συμπεριφορά του μοντέλου κατέληξαν και οι Athanasopoulou et al. (2010) για την περιοχή της ΕΠΑ οι οποίοι συμπεριλαμβάνοντας τα σωματίδια από την επαναιώρηση στις εκπομπές κατάφεραν να αυξήσουν τις συγκεντρώσεις των σωματιδίων χωρίς ωστόσο τα αποτελέσματα του μοντέλου να φτάσουν τις μετρούμενες συγκεντρώσεις. Η παρούσα εργασία κατόρθωσε να εξάγει τιμές των συγκεντρώσεων των σωματιδίων αλλά και του όζοντος πιο κοντά στις τιμές του δικτύου παρακολούθησης σε σχέση με τις προαναφερθείσες παλαιότερες μελέτες.

Τα αποτελέσματα των παραπάνω συγκρίσεων μπορούν να μας οδηγήσουν στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο αναπαρήγαγε σε ικανοποιητικό βαθμό το μελετώμενο επεισόδιο ρύπανσης καθώς κατάφερε να αναπαράγει την ημερήσια διακύμανση και τις υψηλές συγκεντρώσεις O_3 που καταγράφηκαν από τους σταθμούς μέτρησης αλλά και τις συγκεντρώσεις 24ώρου των PM_{10} . Αυτό σημαίνει ότι τα βελτιωμένα δεδομένα εισόδου, δηλαδή το επικαιροποιημένο σύστημα απογραφής εκπομπών βελτίωσε σημαντικά τα αποτελέσματα όπως αναμενόταν.

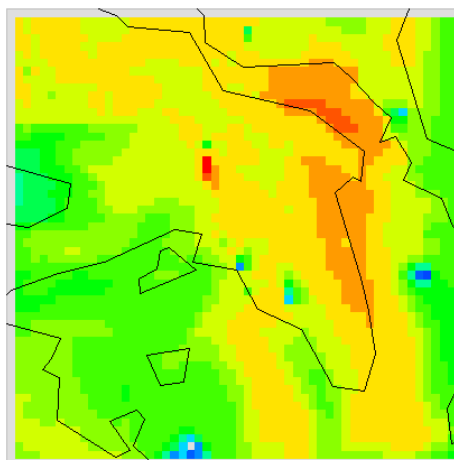
O₃ – 13/06/2010



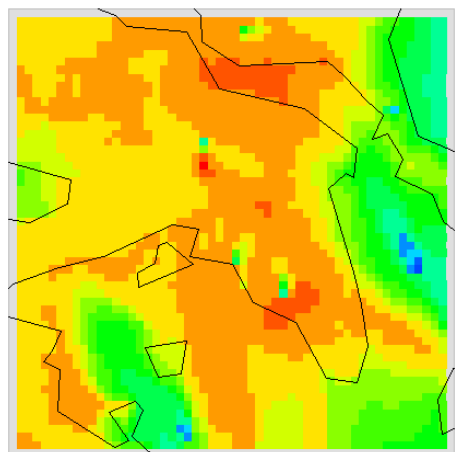
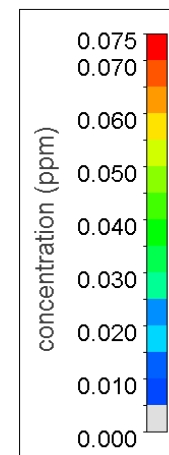
6.00 LST



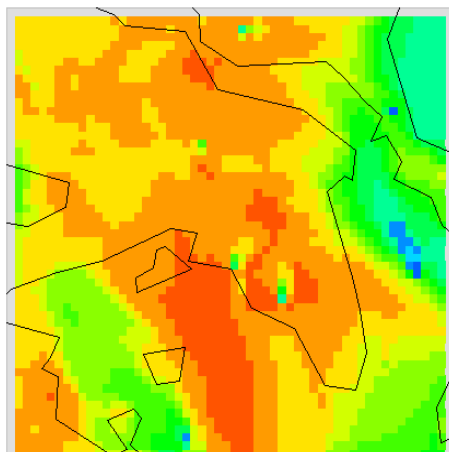
9.00 LST



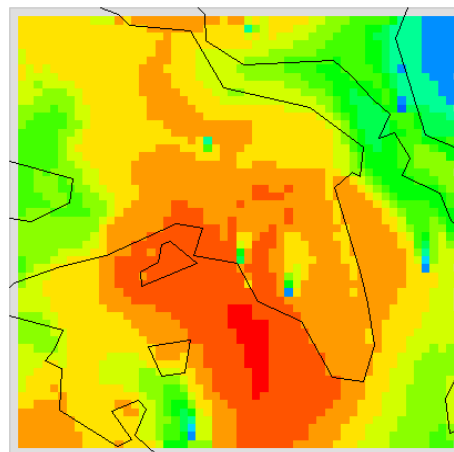
12.00 LST



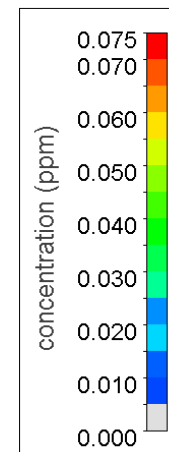
15.00 LST

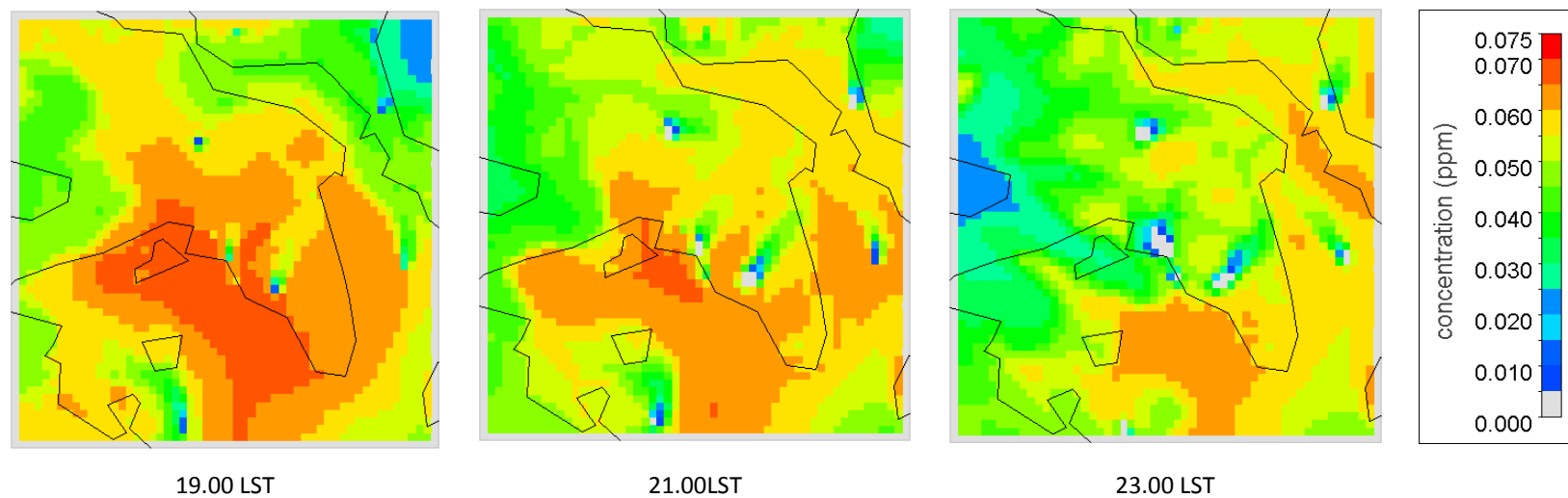


16.00 LST



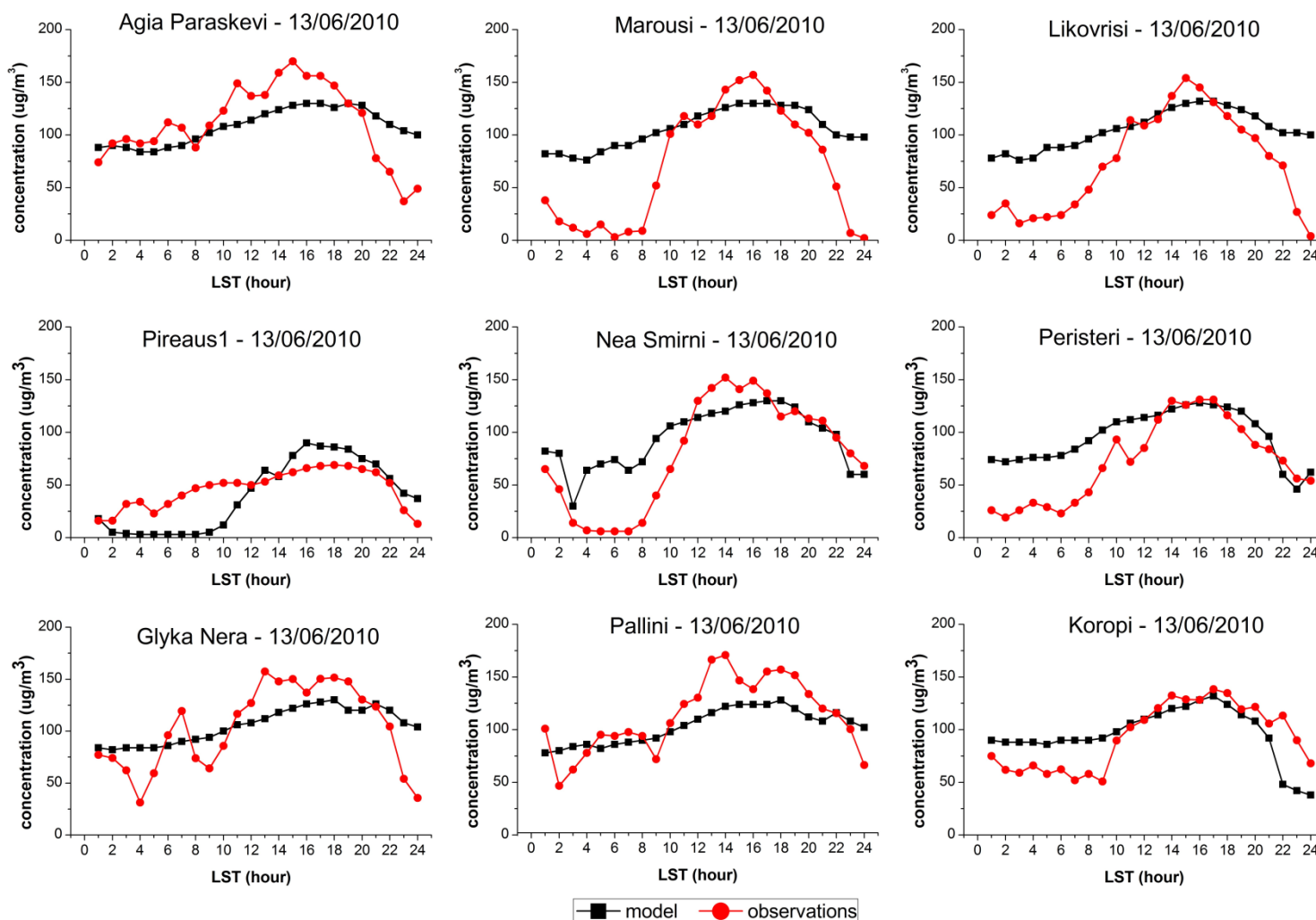
18.00 LST





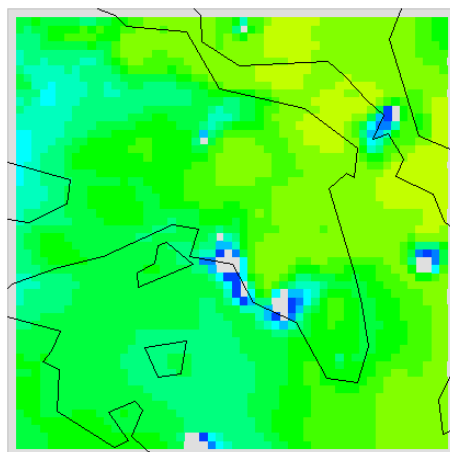
Σχήμα 4-17. Χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων O₃ στις 13/06/2010 για το πλέγμα χωρικής ανάλυσης 2x2km².

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

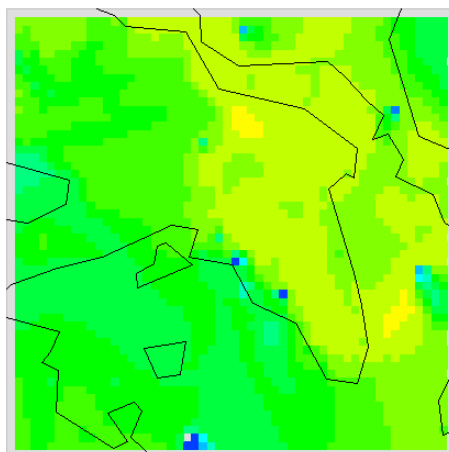


Σχήμα 4-18. Σύγκριση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης με μετρήσεις O_3 για τις 13/06/2010.

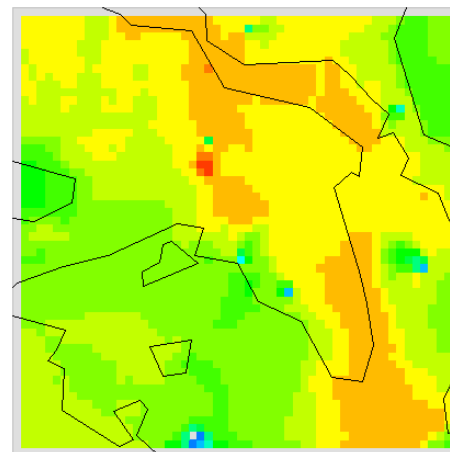
O_3 – 14/06/2010



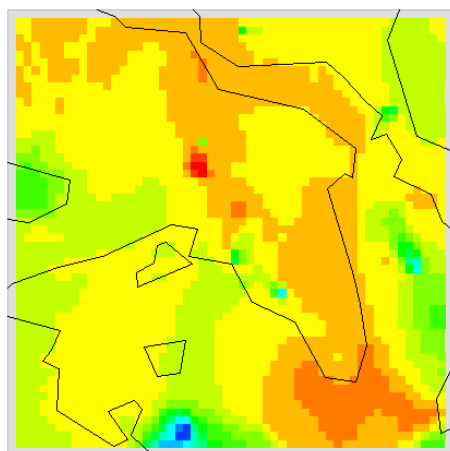
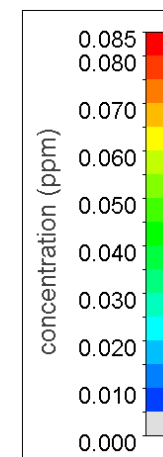
6.00 LST



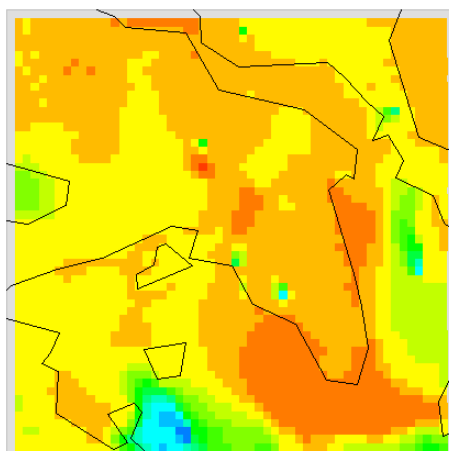
9.00 LST



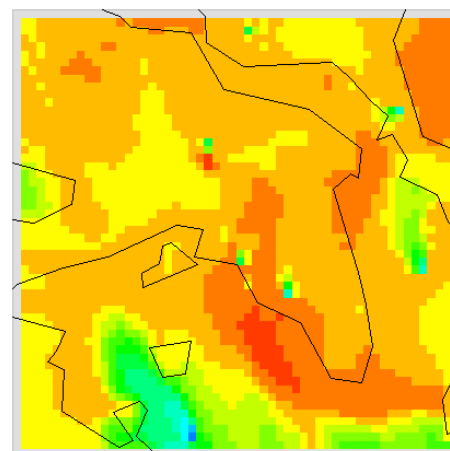
12.00 LST



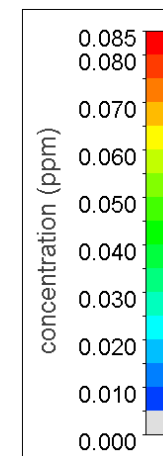
13.00 LST



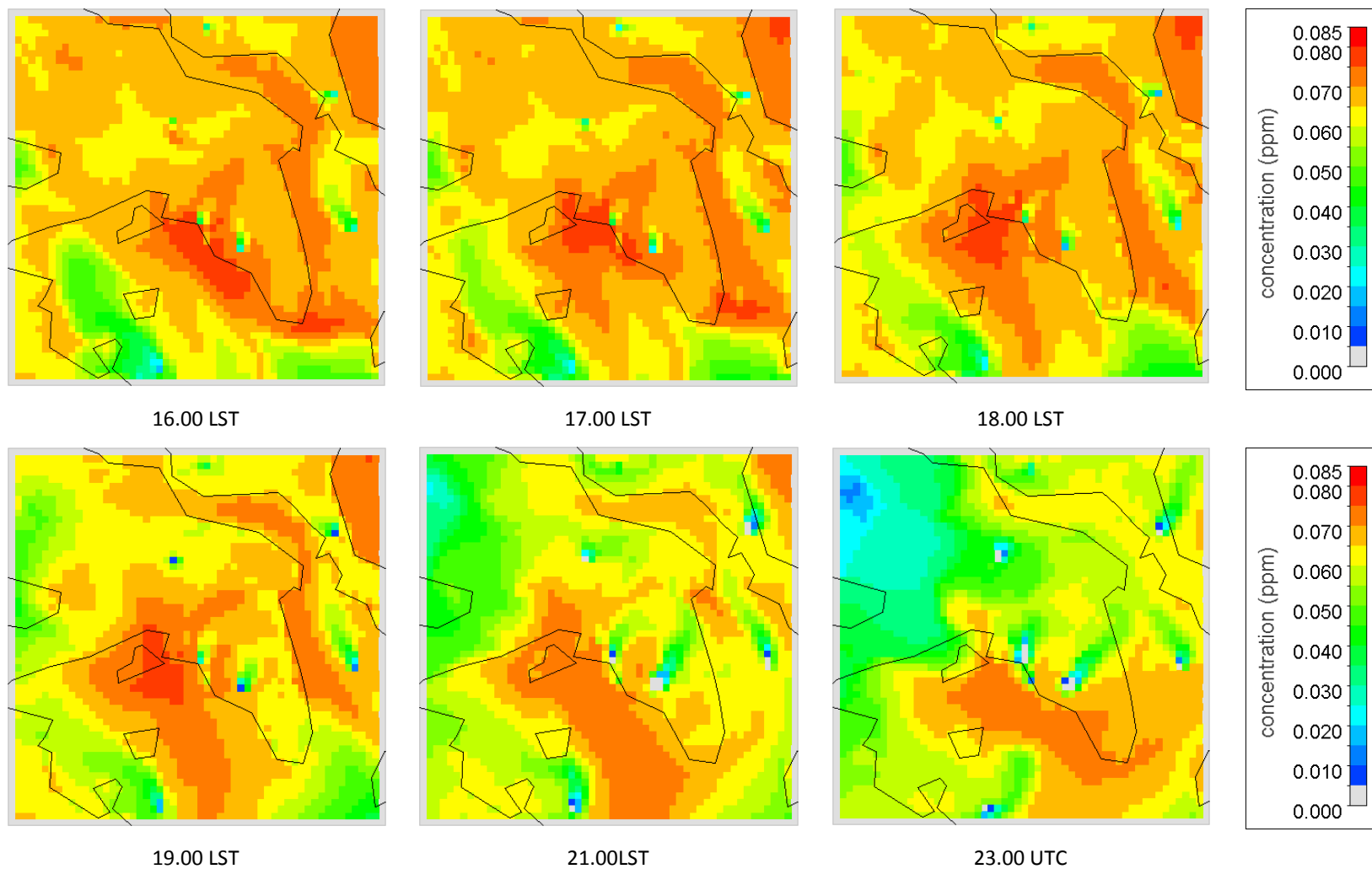
14.00 LST



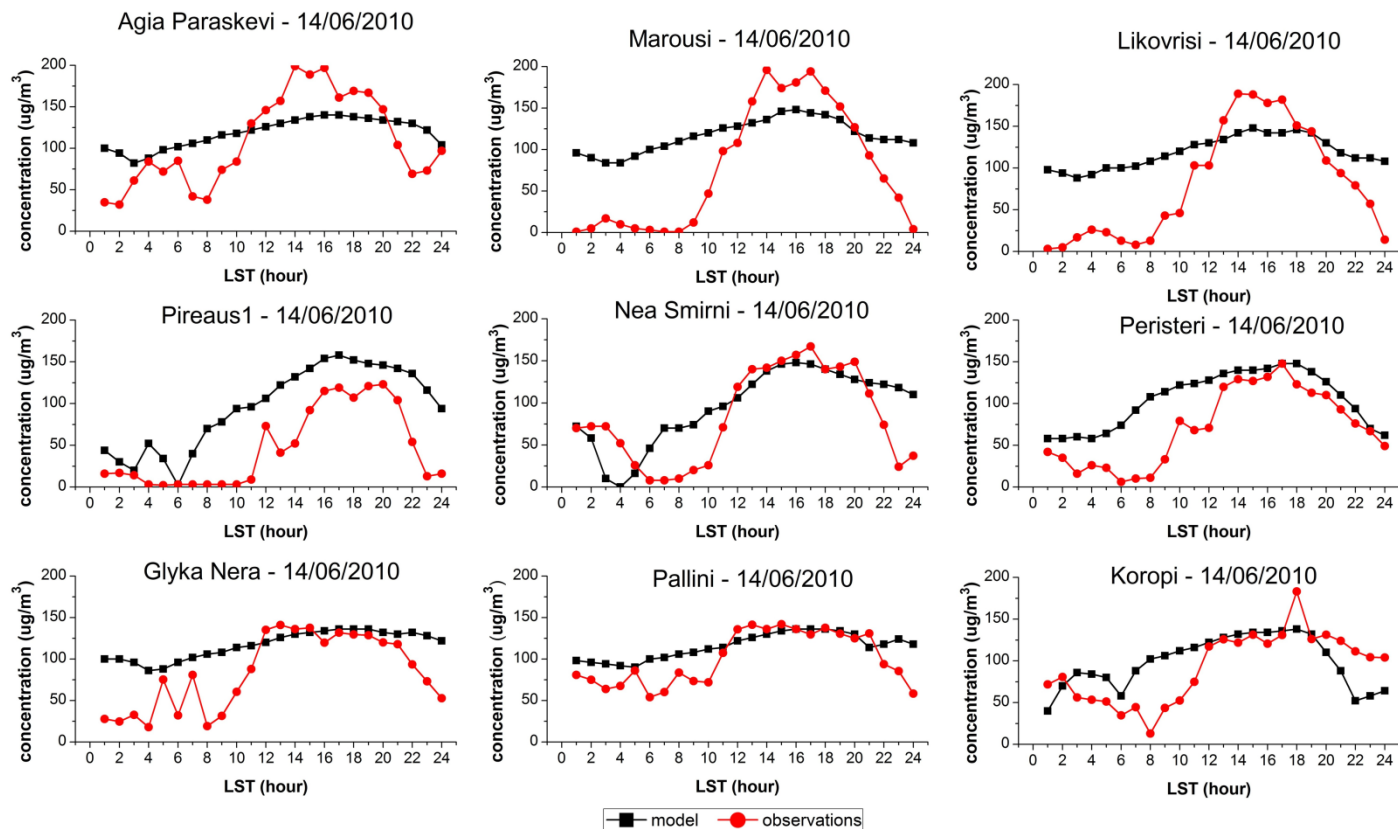
15.00 LST



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ



Σχήμα 4-19. Χωρική κατανομή συγκεντρώσεων O_3 στις 14/06/2010 για το Πλέγμα 3.



Σχήμα 4-20. Σύγκριση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης με μετρήσεις O_3 για τις 14/06/2010.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

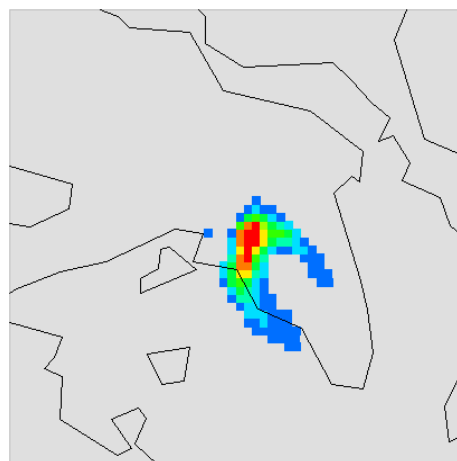
Πίνακας 4-5. Στατιστικά μεγέθη σύγκρισης των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης με μετρήσεις O_3 για τις 13/06/2010.

13/06/2010	MO	MS	r	MB	RMSE	NMB	NME	MNBE	MNGE
Αγ.Παρασκευή	111.63	107.92	0.63	-3.71	28.54	-3.32	20.64	-12.70	14.15
Μαρούσι	70.13	105.75	0.91	35.63	53.05	50.80	61.02	-9.59	11.21
Ν.Σμύρνη	79.75	94.50	0.85	14.75	34.56	18.50	34.48	-9.95	9.95
Πειραιάς-1	40.17	92.25	0.74	52.08	57.62	129.67	131.95		
Περιστέρι	73.00	95.75	0.82	22.75	32.19	31.16	35.62	-3.07	3.07
Λυκόβρυση	74.13	105.25	0.91	31.13	43.83	41.99	48.06	-7.95	8.34
Γλυκά Νερά	103.21	105.33	0.75	2.12	29.11	2.06	23.47	-11.52	12.08
Παλλήνη	113.53	103.42	0.85	-10.12	24.36	-8.91	18.20	-18.62	18.62
Κορωπί	93.53	95.75	0.56	2.22	26.08	2.37	21.88	-5.46	5.46

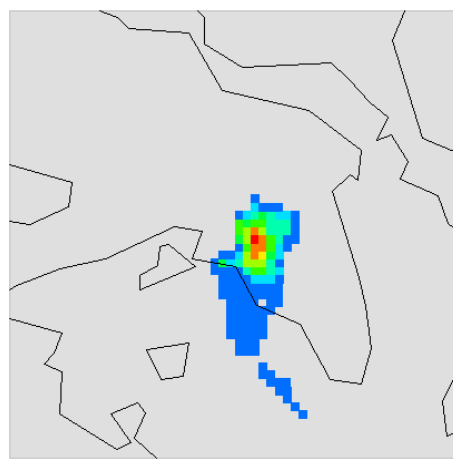
Πίνακας 4-6. Στατιστικά μεγέθη σύγκρισης των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης με μετρήσεις O_3 για τις 14/06/2010.

14/06/2010	MO	MS	r	MB	RMSE	NMB	NME	MNBE	MNGE
Αγ.Παρασκευή	108.83	118.33	0.79	9.50	42.05	8.73	33.54	-18.44	18.44
Μαρούσι	77.71	116.75	0.90	39.04	68.05	50.24	76.73	-17.32	17.32
Ν.Σμύρνη	82.83	95.17	0.69	12.33	41.62	14.89	38.73	-7.13	7.13
Πειραιάς-1	46.08	96.17	0.82	50.08	57.55	108.68	108.86	20.51	20.51
Περιστέρι	71.13	104.75	0.81	33.63	42.78	47.28	47.28	9.33	9.33
Λυκόβρυση	81.04	118.75	0.94	37.71	61.51	46.53	66.38	-15.39	15.39
Γλυκά Νερά	83.65	116.92	0.81	33.27	46.40	39.77	43.93	0.60	7.33
Παλλήνη	100.30	115.42	0.80	15.11	25.81	15.07	20.23	-2.31	4.91
Κορωπί	91.99	98.75	0.48	6.76	38.07	7.35	33.68	1.00	8.05

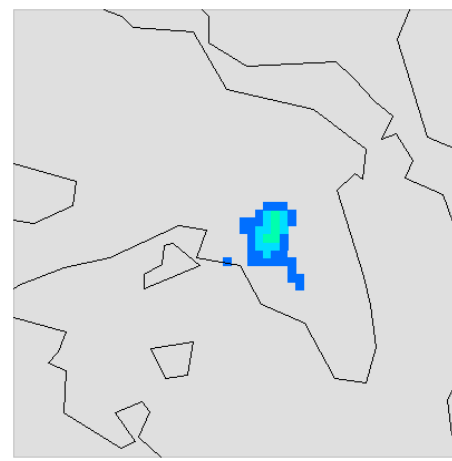
PM₁₀ – 13/06/2010



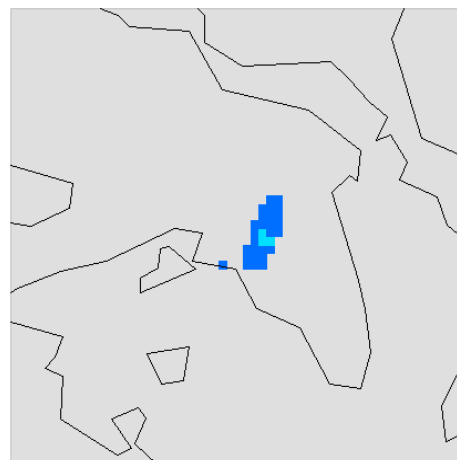
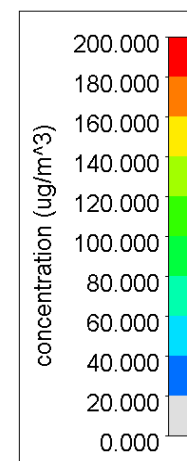
6.00 LST



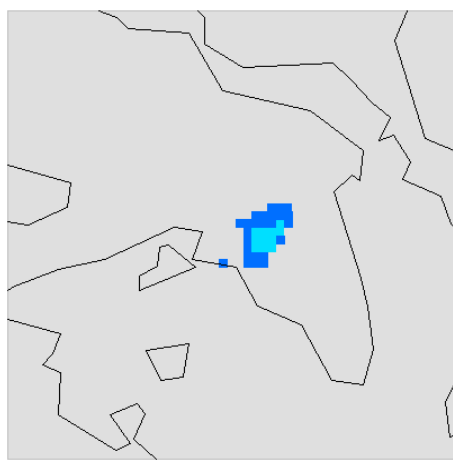
9.00 LST



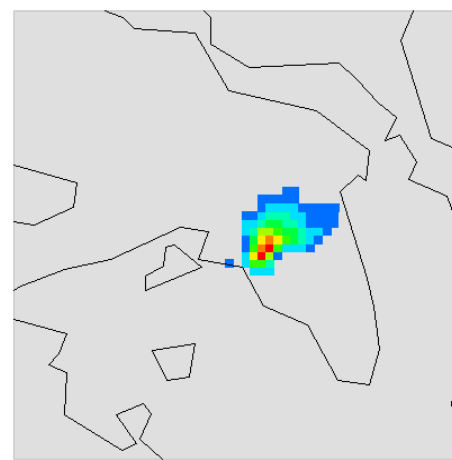
12.00 LST



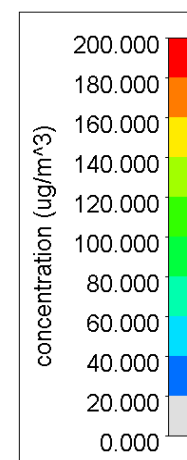
15.00 LST



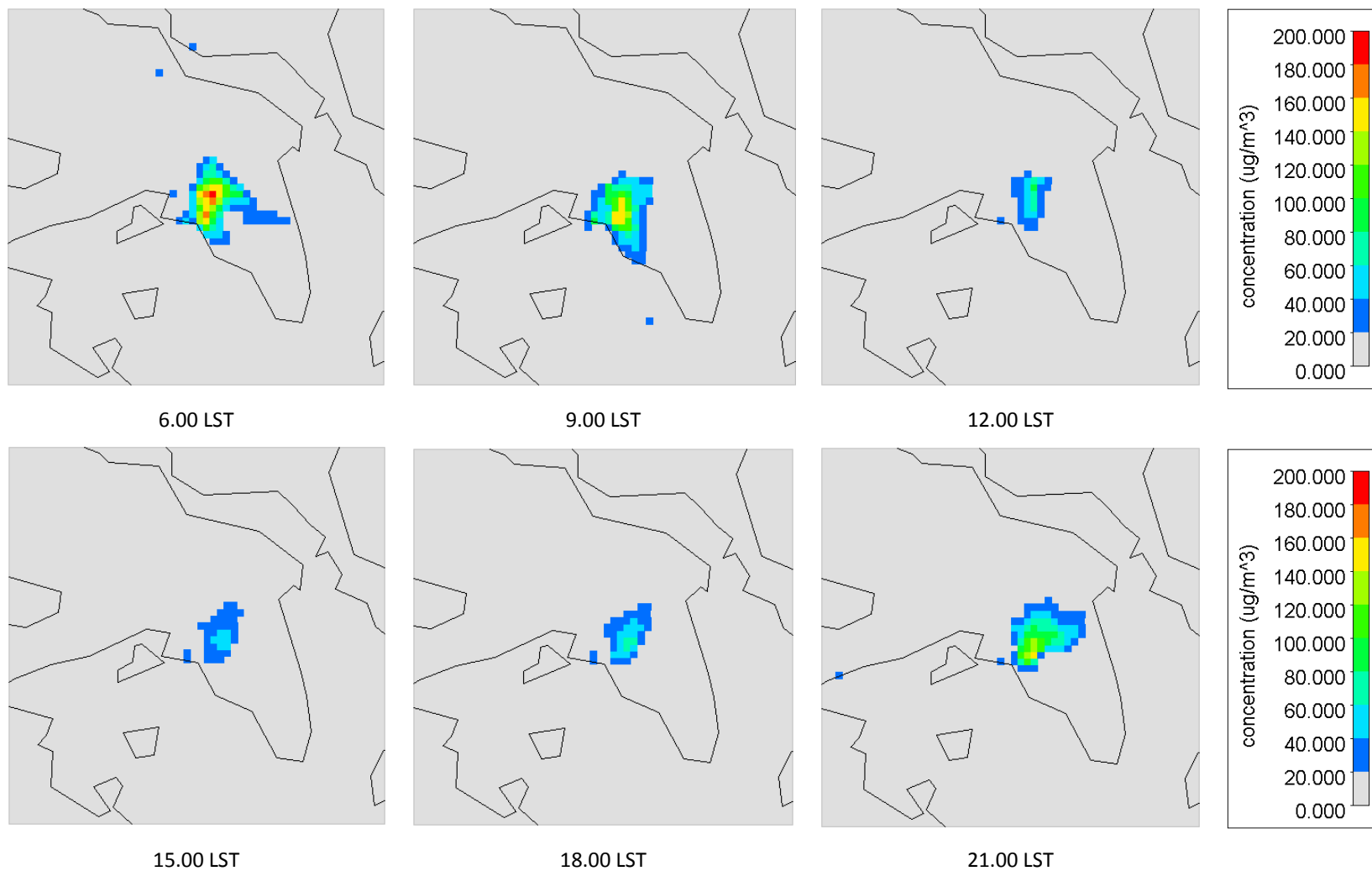
18.00 LST



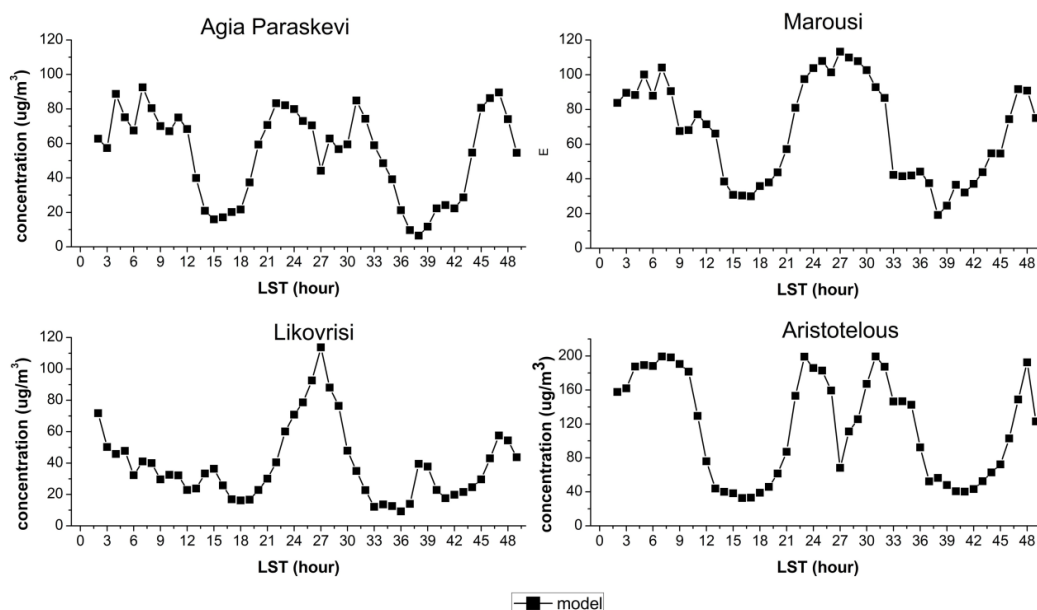
21.00 LST



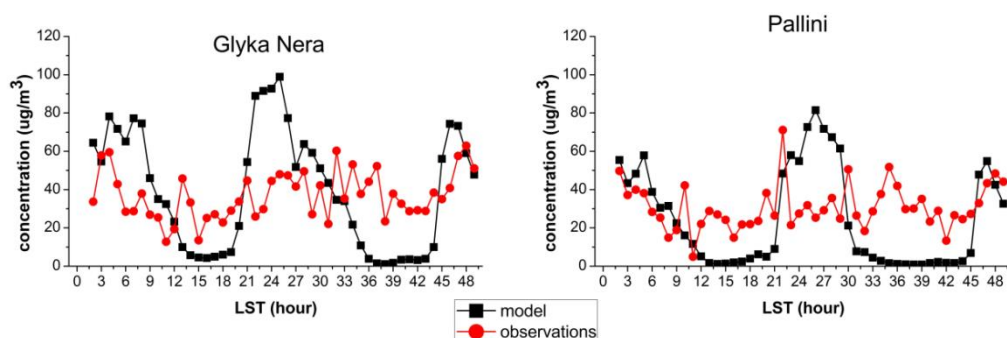
PM₁₀ – 14/06/2010



Σχήμα 4-21. Χωρική κατανομή συγκεντρώσεων PM₁₀ στις 13-14/06/2010 για το Πλέγμα 3.



Σχήμα 4-22. Κατανομή των ωριαίων συγκεντρώσεων PM_{10} που προέκυψαν από την αριθμητική προσομοίωση για την περίοδο 13 και 14 Ιουνίου 2010.



Σχήμα 4-23. Σύγκριση των ωριαίων συγκεντρώσεων PM_{10} που προέκυψαν από την αριθμητική προσομοίωση με μετρήσεις από το δίκτυο των σταθμών του αεροδρομίου Αθηνών για την περίοδο 13 και 14 Ιουνίου 2010.

Πίνακας 4-7. Σύγκριση αποτελεσμάτων αριθμητικής προσομοίωσης και μετρήσεων.

Σταθμός	Μέτρηση		Μοντέλο	
	(μg/m ³ , μέση τιμή 24ώρου)		(μg/m ³ , μέση τιμή 24ώρου)	
	13/06/2010	14/06/2010	13/06/2010	14/06/2010
Αριστοτέλους	55	67	125.08	105.29
Αγία Παρασκευή	28	41	64.83	49.39
Μαρούσι	42	52	74.81	70.25
Λυκόβρυση	50	50	38.24	39.57
Γλυκά Νερά	33.21	40.80	46.36	32.93
Παλλήνη	29.19	32.43	26.14	21.89

4.4 Συμπεράσματα από το κεφάλαιο 4

- Τα αποτελέσματα των παραπάνω συγκρίσεων μεταξύ αριθμητικών δεδομένων και μετρούμενων συγκεντρώσεων μπορούν να μας οδηγήσουν στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο αναπαρήγαγε σε ικανοποιητικό βαθμό το μελετώμενο επεισόδιο ρύπανσης καθώς κατάφερε να αναπαράγει την ημερήσια διακύμανση και τις υψηλές συγκεντρώσεις O_3 που καταγράφηκαν από τους σταθμούς μέτρησης αλλά και τις συγκεντρώσεις 24ώρου των PM_{10} .
- Πιο συγκεκριμένα, σε σχέση με παλαιότερες αριθμητικές μελέτες οι συγκρίσεις εμφανίζονται σαφώς βελτιωμένες, γεγονός που συνδέεται και με την ποιότητα των δεδομένων εισόδου. Είναι προφανές ότι το νέο επικαιροποιημένο σύστημα απογραφής εκπομπών συντέλεσε σε αυτή τη βελτίωση καθώς κατάφερε να απεικονίσει με μεγαλύτερη ακρίβεια την κατάσταση των εκπομπών και στα τρία πλέγματα.
- Όσον αφορά στα αριθμητικά αποτελέσματα, το ανεμολογικό πεδίο που προέκυψε από τις αριθμητικές προσομοιώσεις με το μετεωρολογικό μοντέλο MM5 υπέδειξε ότι κατά τη διάρκεια της πρώτης μέρας (13/06/2010) η αρχικά βόρεια ροή του ανέμου (6.00LST) μετατράπηκε σε δυτική εντός του λεκανοπεδίου και στη συνέχεια σε νοτιοδυτική (12.00LST) και νότια, νοτιοδυτική (15.00LST, 18.00LST) μέχρι τις πρώτες βραδινές ώρες.
- Η αλλαγή της διεύθυνσης του ανέμου από δυτική σε νοτιοδυτική παρατηρήθηκε και στους μετεωρολογικούς σταθμούς στον Πειραιά και το Ελληνικό στις 15.00LST ενώ στους σταθμούς που βρίσκονται στο εσωτερικό του λεκανοπεδίου (Αμπελόκηποι, Θησείο, Μαρούσι, Ψυχικό) η διεύθυνση του ανέμου παρέμεινε νότια, νοτιοδυτική από τις πρωινές ώρες (10.00LST) μέχρι αργά το απόγευμα (19.00LST). Στις ανατολικές περιοχές της Αττικής (Μεσόγεια) η διεύθυνση του ανέμου από βόρεια (9.00LST) άλλαξε σε ανατολική το μεσημέρι (12.00LST) και κατέληξε νοτιοδυτική (18.00LST, 21.00LST) σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων γεγονός που επιβεβαιώνεται και από το σταθμό των Σπάτων. Νοτιότερα ο βόρειος άνεμος (9.00LST) μετατρέπεται σε νοτιοδυτικό (12.00LST) καταφέροντας να εισχωρήσει βαθύτερα στην ανατολική Αττική. Η συγκεκριμένη ροή επιβεβαιώνεται από τα δεδομένα του σταθμού στο Μαρκόπουλο στον οποίο καταγράφεται νότιος, νοτιοδυτικός άνεμος μέχρι τις 20.00LST.
- Στις 14/06/2010 σύμφωνα με τις προσομοιώσεις η θαλάσσια αύρα εισέρχεται στο λεκανοπέδιο στις 12.00LST και ο άνεμος διατηρεί νότια και νοτιοδυτική διεύθυνση μέχρι τις 18.00LST. Το ανεμολογικό πεδίο εμφανίζει τα ίδια χαρακτηριστικά με την προηγούμενη μέρα και στους σταθμούς μέτρησης. Γενικά το μετεωρολογικό μοντέλο κατάφερε να

αναπαράγει την επικρατούσα νοτιοδυτική διεύθυνση του ανέμου στο λεκανοπέδιο της Αττικής καθώς και την ανατολική ροή που καταγράφηκε από το σταθμό των Σπάτων στην Ανατολική Αττική κατά τη διάρκεια της ημέρας στις 13 και 14 Ιουνίου 2010.

- Όσον αφορά στην ταχύτητα του ανέμου, η απόδοση του μοντέλου είναι ικανοποιητική για το εσωτερικό του λεκανοπεδίου με το μέγεθος RMSE να κυμαίνεται από 0.799 μέχρι 1.451 στις 14/06/2010 ενώ οι τιμές του συγκεκριμένου στατιστικού μεγέθους στην Ανατολική Αττική κυμάνθηκαν από 0.975 μέχρι 1.537. Στους περισσότερους σταθμούς παρατηρήθηκε υπερεκτίμηση των μετρούμενων ταχυτήτων από το μοντέλο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το ύψος μέτρησης στους σταθμούς διαφέρει από το αντίστοιχο ύψος του κελιού που το μοντέλο δίνει την ταχύτητα αλλά και στο ότι οι μετρήσεις επηρεάζονται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής που είναι τοποθετημένος ο σταθμός. Επιπλέον, το μοντέλο δεν μπορεί να αποδώσει τις μηδενικές τιμές ταχύτητας που μετρούνται σε κάποιους σταθμούς. Γι' αυτό το λόγο άλλωστε δεν συνηθίζεται να γίνεται έλεγχος ευαισθησίας των μετεωρολογικών μοντέλων για ταχύτητες μικρότερες των 2m/s.
- Το φωτοχημικό μοντέλο CAMx κατάφερε να αναπαράγει την ημερήσια διακύμανση του όζοντος. Κατά τη διάρκεια της νύχτας η συγκέντρωσή του παρέμεινε κάτω από 40ppb πάνω από το λεκανοπέδιο της Αττικής και για τις δύο ημέρες της προσομοίωσης ενώ άρχισε να αυξάνεται σταδιακά με την έναρξη των φωτοχημικών διεργασιών στην ατμόσφαιρα φτάνοντας τη μέγιστη συγκέντρωση το απόγευμα στις 18.00LST την πρώτη μέρα (13/06/2010) και στις 16.00LST την δεύτερη μέρα (14/06/2010) της προσομοίωσης.
- Γενικά οι συγκεντρώσεις αυξήθηκαν από τα νοτιοανατολικά της Αττικής και παρέμειναν σε υψηλά επίπεδα μέσα στο λεκανοπέδιο για το χρονικό διάστημα 16.00-19.00LST. Τις νυχτερινές ώρες το όζον άρχισε να μειώνεται μέσα στο λεκανοπέδιο διατηρώντας ωστόσο υψηλές τιμές στον Σαρωνικό Κόλπο(60-75ppb) και τιμές υποβάθρου (40-50ppb) στα βόρεια και βορειοανατολικά προάστια. Η επικράτηση υψηλών συγκεντρώσεων υποβάθρου στις συγκεκριμένες περιοχές την καλοκαιρινή περίοδο επιβεβαιώνεται από τους Bossioli et al. (2007) και Kalabokas et al. (2012).
- Υψηλές τιμές O_3 εμφανίζονται και στα Μεσόγεια (65-70ppb) τη χρονική περίοδο 15.00-19.00LST.
- Προέκυψε διαφοροποίηση στις μέγιστες τιμές εντός του λεκανοπεδίου μεταξύ των δύο ημερών (max O_3 : 70ppb στις 13/06-Κυριακή, 80ppb στις 14/06-Δευτέρα) η οποία οφείλεται στα διαφορετικά επίπεδα εκπομπών που αποδίδονται στις δύο μέρες λόγω κυρίως της μειωμένης κίνησης των οχημάτων την Κυριακή.

- Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης με δεδομένα από σταθμούς μέτρησης για τις 13/06/2010 έδειξαν ότι το CAMx υπερεκτίμησε τις συγκεντρώσεις του όζοντος στον Πειραιά γεγονός που οφείλεται στα επιβαρυμένα επίπεδα εκπομπών στη περιοχή. Στα δυτικά προάστια (σταθμός: Περιστερί), ικανοποιητική συσχέτιση και υπερεκτίμηση των πρωινών ελάχιστων τιμών. Στα βορειοανατολικά (Αγία Παρασκευή και Μαρούσι) και βόρεια (Λυκόβρυση) προάστια το μοντέλο αναπαρήγαγε τις υψηλές συγκεντρώσεις όζοντος που σημειώθηκαν υπερεκτιμώντας τη μέση ωριαία τιμή των μετρήσεων στους σταθμούς Μαρούσι και Λυκόβρυση και υποεκτιμώντας τη στην Αγία Παρασκευή.
- Στην ανατολική Αττική δεν παρατηρήθηκε μεγάλη διασπορά μεταξύ των μετρήσεων και των αποτελεσμάτων του μοντέλου ($18.20 < NME < 23.47$) και η επικράτηση τιμών υποβάθρου ($> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ κατά το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα) κατά τις νυχτερινές ώρες αναπαράχθηκε από το μοντέλο το οποίο όμως δεν κατόρθωσε να αναπαράγει τις υψηλές συγκεντρώσεις O_3 ($> 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$) που καταγράφηκαν το μεσημέρι από τους σταθμούς.
- Στις 14/06/2010 σημειώθηκε επεισόδιο ρύπανσης ($\text{O}_3 > 180 \mu\text{g}/\text{m}^3$) στα βορειοανατολικά προάστια σύμφωνα με τα δεδομένα των σταθμών, το οποίο το μοντέλο αναπαρήγαγε σε σημαντικό βαθμό ($r = 0.79, 0.90$ και 0.94 στους σταθμούς Αγία Παρασκευή, Μαρούσι και Λυκόβρυση, αντίστοιχα) χωρίς ωστόσο οι τιμές του όζοντος στα αντίστοιχα κελιά να υπερβούν τα $148 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Συνοπτικά το μοντέλο κατάφερε να αναπαράγει τη μεσημεριανή μέγιστη συγκέντρωση όζοντος που καταγράφηκε από τους σταθμούς μέτρησης τόσο ως προς τη χρονική στιγμή εμφάνισης, τη χρονική διάρκεια όσο και ως προς το μέγεθος στους περισσότερους σταθμούς. Το πλούμιο του O_3 κατάφερε να εισχωρήσει στο εσωτερικού του λεκανοπεδίου και να προσεγγίσει ακόμη και τους πιο απομακρυσμένους σταθμούς.
- Όσον αφορά στα αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} , η αριθμητική προσομοίωση δίνει υψηλές συγκεντρώσεις στο κέντρο της αστικής περιοχής του λεκανοπεδίου, στα βορειοανατολικά προάστια στην Ευρύτερη Περιοχή του Πειραιά και τα νοτιοδυτικά παράλια και τις δύο ημέρες μελέτης (13-14/06/2010).
- Πιο συγκεκριμένα, στο κέντρο της Αθήνας οι ωριαίες τιμές των συγκεντρώσεων των PM_{10} παρουσίασαν δύο μέγιστα κατά τη διάρκεια της ημέρας ($200 \mu\text{g}/\text{m}^3$) στις 6.00LST και στις 22.00LST. Οι τιμές αυτές οφείλονται στις τοπικές πηγές και κυρίως στην κίνηση των οχημάτων. Στα βορειοανατολικά προάστια οι υψηλές τιμές εμφανίζονται νωρίς το πρωί (Μαρούσι: $104 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 13/06 6.00LST) ενώ το μέγιστο παρατηρείται τις νυχτερινές ώρες από 13 προς 14 Ιουνίου (Μαρούσι: $113 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 24.00LST, Λυκόβρυση: $113 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2.00LST).

Επιβαρυμένη εμφανίζεται και η περιοχή του Ασπρόπυργου της βραδινές ώρες λόγω της έντονης βιομηχανικής δραστηριότητας και των ιδιαίτερων πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται από τις μονάδες. Μέγιστη συγκέντρωση στη ΒΙ.ΠΕ. Θριασίου Πεδίου είναι τα $54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ σύμφωνα με το CAMx. Στα νότια προάστια και κυρίως στον Πειραιά η μέγιστη συγκέντρωση είναι $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (13/06/2010, 6.00LST). Η κατανομή των σωματιδίων στην ανατολική Αττική κατά την περίοδο μελέτης διατηρήθηκε σε μέτριες συγκεντρώσεις. Σύμφωνα με τις μετρήσεις στο σταθμούς του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών «Ελευθέριος Βενιζέλος» στα Γλυκά Νερά και την Παλλήνη η μέση τιμή 24ώρου ήταν $33.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $29.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και $40.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $32.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ στις 13 και 14 Ιουνίου αντίστοιχα (Πίνακας 4-9).

- Τα αποτελέσματα των παραπάνω συγκρίσεων μπορούν να μας οδηγήσουν στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο αναπαρήγαγε σε ικανοποιητικό βαθμό το μελετώμενο επεισόδιο ρύπανσης καθώς κατάφερε να αναπαράγει την ημερήσια διακύμανση και τις υψηλές συγκεντρώσεις O_3 που καταγράφηκαν από τους σταθμούς μέτρησης αλλά και τις συγκεντρώσεις 24ώρου των PM_{10} . Αυτό σημαίνει ότι τα βελτιωμένα δεδομένα εισόδου, δηλαδή το επικαιροποιημένο σύστημα απογραφής εκπομπών βελτίωσε σημαντικά τα αποτελέσματα όπως αναμενόταν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

5.1 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκε μια σειρά διεργασιών με στόχο τη μελέτη της φωτοχημικής και σωματιδιακής ρύπανσης στην Ευρύτερη Περιοχή των Αθηνών και των παραγόντων που συμβάλλουν στην εμφάνιση υψηλών συγκεντρώσεων αέριων ρύπων και σωματιδίων στην συγκεκριμένη περιοχή. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων εκπομπών, για την Ελλάδα και την ΕΠΑ, χωρικά και χρονικά κατανεμημένων σε πλεγματικά κελιά με κύριο σκοπό τη διερεύνηση των πηγών που συμβάλλουν καθοριστικά στα επίπεδα εκπομπών καθώς και τη μελέτη της διαχρονικής εξέλιξης αυτών αλλά και τη χρήση τους από το φωτοχημικό μοντέλο CAMx για την πραγματοποίηση προσομοιώσεων με τη βοήθεια των οποίων θα διαπιστωθούν οι διεργασίες μεταφοράς, διάχυσης και χημικής αλληλεπίδρασης των ρύπων. Η ευελιξία της βάσης δεδομένων εκπομπών οφείλεται στο γεγονός ότι το μεγαλύτερο μέρος αυτών (όλες οι πηγές εκτός της βιομηχανικής δραστηριότητας) υπολογίστηκαν με επικαιροποιημένα δεδομένα και κατανεμήθηκαν χωρικά και χρονικά με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του λεκανοπεδίου της Αττικής. Επομένως τα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναδείξουν τις επιβαρυμένες σε θέματα εκπομπών περιοχές και να βοηθήσουν στη μελέτη διαφορετικών σεναρίων βελτίωσης της ποιότητας της ατμόσφαιρας. Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι είναι η πρώτη χρονοσειρά χωρικά και χρονικά διαχωρισμένων εκπομπών για την Ελλάδα και την Αττική. Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διατριβή παρουσιάζονται στη συνέχεια.

5.1.1 Γενικά συμπεράσματα

- Η ποιότητα αέρα ήταν και παραμένει ένα σημαντικό πρόβλημα των μεγάλων αστικών περιοχών στις οποίες συγκεντρώνεται μεγάλος όγκος ανθρωπογενών δραστηριοτήτων όπως κίνηση οχημάτων, χρήση κεντρικής θέρμανσης, καύση βιομάζας, βιομηχανικές περιοχές στα όρια του αστικού πλέγματος.
- Η ανάγκη για χρήση και ανάπτυξη αξιόπιστων αριθμητικών μοντέλων είναι ακόμα έντονη καθώς αυτά είναι πολύτιμα εργαλεία στο πλαίσιο της προσπάθειας για την κατανόηση των μηχανισμών διασποράς και χημικών διεργασιών των ρύπων, για την εκτίμηση της έκθεσης του πληθυσμού σε ρύπους επικίνδυνους για την υγεία καθώς και για τη βοήθεια στη χάραξη πολιτικών για τον έλεγχο και τον περιορισμό των πηγών που συμβάλουν στα αυξημένα επίπεδα ρύπανσης.
- Η Ευρύτερη Περιοχή των Αθηνών έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας πολλών Ελλήνων και ξένων ερευνητών λόγω των ιδιαίτερων μορφολογικών/τοπογραφικών και μετεωρολογικών συνθηκών καθώς και λόγω της ύπαρξης αυξημένων εκπομπών ανθρωπογενών ρύπων οι οποίες συχνά οδηγούν στη δημιουργία επεισοδίων ρύπανσης.
- Τα επίπεδα ρύπανσης στην ΕΠΑ σύμφωνα με το ΥΠΕΚΑ παρουσιάζουν σταδιακή μείωση με τάση σταθεροποίησης.
- Οι ρύποι οι οποίοι παρουσιάζουν υψηλά επίπεδα είναι τα αιωρούμενα σωματίδια, το όζον καθώς και νέοι ρύποι όπως PAHs, τους οποίους τα φωτοχημικά μοντέλα είναι σε θέση να προσομοιώσουν για τη μελέτη της διασποράς και της χημικής συμπεριφοράς τους.
- Τα φωτοχημικά μοντέλα είναι χρήσιμα εργαλεία για την υποστήριξη στη χάραξη πολιτικής. Τα αποτελέσματά τους σε μεγάλο βαθμό εξαρτώνται από την ποιότητα και την ακρίβεια των δεδομένων εισόδου.
- Μέχρι την ολοκλήρωση του παρόντος διδακτορικού δεν υπήρχε για την Αττική καθώς και για την Ελλάδα επικαιροποιημένη βάση δεδομένων απογραφής εκπομπών με στοιχεία από επίσημες αρχές της χώρας, με δομή ανοιχτή ώστε να μπορούν να εισαχθούν νέα δεδομένα ή/και να μελετώνται διαφορετικά σενάρια εκπομπών αναλόγως των αναγκών και με νέους συντελεστές ωριαίων εκπομπών.

5.1.2 Συμπεράσματα από τη ανάπτυξη της βάσης δεδομένων εκπομπών

- Η επικαιροποίηση των δεδομένων χρήσης γης για την Αττική υπέδειξε την επέκταση του αστικού πλέγματος προς τα Μεσόγεια λόγω της βελτίωσης και της εξάπλωσης του οδικού δικτύου, την κατασκευή και λειτουργία του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών στα Σπάτα καθώς και την οικιστική ανάπτυξη των γύρω περιοχών που ακολούθησε. Τέλος, αύξηση του πληθυσμού παρατηρήθηκε και στα δυτικά και νοτιοανατολικά προάστια της Αθήνας.
- Οι υψηλότερες τιμές εκπομπών από τον οικιακό τομέα αντιστοιχούν στο CO και ακολουθούν τα αιωρούμενα σωματίδια, τα NMVOCs, τα NOx και το SO₂. Πολύ μικρότερες αλλά σημαντικές είναι οι συγκεντρώσεις των πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων γνωστών ως PAHs (Polycyclic aromatic hydrocarbons).
- Η ανάλυση των ετήσιων οικιακών εκπομπών ανά κατηγορία πηγής (τζάκια, σόμπες, λέβητες) επέδειξε τα τζάκια ως την κύρια πηγή για τους ρύπους CO, NMVOCs και PM λόγω των πολύ υψηλών τιμών των συντελεστών εκπομπής που συνδέονται με την καύση ξύλου - καύσιμο που χρησιμοποιείται κυρίως στα τζάκια και τις σόμπες - σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους καυσίμου.
- Η μείωση στην κατανάλωση βενζίνης το 2008 και το 2010 και η επακόλουθη μείωση των ετήσιων οχηματο-χιλιομέτρων που διανύονται επηρέασαν τις εκπομπές CO, VOCs και NMVOCs. Το ποσοστό μείωσης για την Ελλάδα κατά την περίοδο 2006 - 2008 ήταν 9.5% για το CO, 7.3% για τα VOCs και 7.7% για τα NMVOCs, ενώ για την περίοδο 2006 - 2010 η μείωση ήταν 32.8%, 24.0% και 24.3%, αντίστοιχα. Επιπλέον, η εισαγωγή των νέων κινητήρων αντιρρυπαντικής τεχνολογίας (τα Euro 4 επιβατικά οχήματα τέθηκαν σε ισχύ το 2005 ενώ τα Euro 5 το 2009) επηρέασε τις εκπομπές CO, VOCs και NMVOCs καθώς το μέρος των οχημάτων με κινητήρες τελευταίας τεχνολογίας συνεχώς αυξάνεται επί του συνολικού στόλου.
- Το 40% των εθνικών εκπομπών CO₂, CO, VOC και NMVOC και το 30% των NOx και των σωματιδίων από τις οδικές μεταφορές εκπέμπονται στην Αττική.
- Τα επιβατικά οχήματα έχουν τη μεγαλύτερη συμβολή στις οδικές εκπομπές των CO, VOC, NMVOC και CO₂. Περίπου το 25% των εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα προέρχονται από βενζινοκίνητα επιβατικά οχήματα με κυβισμό 1.4-2.0lt.
- Σχετικά με την επίδραση της τεχνολογίας των κινητήρων στις εκπομπές, τα Euro 3 βενζινοκίνητα επιβατικά οχήματα θεωρούνται οι μεγαλύτεροι ρυπαντές με συνεισφορά στις εκπομπές CO 11.6% για κυβισμό 0.8 - 1.4lt και 13% για κυβισμό 1.4-2.0lt.

- Η κυκλοφορία των οχημάτων εντός του λεκανοπεδίου της Αττικής εμφανίζεται πιο πυκνή τους μήνες Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο και Σεπτέμβριο, ενώ τον Αύγουστο έχουμε μείωση αυτής λόγω των καλοκαιρινών διακοπών. Όσον αφορά στα ημερήσια προφίλ υπάρχει εμφανής διαφορά μεταξύ των καθημερινών και του Σαββατοκύριακου.
- **Κατασκευάστηκαν περιοχικά χρονικά προφίλ διαχωρισμού των εκπομπών από τις οδικές μεταφορές για την Αττική τα οποία προέκυψαν από ωριαία δεδομένα κυκλοφοριακών φόρτων από κεντρικούς οδικούς άξονες του λεκανοπεδίου και αφορούν την περίοδο μελέτης 2006-2010. Τα συγκεκριμένα δεδομένα δίνουν τη δυνατότητα δημιουργίας πολλαπλών εξειδικευμένων χρονικών συντελεστών ανά έτος, ημέρα και ώρα.**
- Όσον αφορά στις εκπομπές από την αεροπορία, η σύγκριση των ετήσιων τιμών των ρύπων CO, NO_x, NMVOC, SO₂ και PM_{2.5} ανέδειξε την επικράτηση του CO έναντι των υπολοίπων αλλά και τη μείωση των ετήσιων εκπομπών από το 2007 και μετά. Η ποσοστιαία διαφορά από το 2006 ως το 2012 ήταν 90% για το CO, 23% για τα NO_x, 47% για τα NMVOCs, 26% για το SO₂ και 65% για τα PM_{2.5}. Γενικά το 2008 παρατηρήθηκε μείωση του αριθμού των πτήσεων η οποία εντάθηκε μετά το 2009 λόγω συγχωνεύσεων των ελληνικών αεροπορικών εταιριών με συνέπεια την κατάργηση ή συγχώνευση πολλών δρομολογίων (25% μείωση στις εθνικές πτήσεις από το 2009 μέχρι το 2012).
- Στον τομέα των θαλάσσιων μεταφορών υπερτερούν οι εκπομπές των NO_x με αυτές των SO_x να ακολουθούν λόγω της χρήσης πετρελαίου ως κύριο καύσιμο.
- Μεταξύ των λιμανιών οι περισσότερες εκπομπές εκλύονται στον Πειραιά (13.5% και 13.9% επί του συνόλου των εκπομπών NO_x και SO_x αντίστοιχα για το έτος 2010) καθώς αυτό αποτελεί το μεγαλύτερο επιβατικό και εμπορικό λιμάνι της χώρας. Ακολουθούν τα λιμάνια της Ηγουμενίτσας, του Περάματος και των Παλουκίων Σαλαμίνας με ποσοστά 8.7%, 5.6% και 5.5% επί του συνόλου των εκπομπών NO_x και 8.8% , 5.7% και 5.6% επί του συνόλου των εκπομπών SO_x για το έτος 2010.
- Καθοριστικός παράγοντας για το ποσοστό των ρύπων και των PM που εκπέμπονται σε κάθε λιμάνι είναι η κίνηση των επιβατικών πλοίων γι' αυτό και τα λιμάνια με την μεγαλύτερη επιβατική κίνηση (Πειραιάς, Πέραμα, Παλούκια Σαλαμίνας και Ηγουμενίτσα) παρουσιάζονται πιο επιβαρυμένα και ακολουθεί ως βασικός παράγοντας η ισχύς της μηχανής του εκάστοτε πλοίου.
- Όσον αφορά στις εκπομπές ο των οχημάτων εκτός δρόμου εκείνες των NO_x υπερσχύουν των υπολοίπων λόγω της χρήσης του πετρελαίου κίνησης ως το κυρίως καύσιμο από τα συγκεκριμένα οχήματα. Ακολουθούν οι εκπομπές CO με πολύ μικρότερο ποσοστό συνεισφοράς στο σύνολο των εκπομπών. Σημαντική είναι η μείωση (περίπου 52%) που

διαπιστώνεται από το 2006 μέχρι το 2011 για όλους τους ρύπους η οποία οφείλεται στη συνεχόμενη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου από τα συγκεκριμένα οχήματα.

- Στην Αττική εκλύεται το 2010 το 11.7% (2,575tn), 12.0% (834tn), 12.2% (262tn) και το 13.6% (156tn) των συνολικών εθνικών εκπομπών NO_x, CO, NMVOC και PM₁₀ αντίστοιχα από τα οχήματα εκτός δρόμου.
- Το μεγαλύτερο μέρος των εκπομπών από τη βιομηχανική δραστηριότητα οφείλεται σε εκπομπές SO_x (417.32ktn – 61.56% το 2007) και ακολουθούν σε μικρότερα ποσοστά οι εκπομπές NO_x (171.38tn – 25.28% το 2007), CO (51.47ktn – 7.59% το 2007) και PM₁₀ (31.71ktn – 4.68% το 2007). Πολύ μικρότερα είναι τα ποσοστά που αντιστοιχούν στις εκπομπές NH₃.
- Οι εκπομπές από τη βιομηχανική δραστηριότητα ακολούθησαν πτωτικές τάσεις την περίοδο 2007-2011. Συγκεκριμένα η μεταβολή των εκπομπών SO_x από το 2007 μέχρι το 2011 ήταν 295,670tn (70.85%) ενώ για τις εκπομπές των NO_x σημειώθηκε μείωση κατά 62,450tn (36.44%). Οι εκπομπές PM₁₀ από 31.7kt το 2007 έφτασαν στους 13.0kt το 2011.
- Οι εκπομπές της NH₃ υπερτερούν των υπολοίπων εκπομπών για την κατηγορία SNAP10 και η διαχείριση της κοπριάς καθορίζει το σύνολο αυτών.
- **Η συγκριτική μελέτη της συνεισφοράς των διαφορετικών πηγών στις συνολικές εκπομπές ανέδειξε ότι στις εκπομπές CO τη μεγαλύτερη συνεισφορά στις συνολικές εκπομπές των ετών 2006-2010 έχουν οι οδικές μεταφορές (εύρος συνεισφοράς: 41.2-61.3%) και ακολουθούν οι εκπομπές από τις σταθερές πηγές καύσης (εύρος συνεισφοράς: 23.5-30.5%). Το ποσοστό που αντιστοιχεί στις οδικές μεταφορές σταδιακά μειώνεται ενώ το αντίστοιχο των εκπομπών από τις σταθερές πηγές καύσης αυξάνεται λόγω της αυξανόμενης χρήσης βιομάζας ως μέσο θέρμανσης από τα νοικοκυριά.**
- Η βιομηχανική δραστηριότητα (παραγωγή ενέργειας και κατασκευαστικός τομέας) συνεισφέρει σημαντικά στις συνολικές εκπομπές NO_x και PM₁₀ με ποσοστιαίο εύρος 40.5-46.7%, 27.0-33.7% αντίστοιχα. Στις εκπομπές CO το ποσοστό συνεισφοράς στις συνολικές εκπομπές είναι πολύ χαμηλότερο και κυμαίνεται μεταξύ 6.41% (το έτος 2009: 31.72kt) και 8.35% (το έτος 2008: 47.71kt).
- Η συνεισφορά της εγχώριας ναυτιλίας είναι πολύ μικρή στις εκπομπές CO (0.6-0.96%) ενώ οι εκπομπές NO_x παίρνουν τη μέγιστη τιμή το 2009 (34.82kt-10.63% των συνολικών εκπομπών). Η προσθήκη των εκπομπών από τη διεθνή ναυτιλία αυξάνει σημαντικά το συνολικό ποσό των εκπομπών. Ενδεικτικά το έτος 2010 οι εκπομπές CO, NO_x και PM₁₀ από τη διεθνή ναυτιλία ήταν 39.01kt, 358.76kt και 1.63kt αντίστοιχα.

- Οι εκπομπές για το πλέγμα χωρικής ανάλυσης $2 \times 2 \text{ km}^2$ για το έτος 2010 και τους ρύπους CO , NO_x και PM_{10} είναι 179.81kt, 89.11kt και 7.00kt αντίστοιχα. Η πλειοψηφία των εκπομπών CO προέρχεται από τις οδικές μεταφορές (81.28%) και ακολουθούν οι εκπομπές από τις σταθερές πηγές καύσης (8.32%). Οι εκπομπές NO_x οφείλονται κατά κύριο λόγο στον τομέα των οδικών μεταφορών (46.54%) και της ναυτιλίας (29.32%), στον οποίο περιλαμβάνονται τα δρομολόγια από την εγχώρια και διεθνή πλεύση όλων των τύπων πλοίων, ενώ η βιομηχανική δραστηριότητα συνεισφέρει κατά 15.94%. Οι εκπομπές των σωματιδίων PM_{10} προέρχονται κατά 45.14% από τις σταθερές πηγές καύσης, 24.86% από τις οδικές μεταφορές και κατά 13.00% από τη ναυτιλία.

5.1.3 Συμπεράσματα από την αριθμητική προσομοίωση

- Το φωτοχημικό μοντέλο CAMx απέδωσε πιο ρεαλιστικά το πεδίο διασποράς των ρύπων στην Αττική, για την περίπτωση νοτίας-νοτιοδυτικής ροής η οποία ευνόησε τη δημιουργία υψηλών επιπέδων όζοντος και PM_{10} . Πιο συγκεκριμένα, παλαιότερες μελέτες έδειχναν υποεκτίμηση και αδυναμία αναπαραγωγής της διασποράς των ρύπων σε όλο το υπολογιστικό πεδίο, εξαιτίας της αβεβαιότητας των δεδομένων απογραφής εκπομπών. Είναι προφανές ότι το νέο επικαιροποιημένο σύστημα απογραφής εκπομπών συντέλεσε σε στη βελτίωση των αποτελεσμάτων καθώς κατάφερε να απεικονίσει με μεγαλύτερη ακρίβεια την κατάσταση των εκπομπών και στα τρία πλέγματα.
- Πιο συγκεκριμένα, το ανεμολογικό πεδίο που προέκυψε από τις αριθμητικές προσομοιώσεις με το μετεωρολογικό μοντέλο MM5 υπέδειξε ότι κατά τη διάρκεια της πρώτης μέρας (13/06/2010) η αρχικά βόρεια ροή του ανέμου (6.00LST) μετατράπηκε σε δυτική εντός του λεκανοπεδίου και στη συνέχεια σε νοτιοδυτική (12.00LST) και νότια, νοτιοδυτική (15.00LST, 18.00LST) μέχρι τις πρώτες βραδινές ώρες.
- Η αλλαγή της διεύθυνσης του ανέμου από δυτική σε νοτιοδυτική παρατηρήθηκε και στους μετεωρολογικούς σταθμούς στον Πειραιά και το Ελληνικό στις 15.00LST ενώ στους σταθμούς που βρίσκονται στο εσωτερικό του λεκανοπεδίου (Αμπελόκηποι, Θησείο, Μαρούσι, Ψυχικό) η διεύθυνση του ανέμου παρέμεινε νότια, νοτιοδυτική από τις πρωινές ώρες (10.00LST) μέχρι αργά το απόγευμα (19.00LST). Στις ανατολικές περιοχές της Αττικής (Μεσόγεια) η διεύθυνση του ανέμου από βόρεια (9.00LST) άλλαξε σε ανατολική το μεσημέρι (12.00LST) και κατέληξε νοτιοδυτική (18.00LST, 21.00LST) σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων γεγονός που επιβεβαιώνεται και από το σταθμό των

Σπάτων. Νοτιότερα ο βόρειος άνεμος (9.00LST) μετατρέπεται σε νοτιοδυτικό (12.00LST) καταφέροντας να εισχωρήσει βαθύτερα στην ανατολική Αττική. Η συγκεκριμένη ροή επιβεβαιώνεται από τα δεδομένα του σταθμού στο Μαρκόπουλο στον οποίο καταγράφεται νότιος, νοτιοδυτικός άνεμος μέχρι τις 20.00LST.

- Στις 14/06/2010 σύμφωνα με τις προσομοιώσεις η θαλάσσια αύρα εισέρχεται στο λεκανοπέδιο στις 12.00LST και ο άνεμος διατηρεί νότια και νοτιοδυτική διεύθυνση μέχρι τις 18.00LST. Το ανεμολογικό πεδίο εμφανίζει τα ίδια χαρακτηριστικά με την προηγούμενη μέρα και στους σταθμούς μέτρησης. Γενικά το μετεωρολογικό μοντέλο κατάφερε να αναπαράγει την επικρατούσα νοτιοδυτική διεύθυνση του ανέμου στο λεκανοπέδιο της Αττικής καθώς και την ανατολική ροή που καταγράφηκε από το σταθμό των Σπάτων στην Ανατολική Αττική κατά τη διάρκεια της ημέρας στις 13 και 14 Ιουνίου 2010.
- Όσον αφορά στην ταχύτητα του ανέμου, η απόδοση του μοντέλου είναι ικανοποιητική για το εσωτερικό του λεκανοπεδίου με το μέγεθος RMSE να κυμαίνεται από 0.799 μέχρι 1.451 στις 14/06/2010 ενώ οι τιμές του συγκεκριμένου στατιστικού μεγέθους στην Ανατολική Αττική κυμάνθηκαν από 0.975 μέχρι 1.537. Στους περισσότερους σταθμούς παρατηρήθηκε υπερεκτίμηση των μετρούμενων ταχυτήτων από το μοντέλο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το ύψος μέτρησης στους σταθμούς διαφέρει από το αντίστοιχο ύψος του κελιού που το μοντέλο δίνει την ταχύτητα αλλά και στο ότι οι μετρήσεις επηρεάζονται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής που είναι τοποθετημένος ο σταθμός. Επιπλέον, το μοντέλο δεν μπορεί να αποδώσει τις μηδενικές τιμές ταχύτητας που μετρούνται σε κάποιους σταθμούς. Γι' αυτό το λόγο άλλωστε δεν συνηθίζεται να γίνεται έλεγχος ευαισθησίας των μετεωρολογικών μοντέλων για ταχύτητες μικρότερες των 2m/s.
- Το φωτοχημικό μοντέλο CAMx κατάφερε να αναπαράγει την ημερήσια διακύμανση του όζοντος. Κατά τη διάρκεια της νύχτας η συγκέντρωσή του παρέμεινε κάτω από 40ppb πάνω από το λεκανοπέδιο της Αττικής και για τις δύο ημέρες της προσομοίωσης ενώ άρχισε να αυξάνεται σταδιακά με την έναρξη των φωτοχημικών διεργασιών στην ατμόσφαιρα φτάνοντας τη μέγιστη συγκέντρωση το απόγευμα στις 18.00LST την πρώτη μέρα (13/06/2010) και στις 16.00LST την δεύτερη μέρα (14/06/2010) της προσομοίωσης.
- Γενικά οι συγκεντρώσεις αυξήθηκαν από τα νοτιοανατολικά της Αττικής και παρέμειναν σε υψηλά επίπεδα μέσα στο λεκανοπέδιο για το χρονικό διάστημα 16.00-19.00LST. Τις νυχτερινές ώρες το όζον άρχισε να μειώνεται μέσα στο λεκανοπέδιο διατηρώντας ωστόσο υψηλές τιμές στον Σαρωνικό Κόλπο (60-75ppb) και τιμές υποβάθρου (40-50ppb) στα βόρεια και βορειοανατολικά προάστια. Η επικράτηση υψηλών συγκεντρώσεων υποβάθρου στις συγκεκριμένες περιοχές την καλοκαιρινή περίοδο επιβεβαιώνεται από τους Bossioli et al.

(2007) και Kalabokas et al. (2012). Υψηλές τιμές O_3 εμφανίζονται και στα Μεσόγεια (65-70ppb) τη χρονική περίοδο 15.00-19.00LST.

- Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης με δεδομένα από σταθμούς μέτρησης για τις 13/06/2010 έδειξαν ότι το CAMx υπερεκτίμησε τις συγκεντρώσεις του όζοντος στον Πειραιά γεγονός που οφείλεται στα επιβαρυμένα επίπεδα εκπομπών στη περιοχή. Στα δυτικά προάστια (σταθμός: Περιστερί), ικανοποιητική συσχέτιση και υπερεκτίμηση των πρωινών ελάχιστων τιμών. Στα βορειοανατολικά (Αγία Παρασκευή και Μαρούσι) και βόρεια (Λυκόβρυση) προάστια το μοντέλο αναπαρήγαγε τις υψηλές συγκεντρώσεις όζοντος που σημειώθηκαν υπερεκτιμώντας τη μέση ωριαία τιμή των μετρήσεων στους σταθμούς Μαρούσι και Λυκόβρυση και υποεκτιμώντας τη στην Αγία Παρασκευή.
- Στην ανατολική Αττική δεν παρατηρήθηκε μεγάλη διασπορά μεταξύ των μετρήσεων και των αποτελεσμάτων του μοντέλου ($18.20 < NME < 23.47$) και η επικράτηση τιμών υποβάθρου ($> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ κατά το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα) κατά τις νυχτερινές ώρες αναπαράχθηκε από το μοντέλο το οποίο όμως δεν κατόρθωσε να αναπαράγει τις υψηλές συγκεντρώσεις O_3 ($> 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$) που καταγράφηκαν το μεσημέρι από τους σταθμούς.
- Στις 14/06/2010 σημειώθηκε επεισόδιο ρύπανσης ($O_3 > 180\mu\text{g}/\text{m}^3$) στα βορειοανατολικά προάστια σύμφωνα με τα δεδομένα των σταθμών, το οποίο το μοντέλο αναπαρήγαγε σε σημαντικό βαθμό ($r = 0.79, 0.90$ και 0.94 στους σταθμούς Αγία Παρασκευή, Μαρούσι και Λυκόβρυση, αντίστοιχα) χωρίς ωστόσο οι τιμές του όζοντος στα αντίστοιχα κελιά να υπερβούν τα $148\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Συνοπτικά το μοντέλο κατάφερε να αναπαράγει τη μεσημεριανή μέγιστη συγκέντρωση όζοντος που καταγράφηκε από τους σταθμούς μέτρησης τόσο ως προς τη χρονική στιγμή εμφάνισης, τη χρονική διάρκεια όσο και ως προς το μέγεθος στους περισσότερους σταθμούς. Το πλούμιο του O_3 κατάφερε να εισχωρήσει στο εσωτερικού του λεκανοπεδίου και να προσεγγίσει ακόμη και τους πιο απομακρυσμένους σταθμούς.
- Όσον αφορά στα αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} , η αριθμητική προσομοίωση δίνει υψηλές συγκεντρώσεις στο κέντρο της αστικής περιοχής του λεκανοπεδίου, στα βορειοανατολικά προάστια στην Ευρύτερη Περιοχή του Πειραιά και τα νοτιοδυτικά παράλια και τις δύο ημέρες μελέτης (13-14/06/2010).
- Πιο συγκεκριμένα, στο κέντρο της Αθήνας οι ωριαίες τιμές των συγκεντρώσεων των PM_{10} παρουσίασαν δύο μέγιστα κατά τη διάρκεια της ημέρας ($200\mu\text{g}/\text{m}^3$) στις 6.00LST και στις 22.00LST. Οι τιμές αυτές οφείλονται στις τοπικές πηγές και κυρίως στην κίνηση των οχημάτων. Στα βορειοανατολικά προάστια οι υψηλές τιμές εμφανίζονται νωρίς το πρωί

(Μαρούσι: $104\mu\text{g}/\text{m}^3$, 13/06 6.00LST) ενώ το μέγιστο παρατηρείται τις νυχτερινές ώρες από 13 προς 14 Ιουνίου (Μαρούσι: $113\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24.00LST, Λυκόβρυση: $113\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2.00LST). Επιβαρυσμένη εμφανίζεται και η περιοχή του Ασπρόπυργου της βραδινές ώρες λόγω της έντονης βιομηχανικής δραστηριότητας και των ιδιαίτερων πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται από τις μονάδες. Μέγιστη συγκέντρωση στη ΒΙ.ΠΕ. Θριασίου Πεδίου είναι τα $54\mu\text{g}/\text{m}^3$ σύμφωνα με το CAMx. Στα νότια προάστια και κυρίως στον Πειραιά η μέγιστη συγκέντρωση είναι $130\mu\text{g}/\text{m}^3$ (13/06/2010, 6.00LST). Η κατανομή των σωματιδίων στην ανατολική Αττική κατά την περίοδο μελέτης διατηρήθηκε σε μέτριες συγκεντρώσεις. Σύμφωνα με τις μετρήσεις στο σταθμούς του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών «Ελευθέριος Βενιζέλος» στα Γλυκά Νερά και την Παλλήνη η μέση τιμή 24ώρου ήταν $33.21\mu\text{g}/\text{m}^3$, $29.19\mu\text{g}/\text{m}^3$ και $40.80\mu\text{g}/\text{m}^3$, $32.43\mu\text{g}/\text{m}^3$ στις 13 και 14 Ιουνίου αντίστοιχα.

- Τα αποτελέσματα των παραπάνω συγκρίσεων μπορούν να μας οδηγήσουν στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο αναπαρήγαγε σε ικανοποιητικό βαθμό το μελετώμενο επεισόδιο ρύπανσης καθώς κατάφερε να αναπαράγει την ημερήσια διακύμανση και τις υψηλές συγκεντρώσεις O_3 που καταγράφηκαν από τους σταθμούς μέτρησης αλλά και τις συγκεντρώσεις 24ώρου των PM_{10} . Αυτό σημαίνει ότι τα βελτιωμένα δεδομένα εισόδου, δηλαδή το επικαιροποιημένο σύστημα απογραφής εκπομπών βελτίωσε σημαντικά τα αποτελέσματα όπως αναμενόταν.

5.2 Μελλοντική έρευνα

Η καταγραφή των εκπομπών και η πραγματοποίηση των αριθμητικών προσομοιώσεων δημιούργησαν ευνοϊκές συνθήκες για τη διερεύνηση πολλών ακόμα παραμέτρων σχετικά με την εμφάνιση και μελέτη των επεισοδίων ρύπανσης στην πιο πυκνοκατοικημένη περιοχή της Ελλάδας, την Ευρύτερη Περιοχή των Αθηνών. Βασική προϋπόθεση για την πραγματοποίηση αριθμητικών προσομοιώσεων είναι η διαρκής ανανέωση της βάσης εκπομπών με επικαιροποιημένα δεδομένα που θα αφορούν την αποτύπωση των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στην ΕΠΑ.

Η προτεινόμενη μελλοντική έρευνα επομένως θα μπορούσε να είναι:

- Η προσθήκη των εκπομπών φυσικής προέλευσης στη βάση δεδομένων καθώς και η πραγματοποίηση νέων προσομοιώσεων με στόχο τη μελέτη της επίδρασής τους στα επίπεδα των συγκεντρώσεων των σωματιδίων και του όζοντος.

- Η περαιτέρω μελέτη των οικιακών εκπομπών με κριτήριο την μεταβολή της αναλογίας του είδους καυσίμου (πετρέλαιο/βιομάζα) και η επίδραση των συγκεκριμένων εκπομπών στην εμφάνιση επεισοδίων ρύπανσης κατά τη χειμερινή περίοδο.
- Ο έλεγχος της ευαισθησίας του μοντέλου στις διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες (θαλάσσια αύρα, βόρειος άνεμος), τις οριακές και αρχικές συνθήκες και τους διάφορους χημικούς μηχανισμούς. Στην ΕΠΑ εμφανίζονται συχνά συστήματα τοπικής κυκλοφορίας και θερμοκρασιακές αναστροφές φαινόμενα που καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό την ποιότητα του αέρα της περιοχής. Η αριθμητική μελέτη τους θα βοηθήσει στον περαιτέρω έλεγχο της απόδοσης του μοντέλου.
- Η εμβάθυνση στις διεργασίες μεταφοράς πρωτογενών και δευτερογενών ρύπων στο λεκανοπέδιο της Αττικής οι οποίοι στη συνέχεια συμβάλλουν στην εμφάνιση υψηλών συγκεντρώσεων O_3 και PM. Η επίδραση των απομακρυσμένων πηγών στις πρόδρομες ενώσεις του όζοντος και των σωματιδίων που εμφανίζονται στην ΕΠΑ είναι σημαντική και η μελέτη αυτής θα συμβάλει στη καλύτερη κατανόηση των διεργασιών της δημιουργίας επεισοδίων ρύπανσης.
- Η διερεύνηση της χημικής σύστασης των PM όπως αυτή αναπαράγεται από το φωτοχημικό μοντέλο και σύγκριση στη συνέχεια με δεδομένα μετρήσεων.
- Η μελέτη και άλλων ομάδων ρύπων εκτός του όζοντος και των σωματιδίων, όπως για παράδειγμα τα PAHs.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Akylas, E., V. Kotroni, and K. Lagouvardos, 2007: Sensitivity of high resolution operational forecasts to the choice of the planetary boundary layer scheme. *Atmospheric Research*, 84, 49–57.

Aleksandropoulou, V., and M. Lazaridis, 2004: Spatial distribution of gaseous and particulate matter emissions in Greece. *Water, Air Soil Poll*, 153, 15–34.

<http://dx.doi.org/10.1023/B:WATE.0000019923.58620.58>

Aleksandropoulou, V., K. Torseth, M. Lazaridis, 2011: Atmospheric emission inventory for natural and anthropogenic sources and spatial emission mapping for the Greater Athens Area. *Water Air Soil Poll*, 219, 507–26. <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-010-0724-2>

Anagnostopoulos, J.S. and G. Bergeles, 1998: A numerical model for wind field and pollutant concentration calculations over complex terrain. Application to Athens, Greece. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 73(3), 285–306.

Anderson, J.R., E. Hardy, J. Roach, R.A Witmer, 1976: Land Use and Land Cover Classification System for use with remote sensor data. Geological Survey Professional Paper 964.

Asimakopoulos, D., D. Deligiorgi, C. Drakopoulos, C. Helmis, K. Kokkori, D. Lalas, et al., 1992: An experimental study of nighttime air-pollutant transport over complex terrain in Athens. *Atmos Environ*, 26B, 59–71.

Αστήθα Μαρίνα, 2007 : Γενικά χαρακτηριστικά μεταφοράς και μετασχηματισμού αέριων ρύπων – Πιθανές επιπτώσεις στο εποχικό κλίμα. Διδακτορική διατριβή. Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Φυσικής, Τομέας Φυσικής Περιβάλλοντος – Μετεωρολογίας.

Astitha, M., G. Kallos and P. Katsafados, 2008: Air pollution modeling in the Mediterranean Region: Analysis and forecasting of episodes. *Atmospheric Research*, 89, 358–364.

Athanasopoulou, E., M. Tombrou, S.N. Pandis, and A.G. Russell, 2008: The role of sea-salt emissions and heterogenous chemistry in the air quality of polluted coastal areas. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 8, 3807– 3841.

Athanasopoulou, E., M. Tombrou, A.G. Russell, A. Karanasiou, K. Eleftheriadis, and A. Dandou, 2010: Implementation of road and soil dust emission parameterizations in the aerosol model CAMx: Applications over the greater Athens urban area affected by natural sources. *Journal of Geophysical Research*, 115, D17301. Doi:10.1029/2009JD013207

Atkinson, R., 2000: Atmospheric chemistry of VOCs and NOx. *Atmos Environ*, 34, 2063–2101. [http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00460-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00460-4)

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ban-Weiss, G.A., J.P. McLaughlin, R.A. Harley, M.M. Lunden, T.W. Kirchstetter, R.A. Kean, A.W. Strawa, E.D. Stevenson, G. Kendall., 2008: Long-term changes in emissions of nitrogen oxides and particulate matter from on-road gasoline and diesel vehicles. *Atmos Environ*, 42, 220-32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.09.049>
- Borrego, C., A. Monteiro, J. Ferreira, M.R. Moraes, A. Carvalho, I. Ribeiro, A.I. Miranda, D.M. Moreira, 2010: Modelling the photochemical pollution over the metropolitan area of Porto Alegre, Brazil. *Atmospheric Environment*, 44, 370-380.
- Bossioli, E., M. Tombrou, C. Pilinis, 2002: Adapting the speciation of the VOCs emission inventory in the Greater Athens Area. *Water Air Soil Poll*, 2, 141-53. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1019999528315> <http://dx.doi.org/10.1023/A:1021302427057>
- Bossioli, E., Maria Tombrou, Aggeliki Dandou, and Nikos Soulakelis, 2007: Simulation of the effects of critical factors on ozone formation and accumulation in the greater Athens area. *Journal Of Geophysical Research*, vol. 112, D02309.
- Byun Daewon, W., Soon – Tae Kim, Seung – Bum Kim, 2007: Evaluation of air quality models for the simulation of a high ozone episode in the Houston metropolitan area. *Atmospheric Environment*, 41, 837 – 853.
- Carapiperis, L., 1951. On the periodicity of the Etesian in Athens. *Weather*, Dec.1951.
- Castell, N., E. Mantilla, R. Salvador, A.F. Stein, M. Millan, 2010: Photochemical model evaluation of the surface ozone impact of a power plant in a heavily industrialized area of southwestern Spain. *Journal of Environmental Management*, 91, 662- 676.
- Chaloulakou, A., P. Kassomenos, N. Spyrellis, P. Demokritou, P. Koutrakis, 2003: Measurements of PM₁₀ and PM_{2.5} particle concentrations in Athens, Greece. *Atmospheric Environment* 37, 649–660.
- Chaloulakou, A., I. Mavroidis, I. Gavriil, 2008: Compliance with the annual NO₂ air quality standard in Athens. Required NO_x levels and expected health implications. *Atmospheric Environment* 42,454-465.
- Cheng, Fang-Yi, S. Kim, D.W. Byun, 2008: Application of high resolution land use and land cover data for atmospheric modeling in the Houston-Galveston Metropolitan area: Part II Air quality simulation results. *Atmospheric Environment* 42, 4853-4869.
- Civerolo, K.L., G. Sistla, S.T. Rao, D.J. Nowak, 2000: The effects of land use in meteorological modeling: implications for assessment of future air quality scenarios. *Atmospheric Environment*, 34, 1615-21.
- Clappier, A., A. Martilli, P. Grossi, P. Thunis, F. Pasi, B.C. Krueger, B. Calpini, G. Graziani, H. Van Den Bergh, 2000: Effect of sea breeze on air pollution in the greater Athens area. Part I: Numerical simulations and field observations. *Journal of Applied Meteorology* 39, Issue 4, 546-562.
- CMAS (Community Modeling and Analysis System) Center, 2014. Visualization Environment for Rich Data Interpretation (VERDI 1.5): Developer Instructions. U.S. EPA Contract No. EP-W-09-023, “Operation of the Center for Community Air Quality Modeling and Analysis (CMAS). pp.48.

- Coelho, M., T. Fontes, J.M. Bandeira, S.R. Pereira, O. Tchepel, D. Dias, E. Sá, J.H. Amorim, C. Borrego, 2014: Assessment of potential improvements on regional air quality modelling related with implementation of a detailed methodology for traffic emission estimation. *Sci Total Environ*, 470-471, 127-37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.09.042>
- Dandou, A., M. Tombrou, E. Akylas, N. Soulakellis, E. Bossioli, 2005: Development and evaluation of an urban parameterization scheme in the PennState/NCAR Mesoscale Model (MM5). *J. Geophys. Res.* 110, D10102.
- Dandou, A., M. Tombrou, N. Soulakellis, 2009: The Influence of the City of Athens on the Evolution of the Sea-Breeze Front. *Boundary-Layer Meteorol.* 131, 35–51.
- Dudhia, J., 1993: A non-hydrostatic version of the Penn State/NCAR mesoscale model: validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. *Mon. Weather Rev.* 121, 1493–1513.
- Economopoulos, A.P., 1997: Management of space heating emissions for effective abatement of urban smoke and SO₂ pollution. *Atmospheric Environment*, Vol. 31, No. 9, 13327-37.
- EEA(European Environmental Agency), 2010: The European environment — state and outlook 2010: synthesis. European Environment Agency, Copenhagen.
- EEA (European Environmental Agency), 2013a: Air quality in Europe — 2013 report. EEA Report No 9/2013.
- EEA (European Environmental Agency), 2013b: European Union emission inventory report 1990–2011 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP). EEA Technical report No 10/2013.
- Eleftheriadis, K., D. Balis, I. C. Ziomas, I. Colbeck, N. Manalis, 1998: Atmospheric aerosol and gaseous species in Athens, Greece. *Atmospheric Environment* Vol. 32, No. 12, pp. 2183–2191.
- ΕΛ.ΣΤΑΤ. Οκτώβριος 2013: Έρευνα Κατανάλωσης Ενέργειας στα νοικοκυριά, 2011 – 2012. Ανάκτηση Νοέμβριος 2013 από:
http://www.statistics.gr/portal/page/portal/ESYE/BUCKET/A0805/PressReleases/A0805_SFA40_DT_5Y_00_2012_01_F_GR.pdf
- ΕΛ.ΣΤΑΤ., 2014a: Απογραφή Πληθυσμού-Κατοικιών 2011. Δημογραφικά και κοινωνικά χαρακτηριστικά του Μόνιμου Πληθυσμού της Χώρας σύμφωνα με την αναθεώρηση των αποτελεσμάτων της Απογραφής Πληθυσμού-Κατοικιών 2011 στις 20/3/2014. http://www.statistics.gr/portal/page/portal/ESYE/BUCKET/A1602/PressReleases/A1602_SAM01_DT_DC_00_2011_03_F_GR.pdf
- ΕΛ.ΣΤΑΤ., 2014b: Κατανομή της έκτασης της Ελλάδος σε γενικευμένες κατηγορίες χρήσης / κάλυψης, κατά ΥΠΑ, νομό, δήμο ή κοινότητα. Ανάκτηση από:
- Environ, 2014: CAMx User's Guide Comprehensive Air quality Model with extensions, Version 6.1, pp.291. http://www.camx.com/files/camxusersguide_v6-10.pdf
- EPA, 1991: Guideline for regulatory applications of the urban airshed model. US Environmental Protection Agency Report EPA-450/4-91-013, EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC 27711, 89 pp.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Eurostat. European Forum for GeoStatistics. GEOSTAT 1A – Representing Census data in a European population grid. Final Report 2012.

Eurostat, 2011: European Forum for GeoStatistics. GEOSTAT 1A – Representing Census data in a European population grid. Final Report for A 2010 – 2011. ESSnet project GEOSTAT1A final report_0.pdf

http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/gisco_Geographical_information_maps/documents/ESSnet%20project%20GEOSTAT1A%20final%20report_0.pdf

Eurostat statistics database, 2013
http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/search_database

Eurostat, 2014: European Forum for GeoStatistics. GEOSTAT 1B – Final Report. Final Report for 2012 – 2013. WP0-4_geostat1b-final-technical-report-v5.pdf, <http://www.efgs.info/geostat/1B/frontpage/final-technical-report>

Fameli K.M., V.D. Assimakopoulos and V. Kotroni, 2011: Comparative study of the land use characteristics in the Greater Athens Area (GAA) before and after 2004, *12th International Conference on Environmental Science and Technology, Rhodes island, Greece, 8-10 September 2011*.

Fameli K.M., V.D. Assimakopoulos, V. Kotroni, 2012a: On the effect of land use change on the meteorological parameters above the Greater Athens Area, *11th International Conference on Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics, Athens, 29 May – 1 June 2012*.

Fameli K.M., V.D. Assimakopoulos, V. Kotroni and A. Retalis, 2012b: Assimilation of numerical study of the distribution of ozone above the Greater Athens Area (GAA), *8th International Conference on Air Quality – Science and Application, Athens, 19-23 March 2012*.

Fameli K.M. and V.D. Assimakopoulos, 2013a: Road transport emissions and the effect of dieselization of passenger cars on the air quality of the Greater Athens Area (GAA), Greece, *International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes HARMO15, Madrid (Spain) May, 6-9, 2013*.

Fameli K.M., V.D. Assimakopoulos, V. Kotroni and A. Retalis, 2013b: Effect of the land use change characteristics on the air pollution patterns above the greater Athens area (GAA) after 2004, *Global Nest Journal, Volume 15, Issue 2*.

Fameli K.M. and V.D. Assimakopoulos, 2014. Aviation Emission Inventory for Greek Airports. *TAP 2014 Conference, 18-19 September, 2014, Graz, Austria*.

Fameli K.M. and V.D. Assimakopoulos, 2015: Development of a road transport emission inventory for Greece and the Greater Athens Area: Effects of important parameters. *Science of the Total Environment*, 505, 770-786.

Feldman, M.S., T. Howard, E. McDonald-Buller, G. Mullins, D.T. Allen, A. Webb, Y. Kimura, 2007: Applications of satellite remote sensing data for estimating dry deposition in eastern Texas. *Atmospheric Environment*, 41, 7562 – 7576.

Feldman, M.S., T. Howard, E. McDonald-Buller, G. Mullins, D.T. Allen, A. Hansel, A. Wisthaler, 2010: Applications of satellite remote sensing data for estimating biogenic emissions in southern Texas. *Atmospheric Environment*, 44, 917-929.

- Funk, T.H., L.R. Chinkin, P.T. Roberts, M. Saeger, S. Mulligan, V.H. Paramo Figueroa, J. Yarbrough, 2001: Compilation and evaluation of a Paso del Norte emission inventory. *Science of the Total Environment*, 276, 135-51. [http://dx.doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00776-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00776-8)
- Gaydos, T.M., R. Pinder, B. Koo, K.M. Fahey, G. Yarwood, S.N. Pandis, 2007: Development and application of a three- dimensional aerosol chemical transport model, PMCAMx. *Atmospheric Environment*, 41, 2594- 2611.
- Gaidajis, G., K. Angelakoglou and D. Aktoglou, 2014: Wintertime particulate mass concentrations in urban environment and the impact of economic crisis. *Journal of Environmental Science and Health, Part A* 49, 1653–1660. DOI: 10.1080/10934529.2014.951221
- Gerasopoulos, E., G. Kouvarakis, M. Vrekoussis, M. Kanakidou, N. Mihalopoulos, 2005: Ozone variability in the marine boundary layer of the Eastern Mediterranean based on 7-year observations. *Journal of Geophysical Research* 110, D15309.
- Gerasopoulos, E., G. Kouvarakis, M. Vrekoussis, C. Donoussis, N. Mihalopoulos, M. Kanakidou, 2006: Photochemical ozone production in the Eastern Mediterranean. *Atmospheric Environment*, 40 ,3057–3069.
- Giambanis, A., J. Anagnostopoulos, G. Bergeles, 1998: Numerical simulation of pollutant dispersion and photochemical kinetics over complex terrain. *Applied Mathematical Modelling*, 22, 313-29.
- Giannaros, T.M., D. Melas, I.A. Daglis, 2013: Numerical study of the urban heat island over Athens (Greece) with the WRF model. *Atmospheric Environment*, 73 ,103-111.
- Glavas, Sotirios, 1999: Surface ozone and NO_x concentrations at a high altitude Mediterranean site, Greece. *Atmospheric Environment*, 33, 3813-3820.
- Grivas, G., A. Chaloulakou, P. Kassomenos, 2008: An overview of the PM₁₀ pollution problem, in the Metropolitan Area of Athens, Greece. Assessment of controlling factors and potential impact of long range transport. *Science of the Total Environment*, 389, 165-177.
- Grossi, P., P. Thunis, A. Martilli, A. Clappier, 2000: Effect of sea breeze on air pollution in the greater Athens area. Part II: Analysis of different emission scenarios. *J. Appl. Meteorol.* 39,563–575.
- Guerreiro, B.B. Cristina, V. Foltescu, Frank de Leeuw, 2014: Air quality status and trends in Europe. *Atmospheric Environment*, 98, 376-384.
- Hanna, SR, Z. Lu, H.C. Frey, N. Wheeler, J. Vukovich, S. Arunachala, et al.. 2001: Uncertainties in predicted ozone concentrations due to input uncertainties for the UAM- V photochemical grid model applied to the July 1995OTAG domain. *Atmos Environ*, 35, 891–903. [http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00367-8](http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00367-8)
- Hatzianastassiou, N., B.D. Katsoulis and B. Antakis, 2007: Extreme Nitrogen Oxide and Ozone Concentrations in Athens Atmosphere in Relation to Meteorological Conditions. *Environ Monit Assess*, 128, 447–464.
- Hong, S.Y. and H.L. Pan, 1996: Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium - range forecast model. *Mon. Weather Rev.* 124, 2322-2339.
- Hu, Jianlin, Qi Ying, Jianjun Chen, Abdullah Mahmud, Zhan Zhao, Shu-Hua Chen, M.J. Kleeman, 2010: Particulate air quality model predictions using prognostic vs. diagnostic meteorology in central California. *Atmospheric Environment*, 44, 215-226.

ICCT (International Council on Clean Transportation). Campestrini M and Mock Peter. European Vehicle Market Statistics. Pocketbook 2011 Edition.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>

Im, U., N. Daskalakis, K. Markakis, M. Vrekoussis, J. Hjorth, S. Myriokefalitakis, E. Gerasopoulos, G. Kouvarakis, A. Richter, J. Burrows, L. Pozzoli, A. Unal, T. Kindap, M. Kanakidou, 2014: Simulated air quality and pollutant budgets over Europe in 2008. *Science of the Total Environment*, 470-471, 270-281.

Jackson, B., D. Chau, K. Gurer, A. Kaduwela, 2006: Comparison of ozone simulations using MM5 and CALMET/MM5 hybrid meteorological fields for the July/August 2000 CCOS episode. *Atmospheric Environment*, 40, 2812 – 2822.

Jacobson, Mark Z. : Fundamentals of atmospheric modeling. Cambridge University Press, pp 656.

Jenkin, M.E. and K.C. Clemitshaw, 2000: Ozone and other secondary photochemical pollutants: chemical processes governing their formation in the planetary boundary layer. *Atmos Environ*, 34, 2499-2527. [http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00478-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00478-1)

Jorquera, Hector and Julio Castro, 2010: Analysis of urban pollution episodes by inverse modeling. *Atmospheric Environment*, 44, 42-54.

Kain, J.S. and J.M. Fritsch, 1993: Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. The Representation of Cumulus in numerical models. *Meteor. Mon. 46 Amer. Met. Soc.*, 165-177.

Kalabokas, P.D., L.G. Viras, C.C. Repapis, 1999a: Analysis of 11-year record (1987-1997) of air pollution measurements in Athens, Greece, Part I: primary air pollutants. *Global Nest: the International Journal* 1 (3), 157-167.

Kalabokas, P.D., L.G. Viras, C.C. Repapis, J.G. Bartzis, 1999b: Analysis of 11-year record (1987-1997) of air pollution measurements in Athens, Greece, Part II: photochemical air pollutants. *Global Nest: the International Journal* 1 (3), 169-176.

Kalabokas, P.D., C.C. Repapis, 2004. A climatological study of rural surface ozone in central Greece. *Atmospheric Chemistry and Physics* 4, 1139-1147.

Kalabokas, P.D., A.D. Papayannis, G. Tsaknakis, I. Ziomas, 2012: A study on the atmospheric concentrations of primary and secondary air pollutants in the Athens basin performed by DOAS and DIAL measuring techniques. *Science of the Total Environment*, 414, 556–563.

Kallos, G., P. Kassomenos, R.A. Pielke, 1993: Synoptic and mesoscale weather conditions during air pollution episodes in Athens. *Boundary-Layer Meteorol.* 62, 163–184.

Kallos, G., M. Astitha, P. Katsafados, Ch. Spyrou, 2007: Long-range transport of anthropogenically and naturally produced particulate matter in the Mediterranean and North Atlantic: current state of knowledge. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 46, 1230-1251.

Kanakidou, M., N. Mihalopoulos, T. Kindap, U. Im, M. Vrekoussis, E. Gerasopoulos, E. Dermizaki, A. Unal, M. Koçak, K. Markakis, D. Melas, G. Kouvarakis, A. F. Youssef, A. Richter, N. Hatzianastassiou, A. Hilboll, F. Ebojie, F. Wittrock, C. von Savigny, J.P. Burrows, A. Ladstaetter-

- Weissenmayer, H. Moubasher, 2011: Megacities as hot spots of air pollution in the East Mediterranean. *Atmospheric Environment*, 45, 1223-1235.
- Karydis, V.A., A.P. Tsimpidi, C. Fountoukis, A. Nenes, M. Zavala, W. Lei, L.T. Molina, S.N. Pandis, 2010: Simulating the fine and coarse inorganic particulate matter concentrations in a polluted megacity. *Atmospheric Environment*, 44, 608-620.
- Kassomenos, P.A., H.A. Flokas, S. Lykoudis, A. Skouloudis, 1998: Spatial and temporal characteristics of the relationship between air quality status and mesoscale circulation over an urban Mediterranean basin. *Science of the Total Environment*, 217, 37-57.
- Kassomenos, P.A., S. Vardoulakis, A. Chaloulakou, A.K. Paschalidou, G. Grivas, R. Borge, J. Lumbreras, 2014a: Study of PM₁₀ and PM_{2.5} levels in three European cities: Analysis of intra and inter urban variations. *Atmospheric Environment*, 87, 153-163.
- Kassomenos, P. A., K. Dimitriou and A.K. Paschalidou, 2014b: Human health damage caused by particulate matter PM₁₀ and ozone in urban environments: the case of Athens, Greece. *Environ Monit Assess*, 185:6933–6942. DOI 10.1007/s10661-013-3076-8.
- Katsoulis, B.D. 1988: Some meteorological aspects of air pollution in Athens, Greece. *Meteorological and Atmospheric Physics*, 39, 203 – 212.
- Katsoulis, M., K. Dimakopoulou, X. Pedeli, D. Trichopoulos, A. Gryparis, A. Trichopoulou, K. Katsouyanni, 2014: Long-term exposure to traffic-related air pollution and cardiovascular health in a Greek cohort study. *Science of the Total Environment* 490, 934–940.
- Katsouyianni, K., D. Zmirou, C. Spix, et al., 1995: Short-term effects of air pollution on health: A European approach using epidemiologic time series data. *Eur Respir*, 8, 1030-38.
- Kioutsioukis, I., C. Zerefos, D. Melas and I. Ziomas, 2003: Evolution of perturbations in 3D air quality models. *Annals of Geophysics*, vol. 46, N. 2.
- Kioutsioukis, I., D. Melas, C. Zerefos, I. Ziomas, 2005: Efficient sensitivity computations in 3D air quality models. *Computer Physics Communications*, 167, 23–33.
- Kotroni, V., Kallos, G., Lagouvardos, K., Varinou, M., Walko, R., 1999: Numerical simulation of the meteorological and dispersion conditions during an air pollution episode over Athens, Greece. *J. Appl. Meteorol.* 38, 432-447.
- Kotroni, V., K. Lagouvardos and D. Lalas, 2001: The effect of Crete island on the Etesian winds over the Aegean Sea. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 127, 1917-1938.
- Kotroni, V. and K. Lagouvardos, 2004: Evaluation of MM5 high resolution real-time forecasts over the urban area of Athens, Greece. *J. Appl. Meteorol.* 43, 1666–1678.
- Kotroni V., K. Lagouvardos, A. Retalis, 2011: The heat wave of June 2007 in Athens, Greece – Part 2: Modeling study and sensitivity experiments. *Atmos Research*, 100, 1-11.
- Kourtidis, K.A., I.C. Ziomas, B. Rappenglueck, A. Proyou, D. Balis, 1999: Evaporative traffic hydrocarbon emissions, traffic CO and speciated HC traffic emissions from the city of Athens. *Atmos Environ*, 33, 3831-42. [http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00395-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00395-1)
- Kyriakis, N., Z. Samaras, A. Andrias, 1998: MEET: Road traffic composition. MEET deliverable 16. LAT report, n89823, Thessaloniki, Greece.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Larissi, I.K., A. Antoniou, P.T. Nastos, A.G. Paliatsos, 2010: The role of wind in the configuration of the ambient air quality in Athens, Greece. *Fresen. Environ. Bull.*, 19 (9B), 1989-1996.
- Lazaridis, M., A. Spyridaki, S. Solberg, G. Kallos, T. Svendby, F. Flatou, I. Drossinos, C. Housiadas, J. Smolik, I. Colbeck, M. Varinou, F. Gofa, K. Eleftheriadis, V. Zdimal, and P.G. Georgopoulos, 2004: Modeling of combined aerosol and photooxidant processes in the Mediterranean area. *Water Air Soil Poll*, 4, 3-21.
- Lazaridis, M., A. Spyridaki, S. Solberg, J. Smolik, V. Zdimal, K. Eleftheriadis, V. Aleksandropoulou, O. Hov, P.G. Georgopoulos, 2005: Mesoscale modelling of combined aerosol and photo-oxidant processes in the Eastern Mediterranean. *Atmospheric Chemistry and Physics* 5, 927-940.
- Lee, S.-M., M. Princevac, S. Mitsutomi, J. Cassmassi, 2009: MM5 simulations for air quality modeling: An application to a coastal area with complex terrain. *Atmospheric Environment*, 43, 447-57.
- Lei, W., B. de Foy, M. Zavala, R. Volkamer, and L.T. Molina, 2007: Characterizing ozone production in the Mexico City Metropolitan Area: a case study using a chemical transport model. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 7, 1347 – 1366.
- Lewne, M., J.Cyrys, K. Meliefste, G. Hoek, M. Brauer, P. Fischer, U. Gehring, J. Heinrich, B. Brunekreef, T. Bellander, 2004: Spatial variation in nitrogen dioxide in three European areas. *Science of the Total Environment* 332, 217–230.
- Markakis, K., A. Poupkou, D. Melas, P. Tzoumaka, M. Petrakakis, 2010: A computational approach based on GIS technology for the development of an anthropogenic emission inventory of gaseous pollutants in Greece. *Water Air Soil Poll*, 207, 157-180. <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-009-0126-5>
- Μαρκάκης, 2010: Συμβολή στη μελέτη της σωματιδιακής ρύπανσης στην Ελλάδα. Διδακτορική διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Φυσικής, Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας.
- Markou, M.T. and P. Kassomenos, 2010: Cluster analysis of five years of back trajectories arriving in Athens, Greece. *Atmospheric Research* 98, 438–457.
- Martilli, A., Y.-A. Roulet, M. Junier, F. Kirchner, M.W. Rotach, A. Clappier, 2003: On the impact of urban surface exchange parameterisations on air quality simulations: the Athens case. *Atmospheric Environment*, 37, 4217 – 4231.
- Mavroukou, T., K. Philippopoulos, D. Deligiorgi, 2012: The impact of sea breeze under different synoptic patterns on air pollution within Athens basin. *Sci. Total Environ.*, 433, 31–43.
- Mavroidis, I. and A. Chaloulakou, 2011: Long-term trends of primary and secondary NO₂ production in the Athens area. Variation of the NO₂/NO_x ratio. *Atmospheric Environment*, 45, 6872-6879.
- Mazarakis, N., V. Kotroni, K. Lagouvardos and A.A. Argiriou, 2009: The sensitivity of numerical forecasts to convective parameterization during the warm period and the use of lightning data as an indicator for convective occurrence. *Atmos. Res.*, 94 (4), 704-714.
- Mellios, G., R.V. Aalst, Z. Samaras, 2006: Validation of road traffic urban emission inventories by means of concentration data measured at air quality monitoring stations in Europe. *Atmos Environ*, 40, 7362-7377. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.06.044>

- Metaxas, D., A. and Bartzokas, 1994: Pressure covariability over the Atlantic, Europe and N. Africa. Application: centers of action for temperature, winter precipitation and summer winds in Athens, Greece. *Theor. Appl. Climatol.*, 49, 9-18.
- Mihalopoulos, N., V.-M. Kerminen, M. Kanakidou, H. Berresheim, J. Sciare, 2007: Formation of particulate sulfur species (sulfate and methanesulfonate) during summer over the Eastern Mediterranean: a modelling approach. *Atmospheric Environment*; 41, 6860-6871.
- Morris, R.E., K. Bonyoung, A. Guenther, G. Yarwood, D. McNally, T.W. Tesche, G. Tonnesen, J. Boylan, P. Brewer, 2006: Model sensitivity evaluation for organic carbon using two multi-pollutant air quality models that simulate regional haze in the southeastern United States. *Atmospheric Environment*, 40, 4960 – 4972.
- Moussiopoulos, N., P. Sahm, C. Kessler, 1995: Numerical simulation of photochemical smog formation in Athens, Greece—a case study. *Atmos. Environ.* 29, 3619–3632.
- Moussiopoulos, N., S. Papagrigoriou, J.G. Bartzis, K. Nester, H. Van den Bergh, G. Theodoridis, 2000: Forecasting air quality in the Greater Athens area for the year 2004: an intercomparison of the results of four different dispersion models. *International Journal of Environment and Pollution*, 14, 343 – 353.
- Moussiopoloulos, N., Ch. Vlachokostas, G. Tsilingiridis, I. Douros, E. Hourdakakis, C. Naneris, C. Sidiropoulos, 2009: Air quality status in Greater Thessaloniki Area and the emission reductions needed for attaining the EU air quality legislation. *Science of the Total Environment*, 407, 1268-1285.
- Μποσιώλη Ελισσάβετ, 2006: Μελέτη της επίδρασης των παραγόντων που ευνοούν τη δημιουργία και συσσώρευση όζοντος στην περιοχή της Αττικής με τη μέθοδο της αριθμητικής προσομοίωσης. Διδακτορική διατριβή. Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Φυσικής, Τομέας Φυσικής Περιβάλλοντος – Μετεωρολογίας.
- Nastos, P.T., A.G. Paliatsos, M.B. Anthracopoulos, E.S. Roma, K.N. Priftis, 2010: Outdoor particulate matter and childhood asthma admissions in Athens, Greece: a time-series study *Environmental Health*, 2010, 9:45.
- Ntziachristos, L., G. Mellios, Ch. Kouridis, Th. Papageorgiou et al. European Database of Vehicle Stock for the Calculation and Forecast of Pollutant and Greenhouse Gases Emissions with TREMOVE and COPERT – Final Report 2008. LAT/AUTH Report No. 08.RE.0009.V2, Thessaloniki, Greece, p.250.
- Odum, J.R., T.P.W. Jungkamp, R.J. Griffin, R.C. Flagan, J.H. Seinfeld, 1997: The atmospheric aerosol-forming potential of whole gasoline vapor. *Science*, 276, 96-9. <http://dx.doi.org/10.1126/science.276.5309.96>
- Odyssee – Mure project, 2014. www.odyssee-mure.eu. Odysse database, Ανάκτηση στις 15-04-2014.
- OpenStreetMap data (2012). Available at: www.openstreetmap.org. Accessed October 2012.
- Parrish, D.D., M. Trainer, D. Hereid, E.J. Williams, K.J. Olszyna, R.A. Harley, J.F. Meagher, F.C. Fehsenfeld, 2002: Decadal change in carbon monoxide to nitrogen oxide ratio in U.S. vehicular emissions. *Journal of Geophysical Research*, 107(D12), 4140. <http://dx.doi.org/10.1029/2001JD000720>

- Πατεράκη Στυλιανή, 2012. Πειραματική και αριθμητική μελέτη της αιωρούμενης σωματιδιακής ύλης (TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁) και της χημικής της σύστασης πάνω από την ευρύτερη περιοχή της Αττικής. Διδακτορική διατριβή, Ε.Κ.Π.Α., Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Φυσικής.
- Pateraki, St., T. Maggos, J. Michopoulos, H.A. Flocas, D.N. Asimakopoulos, C. Vasilakos, 2008: Ions species size distribution in particulate matter associated with VOCs and meteorological conditions over an urban region. *Chemosphere*, 72, 496–503.
- Pateraki, St., V.D. Assimakopoulos, Th. Maggos, **K.M. Fameli**, V. Kotroni, Ch. Vasilakos: 2013: Particulate matter pollution over a Mediterranean urban area. *Science of the Total Environment* 463–464, 508–524.
- Perez – Roa, R., J. Castro, H. Jorquera, J.R. Perez – Correa, V. Vesovic, 2006: Air – pollution modelling in an urban area: Correlating turbulent diffusion coefficients by means of an artificial neural network approach. *Atmospheric Environment*, 40, 109 – 125.
- Pilinis, C., P. Kassomenos, G. Kallos, 1993: Modeling of photochemical pollution in Athens, Greece. Application of the RAMS-CALGRID modeling system. *Atmospheric Environment*, 27B, 353-70.
- Pirovano, G., I. Coll, M. Bedogni, S. Alessandrini, M.P. Costa, V. Gabusi, F. Lasry, L. Menut, R. Vautard, 2007: On the influence of meteorological input on photochemical modelling of a severe episode over a coastal area. *Atmospheric Environment*, 41, 6445 – 6464.
- Polymeneas, P., E. Giannopoulou and C. Polinis, 2007: On the importance of biogenic emissions in the air pollution in the Greater Athens Area: the episode of June 22 & 25, 2003. *Proceedings of the 10th International Conference on Environmental Science and Technology, Kos island, Greece, 5- 7 September 2007*.
- Poupkou, A., P. Symeonidis, I. Ziomas, D. Melas, K. Markakis, 2007: A spatially and temporarily disaggregated anthropogenic emission inventory in the Southern Balkan region. *Water Air Soil Poll*, 185, 335-48. <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-007-9457-2>
- Poupkou, A., D. Melas, I. Ziomas, P. Symeonidis, I. Lisaridis, E. Gerasopoulos, C. Zerefos, 2008a: Simulated Summertime Regional Ground-Level Ozone Concentrations over Greece. *Water Air Soil Pollut*, 196, 169–181. DOI 10.1007/s11270-008-9766-0
- Poupkou, A., P. Symeonidis, I. Lisaridis, D. Melas, I. Ziomas, O.D. Yay, D. Balis, 2008b: Effects of anthropogenic emission sources on maximum ozone concentrations over Greece. *Atmospheric Research*, 89, 374-381.
- Prezerakos, N.G., 1986: Characteristics of the sea breeze in Attica, Greece. *Boundary-Layer Meteorol.*, 36, 245-266.
- Progiou, A.G. and I.C. Ziomas, 2011: Road traffic emissions impact on air quality of the Greater Athens Area based on a 20 year emissions inventory. *Sci Total Environ*, 410-411, 1-7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.09.050>
- Progiou, AG. and I.C. Ziomas, 2012: Twenty year road traffic emission trend in Greece. *Water Air Soil Poll*, 223, 305-17. <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-011-0859-9>

Pulles Tinus and Dick Heslinga. The Art of Emission Inventorying. TNO- Innovation for Life publications. pp. 78 (ISBN number: ISBN/EAN 9789059863415) https://www.tno.nl/content.cfm?context=thema&content=prop_publicatie&laag1=896&laag2=915&laag3=150&item_id=665&Taal=2

Pusede, S.E. and R.C. Cohen, 2012: On the observed response of ozone to NO_x and VOC reactivity reductions in San Joaquin Valley California 1995–present. *Atmos Chem Phys*, 12, 8323–8339.

<http://dx.doi.org/10.5194/acp-12-8323-2012>

Puxbaum, H., Caseiro A., Sánchez-Ochoa A., Kasper-Giebl A., Claeys M., Gelencsér A., et al., 2007: Levoglucosan levels at background sites in Europe for assessing the impact of biomass combustion on the European aerosol background. *J Geophys Res Atmos*, 112.

Querol, X., A. Alastuey, J. Pey, M. Cusack, N. Pérez, N. Mihalopoulos, C. Theodosi, E. Gerasopoulos, N. Kubilay, M. Koçak, 2009a: Variability in regional background aerosols within the Mediterranean. *Atmospheric Chemistry and Physics* 9, 4575–4591.

Querol, X., J. Pey, M. Pandolfi, A. Alastuey, M. Cusack, N. Pérez, T. Moreno, N. Viana, N. Mihalopoulos, G. Kallos, S. Kleanthous, 2009b: African dust contributions to mean ambient PM₁₀ mass-levels across the Mediterranean basin. *Atmospheric Environment* 43, 4266–4277.

Rückerl, R., R. Hampel, S. Breitner, J. Cyrys, U. Kraus, J. Carter, L. Dailey, R.B. Devlin, D. Diaz-Sanchez, W. Koenig, R. Phipps, R. Silbajoris, J. Soentgen, J. Soukup, A. Peters, A. Schneider, 2014: Associations between ambient air pollution and blood markers of inflammation and coagulation/fibrinolysis in susceptible populations. *Environment International*, 70, 32–49.

Saffari, A., N. Daher, C. Samara, D. Voutsas, A. Kouras, E. Manoli, O. Karagkiozidou, C. Vlachokostas, N. Moussiopoulos, M.M. Shafer, Schauer, J. James, C. Sioutas, 2013: Increased biomass burning due to the economic Crisis in Greece and its adverse impact on Wintertime air quality in Thessaloniki. *Environ. Sci. Technol.* 47, 13313–13320. <http://dx.doi.org/10.1021/es403847h>.

Samaali, M., S. Francois, J.-F. Vinuesa, J.-L. Ponche, 2007: A new tool for processing atmospheric emission inventories: Technical aspects and application to the ESCOMPTE study area. *Environmental Modelling and Software*, 22, 1765–1774.

Samoli, E., E. Kougea, P. Kassomenos, A. Analitis, K. Katsouyanni, 2011: Does the presence of desert dust modify the effect of PM₁₀ on mortality in Athens, Greece?. *Science of the Total Environment* 409, 2049–2054.

Santamouris, M., J.A. Paravantis, D. Founda, D. Kolokotsa, P. Michalakakou, A.M. Papadopoulos, N. Kontoulis, A. Tzavali, E.K. Stigka, Z. Ioannidis, A. Mehili, A. Matthiessen, E. Servou, 2013: Financial crisis and energy consumption: A household survey in Greece. *Energy and Buildings*, 65, 477–487.

Sarigiannis, D.A., S.P. Karakitsios, M. Kermenidou, S. Nikolaki, D. Zikopoulos, S. Semelidis, A. Papagiannakis, R. Tzimou, 2014: Total exposure to airborne particulate matter in cities: The effect of biomass combustion. *Science of the Total Environment*, 493, 795–805.

Schultz, P., 1995: An explicit cloud physics parameterization for operational numerical weather prediction. *Mon. Weather Rev.* 123, 3331–3343.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Sidiropoulos, C. and G. Tsilingiridis, 2009: Improved sectoral allocation of NMVOC emissions from solvent use in Greece. *Science of the Total Environment*, 407,4075-4083.
- Slini, T., E. Giama and A.M. Papadopoulos, 2014: The impact of economic recession on domestic energy consumption. *International Journal of Sustainable Energy*, <http://dx.doi.org/10.1080/14786451.2014.882335>
- Spyridaki, A., M. Lazaridis, K. Eleftheriadis, J. Smolik, N. Mihalopoulos, V. Aleksandropoulou. 2006: Modelling and evaluation of size-resolved aerosol characteristics in the Eastern Mediterranean during the SUB-AERO project. *Atmospheric Environment* 40, 6162-6275.
- Svensson Gunilla, 1998: Model simulations of the air quality in Athens, Greece, during the MEDCAPHOT – TRACE CAMPAING. *Atmospheric Environment*, 32, 2239 – 2268.
- Svensson Gunilla and Otto Klemm, 1998: Aircraft measurements and model simulations of the air quality in Athens, Greece. *Atmospheric Environment*, 32, 2269 – 2289.
- Symeonidis, P., I. Ziomas, A. Proyou, 2003: Emissions of air pollutants from the road transport sector in Greece: Year to year variation and present situation. *Environ Technol*, 24, 719-26. <http://dx.doi.org/10.1080/09593330309385608>
- Symeonidis, P., I. Ziomas, A. Proyou, 2004: Development of an emission inventory system from transport in Greece. *Environmental Modelling & Software*, 19,413–421.
- Symeonidis, P., A. Poupkou, A. Gkantou, D. Melas, O. Devrim Yay, E. Pouspourika, D. Balis, 2008: Development of a computational system for estimating biogenic NMVOCs emissions based on GIS technology. *Atmospheric Environment*, 42, 1777-1789.
- Taghavi, M., S. Cautenet, J. Arteta, 2005: Impact of highly detailed emission inventory on modelling accuracy. *Atmos Res*, 74, 65–8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2004.06.007>
- Theodosi, C., G. Grivas, P. Zarnpas, A. Chaloulakou, and N. Mihalopoulos, 2011: Mass and chemical composition of size-segregated aerosols (PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀) over Athens, Greece: local versus regional sources. *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 11895–11911.
- TNO-report B&O-A R 2005/297, LOTOS-EUROS : Documentation. M. Schaap M. Roemer F. Sauter G. Boersen R. Timmermans P.J.H. Builtjes Annex C by A.T. Vermeulen (ECN)
- Tombrou, M., E. Bossioli, A.P. Protonotariou, H. Flocas, C. Giannakopoulos, A. Dandou. 2009: Coupling GEOS-CHEM with a regional air pollution model for Greece. *Atmospheric Environment*, 43, 4793–4804.
- Tsilingiridis, G., 2009: Aircraft air pollutant emissions in greek airports, *Global NEST J*, 11(4), 528-534.
- Tzannatos, E., 2010: Ship emissions and their externalities for the port of Piraeus – Greece. *Atmospheric Environment* 44, 400-407.
- Vardoulakis, S. and P. Kassomenos, 2008: Sources and factors affecting PM₁₀ levels in two European cities: Implications for local air quality management. *Atmospheric Environment*, 42, 3949-3963.
- Varinou, M., G. Kallos, G. Tsilingiridis, G. Sistla, 1999: The role of anthropogenic and biogenic emissions on tropospheric ozone formation over Greece. *Phys. Chem. Earth*, 24 (5), 507-513.

- Viras, L.G., 2002: Comparison of Ozone levels between working days and weekends in Athens, Greece. *Environmental Monitoring and Assessment*, 80, 301-314.
- Visschedijk, A.H.J. and H.A.C. Denier van der Gon, 2005: Gridded European anthropogenic emission data for NO_x, SO₂, NMVOC, NH₃, CO, PM₁₀, PM_{2.5} and CH₄ for the year 2000, TNO B&O-A Rapport 2005/106, 2005.
- Vlachokostas, Ch., Ch. Achillas, N. Moussiopoulos, E. Hourdakakis, G. Tsilingiridis, L. Ntziachristos, G. Baniass, N. Stavrakakis, C. Sidiropoulos, 2009: Decision support system for the evaluation of urban air pollution control options: Application for particulate pollution in Thessaloniki, Greece. *Science of the Total Environment*, 407, 5937- 5948.
- Vrekoussis, M., A. Richter, A. Hilboll, J. P. Burrows, E. Gerasopoulos, J. Lelieveld, L. Barrie, C. Zerefos and N. Mihalopoulos, 2013: Economic crisis detected from space: Air quality observations over Athens/Greece. *Geophysical Research Letters*, 40(2), 458–463.
- WHO, 2005: Effects of air pollution on children's health and development — a review of the evidence, World Health Organization, Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark.
- WHO, 2006a: Air quality guidelines.Global update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide, World Health Organization, Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark.
- WHO, 2006b: Health risks of particulate matter from long-range transboundary air pollution, World Health Organization, Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark.
- WHO, 2007: Health risks of heavy metals from long-range transboundary air pollution, Joint WHO/ Convention Task Force on the Health Aspects of Air Pollution, World Health Organization, Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark.
- WHO, 2008: Health risks of ozone from long-range transboundary air pollution, World Health Organization, Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark.
- WHO, 2013: Review of evidence on health aspects of air pollution — REVIHAAP Project Technical report, World Health Organization, Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark.
- Winiwarter, W., C. Doreb, G. Hayman, D. Vlachogiannis, N. Gounaris, J. Bartzis, S. Ekstrand, M. Tamponi, G. Maffei, 2003: Methods for comparing gridded inventories of atmospheric emissions— application for Milan province, Italy and the Greater Athens Area, Greece. *Sci Total Environ*, 303, 231-43. [http://dx.doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00473-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00473-4)
- Yarwood, G., J. Grant, B. Koo, A.M. Dunker, 2008: Modeling weekday to weekend changes in emissions and ozone in the Los Angeles basin for 1997 and 2010. *Atmospheric Environment*, 42, 3765-3779.
- ΥΠΕΚΑ, 2013: Ετήσια έκθεση Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης. ΥΠΕΚΑ, Γεν. Δ/ση Περιβάλλοντος, Δ/ση ΕΑΡΘ, Τμήμα Ποιότητας Ατμόσφαιρας.
- Ziomas, I.C., P. Suppan, B. Rappengluck, D. Balis, P. Tzoumaka, D. Melas, et al., 1995: A contribution to the study of photochemical smog in the Greater Athens area. *Beitr. Phys. Atmos.* 68, 191–203.
- Ziomas, I. C., 1998a: The Mediterranean campaign of photochemical tracers transport and chemical evolution (MEDCAPHOT- TRACE) – An outline. *Atmospheric Environment*, 32, 2045 – 2053. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 7, 11399- 11428.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ziomas, I, P. Tzoumaka, D. Balis, D. Melas, C. Zerefos, O. Klemm, 1998b: Ozone episodes in Athens, Greece. A modelling approach using data from the MEDCAPHOT-TRACE. *Atmos Environ*,31(12), 2313-21. [http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00414-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00414-7)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΜΗΤΡΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ

Το σύστημα απογραφής εκπομπών που χρησιμοποιήθηκε για το Πλέγμα 1 είναι του έτους 2010 και προέκυψε από τη βάση δεδομένων του EMEP (<http://www.ceip.at/>). Το EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme) είναι ένα ευρωπαϊκό επιστημονικό πρόγραμμα παρακολούθησης και αξιολόγησης της μεταφοράς αέριων ρύπων σε μεγάλες αποστάσεις. Λειτουργεί στο πλαίσιο της Σύμβασης για τη διασυνοριακή ρύπανση της ατμόσφαιρας (CLRTAP - Convention on Long-range Transboundary Air Pollution) με στόχο τη διεθνή συνεργασία για την επίλυση των διασυνοριακών προβλημάτων ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αφορούσαν ετήσιες εκπομπές ανά είδος πηγής και ήταν κατανεμημένα σε πλέγμα χωρικής ανάλυσης 50x50km² (Σχ.Π-1-1). Διανέμονται ελεύθερα από το Κέντρο Απογραφής Εκπομπών και Προβλέψεων (CEIP - Centre on Emission Inventories and Projections) μέσω του WebDab (<http://www.ceip.at/>). Η συγκεκριμένη βάση δεδομένων παρέχει πληροφορίες για τις εκπομπές καθώς και μελλοντικές εκτιμήσεις αυτών για όλα τα κράτη-μέλη της Σύμβασης LRTAP. Τα δεδομένα παρέχονται με τις εξής τέσσερις μορφές:

- Εκπομπές, όπως αυτές κατατίθενται επίσημα από τα μέλη,
- Εκπομπές οι οποίες χρησιμοποιούνται στα μοντέλα του EMEP (στις οποίες έχουν συμπληρωθεί οι τυχόν ελλείψεις σε δεδομένα),
- Πλεγματικές εκπομπές και εκπομπές από μεγάλες σημειακές πηγές πλοταρισμένες πάνω στους χάρτες Google, και
- Επίσημα δεδομένα δραστηριότητας τόπως κατατίθενται από τα μέλη.

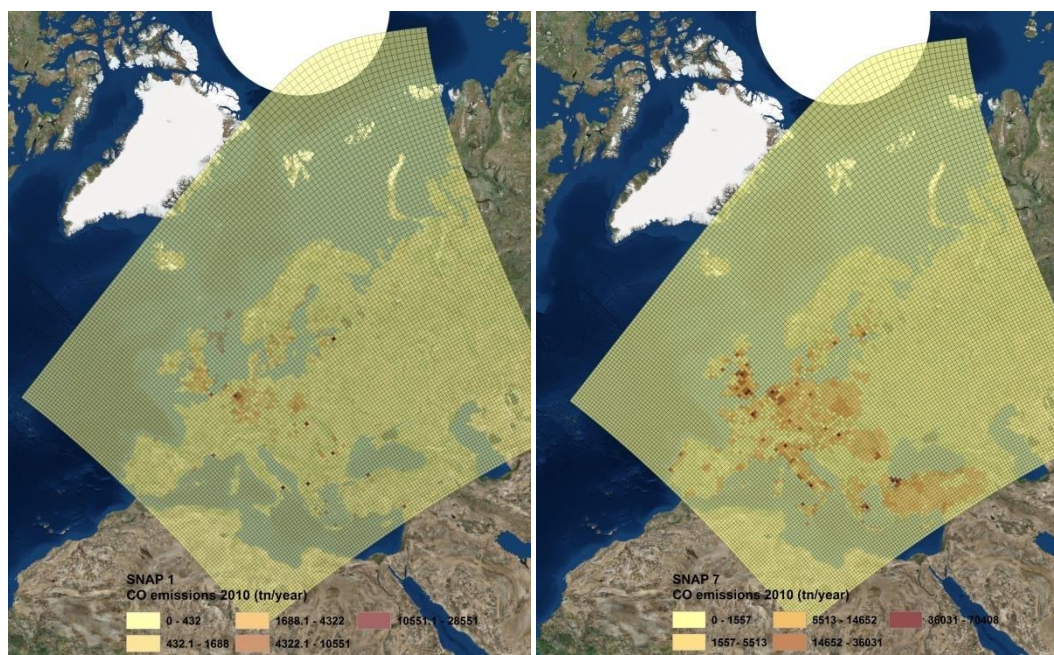
Από τις παραπάνω επιλογές επιλέχθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής οι πλεγματικές εκπομπές οι οποίες αφορούν σε 10 κατηγορίες πηγών όπως αυτές περιγράφονται στον Πίνακα 3-2 και στη διεθνή ναυσιπλοΐα. Το πλέγμα του EMEP περιλαμβάνει κελιά εμβαδού 2500km² (50x50 km²) τα οποία μετατράπηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος ArcView v10 σε κελιά εμβαδού 324 km² (18x18 km²) όπως απαιτούνταν για την διαμόρφωση των εκπομπών του Πλέγματος 1 της προσομοίωσης (Σχ. Π-1-1). Ουσιαστικά ο καταμερισμός των εκπομπών σε κελιά μικρότερου εμβαδού βασίστηκε στο ποσοστό της επιφάνειας που αναλογεί στο κελί μεγέθους 324 km² επί της συνολικής επιφάνειας του κελιού του πλέγματος EMEP. Στο Σχήμα Π-2 παρουσιάζονται οι εκπομπές από δύο είδη πηγών χωρικά κατανεμημένες στο πλέγμα EMEP. Οι εκπομπές CO από την καύση για την παραγωγή ενέργειας είναι υψηλότερες στις περιοχές που βρίσκονται συγκεντρωμένες μεγάλες

μονάδες παραγωγής ενέργειας όπως είναι η Γερμανία, η Μεγάλη Βρετανία και σε περιορισμένες περιοχές των υπολοίπων χωρών. Απ' την άλλη οι εκπομπές από τις οδικές μεταφορές είναι διασκορμισμένες σε όλες τις χώρες με τις μέγιστες τιμές να βρίσκονται κυρίως στα αστικά κέντρα.

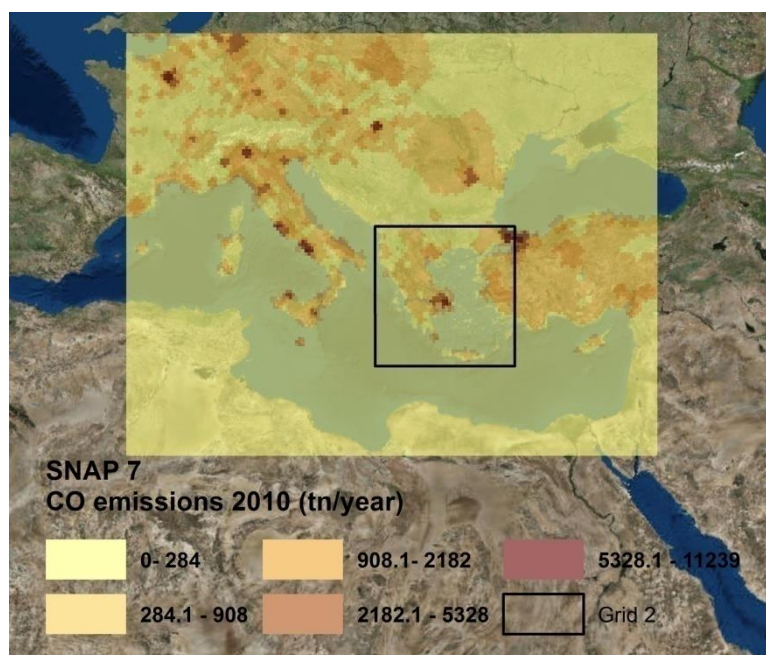
Στο Σχ. Π-3 παρουσιάζονται αντίστοιχα οι εκπομπές CO από τις οδικές μεταφορές οι οποίες είναι χωρικά κατανεμημένες στα κελιά του Πλέγματος 1. Δεν παρατηρείται κάποια διαφοροποίηση στην χωρική κατανομή των εκπομπών σε σύγκριση με το πλέγμα του EMEP. Η αλλαγή της χωρικής ανάλυσης καθρεπτίζεται μόνο στην τιμή του ρύπου ανά κελί.



Σχήμα Π-1-1. Το Πλέγμα EMEP και τα τρία πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση.



Σχήμα Π-1-2. Εκπομπές CO (tonnes) για το έτος 2010 από την καύση για την παραγωγή ενέργειας (SNAP1) και τις οδικές μεταφορές (SNAP7) χωρικά καταναμημένες στο πλέγμα του ΕΜΕΡ.



Σχήμα Π-1-3. Εκπομπές CO (tonnes) για το έτος 2010 από τις οδικές μεταφορές (SNAP7) χωρικά καταναμημένες στο Πλέγμα 1 της προσομοίωσης.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΧΡΟΝΙΚΟΥ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΠΟ ΤΙΣ ΟΔΙΚΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΤΤΙΚΗ

Οι συντελεστές χρονικού διαχωρισμού των εκπομπών για το έτος 2010 για την ΕΠΑ παρουσιάζονται στους επόμενους πίνακες. Οι συγκεκριμένοι συντελεστές προέκυψαν από ωριαία δεδομένα κυκλοφοριακού φόρτου που χορηγήθηκαν από το Κέντρο Διαχείρισης της Κυκλοφορίας στην Αττική για την περίοδο 2006 – 2010. Τα δεδομένα καλύπτουν το κυρίως οδικό δίκτυο του λεκανοπεδίου της Αττικής και περιλαμβάνουν μετρήσεις και των δύο κατευθύνσεων κίνησης. Το γεγονός αυτό υπογραμμίζει την ιδιαιτερότητα των συγκεκριμένων συντελεστών καθώς αυτοί δημιουργήθηκαν με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας των οχημάτων στην περιοχή.

Πίνακας Π-2-1. Μηνιαίοι συντελεστές για το έτος 2010.

Μήνας*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Μηνιαίος συντελεστής	0.083305	0.083928	0.083845	0.082865	0.088883	0.089645	0.085298	0.069467	0.0863	0.083411	0.082391	0.080661

* 1 για τον Ιανουάριο, 2 για τον Φεβρουάριο, κτλ.

Πίνακας Π-2-2. Ημερήσιοι συντελεστές

Μήνας	Ημέρα*	Ημερήσιος συντελεστής	Μήνας	Ημέρα*	Ημερήσιος συντελεστής	Μήνας	Ημέρα*	Ημερήσιος συντελεστής	Μήνας	Ημέρα*	Ημερήσιος συντελεστής
1	1	0.120722	4	1	0.122322	7	1	0.114884	10	1	0.12588
1	2	0.149096	4	2	0.137453	7	2	0.15072	10	2	0.145334
1	3	0.150961	4	3	0.15101	7	3	0.148253	10	3	0.148606
1	4	0.142115	4	4	0.15518	7	4	0.151638	10	4	0.1505

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΧΡΟΝΙΚΟΥ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΠΟ ΤΙΣ ΟΔΙΚΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΤΤΙΚΗ

1	5	0.152316	4	5	0.156609	7	5	0.156424	10	5	0.139055
1	6	0.150065	4	6	0.150697	7	6	0.155034	10	6	0.154805
1	7	0.134725	4	7	0.126729	7	7	0.123046	10	7	0.135821
2	1	0.123364	5	1	0.123541	8	1	0.113072	11	1	0.124443
2	2	0.138458	5	2	0.143147	8	2	0.154391	11	2	0.145455
2	3	0.14741	5	3	0.147833	8	3	0.156807	11	3	0.146566
2	4	0.150088	5	4	0.148072	8	4	0.152032	11	4	0.147138
2	5	0.150973	5	5	0.153409	8	5	0.151419	11	5	0.151091
2	6	0.155675	5	6	0.155469	8	6	0.155608	11	6	0.151467
2	7	0.134033	5	7	0.128529	8	7	0.116672	11	7	0.13384
3	1	0.12523	6	1	0.11987	9	1	0.123097	12	1	0.126283
3	2	0.147417	6	2	0.148051	9	2	0.144286	12	2	0.143944
3	3	0.148505	6	3	0.146876	9	3	0.145228	12	3	0.147975
3	4	0.148304	6	4	0.14915	9	4	0.15075	12	4	0.149993
3	5	0.138989	6	5	0.153781	9	5	0.151569	12	5	0.152361
3	6	0.154019	6	6	0.153332	9	6	0.15358	12	6	0.148899
3	7	0.137535	6	7	0.128939	9	7	0.13149	12	7	0.130545

* 1 για την Κυριακή, 2 is για τη Δευτέρα, κτλ.

Πίνακας Π-2-3. Ωριαίοι συντελεστές (μόνο για τους μήνες Ιανουάριο και Ιούνιο).

Μήνας	Ημέρα	Ωρα(UTC)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	0.030544	0.024664	0.021142	0.019807	0.018372	0.017409	0.021458	0.030716	0.040961	0.050989	0.056742	0.061624
1	2	0.009812	0.007323	0.008069	0.01655	0.038627	0.058280	0.058448	0.054088	0.051748	0.051917	0.052685	0.054370
1	3	0.008178	0.006187	0.007049	0.015654	0.037597	0.058403	0.058366	0.055137	0.053062	0.052903	0.053076	0.054831
1	4	0.010831	0.008453	0.008797	0.015871	0.034095	0.050910	0.050839	0.050267	0.050594	0.052117	0.054561	0.057141
1	5	0.009355	0.006937	0.007584	0.015796	0.036813	0.057087	0.056311	0.054668	0.053736	0.053213	0.052826	0.054040

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΧΡΟΝΙΚΟΥ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΠΟ ΤΙΣ ΟΔΙΚΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΤΤΙΚΗ

1	6	0.017594	0.013461	0.013002	0.019590	0.035838	0.050557	0.049712	0.046992	0.046328	0.048090	0.050846	0.053319
1	7	0.020816	0.017505	0.016396	0.018901	0.023704	0.027475	0.034262	0.041559	0.047740	0.053285	0.055957	0.057187
6	1	0.026251	0.021153	0.020881	0.022353	0.020909	0.026610	0.035062	0.044105	0.050220	0.051445	0.051796	0.048342
6	2	0.007276	0.008181	0.016501	0.040124	0.058499	0.058570	0.054924	0.052361	0.051263	0.051582	0.053015	0.054573
6	3	0.006678	0.007500	0.016210	0.039747	0.058195	0.058476	0.056236	0.053401	0.051923	0.052067	0.053384	0.056603
6	4	0.006763	0.007756	0.015834	0.038797	0.057184	0.058011	0.054917	0.053439	0.051925	0.052169	0.053643	0.055784
6	5	0.007576	0.008309	0.016820	0.040570	0.056989	0.055445	0.052813	0.052433	0.051332	0.051574	0.053219	0.055829
6	6	0.008331	0.009205	0.017048	0.039355	0.056263	0.056336	0.053624	0.052071	0.051414	0.052462	0.052652	0.054922
6	7	0.016877	0.016272	0.020756	0.030231	0.034700	0.040597	0.046099	0.050486	0.053384	0.054125	0.055052	0.054632

Ώρα (UTC)													
Μήνας	Ημέρα	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	1	0.057618	0.051149	0.054139	0.060071	0.062160	0.058051	0.052042	0.054392	0.042819	0.033881	0.041780	0.037469
1	2	0.057500	0.059572	0.058842	0.061020	0.058895	0.053514	0.048669	0.043741	0.032773	0.024793	0.023396	0.015367
1	3	0.058197	0.058185	0.058226	0.060225	0.058420	0.053664	0.051521	0.047760	0.035110	0.026654	0.018800	0.012795
1	4	0.058592	0.058248	0.058356	0.060186	0.059149	0.055615	0.050894	0.048967	0.037230	0.029587	0.022503	0.016201
1	5	0.057411	0.057948	0.057158	0.059676	0.057219	0.053214	0.051803	0.047722	0.035117	0.027373	0.022105	0.014889
1	6	0.053895	0.052747	0.052998	0.05634	0.056447	0.053586	0.052762	0.052009	0.041373	0.033857	0.024667	0.023987
1	7	0.057686	0.055898	0.051944	0.053071	0.053835	0.053520	0.055065	0.054865	0.047651	0.041959	0.032846	0.026871
6	1	0.044919	0.046423	0.051574	0.054943	0.058518	0.057299	0.056102	0.048485	0.044249	0.044108	0.040602	0.033653
6	2	0.056797	0.056642	0.058822	0.056411	0.052191	0.048012	0.044917	0.033351	0.026576	0.030558	0.018547	0.010308
6	3	0.056910	0.056273	0.058423	0.056535	0.053139	0.051578	0.04926	0.033231	0.028119	0.021892	0.015076	0.009145
6	4	0.055449	0.055728	0.057963	0.056676	0.053643	0.050557	0.048199	0.037689	0.030014	0.023543	0.015008	0.009308
6	5	0.055938	0.056675	0.056429	0.054714	0.052915	0.050037	0.049524	0.037920	0.029995	0.025316	0.017328	0.010300
6	6	0.055477	0.054806	0.056239	0.054761	0.051800	0.049441	0.049439	0.037967	0.031678	0.024928	0.018240	0.011543
6	7	0.050507	0.046173	0.046454	0.049885	0.053010	0.054386	0.053918	0.046559	0.042162	0.033737	0.028327	0.021673

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

Σημαντικό στάδιο κατά την πραγματοποίηση αριθμητικών προσομοιώσεων η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου η οποία πραγματοποιείται με τρεις μεθόδους:

- Σύγκριση με αποτελέσματα άλλων μελετών,
- Ποιοτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων (γραφικές παραστάσεις), και
- Ποσοτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων (στατιστικά μεγέθη).

Σύγκριση με αποτελέσματα άλλων μελετών

Σε κάθε χώρα υπάρχει ένα σύνολο περιοχών που συγκεντρώνει το ενδιαφέρον των μελετητών. Αυτές είναι συνήθως τα μεγάλα αστικά κέντρα λόγω της αυξημένης πυκνότητας πληθυσμού και των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, οι βιομηχανικές περιοχές λόγω του επιβαρυσμένου πεδίου εκπομπών αλλά και κάποιες τουριστικές περιοχές οι οποίες μελετώνται για οικονομικούς λόγους. Επομένως, η διαχρονική μελέτη, αριθμητική και πειραματική, των συγκεντρώσεων των ρύπων σε μια περιοχή επιτρέπει μελέτη των παραμέτρων που καθορίζουν την ποιότητα αέρα, τη σύγκριση των αποτελεσμάτων καθώς και τη μελέτη των μεταβολών στην ποιότητα του αέρα.

Ποιοτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Η ποιοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών επιτυγχάνεται με τη δημιουργία γραφικών παραστάσεων των συγκεντρώσεων των ρύπων που προκύπτουν από την αριθμητική προσομοίωση και των τιμών που προκύπτουν από σταθμούς μέτρησης της ποιότητας του αέρα. Σύμφωνα με την Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (EPA, 1991) για τον ποιοτικό έλεγχο πρέπει να παρουσιάζονται οπωσδήποτε γραφήματα χωρικής κατανομής των συγκεντρώσεων του μοντέλου, χρονικής διακύμανσης και διασποράς (scatter plots) των μετρούμενων και υπολογιζόμενων από το μοντέλο συγκεντρώσεων. Πιο συγκεκριμένα, τα γραφήματα χωρικής κατανομής αποτυπώνουν την κατανομή των συγκεντρώσεων μια συγκεκριμένη ώρα παρέχοντας πληροφορίες σχετικά με την τοποθεσία των πιο επιβαρυσμένων περιοχών και το μέγεθος αυτής της επιβάρυνσης. Τα γραφήματα χρονικής διακύμανσης πρέπει να δημιουργούνται για κάθε σταθμό ξεχωριστά και να αφορούν στις ωριαίες τιμές όταν αυτό είναι δυνατόν. Η χρήση τους βοηθάει στον έλεγχο της ικανότητας του μοντέλου να αναπαράγει τις μέγιστες συγκεντρώσεις των ρύπων που έχουν καταγραφεί από τους σταθμούς μέτρησης και τον ημερήσιο κύκλο του

εκάστοτε ρύπου. Τα γραφήματα διασποράς απεικονίζουν την έκταση του συστηματικού σφάλματος στο σύνολο των ωριαίων ζευγαριών μετρήσεων-αριθμητικών προβλέψεων. Η διασπορά των σημείων σ' ένα τέτοιο διάγραμμα αποτελεί μέτρο των σφαλμάτων κατά την προσομοίωση.

Ποσοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων

Προκειμένου να αναλυθούν ποσοτικά τα αποτελέσματα του μοντέλου χρησιμοποιούνται στατιστικά μεγέθη όπως είναι ο συντελεστής συσχέτισης (correlation coefficient- r), το συστηματικό σφάλμα (bias), η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error-RMSE), το κανονικοποιημένο μέσο απόλυτο σφάλμα (Normalized Mean Error-NME), το κανονικοποιημένο μέσο συστηματικό σφάλμα (Normalized Mean Bias-NMB), το μέσο κανονικοποιημένο συστηματικό σφάλμα (Mean Normalized Bias Error-MNBE) και το μέσο κανονικοποιημένο απόλυτο ακαθάριστο σφάλμα (Mean Normalized Gross Error-MNGE). Παρακάτω δίνεται μια σύντομη περιγραφή των στατιστικών μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή για την αξιολόγηση του μετεωρολογικού μοντέλου MM5 και του φωτοχημικού μοντέλου CAMx. Στις εξισώσεις που δίνονται με O_i συμβολίζεται η i παρατήρηση (observation) δηλαδή η συγκέντρωση του ρύπου που μετρήθηκε από το σταθμό τη χρονική στιγμή t , S_i είναι η i συγκέντρωση που προέκυψε από την αριθμητική προσομοίωση τη χρονική στιγμή t και N είναι το πλήθος του ζεύγους τιμών.

Διαφορά μεταξύ παρατηρήσεων και αποτελεσμάτων του μοντέλου

1. Συντελεστής συσχέτισης (correlation coefficient- r)

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2}}$$

Ο συντελεστής συσχέτισης αποτελεί μέτρο της σχέσης μεταξύ των παρατηρήσεων και των συγκεντρώσεων του μοντέλου. Τιμές κοντά στη μονάδα (± 1) υποδηλώνουν καλή απόδοση του μοντέλου ενώ η μηδενική τιμή υποδηλώνει μη συσχέτιση των δύο μεγεθών.

2. Συστηματικό σφάλμα (Mean Bias-MB)

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

Το συστηματικό σφάλμα δείχνει την διαφορά μεταξύ των παρατηρήσεων και των συγκεντρώσεων του μοντέλου δηλαδή την υπερεκτίμηση ($MB>0$) από το μοντέλο των αναμενόμενων συγκεντρώσεων (παρατηρήσεων) ή την υποεκτίμηση ($MB<0$) αυτών.

3. Τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (*Root Mean Square Error-RMSE*)

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

Η Τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος αντιπροσωπεύει την τυπική απόκλιση των διαφορών μεταξύ των παρατηρήσεων και των αποτελεσμάτων του μοντέλου. Παίρνει τιμές ≥ 0 με το μηδέν να αποτελεί την πιο ικανοποιητική τιμή όσον αφορά στην απόδοση του μοντέλου.

Σχετικές διαφορές κανονικοποιημένες ως προς την παρατηρούμενη τιμή

4. Κανονικοποιημένο μέσο απόλυτο σφάλμα (*Normalized Mean Error-NME*)

$$NME = \frac{\sum_{i=1}^N |S_i - O_i|}{\sum_{i=1}^N O_i}$$

5. Κανονικοποιημένο μέσο συστηματικό σφάλμα (*Normalized Mean Bias-NMB*)

$$NME = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N O_i}$$

6. Μέσο κανονικοποιημένο συστηματικό σφάλμα (*Mean Normalized Bias Error-MNBE*)

$$MNBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{S_i - O_i}{O_i}$$

7. Μέσο κανονικοποιημένο απόλυτο ακαθάριστο σφάλμα (*Mean Normalized Gross Error-MNGE*)

$$MNGE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|S_i - O_i|}{O_i}$$

Συντομογραφίες

CAMx	Comprehensive Air Quality Model with extensions
EEA	European Environmental Agency
EFGS	European Forum for GeoStatistics
EMEP	European Monitoring and Evaluation Programme
HDV	Heavy Duty Vehicles
ICAO	International Civil Aviation Organization
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LAU2	Local Administrative Units level 2
LCV	Light Commercial Vehicles
LPG	Liquid Petroleum Gas
LRTAP	Long-Range Transboundary Air Pollution
MM5	Mesoscale Model version 5
NMVOC	Non-Methane Volatile Organic Compounds
OSM	OpenStreetMap
PAHs	Polycyclic Aromatic Hydrocarbons
PCs	Passenger Cars
PM	Particulate Matter
RMSE	Root Mean Square Error
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
WHO	World Health Organisation
ΕΔΠΑΡ	Εθνικό Δίκτυο για την Παρακολούθηση της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης
ΕΛ.ΣΤΑΤ.	Ελληνική Στατιστική Υπηρεσία
Ε.Π.Α.	Ευρύτερη Περιοχή των Αθηνών
Ι.ΜΕΤ.	Ελληνικό Ινστιτούτο Μεταφορών
ΚΔΚ	Κέντρου Διαχείρισης Κυκλοφορίας
ΜΜΜ	Μέσα Μαζικής Μεταφοράς
Υ.Π.Ε.Κ.Α.	Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής
ΦΧΜ	Φωτοχημικά μοντέλα



Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος ΙΙ . Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.