



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ: ΕΛΕΓΧΟΣ
ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΒΙΚΤΩΡΙΑ Γ. ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΠΟΥΛΟΥ
Μηχ. Περιβάλλοντος, Msc

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΝΟΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ
ΤΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ ΣΕ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΑ
ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΚΑΙ ΤΩΝ ΕΠΠΤΩΣΕΩΝ
ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΧΑΝΙΑ 2010

ΒΙΚΤΩΡΙΑΣ Γ. ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΠΟΥΛΟΥ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΝΟΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ ΣΕ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΑ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΚΑΙ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Υποβλήθηκε στο Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών Έλεγχος Ποιότητας και Διαχείριση Περιβάλλοντος

Εκπονήθηκε στο τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Τομέας Σχεδιασμού και Ανάπτυξης Περιβαλλοντικών Διεργασιών, Εργαστήριο Ατμοσφαιρικών Αιωρούμενων Σωματιδίων

Ημερομηνία Προφορικής εξέτασης: 24/9/2010

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Μ. Λαζαρίδης, Αναπλ. Καθηγητής του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης (Επιβλέπων)

Χ. Χουσιάδας, Ερευνητής Α στο Ινστιτούτο Πυρηνικής Τεχνολογίας - Ακτινοπροστασίας, ΕΚΕΦΕ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ (Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής)

Ν. Καλογεράκης, Καθηγητής του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης (Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής)

Γ. Καρατζάς, Καθηγητής του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης

Δ. Μαντζαβίνος, Καθηγητής του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης

Ε. Κατσίβελα, Αναπλ. Καθηγήτρια του τμήματος Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης

Ε. Διαμαντόπουλος, Καθηγητής του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάπτυξη μοντέλων έκθεσης και δόσης ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων μέσω εισπνοής αποτελεί σημαντικό βήμα στην κατανόηση των σχέσεων έκθεσης-δόσης-απόκρισης και βοηθά στην εκτίμηση των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία από την εισπνοή διάφορων τοξικών συστατικών μετά από έκθεση σε οικιακό ή εργασιακό περιβάλλον. Ο περιορισμός των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία από έκθεση σε ατμοσφαιρικά αιωρούμενα σωματίδια απαιτεί την διαμόρφωση κατάλληλων στρατηγικών διαχείρισης της αέριας ρύπανσης που εξετάζουν ολοκληρωμένα την πορεία των σωματιδίων από την εκπομπή τους στην πηγή, την μεταφορά και μετατροπή τους στην ατμόσφαιρα, τη συσσώρευση τους στο περιβάλλον και την επαφή (έκθεση) και λήψη (δόση) τους από το ανθρώπινο σώμα. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε το ολοκληρωμένο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων STEDOM (Sources Transport Exposure DOse Model) που αντιμετωπίζει ολοκληρωμένα το πρόβλημα της διαχείρισης της ποιότητας του αέρα. Το σύστημα επικεντρώνεται στην εκτίμηση της έκθεσης και δόσης αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα κάτω από διάφορες συνθήκες (μονάδα λογισμικού ExDoM; σενάρια δραστηριότητας και έκθεσης ατόμου, απλό μικροπεριβαλλοντικό μοντέλο σταθερής κατάστασης, ανάλυση αποδεκτών, και τροποποιημένο το μοντέλο HRTM της ICRP) και επιπλέον περιλαμβάνει εργαλεία για τον υπολογισμό των εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων και αερίων ρύπων στην ατμόσφαιρα καθώς και την χωρική, χρονική και χημική τους διάκριση (μονάδα λογισμικού Sources; ανθρωπογενείς και φυσικές πηγές), και την μεταφορά/μετατροπή και συσσώρευση τους στο περιβάλλον (μονάδα λογισμικού Transport συνδεδεμένη με το μοντέλο ISC3LT της Αμερικανικής Υπηρεσίας Περιβάλλοντος). Τα παραπάνω τμήματα του συστήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανεξάρτητα (αυτόνομη χρήση) ή διαδοχικά και συνδέονται από γεωγραφικό περιβάλλον χρήστη που περιλαμβάνει λειτουργίες γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (vb.NET, MapObjects της ESRI). Στην εργασία παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθείται στο σύστημα, αξιολογούνται τα αποτελέσματα του και η χρήση του διερευνάται μέσα από εφαρμογές. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τρεις εφαρμογές του συστήματος, μέσα από τις οποίες εξετάζεται η επίδραση των πηγών εσωτερικών και εξωτερικών χώρων, των φυσικών και χημικών χαρακτηριστικών των αιωρούμενων σωματιδίων και της φυσιολογίας του εκτεθειμένου ατόμου στην έκθεση, δόση και απομάκρυνση τους από το ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα καθώς και στη σχέση ατμοσφαιρικής, εξωτερικής, εσωτερικής και ατομικής έκθεσης. Αναλυτικότερα, παρουσιάζεται εφαρμογή της μονάδας Sources του συστήματος στην εκτίμηση των εκπομπών από φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές στην ευρύτερη περιοχή Αθηνών και η μονάδα ExDoM του μοντέλου χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της επίδρασης των μετεωρολογικών συνθηκών, της διείσδυσης του εξωτερικού αέρα στον εσωτερικό χώρο, των πηγών εσωτερικών και εξωτερικών χώρων, των φυσικών (διαστάσεις, κατανομή μεγέθους) και χημικών (σύσταση, προέλευση) χαρακτηριστικών των σωματιδίων, και της φυσιολογίας στην έκθεση και δόση αιωρούμενων σωματιδίων και συστατικών τους στο αναπνευστικό σύστημα ατόμου εκτεθειμένου στις συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων που μετρήθηκαν σε δύο κατοικίες στο Όσλο Νορβηγίας και στην περιοχή του Πολυτεχνείου Κρήτης (μετρήσεις σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους του ιδρύματος και σε σπίτι που βρίσκεται στην περιοχή περιμετρικά του). Βρέθηκε πως το μοντέλο ExDoM μπορεί να προσομοιώσει με επιτυχία τους μηχανισμούς που επιδρούν στην εναπόθεση και συσσώρευση σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα και συνολικά το μοντέλο STEDOM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των πηγών ρύπανσης σε μια περιοχή και τον υπολογισμό της έκθεσης και δόσης ενός ατόμου που δραστηριοποιείται σε αυτή. Επιπρόσθετα τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου στην ευρύτερη περιοχή Αθηνών έδειξαν πως το μεγαλύτερο μέρος των εισπνεύσιμων αιωρούμενων σωματιδίων εκπέμπονται από φυσική πηγή, συγκεκριμένα από το έδαφος εξαιτίας του ανέμου, ενώ η σημαντικότερη πηγή αναπνεύσιμων σωματιδίων κατά μια χειμερινή ημέρα ήταν η κεντρική θέρμανση. Επιπλέον από τις εφαρμογές του ExDoM στο Όσλο και στην ευρύτερη περιοχή του Πολυτεχνείου Κρήτης βρέθηκε πως η είσοδος του εξωτερικού αέρα σε εσωτερικούς χώρους αποτελεί σημαντική πηγή ρύπανσης ενώ η επίδραση των

δραστηριοτήτων/πηγών σε εσωτερικούς χώρους στην συγκέντρωση μάζας και αριθμού αιωρούμενων σωματιδίων εξαρτάται από τον εξαερισμό, την κατασκευή, σχεδίαση και τοποθεσία της κατοικίας και την εποχή. Οι πηγές σε εσωτερικούς χώρους μπορούν να αυξήσουν σημαντικά τις συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων και σε συνδυασμό με την αυξημένη φυσική δραστηριότητα του εκτεθειμένου ατόμου να έχουν ως αποτέλεσμα υψηλή δόση στο αναπνευστικό του σύστημα. Τα σωματίδια που παράγονται από πηγές στον εσωτερικό χώρο έχουν διαφορετικό μέγεθος από τα σωματίδια στον εξωτερικό χώρο και έτσι διεισδύουν με διαφορετικό τρόπο στο αναπνευστικό σύστημα. Ακόμα βρέθηκε πως η δόση σωματιδίων στην κυψελιδική περιοχή των πνευμόνων στην περιοχή του Όσλο κατά τις μελετώμενες περιόδους αποτελούταν κυρίως από οργανικό υλικό (ανθρωπογενή και δευτερογενώς παραγόμενα οργανικά σωματίδια), ενώ τα σωματίδια που πηγάζουν από φυσικές πηγές (έδαφος και θαλάσσια αεροζόλ) αποτέθηκαν κυρίως στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η χρήση τιμών ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης σωματιδίων από σταθερούς σταθμούς μέτρησης ποιότητας αέρα ως αντιπροσωπευτικές για την έκθεση ενός ατόμου σε εξωτερικά και εσωτερικά περιβάλλοντα μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένη εκτίμηση της δόσης στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη τη διακύμανση των συγκεντρώσεων έκθεσης σε εσωτερικά και εξωτερικά περιβάλλοντα και την διαφοροποίηση στην ημερήσια δραστηριότητα μεταξύ ατόμων, η χρήση μέσων ημερήσιων τιμών συγκέντρωσης επαρκεί για την εκτίμηση της δόσης και επικινδυνότητας των αιωρούμενων σωματιδίων.

ABSTRACT

The development of inhalation exposure and dose models is an important step in understanding exposure – dose – response relationships for ambient particulate matter and can certainly help in assessing human health effects from inhalation of different toxicants in occupational and residential environments. Limiting health effects from exposure to particulate matter requires the development of air pollution mitigation strategies which take into account the chain of events, from release of particles from pollution sources, atmospheric transport, dispersion and transformation, over accumulation in the environment and contact (exposure) and uptake (dose) from the human body. In the current thesis the simple and user friendly integrated decision support tool for air quality management STEDOM (Sources Transport Exposure DOse Model) was developed. The tool focus is on particulate matter exposure and dose modelling under variant conditions (ExDoM; exposure scenarios, simple steady state microenvironmental model, source apportionment and modified the HRTM model of ICRP) and also includes independent modules for emission estimation, spatial temporal and chemical disaggregation (Sources; anthropogenic and natural emissions) and for dispersion (Transport; incorporates the US EPA ISC3LT model) all combined under a graphical user interface with GIS capabilities (vb.NET and MapObjects by ESRI). The methodology used in the model is presented along with the validation of its results, and its performance is investigated through specific applications. Specifically, the model is used in three case studies in order to examine the effect of indoor and outdoor sources, physical and chemical characteristics of particles and exposed subject characteristics to the exposure, dose and clearance of particles from the human respiratory tract, and also to the relationship between ambient, outdoor, indoor and personal exposure. In particular, the Sources module is applied for the greater area of Athens and the ExDoM module is used for the evaluation of the effects of meteorological conditions, outdoor air infiltration indoors, indoor and outdoor sources, physical (size distribution) and chemical (composition and origin) characteristics of particles and exposed subject characteristics to the exposure and dose of particles and their compounds, delivered to the lungs of a person exposed to measured aerosol concentrations at two residential areas of Oslo, Norway, and at the region of the Technical University of Crete (measurements at the university and at a house located nearby). The results indicate that the module ExDOM can simulate successfully the mechanisms involved in deposition and clearance of particles from the human respiratory tract and overall that STEDOM can be used for the determination of pollution sources at an area and the estimation of exposure and dose of a person active at that area. Additionally, the results of the model application for the greater area of Athens showed that the majority of inhalable particles are of natural origin, specifically from the resuspension of dust by wind erosion. However the main source of respirable particles during a winter day was central heating. Also from the results of the applications of ExDoM module it can be concluded that the infiltration of outdoor air indoors is an important source of indoor particulate matter and that the effect of indoor sources/activities on indoor concentrations is modulated by the air exchange rate, the house structure, design and location and the season. Indoor sources increase indoor concentrations which together with the increased activity of the exposed subject can lead to significant dose to the respiratory tract. Indoor generated particles have different size distributions than the outdoor, and therefore penetrate differently the human respiratory tract. The dose of particles reaching the alveolar region of the lungs at the Oslo metropolitan area was mainly composed by organic material (anthropogenic and secondary organic aerosols) whereas crustal and marine particles originating from natural sources were deposited in the upper respiratory tract. The results indicate that considering the ambient concentration of particles as representative to the exposure of an individual in indoor and outdoor environments may result in inaccurate estimation of the actual dose. In addition, considering the variability in activity patterns of individuals and the fluctuations in exposure concentrations related to these activities especially in the indoor environment, the use of day averaged values of concentrations is sufficient in dose and risk assessments.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ατμοσφαιρικών Αιωρούμενων Σωματιδίων του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης κάτω από την καθοδήγηση και επίβλεψη του Αναπληρωτή καθηγητή κ. Λαζαρίδη Μιχαήλ. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω θερμά για την υποστήριξη του σε επιστημονικό και φιλικό επίπεδο, για την οικονομική υποστήριξη κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση και κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Ακόμα, ευχαριστώ το τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος για την παροχή υλικοτεχνικής υποδομής καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Επιπλέον, ευχαριστώ την επιτροπή ερευνών του Πολυτεχνείου Κρήτης που υποστήριξε με το πρόγραμμα Βασική έρευνα 2006 την ανάπτυξη του μοντέλου δόσης αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα.

Ευχαριστώ επίσης, τα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής Ερευνητή Α κ. Χουσιάδα Χρήστο και Καθηγητή κ. Καλογεράκη Νικόλαο για τις παρατηρήσεις τους κατά την περίοδο εκπόνησης της εργασίας και συγγραφής των δημοσιεύσεων. Ευχαριστώ τα μέλη της κριτικής επιτροπής για τις χρήσιμες παρατηρήσεις και προτάσεις τους όσον αφορά στο κείμενο της διατριβής. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα το μέλος της κριτικής επιτροπής Αναπληρώτρια καθηγήτρια κ. Κατσιβελα Ελευθερία για τις εύστοχες παρατηρήσεις της και την βοήθεια της στα πλαίσια της συνεργασίας μας για την δημοσίευση αποτελεσμάτων της εργασίας.

Θα ήθελα επιπρόσθετα, να ευχαριστήσω τον Ερευνητή Α κ. Ελευθεριάδη Κωνσταντίνο, από το Εργαστήριο Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος του Ινστιτούτου Πυρηνικής Τεχνολογίας & Ακτινοπροστασίας του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος, για τις χρήσιμες συμβουλές του όσον αφορά στη χημική σύσταση των σωματιδίων και για τις παρατηρήσεις του στη συγγραφή της αντίστοιχης δημοσίευσης. Επιπλέον ευχαριστώ τους κ. Σφέτσο Αθανάσιο και κ. Γούναρη Νικόλαο, από το Εργαστήριο Περιβαλλοντικών Ερευνών του Ινστιτούτου Πυρηνικής Τεχνολογίας & Ακτινοπροστασίας του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος, τον πρώτο για την παροχή των μετεωρολογικών στοιχείων από το μοντέλο MM5 που χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό των φυσικών εκπομπών και τον έλεγχο των αποτελεσμάτων για τις εκπομπές στην Ευρύτερη Περιοχή Αθηνών, και τον δεύτερο για τις χρήσιμες συμβουλές του σε θέματα γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών.

Επιπλέον, ευχαριστώ θερμά την κ. Σπυριδάκη Αθηνά για την βοήθεια της στην εύρεση των κατάλληλων συντελεστών χρονικής διακύμανσης των εκπομπών και χημικής διάκρισης των ανθρωπογενών εκπομπών ΠΟΕ, την εξέταση της εγκυρότητας των εκπομπών και την φιλία της. Ευχαριστώ την κ. Dzumbona Lucie για τον λεπτομερή οδηγό σταθμικών μετρήσεων με την χρήση του προσκρουστή Andersen και τον κ. Ondracek Jacub για την παροχή πληροφοριών σχετικά με την αξιοπιστία των οργάνων μέτρησης συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων του εργαστηρίου Ατμοσφαιρικών Αιωρούμενων Σωματιδίων. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κ. Γλυτσό Θεόδωρο, κ. Κοπανάκη Ηλία και κ. Σωφρονιάδη Σωφρόνιο για τη βοήθεια τους κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στην περιοχή του Πολυτεχνείου και για την φιλία τους. Ευχαριστώ τον κ. Γλυτσό Θεόδωρο επιπλέον για την παροχή στοιχείων σχετικά με την αριθμητική συγκέντρωση σωματιδίων από συγκεκριμένες πηγές (μοντελοποίηση των πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στην κατοικία στο προάστιο του Όσλο κατά την θερινή περίοδο). Ιδιαίτερα, ευχαριστώ την ομάδα ερευνητών του Νορβηγικού Ινστιτούτου Ατμοσφαιρικών Ερευνών, που πραγματοποίησε τις μετρήσεις στο Όσλο, Νορβηγίας, στα πλαίσια του προγράμματος Urban-Aerosol.

Ευχαριστώ όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Ατμοσφαιρικών Αιωρούμενων Σωματιδίων για την βοήθεια και συνεργασία τους. Θα ήθελα τέλος να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την υπομονή και την αγάπη της κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Χανιά, Σεπτέμβριος 2010

Βικτωρία Αλεξανδροπούλου

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η διδακτορική διατριβή οδήγησε στη δημοσίευση 4 άρθρων σε 4 επιστημονικά περιοδικά, ενώ επιπλέον δύο άρθρα βρίσκονται στο στάδιο αναθεώρησης, και ένα βρίσκεται υπό προετοιμασία. Τα άρθρα αυτά είναι:

M. Lazaridis, V. Aleksandropoulou, J. Smolík, J.E. Hansen, T. Glytsos, N. Kalogerakis and E. Dahlin. Physico-chemical characterisation of indoor/outdoor particulate matter in two residential houses in Oslo, Norway: Measurements overview and physical properties – URBAN-AEROSOL Project. *Indoor Air* 16, 282-295 (2006).

M. Lazaridis, V. Aleksandropoulou, J.E. Hanssen, C. Dye, K. Eleftheriadis and E. Katsivela. Inorganic and carbonaceous components in indoor/outdoor particulate matter in two residential houses in Oslo, Norway. *Journal of the Air & Waste Management Association* 58 (3), 346-356 (2008).

V. Aleksandropoulou, C. Mitsakou, C. Housiadis, and M. Lazaridis. Particulate Matter Exposure and Dose Relationships Derived from Realistic Exposure Scenarios. *Indoor and Built Environment* 17, 237-246 (2008).

M. Lazaridis and V. Aleksandropoulou. Sources and variability of indoor and outdoor gaseous aerosol precursors (O₃, NO_x and VOCs). *Water Air & Soil Pollution Focus* 9 (1-2), 3-13 (2009).

V. Aleksandropoulou, K. Tørseth and M. Lazaridis. Atmospheric emission inventory for natural and anthropogenic sources and spatial emission mapping for the Greater Athens Area (GAA). *Water Air & Soil Pollution* (έχει γίνει δεκτό από τους κριτές με μικρές αλλαγές).

V. Aleksandropoulou and M. Lazaridis. Development and application of a model (ExDoM) for calculating the respiratory tract dose and retention of particles under variable exposure conditions. *Air Quality, Atmosphere & Health* (έχει γίνει δεκτό από τους κριτές με μικρές αλλαγές).

V. Aleksandropoulou, T. Glytsos and M. Lazaridis. Contribution from indoor sources and outdoor air infiltration to particle number concentration and lung dose indoors (υπό προετοιμασία).

Επιπλέον μέρος της εργασίας δημοσιεύεται στο κεφάλαιο Έκθεση των ανθρώπων σε αέριους ρύπους εσωτερικών χώρων που περιλαμβάνεται στο βιβλίο Μ. Λαζαρίδης (2008). Ποιότητα αέρα σε εσωτερικούς χώρους. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.

Άλλες δημοσιεύσεις των αποτελεσμάτων της διδακτορικής διατριβής σε πρακτικά συνεδρίων με κρίση της περίληψης ή/και του άρθρου καθώς και δημοσιεύσεις σχετιζόμενες έμμεσα με τη διδακτορική διατριβή (χρήση τμημάτων του μοντέλου) δίνονται στο τέλος της εργασίας.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ ΚΑΙ ΕΠΕΞΗΓΗΣΕΩΝ

ΑΑΣ: Ανθρώπινο Αναπνευστικό Σύστημα

ΑΒΠΟΕ: Άλλες Βιογενείς Πτητικές Οργανικές Ενώσεις; οργανικές ενώσεις βιογενούς προέλευσης, εκτός από το ισοπρένιο και τα μονοτερπένια

ΑΣ: Αιωρούμενα Σωματίδια

ΑΣ₁₀: τα σωματίδια που διέρχονται διά στομίου κατά μέγεθος διαλογής, όπως ορίζεται στη μέθοδο αναφοράς για τη δειγματοληψία και μέτρηση ΑΣ₁₀ (EN 12341), με αποτελεσματικότητα 50 % ως προς τη συγκράτηση των σωματιδίων αεροδυναμικής διαμέτρου 10 μm

ΑΣ_{2,5}: τα σωματίδια που διέρχονται διά στομίου κατά μέγεθος διαλογής, όπως ορίζεται στη μέθοδο αναφοράς για τη δειγματοληψία και μέτρηση ΑΣ_{2,5} (EN 14907), με αποτελεσματικότητα 50 % ως προς τη συγκράτηση των σωματιδίων αεροδυναμικής διαμέτρου 2,5 μm

ΕΠΑ: Ευρύτερη Περιοχή Αθηνών

ΚΘ: Θερινή περίοδος μετρήσεων στην κατοικία στο Κέντρο του Όσλο, Νορβηγίας

ΚΧ: Χειμερινή περίοδος μετρήσεων στην κατοικία στο Κέντρο του Όσλο, Νορβηγίας

ΠΘ: Θερινή περίοδος μετρήσεων στην κατοικία στο Προάστιο του Όσλο, Νορβηγίας

ΠΟΕ : Πτητικές Οργανικές Ενώσεις; οργανικές ενώσεις ανθρωπογενούς και βιογενούς προέλευσης, εκτός από το μεθάνιο, που είναι ικανές να παράγουν φωτοχημικά οξειδωτικά μέσω αντιδράσεων με οξείδια του αζώτου παρουσία ηλιακού φωτός

ΠΧ: Χειμερινή περίοδος μετρήσεων στην κατοικία στο Προάστιο του Όσλο, Νορβηγίας

ACS: American Cancer Society; Αμερικανική Κοινότητα για τον Καρκίνο

AI: Alveolar-Interstitial region; Κυψελιδική περιοχή των πνευμόνων

AIRQUIS: Air Quality Information System; Σύστημα Πληροφοριών Ποιότητας Αέρα του Νορβηγικού Ινστιτούτου Ατμοσφαιρικών Ερευνών

APCS: Absolute Principal Component Scores; Μέθοδος ανάλυσης σε κύριες συνιστώσες (Thurston και Spengler, 1985)

APEX: Air Pollution Exposure model; Μοντέλο έκθεσης σε ατμοσφαιρικούς ρύπους της US EPA (2008)

APHEA: Air Pollution and Health: A European Approach; Μελέτη έκθεσης του πληθυσμού σε ατμοσφαιρικούς ρύπους στην Ευρώπη

APS: Aerodynamic Particle Sizer; Αναλυτής αεροδυναμικής κινητικότητας

ASPEN: Assessment System for Population Exposure Nationwide; Μοντέλο έκθεσης της US EPA (2000)

BB: Bronchial region; Περιοχή βρόγχων των πνευμόνων

bb: Bronchiolar region; Περιοχή βρογχιολίων των πνευμόνων

CBM-IV: Carbon- Bond Mechanism-IV; Μηχανισμός που χρησιμοποιείται από φωτοχημικά μοντέλα ποιότητας αέρα για την περιγραφή και προσομοίωση των χημικών μηχανισμών στην ατμόσφαιρα

CHAD: Consolidated Human Activity Database; βάση δεδομένων που περιλαμβάνει τα στοιχεία δραστηριότητας του πληθυσμού όπως καταγράφηκαν από αρκετές αμερικανικές μελέτες (McCurdy κ.α., 2000)

CDF: Computational Fluid Dynamics; Υπολογιστική Ρευστομηχανική

CEIP: Centre on Emission Inventories and Projections; Κέντρο Απογραφών Εκπομπών και Προβολών

CLC2000: CORINE Land Cover 2000; Εδαφοκάλυψη βάσει καταλόγου Corine (EEA CLC2000, 2009)

CMB: Chemical Mass Balance; κατηγορία μοντέλων χημικής ισορροπίας που χρησιμοποιείται στην ανάλυση αποδεκτών

CO: Carbon Monoxide; Μονοξείδιο του άνθρακα

COPD: Chronic obstructive pulmonary disease; Χρόνια αποφρακτική πνευμονοπάθεια

CORINAIR: Core Inventory of Air Emissions; Απογραφή εκπομπών ρύπων στην ατμόσφαιρα

CRF: Common Reporting Format; κατηγοριοποίηση πηγών ρύπων στην ατμόσφαιρα που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία μητρώων εκπομπών στα πλαίσια του προγράμματος UNFCCC

DL: Detection Limit; Όριο ανίχνευσης

DORIAN: Dose Response Information Analysis System; Σύστημα για τον προσδιορισμό των επιπτώσεων της έκθεσης σε ρύπους στην υγεία (Georgopoulos, 2006)

EC: Elemental Carbon; Στοιχειακός Άνθρακας

EEA: European Environment Agency; Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος

EFFIS: European Forest Fire Information System; Ευρωπαϊκό Σύστημα Πληροφόρησης για τις δασικές πυρκαγιές

EMEP/CLRTAP: European Monitoring and Evaluation Programme/Convention on Long-range Transboundary Air Pollution; Πρόγραμμα συνεργασίας για τη συνεχή παρακολούθηση και την εκτίμηση της μεταφοράς των ατμοσφαιρικών ρύπων σε μεγάλη απόσταση στην Ευρώπη

EMY: Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία

EPER: European Pollutant Emission Register; Ευρωπαϊκό μητρώο ρυπογόνων εκπομπών (EPER, 2008)

E-PRTR ή E-MEMP: European Pollutant Release and Transfer Register; Ευρωπαϊκό Μητρώο Έκλυσης και Μεταφοράς Ρύπων (E-PRTR, 2009)

ERV: Expiratory Reverse Volume; Εκπνευστικός όγκος αέρα

ET: Extra Thoracic region; Εκτός θώρακα περιοχή

ET1: Extra Thoracic region 1; Εκτός θώρακα περιοχή 1. Περιλαμβάνει την πρόσθια ρινική κοιλότητα.

ET2: Extra Thoracic region 2; Εκτός θώρακα περιοχή 2 Περιλαμβάνει την ύστερη ρινική κοιλότητα, τον λάρυγγα, το φάρυγγα και το στόμα.

ETC/ACC: European Topic Centre on Air and Climate Change; Ευρωπαϊκό Θεματικό Κέντρο για την ατμόσφαιρα και την αλλαγή του κλίματος

ExDoM: Exposure Dose Model; το μοντέλο έκθεσης και δόσης ΑΣ που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής

EXPOLIS: Air Pollution Exposure Distributions within Adult Urban Populations in Europe study; Μελέτη της έκθεσης ενηλίκων σε ατμοσφαιρικούς ρύπους σε αστικές περιοχές της Ευρώπης που πραγματοποιήθηκε την περίοδο 1996-2000 σε 7 πόλεις (Jantunen κ.α., 1998)

F: Fast; ταχεία απορρόφηση στο αίμα

FRC: Functional Residual Capacity; υπόλοιπη λειτουργική χωρητικότητα των πνευμόνων

gel: ταχέως κινούμενο στρώμα βλέννας που καλύπτει τις βλεφαρίδες του επιθηλίου

GENEMIS: Generation and Evaluation of Emission Data; Ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα με στόχο την βελτίωση των μεθόδων δημιουργίας μητρώων εκπομπών που χρησιμοποιούνται σε ατμοσφαιρικά μοντέλα

GF: Glass Fiber; Υαλόνημα

GIS: Geographic Information Systems; Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών

GLC2000: Global Land Cover 2000 Project

GPS: Global Positioning System; Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού

HAPEM6: Hazardous Air Pollutant Exposure Model version 6; μοντέλο έκθεσης της US EPA (2007β)

HEI: Health Effects Institute; Ινστιτούτο Επιπτώσεων στην Υγεία

HEM3: Human Exposure Model version 3; μοντέλο έκθεσης της US EPA (2007α)

HRTM: Human Respiratory Tract Model; Το μοντέλο ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος της ICRP (1994)

HYSPLIT4 model: HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model; Μοντέλο υπολογισμού τροχιών αερίων μαζών (Draxler και Rolph, 2003)

IC: Inspiratory Capacity; εισπνευστική χωρητικότητα των πνευμόνων

ICRP: International Commission on Radiological Protection; Διεθνής Υπηρεσία Ακτινοπροστασίας

IMPRESAREO: Improving the Spatial Resolution of Air Emission Inventories Using Earth Observation Data; Ευρωπαϊκό Ερευνητικό πρόγραμμα με τίτλο "Βελτίωση της χωρικής ανάλυσης των απογραφών εκπομπών στην ατμόσφαιρα με τη χρήση δεδομένων τηλεπισκόπησης" (π.χ. Hayman κ.α., 2001)

IPPC: Integrated Pollution Prevention and Control; Ολοκληρωμένη πρόληψη και έλεγχος της ρύπανσης (Οδηγία 2008/1/EK)

IRV: Inspiratory Reverse Volume; εισπνευστικός όγκος αέρα

ISC3: Industrial Source Complex Model version 3; μοντέλο διασποράς ρύπων στην ατμόσφαιρα της US EPA

ISCLT: Industrial Source Complex Model Long Term; η έκδοση του μοντέλου ISC για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων για μεγάλες χρονικές περιόδους US EPA (1995α και 1995β)

LAU: Local Administrative Unit; Τοπική διοικητική μονάδα

LCC: Lambert Conformal Conic; Σύμμορφη κωνική προβολή Lambert

LPS: Large Point Sources; Μεγάλες Σημειακές Πηγές

LUDEP: LUng Dose Evaluation Program; Μοντέλο Δοσιμετρίας βασισμένο στο μοντέλο HRTM της ICRP

M: Medium; απορρόφηση με μέτρια ταχύτητα στο αίμα

MapObjects ESRI: Λογισμικό δημιουργίας λειτουργιών GIS της εταιρίας ESRI

MENTOR/SHEDS: Modeling Environment for Total Risk studies linked with the Stochastic Simulation of Human Exposure and Dose System; Στοχαστικό μοντέλο εκτίμησης της ανθρώπινης έκθεσης και δόσης (Georgopoulos και Lioy, 2006)

MM5: Fifth-Generation NCAR / Penn State Mesoscale Model; Μετεωρολογικό μοντέλο (Grell κ.α., 1994)

MPPD: Multiple-Path Particle Dosimetry Model; Μοντέλο Δοσιμετρίας Σωματιδίων (Price κ.α., 2002)

NFR: Nomenclature for Reporting; κατηγοριοποίηση πηγών ρύπων στην ατμόσφαιρα που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία μητρώων εκπομπών στα πλαίσια του προγράμματος UNECE/CLRTAP

NILU: Norwegian Institute for Air Research; Νορβηγικό Ινστιτούτο Ατμοσφαιρικών Ερευνών

NMMAPS: National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study; Επιδημιολογική μελέτη του HEI (Samet κ.α., 2000)

NO₂: Nitrogen Dioxide; Διοξείδιο του αζώτου

NO_x: Nitrogen oxides; Οξειδία του αζώτου

OC: Organic Carbon; Οργανικός Άνθρακας

ORFA-PNNC: Oblique Rotational Factor Analysis with partially Non-Negative Constraint; Μέθοδος παραγοντικής ανάλυσης με περιορισμούς όσον αφορά στους αρνητικούς αριθμούς (Ozeki κ.α., 2004)

PAR: Photosynthetic Active Radiation; Φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία

PCA: Principal Component Analysis; Ανάλυση σε κύριες συνιστώσες - ΑΚΣ

PMF: Positive Matrix Factorization; Μέθοδος ανάλυσης σε κύριες συνιστώσες (Paatero και Tapper, 1994)

DPP: Dichotomous Partisol Plus sequential air sampler (Rupprecht and Patashnick Co., Inc., Albany, NY, USA); δειγματολήπτης αεροζόλ (A_{Σ2,5} και A_{Σ2,5-10})

RIVM: The National Institute for Public Health and the Environment; Εθνικό Ινστιτούτο για την Δημόσια Υγεία και το Περιβάλλον

RV: Residual Volume; υπόλοιπη χωρητικότητα των πνευμόνων

S: Slow; αργή απορρόφηση στο αίμα

seq: sequestered; στρώμα υπό του επιθηλίου/ τοιχώματα των αεραγωγών

SMPS: Scanning Mobility Particle Sizer; Αναλυτής διαφορικής κινητικότητας

SNAP: Selected Nomenclature for Sources of Air Pollution; κατηγοριοποίηση πηγών ρύπων στην ατμόσφαιρα που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία μητρώων εκπομπών στα πλαίσια του προγράμματος EMEP

SO₂: Sulphur Dioxide; Διοξείδιο του θείου

sol: αργά κινούμενο στρώμα αναπνευστικής βλέννας που υπόκειται του στρώματος gel

STAR: STability Array; μορφοποίηση δεδομένων ανέμου

sur: surface; ταχέως κινούμενο στρώμα βλέννας που καλύπτει το επιθήλιο

TB: Tracheobronchial region; Τραχειοβρογχική περιοχή των πνευμόνων

TEOM: Tapered Element Oscillating Microbalance; Όργανο μέτρησης σωματιδίων σε πραγματικό χρόνο

TLC: Total Lung Capacity; ολική χωρητικότητα των πνευμόνων

TNO: Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek; Ολλανδικός οργανισμός έρευνας στις εφαρμοσμένες επιστήμες

TRIM: Total Risk Integrated Methodology system; σύστημα υπολογισμού του κινδύνου από την έκθεση του ατόμου σε διάφορα τοξικά συστατικά της US EPA

UNECE: United Nations Economic Commission for Europe; Οικονομική επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών για την Ευρώπη

UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change; Σύμβαση πλαισίου των Ηνωμένων Εθνών για τις κλιματικές μεταβολές

US EPA: United States Environmental Protection Agency; Αμερικανική Επιτροπή Περιβάλλοντος

USGS: United States Geological Survey;

UTC: Coordinated Universal Time; Παγκόσμια Ώρα

VB.net: Visual Basic .NET; Γλώσσα προγραμματισμού

VBA: Visual Basic for Applications; Γλώσσα προγραμματισμού

VC: Vital Capacity; ζωτική χωρητικότητα των πνευμόνων

V_T: Tidal volume; ο όγκος αέρα που λαμβάνεται σε κάθε εισπνοή

WHO: World Health Organization; Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας

WRAP: Western Regional Air Partnership project; Αμερικανικό ερευνητικό πρόγραμμα για τον υπολογισμό των εκπομπών σκόνης (Mansel κ.α., 2004)

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΚΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΔΟΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΔΟΣΗΣ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΑΝΑΠΝΕΥΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	4
1.1.1. ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΑΣ ΣΤΟ ΑΑΣ	4
1.1.2. ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΚΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΔΟΣΗΣ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΑΝΑΠΝΕΥΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	7
1.2. ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ	10
2. ΠΗΓΕΣ ΚΑΙ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ	15
2.1. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΙ ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΡΥΠΩΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΑΠΟ ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΠΗΓΕΣ	18
2.1.1. ΧΗΜΙΚΗ ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ.....	23
2.1.2. ΧΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΡΥΠΩΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΑΠΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΕΣ ΠΗΓΕΣ	25
2.2. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΚΛΥΣΗΣ ΡΥΠΩΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΑΠΟ ΦΥΣΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ....	25
2.2.1. ΈΚΛΥΣΗ ΒΙΟΓΕΝΩΝ ΠΤΗΤΙΚΩΝ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΕΝΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ..	25
2.2.2. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ	27
2.2.3. ΑΙΩΡΗΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΚΟΝΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΕΔΑΦΟΣ ΕΞΑΙΤΙΑΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ...	28
3. ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΡΥΠΩΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΣΕ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ.....	32
3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ISC3LT	33
3.1.1. ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΠΟ ΣΗΜΕΙΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ	34
3.1.2. ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΠΟ ΜΗ-ΣΗΜΕΙΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ	39
3.1.3. ΞΗΡΗ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ	40
3.2. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ– ΣΥΝΔΕΣΗ - ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΠΗΓΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	41
3.3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΔΕΚΤΩΝ – ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΗΓΩΝ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑΣ ΤΟΥΣ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΕΚΘΕΣΗΣ	42
3.4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΡΟΧΙΩΝ ΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΜΑΖΩΝ	44
3.5. ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΙΚΡΟΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ.....	45
4. ΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΑΝΑΠΝΕΥΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ – ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ, ΔΟΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ.....	47
4.1. ΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΑΝΑΠΝΕΥΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	47
4.1.1. ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑΣ ΤΟΥ ΑΑΣ	50
4.1.2. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΑΣ	55

4.1.3.	ΡΟΗ ΑΕΡΑ ΣΤΟ ΑΑΣ	59
4.2.	ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΑΝΑΠΝΕΥΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	62
4.2.1.	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ	62
4.2.2.	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟ ΑΝΑΠΝΕΥΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	65
4.3.	ΜΕΤΑΦΟΡΑ/ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΣ ΣΤΟ ΑΑΣ	68
4.3.1.	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΑΑΣ	72
4.4.	ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΚΑΙ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΔΟΣΗΣ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΑΝΑΠΝΕΥΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΧΔΟΜ	78
4.5.	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΧΔΟΜ ΜΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....	92
5.	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	101
5.1.	ΕΦΑΡΜΟΓΗ 1: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΚΛΥΣΗΣ ΡΥΠΩΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΑΘΗΝΩΝ (ΕΠΑ) ΑΠΟ ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ. 101	
5.1.1.	ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΗΓΩΝ ΡΥΠΑΝΣΗΣ	102
5.1.2.	ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΙ ΧΡΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΠΟ ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΠΗΓΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ	104
5.1.3.	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ.....	107
5.1.4.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	109
5.2.	ΕΦΑΡΜΟΓΗ 2: ΈΚΘΕΣΗ ΣΕ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΚΑΙ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ ΣΤΟ ΌΣΛΟ ΝΟΡΒΗΓΙΑΣ ΣΕ ΟΛΙΚΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΚΑΙ ΣΤΑ ΧΗΜΙΚΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΤΟΥΣ.....	116
5.2.1.	ΣΗΜΕΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	117
5.2.2.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥΣ	121
5.2.3.	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΚΑΙ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΔΟΣΗΣ.....	134
5.3.	ΕΦΑΡΜΟΓΗ 3: ΈΚΘΕΣΗ ΣΕ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΚΑΙ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ ΣΤΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΟΥ ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ.....	142
5.3.1.	ΣΗΜΕΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	142
5.3.2.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	145
5.3.3.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΔΟΣΗΣ.....	147
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	149
	ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΕΣ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ	185
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	190
	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΑΝΑΠΝΕΥΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	190
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	196
	ΕΦΑΡΜΟΓΗ 1 - ΕΚΠΟΜΠΕΣ	196
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ	204
	ΕΦΑΡΜΟΓΗ 2	204
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ.....	212
	ΕΦΑΡΜΟΓΗ 3	212

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ	215
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	219
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	221

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια τα αποτελέσματα από πλήθος επιστημονικών ερευνών έχουν καταδείξει τη σχέση μεταξύ έκθεσης σε ατμοσφαιρικά αιωρούμενα σωματίδια (ΑΣ) και επιπτώσεων στην υγεία. Δεδομένα από επιδημιολογικές μελέτες μεγάλης χρονικής διάρκειας δίνουν μαθηματικές συσχετίσεις μεταξύ μακροχρόνιας έκθεσης σε ΑΣ και θνησιμότητας (Pope κ.α., 1999; Schwartz κ.α., 1999; Laden, 2000; Krewski κ.α., 2000; Katsouyanni κ.α., 2001; Pope κ.α., 2002; Dominici κ.α., 2005; Neuberger 2004). Πρόσφατες επιδημιολογικές μελέτες (σύνοψη δίνεται στο HEI, 2003 και στο US EPA 2009) ακολούθησαν την επιτυχή εφαρμογή των μελετών των έξι πόλεων από το Harvard (Dockery κ.α., 1993) και της μελέτης της Αμερικανικής Κοινότητας για τον Καρκίνο (ACS) (Pope κ.α., 1995). Οι μελέτες αυτές έδειξαν τη σημαντική συνεισφορά των επιπέδων των ΑΣ στη θνησιμότητα και νοσηρότητα του ανθρώπινου πληθυσμού. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε αύξηση της θνησιμότητας για μεγάλες χρονικές περιόδους από 17% μέχρι 26% και για άτομα που ζουν σε περιοχές με αυξημένες συγκεντρώσεις σωματιδίων ΑΣ_{2,5} (US EPA, 2004; Brunekreef, 1997; UK Department of Health, 2001).

Σε συνέχεια των παραπάνω μελετών έγιναν έρευνες που επανεξέτασαν τα αποτελέσματα τους με σκοπό την εξέταση της ακρίβειας και της επαναληψιμότητας των αποτελεσμάτων τους. Η μελέτη από το Ινστιτούτο Επιπτώσεων στην Υγεία (HEI, Health effects Institute) για τις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής αποτελεί ένα σημαντικό παράδειγμα αυτών των προσπαθειών (NMMAPS) (Samet κ.α., 2000). Η μελέτη NMMAPS έδειξε αύξηση κατά 0.5% της θνησιμότητας με αύξηση κατά 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων στις 90 μεγαλύτερες πόλεις των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής όταν η μέση ημερήσια συγκέντρωση ΑΣ₁₀ ήταν μεταξύ 15 και 53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν βρεθεί από την Ευρωπαϊκή μελέτη APHEA (0.6% αύξηση της θνησιμότητας για αύξηση συγκέντρωσης 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) (Katsouyanni κ.α., 1996) καθώς και από πρόσφατες αναλύσεις στην Ευρώπη, τη Βόρεια και Νότια Αμερική (0.7% αύξηση της θνησιμότητας για αύξηση συγκέντρωσης 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) (Levy κ.α., 2000). Ειδικότερα στην Ελλάδα, σύμφωνα με πρόσφατη μελέτη του Ευρωπαϊκού θεματικού κέντρου για τον αέρα και την κλιματική αλλαγή, 15829 πρώιμοι θάνατοι ανά έτος οφείλονται στην έκθεση σε ΑΣ₁₀ (Barrett κ.α., 2008).

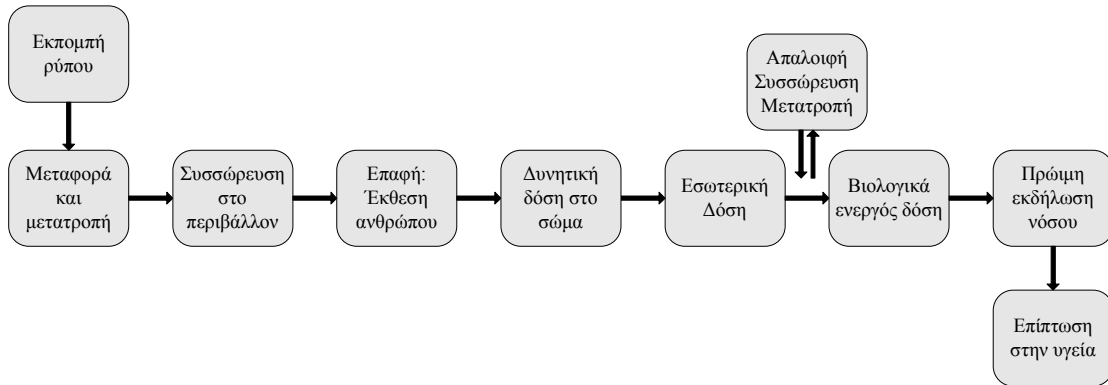
Για τον υπολογισμό των συναρτήσεων μεταξύ συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων και αποτελέσματος (θνησιμότητα) οι επιδημιολογικές μελέτες χρησιμοποίησαν το μοντέλο του Cox (Cox, 1972). Μια πρόσφατη μελέτη από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας παρουσιάζει την ανάπτυξη της μεθοδολογίας για τον υπολογισμό της θνησιμότητας του πληθυσμού από την αέρια ρύπανση και ειδικότερα από τα αιωρούμενα σωματίδια (WHO, 2006). Επιπλέον, τοξικολογικές μελέτες παρουσιάζουν τις βιολογικές απαντήσεις για τις συσχετίσεις αυτές (Schwartz, 1994; Pope κ.α., 1995; Schlesinger, 1995; Krewski κ.α., 2000; Kim κ.α., 2000; Dab κ.α., 2001; Pope κ.α., 2002).

Στις επιδημιολογικές μελέτες η σχέση μεταξύ έκθεσης και απόκρισης συνήθως θεωρείται γραμμική (Wichmann κ.α., 2000; Lippmann κ.α., 2000; Pope κ.α., 2002; Analitis κ.α., 2006). Επιπλέον η απόκριση σχετίζεται με μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις έκθεσης από σταθερούς σταθμούς ποιότητας αέρα παρά με την ατομική έκθεση σε σωματίδια στους χώρους όπου δραστηριοποιείται το άτομο (Ozkaynak 1996). Ωστόσο οι άνθρωποι περνούν μεγάλο μέρος του χρόνου τους σε εσωτερικούς χώρους (~85% Klepeis κ.α., 2001; Hanninen κ.α., 2003; Eurostat, 2004) όπου εκτίθενται σε ατμοσφαιρικά σωματίδια που διεισδύουν στο εσωτερικό αέρα και σωματίδια που παράγονται από εσωτερικές πηγές και τις δραστηριότητες του ατόμου (π.χ. μαγείρεμα, κάπνισμα, ατομικές δραστηριότητες) που μπορεί να διαφέρουν σημαντικά ως προς τα φυσικά και χημικά τους χαρακτηριστικά από τα ατμοσφαιρικά σωματίδια (Sinclair κ.α, 1990; Brauer κ.α, 1991; Thatcher and Layton, 1995; Lebowitz κ.α., 1995; Allen κ.α, 1995; Wallace κ.α, 1996; Su, 1996; Weschler κ.α, 1997; Jang κ.α, 1999; Siegmann κ.α, 1999; Wilson κ.α, 2000; Wallace, 2000; Lachenmyer and Hidy, 2000; Abt κ.α, 2000; Jones κ.α., 2000; Long κ.α., 2000; Long κ.α, 2001; Kousa κ.α., 2002α και 2002β; Franck κ.α., 2003; Morawska κ.α., 2003; Lunden κ.α, 2003; Schneider κ.α., 2004; Hanninen κ.α., 2004; Nazaroff κ.α, 2004α και 2004β; He κ.α., 2004; Wallace κ.α., 2006; Meng κ.α., 2005; Lazaridis κ.α., 2006; Hussein κ.α, 2006; Hoek κ.α., 2008; Lazaridis κ.α., 2008α).

Οι επιπτώσεις όμως των αιωρούμενων σωματιδίων στην υγεία του ανθρώπου καθορίζονται τόσο από το μέγεθος όσο και από τη χημική τους σύσταση που με τη σειρά τους εξαρτώνται από τις διεργασίες παραγωγής στις πηγές από όπου εκπέμπονται τα σωματίδια και των μεταβολών που υπόκεινται στην ατμόσφαιρα (Harrison και Yin, 2000; US EPA, 2009). Η διαλυτότητα και το μέγεθος τους καθορίζει τις θέσεις στις οποίες θα βρεθούν στο αναπνευστικό σύστημα και την μεταφορά τους από εκεί στον οργανισμό. Τα υπέρλεπτα σωματίδια για παράδειγμα θεωρούνται πιο τοξικά από τα μεγαλύτερα καθώς μπορούν να διεισδύσουν στο παρέγχυμα (Donaldson κ.α., 2000; Gehr κ.α., 2000). Επιπλέον η τοξικότητα των σωματιδίων σχετίζεται με τα υδατοδιαλυτά ιόντα τους και την περιεκτικότητά τους σε μέταλλα, και οργανικά συστατικά (Salvi και Holgate, 1999; Mauderly και Chow, 2008). Για παράδειγμα όξινα σωματίδια μπορούν να ελαττώσουν τον ρυθμό καθαρισμού των πνευμόνων και να επηρεάσουν το πνευμονικό ανοσοποιητικό σύστημα (Bree and Cassee, 2000). Σε αρκετές μελέτες έχει βρεθεί σχέση μεταξύ της απόκρισης του οργανισμού και της έκθεσης σε συγκεκριμένα χημικά συστατικά (σύνοψη δίνεται στο US EPA, 2009).

Έτσι ένα σημαντικό ερώτημα που προκύπτει από τις επιδημιολογικές μελέτες είναι αν οι συγκεντρώσεις από σταθερούς σταθμούς μέτρησης ποιότητας αέρα είναι αντιπροσωπευτικές για τον υπολογισμό της έκθεσης και τον καθορισμό της σχέσης με την επίπτωση/απόκριση του οργανισμού. Πρόσφατα η Αμερικανική Επιτροπή Περιβάλλοντος (US EPA, 2009) συνοψίζοντας μελέτες των τελευταίων ετών στην Αμερική κατέδειξε ότι ειδικά για τα $AS_{2,5}$ και τα SO_4^{2-} οι τιμές από σταθερούς σταθμούς μέτρησης της ποιότητας αέρα δίνουν μια καλή εκτίμηση της έκθεσης.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, για την ελάττωση των επιπτώσεων των ΑΣ στην ανθρώπινη θα πρέπει να εξετάζεται ολοκληρωμένα η πορεία των σωματιδίων από την εκπομπή τους στην πηγή, την μεταφορά/μετατροπή τους στην ατμόσφαιρα και στη συνέχεια στο ανθρώπινο σώμα (US EPA, 2009). Αναλυτικότερα, η πορεία που ακολουθούν τα σωματίδια και οδηγεί στην απόκριση του οργανισμού δίνεται στο σχήμα της Εικόνας 1 που ακολουθεί.



Εικόνα 1 Οι επιπτώσεις της αέριας ρύπανσης στην υγεία ως αποτέλεσμα της αλυσίδας γεγονότων που ξεκινούν από την εκπομπή των ρύπων (τροποποιημένο από Liou κ.α., 1990).

Τα σωματίδια που προκαλούν επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον εξαιτίας της τοξικότητάς τους εκλύονται αρχικά στην ατμόσφαιρα από φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές ή παράγονται από αντιδράσεις στην ατμόσφαιρα. Έτσι, το πρώτο βήμα για την αποτελεσματική λύση των προβλημάτων αέριας ρύπανσης και την αντιμετώπιση των επιπτώσεων της στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον είναι η εκτίμηση της έκλυσης ρύπων στην ατμόσφαιρα και στη συνέχεια ο υπολογισμός της μεταφοράς, μετατροπής και συσσώρευσης τους στο περιβάλλον με τη βοήθεια μοντέλων ποιότητας αέρα. Στη συνέχεια ο άνθρωπος έρχεται σε επαφή με τα σωματίδια στα περιβάλλοντα όπου δραστηριοποιείται και έτσι εκτίθεται σε αυτά. Η έκθεση δηλαδή είναι το αποτέλεσμα του συνδυασμού συγκέντρωσης ενός ρύπου σε κάποιο χώρο και της παραμονής ενός ατόμου στον χώρο αυτό για κάποιο χρονικό διάστημα. Η ολική έκθεση υπολογίζεται από τη σχέση (Εξ.1):

$$Ex_i = \sum_{j=1}^n C_j t_{ij}$$

όπου Ex_i είναι η συνολική έκθεση του ατόμου i , C_j είναι η συγκέντρωση ΑΣ στο περιβάλλον j , t_{ij} είναι η διάρκεια παραμονής του ατόμου i στο περιβάλλον j , και n είναι το πλήθος των διαφορετικών περιβαλλόντων στα οποία εκτίθεται το άτομο κατά τη διάρκεια. Ωστόσο η εκτίμηση της αλληλεπίδρασης του ατόμου με το περιβάλλον δεν είναι αρκετή για να καθοριστούν οι επιπτώσεις ενός ρύπου στην υγεία ενός ατόμου. Η έκθεση αναφέρεται στην συγκέντρωση του ρύπου στο σημείο που έρχεται σε επαφή με το σώμα αλλά η ποσότητα που πραγματικά εισέρχεται στο σώμα και είναι υπεύθυνη για οποιαδήποτε απόκριση του οργανισμού είναι η δόση. Η δόση αυτή αφορά τόσο σε σωματίδια που παραμένουν στο αναπνευστικό σύστημα για μεγάλο χρονικό διάστημα μετά την έκθεση όσο και σε σωματίδια και

συστατικά τους που μεταφέρονται στο σώμα και συσσωρεύονται σε άλλα όργανα του ανθρώπινου σώματος. Διακρίνεται σε δυνητική (potential), εφαρμοζόμενη (applied) και εσωτερική (internal) και εκφράζει αντίστοιχα την πραγματική ποσότητα του ρύπου που εισέρχεται στον οργανισμό, που αποτίθεται στους ιστούς των πνευμόνων ή απορροφάται-συσσωρεύεται σε αυτούς. Η δόση αυτή μεταβάλλεται ανάλογα με τις συνθήκες έκθεσης (συγκέντρωση, διάρκεια, φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά σωματιδίων), την δραστηριότητα του ατόμου και την μορφολογία του αναπνευστικού του συστήματος (που με τη σειρά τους εξαρτώνται από πολλές παραμέτρους όπως η ηλικία, το φύλλο, η κατάσταση υγείας του ατόμου κ.α.). Ιδιαίτερα σημαντική είναι η βιολογικά ενεργός δόση που εκφράζει την ποσότητα του ρύπου που έρχεται πραγματικά σε επαφή με τους υπό εξέταση ιστούς, όργανα του σώματος ή υγρά του σώματος. Μέχρι σήμερα ωστόσο ο προσδιορισμός των επιπτώσεων της σωματιδιακής ατμοσφαιρικής ρύπανσης πραγματοποιείται με εξισώσεις έκθεσης-απόκρισης ή δόσης απόκρισης όπου δόση θεωρείται η δυνητική ή εσωτερική δόση καθώς η βιολογικά ενεργός δόση δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα.

Από τα αποτελέσματα των επιδημιολογικών ερευνών έχουν προκύψει όρια για την συγκέντρωση των ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων για την πρόληψη της ανθρώπινης υγείας. Έτσι η αποτίμηση των επιπτώσεων των ΑΣ στην ανθρώπινη υγεία βάσει της ισχύουσας νομοθεσίας περιορίζεται στον προσδιορισμό της έκθεσης του ανθρώπου σε αιωρούμενα σωματίδια ενώ ταυτόχρονα τα θεσπισμένα όρια συγκεντρώσεων αφορούν στην έκθεση σε εξωτερικό περιβάλλον. Τα όρια αυτά για την Ευρώπη είναι για τα ΑΣ₁₀ τα 40 μg/m³ οριακή μέση ετήσια τιμή, η μέση ημερήσια τιμή τους δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 50 μg/m³ για περισσότερο από 35 φορές το έτος; ενώ θεσπίστηκε οριακή τιμή και για τη μέση ετήσια συγκέντρωση ΑΣ_{2,5} η 25 μg/m³ την 1^η Ιανουαρίου 2015 (Οδηγία 2008/50/EK). Ωστόσο, κάθε προσπάθεια αποτίμησης των επιπτώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων στην ανθρώπινη υγεία και περιορισμού τους θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη όλες τις διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα πριν και μετά την έκθεση.

1.1.Ανασκόπηση μοντέλων έκθεσης και δόσης και συστημάτων προσδιορισμού της έκθεσης και δόσης αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα

1.1.1. Μοντέλα εναπόθεσης και καθαρισμού ΑΣ στο ΑΑΣ

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί αρκετά μοντέλα υπολογισμού της εναποτιθέμενης δόσης και της απομάκρυνσης/μεταφοράς αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα. Τα μοντέλα προσδιορισμού της εναποτιθέμενης δόσης μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες, τα ημιεμπειρικά, τα μηχανιστικά και τα στοχαστικά ανάλογα με την περιγραφή του ΑΑΣ και τον τρόπο υπολογισμού του ποσοστού εναπόθεσης σωματιδίων σε

κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος. Αναλυτικότερα, στην πρώτη κατηγορία μοντέλων το ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα θεωρείται πως αποτελείται από διακριτές περιοχές (Εικόνα 2), κάθε μια από τις οποίες δρα σαν φίλτρο στα σωματίδια που τη διαρρέουν με το ρεύμα του εισπνεόμενου και εκπνεόμενου αέρα. Η διαδικασία της εναπόθεσης αντιμετωπίζεται στατικά και η απόδοση κάθε φίλτρου υπολογίζεται από εξισώσεις που προέρχονται από καμπύλες προσέγγισης πειραματικών δεδομένων. Το πιο ευρέως διαδεδομένο και χρησιμοποιούμενο ημιεμπειρικό μοντέλο είναι το Μοντέλο του Ανθρώπινου Αναπνευστικού Συστήματος (HRTM) της διεθνούς υπηρεσίας ακτινοπροστασίας (ICRP) (ICRP, 1994). Άλλα ημιεμπειρικά μοντέλα είναι αυτά των Chan και Lippmann (1980), Chang κ.α. (1991), Phalen κ.α. (1991). Τα ημιεμπειρικά μοντέλα μπορούν να εφαρμοστούν μόνο για τις συνθήκες κάτω από τις οποίες προέκυψαν τα πειραματικά δεδομένα. Υπό τις δεδομένες συνθήκες ωστόσο θεωρούνται πιο αξιόπιστα από τα μηχανιστικά καθώς λόγω της στατιστικής τους φύσης λαμβάνουν υπόψη όλους τους μηχανισμούς που επιδρούν στα σωματίδια (Oldham κ.α., 2000).

Από την άλλη πλευρά τα μηχανιστικά μοντέλα προσομοιώνουν κάθε μηχανισμό εναπόθεσης σωματιδίων χωριστά και επιλύουν εξισώσεις μεταφοράς σωματιδίων για τον προσδιορισμό της εφαρμοσμένης δόσης. Στη βιβλιογραφία απαντάται ένα μεγάλο πλήθος μηχανιστικών μοντέλων. Ενδεικτικά κάποια από αυτά είναι τα μοντέλα Robinson και Yu (2001) για την εισπνοή καπνού τσιγάρου, των Yu κ.α. (1979), Egan και Nixon (1985), Anjilvel και Asgharian (1995), Bergmann κ.α. (1997), Hashish κ.α. (1998), Gradon και Prodgorski (1999), Venkataraman και Kao (1999), Oldham κ.α. (2000), Darquenne (2001), Lazaridis κ.α. (2001α), Moskal και Gradon (2002), Zhang κ.α., (2002), Goo και Kim (2003), Mitsakou κ.α. (2005), Park και Wexler (2007). Τα μηχανιστικά μοντέλα μπορούν να διακριθούν σε διάφορες κατηγορίες: (1) ανάλογα με την μορφολογία και φυσιολογία του αναπνευστικού συστήματος σε μοντέλα που χρησιμοποιούν ιδεατή γεωμετρία και σε αυτά που η γεωμετρία μεταβάλλεται συναρτήσει της φάσης της αναπνοής και επιλύονται με τη βοήθεια CFD (computational fluid dynamics) (2) ανάλογα με την προσέγγιση που χρησιμοποιούν για τον υπολογισμό της ροής των σωματιδίων σε Eulerian και Lagrangian, (3) ανάλογα με τον προσδιορισμό της πορείας που ακολουθεί το ρεύμα αέρα και των παραμέτρων φυσιολογίας σε αιμοκρατικά και στοχαστικά. Αν και τα μοντέλα αυτής της κατηγορίας είναι πιο ρεαλιστικά και μπορούν να υπολογίσουν την εναπόθεση σωματιδίων στο αναπνευστικό για διαφορετικές παραμέτρους φυσιολογίας έχουν πολλές αδυναμίες. Για παράδειγμα, πολλά μοντέλα δεν λαμβάνουν υπόψη την πραγματική μορφή του αναπνευστικού συστήματος είτε θεωρώντας μια ιδανική συμμετρική γεωμετρία κάτι που δεν ισχύει λόγω της φυσικής διαφοροποίησης μεταξύ των ατόμων, είτε θεωρώντας δεδομένη την πορεία των σωματιδίων μέσα στο αναπνευστικό αδιαφορώντας έτσι για τον τρόπο διακλάδωσης των αεραγωγών. Μια ακόμα απλοποίηση που γίνεται συνήθως είναι πως ο όγκος/η επιφάνεια των αεραγωγών του αναπνευστικού συστήματος δεν μεταβάλλονται κατά την διάρκεια της αναπνοής παρά μόνο στην περιοχή των κυψελίδων. Αν και η δυναμική των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα καθορίζεται από πολλούς μηχανισμούς όπως η βαρυτική καθίζηση, καθίζηση λόγω διάχυσης, ανάσχεση και ενσφήνωση, θερμοφόρηση, ηλεκτροστατική καθίζηση, συσσωμάτωση,

συμπύκνωση και πυρηνοποίηση τα μοντέλα δεν λαμβάνουν υπόψη όλους τους παραπάνω μηχανισμούς στον υπολογισμό της εναπόθεσης των σωματιδίων. Άλλες αδυναμίες κάποιων μηχανιστικών μοντέλων είναι πως δεν λαμβάνουν υπόψη την επίδραση των τοιχωμάτων των αεραγωγών και του στρώματος σωματιδίων που ήδη έχουν αποτεθεί εκεί, την επίδραση των δευτερευόντων αντίστροφων ρευμάτων ροής που δημιουργούνται στις διακλαδώσεις του αναπνευστικού. Η σημαντικότερη ίσως αδυναμία για την πρακτική εφαρμογή τους είναι πως δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνθήκες μεταβαλλόμενης συγκέντρωσης έκθεσης ή παραμέτρων φυσιολογία. Τέλος στα στοχαστικά μοντέλα οι τιμές των παραμέτρων μορφομετρίας του ΑΑΣ εισάγονται με τη μορφή στατιστικών κατανομών που προέρχονται από μετρήσεις και στη συνέχεια η εναπόθεση υπολογίζεται εμπειρικά ή όπως στα στοχαστικά μηχανιστικά μοντέλα. Έτσι αν και επιλύουν ορισμένα από τα προβλήματα των μηχανιστικών μοντέλων εξακολουθούν να παρουσιάζουν αρκετά από τα μειονεκτήματά τους. Στοχαστικά μοντέλα υπολογισμού της εναπόθεσης είναι τα μοντέλα των Hofmann και Koblinger (1985, 1990), Hofmann και Koblinger (1992), Asgharian, Hofmann και Bergmann (2001), Hofmann κ.α. (2003).

Αρκετά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί και για τον προσδιορισμό της απομάκρυνσης των σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα και τον υπολογισμό της εσωτερικής δόσης τους. Αν και η μεταφορά των σωματιδίων στο αναπνευστικό πραγματοποιείται τόσο με την ροή της πνευμονικής βλέννας προς τον οισοφάγο όσο και με άλλους μηχανισμούς όπως η μεταφορά με τους παλμούς των κροσσών των κυττάρων του επιθηλίου, με την διάλυση και/ή διάχυση στο πνευμονικό επιθήλιο και απορρόφηση στο αίμα, φαγοκύτωση από μακροφάγα κύτταρα, μεταφορά με το λεμφικό δίκτυο, στα περισσότερα μοντέλα ο καθαρισμός σωματιδίων υπολογίζεται μόνο για την τραχειοβρογχική περιοχή και αφορά μόνο στην μεταφορά των σωματιδίων με την βλέννα και την απορρόφηση στο αίμα. Επιπλέον ο καθαρισμός των σωματιδίων εξαρτάται από τα φυσικά και χημικά τους χαρακτηριστικά, την υγεία του ατόμου ή την προηγούμενη έκθεση του αναπνευστικού σε ουσίες που μεταβάλλουν την κυτταρική σύσταση και δομή του και το πλήθος των μακροφάγων κυττάρων αλλά και στην περιοχή και ποσότητα των σωματιδίων που αποτίθενται (π.χ. πολλή μεγάλη ποσότητα μπορεί να οδηγήσει στο γνωστό *overloading effect* και την λύση των μακροφάγων κυττάρων). Ωστόσο τα περισσότερα μοντέλα αφορούν σε αδιάλυτα, μη τοξικά σωματίδια και συγκεκριμένης χημικής σύστασης. Πολλά από τα μοντέλα αυτά αφορούν στη συμπεριφορά των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα τρωκτικών (Gradon κ.α., 1996; Tran κ.α., 1999α; Tran κ.α., 1999β) και σκύλων (Stradling κ.α., 2000), ενώ κάποια έχουν αναχθεί για την περίπτωση ανθρώπων (Hofmann και Asgharian, 2003; Hsieh και Yu, 1998). Ειδικά για τον άνθρωπο έχουν αναπτυχθεί λίγα μοντέλα εξαιτίας της έλλειψης πειραματικών δεδομένων (Lee κ.α., 1979; Phalen κ.α., 1991; ICRP, 1994; Asgharian, Hofmann και Miller., 2001; Kuempel κ.α., 2001; Sturm και Hofmann, 2003α και 2003β; Sturm και Hofmann, 2006; Sturm, 2007). Το μοντέλο της ICRP εξακολουθεί να αποτελεί τη βάση για την ανάπτυξη πολλών από αυτά τα μοντέλα.

Συμπερασματικά, οι περισσότερες από τις μέχρι σήμερα ερευνητικές προσπάθειες στον τομέα αντιμετωπίζουν συνήθως αποσπασματικά το πρόβλημα της εσωτερικής δόσης του ανθρώπου από αιωρούμενα σωματίδια. Συνήθως περιορίζονται στον υπολογισμό της εναποτιθέμενης δόσης αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα ή της απομάκρυνσης τους μετά την απόθεση (μοντέλα κινητικής φαρμάκων). Επίσης δεν λαμβάνουν υπόψη όλους τους μηχανισμούς που πιθανόν επηρεάζουν την δυναμική των σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα (π.χ. διόγκωση των σωματιδίων λόγω υγροσκοπικότητας, μεταφορά από τα μακροφάγα κύτταρα). Ακόμα ελάχιστα έχει μελετηθεί η επίδραση των σωματιδίων που ήδη βρίσκονται στα τοιχώματα των αεραγωγών στον υπολογισμό της εναπόθεσης και της απομάκρυνσης τους από το ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα και ειδικά σε συνάρτηση με την χημική τους σύσταση. Τέλος πολλά από τα υφιστάμενα μοντέλα έχουν αναπτυχθεί με τρόπο που η τελική τους εφαρμογή με πραγματικά πειραματικά δεδομένα έκθεσης να είναι δύσκολη. Πιο συγκεκριμένα αρκετά μοντέλα δεν μπορούν να εφαρμοστούν παρά μόνο υπό τις πολύ αυστηρές συνθήκες για τις οποίες αναπτύχθηκαν είτε χρειάζονται πολλά δεδομένα εισόδου που είναι πρακτικά αδύνατο να βρεθούν είτε δεν μπορούν να εφαρμοστούν για συνεχή έκθεση.

1.1.2. Μοντέλα έκθεσης και ολοκληρωμένα συστήματα προσδιορισμού της έκθεσης και δόσης αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα

Τα περισσότερα από τα παραπάνω μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί έως σήμερα δεν αποτελούν ολοκληρωμένα συστήματα προσδιορισμού της έκθεσης και δόσης σε σωματίδια. Μοντέλα εκτίμησης της έκθεσης του ανθρώπου σε ατμοσφαιρικούς ρύπους έχουν αναπτυχθεί στο παρελθόν για την υποστήριξη μελετών της επίδρασης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ανθρώπινη υγεία και της διαχείριση του κινδύνου. Διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, στα στατιστικά, τα αιτιοκρατικά και τα στοχαστικά. Στα στατιστικά μοντέλα έκθεσης προσδιορίζονται οι παράγοντες που θεωρείται πως επηρεάζουν τη μετρούμενη έκθεση. Στα αιτιοκρατικά πραγματοποιείται συνδυασμός μητρώων εκπομπών, με μοντέλα ατμοσφαιρικής διασποράς των ρύπων και δραστηριότητας του πληθυσμού. Συχνά συνδυάζονται με μεθόδους επιμερισμού της ρύπανσης στις πηγές εκπομπής – προέλευσης της για τον καθορισμό της συνεισφοράς κάθε πηγής στην συνολική έκθεση του ανθρώπου (source apportionment).

Ο στόχος και για τον οποίο κατασκευάζεται ένα μοντέλο έκθεσης και το πεδίο μελέτης (ρύπος, περιοχή, μέσο και τρόπος έκθεσης, χρονικό πλαίσιο – βραχυχρόνια ή μακροχρόνια έκθεση) καθορίζουν το εύρος και την λεπτομέρεια που θα χρησιμοποιηθεί στον προσδιορισμό της έκθεσης. Στα μοντέλα έκθεσης μέσω της εισπνοής ρύπων που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα η έκθεση γενικά έχει διαχωριστεί σε τρεις κύριους τύπους: έκθεση σε εξωτερικό χώρο, έκθεση σε εσωτερικό χώρο εξαιτίας της εισχώρησης του ατμοσφαιρικού αέρα εντός του κτιρίου και έκθεση σε εσωτερικούς χώρους λόγω της ύπαρξης εσωτερικών πηγών ρύπανσης. Η έκθεση σε

εσωτερικό χώρο συνήθως αναφέρεται σε έκθεση σε γραφείο, κατοικία, μέσα μεταφοράς. Οι εξωτερικές συγκεντρώσεις συχνά προέρχονται από σταθμούς μέτρησης εισάγοντας έτσι σημαντικό σφάλμα στον υπολογισμό της πραγματικής έκθεσης η οποία υπολογίζεται συνδυάζοντας πληροφορίες κινητικότητας του πληθυσμού σε διάφορα μικροπεριβάλλοντα και της συγκέντρωσης του ρύπου σε αυτά. Η θέση του πληθυσμού στην περιοχή μελέτης προσδιορίζεται βάσει πληροφοριών που αφορούν τις ημερήσιες δραστηριότητες του πληθυσμού της περιοχής και προέρχονται από στατιστικές μελέτες ή θεωρείται ακίνητος ή μόνιμα εγκατεστημένος σε μια θέση. Η έκθεση που υπολογίζεται με την χρήση σεναρίων μπορεί να διαφέρει σημαντικά από την ατομική έκθεση γιατί (α) όταν χρησιμοποιούνται ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις ΑΣ δεν περιλαμβάνει την επίδραση των ΑΣ που παράγονται από πηγές στον εσωτερικό χώρο (β) μπορεί να γίνεται σε πολλά διαφορετικά περιβάλλοντα, και (γ) η συγκέντρωση στην περιοχή εισπνοής του ατόμου μπορεί να διαφέρει πολύ από την εσωτερική συγκέντρωση εξαιτίας των δραστηριοτήτων του ατόμου.

Επιπλέον αν και η διαδικασία της αποτίμησης της έκθεσης στα πλαίσια του χαρακτηρισμού του κινδύνου πρέπει να περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της εσωτερικής, απορροφούμενης και βιολογικά ενεργούς δόσης για τον καθορισμό της επίπτωσης στην υγεία τα μοντέλα περιορίζονται στον καθορισμό των συγκεντρώσεων και της διάρκειας της έκθεσης. Συχνά δεν περιλαμβάνουν την έκθεση σε εσωτερικούς χώρους και επιπλέον τα μοντέλα διασποράς που χρησιμοποιούν δεν λαμβάνουν υπόψη την μορφολογία της περιοχής και την χημεία του ρύπου. Τα περισσότερα από τα μοντέλα έκθεσης που έχουν αναπτυχθεί και δίνονται από την EPA δεν αφορούν έκθεση σε σωματίδια. Ο Price κ.α. (2003) δίνει μια σύνοψη των παραπάνω μοντέλων. Ορισμένα από τα πιο ολοκληρωμένα μοντέλα έκθεσης/δόσης που έχουν αναπτυχθεί είναι:

- Το σύστημα AIRQUIS (Clench-Aas κ.α., 1999α, 1999β, 1999γ; Walker κ.α., 1999; Guerreiro κ.α., 1999; Bartonova κ.α., 1999) είναι ένα εμπορικό σύστημα διαχείρισης της ποιότητας του αέρα βασισμένο σε γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών (ΓΣΠ; GIS) που αναπτύχθηκε από το Νορβηγικό Ινστιτούτο Ατμοσφαιρικών Ερευνών (NILU). Στόχοι του συστήματος είναι η παρουσίαση δεδομένων ποιότητας αέρα σε πραγματικό χρόνο, η παροχή πληροφοριών σε σχέση με την έκθεση σε ατμοσφαιρικούς ρύπους και η δυνατότητα ανάπτυξης επικερδών στρατηγικών μείωσης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Μέχρι πρόσφατα το μοντέλο δεν περιλάμβανε μοντέλο έκθεσης αλλά ήταν απλά ένα σύστημα διαχείρισης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (αυτόματη λήψη δεδομένων ποιότητας αέρα και μετεωρολογίας από δίκτυο σταθμών μέτρησης (GPS) και επεξεργασία τους, μοντέλο διασποράς και πρόβλεψη επεισοδίων ρύπανσης (EPISODE - CO, NO_x, NO₂, SO₂, Cl₂, ΑΣ_{2,5}, ΑΣ₁₀), μητρώο εκπομπών (Οδικές μεταφορές, κεντρική θέρμανση, πλοία, βιομηχανία – Αναθεώρηση σε ετήσια βάση), ανάλυση κόστους διαφορετικών σεναρίων μείωσης εκπομπών και εφαρμογής μέτρων μείωσης της ρύπανσης). Δημοσιεύσεις εφαρμογών των επιμέρους τμημάτων του μοντέλου κατά το 1999 αναφέρουν ότι για τον υπολογισμό της έκθεσης του πληθυσμού το AIRQUIS περιλαμβάνει βάση δεδομένων με πολεοδομική-κτιριακή πληροφορία (θέση κτιρίων, πλήθος ορόφων) και πυκνότητα

πληθυσμού (αριθμός κατοίκων κάθε κτιρίου). Ειδικότερα η έκθεση κάθε ατόμου προκύπτει συνδυάζοντας τα αποτελέσματα του μοντέλου διασποράς (οι συντεταγμένες των κτιρίων στο χάρτη δίνονται ως θέσεις αποδεκτών) με τις πληροφορίες για τον πληθυσμό σε βραχυχρόνια (DINEX- συμπλήρωση ημερολογίων δραστηριότητας) και μακροχρόνια βάση (SPINEX). Τα αποτελέσματα του μοντέλου όσον αφορά στις ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις διορθώνονται στις περιοχές γύρω από τους σταθμούς μέτρησης. Οι εφαρμογές του (όσες έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία) αφορούν την έκθεση ενηλίκων σε βιομηχανική περιοχή, την έκθεση ενηλίκων λόγω οδικών μετακινήσεων και την έκθεση παιδιών στο Όσλο και την περιοχή Grenland της Νορβηγίας. Το μοντέλο σήμερα βρίσκεται υπό ανάπτυξη-εξέλιξη κυρίως όσον αφορά στην έκθεση και τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων έκθεσης σε μικροπεριβάλλοντα.

- Το Individual Exposure Model (Wu κ.α., 2005) αναπτύχθηκε για τον υπολογισμό της μακροχρόνιας έκθεσης των παιδιών στην Νότια Καλιφόρνια σε CO, NO₂, AΣ₁₀, AΣ_{2,5} και EC που προέρχονται από εκπομπές στο εξωτερικό περιβάλλον. Οι συγκεντρώσεις των ρύπων υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη τις εκπομπές από οχήματα (CALINE4) και από μεταφορά των ρύπων από άλλες περιοχές (SMOG). Η συγκέντρωση σε εσωτερικούς χώρους υπολογίζεται με ισοζύγιο μάζας θεωρώντας ότι δεν υπάρχουν πηγές. Η συγκέντρωση εντός οχημάτων προέρχεται από μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί για την περιοχή ενώ τα δεδομένα σχετικά με το ημερολόγιο δραστηριοτήτων των παιδιών προέρχονται από την μελέτη Southern California Children's Health Study.
- The Sheds-PM (Burke κ.α., 2001) είναι ένα στοχαστικό μοντέλο υπολογισμού της έκθεσης ενός ατόμου σε ατμοσφαιρικά AΣ και σε AΣ σε εσωτερικούς χώρους. Για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων σε κατοικίες χρησιμοποιεί ένα απλό μοντέλο ισοζυγίου μάζας σε σταθερή κατάσταση. Το ημερολόγιο δραστηριοτήτων του εκτεθειμένου ατόμου λαμβάνεται από την βάση δεδομένων CHAD (Mc Curdy κ.α., 2000). Το μοντέλο έχει πλέον ενσωματωθεί στο σύστημα MENTOR/SHEDS (Modeling Environment for Total Risk studies linked with the Stochastic Simulation of Human Exposure and Dose System) που αναπτύσσεται συνεχώς με την υποστήριξη της Αμερικανικής Υπηρεσίας Περιβάλλοντος (US EPA) (Georgopoulos και Liou, 2006). Πρόκειται για ένα μοντέλο που παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού της έκθεσης από οποιοδήποτε μέσο (έδαφος, ατμόσφαιρα, νερό) και με οποιοδήποτε τρόπο (εισπνοή, κατάποση, δερματική επαφή, έγχυση). Το σύστημα περιλαμβάνει πλήθος βάσεων δεδομένων της EPA για τη δημιουργία σεναρίων έκθεσης (π.χ. από τα αποτελέσματα της μελέτης RIOPA; Weisel κ.α., 2005; Turpin κ.α., 2007), και διάφορα επιμέρους μοντέλα ενώ χρησιμοποιεί το πρόγραμμα ArcGIS για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων του χωρικά. Ορισμένες εφαρμογές του για έκθεση σε AΣ είναι οι Georgopoulos κ.α. (2005, 2006). Το σύστημα MENTOR έχει επιπλέον εννοποιηθεί με το σύστημα DORIAN (Dose Response Information Analysis System; Environmental and Occupational Health Sciences Institute) για τον προσδιορισμό των επιπτώσεων από τη έκθεση στην υγεία (Georgopoulos, 2008).

- Άλλα αιτιοκρατικά μοντέλα έκθεσης της US EPA είναι τα APEX (Air Pollution Exposure Model, του συστήματος TRIM.expo, the Total Risk Integrated Methodology system; Palma κ.α., 1999 και US EPA, 2008), HAPEM6 (Hazardous Air Pollutant Exposure Model; US EPA, 2007α), HEM3 και HEM-Screen (Human Exposure Model; US EPA, 2007β), το ASPEN (ASSESSMENT SYSTEM FOR POPULATION EXPOSURE NATIONWIDE; US EPA, 2000). Στα παραπάνω μοντέλα ο υπολογισμός των συγκεντρώσεων έκθεσης γίνεται για τον εξωτερικό χώρο με μοντέλο διασποράς (με εξαίρεση το μοντέλο HAPEM). Ο υπολογισμός της έκθεσης γίνεται για εξωτερικό χώρο και σε όσα περιλαμβάνεται υπολογισμός δόσης αφορά κυρίως στην δυνητική δόση ή σε σωματίδια συγκεκριμένης χημικής σύστασης. Τα μοντέλα αυτά είναι ελεύθερα διαθέσιμα, ωστόσο έχουν αναπτυχθεί στα πλαίσια συγκεκριμένων εφαρμογών και δεν είναι φιλικά προς το χρήστη από την εγκατάσταση του λογισμικού έως τη χρήση και την μορφοποίηση των αρχείων εισόδου.
- Το μοντέλο EXPAND των Kousa, κ.α. (2002α και 2002β) συνδυάζει αποτελέσματα μελετών έκθεσης στο Ελσίνκι (ημερολόγια δραστηριοτήτων κ.α. EXPOLIS study; Jantunen, 1998) με μοντέλα διασποράς ρύπων από την οδική κυκλοφορία και από στατικές πηγές ρύπανσης, μετεωρολογικά δεδομένα και τη χρήση ΓΠΣ. Ωστόσο το μοντέλο διασποράς που χρησιμοποιείται για τις γραμμικές πηγές ρύπανσης δεν λαμβάνει υπόψη την μορφολογία της γύρω περιοχής στην εξάπλωση του πλουμίου, αφορά μόνο στον υπολογισμό της έκθεσης πληθυσμού, δεν περιλαμβάνει μοντέλο υπολογισμού δόσης και επιπλέον δεν περιλαμβάνει μοντέλο υπολογισμού συγκεντρώσεων σε μικροπεριβάλλοντα αλλά θεωρεί ότι οι συγκεντρώσεις έκθεσης μπορούν να οριστούν βάσει του μέσου λόγου εσωτερικής προς εξωτερικής συγκέντρωσης. Χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της έκθεσης των κατοίκων στο Ελσίνκι.

1.2. Στόχοι της εργασίας και ανάπτυξη της

Ο κύριος στόχος της διδακτορικής διατριβής είναι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος υποστήριξης αποφάσεων για την εκτίμηση της έκθεσης και δόσης, δυνητικής, εφαρμοσμένης (εναποτιθέμενης) και εσωτερικής, του ανθρώπου σε ατμοσφαιρικά αιωρούμενα σωματίδια. Επιπλέον στόχοι είναι:

- Η αξιολόγηση της επίδρασης των πηγών εσωτερικών χώρων και εξωτερικών στην έκθεση και δόση αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα.
- Η αξιολόγηση της επίδρασης της φυσιολογίας του εκτεθειμένου ατόμου στην έκθεση και δόση αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό του σύστημα.

Το σύστημα STEDOM (Sources Transport Exposure DOse Model) που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μπορεί να αντιμετωπίσει ολοκληρωμένα το πρόβλημα της διαχείρισης της ποιότητας του αέρα, όσον αφορά σε αιωρούμενα σωματίδια, καθώς περιλαμβάνει εργαλεία για τον υπολογισμό των εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων και

αερίων ρύπων στην ατμόσφαιρα (μονάδα λογισμικού Sources; ανθρωπογενείς και φυσικές πηγές, υπολογισμός και χωρική, χρονική και χημική διάκριση των εκπομπών), την μεταφορά/μετατροπή και συσσώρευση τους στο περιβάλλον (μονάδα λογισμικού Transport συνδεδεμένη με το μοντέλο ISC3LT της Αμερικανικής Υπηρεσίας Περιβάλλοντος), τον υπολογισμό της έκθεσης και δόσης (εφαρμοσμένης και της εσωτερικής) αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα κάτω από διάφορες συνθήκες (μονάδα λογισμικού ExDoM; σενάρια δραστηριότητας και έκθεσης ατόμου, απλό μικροπεριβαλλοντικό μοντέλο σταθερής κατάστασης, ανάλυση αποδεκτών, και τροποποιημένο το μοντέλο HRTM της ICRP). Τα παραπάνω τμήματα του συστήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανεξάρτητα (αυτόνομη χρήση) ή διαδοχικά και συνδέονται από γεωγραφικό περιβάλλον χρήστη που περιλαμβάνει λειτουργίες γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών. Η διατριβή επικεντρώθηκε στην κατανόηση της επίδρασης των φυσικών και χημικών χαρακτηριστικών των σωματιδίων στην έκθεση, δόση και απομάκρυνση τους από το ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα καθώς και στη σχέση ατμοσφαιρικής, εσωτερικής και ατομικής έκθεσης μέσα από συγκεκριμένα παραδείγματα (εφαρμογές). Αναλυτικότερα, οι ενέργειες που πραγματοποιήθηκαν για την επίτευξη των παραπάνω στόχων στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής είναι:

- Δημιουργία μοντέλου για τον υπολογισμό της έκθεσης ατόμου μέσω εισπνοής σε ατμοσφαιρικά αιωρούμενα σωματίδια και συστατικά τους υπό συνθήκες μεταβαλλόμενης συγκέντρωσης, περιβάλλοντος έκθεσης και δραστηριοτήτων του εκτεθειμένου ατόμου.
- Δημιουργία μοντέλου για τον υπολογισμό της προβλεπόμενης και εφαρμοσμένης δόσης στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα από την εισπνοή σωματιδίων και συγκεκριμένων χημικών συστατικών τους. Ο αλγόριθμος στηρίζεται στο μοντέλο εναπόθεσης ραδιενεργών σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα της ICRP και περιλαμβάνει τροποποιήσεις όσον αφορά στον υπολογισμό της προβλεπόμενης δόσης, της διαχείρισης της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων και της χημικής τους σύστασης. Επιπλέον περιλαμβάνει τον υπολογισμό της εφαρμοσμένης δόσης.
- Δημιουργία μοντέλου για τον υπολογισμό της απομάκρυνσης σωματιδίων από το ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα και τον υπολογισμό της εσωτερικής δόσης στους ιστούς του αναπνευστικού συστήματος, στο γαστρεντερικό σύστημα και το αίμα. Ο αλγόριθμος στηρίζεται στο μοντέλο καθαρισμού ραδιενεργών σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα της ICRP και περιλαμβάνει τροποποιήσεις για τον υπολογισμό της δόσης ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων που απομακρύνονται με βραδύ ρυθμό από το αναπνευστικό σύστημα.
- Δημιουργία μοντέλου για τον υπολογισμό των εκπομπών βιογενών υδρογονανθράκων (ισοπρενίου, τερπενίων και ΑΒΠΟΕ) βάσει στοιχείων εδαφοκάλυψης (landcover). Βιβλιογραφική μελέτη για την εύρεση των κατάλληλων συντελεστών για την ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, και υπολογισμός των εκπομπών για συγκεκριμένη χρονική περίοδο.
- Δημιουργία μοντέλου για τον υπολογισμό των εκπομπών επαναιωρούμενης σκόνης στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας βάσει στοιχείων εδαφοκάλυψης (landcover) και εδαφικών χαρακτηριστικών, και υπολογισμός τους για συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

- Δημιουργία αλγορίθμου για την αναγωγή των ανθρωπογενών εκπομπών του EMEP (πολική στερεογραφική προβολή, οριζόντια διακριτότητα $50 \times 50 \text{ km}^2$) σε πλέγμα υψηλότερης χωρικής ανάλυσης. Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιεί δεδομένα εδαφοκάλυψης, πυκνότητας πληθυσμού, τοποθεσίας και ποσότητας έκλυσης ρύπων από μεγάλες σημειακές πηγές και συντελεστές βαρύτητας για κάθε κατηγορία πηγής και εδαφοκάλυψης. Εφαρμογή για τις εκπομπές του έτους 2007 στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας.
- Σχεδιασμός και πραγματοποίηση μελέτης έκθεσης ατόμου σε ατμοσφαιρικά αιωρούμενα σωματίδια στην περιοχή του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η μελέτη περιλάμβανε την πραγματοποίηση σταθμικών μετρήσεων της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων στον μετεωρολογικό σταθμό του εργαστηρίου ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος για την περίοδο 11-18 Δεκεμβρίου 2007. Επιπλέον, περιλάμβανε την πραγματοποίηση μετρήσεων εσωτερικής και εξωτερικής συγκέντρωσης ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων σε κατοικία που βρίσκεται στα όρια της Πολυτεχνειούπολης για την ίδια περίοδο, και μετρήσεων ατομικής έκθεσης σε αναπνεύσιμα σωματίδια στην περιοχή του Πολυτεχνείου, στο κτίριο του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος, στην κατοικία και κατά τη μεταφορά από και προς αυτή στο Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Επεξεργασία των μετρήσεων πεδίου σωματιδίων και αερίων ρύπων σε δύο κατοικίες στο Όσλο Νορβηγίας για την μελέτη της επίδρασης συγκεκριμένων παραμέτρων στην συγκέντρωση, έκθεση και δόση σωματιδίων και χημικών συστατικών τους. Για τον υπολογισμό της έκθεσης και δόσης χρησιμοποιήθηκε σενάριο δραστηριότητας. Για την δημιουργία του σεναρίου, πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική μελέτη για την εύρεση του τυπικού προφίλ ημερήσιας δραστηριότητας των Νορβηγών, και του χρόνου παραμονής τους σε διαφορετικά περιβάλλοντα.
- Δημιουργία μοντέλου για την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων κατανομής μεγέθους μάζας σωματιδίων ώστε να μπορούν να εισαχθούν στο μοντέλο έκθεσης-δόσης.
- Δημιουργία εργαλείου για την στατιστική επεξεργασία των τροχιών των αερίων μαζών τους σε συνδυασμό με τις παρατηρούμενες συγκεντρώσεις σωματιδίων στο εξωτερικό περιβάλλον για την αναγνώριση από τον χρήστη των ακραίων τιμών συγκεντρώσεων που πιθανώς να οφείλονται σε επεισόδια σκόνης από την Βόρεια Αφρική ή/και σε μεταφορά αερίων μαζών από αστικές, βιομηχανικές, απομακρυσμένες περιοχές. Το παραπάνω, σε συνδυασμό με την ανάλυση αποδεκτών με την υλοποίηση του αλγορίθμου ORFA-PNNC παρέχουν ένα εργαλείο για την εύρεση των πηγών ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων στην περιοχή μελέτης. Το πρόγραμμα χρησιμοποιήθηκε στις εφαρμογές στο Όσλο και στην περιοχή του Πολυτεχνείου Κρήτης.
- Δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος σε VB.net για την επιλογή/εισαγωγή παραμέτρων στο μοντέλο ExDoM, την δημιουργία πλέγματος και αρχείων εισόδου για τα μοντέλα Sources

και Transport και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων τους με τη μορφή χαρτών (χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό MapObjects της ESRI).

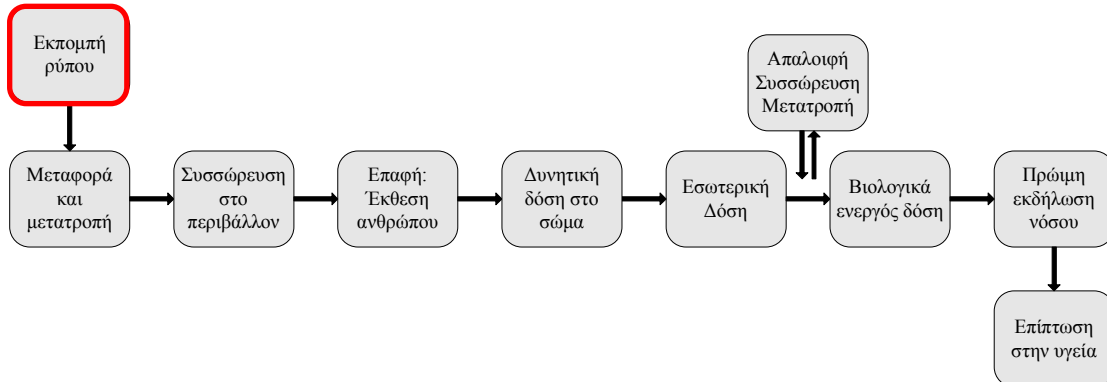
Το μοντέλο STEDOM εξετάζει τα πρώτα αλυσιδωτά βήματα της πορείας που ακολουθούν τα ΑΣ και οδηγεί στις επιπτώσεις τους στην ανθρώπινη υγεία, ξεκινώντας από την εκπομπή τους έως και τον υπολογισμό της εσωτερικής δόσης τους (Εικόνα 1). Στην εργασία παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθείται στο σύστημα, αξιολογούνται τα αποτελέσματα του και η χρήση του διερευνάται μέσα από εφαρμογές. Συγκεκριμένα, στο πρώτο μέρος της εργασίας γίνεται ανάπτυξη του θεωρητικού υποβάθρου και αναπτύσσεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιεί το μοντέλο STEDOM. Αναλυτικότερα, στο κεφάλαιο 2 εξετάζεται το πρώτο βήμα της πορείας που αφορά στην εκπομπή ΑΣ και αερίων ρύπων στην ατμόσφαιρα. Γίνεται μια εισαγωγή στα μητρώα εκπομπών και παρουσιάζεται μια σύντομη ανασκόπηση της μεθοδολογίας που εφαρμόζεται για την κατασκευή τους στην Ευρώπη. Αναπτύσσεται η μεθοδολογία υπολογισμού, χωρικής, χρονικής και χημικής διάκρισης των φυσικών και ανθρωπογενών εκπομπών που χρησιμοποιεί το μοντέλο Sources. Στο κεφάλαιο 3 εξετάζονται τα βήματα που αφορούν στην μεταφορά και μετατροπή του ρύπου και τη συσσώρευση του στο περιβάλλον. Παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο του μοντέλου διασποράς ISC3LT που χρησιμοποιεί το μοντέλο Transport του συστήματος STEDOM και αναπτύσσεται ο τρόπος σύνδεσης του με το μητρώο εκπομπών που προκύπτει από το μοντέλο Sources. Επιπλέον παρουσιάζεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται στο μοντέλο για την εύρεση των συγκεντρώσεων σταθερής κατάστασης σε εσωτερικούς χώρους καθώς και τα εργαλεία ανάλυσης αποδεκτών και ανάλυσης των τροχιών των αερίων μαζών. Το Κεφάλαιο 4 αφορά στην έκθεση και δόση ΑΣ στο ΑΑΣ. Αρχικά περιγράφεται το ΑΑΣ και συγκεκριμένα η ανατομία και φυσιολογία του, μοντέλα μορφολογίας του και ο τρόπος ροής του αέρα μέσα από αυτό. Στη συνέχεια αναλύονται οι μηχανισμοί εναπόθεσης ΑΣ και γίνεται ανασκόπηση του τρόπου υπολογισμού του εναποτιθέμενου κλάσματος ΑΣ σε υφιστάμενα μοντέλα. Ακολουθεί η παρουσίαση των μηχανισμών μεταφοράς/απομάκρυνσης των ΑΣ στο ΑΑΑΣ και του τρόπου υπολογισμού της απομάκρυνσης ΑΣ σε υφιστάμενα μοντέλα. Τέλος δίνεται η μεθοδολογία του μοντέλου υπολογισμού της εφαρμοσμένης και εσωτερικής δόσης ΑΣ στο ΑΑΣ ExDoM που αναπτύχθηκε ως τμήμα του STEDOM και γίνεται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας, Κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται τρεις εφαρμογές του συστήματος STEDOM. Σε κάθε εφαρμογή παρουσιάζονται επιπλέον στοιχεία για τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, οι πειραματικές μετρήσεις, και συνοπτικά τα αποτελέσματα και συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτές. Αρχικά (ενότητα 5.1) παρουσιάζεται εφαρμογή της μονάδας Sources του συστήματος στην εκτίμηση των εκπομπών από φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές στην ευρύτερη περιοχή Αθηνών το έτος 2007 και κατά μια χειμερινή ημέρα του 2008. Προσδιορίζονται οι κύριες πηγές ΑΣ στην ΕΠΑ, εξετάζεται η εγκυρότητα του μητρώου εκπομπών EMEP όσον αφορά στις εκπομπές από τη γεωργία, και η συνεισφορά των φυσικών πηγών στις συνολικές εκπομπές στην ΕΠΑ. Στη συνέχεια η μονάδα ExDoM του μοντέλου

εφαρμόζεται σε μελέτη έκθεσης στο Όσλο, Νορβηγίας (ενότητα 5.2) και στην περιοχή του Πολυτεχνείου Κρήτης (ενότητα 5.3). Αξιολογείται η επίδραση των μετεωρολογικών συνθηκών, της διείσδυσης του εξωτερικού αέρα στον εσωτερικό χώρο, των πηγών εσωτερικών και εξωτερικών χώρων, των φυσικών (διαστάσεις, κατανομή μεγέθους) και χημικών (σύσταση, προέλευση) χαρακτηριστικών των σωματιδίων, και της φυσιολογίας του ατόμου στην έκθεση και δόση ΑΣ και συστατικών τους στο ΑΑΣ και εξετάζεται η σχέση ατμοσφαιρικής, εξωτερικής, εσωτερικής και ατομικής συγκέντρωσης έκθεσης και της αντίστοιχης δόσης στο ΑΑΣ. Τέλος στο Κεφάλαιο 6 συνοψίζεται η συνεισφορά της παρούσας εργασίας και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτή όσον αφορά στη χρήση του μοντέλου αλλά και στις εκπομπές ΑΣ και στην επίδραση διαφόρων παραμέτρων στην έκθεση και δόση ΑΣ στο ΑΑΣ στα χωρικά και χρονικά πλαίσια των μελετών έκθεσης που πραγματοποιήθηκαν.

2. ΠΗΓΕΣ ΚΑΙ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ



Οι ρύποι που προκαλούν επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον εξαιτίας της τοξικότητάς τους εκλύονται αρχικά στην ατμόσφαιρα από φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές. Έτσι, το πρώτο βήμα για την αποτελεσματική λύση των προβλημάτων αέριας ρύπανσης και την αντιμετώπιση των επιπτώσεων της στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον είναι η εκτίμηση της έκλυσης ρύπων στην ατμόσφαιρα. Συγκεκριμένα, χρειάζεται μια πλήρη εικόνα των πηγών έκλυσης, της ποσότητας και του τύπου των ρύπων που εκπέμπονται σε μια περιοχή. Οι ρύποι εκλύονται τόσο από ανθρωπογενείς πηγές, όπως για παράδειγμα οι εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, οι βιομηχανίες, η θέρμανση κτιρίων και τα οχήματα, όσο και από φυσικές πηγές όπως η βλάστηση, το έδαφος, οι ωκεανοί.

Οι πληροφορίες για τις πηγές, τον τύπο και την ποσότητα ρύπων που εκλύονται σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους καταγράφονται σε απογραφές-μητρώα εκπομπών (emission inventories). Τα μητρώα εκπομπών ρύπων στην ατμόσφαιρα μιας περιοχής είναι σημαντικά εργαλεία για την διαχείριση της ποιότητας του αέρα, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εύρεση των σημαντικότερων πηγών ρύπανσης σε μια περιοχή όπου υπερβαίνονται τα όρια ποιότητας αέρα. Επιπλέον, μαζί με τα μοντέλα ποιότητας αέρα χρησιμοποιούνται στην εκτίμηση των επιπτώσεων συγκεκριμένων ανθρώπινων δραστηριοτήτων σε μια περιοχή και στην ανάπτυξη και εκτίμηση των αποτελεσμάτων στρατηγικών μείωσης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Placet κ.α., 2000; Winiwarter κ.α., 2009; Karl κ.α., 2009).

Για την δημιουργία ενός μητρώου εκπομπών θα έπρεπε να μετρηθεί η έκλυση ρύπων από κάθε πηγή στην περιοχή ενδιαφέροντος. Ωστόσο αυτό είναι πρακτικά αδύνατο εξαιτίας των πόρων

που απαιτεί αλλά και της φύσης ορισμένων πηγών (ανεξέλεγκτες πηγές). Έτσι οι εκπομπές συνήθως υπολογίζονται με τη βοήθεια συντελεστών εκπομπής, που έχουν προκύψει από μετρήσεις σε αντιπροσωπευτικές πηγές κάθε κατηγορίας, και των αντίστοιχων στοιχείων για τη δραστηριότητα της πηγής (π.χ. κατανάλωση καυσίμου, παραγόμενες μονάδες). Στα μητρώα εκπομπών οι πηγές συνήθως ταξινομούνται σε σημειακές, εμβαδικές και γραμμικές βάσει της φύσης της πηγής (π.χ. οι θερμικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής είναι σημειακές πηγές ενώ οι δρόμοι γραμμικές) και της χωρικής διάστασης με την οποία εισάγονται στα μοντέλα ποιότητας αέρα. Για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μοντέλα ποιότητας αέρα θα πρέπει να περιλαμβάνουν επιπλέον στοιχεία για την τοποθεσία των πηγών και την κατανομή των εκπομπών στο χρόνο.

Ανάλογα με τα διαθέσιμα στοιχεία και την χρήση του, ένα μητρώο εκπομπών μπορεί να κατασκευαστεί με δύο τρόπους, από την κορυφή προς τη βάση (top-down) και από τη βάση προς την κορυφή (bottom-up). Σε ένα μητρώο που έχει κατασκευασθεί με τον πρώτο τρόπο, ο υπολογισμός των εκπομπών γίνεται με τη μέθοδο των συντελεστών εκπομπής και «χονδρικών» στατιστικών στοιχείων. Επιπλέον, αν και δεν περιέχει λεπτομέρειες για την τοποθεσία και την ποσότητα έκλυσης των ρύπων χωριστά από κάθε πηγή, και έχει περιορισμένη χωρική και χρονική διακρίσιμότητα, παρέχει μια πρώτη εικόνα των εκπομπών στην περιοχή ενδιαφέροντος. Από την άλλη μεριά ένα μητρώο εκπομπών κατασκευασμένο από τη βάση προς την κορυφή, αν και βασίζεται στον ίδιο τρόπο υπολογισμού, περιέχει περισσότερες λεπτομέρειες για τους τύπους των πηγών, την τοποθεσία, τις εκπομπές και την δραστηριότητα/κατανάλωση τους, και την κατανομή αυτών στο χρόνο.

Στην Ευρώπη, από το 1985 υπάρχει η μεθοδολογία υπολογισμού των εκπομπών CORINAIR (CORe INventory AIR emissions – Απόφαση Συμβουλίου 85/338/ΕΟΚ) για την κατασκευή μητρώων αερίων εκπομπών. Η μεθοδολογία αυτή περιγράφεται στον Οδηγό απογραφής αερίων εκπομπών EMEP/CORINAIR που ανανεώνεται τακτικά (τελευταία ανανέωση 3^η έκδοση, Ιούνιος 2009; EMEP/EEA, 2009). Επιπλέον, στα πλαίσια του οδηγού EMEP/CORINAIR ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος (ΕΕΑ) και το Ευρωπαϊκό Θεματικό Κέντρο για την Ατμόσφαιρα και την Αλλαγή του Κλίματος (European Topic Centre on Air and Climate Change) έχουν αναπτύξει, και διαθέτουν ελεύθερα, εφαρμογές λογισμικού για την δημιουργία μητρώων εκπομπής ρύπων στην ατμόσφαιρα των Ευρωπαϊκών χωρών. Αυτά τα εργαλεία τυποποιούν τις διαδικασίες συλλογής των απαραίτητων δεδομένων, υπολογισμού των εκπομπών και υποβολής ετήσιων εκθέσεων σύμφωνα με τις απαιτήσεις των διεθνών συμβάσεων και της νομοθεσίας της ΕΕ.

Αναλυτικότερα, η Ελλάδα όπως και οι υπόλοιπες Ευρωπαϊκές χώρες, παραδίδει ετησίως στοιχεία αερίων εκπομπών στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή στα πλαίσια της σύμβασης της οικονομικής επιτροπής για την Ευρώπη των Ηνωμένων Εθνών για τη διασυνοριακή ατμοσφαιρική ρύπανση μεγάλης απόστασης (UNECE/CLRTAP: UN Economic Commission for

Europe/ Convention on Long-range Transboundary Air Pollution). Επιπλέον μέσω του μηχανισμού παρακολούθησης της ΕΕ για τα αέρια του θερμοκηπίου, παραδίδει στοιχεία εκπομπών σύμφωνα με τη σύμβαση πλαισίου των Ηνωμένων Εθνών για τις κλιματικές μεταβολές (UNFCCC: UN Framework Convention on Climate Change). Ακόμα στα πλαίσια της οδηγίας για την ολοκληρωμένη πρόληψη και έλεγχο της ρύπανσης (IPPC: Integrated pollution prevention and control; Οδηγία 2008/1/EK) παραδίδει στον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος για το Ευρωπαϊκό μητρώο έκλυσης και μεταφοράς ρύπων (E-PRTR: European Pollutant Release and Transfer Register; Κανονισμός 166/2006/EK; E-PRTR, 2009), πληροφορίες για τις εκπομπές ρύπων στον ατμοσφαιρικό αέρα, στα ύδατα και στο έδαφος από μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Επιπλέον, κάθε 5 έτη στα πλαίσια του προγράμματος συνεργασίας για τη συνεχή παρακολούθηση και εκτίμηση της μεταφοράς σε μεγάλη απόσταση ατμοσφαιρικών ρύπων στην Ευρώπη (EMEP/LRTAP) δίνει χωρικά καταναμημένες εκπομπές στο πλέγμα του EMEP (κελιά 50x50 km²; για το έτος 2005 κατατέθηκαν το Σεπτέμβριο του 2009). Οι πηγές ρύπων στα μητρώα που συντάσσονται για τους παραπάνω σκοπούς διακρίνονται σε 6 κατηγορίες με 25 υποκατηγορίες (IPCC/CRF) για το πρόγραμμα UNFCCC, 6 κατηγορίες με 5 υποκατηγορίες η καθεμιά (NFR) για το πρόγραμμα UNECE/CLRTAP, σε 11 κατηγορίες (SNAP) για το πρόγραμμα EMEP/LRTAP και σε 9 με διάφορες υποκατηγορίες για το μητρώο E-MEMP. Οι κατηγορίες διαφέρουν αρκετά ωστόσο για τις υποκατηγορίες των διαφόρων ταξινομήσεων μπορεί να γίνει μεταξύ τους αντιστοίχιση (UN, 2009).

Η Ελλάδα στα στοιχεία που παραδίδει έως σήμερα περιλαμβάνονται οι εκπομπές από τις περισσότερες ανθρώπινες δραστηριότητες. Έτσι, στα πλαίσια της εργασίας δεν εξετάζεται ο υπολογισμός των εκπομπών από ανθρωπογενείς πηγές αλλά παρουσιάζεται ένας τρόπος αξιοποίησης των παραπάνω στοιχείων για την εξαγωγή μητρώων εκπομπών με κατάλληλη χωρική, χρονική και χημική ανάλυση για την εισαγωγή τους σε μοντέλα διασποράς ή φωτοχημικά μοντέλα ποιότητας του αέρα. Η μεθοδολογία που παρουσιάζεται σε απλουστευμένη μορφή (χρήση μόνο της κατανομής πληθυσμού και στοιχείων εδαφοκάλυψης) έχει εφαρμοστεί σε παλαιότερες εκτιμήσεις της χωρικής κατανομής των εκπομπών στην Ελλάδα με ικανοποιητικά αποτελέσματα (Aleksandropoulou κ.α., 2004; Spyridaki κ.α., 2006; Lazaridis κ.α., 2008β). Η μεθοδολογία έχει πλέον τροποποιηθεί ώστε να μπορεί να αξιοποιήσει τα νέα ανοιχτά προς το κοινό στοιχεία που διατίθενται από την ΕΕΑ και για κάποιες κατηγορίες πηγών συμφωνεί με τον Οδηγό χωρικής απόδοσης των εκπομπών που δημοσιεύτηκε στον νέο Οδηγό απογραφής αέριων εκπομπών (έκδοση 2009). Σημειώνεται πως στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται μόνο ο υπολογισμός της έκλυσης εκπομπών αμμωνίας (NH₃) από τις καλλιέργειες και την εκτροφή των ζώων επειδή στην βάση δεδομένων του EMEP οι τιμές είναι πολύ μικρές. Επιπλέον εξετάζεται ο υπολογισμός των εκπομπών από φυσικές πηγές που έως σήμερα δεν περιλαμβάνονται στα στοιχεία που παραδίδει η Ελλάδα. Συγκεκριμένα εξετάζεται ο υπολογισμός των εκπομπών από τη βλάστηση (τροποποιημένη η μεθοδολογία CORINAIR), το έδαφος (μόνο για τα σωματίδια) και την θάλασσα (δεν περιλαμβάνονται στον οδηγό απογραφής αερίων εκπομπών). Ο υπολογισμός των εκπομπών από φυσικές πηγές είναι σημαντικός

ιδιαίτερα μετά την έκδοση της Οδηγίας 2008/50/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και Συμβουλίου για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και καθαρότερα αέρα για την Ευρώπη. Σύμφωνα με την παραπάνω Οδηγία οι εκπομπές από φυσικές πηγές μπορούν παραδίδονται χωριστά και να λαμβάνονται υπόψη σε περιπτώσεις υπέρβασης των οριακών τιμών συγκεντρώσεων.

Σημειώνεται ότι για την εφαρμογή με εύχρηστο τρόπο της μεθοδολογίας που παρουσιάζεται, δημιουργήθηκε η μονάδα λογισμικού Sources σε Visual studio 2008 (VB.NET) (Windows OS) με χρήση του εργαλείου MapObjects της ESRI για την ανάπτυξη ΓΠΣ. Η εφαρμογή Sources εκτελεί τις λειτουργίες δημιουργίας του πλέγματος, υπέρθεσης των δεδομένων, απεικόνισης των αποτελεσμάτων και εξαγωγής των χαρτών σε μορφή εικόνας που αναφέρονται στις επόμενες παραγράφους.

2.1. Εκτίμηση και χωρική κατανομή των εκπομπών ρύπων στην ατμόσφαιρα από ανθρωπογενείς πηγές

Δεδομένα εθνικών εκπομπών ή σε επίπεδο περιφέρειας/νομού κτλ μπορούν να αναλυθούν σε μικρότερες χωρικές μονάδες και να αυξηθεί η διακρίσιμότητα τους χρησιμοποιώντας αντιπροσωπευτικά στατιστικά στοιχεία (Maes κ.α., 2009). Αναλυτικότερα, σύμφωνα με τη μεθοδολογία χωρικής αποτύπωσης των εκπομπών, που περιγράφεται στον Οδηγό Απογραφής Αέριων Εκπομπών EMEP/EEA (Goodwin κ.α., 2009), οι εκπομπές από πηγές με διαφορετική χωρική διάσταση (σημειακές, γραμμικές, εμβαδικές πηγές) κατανομούνται στις αντίστοιχες γεωγραφικές μονάδες και στη συνέχεια τα αποτελέσματα εναρμονίζονται και προστίθενται σε ένα κοινό πλέγμα αναφοράς χρησιμοποιώντας λογισμικό ΓΠΣ. Ο τύπος αναπαράστασης που χρησιμοποιείται στην χωρική απόδοση μιας πηγής εξαρτάται πέρα από την φύση της πηγής και από τον τύπο αναπαράστασης των διαθέσιμων στατιστικών στοιχείων.

Η παραπάνω μεθοδολογία/αρχή ακολουθείται για την απόδοση στο πλέγμα που καλύπτει την περιοχή μελέτης των εκπομπών από ανθρωπογενείς πηγές. Τα δεδομένα εκπομπών λαμβάνονται από τη βάση δεδομένων UNECE/EMEP/CLRTAP για αέριες και σωματιδιακές ανθρωπογενείς εκπομπές (NO_x , SO_x , ΠΟΕ, CO, NH_3 , $\text{A}\Sigma_{2,5}$ και $\text{A}\Sigma_{2,5-10}$) του προγράμματος συνεργασίας για τη συνεχή παρακολούθηση και εκτίμηση της μεταφοράς σε μεγάλη απόσταση ατμοσφαιρικών ρύπων στην Ευρώπη (EMEP/CLRTAP, 2009; στοιχεία που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο του EMEP). Η επιλογή αυτών των δεδομένων από την λίστα των διαθέσιμων στοιχείων του Κέντρου Απογραφών Εκπομπών και Προβολών (CEIP) του προγράμματος EMEP γίνεται εξαιτίας της χωρικής τους διακρίσιμότητας (πλέγμα EMEP με 132×111 πλεγματικά σημεία σε κάρναβο χωρικής διακρίσιμότητας $50 \times 50 \text{ km}^2$; πολική στερεογραφική προβολή με πραγματική επιφάνεια στο γεωγραφικό πλάτος 60°N). Οι εκπομπές από ανθρώπινες δραστηριότητες διακρίνονται στις κατηγορίες SNAP 97 (codes 1-10). Οι κατηγορίες αυτές είναι:

(1) Καύση σε βιομηχανίες παραγωγής και μετασχηματισμού ενέργειας, (2) Μη βιομηχανικές εγκαταστάσεις καύσης (περιλαμβάνει τη θέρμανση κτιρίων), (3) Καύση σε βιομηχανίες, (4) Διεργασίες παραγωγής, (5) Εξόρυξη και διακίνηση ορυκτών καυσίμων και γεωθερμικής ενέργειας, (6) Χρήση διαλυτών και άλλων προϊόντων, (7) Οδικές μεταφορές, (8) Άλλες κινητές πηγές και μηχανήματα, (9) Επεξεργασία και διάθεση αποβλήτων, και (10) Γεωργία/Κτηνοτροφία (συμπεριλαμβάνονται οι εκπομπές από την εκτροφή ζώων και τη χρήση λιπασμάτων στις καλλιέργειες). Στην κατηγορία 8, συμπεριλαμβάνονται και οι εκπομπές από πλοία (εγχώριες και διεθνής μεταφορές; Lavender, 1999) που δίνονται ωστόσο χωριστά.

Τα στατιστικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την αύξηση της χωρικής διακρίσιμότητας των εκπομπών είναι δεδομένα εδαφοκάλυψης, πυκνότητας πληθυσμού καθώς και εκπομπών και θέσης των μεγάλων σημειακών πηγών και του οδικού δικτύου. Αναλυτικότερα, χρησιμοποιούνται δεδομένα:

- εδαφοκάλυψης ταξινομημένα σύμφωνα με την τυπική κατηγοριοποίηση στοιχείων εδαφοκάλυψης της Ευρωπαϊκής ένωσης (Corine land cover 2000 και άνω - CLC2000). Στοιχεία για τις κατηγορίες εδαφοκάλυψης και χάρτης τους στην Ευρώπη διατίθενται δωρεάν από την ΕΕΑ (οι κατηγορίες εδαφοκάλυψης παρουσιάζονται στον πίνακα 1 του παραρτήματος Β; ΕΕΑ CLC2000, 2009).
- πυκνότητας πληθυσμού. Στοιχεία διατίθενται δωρεάν από την ΕΕΑ, με χωρική ανάλυση $100 \times 100 \text{ m}^2$ ή σε διανυσματική μορφή, βασισμένα στην απογραφή πληθυσμού κατά τοπική διοικητική μονάδα (Local Administrative Unit) των ετών 2000-2001 (EC, 2007).
- τοποθεσίας και ποσότητας έκλυσης ρύπων από μεγάλες σημειακές πηγές που δίνονται στο Ευρωπαϊκό μητρώο έκλυσης ρύπων (E-PRTR, 2009). Το μητρώο περιλαμβάνει τιμές για τα έτη 2000 και 2004 (του ευρωπαϊκού μητρώου ρυπογόνων εκπομπών EPER 2008) και του 2007.
- οδικού δικτύου; για ορισμένες ελληνικές πόλεις δίνονται χάρτες από το κέντρο περιβαλλοντικών δεδομένων του ΕΕΑ.
- συντελεστών βαρύτητας ανά κατηγορία πηγής και εδαφοκάλυψης (Μέθοδοι Βαθμίδας 1, Goodwin κ.α., 2009)

Τα δεδομένα πυκνότητας πληθυσμού χρησιμοποιούνται για την χωρική κατανομή των εκπομπών από τη θέρμανση κτιρίων, τη χρήση διαλυτών, την διανομή ορυκτών καυσίμων, την επεξεργασία αποβλήτων και την οδική κυκλοφορία σε συνδυασμό με τα δεδομένα εδαφοκάλυψης τα οποία παρέχουν την θέση των πηγών. Για παράδειγμα, οι εκπομπές από σταθερές πηγές που περιλαμβάνουν την βιομηχανική καύση, την εξαγωγή ορυκτών και τη θέρμανση κτιρίων αποδίδονται σε περιοχές με αστική δόμηση (συνεχής και ασυνεχής) ενώ οι εκπομπές από την γεωργία και κτηνοτροφία σε αγροτικές περιοχές. Στον Πίνακα 1 δίνονται συνοπτικά τα στατιστικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την κατανομή των εκπομπών κάθε κατηγορίας πηγών καθώς και η χωρική διάσταση των πηγών.

Πίνακας 1 Χωρική διάσταση και δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την απόδοση των ανθρωπογενών εκπομπών στο πλέγμα της περιοχής μελέτης.

Κατηγορία πηγής	Χωρική διάσταση	Εδαφοκάλυψη	Πυκνότητα πληθυσμού
Καύση σε βιομηχανίες παραγωγής και μετασχηματισμού ενέργειας	Σημείο		
Μη βιομηχανικές εγκαταστάσεις καύσης	Επιφάνεια		×
Καύση σε βιομηχανίες	50% Επιφάνεια και 50% Σημείο	×*	
Διεργασίες παραγωγής	Σημείο		
Εξόρυξη και διακίνηση ορυκτών καυσίμων και γεωθερμικής ενέργειας	Επιφάνεια	×*	×*
Χρήση διαλυτών και άλλων προϊόντων	Επιφάνεια και Σημείο		×
Οδικές μεταφορές	Επιφάνεια ή/και Γραμμή		×
Άλλες κινητές πηγές και μηχανήματα	Επιφάνεια	×*	
Επεξεργασία και διάθεση απορριμμάτων	Επιφάνεια	×	×
Γεωργία	Επιφάνεια	×	
Εκπομπές από πλοία	Επιφάνεια	×	
Άλλες πηγές και καταβόθρες (φυσικές εκπομπές)	Επιφάνεια	×	

*Χρήση συντελεστών βαρύτητας

Οι εκπομπές των μεγάλων σημειακών πηγών λαμβάνονται από το μητρώο E-MEMP (2008) και τοποθετούνται στις θέσεις από όπου εκλύονται στην περιοχή μελέτης. Η θέση αυτή αντιστοιχεί σε ένα κελί του πλέγματος που καλύπτει την περιοχή μελέτης (για εισαγωγή των στοιχείων σε μοντέλα ποιότητας αέρα), και σε ένα κελί του EMEP. Για τις περισσότερες κατηγορίες πηγών μόνο ένα μέρος των εκπομπών που εκλύονται ανά κελί του EMEP προκύπτει από τις μεγάλες σημειακές πηγές. Οι υπόλοιπες εκπομπές κατανέμονται στο πλέγμα ως εμβαδικές με τη βοήθεια της μεθοδολογίας που περιγράφεται παρακάτω, θα πρέπει ωστόσο να δίνεται προσοχή στον τρόπο υπολογισμού τους. Αναλυτικότερα, στην βάση δεδομένων του EMEP περιλαμβάνονται οι εκπομπές από μεγάλες σημειακές πηγές αλλά ειδικά για την Ελλάδα είτε δεν δίνονται χωριστά ή δεν συμφωνούν με αυτές του E-MEMP (εξαρτάται από το έτος αναφοράς). Αν δίνονται εκπομπές από μεγάλες σημειακές πηγές από το EMEP και συμφωνούν με αυτές του μητρώου E-MEMP, τότε οι εκπομπές που θα κατανεμηθούν ως εμβαδικές, υπολογίζονται με αφαίρεση των εκπομπών από σημειακές πηγές από τις χωρικά κατανεμημένες εκπομπές που λαμβάνονται από το μητρώο EMEP (Emissions as used in EMEP models). Διαφορετικά, χρησιμοποιούνται συντελεστές για την ελάττωση των χωρικά κατανεμημένων εκπομπών του μητρώου EMEP, στα κελιά του EMEP όπου υπάρχουν σημειακές πηγές (βάσει E-MEMP), ώστε οι εκπομπές που προκύπτουν να μην περιλαμβάνουν τις μεγάλες σημειακές πηγές. Οι συντελεστές αυτοί προκύπτουν από τις τιμές της σχετικής συνεισφοράς των εκπομπών σημειακών πηγών στις εκπομπές κάθε κατηγορίας πηγών που χρησιμοποιούνται στο πρόγραμμα EMEP για τη χαρτογράφηση των εκπομπών (EMEP/MSW, 2003). Σύμφωνα με τη μεθοδολογία αυτή όλες οι εκπομπές από τις κατηγορίες 1 “Καύση σε βιομηχανίες παραγωγής και μετασχηματισμού ενέργειας”, και 4 “Διεργασίες παραγωγής” (EMEP/MSW, 2003) οφείλονται σε σημειακές πηγές, ενώ από την κατηγορία 3, “Καύση σε βιομηχανίες”, το 50%. Οι εκπομπές σημειακών πηγών από την γεωργία και την “Χρήση διαλυτών και άλλων προϊόντων”, (κατηγορίες 10 και 6, αντίστοιχα) αφαιρούνται απευθείας όπως και στην πρώτη περίπτωση. Ακόμα, οι εκπομπές σωματιδίων ΑΣ₁₀ που περιλαμβάνονται στο

μητρώο E-MEMP πρέπει αρχικά να διαχωριστούν σε $A_{\Sigma_{2,5}}$ και $A_{\Sigma_{2,5-10}}$ πριν αφαιρεθούν από τις εκπομπές του μητρώου EMEP. Αυτό μπορεί να γίνει εισάγοντας έναν λόγο $A_{\Sigma_{2,5}}/A_{\Sigma_{10}}$ για κάθε κατηγορία πηγών.

Η εξίσωση που χρησιμοποιείται για την χωρική κατανομή των εκπομπών βάσει μόνο της πυκνότητας πληθυσμού είναι η:

$$E_{i,j,k,x} = E_{j,k,x} \frac{\rho_{\rho_i}}{\rho_{\rho_x}} \quad (\text{Εξ. 2})$$

όπου $E_{i,j,k,x}$ είναι η εκπεμπόμενη ποσότητα (Mg/έτος) ρύπου j από την κατηγορία πηγών k από την γεωγραφική/χωρική μονάδα i που βρίσκεται εντός του κελιού του EMEP x, $E_{j,k,x}$ είναι η εκπεμπόμενη ποσότητα (Mg/έτος) ρύπου j από την κατηγορία πηγών k από το κελί του EMEP x για το οποίο οι εκπομπές κατανέμονται χωρικά, ρ_{ρ_i} είναι ο πληθυσμός στην γεωγραφική μονάδα i, και ρ_{ρ_x} είναι ο συνολικός πληθυσμός στο κελί x του EMEP (αριθμός κατοίκων). Οι γεωγραφικές μονάδες προκύπτουν μετά από επίθεση (spatial overlay) των στατιστικών δεδομένων (πυκνότητα πληθυσμού) με το πλέγμα της περιοχής μελέτης (ορίζεται α. με χάραξη στον χάρτη της περιοχής ενδιαφέροντος, β. με σημείωση ή εισαγωγή των συντεταγμένων της ΝΔ γωνίας, του πλήθους των κελιών στη βόρεια και ανατολική κατεύθυνση και του μεγέθους τους, και γ. με εισαγωγή αρχείου με τις συντεταγμένες του κέντρου κάθε κελιού). Στη συνέχεια τα αποτελέσματα για κάθε κατηγορία πηγών αθροίζονται στα κελιά του πλέγματος της περιοχής ($1 \times 1 \text{ km}^2$ στην εφαρμογή). Αυτή η διαδικασία ακολουθείται για την κατανομή των εκπομπών από τη χρήση διαλυτών, την εξόρυξη και διακίνηση ορυκτών καυσίμων και τις μη βιομηχανικές μονάδες καύσης.

Οι εκπομπές από άλλες κινητές πηγές και μηχανήματα και από την καύση σε βιομηχανίες (που δεν περιλαμβάνονται στην βάση E-MEMP) κατανέμονται χωρικά βάσει της εδαφοκάλυψης και συντελεστών βαρύτητας για κάθε κατηγορία εδαφοκάλυψης. Αναλυτικότερα, χρησιμοποιείται η εξίσωση:

$$E_{i,j,k,x} = E_{j,k,x} \frac{w_{k,l}^i A_{i,x,l}}{\sum_x w_{k,l}^i A_{x,l}} \quad (\text{Εξ. 3})$$

όπου $A_{i,x,l}$ είναι η έκταση κάθε γεωγραφικής μονάδας i με εδαφοκάλυψη l στο κελί x του EMEP για το οποίο οι εκπομπές κατανέμονται χωρικά και $w_{k,l}^i$ είναι ο συντελεστής βαρύτητας των εκπομπών για την κατηγορία πηγών k και εδαφοκάλυψης l. Οι συντελεστές βαρύτητας λαμβάνονται από τις μεθόδους Βαθμίδας 1 που περιγράφονται στη μεθοδολογία χωρικής αποτύπωσης των εκπομπών του νέου Οδηγού Απογραφής Αέριων Εκπομπών και εξαρτώνται μόνο από την κατηγορία πηγής και εδαφοκάλυψης και όχι από τον ρύπο.

Οι εκπομπές από την επεξεργασία και διάθεση απορριμμάτων κατανέμονται χωρικά βάσει του πληθυσμού και σταθμισμένες σε περιοχές με συνεχόμενη και ασυνεχής αστική δόμηση (Goodwin κ.α., 2009).

Ο υπολογισμός και η χωρική κατανομή των εκπομπών από τις οδικές μεταφορές απαιτεί τη συγκέντρωση πολλών στοιχείων για το οδικό δίκτυο, τα χαρακτηριστικά των οχημάτων και τιμές κυκλοφοριακού φόρτου τουλάχιστο για τις μεγάλες οδικές αρτηρίες. Όταν τα παραπάνω στοιχεία δεν είναι διαθέσιμα οι εκπομπές από τις οδικές μεταφορές μπορούν να κατανεμηθούν χωρικά χρησιμοποιώντας ψηφιακούς χάρτες του οδικού δικτύου σε συνδυασμό με δεδομένα πυκνότητας πληθυσμού και στατιστικά στοιχεία για τις εκπομπές ανά κατηγορία οχήματος και τύπο δρόμου (Goodwin κ.α., 2009). Στα πλαίσια της εργασίας χρησιμοποιείται τροποποιημένη η μεθοδολογία του Briggs (2005; European APMOSPHERE project) για την εξαγωγή χωρικά κατανεμημένων εκπομπών από τις οδικές μεταφορές με λιγότερα στοιχεία. Αρχικά, το οδικό δίκτυο ταξινομείται σε 4 κατηγορίες δρόμων που θεωρείται πως επηρεάζονται/εξυπηρετούν πληθυσμούς από μια ευρύτερη περιοχή διαφορετικής ακτίνας για κάθε κατηγορία. Οι κατηγορίες που χρησιμοποιούνται είναι: (1) αυτοκινητόδρομοι που επηρεάζονται από την πυκνότητα του πληθυσμού από μια περιοχή σε ακτίνα 50 km; (2) μεγάλοι οδικοί άξονες, θεωρείται ότι επηρεάζονται από τους πληθυσμούς μέσα σε ακτίνα 35 km; (3) δευτερεύουσες οδοί, θεωρείται ότι επηρεάζονται από τους πληθυσμούς από μια μικρότερη περιοχή (ακτίνα 10 km); (4) πεζόδρομοι χωρίς εκπομπές. Το μέγεθος των περιοχών μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα την περιοχή ενδιαφέροντος. Η επίδραση του πληθυσμού που εξυπηρετεί κάθε δρόμος στις εκπομπές του, υπολογίζεται με τη βοήθεια της εστιακά μέσης τιμής πληθυσμού στο ΓΠΣ (Goodwin κ.α., 2009). Οι εκπομπές διαχωρίζονται έτσι στις κατηγορίες δρόμων βάσει του πληθυσμού που εξυπηρετούν. Στη συνέχεια, υπολογίζονται για κάθε τύπο δρόμου οι ετήσιες εκπομπές ($E_{i,j,x}$) ανά μονάδα μήκους, για κάθε ρύπο j και γεωγραφικό στοιχείο δρόμου i που βρίσκεται εντός του κελιού x του πλέγματος του EMEP. Η εξίσωση που χρησιμοποιείται είναι:

$$E_{i,j,x} = \frac{E_{j,x}}{\text{pop}_x} \frac{\text{pop}_i}{l_i} \quad (\text{Εξ. 4})$$

όπου $E_{j,x}$ είναι η ετήσια εκπομπή (Mg) του ρύπου j από το κελί x του πλέγματος του EMEP, του οποίου οι εκπομπές κατανομούνται χωρικά, pop_i είναι ο πληθυσμός που επηρεάζεται/εξυπηρετείται από το γεωγραφικό στοιχείο δρόμου i , pop_x είναι ο πληθυσμός που εξυπηρετείται από όλες τις γεωγραφικές μονάδες i που βρίσκονται στο κελί x του πλέγματος του EMEP, και l_i είναι το μήκος του γεωγραφικού στοιχείου δρόμου i . Τέλος τα αποτελέσματα (στρώσεις στο ΓΠΣ) αποδίδονται στα κελιά του πλέγματος της περιοχής ενδιαφέροντος χρησιμοποιώντας εργαλεία επίθεσης του ΓΠΣ.

Στο μητρώο UNECE/EMEP περιλαμβάνονται εκπομπές αμμωνίας από την χρήση λιπασμάτων στις καλλιέργειες και την εκτροφή ζώων. Ωστόσο οι τιμές τους έχει βρεθεί πως είναι αρκετά μικρές σε σχέση με υπολογισμούς για την περιοχή της Αθήνας (Sotiropoulou κ.α., 2004). Γι αυτό τον λόγο εξετάζεται ο τρόπος υπολογισμού των εκπομπών POE και NH₃ από τη χρήση λιπασμάτων, από τα φυτά (χωρίς τη χρήση λιπασμάτων) και από την εκτροφή ζώων (διαχείριση κοπριάς). Αναλυτικότερα, ακολουθείται ο γενικός τρόπος υπολογισμού των εκπομπών με μονάδες δραστηριότητας την επιφάνεια των καλλιεργειών ανά είδος και τον αριθμό των ζώων. Οι συντελεστές εκπομπής από την εκτροφή ζώων δίνονται στον Οδηγό απογραφής αερίων

εκπομπών (EMEP/ΕΕΑ, 2009) ενώ για τις εκπομπές από τα λιπάσματα χρησιμοποιείται η ποσότητα αζώτου που εφαρμόζεται με το λίπασμα και ένας συντελεστής για το ποσοστό αυτού του αζώτου που εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα σαν αμμωνία. Πληροφορίες για τα παραπάνω μπορούν να ληφθούν για παράδειγμα από την βάση δεδομένων της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής ανά περιφέρεια ή νομό, και σε εθνικό επίπεδο από τον Οργανισμό Τροφίμων και Γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών (UN FAO – Feristat, 2007). Οι εκπομπές υπολογίζονται με αυτό τον τρόπο για κάθε νομό ή περιφέρεια και μετά αφαιρούνται οι εκπομπές από τις μεγάλες σημειακές πηγές της κατηγορίας. Οι υπόλοιπες εκπομπές διανέμονται στην έκταση των γεωγραφικών μονάδων με εδαφοκάλυψη «αγροτικές εκτάσεις» και προκύπτει ένας συντελεστής εκπομπής ανά μονάδα επιφάνειας (EF, Mg/km²έτος) για κάθε ρύπο j, κατηγορία εδαφοκάλυψης I και νομό/περιφέρεια/(αρχική χωρική μονάδα) x. Στη συνέχεια οι εκπομπές μεταφέρονται στα κελιά του πλέγματος της περιοχής μελέτης χρησιμοποιώντας λειτουργίες επίθεσης στο ΓΠΣ και την εξίσωση:

$$E_{i,j} = \sum_{l,x} EF_{j,l,x} A_{l,x} \quad (\text{Εξ. 5})$$

όπου $E_{i,j}$ είναι η εκπομπή (Mg/έτος) του ρύπου j από το κελί i, και A είναι η έκταση (km²) κάθε γεωγραφικής μονάδας στο κελί i με κατηγορία εδαφοκάλυψης l που βρίσκεται εντός της περιοχής x.

2.1.1. Χημική διάκριση ανθρωπογενών εκπομπών

Οι εκπομπές διακρίνονται ως προς τη χημική τους σύσταση έτσι ώστε να μπορούν να εισαχθούν σε φωτοχημικά μοντέλα ποιότητας του αέρα. Αναλυτικότερα, οι εκπομπές ΠΟΕ διακρίνονται σε C₂H₆, nC₄H₁₀, C₂H₄, C₃H₆, o-xylene, HCHO and CH₃CHO, methyl-ethyl-ketone, C₂H₅OH, CH₃OH, και αδρανή. Ο χημικός διαχωρισμός γίνεται ανά κατηγορία πηγής, σύμφωνα με τη μεθοδολογία του προγράμματος EMEP, η οποία βασίζεται σε λεπτομερή ανάλυση της χημικής σύστασης των ΠΟΕ στο Ηνωμένο Βασίλειο (UK) (PORG, 1993) (EMEP, 1999; Πίνακας 2). Στη συνέχεια οι εκπομπές ομαδοποιούνται στις κατηγορίες που χρησιμοποιούνται από το χημικό μηχανισμό CBM-IV.

Ο διαχωρισμός των εκπομπών SO_x σε SO₂ και θείο γίνεται θεωρώντας πως το 95% της ποσότητας SO_x εκλύεται ως SO₂ για όλες τις κατηγορίες πηγών (τυπική τιμή; χρησιμοποιείται λόγω έλλειψης αναλυτικότερων δεδομένων για την Ελλάδα και την ΕΠΑ). Για τον διαχωρισμό των εκπομπών NO_x σε NO και NO₂ χρησιμοποιούνται συντελεστές από το μοντέλο EMEP (EMEP-MS/W, 2003) για κάθε κατηγορία πηγών (ποσοστό NO₂ στις εκπομπές NO_x: 5% για τις κατηγορίες πηγών 1-6, 9 και 10, 7,3% για τις εκπομπές από οδικές μεταφορές, 7% για τις εκπομπές από άλλες κινητές πηγές και μηχανήματα – περιλαμβάνονται και οι εκπομπές από τις θαλάσσιες μεταφορές).

Πίνακας 2 Χημική σύσταση πτητικών υδρογονανθράκων. Πηγή: EMEP (1999).

SNAP	C2H6	nC4H10	C2H4	C3H6	o-xylene	HCHO	CH3CHO	MEK	C2H5OH	CH3OH	Αδρανή
1	0,1297	0,3057	0,161	0,0855	0,0277	0,0176	0,0193	0,00773	0,2229	0,00387	0,01907
2	0,1297	0,3057	0,161	0,0855	0,0277	0,0176	0,0193	0,00773	0,2229	0,00387	0,01907
3	0,1297	0,3057	0,161	0,0855	0,0277	0,0176	0,0193	0,00773	0,2229	0,00387	0,01907
4	0,00146	0,00971	0,0188	0	0,00828	0	0	0,00355	0,9347	0,00079	0,02273
5	0	0,8201	0,0241	0,1096	0,0239	0	0	0	0,02239	0	0
6	0,0536	0,3599	0	0	0,273	0	0	0,03666	0,1997	0	0,07717
7	0,0486	0,3087	0,0863	0,07	0,3676	0,0164	0,0106	0	0,0875	0	0,00447
8	0,057	0,18	0,12	0,046	0,106	0,059	0,04	0	0,392	0	0
9	0,4841	0,4841	0	0	0	0,0318	0	0	0	0	0
10	0,1297	0,3057	0,161	0,0855	0,0277	0,0176	0,0193	0,00773	0,2229	0,00387	0,01907

Ο διαχωρισμός ως προς τη χημική σύσταση των σωματιδιακών εκπομπών πραγματοποιείται με τη μεθοδολογία που ακολουθείται στο πρόγραμμα EMEP/TNO (Berdowski κ.α., 1997). Στην περίπτωση των ΑΣ_{2,5}, ο χημικός διαχωρισμός βασίζεται στη μέθοδο των Andersson-Sköld and Simpson (2001), κατά την οποία τα λεπτά σωματίδια (ΑΣ_{2,5}) αποτελούνται από στοιχειακό άνθρακα (EC), οργανικό άνθρακα (OC) (85% accumulation mode, 15% Aitken mode) και σκόνη (mineral dust). Ο χημικός διαχωρισμός γίνεται ανά κατηγορία πηγής. Οι συντελεστές αναλογίας του OC προσαυξήθηκαν κατά 40%, για τη μετατροπή του σε οργανική ύλη (OM), με παράλληλη μείωση των συντελεστών αναλογίας EC και σκόνης κατά το ίδιο ποσοστό. Ο όρος οργανική ύλη αναφέρεται στη συνολική μάζα των οργανικών ενώσεων που ανιχνεύονται στην ατμόσφαιρα. Η μάζα των ατόμων άνθρακα που υπάρχουν σε μια οργανική ένωση θεωρείται ότι αποτελεί το 60% της συνολικής μάζας της ένωσης, ενώ ποσοστό 40% οφείλεται στα υπόλοιπα στοιχεία (N, O, H) τα οποία υπάρχουν στην ένωση αυτή. Οι συντελεστές που χρησιμοποιούνται για την χημική σύσταση των εκπομπών ΑΣ_{2,5} δίνονται στον Πίνακα 3. Οι εκπομπές σωματιδίων ΑΣ_{2,5-10} θεωρείται πως αποτελούνται από σκόνη (Smolik κ.α., 2003; Tsyro, 2002).

Πίνακας 3 Κατηγορίες πηγών εκπομπής ΑΣ_{2,5} για το έτος 1999 και συντελεστές για τη χημική σύσταση των εκπομπών ΑΣ_{2,5}. Πηγή: Andersson-Sköld and Simpson (2001).

Κατηγορία πηγής (SNAP 97)	OC	EC	Σκόνη
1. Καύση σε βιομηχανίες παραγωγής και μετασχηματισμού ενέργειας	46,66	26,67	26,67
2. Μη βιομηχανικές εγκαταστάσεις καύσης	70	12	18
3. Καύση σε βιομηχανίες	46,66	26,67	26,67
4. Διεργασίες παραγωγής	0	20	80
5. Εξόρυξη και διακίνηση ορυκτών καυσίμων και γεωθερμικής ενέργειας	56	0	44
6. Χρήση διαλυτών και άλλων προϊόντων	100	0	0
7. Οδικές μεταφορές	56	14,67	29,33
8. Άλλες κινητές πηγές και μηχανήματα	14	57,33	28,67
9. Επεξεργασία και διάθεση απορριμμάτων	46,66	26,67	26,67
10. Γεωργία	98	0	2

2.1.2. Χρονική διακύμανση των εκπομπών ρύπων στην ατμόσφαιρα από ανθρώπινες πηγές

Η χρονική ανάλυση των εκπομπών αυξάνεται με τη βοήθεια του μοντέλου από εκπομπές ανά έτος σε εκπομπές ανά μήνα και ανά ώρα. Αναλυτικότερα, εισάγεται ημερήσια και μηνιαία (εποχιακή) διακύμανση για τις εκπομπές των αερίων ρύπων NO_x, SO_x, NMVOCs και CO από τις καύσεις σε βιομηχανίες παραγωγής και μετασχηματισμού ενέργειας, τις μη βιομηχανικές εγκαταστάσεις καύσης, τις καύσεις σε βιομηχανίες, τις οδικές μεταφορές και, ειδικότερα για τις ΠΟΕ, από τη χρήση διαλυτών. Παράλληλα, οι εκπομπές διακρίνονται ανά κατηγορία πηγών εκπομπής σε ημερήσιες και νυχτερινές. Η εξίσωση που περιγράφει την χρονική διάκριση των εκπομπών είναι η:

$$E_{h,j,k} = E_{y,j,k} M_{j,k} D_{j,k} H_{j,k} \quad (\text{Εξ. 6})$$

όπου $E_{h,j,k}$ είναι η ωριαία εκπομπή του ρύπου j από την κατηγορία πηγών k , $E_{y,j,k}$ είναι οι ετήσιες εκπομπές του, και M , D και H είναι οι συντελεστές μηνιαίας, ημερήσιας και ωριαίας διακύμανσης, αντίστοιχα. Αντίστοιχα προκύπτουν και οι μηνιαίες εκπομπές. Οι τιμές των συντελεστών μηνιαίας, ημερήσιας και ωριαίας διακύμανσης βασίζονται στην ημερήσια (day-to-day) μεταβολή των συντελεστών εκπομπής των αερίων ρύπων από το πρόγραμμα GENEMIS, ενώ των ωριαίων συντελεστών σε εκτιμήσεις του Vestreng κ.α. (EMEP-MSC/W, 2003; Klein κ.α., 2004; Πίνακας 4).

Πίνακας 4 Συντελεστές ημερήσιας διακύμανσης αερίων ρύπων ανά κατηγορία πηγής, στην Ελλάδα. Πηγή: Vestreng κ.α. (EMEP-MSC/W, 2003; Klein κ.α., 2004).

Κατηγορία πηγής (SNAP 97)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ημέρα	1,0	1,2	1,2	1,0	1,0	1,5	1,5	1,2	1,0	1,0
Νύχτα	1,0	0,8	0,8	1,0	1,0	0,5	0,5	0,8	1,0	1,0

2.2. Εκτίμηση της έκλυσης ρύπων στην ατμόσφαιρα από φυσικές πηγές

2.2.1. Έκλυση Βιογενών Πτητικών Οργανικών Ενώσεων από τη βλάστηση

Η βλάστηση αποτελεί πηγή εκπομπής ισοπρενίου, τερπενίων, αλκοολών, αλδευδών και άλλων οξυγονωμένων αερίων ενώσεων. Από τις εκλυόμενες ενώσεις, σημαντικότερη, λόγω της αφθονίας της, σε σχέση με τις άλλες βιογενείς εκπομπές, αλλά και της επίδρασής της στις ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις όζοντος, θεωρείται το ισοπρένιο. Η παραγωγή ισοπρενίου αποτελεί παραπροϊόν των διεργασιών φωτοσύνθεσης και εκπνοής του φυτού. Εκπέμπεται παρουσία ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία είναι απαραίτητη για την εκκίνηση της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας. Σημαντικά επίσης είναι τα μονοτερπένια, τα οποία αντιδρούν στην ατμόσφαιρα με τις ρίζες OH[•] και το O₃ και σχηματίζουν δευτερογενώς παραγόμενα αιωρούμενα σωματίδια. Σε αντίθεση με τις εκπομπές ισοπρενίου, οι οποίες συνδέονται άμεσα με την ηλιακή

ακτινοβολία, οι εκπομπές τερπενίων και άλλων οξυγονωμένων ενώσεων εξαρτώνται πρώτιστα από διεργασίες βιοχημικές (από τη διαθέσιμη ποσότητα τερπενίων στα έλαια του φυλλώματος και από την τάση ατμών τους) και άρα από τη θερμοκρασία και το είδος του φυτού (Guenther, 1994).

Η εκτίμηση των εκπομπών βιογενών ΠΟΕ (ΒΠΟΕ) βασίζεται στη μεθοδολογία υπολογισμού που δίνεται στον Οδηγό Απογραφής Αέριων Εκπομπών EMEP/CORINAIR (SNAP 11). Χρησιμοποιούνται τροποποιημένοι συντελεστές διόρθωσης των εκπομπών από περιβαλλοντικές παραμέτρους και επιπλέον υπολογίζονται οι εκπομπές Άλλων Βιογενών ΠΟΕ (ΑΒΠΟΕ; αλκοόλες, αλδεΐδες και άλλες οξυγονωμένες ενώσεις). Αναλυτικότερα, ο ρυθμός εκπομπής, E (σε $\mu\text{g C/m}^2\text{h}$) υπολογίζεται σύμφωνα με τη μεθοδολογία των Guenther κ.α. (1993, 1996) και Geron κ.α. (1994) από την σχέση:

$$E = \varepsilon D \gamma \quad (\text{Εξ. 7})$$

όπου ε είναι ο συντελεστής εκπομπής για κάθε είδος σε τυπική θερμοκρασία $T_s = 303 \text{ K}$ και φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (PAR) ίση με $1000 \mu\text{mol photons (400-700 nm)/m}^2\text{s}$, D είναι η πυκνότητα φυλλώδης βιομάζας ($\text{g ξηρής φυλλώδης βιομάζας/m}^2$), και γ είναι μια αδιάστατη περιβαλλοντική παράμετρο (συντελεστής διόρθωσης) η οποία χρησιμεύει για την περιγραφή των επιδράσεων των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας στις βιογενείς εκπομπές.

Οι εκπομπές ισοπρενίου εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και την ηλιακή ακτινοβολία, ενώ οι εκπομπές των μονοτερπενίων και των ΑΒΠΟΕ μεταβάλλονται μόνο με την θερμοκρασία. Ο συντελεστής διόρθωσης γ δίνεται ως το γινόμενο του συντελεστή διόρθωσης για διακυμάνσεις της θερμοκρασίας (C_T) με τον συντελεστή διόρθωσης για διακυμάνσεις της ηλιακής ακτινοβολίας (C_L). Οι παραπάνω συντελεστές τροποποιήθηκαν σε σχέση με τη μεθοδολογία EMEP/CORINAIR. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής εξάρτησης των εκπομπών ισοπρενίου από την ηλιακή ακτινοβολία υπολογίζεται βάσει των Simpson κ.α. (1995) και Guenther κ.α. (1993) τροποποιημένος κατά τους Simeonidis κ.α. (1999) ενώ ο συντελεστής εξάρτησης των εκπομπών μονοτερπενίων και ΑΒΠΟΕ από την θερμοκρασία υπολογίζεται βάσει των Pierce κ.α. (1990) και Simeonidis κ.α. (1999). Αναλυτικά οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι:

$$Y_{iso} = C_T C_L \quad (\text{Εξ. 8})$$

$$C_T = \frac{\exp(C_{T1}(T-T_s)/RT_s T)}{1 + \exp(C_{T2}(T-T_M)/RT_s T)} \quad (\text{Εξ. 9})$$

$$C_L = \frac{FL + L_1 + L_2 - \sqrt{(FL + L_1 + L_2)^2 - 4FL L_1}}{2L_1} \quad (\text{Εξ. 10})$$

$$Y_{mts} = \exp(0,0739(T - T_s)) \text{ και} \quad (\text{Εξ. 11})$$

$$Y_{OVOC} = Y_{mts} \quad (\text{Εξ. 12})$$

όπου T είναι η θερμοκρασία των φυλλωμάτων (K), $C_{T1} = 95000 \text{ J/mol}$, $C_{T2} = 230000 \text{ J/mol}$, $T_M = 314 \text{ K}$, $T_s = 303 \text{ K}$, R είναι η σταθερά των αερίων ($8,314 \text{ J/K mol}$), $F = 0,385$, $L_1 = 105,6$, $L_2 =$

6,12 και L η τιμή της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (PAR; $\mu\text{mol photons/m}^2\text{s}$ στα 400 - 700 nm).

Οι τιμές για τους συντελεστές εκπομπής και την πυκνότητα φυλλώδους βιομάζας δίνονται χωριστά για κάθε κατηγορία ΒΠΟΕ και για 2 εποχές, χειμερινή και θερινή ανά κατηγορία εδαφοκάλυψης (κατά ΕΕΑ Corine land cover 2000). Στα πλαίσια της εργασίας συγκεντρώθηκαν και επιλέχθηκαν αντιπροσωπευτικές τιμές των παραπάνω παραμέτρων για την Ευρύτερη περιοχή Αθηνών (ΕΠΑ; αναλύονται στο Κεφάλαιο 5.1). Οι τιμές αυτές μπορούν να εφαρμοστούν, με κάποιες τροποποιήσεις από τον χρήστη, για όλη την Ελλάδα (π.χ. συντελεστές προγράμματος NatAir για όλη την Ευρώπη; Steinbrecher, 2009). Ο τρόπος επιλογής των κατάλληλων συντελεστών περιγράφεται στην εφαρμογή της μεθοδολογίας για την ΕΠΑ.

Οι ωριαίες τιμές φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας πρέπει να εισάγονται μαζί με τα μετεωρολογικά δεδομένα. Εφόσον τα δεδομένα αυτά προκύπτουν από το μοντέλο MM5 (Grell κ.α., 1994), το μοντέλο μπορεί να υπολογίσει τις τιμές PAR χρησιμοποιώντας συντελεστή μετατροπής των τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στην επιφάνεια της γης (solar reaching surface).

2.2.2. Παραγωγή αιωρούμενων σωματιδίων από την επιφάνεια της θάλασσας

Από την επιφάνεια της θάλασσας εκπέμπονται σωματίδια είτε άμεσα με τη μορφή φυσαλίδων αφρού από τις κορυφογραμμές των κυμάτων σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου ($u > 10 \text{ m/s}$) ή έμμεσα με τη μορφή σταγονιδίων (film drops) και πίδακα (jet drops) όταν τα κύματα χτυπούν στην επιφάνεια της θάλασσας σε μικρότερες ταχύτητες ανέμου (Singh, 1995). Έτσι, ο υπολογισμός της εκπομπής σωματιδίων από την επιφάνεια της θάλασσας γίνεται ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου και το μέγεθος του σωματιδίου. Για τον υπολογισμό των εκπομπών υδροσταγονιδίων από την ανοιχτή θάλασσα ακολουθείται η μέθοδος που αναφέρεται στην εργασία του Grini κ.α. (2002). Ο υπολογισμός της εκπεμπόμενης ποσότητας Na και Cl γίνεται, για 8 κατηγορίες μεγέθους των σωματιδίων ($A_{\Sigma 10}$; 0,04-0,08, 0,08-0,16, 0,16-0,31, 0,31-0,62, 0,62-1,25, 1,25-2,5, 2,5-5,0, 5,0-10,0 σε μm). Αναλυτικότερα, η ροή σωματιδίων F (σωματίδια/ m^2s) στο λεπτό στρώμα της ατμόσφαιρας πάνω από τη θάλασσα υπολογίζεται συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου και του μεγέθους των σωματιδίων το οποίο εξαρτάται από τη σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας (RH) πάνω από τη θάλασσα. Η ακτίνα r του υγρού σωματιδίου δίνεται από την σχέση $r = ar_d^\beta$ (Εξ. 13), όπου r_d είναι η ακτίνα του ξηρού σωματιδίου και a και β είναι συντελεστές που εξαρτώνται από την σχετική υγρασία και υπολογίζονται από τις εξισώσεις (Fitzgerald, 1975):

$$\beta = e^{\left(\frac{0,00077RH}{1,009-RH}\right)} \quad (\text{Εξ. 14})$$

$$\text{και } \alpha = 1,62e^{\left(\frac{0,066RH}{\Phi - RH}\right)} \quad (\text{Εξ. 15})$$

όπου $\Phi = 1,2$ για τα σωματίδια NaCl, για τιμές $RH < 97\%$. Για τον υπολογισμό της αναλογίας μεταξύ υγρού και ξηρού σωματιδίου θεωρείται πως $RH = 80\%$, τιμή αποδεκτή για το λεπτό ατμοσφαιρικό στρώμα που βρίσκεται ακριβώς πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας (Aleksandropoulou κ.α., 2004). Για $RH = 80\%$, η απορρόφηση νερού έχει ως συνέπεια το διπλασιασμό του μεγέθους του σωματιδίου (Fitzgerald, 1975), άρα $r_d = 0,5r$ (Εξ. 16).

Για σωματίδια με $r < 7$ μm , χρησιμοποιείται η προσέγγιση του Monahan κ.α. (1986), η οποία βασίζεται στον εμπειρικό προσδιορισμό της αφρώδους επιφάνειας του κύματος (whitcap cover) συναρτήσεως της ταχύτητας του ανέμου. Συγκεκριμένα για ταχύτητες ανέμου $u < 10$ m/s χρησιμοποιείται ο έμμεσος μηχανισμός για την παραγωγή σταγονιδίων φυσαλίδας και πίδακα:

$$\frac{\partial F}{\partial r} = 1,373u^{3,41}r^{-3}(1+0,057r^{1,05})10^{1,19e^{-B^2}} \quad (\text{Εξ. 17})$$

όπου u η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10 m από την επιφάνεια της θάλασσας και το B ένας εμπειρικός συντελεστής που δίνεται από τη σχέση $B = 0,380 - \log r / 0,65$ (Εξ. 18).

Ο άμεσος μηχανισμός για την εκπομπή σωματιδίων με ακτίνα $r < 7$ μm σε ταχύτητες ανέμου $u > 10$ m/s παραλείφθηκε στον τελικό υπολογισμό, μετά από διαπίστωση ότι οι τιμές περιείχαν μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας (Aleksandropoulou κ.α., 2004; Monahan κ.α., 1986). Ο υπολογισμός των εκπομπών στις προαναφερόμενες συνθήκες γίνεται με τον έμμεσο μηχανισμό. Για σωματίδια ακτίνας $r > 7$ μm , χρησιμοποιείται η προσέγγιση του Smith κ.α. (1993), η οποία χρησιμοποιείται για την περιγραφή των μηχανισμών άμεσης και έμμεσης εκπομπής θαλασσίων υδροσταγονιδίων:

$$\frac{\partial F}{\partial r} = \sum_{i=1}^2 A_i e^{f_i \left(\ln \frac{r}{R_{0i}}\right)^2} \quad (\text{Εξ. 19})$$

όπου $f_1 = 3,1$, $f_2 = 3,3$, $R_{01} = 2,1$ μm , $R_{02} = 9,2$ μm , $\log A_1 = 0,0676u + 2,43$ (Εξ. 20) και $\log A_2 = 0,0959u^{1/2} - 1,476$ (Εξ. 21).

Για κάθε κλάσμα μεγέθους των σωματιδίων η ροή F μετατρέπεται σε μάζα/ρυθμό εκπομπής $E_{r,\text{tot}}$ (g/h) με την εξίσωση $E_{r,\text{tot}} = F A M_d 3,6 \times 10^6 dr$ (Εξ. 22), όπου A είναι το εμβαδόν της έκτασης που καλύπτεται από θάλασσα και M_d είναι η μάζα (kg) του ξηρού σωματιδίου, $M_d = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho 10^{-18}$ (Εξ. 23). Η πυκνότητα του ξηρού θαλάσσιου άλατος είναι $\rho \sim 2200$ kg/m³ (Hess, 1998).

2.2.3. Αιώρηση σωματιδίων σκόνης από το έδαφος εξαιτίας του ανέμου

Η εκπομπή σωματιδίων σκόνης από το έδαφος αγροτικών και κενών (vacant) εκτάσεων εξαρτάται από πολλές παραμέτρους με σημαντικότερες την δομή και σύσταση του εδάφους, την

ταχύτητα του ανέμου, την κάλυψη του εδάφους με φυτά, κτίρια κλπ αδιάβρωτα στοιχεία, τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής, και τις καταπονήσεις του εδάφους (Cowherd κ.α., 1985). Στο μοντέλο οι εκπομπές σκόνης μπορούν να υπολογίζονται ανά ώρα για 2 κατηγορίες μεγέθους ($A_{Σ_{2,5}}$ και $A_{Σ_{2,5-10}}$) με τη μέθοδο του Choi κ.α. (2008) ή/και τη μέθοδο του Mansell κ.α. (2004; WRAP - Western Regional Air Partnership project). Και στις δύο μεθόδους οι παραπάνω παράμετροι ομαδοποιούνται στις εξής: (α) εδαφοκάλυψη που καθορίζει την τιμή φυτοκάλυψης, αδιάβρωτων στοιχείων και επιφανειακής τραχύτητας του εδάφους; (β) περιεκτικότητα επιφανειακού στρώματος εδάφους σε άργιλο, λάσπη και άμμο (clay, silt and sand) που περιγράφει τη δομή/σύσταση (texture) του εδάφους; (γ) ταχύτητα τριβής (wind friction velocity) και τιμή κατωφλιού της ταχύτητας τριβής (threshold friction velocity); (δ) υγρασία και θερμοκρασία εδάφους.

Στην προσέγγιση του Choi κ.α. (2008) υπολογίζεται η κατακόρυφη ροή εκπομπών σκόνης (F_a ; g/cm^2s) με την εξίσωση των Westphal κ.α. (1987) τροποποιημένη σύμφωνα με τα αποτελέσματα των Park και In (2003) και Liu και Westphal (2001). Οι υπολογισμοί γίνονται χωριστά για εδάφη που είναι κυρίως αμμώδη και χωριστά για εδάφη που είναι κυρίως λασπώδη και αργιλικά:

Όταν $U_* \geq U_{*t}$:

$$F_a = 0,13 \times (1-R) \times 10^{-14} \times U_*^4 \text{ για εδάφη που είναι κυρίως λασπώδη και αργιλικά} \quad (\text{Εξ. 24})$$

$$F_a = 0,13 \times (1-R) \times 10^{-13} \times U_*^3 \text{ για εδάφη που είναι κυρίως αμμώδη} \quad (\text{Εξ. 25})$$

Όταν $U_* < U_{*t}$ τότε $F_a = 0$

όπου U_* η ταχύτητα τριβής (cm/s), U_{*t} η τιμή κατωφλιού της ταχύτητας τριβής (cm/s), και R ο συντελεστής διόρθωσης/ελάττωσης που εξαρτάται από την εδαφοκάλυψη. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα πολλαπλασιάζονται με το κλάσμα (f) περιεκτικότητας του επιφανειακού στρώματος του εδάφους σε λάσπη (small silt) και άργιλο ώστε οι εκπομπές E (g/cm^2s) να περιοριστούν σε σωματίδια $A_{Σ_{10}}$.

$$E = (f_{\text{clay}} + f_{\text{small silt}}) F_a \quad (\text{Εξ. 26})$$

Η τιμή κατωφλιού της ταχύτητας τριβής του ανέμου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$U_{*t} = U_{*t,1} \text{ για } w < w' \quad (\text{Εξ. 27})$$

$$U_{*t} = U_{*t,1} \sqrt{1 + 1,21(w - w')^{0,68}} \text{ για } w > w' \quad (\text{Εξ. 28})$$

όπου w είναι η υγρασία της ατμόσφαιρας, w' είναι το κατώφλι της υγρασίας του εδάφους (κ.ο.) και δίνεται από την εξίσωση $w' = 0,0014(\% \text{ \acute{a}ργιλος})^2 + 0,17(\% \text{ \acute{a}ργιλος})$ (Εξ. 29). Η παράμετρος $U_{*t,1}$ είναι μια αρχική εμπειρική τιμή της ταχύτητας τριβής που υπολογίζεται: $U_{*t,1} = 0,30e^{7,22Z_0}$ (Εξ. 30), όπου z_0 είναι το μήκος επιφανειακής τραχύτητας (m) και εξαρτάται από την φυτοκάλυψη/εδαφοκάλυψη της περιοχής. Η ταχύτητα τριβής υπολογίζεται με την σχέση:

$$\frac{u_z}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (\text{Εξ. 31})$$

όπου κ είναι η σταθερά von Karman (= 0,4) και u_z η ταχύτητα του ανέμου (m/s) σε ύψος z (m).

Στην δεύτερη προσέγγιση υπολογίζεται η οριζόντια ροή εκπομπών σωματιδίων βάσει της μεθοδολογίας του Mansell κ.α. (2004). Θεωρείται πως σε κάθε επεισόδιο διάβρωσης του εδάφους από τον άνεμο η εκπομπή των σωματιδίων ξεκινά με απότομα με αιώρηση μεγάλης ποσότητας σωματιδίων (spike) και στη συνέχεια ο ρυθμός εκπομπής των σωματιδίων ελαττώνεται. Η εξίσωση που περιγράφει την οριζόντια ροή σωματιδίων (E σε g) είναι:

$$E = A \times (EF_{\text{spike}} + T \times ER) \quad (\text{Εξ. 32})$$

όπου A (m^2) είναι η επιφάνεια του εδάφους από την οποία εκπέμπονται τα σωματίδια, T (h) είναι η διάρκεια του επεισοδίου, EF_{spike} (g/m^2) είναι ο συντελεστής εκπομπής στην αρχή και ER ($\text{g}/\text{m}^2\text{h}$) ο ρυθμός εκπομπής στην πορεία του επεισοδίου. Η περιοχή διακρίνεται ανάλογα την υφή και κατάσταση του εδάφους σε περιοχή με επιφάνεια εδάφους σταθερή ή ασταθής, δηλαδή σε επιφάνειες εδάφους με περιορισμένη ή απεριόριστη δυνατότητα διάβρωσης (AP-42 Method; US EPA, 1985). Σε κάθε κατηγορία αντιστοιχούν συντελεστές εκπομπής EF_{spike} και ER που εξαρτώνται από την ταχύτητα του ανέμου. Η οριζόντια ροή μετατρέπεται σε κατακόρυφη εκπομπή σωματιδίων (g) με την σχέση:

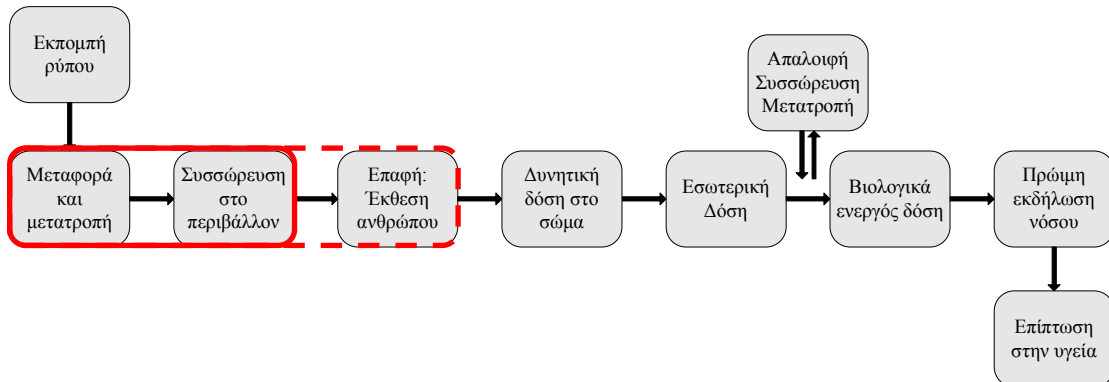
$$E_f = a \times E \times CF \times RRF \quad (\text{Εξ. 33})$$

όπου CF (αδιάστατο) είναι ο συντελεστής διόρθωσης των εκπομπών εξαιτίας της φυτοκάλυψης ή/και της παρουσίας αδιάβρωτων στοιχείων, και RRF (αδιάστατο) είναι ο συντελεστής αναφόρτισης της επιφάνειας. Το a είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από την υφή του εδάφους και την ταχύτητα τριβής του ανέμου και η τιμή του θεωρείται πως κυμαίνεται μεταξύ 10^{-3} – 10^{-4} στην Ευρώπη (δίνεται ως best value assessment στην μελέτη των Korcz κ.α., 2009). Σε κάθε είδος εδαφοκάλυψης αντιστοιχεί ένας συντελεστής διόρθωσης CF σύμφωνα με τον Korcz κ.α. (2009). Ο συντελεστής RRF εξαρτάται από μετεωρολογικές παραμέτρους και εκφράζει την πιθανότητα εκπομπής σωματιδίων από το έδαφος. Η τιμή του καθορίζεται βάσει περιορισμών στην δυνατότητα εκπομπής σωματιδίων από μια περιοχή και μπορεί να είναι 0 ή 1 εφόσον είναι γνωστές οι τιμές των μετεωρολογικών παραμέτρων για κάθε ώρα για μεγάλη χρονική περίοδο. Οι παραδοχές που λήφθηκαν υπόψη στον υπολογισμό του στα πλαίσια της εργασίας, ισχύουν για τυπικά εδάφη στην Ευρώπη και την Αμερική (Mansell κ.α., 2004). Αναλυτικότερα, θεωρείται πως ασταθείς επιφάνειες μπορούν να εκπέμπουν σωματίδια για 10 συνεχείς ώρες, ενώ σταθερές επιφάνειες μόνο για μια ώρα. Στη συνέχεια απαιτούνται 24 h για την αναφόρτιση των επιφανειών σε σωματίδια ικανά να αιωρηθούν από τον άνεμο. Ακόμα δεν εκπέμπονται σωματίδια κατά τη διάρκεια βροχής, χιονόπτωσης και παγετού (θερμοκρασία του εδάφους κάτω από 0°C). Ο χρόνος αναφόρτισης σε περίπτωση βροχής και χιονόπτωσης είναι 72 h ενώ σε περίπτωση παγετού 12 h επιπλέον. Η τιμή κατωφλίου της ταχύτητας τριβής θεωρείται σταθερή και ίση με 8,9 m/s (αντιπροσωπευτική τιμή για την Ευρώπη; Korcz κ.α., 2009; Mansell κ.α., 2004).

Οι εκπομπές $AS_{2,5}$ και στις δύο μεθόδους λαμβάνονται ως το 10% των εκπομπών AS_{10} (μετρήσεις λόγου για εδάφη στις ΗΠΑ; MRI, 2005). Ο συντελεστής αυτός μπορεί να διαφέρει ανάλογα τον τύπο του εδάφους.

Στο μοντέλο περιλαμβάνονται τυπικές τιμές για τους συντελεστές εκπομπής και διόρθωσης για την ΕΠΑ όπου το μοντέλο εφαρμόστηκε. Η ταξινόμηση τους είναι σε κατηγορίες εδαφοκάλυψης CLC2000 (έχει γίνει μετατροπή από τις κατηγορίες GLC2000 που δίνονται από τον Korcz κ.α., 2009, και τις κατηγορίες USGS από τους Park και In, 2003) και σε κατηγορίες υφής εδάφους σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό χάρτη Εδαφών (European Soil Map, Soil Topological Unit Texture, Soil Horizon Texture; ESDB v2.0, 2004). Περισσότερες λεπτομέρειες δίνονται στην εφαρμογή 1 (Κεφάλαιο 5).

3. ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΡΥΠΩΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΣΕ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ



Η σχέση μεταξύ των εκπομπών ρύπων και των συγκεντρώσεων τους στο περιβάλλον εξαρτάται από πολλές παραμέτρους όπως τα χαρακτηριστικά της πηγής (π.χ. ρυθμός εκπομπής), τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος της περιοχής (π.χ. μορφολογία εδάφους, τύπος δόμησης), τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα (π.χ. διάχυση, φωτοχημικές αντιδράσεις, εναπόθεση), τις φυσικοχημικές ιδιότητες του ρύπου, τη θέση των αποδεκτών στο χώρο και το χρόνο. Οι μετρήσεις των συγκεντρώσεων ρύπων στο περιβάλλον δίνουν μόνο μια εικόνα της κατάστασης της ατμόσφαιρας σε συγκεκριμένο χώρο και χρόνο. Έτσι για την εκτίμηση των επιπέδων των συγκεντρώσεων ρύπων στο χώρο και στο χρόνο μιας περιοχής χρησιμοποιούνται μαθηματικά μοντέλα ποιότητας του αέρα. Τα μοντέλα ποιότητας του αέρα είναι μια μαθηματική περιγραφή της ατμοσφαιρικής μεταφοράς, διασποράς, διάχυσης, της υγρής και ξηρής εναπόθεσης, της βαρυτικής καθίζησης, και των φωτοχημικών και φυσικών μετασχηματισμών των ρύπων (Καραθανάσης, 2007). Τα μοντέλα ποιότητας αέρα χρησιμοποιούνται για την κατανόηση των φαινομένων στην ατμόσφαιρα και τα αποτελέσματά τους θα πρέπει να αξιολογούνται συνεχώς με μετρήσεις συγκεντρώσεων ώστε να θεωρούνται αξιόπιστα. Τα μοντέλα ποιότητας αέρα μπορούν επιπλέον να χρησιμοποιηθούν για:

- τον υπολογισμό της συνεισφοράς μιας πηγής στις συγκεντρώσεις μιας περιοχής,
- την αξιολόγηση και εύρεση της αποτελεσματικότερης στρατηγικής για τη μείωση της ρύπανσης της ατμόσφαιρας μιας περιοχής,
- την χωροθέτηση μιας νέας πηγής (αδειοδότηση) έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι επιπτώσεις της στο περιβάλλον, και
- την πρόγνωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας.

Τα μοντέλα ποιότητας του αέρα διακρίνονται σε πολλές κατηγορίες, η ανάλυση τους όμως ξεφεύγει από τους στόχους της εργασίας. Στην ενότητα αυτή θα αναλυθεί απλά ο τρόπος υπολογισμού των συγκεντρώσεων ρύπων στην ατμόσφαιρα με το μοντέλο ISC3 (Industrial Source Complex Model) που χρησιμοποιείται από την εφαρμογή που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας. Το μοντέλο ISC3 είναι ένα απλό εμπειρικό μοντέλο ποιότητας της ατμόσφαιρας γκαουσιανού τύπου. Όπως και άλλα αναλυτικά μοντέλα γκαουσιανού τύπου, χρησιμοποιείται κυρίως για ρυθμιστικούς σκοπούς. Το μοντέλο ISC3 ήταν έως και το 2005 το προτεινόμενο μοντέλο από την Αμερικανική Επιτροπή Προστασίας Περιβάλλοντος (US EPA) για μελέτες ποιότητας αέρα για ρυθμιστικούς λόγους (π.χ. περιβαλλοντική αδειοδότηση νέων βιομηχανικών μονάδων). Στη μονάδα λογισμικού Transport που αναπτύχθηκε χρησιμοποιείται η εφαρμογή (τροποποιημένος πηγαίος κώδικας και εκτελέσιμο αρχείο του μοντέλου) ISC3 μαζί με εργαλεία για την δημιουργία του πλέγματος αποδεκτών και την μετατροπή των αποτελεσμάτων της μονάδας Sources σε αρχεία εισόδου του μοντέλου. Η έκδοση LT χρησιμοποιείται για την εύρεση των μέσων συγκεντρώσεων σε μια περιοχή για μεγάλες χρονικές περιόδους. Τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό της έκθεσης πληθυσμού και των επιπτώσεων στην υγεία των κατοίκων μιας περιοχής. Σημειώνεται πως η συγκεκριμένη μονάδα λογισμικού έχει ελεγχθεί μόνο με τη βοήθεια τυπικών αρχείων εισόδου και εξόδου που διατίθενται μαζί με το μοντέλο ISC3. Στις εφαρμογές τα επίπεδα των συγκεντρώσεων σωματιδίων και άλλων ρύπων στον αέρα προέρχονται από μετρήσεις.

Το μοντέλο ISCLT δίνει αποτελέσματα σχετικά με τη συνεισφορά κάθε πηγής στην συγκέντρωση που παρατηρείται σε κάθε αποδέκτη. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή εφόσον είναι γνωστές οι συγκεντρώσεις έκθεσης, η εύρεση των πιθανών πηγών ρύπανσης και της συνεισφοράς τους σε έναν αποδέκτη γίνεται με ανάλυση των τροχιών των αερίων μαζών και ανάλυση αποδεκτών, όπως παρουσιάζεται στο τέλος του Κεφαλαίου. Επιπλέον, παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού της συγκέντρωσης ΑΣ στο εσωτερικό περιβάλλον από την εξωτερική.

3.1.Εισαγωγή στο μοντέλο ISC3LT

Ο υπολογισμός των συγκεντρώσεων στον εξωτερικό χώρο γίνεται με το μοντέλο ISCLT3. Στο μοντέλο μπορούν να εισαχθούν σημειακές, γραμμικές, εμβαδικές και πηγές όγκου. Στον υπολογισμό λαμβάνονται υπόψη η ξηρή εναπόθεση των σωματιδίων, η επίδραση των κτιρίων (περιορισμένη) και του ανάγλυφου (περιορισμένη), ενώ ο υπολογισμός της ανύψωσης του πλουμίου γίνεται συναρτήσει της προσήνεμης απόστασης. Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολλαπλές πηγές (έως 300) διαφορετικής χωρικής διάστασης που μπορούν να ταξινομούνται σε ομάδες πηγών (έως 5). Οι αποδέκτες (έως 1200) μπορούν να τοποθετούνται σε διακριτά σημεία στο χώρο ή πλέγμα καρτεσιανό ή πολικό (US EPA, 1995α).

Τα μετεωρολογικά δεδομένα, σε μηνιαία, εποχιακή ή ετήσια βάση, εισάγονται στο μοντέλο με το αρχείο ελέγχου της εκτέλεσης και με εξωτερικό αρχείο εισόδου. Στο αρχείο αυτό περιλαμβάνονται τα δεδομένα ανέμου σε μορφή περιλήψεων STAR (Stability Array). Οι περιλήψεις αυτές περιλαμβάνουν δεδομένα σε μορφή συχνότητας εμφάνισης σε συνθήκες όπου συνδυάζονται συγκεκριμένη κλάση ταχύτητας του ανέμου, τομέας διεύθυνσης του ανέμου και κατηγορία ευστάθειας της ατμόσφαιρας (πίνακας πυκνότητας πιθανότητας). Δηλαδή στο μοντέλο η διεύθυνση του ανέμου εισάγεται σαν συχνότητα εμφάνισης ανά τομέα, χωρίς πληροφορίες για την κατανομή του ανέμου μέσα στον τομέα. Το μοντέλο μπορεί να υπολογίσει την συγκέντρωση ή ξηρή εναπόθεση χωριστά για κάθε περίληψη STAR ή για τη συνολική περίοδο που καλύπτουν οι περιλήψεις STAR στο αρχείο εισόδου. Τα μετεωρολογικά δεδομένα θεωρούνται αντιπροσωπευτικά της περιοχής μελέτης/της περιοχής γύρω από την πηγή. Θα πρέπει να σημειωθεί πως επειδή σε κάθε εκτέλεση του μοντέλου εισάγονται μόνο μια φορά οι τιμές των μετεωρολογικών παραμέτρων και των χαρακτηριστικών της περιοχής, τα αποτελέσματα του είναι περισσότερο αξιόπιστα για πηγές που δεν απέχουν πολύ γεωγραφικά. Ακόμα δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση πηγών στη περιοχή γύρω από την μελετώμενη, όπως και οι συγκεντρώσεις υποβάθρου στην περιοχή.

3.1.1. Εκπομπές από Σημειακές πηγές

Η μακροχρόνια μέση συγκέντρωση που προκύπτει από τις εκπομπές σημειακής πηγής, υπολογίζεται ως η σταθμισμένη με τη συχνότητα εμφάνισης μέση τιμή των μέσων συγκεντρώσεων για κάθε συνδυασμό μετεωρολογικών παραμέτρων. Αναλυτικότερα, η επιφάνεια που περικλείει κάθε πηγή διακρίνεται σε τομείς ίσου γωνιακού πάχους και τελικά η μέση συγκέντρωση, που προκύπτει από μία πηγή, σε κάθε αποδέκτη υπολογίζεται ως η μέση τιμή για κάθε διεύθυνση ανέμου, ταχύτητα ανέμου και κατηγορία ευστάθειας. Η σχέση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό είναι η μέση ανά τομέα εξίσωση του Gauss:

$$\chi_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{K}{R\Delta\theta} \sum_{i,j,k} \frac{QfSVD}{u_s\sigma_z} \quad (\text{Εξ. 34})$$

όπου χ είναι η συγκέντρωση ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), K ο συντελεστής για τη μετατροπή των μονάδων (τυπική τιμή 10^6 για ρυθμό εκπομπής σε g/s και συγκέντρωση σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Q ο ρυθμός εκπομπής (μάζα στη μονάδα του χρόνου) για την κατηγορία ταχύτητας ανέμου i , την κατηγορία ευστάθειας k και την εποχή l ; f είναι η συχνότητα εμφάνισης της κατηγορίας ταχύτητας ανέμου i , της κατηγορίας διεύθυνσης ανέμου j και της κατηγορίας ευστάθειας k την εποχή l ; $\Delta\theta'$ είναι το πλάτος του τομέα (ακτίνα); R είναι η ακτινική απόσταση του αποδέκτη από πλευρική υποθετική σημειακή πηγή; S είναι μια συνάρτηση ομαλοποίησης των τιμών, u_s είναι η μέση ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της καμινάδας για την κατηγορία ταχύτητας ανέμου i και την κατηγορία ευστάθειας k (m/s), σ_z είναι η τυπική απόκλιση της κατακόρυφης κατανομής της συγκέντρωσης για την κατηγορία ευστάθειας k (m), V είναι το κατακόρυφο όριο για την κατηγορία ταχύτητας ανέμου i , την

κατηγορία ευστάθειας k και την εποχή l , και D είναι ο όρος εξασθένισης για την κατηγορία ταχύτητας ανέμου i και την κατηγορία ευστάθειας k .

Η ακτινική απόσταση R υπολογίζεται από τη σχέση $R = \sqrt{(x+x_y)^2 + y^2}$ (Εξ. 35), όπου x είναι η απόσταση από την προσήνεμη πλευρά από το κέντρο της πηγής ως στον αποδέκτη μετρημένη κατά μήκος του άξονα του πλουμίου (m), y είναι η πλευρική απόσταση του αποδέκτη από τον άξονα του πλουμίου (m), και x_y η πλευρική εικονική απόσταση που είναι 0 για πηγές χωρίς κατώρευμα ή χωρίς πλευρική διασπορά.

Οι προσήνεμες και πλευρικές/κάθετες στη διεύθυνση του ανέμου αποστάσεις από την πηγή υπολογίζονται για όλο το δίκτυο αποδεκτών που μπορεί να είναι σε πολικό ή καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων ή και στα δύο. Σε πολικό σύστημα συντεταγμένων η ακτινική συνιστώσα του σημείου (r, θ) μετριέται από την αρχή που καθορίζεται από το χρήστη ενώ η γωνιακή συνιστώσα θ μετριέται από το Βορά με τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, ο άξονας X είναι θετικός προς την Ανατολή και ο άξονας Y προς τον Βορά. Σε κάθε περίπτωση η θέση κάθε πηγής ορίζεται σε σχέση με την αρχή των αξόνων του πλέγματος (δικτύου) χρησιμοποιώντας καρτεσιανές συντεταγμένες. Σε πολικό σύστημα συντεταγμένων με την αρχή των αξόνων στο σημείο (X_0, Y_0) , οι συντεταγμένες ενός αποδέκτη (R) στο σημείο (r, θ) είναι $X(R) = r \sin \theta - X_0$ (Εξ. 36) και $Y(R) = r \cos \theta - Y_0$ (Εξ. 37), ενώ η προσήνεμη (στη διεύθυνση ανέμου WD) απόσταση του από πηγή που βρίσκεται στο σημείο $(X(S), Y(S))$ και η πλευρική του από τον άξονα του πλουμίου δίνονται από τις σχέσεις:

$$x = -(X(R) - X(S)) \sin(WD) - (Y(R) - Y(S)) \cos(WD) \quad (\text{Εξ. 38})$$

$$\text{και } y = (X(R) - X(S)) \cos(WD) - (Y(R) - Y(S)) \sin(WD) \quad (\text{Εξ. 39})$$

Η ταχύτητα του ανέμου u_s στο ύψος της καμινάδας (m/s) υπολογίζεται με αναγωγή της ταχύτητας ανέμου u_{ref} (m/s) που παρατηρείται σε ένα ύψος αναφοράς z_{ref} (m) στο ύψος της καμινάδας h_s (m) χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$u_s = u_{ref} \left(\frac{h_s}{z_{ref}} \right)^p \quad (\text{Εξ. 40})$$

όπου p είναι ο εκθέτης στην εξίσωση για το προφίλ του ανέμου και εξαρτάται από την κατηγορία ευστάθειας της ατμόσφαιρας και την περιοχή γύρω από την πηγή. Οι τυπικές τιμές του είναι αυτές που δίνονται στον Πίνακα 5. Οι τιμές του p μπορούν να δοθούν ακόμα σαν συνάρτηση της κατηγορίας ευστάθειας της ατμόσφαιρας και την κατηγορία ταχύτητας του ανέμου. Η τιμή της ταχύτητας u_s στο ύψος της καμινάδας δεν μπορεί να είναι μικρότερη από 1 m/s .

Το ενεργό ύψος της καμινάδας h_e , είναι το άθροισμα του φυσικού ύψους της καμινάδας, h_s (m), και της ανύψωσης του πλουμίου, Δh , και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του κατακόρυφου ορίου. Στην περίπτωση που η ταχύτητα με την οποία εξέρχονται οι εκπομπές από την καμινάδα, v_s (m/s), είναι μικρότερη από $1,5u_s$ το φυσικό ύψος της καμινάδας μπορεί να

διορθωθεί σε $h'_s = h_s + 2d_s [v_s/u_s - 1,5]$ (Εξ. 41) όπου d_s (m) είναι η διάμετρος της καμινάδας στην κορυφή της (υπολογισμός κατωρεύματος καμινάδας). Έτσι το ενεργό ύψος της καμινάδας υπολογίζεται τελικά από τη σχέση $h_e = h'_s + \Delta h$ (Εξ. 42). Η ανύψωση του πλουμίου εξαρτάται από τις αρχικές συνθήκες της πηγής (ταχύτητα εξόδου απαερίων και διαφορά θερμοκρασίας του πλουμίου με τον αέρα), την στρωματοποίηση της ατμόσφαιρας και την ταχύτητα του ανέμου (Seinfeld και Pandis, 2006). Ο υπολογισμός της στο μοντέλο γίνεται με τις εξισώσεις του Briggs για πλούμιο που δεν επηρεάζονται από κτίρια, ενώ σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται οι μέθοδοι των Huber-Snyder και Schulman-Scire (US EPA, 1995α και 1995β). Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται από το μοντέλο για τον υπολογισμό της ανύψωσης πλουμίου που δεν επηρεάζεται από κτίρια δίνονται στη μορφή $\Delta h = E x^b / u_s^3$ (Εξ. 43) στον Πίνακα 6 μαζί με την απόσταση x_i στην οποία το πλούμιο φτάνει στο μέγιστο ύψος του και την κρίσιμη διαφορά θερμοκρασίας ΔT_c .

Πίνακας 5 Τιμές της παραμέτρου p για τον υπολογισμό της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος έκλυσης εκπομπών από σημειακή πηγή (US EPA, 1995β).

Κατηγορία ευστάθειας	p για αγροτική περιοχή	p για αστική περιοχή
A	0,07	0,15
B	0,07	0,15
C	0,10	0,20
D	0,15	0,25
E	0,35	0,30
F	0,55	0,30

Η τυπική απόκλιση της κατακόρυφης κατανομής της συγκέντρωσης, σ_z (m), υπολογίζεται για αγροτικές περιοχές από τη σχέση $\sigma_z = \alpha x^b$ (Εξ. 44), που προσεγγίζει της καμπύλες Pasquill-Gifford (Turner, 1970). Οι τιμές των συντελεστών α και b εξαρτώνται από την κατάσταση ευστάθειας της ατμόσφαιρας, και την προσήνεμη απόσταση x (km). Για αστικές περιοχές η διασπορά σ_z υπολογίζεται με τις εξισώσεις του Briggs συναρτήσει της κατάστασης ευστάθειας και της προσήνεμης απόστασης. Το μοντέλο θεωρεί πως η κατανομή της συγκέντρωσης κατά πλάτος κάθε τομέα είναι ομοιόμορφη και έτσι δεν λαμβάνει υπόψη την τυπική απόκλιση σ_y της πλευρικής κατανομής παρά μόνο στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Schulman-Scire για την ανύψωση του πλουμίου. Οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν μόνο για την περίπτωση ιδεατής σημειακής πηγής και διορθώνονται από το μοντέλο ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν. Για παράδειγμα σε περίπτωση ανυψωμένου πλουμίου (Buoyancy-induced), που επικρατεί διασπορά λόγω θερμικής άνωσης, η διορθωμένη τυπική απόκλιση της κατακόρυφης κατανομής της συγκέντρωσης, σ_{ze} (m), δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{ze} = \sqrt{\left[\sigma_z^2 + \left(\frac{\Delta h}{3,5} \right)^2 \right]} \quad (\text{Εξ. 45})$$

όπου Δh είναι η ανύψωση του πλουμίου και εξαρτάται από την απόσταση εφόσον ο αποδέκτης βρίσκεται σε θέση όπου το πλούμιο δεν έχει φτάσει ακόμα στο μέγιστο ύψος του. Στην περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη και η επίδραση των κτιρίων στην διασπορά τότε η διόρθωση των τυπικών αποκλίσεων γίνεται λαμβάνοντας υπόψη και τις εικονικές αποστάσεις στην κατακόρυφη και πλευρική διεύθυνση. Η διαδικασία υπολογισμού των εικονικών αποστάσεων αλλά και των διορθωμένων τυπικών αποκλίσεων ξεφεύγει από τους στόχους της εργασίας. Ο αναγνώστης παραπέμπεται στο εγχειρίδιο χρήσης του μοντέλου ISC3LT.

Πίνακας 6 Εξισώσεις υπολογισμού ανύψωσης πλουμίου στη μορφή $\Delta h = E x^b / u_s^a$.

Κατηγορία ευστάθειας	Ανύψωση	No	α	b	E	Συνθήκες
Ασταθής ή Ουδέτερη	Θερμική άνωση ($\Delta T \geq \Delta T_{c1}$)	1	1	0	$21,425 F_b^{3/4}$	$F_b < 55, x \geq x_{f1-1}$
		2	1	0	$38,71 F_b^{3/5}$	$F_b \geq 55, x \geq x_{f1-2}$
		3	1	2/3	$1,6 F_b^{1/3}$	$F_b < 55, x < x_{f1-1}$ και $F_b \geq 55, x < x_{f1-2}$
	Ορμή ($\Delta T < \Delta T_{c1}$)	4	1	0	$3 d_s v_s$	$x \geq x_{f1}$
		5	1/3	2/3	$(3 F_m / \beta_f^2)^{1/3}$	$x < x_{max-1}$
Σταθερή	Θερμική άνωση ($\Delta T \geq \Delta T_{c2}$)	6	1/3	0	$2,6 (F_b / s)^{1/3}$	$x \geq x_{f2}$
		7	1	2/3	$1,6 F_b^{1/3}$	$x < x_{f2}$
	Ορμή ($\Delta T < \Delta T_{c2}$)	8 ^a	1/3	0	$1,5 (F_m / \sqrt{s})^{1/3}$	$x \geq x_{f2}$
		9	b			$x < x_{max-2}$

^a χρησιμοποιείται και η σχέση Νο 4 και επιλέγεται η μικρότερη από τις δύο τιμές

$$^b \Delta h = \left[3 F_m \frac{\sin(x\sqrt{s}/u_s)}{\beta_f^2 u_s \sqrt{s}} \right]^{1/3}$$

s: η παράμετρος σταθερότητας (s^{-2}), $s = g \frac{\partial \theta}{\partial z} / T_a$

F_b και F_m (m^4/s^3): παράμετρος ροής λόγω θερμικής άνωσης $F_b = g v_s d_s^2 \frac{\Delta T}{4 T_s}$ και λόγω ορμής $F_m = v_s^2 d_s^2 \frac{T_a}{4 T_s}$, με

$\Delta T = T_s - T_a$, όπου T_s η θερμοκρασία του πλουμίου και T_a του αέρα (K)

$\Delta T_{c1-1,2}$: κρίσιμη διαφορά θερμοκρασίας σε περίπτωση ασταθής ή ουδέτερης ατμόσφαιρας, για $F_b < 55$ είναι

$$(\Delta T)_{c1-1} = 0,02977 T_s \frac{v_s^{1/3}}{d_s^{2/3}} \text{ και για } F_b \geq 55 \text{ είναι } (\Delta T)_{c1-2} = 0,00575 T_s \frac{v_s^{2/3}}{d_s^{1/3}}$$

ΔT_{c2} : κρίσιμη διαφορά θερμοκρασίας σε περίπτωση σταθερής ατμόσφαιρας, $(\Delta T)_{c2} = 0,019582 T_a v_s \sqrt{s}$

$x_{f1-1,2}$: η απόσταση από την πηγή στην οποία το πλούμιο φτάνει στο μέγιστο ύψος του για ασταθή ή ουδέτερη

ατμόσφαιρα, για $F_b < 55$ είναι $x_{f1-1} = 49 F_b^{5/8}$ και για $F_b \geq 55$ είναι $x_{f1-2} = 119 F_b^{2/5}$

x_{f2} : η απόσταση από την πηγή στην οποία το πλούμιο φτάνει στο μέγιστο ύψος του για σταθερή ατμόσφαιρα,

$$x_{f2} = 2,0715 \frac{u_s}{\sqrt{s}}$$

$$x_{max-1,2}: \text{προσήνεμη απόσταση, } x_{max-1} = \begin{cases} 4 d_s (v_s + 3 u_s)^2 / v_s u_s & \text{για } F_b = 0 \\ x_{f1-1} & \text{για } F_b < 55, \text{ και } x_{max-2} = 0,5 \frac{\pi u_s}{\sqrt{s}} \\ x_{f1-2} & \text{για } F_b \geq 55 \end{cases}$$

β_f : παράμετρος τζέτ, $\beta_f = 1/3 + u_s / v_s$

Το κατακόρυφο όριο V χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της κάθετης διασποράς του πλουμίου και περιλαμβάνει τα αποτελέσματα σε αυτή, του υψομέτρου της πηγής και των αποδεκτών, της ανύψωσης του πλουμίου, της περιορισμένης ανάμιξης στον κατακόρυφο άξονα, της βαρυτικής καθίζησης και της ξηρής απόθεσης των μεγάλων σωματιδίων. Για αέριους ρύπους και σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από περίπου 0,1 μm οι επιδράσεις της βαρυτικής

καθίζησης και της ξηρής εναπόθεσης μπορούν να παραληφθούν και έτσι ο υπολογισμός του κατακόρυφου ορίου γίνεται με την εξίσωση:

$$V = \exp\left[-0,5\left(\frac{z_r - h_e}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-0,5\left(\frac{z_r + h_e}{\sigma_z}\right)^2\right] + \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ \begin{array}{l} \exp\left[-0,5\left(\frac{H_1}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-0,5\left(\frac{H_2}{\sigma_z}\right)^2\right] \\ + \exp\left[-0,5\left(\frac{H_3}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-0,5\left(\frac{H_4}{\sigma_z}\right)^2\right] \end{array} \right\} \quad (\text{Εξ. 46})$$

όπου z_r είναι το ύψος του αποδέκτη από το έδαφος (m), $h_e = h_s + \Delta h$ και $H_1 = z_r - (2iz_i - h_e)$, $H_2 = z_r + (2iz_i - h_e)$, $H_3 = z_r - (2iz_i + h_e)$, $H_4 = z_r + (2iz_i + h_e)$ (Εξ. 47)

Το άπειρο όριο στην παραπάνω εξίσωση αντιπροσωπεύει τον περιορισμό της ανύψωσης του πλουμίου στην κορυφή του στρώματος ανάμιξης. Αν το ενεργό ύψος της καμινάδας, h_e , είναι πάνω από το ύψος του στρώματος ανάμιξης, z_i (m), θεωρείται πως το πλούμιο εισέρχεται πλήρως στο στρώμα αναστροφής και έτσι οι συγκεντρώσεις στο έδαφος είναι μηδενικές. Σε μεγάλες προσήνεμες αποστάσεις ($\sigma_z/z_i \geq 1,6$) το κατακόρυφο όριο αλλάζει την κατακόρυφη κατανομή των συγκεντρώσεων από γκαουσιανή σε ορθογώνια και υπολογίζεται από τη σχέση $V = \sqrt{2\pi}\sigma_z/z_i$ (Εξ. 48). Στην περίπτωση που το πλούμιο διέρχεται από περιοχές ανυψωμένου εδάφους απλής μορφολογίας (δηλαδή το υψόμετρο δεν ξεπερνά το h_e), ο υπολογισμός του κατακόρυφου ορίου γίνεται αντικαθιστώντας στην παραπάνω εξίσωση το ενεργό ύψος της καμινάδας με μια νέα τιμή $h_e' = h_e + z_s - z_{(x,y)}$ (Εξ. 49), όπου z_s είναι το υψόμετρο (m) στη θέση της καμινάδας και $z_{(x,y)}$ είναι το υψόμετρο στη θέση (x,y) του αποδέκτη. Θεωρείται πως δεν αλλάζει ο άξονας του πλουμίου και πως το ύψος ανάμιξης ακολουθεί το ανάγλυφο. Οι αποδέκτες που βρίσκονται πάνω από το ύψος της καμινάδας h_s θεωρείται πως βρίσκονται σε υψόμετρο $z_s + h_s$. Για εκπομπές μεγάλων σωματιδίων ο υπολογισμός του κατακόρυφου ορίου λαμβάνει υπόψη την ξηρή εναπόθεση τους και γίνεται με διαφορετικό τρόπο που περιγράφεται αναλυτικά στο εγχειρίδιο χρήσης του μοντέλου ISC3LT.

Το όριο εξασθένησης D, είναι ένας συντελεστής για τον υπολογισμό της απομάκρυνσης των ρύπων με απλές φυσικές ή/και χημικές διεργασίες. Όταν δεν υπάρχει εξασθένηση η τιμή του είναι μονάδα ενώ όταν υπάρχει εξασθένηση με ρυθμό ψ (s^{-1}) το όριο D υπολογίζεται με την εξίσωση $D = \exp(-\psi x/u_s)$ (Εξ. 50) που , όπου x είναι η προσήνεμη απόσταση (m) και u_s είναι ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της καμινάδας (m/s).

Τέλος, ο συντελεστής S χρησιμοποιείται για την ομαλοποίηση των τιμών των συγκεντρώσεων στα άκρα των τομέων. Οι συγκεντρώσεις στον κεντρικό άξονα κάθε τομέα παραμένουν όπως υπολογίζονται ενώ οι υπόλοιπες διορθώνονται με τη τιμή της συγκέντρωσης στον κεντρικό άξονα των γειτονικών τομέων. Η τιμή του S δίνεται από τη σχέση $S = (\Delta\theta' - |\theta'_j - \theta'|) / \Delta\theta'$ (Εξ. 51) που ισχύει για $|\theta'_j - \theta'| \leq \Delta\theta'$ διαφορετικά η τιμή της είναι μηδέν. Οι παράμετροι θ'_j και θ' είναι οι γωνιακές αποστάσεις (σε ακτίνια) από τον Βορά ως τον κεντρικό άξονα του τομέα j και τον αποδέκτη στη θέση R, αντίστοιχα.

3.1.2. Εκπομπές από Μη-σημειακές πηγές

Πηγές όγκου

Η διασπορά από πηγές όγκου υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο εικονικών πηγών. Αναλυτικότερα, θεωρείται πως υπάρχει μια εικονική σημειακή πηγή σε συγκεκριμένη απόσταση από την υπήνεμη πλευρά της πηγής όγκου. Πηγή όγκου (τρισεδιάστατη πηγή) στο μοντέλο μπορεί να είναι μια επιφανειακή ή ανυψωμένη γραμμική ή εμβαδική πηγή όπως για παράδειγμα μια σιδηροδρομική γραμμή και ένας ιμάντας μεταφοράς. Οι επιφανειακές πηγές όγκου μπορούν να εισαχθούν στο μοντέλο και σαν εμβαδικές πηγές. Για τον υπολογισμό της διασποράς των εκπομπών από μια πηγή όγκου είναι απαραίτητα το ενεργό ύψος της πηγής (0 για επιφανειακή πηγή), οι διαστάσεις της και οι αρχικές τιμές των παραμέτρων διασποράς σ_{y0} και σ_{z0} στο ενεργό ύψος της πηγής. Για τον υπολογισμό των αρχικών παραμέτρων διασποράς χρησιμοποιούνται οι διαστάσεις της πηγής. Ο υπολογισμός των παραμέτρων διασποράς στη συνέχεια και των εικονικών αποστάσεων γίνεται όπως και για τη διασπορά πλουμίου από σημειακή πηγή με την επίδραση κτιρίων. Μια γραμμική πηγή μπορεί να αποτελείται από πολλές πηγές όγκου. Οι διαστάσεις όλων των πηγών όγκου που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο στους άξονες Βοράς-Νότος και Ανατολή-Δύση πρέπει να είναι ίσες.

Εμβαδικές πηγές

Εμβαδική πηγή στο μοντέλο μπορεί να είναι οποιαδήποτε επιφανειακή πηγή δύο διαστάσεων. Συγκεκριμένα οποιαδήποτε επιφανειακή πηγή μπορεί να εισαχθεί στο μοντέλο ως εμβαδική αρκεί η επιφάνεια της να προσεγγιστεί με ορθογώνια με μέγιστο λόγο μήκους προς πλάτος $10/1$. Ο υπολογισμός της συγκέντρωσης στο έδαφος σε έναν αποδέκτη που βρίσκεται στην προσήνεμη διεύθυνση ολόκληρης ή μέρους της επιφανειακής πηγής γίνεται ολοκληρώνοντας την εξίσωση του Gauss αριθμητικά αντίθετα και κάθετα στη διεύθυνση του ανέμου:

$$X = \frac{Q_A K}{2\pi u_s} \int_x \frac{VD}{\sigma_y \sigma_z} \left(\int_y \exp \left[-0,5 \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] dy \right) dx \quad (\text{Εξ. 52})$$

όπου Q_A είναι ο ρυθμός εκπομπής της επιφανειακής πηγής (μάζα ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνο). Στη συνέχεια για την εύρεση της μέσης συγκέντρωσης ανά τομέα τα αποτελέσματα ολοκληρώνονται για κάθε συνδυασμό κατηγορίας ταχύτητας ανέμου, ευστάθειας της ατμόσφαιρας και διεύθυνσης ανέμου στο αρχείο περιλήψεων STAR χρησιμοποιώντας τον κανόνα του τραπεζίου. Ακόμα, για κάθε τομέα γίνεται ομαλοποίηση των τιμών στα άκρα όπως και στην περίπτωση σημειακής πηγής. Η απόσταση του αποδέκτη δεν μπορεί να είναι μικρότερη από 1m από την εμβαδική πηγή.

Πηγές ανοιχτού φρέατος

Πηγές ανοιχτού φρέατος θεωρούνται οι ανοικτές επιφάνειες του εδάφους όπως ορυχεία και λατομεία που εκπέμπουν σωματίδια. Οι πηγές εισάγονται στο μοντέλο με τη μορφή ενός μόνο ορθογωνίου με μέγιστο λόγο μήκους προς πλάτος $10/1$. Η συγκέντρωση μέσα στην πηγή

ανοικτού φρέατος είναι μηδενική για αυτό δεν θα πρέπει να τοποθετούνται αποδέκτες μέσα στα όρια της πηγής. Για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων των σωματιδίων που προκύπτουν από τις εκπομπές μιας πηγής ανοικτού φρέατος χρησιμοποιείται η ίδια μεθοδολογία όπως και στις εμβαδικές πηγές αλλά η ενεργός επιφάνεια τους (A) μεταβάλλεται ανάλογα με τη διεύθυνση του ανέμου και το βάθος του φρέατος. Επιπλέον μέρος των εκπομπών τους παραμένουν στο χώρο της πηγής και μόνο κάποιες διαφεύγουν κυρίως από την υπήνεμη πλευρά της πηγής. Ο συντελεστής διαφυγής ϵ για κάθε κατηγορία μεγέθους i των σωματιδίων δίνεται από τη σχέση:

$$\epsilon_i = \frac{1}{(1 + v_g / (\alpha U_r))} \quad (\text{Εξ. 53})$$

όπου v_g (m/s) είναι η ταχύτητα βαρυτικής καθίζησης, U_r είναι η ταχύτητα στα 10m (m/s), και α είναι η σταθερά αναλογίας μεταξύ της ροής από την πηγή και του γινομένου της ταχύτητας U_r με την συγκέντρωση στην πηγή. Έτσι ο συντελεστής εκπομπής ανά μονάδα επιφάνειας από την πηγή ανοικτού φρέατος για κάθε κατηγορία μεγέθους σωματιδίων είναι $Q_i = \epsilon_i \phi_i Q$ (Εξ. 54), όπου Q είναι ο συνολικός ρυθμός εκπομπής για όλες τις κατηγορίες μεγέθους των σωματιδίων μέσα στην πηγή, και ϕ_i είναι το κλάσμα των σωματιδίων στην κατηγορία μεγέθους i . Ο συνολικός συντελεστής εκπομπής/διαφυγής Q_a δίνεται ως $Q_a = \sum_i Q_i$ (Εξ. 55) και μεταβάλλεται στη συνέχεια ανάλογα με την ενεργό επιφάνεια A της πηγής σε ενεργό συντελεστή εκπομπής με τη σχέση $Q_e = Q_a / A$ (Εξ. 56).

3.1.3. Ξηρή εναπόθεση

Το μοντέλο μπορεί επιπλέον να υπολογίσει την ποσότητα σωματιδίων που αποτίθεται στο έδαφος λόγω ξηρής εναπόθεσης. Η ροή σωματιδίων στο έδαφος λόγω ξηρής εναπόθεσης, F_d ($\mu\text{g}/\text{m}^2\text{s}$), δίνεται γενικά από τη σχέση:

$$F_d = \chi v_d \quad (\text{Εξ. 57})$$

όπου, χ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) είναι η συγκέντρωση στο έδαφος που υπολογίζεται με την μέση ανά τομέα εξίσωση του Gauss λαμβάνοντας υπόψη την ξηρή εναπόθεση στον υπολογισμό του κατακόρυφου ορίου V , και v_d (m/s) είναι η ταχύτητα εναπόθεσης. Στον υπολογισμό της ταχύτητας εναπόθεσης το μοντέλο λαμβάνει υπόψη την επίδραση της βαρυτικής καθίζησης, της αδράνειας και της διάχυσης. Στον υπολογισμό χρειάζονται απαραίτητα η μέση διάμετρος μάζας των σωματιδίων για κάθε κλάσμα μεγέθους, η πυκνότητα τους, και το μήκος τραχύτητας της επιφάνειας. Περισσότερες λεπτομέρειες για τον υπολογισμό της ταχύτητας εναπόθεσης δίνονται στον οδηγό χρήσης του μοντέλου ISC3LT.

Για σημειακές πηγές και πηγές όγκου ο υπολογισμός της μέσης εποχιακής εναπόθεσης στον αποδέκτη που βρίσκεται στο σημείο (r, θ) από την βάση της καμινάδας ή το κέντρο της πηγής όγκου, για την κατηγορία μεγέθους σωματιδίων n (με κλάσμα ϕ_n) δίνεται από την εξίσωση:

$$F_{d,l,n} = \frac{K\varphi_n}{\sqrt{2\pi R^2 \Delta\theta}} \sum_{i,j,k} \frac{Q_j V_{dn} D}{\sigma_z} \quad (\text{Εξ. 58})$$

όπου V_{dn} είναι το κατακόρυφο όριο υπολογισμένο λαμβάνοντας υπόψη την ξηρή εναπόθεση και Q_j είναι ο ρυθμός εκπομπής κατά την εποχή l για την κατηγορία ταχύτητας ανέμου i και ευστάθειας k .

Για εμβαδικές πηγές και πηγές ανοιχτού φρέατος ο υπολογισμός γίνεται όπως και στην περίπτωση υπολογισμού της συγκέντρωσης με ολοκλήρωση για κάθε τομέα της εξίσωσης:

$$F_{d,n} = \frac{Q_j K \varphi_n V_{dn} V_{dn}(x, z_d, h_{ed}) D}{2\pi \sigma_y \sigma_z u_s} \exp\left[-0,5 \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \quad (\text{Εξ. 59})$$

όπου j είναι η χρονική περίοδος για την οποία υπολογίζεται η εναπόθεση.

3.2. Εφαρμογή μοντέλου διασποράς– Σύνδεση - Αναπαράσταση των πηγών για την εισαγωγή τους στο μοντέλο

Για την εκτέλεση του μοντέλου όπως αναφέρθηκε παραπάνω, χρειάζονται ένα αρχείο περιλήψεων STAR και ένα αρχείο καθορισμού των παραμέτρων της εκτέλεσης, όπως οι πηγές, οι θέσεις των αποδεκτών, ο ρύπος προς εξέταση, ο χαρακτηρισμός της περιοχής ως αστική ή αγροτική, το μήκος ταχύτητας ανά μέση περίοδο στο αρχείο STAR, το ύψος ανάμιξης κ.α. Η εισαγωγή των εκπομπών που υπολογίζονται με την μονάδα λογισμικού Sources στο μοντέλο ISC3LT γίνεται με την αναπαράσταση κάθε κατηγορίας πηγών (κατά SNAP 97) με μια από τις κατηγορίες πηγών του μοντέλου. Αναλυτικότερα, οι μεγάλες σημειακές πηγές όλων των κατηγοριών SNAP θεωρούνται σημειακές πηγές και για το μοντέλο ISC3LT και εισάγονται επιπλέον τα φυσικά χαρακτηριστικά των μονάδων για κάθε μια (ύψος και διάμετρος καμινάδας, θερμοκρασία και ταχύτητα απαερίων). Οι εκπομπές από την οδική κυκλοφορία, την εξαγωγή και διανομή ορυκτών καυσίμων, τις άλλες κινητές πηγές και μηχανήματα, την διαχείριση αποβλήτων και την γεωργία εισάγονται στο μοντέλο ως εκπομπές από εμβαδικές πηγές με διαστάσεις $1 \times 1 \text{ km}^2$ και ύψος έκλυσης 0,5 m, δηλαδή κάθε κελί του πλέγματος μπορεί να θεωρηθεί ως μια εμβαδική πηγή. Οι συντεταγμένες της πηγής δίνονται από τις συντεταγμένες της ΝΔ γωνίας κάθε κελιού, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του μοντέλου ISC3LT για τις εμβαδικές πηγές. Τέλος οι πηγές που ανήκουν στις κατηγορίες μη-βιομηχανική καύση, βιομηχανική καύση, διεργασίες παραγωγής, χρήση διαλυτών και άλλες πηγές (φυσικές πηγές) θεωρούνται εμβαδικές πηγές με διαστάσεις $1 \times 1 \text{ km}^2$ και ύψος έκλυσης τα 10 m (Trozzi κ.α., 2003).

Οι εκπομπές τους εισάγονται με μέγιστη χρονική ανάλυση 1 μήνα. Οι αποδέκτες ορίζονται στο κέντρο κάθε κελιού του πλέγματος που καλύπτει την περιοχή. Όταν είναι περισσότεροι από 1200 δημιουργείται ένα νέο πλέγμα αποδεκτών με κατάλληλες διαστάσεις. Επιπλέον, αν και δεν υπάρχει περιορισμός στο μοντέλο, θεωρείται πως κάθε πηγή επηρεάζει τις συγκεντρώσεις

ρύπων σε μια περιοχή ακτίνας 50 km (προτείνεται από την EPA για άλλα μοντέλα διασποράς - πηγή). Όταν οι πηγές είναι περισσότερες από 300 το μοντέλο ISCLT εκτελείται περισσότερες φορές και στη συνέχεια να γίνει υπέρθεση των αποτελεσμάτων για να προκύψουν οι τελικές συγκεντρώσεις στο πλέγμα αποδεκτών.

Πίνακας 7 Μήκος τραχύτητας ανά κατηγορία εδαφοκάλυψης στο μοντέλο ISCLT3 (US EPA, 1995β).

Κατηγορία χρήσης γης	Κατηγορία εδαφοκάλυψης	Μήκος τραχύτητας			
		Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο	Χειμώνας
Υδατα	Υδάτινα σώματα	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Φυλλοβόλο δάσος	Μικτό δάσος/ Δάσος πλατύφυλλων	1	1,3	0,8	0,5
Κωνοφόρο δάσος	Δάσος κωνοφόρων	1,3	1,3	1,3	1,3
Βάλτος	Υγρότοποι	0,2	0,2	0,2	0,05
Καλλιεργήσιμη έκταση	Αγροτικές εκτάσεις εκτός από βοσκότοπους	0,03	0,2	0,05	0,01
Λιβάδι	Βοσκότοποι	0,05	0,1	0,01	0,001
Αστική έκταση	Δομημένες εκτάσεις	1	1	1	1
Έρημος/θαμνότοπος	Εκτάσεις με θαμνώδη, και/ή ποώδη βλάστηση/ Ανοικτές εκτάσεις με λίγη ή καθόλου βλάστηση	0,3	0,3	0,3	0,15

Ο υπολογισμός του μέσου μήκους τραχύτητας z_0 και της ταξινόμησης της πηγής σε αστική ή αγροτική περιοχή γίνεται με τον υπολογισμό της μέσης τιμής της περιοχής μελέτης. Οι εκτάσεις που περιλαμβάνονται σε αυτή την περιοχή ταξινομούνται στις κατηγορίες χρήσεων γης i του Πίνακα 7 και προκύπτει μια σταθμισμένη μέση τιμή μήκους τραχύτητας βάσει του εμβαδού (A_i) που καλύπτει κάθε κατηγορία χρήσης γης στην περιοχή. Όλες οι περιοχές με κατηγορία εδαφοκάλυψης δομημένης έκτασης με εξαίρεση τις αστικές πράσινες εκτάσεις θεωρούνται αστικές και όλες οι περιοχές με διαφορετική εδαφοκάλυψη θεωρούνται αγροτικές. Αν η έκταση είναι περισσότερο από 50% αστική τότε η περιοχή θεωρείται αστική διαφορετικά αγροτική.

3.3.Ανάλυση αποδεκτών – Εντοπισμός των πηγών ρύπανσης και της συνεισφοράς τους στις συγκεντρώσεις έκθεσης

Στα πλαίσια της διαμόρφωσης στρατηγικών για την βελτίωση της ποιότητας του αέρα αλλά και σε μελέτες έκθεσης- απόκρισης συχνά χρησιμοποιείται η τεχνική της ανάλυσης αποδεκτών (US EPA, 2009). Η τεχνική της ανάλυσης αποδεκτών είναι μια διαδικασία με την οποία επιχειρείται η εύρεση των πηγών ρύπανσης από ΑΣ σε μια περιοχή/σημείο (αποδέκτης) και της συνεισφοράς τους στις παρατηρούμενες συγκεντρώσεις συστατικών των ΑΣ. Σε αντίθεση με τα μοντέλα ποιότητας αέρα, τα μοντέλα ανάλυσης αποδεκτών έχουν διαγνωστικό χαρακτήρα. Διακρίνονται

σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα μοντέλα χημικής ισορροπίας (Chemical mass Balance) και στα μοντέλα που βασίζονται σε παραγοντική ανάλυση (factor analysis).

Στα μοντέλα χημικής ισορροπίας η συνεισφορά των πηγών υπολογίζεται, συνήθως με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, χρησιμοποιώντας μετρούμενες συγκεντρώσεις ΑΣ και γνωστά, από μετρήσεις, προφίλ σύστασης των εκπομπών κάθε πηγής. Έτσι μπορούν να προκύψουν εξισώσεις με την συγκέντρωση κάθε συστατικού των ΑΣ στον αποδέκτη να εκφράζεται ως το αποτέλεσμα ενός γραμμικού συνδυασμού των συνεισφορών από κάθε ανεξάρτητη πηγή και του σφάλματος. Το σφάλμα συνήθως αντιπροσωπεύει δευτερογενή ΑΣ, σφάλματα στις μετρήσεις, ή ακόμα και πηγές πρωτογενών σωματιδίων που δεν έχουν ληφθεί υπόψη στην ανάλυση (Watson κ.α., 2002). Στην δεύτερη κατηγορία μοντέλων ανάλυσης αποδεκτών, δεν απαιτείται η γνώση στοιχείων για τις πηγές ΑΣ σε έναν αποδέκτη. Στηρίζονται στην τεχνική της παραγοντικής ανάλυσης για την διάσπαση του πίνακα αρχικών δεδομένων (συγκέντρωση συστατικών σε κάθε δείγμα) σε έναν πίνακα με τη συνεισφορά κάθε πηγής σε κάθε δείγμα και έναν με το προφίλ συγκέντρωσης των διαφόρων συστατικών των ΑΣ στην πηγή. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μέθοδοι αυτής της κατηγορία είναι η Absolute Principal Component Scores (APCS; Thurston και Spengler, 1985) και η Positive Matrix Factorization (PMF; Paatero and Tapper, 1994; διατίθεται πλέον λογισμικό για την εφαρμογή της από την Αμερικανική Υπηρεσία Περιβάλλοντος - EPA) που ουσιαστικά μετατρέπουν τα αποτελέσματα μιας ανάλυσης σε κύριες συνιστώσες (PCA) σε μάζα ΑΣ. Περισσότερες λεπτομέρειες για τα μοντέλα αποδεκτών και εφαρμογές τους παρουσιάζονται στα άρθρα ανασκόπησης του Watson κ.α. (2002, 2008).

Στα πλαίσια της εργασίας υλοποιήθηκε ο αλγόριθμος μιας άλλης τεχνικής που στηρίζεται στην ανάλυση σε κύριες συνιστώσες, της ORFA-PNNC (Oblique Rotational Factor Analysis with partially Non-Negative Constraint) που αναπτύχθηκε από τον Ozeki κ.α. (2004) για την εισαγωγή χημικών περιορισμών στα αποτελέσματα της ΑΚΣ (PCA). Η μέθοδος εφαρμόζεται στον πίνακα:

$$D(r \times c) = R(r \times n)C(n \times c) \quad (\text{Εξ. 60})$$

όπου D είναι αρχικός πίνακας δεδομένων με γραμμές r ίσες με το πλήθος των δειγμάτων και στήλες c ίσες με το πλήθος των ρύπων, n το πλήθος των ανεξάρτητων πηγών, C είναι ο πίνακας που περιέχει τις συγκεντρώσεις του συστατικού c που προέρχεται από την πηγή n (πίνακας loadings), και R ο πίνακας που εκφράζει τη συμμετοχή κάθε πηγής n στις συγκεντρώσεις που παρατηρούνται την ημέρα/δείγμα r (πίνακας scores). Η μέθοδος ORFA-PNNC χρησιμοποιεί μεθόδους στροφής των πινάκων C και R που προκύπτουν από την ΑΚΣ έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το πλήθος των αρνητικών στοιχείων. Η ελαχιστοποίηση των αρνητικών στοιχείων στους πίνακες είναι ιδιαίτερα σημαντική αφού οι πίνακες C_{nc} και R_{rn} εκφράζουν συγκεντρώσεις και την συμμετοχή κάθε πηγής σε αυτές. Σημειώνεται ότι πριν την εισαγωγή των δεδομένων πρέπει να γίνει κανονικοποίηση τους με τη μέση τιμή ($d_{rc}' = d_{rc} / \langle d_c \rangle$) έτσι ώστε πιθανές μεγάλες τιμές της συγκέντρωσης ενός συστατικού να μην επηρεάζουν το

αποτέλεσμα. Στην περίπτωση που από τον πίνακα δεδομένων λείπουν τιμές επειδή η συγκέντρωση του συστατικού ήταν μικρότερη του ορίου ανίχνευσης (DL) της μεθόδου ανάλυσης των σωματιδίων στο εργαστήριο όπου πραγματοποιήθηκε πραγματοποιείται αντικατάσταση των τιμών αυτών με 0,5DL. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιείται λόγω ευκολίας και δίνει καλύτερα αποτελέσματα από ότι η αντικατάσταση με τη μέση τιμή (Singh κ.α., 2002). Το εργαλείο αναπτύχθηκε ως μακροεντολή με τη χρήση VBA (visual basic for applications) στο περιβάλλον του excel 2003.

3.4. Ανάλυση τροχιών των αερίων μαζών

Ένα εργαλείο για τον προσδιορισμό των πηγών ρύπανσης σε μια περιοχή είναι η ανάλυση των τροχιών των αερίων μαζών (trajectory) (Stohl, 1998). Η τροχιά που προσδιορίζει τις πιθανές περιοχές από τις οποίες έχει διέλθει η αέρια μάζα πριν φτάσει στο σημείο ενδιαφέροντος ονομάζεται ανάδρομη (backward) ενώ αυτή που δίνει τη διαδρομή της αέρια μάζας προς τα εμπρός στο χρόνο ονομάζεται ορθή (forward) (Καραθανάσης, 2007). Οι ανάδρομες και ορθές τροχιές βοηθούν στην εύρεση των πιθανών πηγών ρύπανσης σε έναν αποδέκτη ή των αποδεκτών μιας πηγής, αντίστοιχα. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι τροχιές περιέχουν μεγάλη αβεβαιότητα εξαιτίας του τρόπου υπολογισμού τους (μετεωρολογικά δεδομένα με χαμηλή χωρική ανάλυση και παραδοχές σχετικά με την κατακόρυφη μεταφορά; Mahura κ.α., 1999; Jorba κ.α., 2004) και θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο ενδεικτικά ως μια καλή εκτίμηση της μέσης κίνησης μιας αέριας μάζας.

Η ανάλυση των ανάδρομων τροχιών των αερίων μαζών έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές μελέτες για την διερεύνηση των πιθανών απομακρυσμένων πηγών ρύπανσης (long range transport) που επηρεάζουν την συγκέντρωση ΑΣ στον αέρα μιας περιοχής και στην διερεύνηση επεισοδίων ρύπανσης (π.χ. Rodriguez κ.α., 2001; Viana κ.α., 2003; Salvador κ.α., 2004; Jorba κ.α., 2004; Grivas κ.α., 2008; Escudero κ.α. 2007; Borge κ.α., 2007; Aarnio κ.α., 2008; Huang κ.α., 2008; Lazaridis κ.α., 2008γ; Salvador κ.α., 2008; Kocak κ.α., 2009; Salvador κ.α., 2010). Τα τελευταία χρόνια μεγάλο ενδιαφέρον έχει δοθεί στην χρήση των ανάδρομων τροχιών για την εύρεση και κυρίως την τεκμηρίωση των επεισοδίων σκόνης σε μια περιοχή προερχόμενης από το έδαφος (Querol κ.α., 2004; Kaskaoutis κ.α., 2007; Kocak κ.α., 2007) αφού σύμφωνα με την Οδηγία 2008/50/EK οι υπερβάσεις των οριακών τιμών που οφείλονται σε φυσικές πηγές, εφόσον αυτό τεκμηριωθεί από το κράτος μέλος, δεν θεωρούνται υπερβάσεις για τους σκοπούς της Οδηγίας. Η ανάλυση των τροχιών των αερίων μαζών στις παραπάνω μελέτες συνήθως συνδυάζεται με την ανάλυση της χημικής σύστασης των σωματιδίων και δορυφορικών εικόνων.

Έτσι στα πλαίσια της εργασίας, για την μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις και το μέγεθος των σωματιδίων σε μια περιοχή και άρα την έκθεση των κατοίκων της, κατασκευάστηκε ένα εργαλείο ανάλυσης των ανάδρομων τροχιών των αερίων

μαζών από το μοντέλο HYSPLIT4 (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory; Air Resources Laboratory of the National Oceanic and Atmospheric Administration; Draxler and Rolph, 2003; Rolph, 2003). Τα αποτελέσματα του μοντέλου HYSPLIT4 θα πρέπει να δίνονται σε μορφή αρχείου κειμένου, για τις συντεταγμένες του αποδέκτη (γεωγραφικό μήκος και πλάτος) και χωριστά για κάθε ημέρα προσομοίωσης της κίνησης των αερίων μαζών κατά την περίοδο ενδιαφέροντος. Συστήνεται η προσομοίωση να γίνεται για κάθε ημέρα της περιόδου την ώρα 12 UTC (Coordinated Universal Time) και κάθε τροχιά να υπολογίζεται για 5 ημέρες (120h) πριν την άφιξη της αέριας μάζας στον αποδέκτη. Για κάθε ένα από τα 120 σημεία της ανάδρομης τροχιάς υπολογίζεται η απόσταση από τον αποδέκτη βάσει της εξίσωσης (haversine):

$$d=R \times 2 \arcsin \sqrt{\sin^2\left(\frac{\varphi_{\pi}-\varphi_{\alpha}}{2}\right)+\cos\varphi_{\pi}\cos\varphi_{\alpha}\sin^2\left(\frac{\lambda_{\pi}-\lambda_{\alpha}}{2}\right)} \quad (\text{Εξ. 61})$$

όπου φ και λ , το γεωγραφικό πλάτος και γεωγραφικό μήκος της πηγής (σημείο της τροχιάς, δείκτης π) και του αποδέκτη (δείκτης α) και R η ακτίνα της γής σε km (6371 km στους υπολογισμούς). Αν η απόσταση είναι μικρότερη από την απόσταση x (km) που ορίζει ο χρήστης για περισσότερα από τα μισά σημεία της τροχιάς τότε θεωρείται πως η αέρια μάζα έχει κινηθεί κυρίως στην περιοχή με ακτίνα x γύρω από τον αποδέκτη. Στη συνέχεια κάθε σημείο της τροχιάς ταξινομείται ως προς την θέση του σε σχέση με τον αποδέκτη στις 4 κατευθύνσεις ΒΔ, ΒΑ, ΝΔ και ΝΑ. Η κατεύθυνση που συγκεντρώνει περισσότερα από τα 60 σημεία της τροχιάς είναι η κυρίαρχη. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται για κάθε ημέρα της περιόδου μελέτης. Το εργαλείο αναπτύχθηκε ως μακροεντολή με τη χρήση VBA (visual basic for applications) στο περιβάλλον του excel 2003.

3.5. Μοντέλο μικροπεριβάλλοντος

Οι συγκεντρώσεις έκθεσης σε κάθε περιβάλλον εισάγονται από τον χρήστη. Ωστόσο, ειδικά στην περίπτωση έκθεσης σε εσωτερικό χώρο η συγκέντρωση των ατμοσφαιρικών ΑΣ στο χώρο μπορεί να εκτιμηθεί με ένα απλό μοντέλο ισοζυγίου μάζας σύμφωνα με την γενική εξίσωση:

$$\frac{dC_i}{dt} = \rho C - aC_i - kC_i + \frac{Q_i}{V} \quad (\text{Εξ. 62})$$

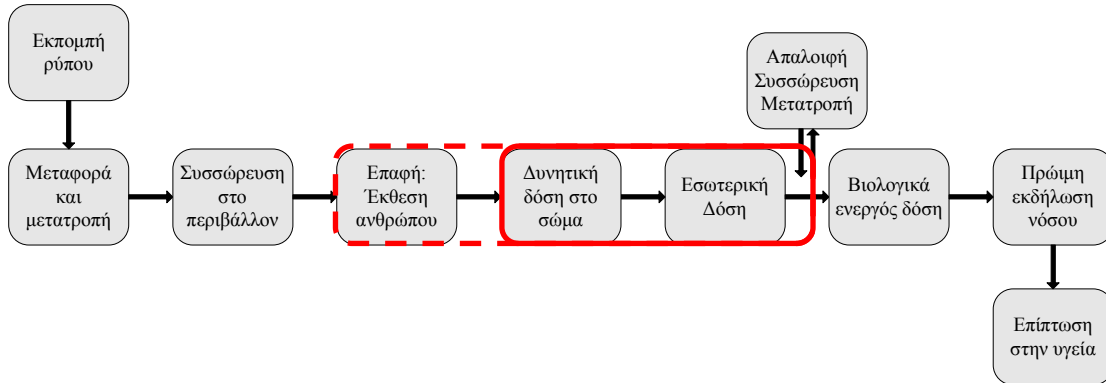
όπου V είναι ο όγκος ομογενή αέρα στο εσωτερικό του χώρου (m^3), C_i η συγκέντρωση ΑΣ στο μικροπεριβάλλον ($\mu g / m^3$), ρ ο ρυθμός εξαερισμού ή ανταλλαγής αέρα με το περιβάλλον (h^{-1}), C η εσωτερική συγκέντρωση, k ο ρυθμός απομάκρυνσης των σωματιδίων από τον αέρα λόγω καθίζησης (h^{-1}), ρ είναι ο λόγος διείσδυσης (το κλάσμα των ΑΣ που δεν φιλτράρονται κατά την διείσδυση του εξωτερικού αέρα στον εσωτερικό χώρο), και Q_i είναι ο ρυθμός εκπομπής σωματιδίων από εσωτερικές πηγές ($\mu g/h$).

Θεωρώντας πως δεν πραγματοποιούνται χημικές αντιδράσεις και εξάτμιση των πτητικών ενώσεων από τα αιωρούμενα σωματίδια η εξίσωση λύνεται ως:

$$C_i[(n+1)\Delta T] = C_i(n\Delta T)\beta[(n+1)\Delta T] + C[(n+1)\Delta T] [1 - \beta[(n+1)\Delta T]] \quad (\text{Εξ. 63})$$

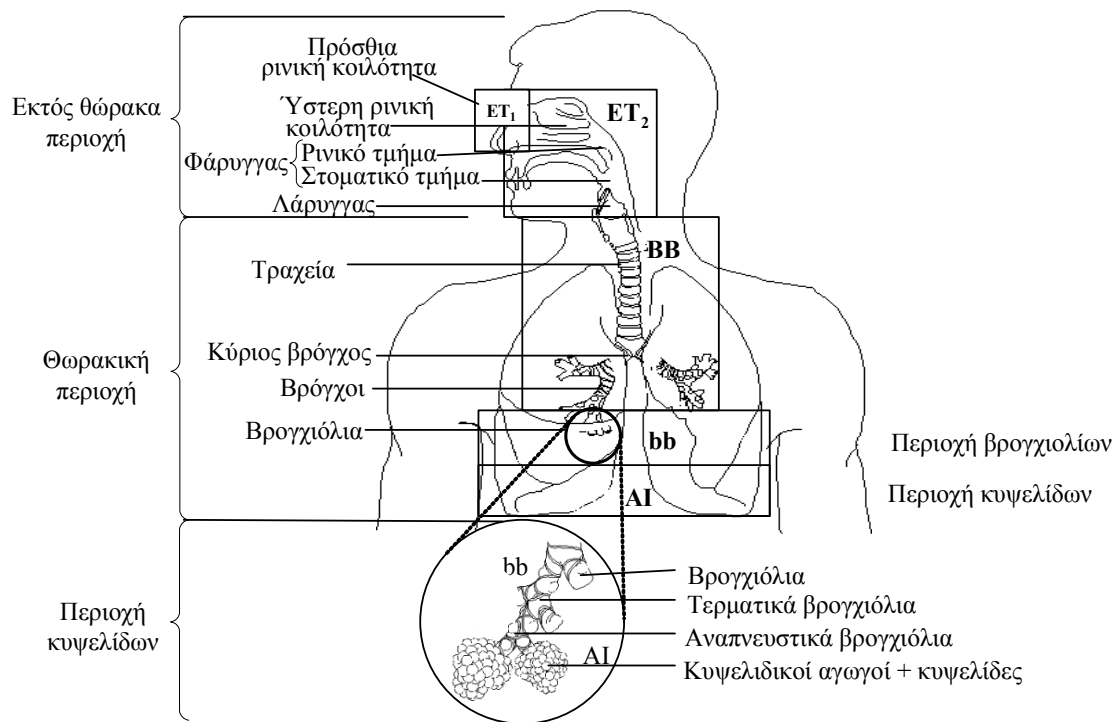
όπου $\beta(\Delta T) = \exp[-a(\Delta T) + k(\Delta T)]\Delta T$ (Εξ. 64), ΔT είναι το χρονικό βήμα (όπου θεωρούμε πως έχουμε σταθερή κατάσταση), n είναι ο αριθμός των βημάτων υπολογισμού ($T/\Delta T$), και T η διάρκεια. Το εργαλείο αναπτύχθηκε ως μακροεντολή με τη χρήση VBA (visual basic for applications) στο περιβάλλον του excel 2003.

4. ΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΑΝΑΠΝΕΥΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ – ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ, ΔΟΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ



4.1. Το ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα

Η δόση των αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα εξαρτάται από την μορφολογία του η οποία προκαλεί μεταβολές στην πίεση, ταχύτητα ροής, κατεύθυνση και υγρασία του αέρα που κινείται μέσα σε αυτό. Από ανατομική και λειτουργική άποψη, το αναπνευστικό σύστημα διαιρείται σε δύο κύρια τμήματα: ένα μεταφορικό τμήμα (conducting airways) που περιλαμβάνει τις ρινικές οδούς, τον ρινοφάρυγγα, το λάρυγγα, την τραχεία, τους βρόγχους και τα βρογχιόλια και ένα αναπνευστικό τμήμα που αποτελείται από το τελικό κομμάτι του βρογχικού δένδρου και τις κυψελίδες (Παπαδάκη κ.α., 2007). Όσον αφορά στην εκτίμηση δόσεων στους ιστούς του συνήθως διακρίνεται σε τρεις περιοχές (Εικόνα 2), το ανώτερο αναπνευστικό σύστημα, την τραχειοβρογχική και την κυψελιδική περιοχή (US EPA, 2002; ICRP, 1994; Schlesinger, 1988). Αναλυτικότερα, το ανώτερο αναπνευστικό ή εκτός θώρακα περιοχή (ET) αποτελείται από την πρόσθια ρινική κοιλότητα (ET₁), την ύστερη ρινική κοιλότητα, τον λάρυγγα, τον φάρυγγα και το στόμα (ET₂). Η τραχειοβρογχική περιοχή (TB) περιλαμβάνει την τραχεία και τους πρωτεύοντες βρόγχους (BB), τους δευτερεύοντες βρόγχους που ακολουθούν (διακλαδώσεις) και τους τελικούς βρόγχους (bb). Τέλος, η κυψελιδική περιοχή (AI) αποτελείται από τους αναπνευστικούς βρόγχους, τις πνευμονικές κυψελίδες (κυψελιδικό αεραγωγό και αεροθυλάκια) και τον συνδετικό ιστό.



Εικόνα 2 Ανατομία του αναπνευστικού συστήματος (ICRP, 1994).

Ο αέρας μεταφέρεται μέσω του ανώτερου αναπνευστικού συστήματος, της τραχείας και των βρόγχων από το εξωτερικό περιβάλλον στα σημεία που πραγματοποιείται η ανταλλαγή αερίων (αναπνοή) δηλαδή στην κυψελιδική περιοχή (Schlesinger, 1988). Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάθε τμήματος του ΑΑΣ καθορίζουν τη ροή του διερχόμενου ρεύματος αέρα και άρα την εναπόθεση σωματιδίων ενώ η κυτταρική σύσταση των τοιχωμάτων τους καθορίζει την μεταφορά των σωματιδίων στο ΑΑΣ. Παρακάτω περιγράφεται η λειτουργία κάθε περιοχής του αναπνευστικού συστήματος και δίνονται βασικά στοιχεία για την κυτταρική σύσταση των τοιχωμάτων της. Επιπλέον αναφέρονται οι σημαντικότεροι μηχανισμοί εναπόθεσης σωματιδίων σε κάθε περιοχή.

Ανώτερο αναπνευστικό σύστημα: Η βασική λειτουργία του ανώτερου αναπνευστικού συστήματος είναι ο πρωτοβάθμιος καθαρισμός του αέρα, η ρύθμιση της υγρασίας και θερμοκρασίας του και η μεταφορά του στην τραχεία και τους πνεύμονες (ICRP, 1994; Schlesinger, 1988). Όταν εισπνέουμε από τη μύτη ο κλιματισμός του αέρα ξεκινά στα ρουθούνια και συνεχίζεται στα υπόλοιπα μέρη της περιοχής. Ο καθαρισμός του αέρα πραγματοποιείται με πρόσκρουση και διασπορά στην πρόσθια ρινική είσοδο και συνεχίζει με φιλτράρισμα των σωματιδίων στο τριχωτό που βρίσκεται πίσω από την είσοδο. Στην περιοχή αυτή βρίσκονται και λεμφαγγεία. Ο αέρας οδηγείται στον προθάλαμο και στη συνέχεια στην ρινική κοιλότητα. Τα τοιχώματα της περιοχής καλύπτονται από αναπνευστική βλέννα που περιέχει ένα μεγάλο δίκτυο αγγείων και αδένων και καλύπτεται από ένα στρώμα κυττάρων επιθηλίου που διαθέτουν βλεφαρίδες. Το στρώμα αυτό μετακινεί τη βλέννα και το πάχος του μπορεί να φτάσει τα 15μm στην περιοχή ET₂. Στην ρινική κοιλότητα εμφανίζονται τα ιγμόρεια και οι ρινοδακρυϊκοί αδένες

ως μικροί αγωγοί ή οπές τα οποία σε συνδυασμό με τα παραπάνω επιτυγχάνουν ικανοποιητική θέρμανση και ύγρανση του αέρα. Μετά τον προθάλαμο η ροή του αέρα μεταβάλλεται απότομα καθώς κινείται οριζόντια στη ρινική κοιλότητα και μέσα από το διάφραγμα. Στη συνέχεια εξέρχεται από την ύστερη ρινική είσοδο και ρέει κάθετα στον φάρυγγα, τον λάρυγγα και την τραχεία. Οι μεταβολές αυτές στη ροή αυξάνουν την εναπόθεση σωματιδίων λόγω πρόσκρουσης στα τοιχώματα. Στο λάρυγγα βρίσκονται και οι φωνητικές χορδές που επιτρέπουν την δίοδο του αέρα στην τραχεία μέσω λεπτής σχισμής. Έτσι η ταχύτητα του αέρα αυξάνεται σημαντικά και μεγάλο ποσοστό των σωματιδίων αποθέεται στην περιοχή αυτή. Εναλλακτικά, αν το άτομο αναπνέει από το στόμα μέρος της απόθεσης πραγματοποιείται εκεί. Οι περιοχές ET_1 και ET_2 διαφέρουν στον ιστό του επιθηλίου τους, που για την πρώτη περιέχει κερατίνη ενώ για την δεύτερη βλεφαρίδες (ICRP, 1994). Ακόμα η εναπόθεση στο στόμα είναι μικρότερη απ' όση στη μύτη και είναι χαρακτηριστικό ότι οι διαστάσεις του στόματος ποικίλλουν σημαντικά μεταξύ ατόμων (Schlesinger, 1988).

Τραχειοβρογχική περιοχή: Η τραχειοβρογχική περιοχή ξεκινά από την τραχεία (γενιά 0 – η έννοια της γενιάς αναλύεται στην παράγραφο 4.1.1) και φθάνει ως τα τελικά βρογχιόλια (γενιά 15). Διακρίνεται στην βρογχική περιοχή (BB, γενιές 0 – 8) και την περιοχή των βρογχολίων (bb, γενιές 9 – 15) και περιλαμβάνει ένα δίκτυο λεμφαγγείων (ICRP, 1994). Στόχος της είναι η μεταφορά και ο κλιματισμός του αέρα καθώς και ο καθαρισμός του με εναπόθεση σωματιδίων λόγω πρόσκρουσης, καθίζησης και διασποράς. Το δέντρο αεραγωγών της τραχειοβρογχικής περιοχής ξεκινά από την τραχεία. Η τραχεία διατηρείται μόνιμα ανοιχτή από χόνδρους και τα τοιχώματα της καλύπτονται από αναπνευστική βλέννα και αρκετούς αδένες. Το στρώμα βλέννας (~5 μ m) στην επιφάνεια του επιθηλίου κινείται προς το φάρυγγα με τη βοήθεια των βλεφαρίδων. Στη συνέχεια η τραχεία διαιρείται σε 2 κύριους βρόγχους με τοιχώματα ίδιας κυτταρικής σύστασης με την τραχεία. Οι κύριοι βρόγχοι διακλαδίζονται στους λοβώδεις βρόγχους (γενιές 2 και 3) που εισέρχονται στους πνεύμονες (3 στον δεξί λοβό και 2 στον αριστερό) και αυτοί με τη σειρά τους στους τμηματικούς βρόγχους (γενιά 4) που εισέρχονται στις κοιλότητες που απαρτίζουν τους πνεύμονες και διαιρούνται περαιτέρω (Schlesinger, 1988). Οι βρόγχοι καλύπτονται από αναπνευστική βλέννα πάνω σε επιθήλιο με βλεφαρίδες που οδηγεί τη βλέννα προς την τραχεία. Τα βρογχιόλια που ακολουθούν καλύπτονται από ένα στρώμα από αναπνευστικό επιθήλιο. Ο συνδετικός ιστός είναι λιγότερος απ' όση στους βρόγχους ενώ επικρατεί μεγάλο πλήθος λεμφαγγείων. Είναι σημαντικό πως παρατηρείται διαφοροποίηση στο αναπνευστικό σύστημα μεταξύ ανθρώπων που αφορά στο πλήθος των διαιρέσεων από την τραχεία ως τα τελικά βρογχιόλια με αποτέλεσμα διαφορετικό μήκος διαδρομής για τα σωματίδια άρα και διαφορές στην εναπόθεση και απομάκρυνση τους. Για παράδειγμα μεταξύ τραχείας και τελικών βρογχολίων απαντώνται 16 γενιές σύμφωνα με το συμμετρικό μοντέλο του Weibel (1963) ή 14-17 βάσει του ασύμμετρου μοντέλου του Schum. Τέλος στην συγκεκριμένη περιοχή των πνευμόνων παρατηρείται διαφοροποίηση όσον αφορά και στην κυτταρική σύσταση των τοιχωμάτων των αεραγωγών (ιδιαίτερα για τα εκκριτικά κύτταρα) (ICRP, 1994).

Κυψελιδική περιοχή: Η κυψελιδική περιοχή αποτελείται από τα αναπνευστικά βρογχιόλια (γενιές 16 – 18), τα αεροθυλάκια, τους κυψελιδικούς αεραγωγούς και τις κυψελίδες. Στόχος της περιοχής είναι η αναπνοή, αλλά και λειτουργίες που σχετίζονται με τους ενδοκρινείς αδένες και την άμυνα του οργανισμού. Τα σωματίδια που φθάνουν σε αυτή την περιοχή έχουν μικρό μέγεθος και αποθέτονται λόγω καθίζησης και διασποράς (Fung, 1990). Τα τελικά βρογχιόλια διακλαδίζονται στα αναπνευστικά βρογχιόλια τα οποία χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη των κυψελίδων. Το ποσοστό των κυψελίδων αυξάνεται στις περιφέρειες των πνευμόνων και όταν ο αεραγωγός καλύπτεται πλήρως από κυψελίδες ονομάζεται κυψελιδικός αεραγωγός ο οποίος μπορεί να διακλαδωθεί σε άλλους αεραγωγούς ή αεροθυλάκια. Τα τοιχώματα της περιοχής αποτελούνται από δύο τύπους κυττάρων επιθηλίου και εκκριτικά κύτταρα που παράγουν την αναπνευστική βλέννα. Οι πνεύμονες ενός ενήλικα ανθρώπου περιλαμβάνουν περίπου 300 εκατομμύρια κυψελίδες (Fung, 1990). Το πλήθος των κυψελίδων καθώς και των διακλαδώσεων ποικίλλει μεταξύ ατόμων. Ακόμα η ολική επιφάνεια των κυψελίδων μεταβάλλεται και έχει βρεθεί πως σχετίζεται με τη συνολική μάζα του σώματος (ICRP, 1994). Οι κυψελίδες υποστηρίζονται από ένα δίκτυο συνδετικού ιστού (ενδιάμεσοι ιστοί) μέσω του οποίου ενώνονται τα τριχοειδή ενδοθηλιακά κύτταρα με τα κυψελιδικά κύτταρα στο επιθήλιο σχηματίζοντας την τριχοειδή-κυψελιδική μεμβράνη. Η μεμβράνη αυτή έχει πάχος περίπου 2μm για τους ανθρώπινους πνεύμονες. Όλοι οι παραπάνω σχηματισμοί μαζί με τους λεμφαδένες είναι γνωστοί ως παρέγχυμα (συμπαγής ιστός των σπλάχνων) (Schlesinger, 1988). Οι πνεύμονες περιλαμβάνουν δύο λεμφικά δίκτυα. Το επιφανειακό δίκτυο βρίσκεται στο στρώμα συνδετικού ιστού του ορογόνου υμένα (υπεζωκώς) που καλύπτει τα όργανα στην κοιλότητα του κορμού του ανθρώπου (Schlesinger, 1988). Το δεύτερο δίκτυο (περιβρογχοαγγειακό) βρίσκεται σε μεγαλύτερο βάθος και αποτελείται από συνδεδεμένα αγγεία μέσα στο συνδετικό ιστό που περιβάλλει το αναπνευστικό ως και τα αναπνευστικά βρογχιόλια και το αγγειακό σύστημα των πνευμόνων. Ένα πλέγμα από αγγεία (λεμφαγγεία) συνδέει τα δύο δίκτυα. Τα μεγαλύτερα από αυτά τα αγγεία καταλήγουν σε λεμφαδένες με πιο σημαντικούς αυτούς που βρίσκονται κατά μήκος της τραχείας και των κύριων βρόγχων και στις διακλαδώσεις των βρόγχων και βρογχιολίων (ICRP, 1994). Στην κυψελιδική περιοχή περιλαμβάνονται λεμφικός ιστός, λεμφαγγεία αλλά και βρογχικοί λεμφαδένες. Το συνολικό δίκτυο λεμφαγγείων απορρέει τελικά στην γενική κυκλοφορία του αίματος.

4.1.1. Μοντέλα μορφολογίας του ΑΑΣ

Το αναπνευστικό σύστημα από καθαρά μηχανιστική άποψη αποτελείται από ένα σύστημα αεραγωγών που συνδέονται μεταξύ τους σε συγκεκριμένα σημεία διακλάδωσης. Η διακλάδωση του αεραγωγού μεγαλύτερης διαμέτρου πραγματοποιείται συνήθως διχοτομικά (συμμετρικά μοντέλα), δηλαδή ένας κύριος κλάδος (πρόγονος) διαιρείται σε δυο παρακλάδια (απόγονοι). Για την περιγραφή αυτής της δομής χρησιμοποιείται η έννοια της γενιάς και η θέση κάθε αεραγωγού περιγράφεται με έναν αριθμοδείκτη. Στο μοντέλο αναπνευστικού συστήματος του Weibel, που

χρησιμοποιείται πολύ συχνά, κάθε υποδιαίρεση χαρακτηρίζεται ως γενιά με την τραχεία να αποτελεί την γενιά 0 και κάθε επόμενη διαίρεση ως τις κυψελίδες αριθμείται με αύξοντα αριθμό (Weibel, 1963). Οι πρόγονοι κλάδοι διχοτομούνται σε παρακλάδια βάσει της εξίσωσης $N_z = 2^z$ (Εξ. 65) όπου z ο δείκτης της γενιάς (ICRP, 1994). Στην πραγματικότητα σε κάποιες γενιές το σχήμα διαφοροποιείται και ο πρόγονος κλάδος τριχοτομείται. Αλλά ακόμη και στο διχοτομικό σύστημα διακλάδωσης η δομή μπορεί να διαφέρει ως προς τη συμμετρία. Το σύστημα χαρακτηρίζεται ως σύνηθες ή διαφορετικά είναι συμμετρικό μόνο όταν και τα δύο παρακλάδια έχουν την ίδια διάμετρο, μήκος και γωνία διακλάδωσης (Schlesinger, 1988). Αν διαφέρουν σε οποιοδήποτε από τα παραπάνω χαρακτηριστικά η δομή του αναπνευστικού συστήματος είναι ασύμμετρη.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι διαστάσεις των αεραγωγών του αναπνευστικού συστήματος μεταβάλλονται με την ηλικία, το φύλλο, τη φυλή και την ολική μάζα του σώματος. Για παράδειγμα η διάμετρος των αεραγωγών ποικίλλει μεταξύ Καυκάσιου άντρα και γυναίκας της ίδιας ηλικίας, με τον άντρα να έχει κατά κανόνα τραχεία και βρόγχους μεγαλύτερης διαμέτρου. Ακόμα για ένα μωρό 3 μηνών έχει βρεθεί πως αν και το δέντρο αεραγωγών έχει σχηματιστεί πλήρως, διαθέτει μόνο το 40% των κυψελίδων ενώ σε ηλικία 1 έτους το ποσοστό έχει φθάσει το 80% αλλά οι κυψελίδες κατανέμονται ομοιόμορφα σε όλα τα αναπνευστικά βρογχιόλια σε αντίθεση απ' ότι σε έναν ενήλικα (ICRP, 1994).

Εξαιτίας της πολυπλοκότητας του τρόπου διαίρεσης της αναπνευστικής οδού, η δομή των πνευμόνων περιγράφεται από μοντέλα που συχνά αποτελούν την περιγραφή ιδεατών περιπτώσεων (συμμετρικά). Τα περισσότερα προκύπτουν από πειραματικές μετρήσεις σε καλούπια/πρότυπα που έχουν κατασκευαστεί από πραγματικούς πνεύμονες ή σε μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε ένα μόνο πνεύμονα. Το συμμετρικό μοντέλο A του Weibel χρησιμοποιείται πολύ συχνά στην περιγραφή της δομής του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος (Fung, 1990). Στο μοντέλο του Weibel θεωρείται πως το αναπνευστικό σύστημα αποτελείται από 24 γενιές (z) με την τραχεία ως γενιά 0 και τις γενιές 0-15 να παριστάνουν τους αγωγούς μεταφοράς του αέρα (conducting). Στο μοντέλο Weibel A (Πίνακας 1) κάθε αεραγωγός του αναπνευστικού συστήματος θεωρείται πως διχοτομείται κάτι που απλουστεύει την διαχείριση και εφαρμογή μορφολογικών χαρακτηριστικών στα μοντέλα αλλά δεν ανταποκρίνεται στην πραγματική μορφή του αναπνευστικού συστήματος (Schlesinger, 1988). Έτσι σε κάθε γενιά υπάρχουν 2^z αεραγωγοί και συνολικά 16777215 στο ΑΑΣ. Οι γενιές 15-23 αποτελούν την περιοχή που πραγματοποιείται η αναπνοή και κάθε μία έχει συγκεκριμένο πλήθος κυψελίδων ανά αεραγωγό. Αρχικά όλες οι κυψελίδες αποδίδονταν στην τελευταία γενιά. Οι αεραγωγοί κάθε γενιάς έχουν τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά και την ίδια θέση στην διαδρομή που ακολουθεί ο αέρας από την τραχεία ως στις κυψελίδες. Με τον τρόπο αυτό το πρόβλημα της μοντελοποίησης της ροής του αέρα μέσα στο ΑΑΣ απλουστεύεται σε μια διαδρομή (single-path). Οι αεραγωγοί λαμβάνονται ως κυλινδρικοί αγωγοί συγκεκριμένων διαστάσεων και οι κυψελίδες ως σφαίρες. Η ταχύτητα ελαττώνεται στις μεγαλύτερες γενιές λόγω της αύξησης της συνολικής

επιφάνειας που διαπερνά ο αέρας και έτσι ο χρόνος παραμονής των σωματιδίων σε αυτές αυξάνει. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να παρατηρείται αυξημένη εναπόθεση λόγω διασποράς και καθίζησης σε αυτές τις γενιές. Η χρήση των συμμετρικών μοντέλων μορφολογίας του ΑΑΣ είναι συχνή σε μοντέλα εναπόθεσης ΑΣ στο ΑΑΣ καθώς απλουστεύει τους υπολογισμούς. Ωστόσο τα αποτελέσματα των μοντέλων αυτών θεωρούνται προσεγγιστικά της πραγματικής εναπόθεσης εξαιτίας της αυξημένης εναπόθεσης που δίνουν στις διακλαδώσεις του ΑΑΣ.

Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί μοντέλα του ΑΑΣ που λαμβάνουν υπόψη τους την ασυμμετρία του αναπνευστικού συστήματος. Η ασυμμετρία στα μοντέλα αυτά αφορά την χρήση μη διχοτομικής διακλάδωσης, ασύμμετρες γωνίες διακλάδωσης και/ή διαστάσεις των αεραγωγών κάθε γενιάς καθώς και συνδυασμό όλων των παραπάνω. Ένα από αυτά τα μοντέλα, το μοντέλο των Yeh και Schum (1980) χρησιμοποιείται συχνά και διατηρεί την απλότητα του συμμετρικού μοντέλου Weibel A καθώς οι αεραγωγοί στην ίδια θέση στην διαδρομή που ακολουθεί ο αέρας από την τραχεία ως στις κυψελίδες έχουν ίδιες διαστάσεις. Τα ασύμμετρα μοντέλα του ΑΑΣ περιλαμβάνουν συχνά την τυχαία επιλογή της διακλάδωσης μέσα από την οποία θα διέλθει ο αέρας. Για παράδειγμα το μοντέλο των Horsfield κ.α. (1971) ταξινομεί τους αεραγωγούς σε σειρές J. Η τραχεία αποτελεί τη σειρά 31 και οι μικρότεροι αεραγωγοί μεταφοράς του αέρα είναι τα βρογχιόλια στη σειρά 6. Οι αεραγωγοί της ίδιας σειράς έχουν σχεδόν παντού τις ίδιες διαστάσεις και οι διακλαδώσεις γίνονται διχοτομικά με τέσσερις τρόπους. Για παράδειγμα οι αγωγοί των σειρών 9 και 10 διακλαδίζονται στους αγωγούς των σειρών J-1 και J-3 ενώ οι αγωγοί της σειράς 8 στους αγωγούς των σειρών J-1 και J-2. Με αυτό τον τρόπο το πλήθος των αγωγών ανά γενιά δεν είναι σταθερό και έτσι κάθε διαδρομή του αέρα μέσα στο ΑΑΣ διαπερνά διαφορετικό μήκος αεραγωγών. Επιπλέον οι αγωγοί μεταφοράς του αέρα ελαττώνονται μετά από 15 διακλαδώσεις και παράλληλα αυξάνεται το πλήθος των κυψελιδικών αεραγωγών. Το μοντέλο αυτό αν και πιο ρεαλιστικό από το συμμετρικό μοντέλο Weibel A δίνει συστηματικά χαμηλές τιμές εναπόθεσης για σωματίδια με μέση αεροδυναμική διάμετρο μάζας μικρότερη από 1 μm (Martonen κ.α., 1982). Ακόμα ένα μοντέλο που χρησιμοποιείται συχνά είναι του Phalen (1985) και το τροποποιημένο μοντέλο του Weibel (βάσει των μοντέλων των Yeh και Schum (1980) και Phalen (1985) στην τραχειοβρογχική περιοχή και των Hansen και Ampaya (1975) στην κυψελιδική περιοχή) που χρησιμοποιείται από την Διεθνή Υπηρεσία Ακτινοπροστασίας (ICRP) (Yu και Diu, 1982; Abd El Hady κ.α., 1997).

Αν και τα μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη τους την ασυμμετρία του ΑΑΣ είναι πιο ρεαλιστικά το μοντέλο του Weibel A παραμένει το μοναδικό που συνυπολογίζει την ανατομική ποικιλότητα κάθε ατόμου. Επιπλέον οι τιμές που προκύπτουν για την ολική εναπόθεση των ΑΣ στο ΑΑΣ είναι ίσες με τις μέσες τιμές που προκύπτουν από πολλά διαφορετικά μοντέλα ασυμμετρίας (Yu και Diu, 1982). Οι τιμές τους ωστόσο διαφέρουν όσον αφορά στην τοπική εναπόθεση ΑΣ στο ΑΑΣ.

Πίνακας 8: Διαστάσεις του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος σύμφωνα με το μοντέλο Weibel A, για πνεύμονες ενηλίκων με όγκο 4800 mL και περίπου ¾ διάταση λόγω της αναπνοής (Fung, 1990; ICRP, 1994).

	Γενιά z	Πλήθος ανά γενιά n(z)	Διάμετρος d(z) (cm)	Μήκος l(z) (cm)	Ολική επιφάνεια S(z) (cm ²)	Ολικός όγκος V(z) (cm ³)	Συνολικός όγκος (cm ³)	Σε παροχή 1 l/s			
								Ταχύτητα (cm/s)	Αριθμός Reynolds	Χρόνος Παραμονής (ms)	
BB	Τραχεία	0	1	1,8	12	2,54	30,5	30,5	393	4.350	30
	Κύριος Βρόγχος	1	2	1,22	4,76	2,33	11,25	41,8	427	3.210	11
	Λοβώδεις Βρόγχοι	2	4	0,83	1,9	2,13	3,97	45,8	462	2.390	4,1
		3	8	0,56	0,76	2	1,52	47,2	507	1.720	
	Τμηματικός βρόγχος	4	16	0,45	1,27	2,48	3,46	50,7	392	1.110	3,2
	Βρόγχοι με χόνδρους στα τοιχώματα	5	32	0,35	1,07	3,11	3,3	54	325	690	4,4
		6	64	0,28	0,9	3,96	3,53	57,5	254	434	
		7	128	0,23	0,76	5,1	3,85	61,4	188	277	
		8	256	0,186	0,64	6,95	4,45	65,8	144	164	
		9	512	0,154	0,54	9,65	5,17	71	105	99	
10		1.024	0,13	0,46	13,4	6,31	77,2	73,6	60		
bb	Τελικοί βρόγχοι	11	2.048	0,109	0,39	19,6	7,56	84,8	52,3	34	7,4
	Βρογχιόλια με μυς στα τοιχώματα	12	4.096	0,095	0,33	28,8	9,82	94,6	34,4	20	16
		13	8.192	0,082	0,27	44,5	12,45	106	23,1	11	
		14	16.384	0,074	0,23	69,4	16,4	123,4	14,1	6,5	
	Τελικά βρογχιόλια	15	32.768	0,066	0,2	113	21,7	145,1	8,92	3,6	31
Al	Αναπνευστικά βρογχιόλια	16	65.536	0,06	0,165	180	29,7	174,8	5,40	2,0	60
		17	$131,9 \times 10^3$	0,054	0,141	300	41,8	216,6	3,33	1,1	
		18	262×10^3	0,05	0,117	534	61,1	277,7	1,94	0,57	
	Κυψελιδικοί αεραγωγοί	19	524×10^3	0,047	0,099	944	93,2	370,9	1,10	0,31	210
		20	$1,05 \times 10^6$	0,045	0,083	1.600	139,5	510,4	0,60	0,17	
		21	$2,10 \times 10^6$	0,043	0,07	3.220	224,3	734,7	0,32	0,08	
		22	$4,19 \times 10^6$	0,041	0,059	5.880	350	1.084,7	0,18	0,04	
Αεροθυλάκια	23	$8,39 \times 10^6$	0,041	0,05	11.800	591	1.675	0,09	-	550	
Κυψελίδες, αεραγωγό	21 ανά	300×10^6	0,028	0,023		3.200	4.800				

Πίνακας 9: Σύγκριση μορφολογικών μοντέλων του ΑΑΣ για υπόλοιπη λειτουργική χωρητικότητα πνευμόνων 300 mL ($\approx 1/2$ του όγκου των πνευμόνων). (d: Διάμετρος, l: Μήκος, n: Πλήθος ανά γενιά)

Γενιά (z)	Weibel			Olson			Hansen και Ampaya		
	d (cm)	l (cm)	n (#)	d (cm)	l (cm)	n (#)	d (cm)	l (cm)	n (#)
1	1,539	10,6	1	1,606	10,707	1	1,508	10,046	1
2	1,043	4,07	2	1,16	3,765	2	1,021	3,987	2
3	0,71	1,24	4	0,839	2,703	4	0,695	1,591	4
4	0,479	0,65	8	0,42	2,088	7	0,469	0,636	8
5	0,385	1,086	6	0,504	1,642	20	0,376	1,063	16
6	0,299	0,915	32	0,402	1,303	33	0,293	0,895	32
7	0,29	0,769	64	0,321	0,955	88	0,234	0,753	64
8	0,197	0,65	128	0,268	0,87	143	0,192	0,636	128
9	0,19	0,547	256	0,214	0,696	232	0,155	0,536	256
10	0,132	0,462	512	0,178	0,58	609	0,129	0,452	512
11	0,111	0,393	1024	0,145	0,473	986	0,109	0,385	1024
12	0,093	0,333	2048	0,119	0,385	2580	0,092	0,327	1908
13	0,081	0,282	4096	0,098	0,319	4180	0,08	0,277	3555
14	0,07	0,21	8192	0,08	0,253	6760	0,068	0,226	6624
15	0,06	0,197	16384	0,066	0,224	17710	0,062	0,192	1343
16	0,056	0,171	32768	0,054	0,176	28660	0,052	0,111	23000
17	0,051	0,141	65536	0,045	0,145	43310	0,043	0,09	46000
18	0,046	0,121	131072	0,045	0,071	121400	0,043	0,09	92000
19	0,04	0,1	262144	0,058	0,071	196400	0,044	0,081	184000
20	0,04	0,085	524288	0,067	0,089	514200	0,048	0,061	437000
21	0,038	0,071	1048576	0,031	0,089	832000	0,047	0,047	1035000
22	0,037	0,06	2097153	0,031	0,089	1346300	0,051	0,054	2484000
23	0,035	0,05	4194304	0,031	0,071	3524600	0,039	0,04	5842000
24	0,035	0,043	8388608	0,031	0,054	5702900	0,036	0,038	8602000
25	0,024	0,02	30000000				0,029	0,028	8418000
26							0,027	0,026	3358000
27							0,024	0,02	1333400
Νεκρός όγκος (cm ³)		90			143,3			72,4	
Πλήθος αεραγωγών		16777215			12343125			31880807	

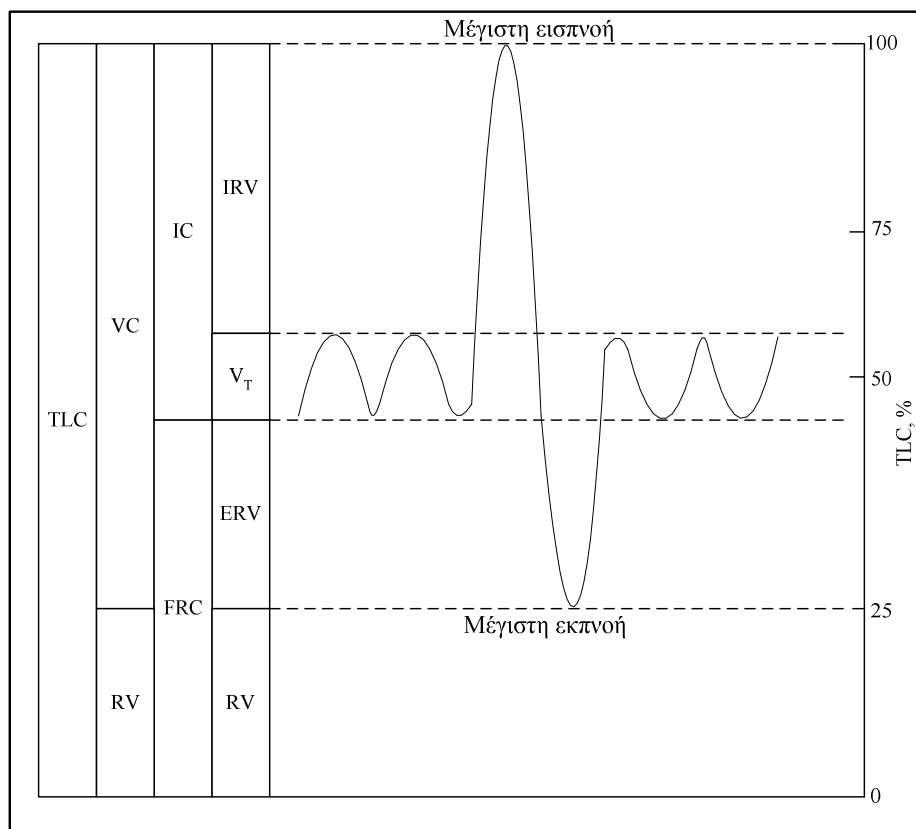
Τέλος έχουν αναπτυχθεί στοχαστικά μοντέλα του ΑΑΣ. Στα στοχαστικά μοντέλα οι αεραγωγοί περιγράφονται πιο ρεαλιστικά ως στατιστικές μεταβλητές με μέσες τιμές και απόκλιση που εξαρτώνται από τον αριθμό της γενιάς. Χρησιμοποιούνται κατανομές συχνότητας των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των αγωγών και στατιστικές συσχετίσεις μεταξύ των πρόγονων με τους επόμενους κλάδους. Με αυτό τον τρόπο αναπαριστούν στη στατιστική φύση του ΑΑΣ και μπορούν να αντιμετωπίσουν καλύτερα από τα συμμετρικά μοντέλα την διαφοροποίηση που υπάρχει στο ΑΑΣ κάθε ατόμου αλλά και την διαφοροποίηση μεταξύ ειδών. Παραδείγματα στοχαστικών μοντέλων είναι των Soong κ.α. (1979) (βασίζεται στο μοντέλο Weibel A) και Koblinger και Hoffman (1985). Τα στοχαστικά μοντέλα μπορούν να περιγράψουν την δομή και λειτουργία του αναπνευστικού συστήματος καλύτερα από τα συμμετρικά μοντέλα και τα μοντέλα ασυμμετρίας. Ωστόσο δεν υπάρχουν αρκετά στην βιβλιογραφία.

4.1.2. Παράμετροι Φυσιολογίας

Η φυσιολογία του αναπνευστικού συστήματος σχετίζεται με την ροή του αέρα κατά την είσοδο και έξοδο του από τη μύτη και το στόμα αλλά και κατά την κίνηση του στους αεραγωγούς του. Κατά την αναπνοή οι αεραγωγοί της τραχειοβρογχικής περιοχής διαστέλλονται και συστέλλονται με αποτέλεσμα να αλλάζει το μήκος και το διαμέτρημα των αγωγών αλλά και η γωνία διακλάδωσης. Εξαιτίας των παραπάνω ο τρόπος διέλευσης του αέρα στους πνεύμονες είναι πολύπλοκος και το ρεύμα αέρα δεν κατανέμεται ομοιόμορφα στους πνεύμονες. Οι παράμετροι που αφορούν στον τρόπο και τον ρυθμό παροχής του αέρα χρησιμοποιούνται στον καθορισμό της πρόσληψης σωματιδίων μετά από έκθεση σε δεδομένη ατμοσφαιρική συγκέντρωση (π.χ. ICRP, 1994; US EPA, 2002; Schlesinger, 1988 κ.α.). Παράλληλα είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό του ποσοστού της εισπνεόμενης σωματιδιακής ύλης που θα εναποτεθεί στις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος.

Οι παράμετροι φυσιολογίας διακρίνονται σε δύο κατηγορίες (ICRP, 2002). Η πρώτη κατηγορία αφορά τον όγκο του αέρα στους πνεύμονες κατά τη διάρκεια ενός κύκλου αναπνοής. Σχετίζεται άμεσα με την ηλικία, το ύψος, βάρος, φύλο, την φυλή και την κατάσταση υγείας του ατόμου. Στην Εικόνα 2 δίνονται οι όγκοι του αέρα στους πνεύμονες κατά την διάρκεια ενός κύκλου αναπνοής. Ένας κύκλος αναπνοής περιλαμβάνει τον χρόνο εισπνοής T_{in} και εκπνοής T_{ex} με ίση διάρκεια που κυμαίνεται από 37,5-50,0% του κύκλου και ο υπόλοιπος αποτελείται από παύσεις. Ο όγκος του αέρα που βρίσκεται στους πνεύμονες τη στιγμή της μέγιστης εισπνοής είναι γνωστός ως ολική χωρητικότητα των πνευμόνων (TLC, total lung capacity). Εισπνευστικός όγκος αέρα (IRV) είναι το κλάσμα της ολικής χωρητικότητας των πνευμόνων που καταλαμβάνεται κατά την εισπνοή. Το αντίστοιχο κλάσμα που καταλαμβάνεται κατά την εκπνοή ονομάζεται εκπνευστικός όγκος αέρα (ERV). Υπόλοιπη χωρητικότητα των πνευμόνων είναι το υπόλοιπο της ολικής χωρητικότητας εάν αφαιρέσουμε

τον εισπνευστικό και εκπνευστικό όγκο αέρα καθώς και τον όγκο που λαμβάνεται σε κάθε εισπνοή (V_T , 500-3800mL) ($RV = TLC - IRV - ERV - V_T$ - Εξ. 66). Ο συνολικός όγκος των πνευμόνων που καταλαμβάνεται κατά την εισπνοή και απελευθερώνεται κατά την εκπνοή είναι η εισπνευστική χωρητικότητα (IC) ενώ ως υπόλοιπη λειτουργική χωρητικότητα (FRC, functional residual capacity) καλείται ο όγκος του αέρα που παραμένει στους πνεύμονες μετά την εκπνοή. Τέλος ζωτική χωρητικότητα των πνευμόνων VC (vital capacity) καλείται το άθροισμα των IRV, V_T και ERV. Πέρα από τις παραπάνω παραμέτρους χρησιμοποιούνται και οι όροι των ανατομικά ή φυσιολογικά νεκρών όγκων αέρα και περιοχών των πνευμόνων. Ειδικότερα, ανατομικά νεκρός όγκος είναι από μορφολογική άποψη ο όγκος των πνευμόνων που δεν καλύπτεται από αναπνευστικό επιθήλιο ή από φυσιολογική άποψη ο όγκος του αέρα που λαμβάνεται ανά εισπνοή αλλά δεν συμμετέχει στην αναπνοή που πραγματοποιείται στις κυψελίδες (ICRP, 1994; Schlesinger, 1988).



Εικόνα 3 Διάγραμμα των κλασμάτων του όγκου αέρα που εισέρχεται στους πνεύμονες. TLC = ο μέγιστος όγκος του αέρα στους πνεύμονες στην εισπνοή (Total Lung Capacity), VC = (Vital Capacity), RV = (Residual Volume), FRC = ο όγκος αέρα που παραμένει στους πνεύμονες μετά από την εκπνοή (Functional Residual Capacity), IRV = (Inspiratory Reserve Volume), ERV = (Expiratory Reserve Volume), V_T = ο όγκος αέρα κάθε εισπνοής (Tidal volume), IC = (Inspiratory Capacity) (Schlesinger, 1988).

Η ηλικία επηρεάζει ιδιαίτερα τα κλάσματα του όγκου του αέρα στους πνεύμονες. Έτσι σε ένα άτομο μεγάλης ηλικίας η υπόλοιπη λειτουργική χωρητικότητα και η υπόλοιπη χωρητικότητα

αυξάνουν ενώ η ζωτική και εισπνευστική χωρητικότητα και ο εκπνευστικός όγκος αέρα μειώνονται. Ακόμα επηρεάζονται σημαντικά οι νεκροί όγκοι κάθε περιοχής του αναπνευστικού καθώς οι πνεύμονες χάνουν την ελαστικότητα τους ενώ ταυτόχρονα ο αέρας δεν αναμειγνύεται και μοιράζεται ομοιόμορφα σε όλους τους αεραγωγούς (Schlesinger, 1988). Έτσι κάποιες κυψελίδες δεν δέχονται συνεχώς αέρα με αποτέλεσμα την αύξηση του όγκου του αέρα που δεν συμμετέχει στην αναπνοή.

Η δεύτερη κατηγορία παραμέτρων φυσιολογίας αφορά τον τρόπο και τον ρυθμό με τον οποίο επαναλαμβάνεται ένας κύκλος αναπνοής. Ειδικότερα, ως τρόπος αναπνοής ορίζεται η κατανομή του αέρα κατά την εισπνοή μεταξύ μύτης και στόματος. Με βάση τον τρόπο αναπνοής οι άνθρωποι χαρακτηρίζονται, για τους σκοπούς της εκτίμησης της δόσης, ως άτομα που αναπνέουν μόνο από τη μύτη (nose breathers) ή και από τις δύο εισόδους (nasal augmenters) όταν εκτελούν ήπια δραστηριότητα (ICRP, 2002). Βέβαια υπάρχει και ένα ποσοστό ατόμων που εισπνέουν μερικώς από το στόμα, αλλά αυτό οφείλεται κυρίως σε ανατομικούς λόγους ή λόγους υγείας. Η συχνότητα εισπνοής είναι το πλήθος των εισπνοών ανά λεπτό (f) και το γινόμενο της με τον όγκο αέρα που λαμβάνεται ανά εισπνοή (V_T) αποτελεί τον ρυθμό εισπνοής B (ventilation rate) που είναι ο εισπνεόμενος όγκος αέρα στη μονάδα του χρόνου (1 h). Η συχνότητα εισπνοής κυμαίνεται από 12 έως 18 εισπνοές το λεπτό για ενήλικες σε ανάπαυση. Τέλος, ως ογκομετρική παροχή αέρα (volumetric flow rate) V (mL/s) στους πνεύμονες ονομάζεται ο εισπνεόμενος όγκος αέρα στη μονάδα του χρόνου που ορίζεται ως ο λόγος του αέρα που λαμβάνεται ανά εισπνοή (V_T) προς το χρόνο που διαρκεί η εισπνοή T_{in} .

Οι παράμετροι της δεύτερης κατηγορίας επηρεάζονται σημαντικά από τη δραστηριότητα του ατόμου και συχνά αναφέρονται ως παράμετροι δραστηριότητας (ICRP, 1994). Όπως αναφέρθηκε παραπάνω οι περισσότεροι άνθρωποι όταν εκτελούν ήπια εργασία αναπνέουν από τη μύτη. Εάν δεν συντρέχουν λόγοι υγείας ή ανατομίας ο τρόπος αναπνοής μεταβάλλεται, και το στόμα συμμετέχει σε αυτή, μόνο όταν απαιτείται μεγάλη παροχή αέρα. Η αναγκαία ζωτική παροχή αέρα σχετίζεται άμεσα με τη δραστηριότητα και το άτομο έχει τις μεγαλύτερες απαιτήσεις όταν εκτελεί βαριά εργασία ή αθλείται με αποτέλεσμα την αύξηση της συχνότητας αναπνοής. Η συμμετοχή ωστόσο του στόματος στην εισπνοή ακόμα και σε αυτές τις περιπτώσεις δεν ξεπερνά το 60% (Schlesinger, 1988). Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να σημειωθεί πως όταν η συχνότητα εισπνοής αυξάνεται και άρα η διάρκεια κάθε κύκλου αναπνοής ελαττώνεται, ο χρόνος εισπνοής δεν μεταβάλλεται ώστε να λαμβάνεται ο απαιτούμενος όγκος αέρα. Η μείωση πραγματοποιείται στον χρόνο εκπνοής αλλά και στη διάρκεια παύσης μεταξύ εισπνοής και εκπνοής (έως και 25% του κύκλου αναπνοής για άτομο που αναπαύεται).

Ο όγκος που λαμβάνεται ανά αναπνοή επηρεάζεται και από το φύλο και την ηλικία του ατόμου (Hofmann κ.α., 2002; Bergmann και Hofmann, 1999; Venkataraman και Kao, 1999).

Πίνακας 10: Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων ανατομίας και φυσιολογίας που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα (ICRP, 1994).

Παράμετρος	Εκτεθειμένο Άτομο							
	Άντρας	Γυναίκα	Αγόρι 15 ετών	Κορίτσι 15 ετών	10 ετών	5 ετών	1 έτους	3 μηνών
<i>Υψος (cm)</i>	176	163	169	161	138	110	75	60
<i>Βάρος (kg)</i>	73	60	57	53	33	20	10	6
<i>FRC</i> : Υπόλοιπη λειτουργική χωρητικότητα (mL)	3301	2681	2677	2325	1484	767	244	148
<i>V_D(ET)</i> : Ανατομικά νεκρός όγκος της ET περιοχής (mL)	50	40	45	39	25	13,3	4,7	2,6
<i>V_D(BB)</i> : Ανατομικά νεκρός όγκος της τραχείας και των βρόγχων(mL)	49	40	44	39	26	15,5	6,8	4,5
<i>V_D(bb)</i> : νεκρός όγκος βρογχιολίων (mL)	47	44	41	37	26	16,7	8,7	6,8
<i>d₀</i> :διάμετρος τραχείας (cm)	1,65	1,53	1,59	1,52	1,31	1,06	0,75	0,616
<i>d₉</i> :διάμετρος του πρώτου βρογχιολίου (cm)	0,165	0,159	0,161	0,156	0,143	0,17	0,107	0,099
<i>d₁₆</i> : διάμετρος του πρώτου αναπνευστικού βρογχιολίου (cm)	0,051	0,048	0,047	0,045	0,039	0,031	0,022	0,020
<i>Κατά τη διάρκεια του ύπνου</i>								
<i>B</i> : Ρυθμός εισπνοής (m ³ /h)	0,45	0,32	0,42	0,35	0,31	0,24	0,15	0,09
<i>V_T</i> : Όγκος που λαμβάνεται ανά εισπνοή (mL)	625	444	500	417	304	174	74	39
<i>V</i> : Ογκομετρική παροχή αέρα (mL/s)	250	178	233	194	172	133	8	50
<i>f</i> : Συχνότητα εισπνοής (εισπνοές/min)	12	12	14	14	17	23	34	38
<i>Ανάπαυση</i>								
<i>B</i> : Ρυθμός εισπνοής (m ³ /h)	0,54	0,39	0,48	0,4	0,38	0,2	0,22	-
<i>V_T</i> : Όγκος που λαμβάνεται ανά εισπνοή (mL)	750	464	533	417	333	213	102	-
<i>V</i> : Ογκομετρική παροχή αέρα (mL/s)	300	217	267	222	211	178	122	-
<i>f</i> : Συχνότητα εισπνοής (εισπνοές/min)	12	14	15	16	19	25	36	-
<i>Καθώς εκτελεί ήπια εργασία</i>								
<i>B</i> : Ρυθμός εισπνοής (m ³ /h)	1,5	1,25	1,38	1,3	1,12	0,57	0,35	0,19
<i>V_T</i> : Όγκος που λαμβάνεται ανά εισπνοή (mL)	1250	992	1000	903	583	244	127	66
<i>V</i> : Ογκομετρική παροχή αέρα (mL/s)	833	694	767	722	622	317	194	106
<i>f</i> : Συχνότητα εισπνοής (εισπνοές/min)	20	21	23	24	32	39	46	48
<i>Καθώς εκτελεί βαριές εργασίες</i>								
<i>B</i> : Ρυθμός εισπνοής (m ³ /h)	3	2,7	2,92	2,57	2,03			-
<i>V_T</i> : Όγκος που λαμβάνεται ανά εισπνοή (mL)	1920	1364	1352	1127	752			-
<i>V</i> : Ογκομετρική παροχή αέρα (mL/s)	1670	1500	1622	1428	1128			-
<i>f</i> : Συχνότητα εισπνοής (εισπνοές/min)	26	33	36	38	45			-

Ένα ενήλικο άτομο εισπνέει περισσότερο όγκο αέρα ανά αναπνοή απ' ότι ένα παιδί και λιγότερο απ' ότι ένας μεσήλικας. Το αντίθετο ισχύει για την συχνότητα αναπνοής που ελαττώνεται με την ηλικία. Στον Πίνακα 3 δίνονται ενδεικτικά τιμές των παραμέτρων φυσιολογίας για Καυκάσια άτομα κάτω από διάφορες δραστηριότητες. Παράλληλα δίνονται οι βασικοί παράμετροι ανατομίας (διάμετροι αεραγωγών) που χρησιμοποιούνται ως συντελεστές συσχέτισης της απόθεσης των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα του Καυκάσιου άντρα (άτομο αναφοράς) και των άλλων ατόμων.

4.1.3. Ροή αέρα στο ΑΑΣ

Η ροή του αέρα στο ΑΑΣ επηρεάζει την συμπεριφορά και την εναπόθεση των σωματιδίων στο ΑΑΣ. Για την εύρεση του πεδίου ροής του αέρα στο ΑΑΣ απαιτείται η επίλυση των εξισώσεων συνέχειας και Navier-Stokes. Η εξίσωση Navier-Stokes με δάνυσμα ταχυτήτων U , πίεσης P , δύναμης της βαρύτητας g , πυκνότητας ρευστού ρ και κινηματικού ιξώδους ν είναι (Εξ. 67):

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \cdot \nabla U = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu (\nabla^2 U) + g$$

και η εξίσωση συνέχειας του είναι (Εξ. 68):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho U = 0$$

Εξαιτίας της πολυπλοκότητας του ΑΑΣ οι εξισώσεις συνέχειας και Navier-Stokes δεν μπορούν να λυθούν εύκολα. Έτσι στα περισσότερα μοντέλα εναπόθεσης θεωρείται πως ο αέρας ρέει με διαλείπουσα ή πλήρως ανεπτυγμένη στρωτή ροή στην τραχειοβρογχική περιοχή ενώ στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα η ροή θεωρείται στροβιλώδης ομογενής στο κέντρο και σε κάποια μοντέλα λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των τοιχωμάτων. Για εισπνοή σε κανονικές συνθήκες η ταχύτητα του αέρα στους πνεύμονες είναι πολύ μικρή και η ροή του μπορεί να θεωρηθεί ασυμπίεστη και να ταξινομηθεί βάσει του αριθμού Reynolds (Εξ. 69):

$$Re = \frac{d\bar{u}}{\nu} = \frac{4Q}{\pi \nu d}$$

όπου d η διάμετρος του αγωγού του αναπνευστικού συστήματος (cm), \bar{u} η μέση ταχύτητα του αέρα στον αεραγωγό (cm/s), ν το κινηματικό ιξώδες του αέρα (cm²/s), και Q η παροχή αέρα (cm³/s). Τα αδρανή σωματίδια μπορεί να θεωρηθεί πως έχουν ταχύτητα \bar{u} . Ο αριθμός Reynolds παίρνει συνήθως μέσες ή και υψηλές τιμές στους αγωγούς του ανώτερου αναπνευστικού συστήματος. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και παραπάνω στον Πίνακα 8, η τιμή του στην ρινική και στοματική κοιλότητα, τον λάρυγγα, την τραχεία και τους κύριους βρόγχους ξεπερνά την οριακή τιμή 2300 για τη μετάβαση από στρωτή σε στροβιλώδη ροή σε ομαλούς ευθείς αγωγούς. Ακόμα και σε τιμές Re μικρότερες της οριακής η ροή του αέρα στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα είναι στροβιλώδης εξαιτίας των ανατομικών χαρακτηριστικών του (περιγράφηκαν νωρίτερα) που μεταβάλλουν απότομα την κατεύθυνση του αέρα. Για μεγαλύτερο ρυθμό εισπνοής (π.χ. κοπιαστική εργασία) η ροή μπορεί να είναι στροβιλώδης έως και την γενιά 10 του μοντέλου Weibel. Για εισπνοή σε κανονικές και ήπιες

συνθήκες (π.χ. ανάπαυση, ύπνος) μπορεί να εφαρμοστεί ο νόμος του Stokes στην βρογχική περιοχή και τις κυψελίδες.

Στα μοντέλα εναπόθεσης σωματιδίων θεωρείται συνήθως πως οι διαστάσεις των αεραγωγών δεν μεταβάλλονται λόγω διαστολής και συστολής. Στο μοντέλο των Haber και Tsuda (1998) θεωρείται πως οι κυψελίδες διαστέλλονται ρυθμικά. Γενικά θεωρείται πως οποιαδήποτε μεταβολή του όγκου των πνευμόνων πραγματοποιείται μόνο στις κυψελίδες (Hofmann κ.α., 1992). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ελαττώνεται ο αριθμός Reynolds κατά την εισπνοή (διαστολή κυψελίδων) (εξίσωση 69). Επιπλέον το διαμέτρημα των αγωγών μεταβάλλεται ρυθμικά. Γενικά μπορεί να θεωρηθεί ότι στις περισσότερες περιπτώσεις εισπνοής με μέσο ρυθμό η ροή του αέρα μέσα στο ΑΑΣ είναι quasi-steady. Για να ισχύει αυτό θα πρέπει ο αριθμός Strouhal (St) στις περιοχές εισόδου των αεραγωγών να είναι μικρότερος από 1 ενώ στις περιοχές μακριά από την είσοδο όπου η ροή θεωρείται ανεπτυγμένη θα πρέπει ο αριθμός Womersley α να είναι μικρότερος από 1 ($St=d\omega/\bar{u}$, $\alpha=(d/2)\sqrt{\omega/\nu}$, όπου $\omega = 2\pi f$, d η διάμετρος του αεραγωγού (cm) και f η συχνότητα εισπνοών). Στις πρώτες γενιές του ΑΑΣ η ανάμειξη του αέρα είναι σημαντική και οι δευτερεύουσες ροές που δημιουργούνται εξαιτίας της ανατομίας των περιοχών αλλά και της μίξης του φρέσκου εισπνεόμενου αέρα με τον προϋπάρχον δημιουργούν ομογενής κλίση στην συγκέντρωση.

Το μήκος εισόδου x_e , δηλαδή η απόσταση από την είσοδο στον αεραγωγό που απαιτείται για την πλήρη ανάπτυξη της ροής δίνεται από τις σχέσεις:

Για πλήρως ανεπτυγμένη στρωτή ροή (Poiseuille)

$$\frac{x_e}{d} \cong \begin{cases} 0,03Re & \text{για } 50 \leq Re \leq 2300 \\ 1,5 & \text{για } Re < 1 \end{cases}$$

$$\text{Για στροβιλώδης ροή } \frac{x_e}{d} \cong 40 \quad (\text{Εξ. 70})$$

Σε κυρτούς αγωγούς, όπως στα σημεία διακλάδωσης στο ΑΑΣ, παρατηρούνται δευτερεύοντα ρεύματα ροής που ωθούν το ρευστό στα τοιχώματα της καμπής. Όταν η γωνία κύρτωσης είναι μεγάλη έτσι ώστε να ισχύει $\Delta=d/R \ll 1$ (όπου R η διάμετρος κύρτωσης σε cm) οι δευτερεύουσες ροές εξαρτώνται μόνο από τον αριθμό Dean ($De=Re\sqrt{\Delta}$ (Εξ. 71)) (Dean, 1928). Η διάμετρος της κύρτωσης στην διακλάδωση (υπό γωνία θ_b) των αεραγωγών μετά από παραδοχές για το μήκος της κύρτωσης (Heistracher και Hofmann, 1995) μπορεί να υπολογιστεί με την σχέση (Εξ. 72):

$$R = \frac{l_{\min}}{3} \sqrt{\frac{1+\cos\theta_b}{1-\cos\theta_b}}$$

Για κυρτούς αγωγούς το μήκος εισόδου για στρωτή ροή είναι (Εξ. 73):

$$\frac{x_e}{l} \cong \sqrt{\frac{De}{\Delta}} \frac{d}{l}$$

όπου l το μήκος του αεραγωγού. Για τα μορφολογικά μοντέλα Weibel A και Yeh και Schum έχει βρεθεί πως υπό συνθήκες ανάπαυσης αλλά και υψηλού ρυθμού εισπνοών (κοπιαστική εργασία) η ροή δεν είναι πλήρως ανεπτυγμένη στο ΑΑΣ παρά μόνο στις γενιές ~11-22 ενώ δευτερεύουσες ροές λόγω της κύρτωσης των αγωγών παρατηρούνται σχεδόν σε όλη την περιοχή BB καθώς και σε μέρος της περιοχής bb.

Η παροχή του αέρα ανά αεραγωγό εξαρτάται από τον τρόπο διανομής του αέρα από τον πρόγονο στους απόγονους κλάδους. Για ένα συμμετρικό μορφολογικό μοντέλο ΑΑΣ με διχοτόμηση κάθε κλάδου σε απόγονους η διανομή του αέρα γίνεται ομοιόμορφα και η μέση ταχύτητα στον αεραγωγό βρίσκεται από το πηλίκο της παροχής του αέρα προς την διατομή του αεραγωγού. Έτσι η ταχύτητα του αέρα στους απόγονους κλάδους είναι πάντα μικρότερη από ότι στον πρόγονο κλάδο. Σε διχοτομικά μορφολογικά μοντέλα με ασυμμετρία η ροή του αέρα διαμοιράζεται στους απόγονους κλάδους με βάση τον λόγο των διατομών τους. Δηλαδή αν Q_i είναι η παροχή αέρα στον πρόγονο κλάδο και $A_{i+1,1}$, $A_{i+1,2}$ οι διατομές των δύο απόγονων κλάδων η παροχή αέρα σε αυτούς θα είναι (Εξ. 74):

$$Q_{i+1,j} = Q_i \frac{A_{i+1,j}}{A_{i+1,1} + A_{i+1,2}}$$

Από φυσιολογική άποψη η διανομή της παροχής του αέρα μεταξύ των κλάδων του αναπνευστικού μπορεί να υπολογιστεί με τη σχέση (Εξ. 75):

$$\int_0^{T_{in}} Q_{i,j}(t) dt = c_i V_{j,i} + \sum_{k=i+1}^N \sum_{n=1}^{m(k)} c_k V_{n,k}$$

όπου i και j οι γενιές του ΑΑΣ, N το πλήθος των γενιών που απομένουν ως την τελευταία, $m(k)$ το πλήθος των αεραγωγών στην γενιά, c_k ο συντελεστής διόγκωσης της γενιάς που συνδέεται με το πλήθος των κυψελίδων στον αεραγωγό και $V_{n,k}$ ο μέσος όγκος του αεραγωγού n της γενιάς k . Ωστόσο ο υπολογισμός με αυτό τον τρόπο δεν χρησιμοποιείται συνήθως ειδικά σε στοχαστικά μοντέλα (αδυναμία εφαρμογής). Τέλος η πτώση πίεσης κατά μήκος των αεραγωγών υπολογίζεται με τη σχέση (Εξ. 76):

$$\Delta P = \frac{C_f \rho \bar{u}^2}{2}$$

όπου C_f είναι ο συντελεστής τριβής. Η τιμή του συντελεστή τριβής δίνεται από τη σχέση (d είναι η διάμετρος του αεραγωγού και l το μήκος του) (Εξ. 77):

$$C_f \propto \begin{cases} \frac{1}{Re d} & \text{για ροή Poiseuille} \\ \sqrt{\frac{1}{Re d}} & \text{για είσοδο σε φυλλώδη ροή και φυλλώδη ροή σε κυρτό αγωγό} \\ \frac{1}{Re^4 d} & \text{για πλήρως ανεπτυγμένη στροβιλώδη ροή σε ομαλό αγωγό} \\ 26,46 \sqrt{\frac{1}{Re d}} - 0,56 & \text{κατά την εισπνοή ΑΑΣ (Pedley κ.α., 1970α και 1970β)} \\ 3,1 \left((Re^{-0,4} - 0,02) \frac{l}{d} + 0,11 \right) & \text{κατά την εκπνοή στο ΑΑΣ (Hardin κ.α., 1980)} \end{cases}$$

Σε κάποια μοντέλα χρησιμοποιήθηκε υπολογιστική ρευστομηχανική (CFD) για τον προσδιορισμό της ταχύτητας του αέρα σε ένα καλώς ανατομικά ορισμένο ΑΑΣ. Αρχικά το ΑΑΣ ορίζεται πλήρως ανατομικά και διακρίνεται γεωμετρικά σε επιμέρους στοιχεία που ορίζονται σε δύο ή 3 διαστάσεις. Έτσι δημιουργείται ένα μαθηματικό ανάλογο (πλέγμα) του χώρου στον οποίο ρέει ο εισπνεόμενος και εκπνεόμενος όγκος αέρα, δηλαδή του ΑΑΣ. Οι κόμβοι των επιμέρους στοιχείων μπορούν να καλύπτουν όλο το χώρο ή μόνο τα όρια του. Στη συνέχεια οι εξισώσεις συνέχειας επιλύονται με πεπερασμένες διαφορές ή πεπερασμένα στοιχεία στους κόμβους του πλέγματος και έτσι προσομοιώνεται η ροή του αέρα μέσα στο ΑΑΣ. Το πεδίο των συγκεντρώσεων στο πλέγμα βρίσκεται με τη βοήθεια του υπολογισμένου πεδίου ροής του αέρα και της εξίσωσης διατήρησης της μάζας. Στη συνέχεια υπολογίζεται η εναπόθεση των σωματιδίων στα τοιχώματα του αναπνευστικού και βρίσκονται σχέσεις (εξισώσεις) για τον υπολογισμό της τοπικής εναπόθεσης. Τα μοντέλα αυτά απαιτούν μεγάλη υπολογιστική ισχύ και ο ορισμός του πλέγματος επηρεάζει την ακρίβεια τους.

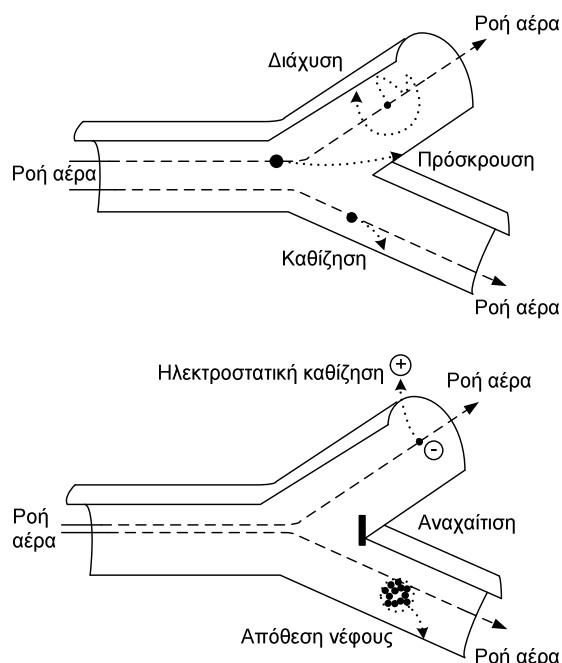
4.2. Εναπόθεση σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα

Η εκτίμηση της δόσης ΑΣ, που θα δεχτεί το αναπνευστικό σύστημα ενός εκτεθειμένου ατόμου, δεν καθορίζεται μόνο από την συγκέντρωση και τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα και τις παραμέτρους φυσιολογίας του ατόμου, αλλά και από την εναπόθεσή τους με διάφορους μηχανισμούς στο αναπνευστικό σύστημα (Schlesinger, 1988). Η εναπόθεση των σωματιδίων σχετίζεται με την απομάκρυνσή τους από την αιωρούμενη κατάσταση και την απόθεσή τους στο αναπνευστικό σύστημα. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η αρχική θέση εναπόθεσης των σωματιδίων γιατί καθορίζει την μετέπειτα μεταφορά και απομάκρυνσή τους από τους αεραγωγούς του αναπνευστικού συστήματος.

4.2.1. Μηχανισμοί εναπόθεσης

Οι κύριοι μηχανισμοί εναπόθεσης των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα είναι η πρόσκρουση, καθίζηση, διάχυση, αναχαίτιση-ενσφήνωση και η ηλεκτροστατική καθίζηση όπως δίνονται στα σχήματα της Εικόνα 4 (US EPA, 2002). Αναλυτικότερα η πρόσκρουση οφείλεται στην αδυναμία των σωματιδίων να ακολουθήσουν τις γραμμές ροής όταν αυτές αλλάζουν απότομα κατεύθυνση ή ταχύτητα. Είναι ο σημαντικότερος μηχανισμός εναπόθεσης για σωματίδια ισοδύναμης αεροδυναμικής διαμέτρου μεγαλύτερης του 0,5μm στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα (ICRP, 2002). Η πιθανότητα εναπόθεσης ενός σωματιδίου λόγω πρόσκρουσης είναι ανάλογη της ταχύτητας του αέρα, του ρυθμού αναπνοής, του μεγέθους και της πυκνότητας του σωματιδίου (Schlesinger, 1988). Η καθίζηση είναι η εναπόθεση σωματιδίων στο αναπνευστικό εξαιτίας της βαρύτητας. Όταν η επίδραση της βαρύτητας γίνει μεγαλύτερη της άνωσης και της αντίστασης του αέρα τα σωματίδια εγκαταλείπουν τις γραμμές ροής και καθιζάνουν με σταθερή ταχύτητα στις επιφάνειες της αναπνευστικής οδού (US EPA,

2002). Αποτελεί όπως και η πρόσκρουση σημαντικό μηχανισμό για σωματίδια ισοδύναμης αεροδυναμικής διαμέτρου μεγαλύτερης των 0,5 μm όταν αυτά κινούνται στους μικρότερους αεραγωγούς του αναπνευστικού συστήματος (Schlesinger, 1988). Η πιθανότητα εναπόθεσης ενός σωματιδίου λόγω καθίζησης είναι ανάλογη του χρόνου παραμονής στους αεραγωγούς, του μεγέθους και της πυκνότητας του σωματιδίου και αντιστρόφως ανάλογη του ρυθμού αναπνοής. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η καθίζηση σωματιδίων αποτελεί βασικό μηχανισμό εναπόθεσης σωματιδίων στην περιοχή εκτός θώρακα και στους αναπνευστικούς αεραγωγούς της κυψελιδικής περιοχής (Βλέπε Πίνακας 8 για χρόνους παραμονής). Η σχετική συνεισφορά της πρόσκρουσης και της καθίζησης στην απόθεση σωματιδίων σε μια διακλάδωση στις αρχικές γενιές των πνευμόνων έχει βρεθεί πως είναι περίπου ίση. Διαφέρουν όμως στη θέση απόθεσης των σωματιδίων αφού τα περισσότερα σωματίδια επικάθονται λόγω πρόσκρουσης στη διακλάδωση ενώ λόγω καθίζησης σε όλο το μήκος των αεραγωγών (Balashazy κ.α., 1999).



Εικόνα 4 Μηχανισμοί εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα.

Σωματίδια διαμέτρου μικρότερης των 0,2 μm κινούνται ακολουθώντας τυχαίες κατευθύνσεις καθώς βομβαρδίζονται από μόρια αέρα (Schlesinger, 1988). Εξαιτίας αυτής της κίνησης είναι πιθανό να έρθουν σε επαφή με τα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού και να αποτεθούν στα σημεία σύγκρουσης. Η διάχυση αποτελεί βασικό μηχανισμό απόθεσης των σωματιδίων στα βρογχιόλια και την κυψελιδική περιοχή όπου η ταχύτητα ροής είναι ιδιαίτερα χαμηλή αλλά και στην περιοχή εκτός θώρακα όπου η ροή του αέρα είναι τυρβώδης (ICRP, 2002).

Τα πρωτογενή σωματίδια είναι συχνά ηλεκτρικά φορτισμένα και σε περίπτωση εισπνοής τους παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά εναπόθεσης που δεν μπορούν να ερμηνευθούν από τους υπόλοιπους μηχανισμούς απόθεσης. Η εναπόθεση των ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων οφείλεται σε ηλεκτροστατική καθίζηση και είναι αντιστρόφως ανάλογη του μεγέθους των

σωματιδίων και της ταχύτητας ροής του αέρα (US EPA, 2002). Ωστόσο, η εισπνοή ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων είναι σπάνια αφού το φορτίο των πρωτογενών σωματιδίων γρήγορα εξουδετερώνεται από τα ιόντα της ατμόσφαιρας (Schlesinger, 1988). Έτσι η εναπόθεση μέσω αυτού του μηχανισμού είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με άλλων (US EPA, 2004; NRPB, 2004).

Τελευταίος μηχανισμός εναπόθεσης είναι η αναχαίτιση που οφείλεται στην φυσική επαφή των σωματιδίων με τα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού. Η αναχαίτιση εξαρτάται από το μέγεθος και το σχήμα του σωματιδίου και είναι σημαντική για σωματίδια με ινώδη μορφή (ICRP, 2002). Τα σωματίδια μεγέθους 0,2 μm – 0,5 μm δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από κανέναν από τους παραπάνω μηχανισμούς και εναποτίθενται ελάχιστα στο αναπνευστικό σύστημα μέσω καθίζησης (US EPA, 2002).

Το ποσοστό των σωματιδίων που εισέρχονται στο αναπνευστικό σύστημα εξαρτάται από το μέγεθος τους όπως και από τη συχνότητα και τον τρόπο αναπνοής. Αφού εισέλθουν στο ΑΑΣ η εναπόθεσή τους εξαρτάται από το μέγεθος τους και βιολογικούς παράγοντες που σχετίζονται με το φύλο, την ηλικία, ασθένειες, το είδος και όσον αφορά στους ανθρώπους με την εθνικότητα. Όπως αναφέρθηκε και στην περιγραφή του αναπνευστικού συστήματος, οι παραπάνω παράγοντες καθορίζουν την ανατομία του αναπνευστικού συστήματος και την λειτουργία της αναπνοής. Αναλυτικότερα, η εθνικότητα σχετίζεται με τις διαστάσεις του σώματος και κατά συνέπεια και του αναπνευστικού συστήματος με αποτέλεσμα διαφορετική εναπόθεση (ICRP, 1994). Η διαφοροποίηση στην εναπόθεση εξαιτίας του φύλου είναι σημαντική ακόμα και για άτομα της ίδιας εθνικότητας. Μια γυναίκα διαθέτει αναπνευστικό σύστημα με αεραγωγούς μικρότερους από ενός άντρα αλλά ταυτόχρονα αναπνέει αέρα με μικρότερο ρυθμό αλλά μεγαλύτερη συχνότητα (Πίνακας 10). Έτσι είναι δύσκολο να φανεί μια καθαρή τάση στην διαφορά εναπόθεσης μεταξύ των δύο φύλων. Ωστόσο σε μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί έχει βρεθεί πως η εναπόθεση των πολύ μικρών σωματιδίων είναι μεγαλύτερη για τις γυναίκες (Kim και Jaques, 2000). Ακόμα, η δομή και η κατάσταση του αναπνευστικού συστήματος ποικίλλουν ανάλογα την ηλικία με αποτέλεσμα να διαφοροποιείται η εναπόθεση των σωματιδίων. Έχει βρεθεί πως το ποσοστό εναπόθεσης στην εκτός θώρακα περιοχή είναι αντιστρόφως ανάλογο με την ηλικία και το ύψος.

Ασθένειες στην αναπνευστική οδό επιδρούν στην δομή της αλλά και τον τρόπο αναπνοής. Άνθρωποι με χρόνιες εμφρακτικές νόσους των πνευμόνων αναπνέουν με μεγαλύτερο ρυθμό και παρουσιάζουν υψηλότερα ποσοστά εναπόθεσης στην TB περιοχή σε σχέση με υγιή άτομα (US EPA, 2002). Ανεξάρτητα της κατανομής της εναπόθεσης μεταξύ της TB και AI περιοχής, τα άτομα με φραγμένα τμήματα της αναπνευστικής οδού λόγω ασθενειών παρουσιάζουν υψηλότερα ποσοστά εναπόθεσης σωματιδίων στους πνεύμονες σε σχέση με τα υγιή. Η κατανομή της ροής του αέρα σε άτομα με COPD είναι ανομοιόμορφη εξαιτίας του άτακτου τρόπου έμφραξης τμημάτων του αναπνευστικού. Έτσι ενώ κάποια τμήματα των

πνευμόνων τους είναι απροσπέλαστα σε άλλα τα σωματίδια προχωρούν βαθύτερα με αποτέλεσμα να παρατηρείται τοπικά εντονότερη εναπόθεση στην ΑΙ περιοχή.

Στη συνέχεια αναλύεται ο τρόπος υπολογισμού της εναπόθεσης σωματιδίων στο ΑΑΣ στα μοντέλα εναπόθεσης.

4.2.2. Υπολογισμός της εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα

Στα μοντέλα εναπόθεσης ακολουθούνται δύο προσεγγίσεις για τον υπολογισμό της μάζας των σωματιδίων που αποτίθενται σε κάθε περιοχή. Στην πρώτη κατηγορία τα ποσοστά εναπόθεσης υπολογίζονται έμμεσα ή άμεσα με εύρεση του πεδίου συγκέντρωσης των ΑΣ μέσα στο ΑΑΣ επιλύοντας τη δυναμική εξίσωση των αεροζόλ (Εξ. 78):

$$\frac{\partial}{\partial t}(A_T C) = -\frac{\partial}{\partial x}(A_A u C) + \frac{\partial}{\partial x}\left(A_T D \frac{\partial C}{\partial x}\right) - L + \left(\frac{\partial}{\partial t}(A_T C)\right)_{\text{αύξηση μεγέθους}} + \left(\frac{\partial}{\partial t}(A_T C)\right)_{\text{συσσωμάτωση}}$$

όπου C είναι η συγκέντρωση των σωματιδίων, A_T είναι το άθροισμα των διατομών σε απόσταση x από την τραχεία όλων των αεραγωγών της γενιάς, A_A είναι το άθροισμα των διατομών όλων των κυψελίδων σε απόσταση x από την τραχεία, u είναι η ταχύτητα ροής, D η παράμετρος διάχυσης στους πνεύμονες (effective diffusivity- λαμβάνει υπόψη την επίδραση της ανάμειξης των νέων σωματιδίων που φτάνουν με το ρεύμα αέρα με τα προϋπάρχοντα στον αεραγωγό) και L ο ρυθμός εναπόθεσης ανά μονάδα μήκους του αεραγωγού. Σε αυτά τα μοντέλα χρησιμοποιείται συνήθως η προσέγγιση της 'χοάνης' ή 'τρομπέτας' (trumpet-tube) για το ΑΑΣ όπου κάθε διατομή αναλογεί στο άθροισμα όλων των διατομών σε απόσταση x από την τραχεία. Στην δεύτερη κατηγορία συνήθως δεν επιλύεται το πεδίο συγκεντρώσεων αλλά βρίσκονται άμεσα τα ποσοστά εναπόθεσης ανά περιοχή (ομογενής τμήματα του αναπνευστικού –compartments- που δρουν ως φίλτρα). Το πεδίο ροής εισάγεται μόνο έμμεσα στον υπολογισμό της εναπόθεσης με την ταχύτητα και τον συντελεστή διάχυσης. Τα μοντέλα αυτής της κατηγορίας είναι και τα παλαιότερα και αν και δεν λαμβάνουν υπόψη την επίδραση των τοιχωμάτων ή ο τρόπος υπολογισμού της εναπόθεσης βασίζεται σε εξισώσεις που προέκυψαν για απλουστευμένες δομές του ΑΑΣ, τα αποτελέσματα τους θεωρούνται πολύ καλά (Stuart, 1984). Οι μηχανισμοί εναπόθεσης που κυρίως λαμβάνονται υπόψη και για τις δύο κατηγορίες μοντέλων είναι η πρόσκρουση, καθίζηση και διασπορά για την τραχειοβρογχική περιοχή ενώ για την περιοχή των κυψελίδων η καθίζηση, και η διασπορά. Η εναπόθεση στην περιοχή του ρινοφάρυγγα συχνά δεν υπολογίζεται αλλά σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ημιεμπειρικές εξισώσεις.

Αναλυτικότερα, η πιθανότητα εναπόθεσης λόγω πρόσκρουσης είναι ανάλογη του αριθμού Stokes των σωματιδίων (Εξ. 79):

$$Stk = \frac{\tau \bar{u}}{l} = \frac{\rho_p d_p^2 C_c \bar{u}}{18\mu l} = \frac{\rho_0 d_{ae}^2 C_c \bar{u}}{18\mu l}$$

όπου τ ο χρόνος που απαιτείται για την προσαρμογή της ταχύτητας του σωματιδίου στις νέες συνθήκες – particle relaxation time (s), C_c ο συντελεστής Cunningham (εξίσωση υπολογισμού του δίνεται στην ενότητα 4.4), l το χαρακτηριστικό μήκος του αγωγού (cm), ρ_p (g/cm^2) και d_p (cm) η πυκνότητα και η διάμετρος του σωματιδίου, ρ_0 (g/cm^3) η πυκνότητα του αέρα και d_{ae} (cm) η αεροδυναμική διάμετρος του σωματιδίου.

Κατά την εκπνοή και την παύση του κύκλου αναπνοής συχνά δεν λαμβάνεται υπόψη (Yu κ.α., 1979; Anjilvel και Asgharian, 1995). Στον Πίνακα 1 του παραρτήματος Α δίνονται κάποιες από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες εξισώσεις για τον υπολογισμό του ποσοστού εναπόθεσης εξαιτίας της πρόσκρουσης. Το ποσοστό εναπόθεσης λόγω πρόσκρουσης δίνεται συναρτήσει του παράγοντα $Stk_{\frac{1}{d}} \theta_b$ όπου l και d το μήκος και η διάμετρος του αεραγωγού και θ_b η γωνία διακλάδωσης. Στις περισσότερες από αυτές τις εξισώσεις θεωρείται πως τα μικρά σωματίδια είναι σφαιρικά και αδρανή, οι αεραγωγοί είναι κυλινδρικοί και τα σωματίδια δεν επηρεάζονται από τον μηχανισμό αναχαίτισης.

Η εναπόθεση λόγω καθίζησης εκφράζεται συναρτήσει του λόγου του χρόνου καθίζησης του σωματιδίου $(u_s \cos \theta_g / d)^{-1}$ με τον χρόνο παραμονής του στον αεραγωγό $(l / \bar{u} - u_s \sin \theta_g)$, όπου θ_g η γωνία της δύναμης της βαρύτητας και u_s η ταχύτητα εναπόθεσης (cm/s). Εκφράσεις για τον υπολογισμό του ποσοστού εναπόθεσης λόγω καθίζησης δίνονται στον Πίνακα 2 του παραρτήματος Α. Η εναπόθεση λόγω διασποράς είναι σημαντική για τα πολύ μικρά σωματίδια και στην κυψελιδική περιοχή των πνευμόνων. Εκφράσεις για τον υπολογισμό του ποσοστού εναπόθεσης λόγω διασποράς δίνονται στον Πίνακα 3 του παραρτήματος Α. Τέλος, ειδικά για την περιοχή των κυψελίδων (d_a διάμετρος της σφαίρας που συνήθως προσομοιάζει τις κυψελίδες) έχουν προταθεί οι εξισώσεις υπολογισμού της εναπόθεσης λόγω καθίζησης και διασποράς που δίνονται στο Πίνακα 4 του παραρτήματος Α.

Ακόμα ένας σημαντικός μηχανισμός εναπόθεσης είναι η ηλεκτροστατική καθίζηση για φορτισμένα σωματίδια. Η επίδραση του μηχανισμού είναι μηδαμινή για 'γερασμένα' αεροζόλ αλλά σημαντική για τα νέα σωματίδια που μόλις παράγονται από διεργασίες για παράδειγμα καύσης είναι συνήθως φορτισμένα. Ο μηχανισμός δεν λαμβάνεται συνήθως υπόψη στα μοντέλα εναπόθεσης. Ωστόσο, έχει προταθεί η παρακάτω εξίσωση για τον υπολογισμό του ποσοστού εναπόθεσης λόγω ηλεκτροστατικής καθίζησης (Yu, 1985):

$$P = 1 - \exp(24Ke)^{1/3} \text{ για στρωτή ροή}$$

$$P = 1 - \exp(-4Ke)^{1/1.74} \text{ για πλήρως ανεπτυγμένη ροή} \quad (\text{Εξ. 80})$$

όπου (Εξ. 81):

$$Ke = \frac{e^2 z^2 C_c}{48 \pi^2 \epsilon_0 \mu d_p d^2 \bar{u}}$$

όπου ϵ_0 η διηλεκτρική σταθερά του κενού, e το στοιχειώδες φορτίο, z το πλήθος των φορτίων ανά σωματίδιο.

Για την εναπόθεση στην περιοχή του ρινοφάρυγγα έχουν προταθεί εξισώσεις της μορφής $P = \alpha + \beta \log \xi$ (Εξ. 82) όπου $\xi = d_{ae}^2 Q$ (Εξ. 83) και έχει μονάδες $\mu m^2 cm^3 s^{-1}$. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη έκφραση είναι αυτή των Yu κ.α. (1981):

$$\begin{aligned} \text{Εισπνοή από τη μύτη (Εξ. 84): } P &= -0,014 + 0,023 \log \xi \quad \text{για } \xi < 337 \text{ κατά την εισπνοή} \\ P &= -0,959 + 0,397 \log \xi \quad \text{για } \xi \geq 337 \text{ κατά την εισπνοή} \\ P &= 0,033 + 0,003 \log \xi \quad \text{για } \xi < 215 \text{ κατά την εκπνοή} \\ P &= -0,851 + 0,399 \log \xi \quad \text{για } \xi \geq 215 \text{ κατά την εκπνοή} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Εισπνοή από το στόμα (Εξ. 85): } P &= -1,117 + 0,324 \log \xi \quad \text{για } \xi \geq 3000 \text{ κατά την εισπνοή} \\ P &= 0 \text{ κατά την εκπνοή και για } \xi < 3000 \text{ κατά την εισπνοή} \end{aligned}$$

Οι παραπάνω μηχανισμοί θεωρούνται πως είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους ή δρουν παράλληλα και ανταγωνιστικά μεταξύ τους στα σωματίδια. Στην περίπτωση που k μηχανισμοί δρουν αυτόνομα το ολικό ποσοστό εναπόθεσης σε μια περιοχή i του ΑΑΣ δίνεται από την σχέση:

$$P_i = 1 - \prod_k (1 - P_{i,k}) \quad (\text{Εξ. 86})$$

Όταν οι k μηχανισμοί δρουν παράλληλα και ανταγωνιστικά στα σωματίδια το συνολικό ποσοστό εναπόθεσης δίνεται από την σχέση (ICRP, 1994):

$$P_i = \sqrt{\sum_k P_{i,k}^2} \quad (\text{Εξ. 87})$$

Ωστόσο μιας και ο όγκος του αέρα που διαρρέει τους αεραγωγούς δεν είναι σταθερός αλλά ελαττώνεται καθώς η θέση του απομακρύνεται από την τραχεία. Έτσι το πραγματικό ποσοστό εναπόθεσης σε κάθε περιοχή i του ΑΑΣ θα πρέπει να σταθμιστεί με τον όγκο αέρα που το διαρρέει καθώς και με το εισπνεύσιμο κλάσμα n_0 , δηλαδή την απόδοση του πρώτου φίλτρου πριν την είσοδο του αέρα στο ΑΑΣ καθώς και με την εναπόθεση στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα P_0 . Έτσι το συνολικό ποσοστό εναπόθεσης έως την περιοχή i των πνευμόνων, των σωματιδίων στα οποία εκτίθεται ένα άτομο δίνεται από τη σχέση:

$$P_{0-i} = 1 - n_0 \left(1 - \frac{P_0}{1 - \gamma_0} \right) \prod_{j=1}^i \left(1 - \frac{P_j}{1 - \gamma_j} \right) \quad (\text{Εξ. 88})$$

$$\gamma_j = \frac{V_j}{\int_0^{T_{in}} Q_j(t) dt} \quad (\text{Εξ. 89})$$

όπου V_j ο όγκος της περιοχής j του ΑΑΣ, Q_j η παροχή του αέρα στην περιοχή και $\gamma_0 = \frac{V_0}{V_T}$ (Εξ. 90).

4.3. Μεταφορά/απομάκρυνση ΑΣ στο ΑΑΣ

Ο καθαρισμός σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα αναφέρεται στη φυσική μεταφορά και απομάκρυνση τους από τις επιφάνειες του, όπου είχαν αρχικά αποθεθεί (Schlesinger, 1988). Πρόκειται για φυσικό μηχανισμό άμυνας του οργανισμού απέναντι σε ξένα σώματα που εισβάλλουν σε αυτόν (Gradon κ.α., 1996). Η γνώση του χρόνου παραμονής των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα μετά την πάροδο της έκθεσης είναι καθοριστική για την απόκριση του. Η απομάκρυνση των σωματιδίων από τις περιοχές που έχουν αποθεθεί γίνεται με τελικό προορισμό το γαστρεντερικό σύστημα, τους τοπικούς λεμφαδένες, το αίμα και ακολούθως όλο τον ανθρώπινο οργανισμό (π.χ. ICRP, 1994; Chang κ.α., 1991). Οι μηχανισμοί απομάκρυνσης των σωματιδίων εξαρτώνται από την περιοχή στην οποία έχουν αποθεθεί, τις φυσικοχημικές ιδιότητες τους (μέγεθος, υδροφιλία, λιποφιλία) και από την συγκέντρωση μάζας ή αριθμού των σωματιδίων που έχουν καθιζάνει στην επιφάνεια (ICRP, 1994; Tran κ.α, 1999α και 1999β; Schlesinger, 1988).

Οι μηχανισμοί καθαρισμού των σωματιδίων από το ΑΑΣ μπορούν να διακριθούν σε δυο κατηγοριοποιηθούν διεργασίες που δρουν ανταγωνιστικά (ICRP, 1994; US EPA, 2002):

- **Μεταφορά σωματιδίων**
Τα σωματίδια μεταφέρονται προς το γαστρεντερικό σύστημα και τους λεμφαδένες αλλά και από το ένα μέρος του αναπνευστικού συστήματος σε άλλο. Η μεταφορά πραγματοποιείται με το στρώμα βλέννας (ταχεία απομάκρυνση), τη λειτουργία των βλεφαρίδων και τη δράση των φαγοκυττάρων (αργή απομάκρυνση). Στην περιοχή εκτός θώρακα επιδρούν και άλλοι μηχανισμοί όπως ο βήχας (Chang κ.α., 1991).
- **Απορρόφηση στο αίμα**
Αναφέρεται στη μεταφορά των συστατικών των σωματιδίων ή και των ίδιων των σωματιδίων (πολύ μικρά) στο αίμα. Πραγματοποιείται σε δύο γενικά στάδια, την διάσπαση των σωματιδίων σε συστατικά και την ανάληψη τους-διάλυση στο αίμα (ICRP, 1994).

Ο τρόπος και ο ρυθμός καθαρισμού εξαρτάται από την αρχική τοποθεσία εναπόθεσης, τις φυσικοχημικές παραμέτρους του υλικού και την χρονική περίοδο από το τέλος της έκθεσης. Ειδικότερα οι μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα σε κάθε περιοχή του ΑΑΣ είναι:

Περιοχή εκτός θώρακα: Στο ανώτερο τμήμα του αναπνευστικού συστήματος και συγκεκριμένα την πρόσθια ρινική κοιλότητα τα αδιάλυτα σωματίδια καθαρίζονται με τη μεταφορά τους με τη βλέννα (US EPA, 2002). Το στρώμα της βλέννας κινείται με φορά τον ρινοφάρυγγα και στη συνέχεια το φάρυγγα απ' όπου και καταπίνεται προς το γαστρεντερικό σύστημα (Schlesinger, 1988). Θα πρέπει να σημειωθεί πως ως γαστρεντερικό σύστημα θεωρείται το σύστημα που αποτελείται από το στομάχι, το λεπτό έντερο (απορρόφηση σωματιδίων στο αίμα), το άνω και το κατώτερο τμήμα του παχύ εντέρου απ' όπου τα σωματίδια εξέρχονται στα κόπρανα (ICRP, 2002). Στις περιοχές που βρίσκονται μακριά από

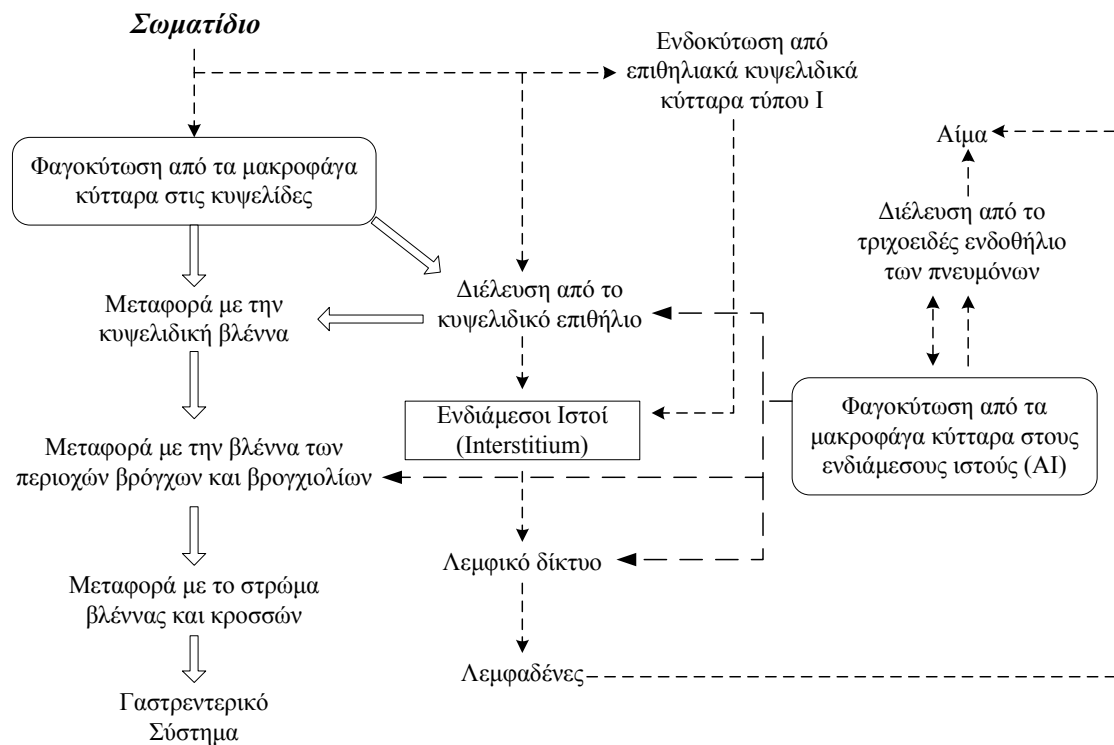
σημεία του επιθηλίου που έχουν βλεφαρίδες η ροή της βλέννας είναι αντίστροφη και κατευθύνει τα σωματίδια σε θέσεις όπου μπορούν πλέον να απομακρυνθούν με μηχανισμούς όπως το φτέρνισμα. Τα διαλυτά σωματίδια στην ρινική κοιλότητα διαχέονται στο επιθήλιο και αν η ροή της βλέννας είναι πιο αργή φθάνουν στα χαμηλότερα στρώματα του επιθηλίου απ' όπου απορροφώνται στο αίμα (Schlesinger, 1988). Στην στοματική κοιλότητα τα αδιάλυτα σωματίδια απομακρύνονται στο φάρυγγα και καταπίνονται ενώ τα διαλυτά απορροφώνται ταχέως στο αίμα (US EPA, 2002). Από την περιοχή τα σωματίδια μπορούν να απομακρυνθούν και με το βήχα ή απόπτυση. Τέλος στο λάρυγγα η ροή της βλέννας από την τραχεία κατευθύνεται στο φάρυγγα απ' όπου τα σωματίδια καταπίνονται (ICRP, 1994).

Τραχειοβρογχική περιοχή: Η περιοχή αυτή καλύπτεται από επιθήλιο που καλύπτεται από στρώμα βλέννας και αποτελεί το βασικό μέσο με το οποίο τα σωματίδια μεταφέρονται στον φάρυγγα και το γαστρεντερικό σύστημα (Schlesinger, 1988). Αυτό ισχύει για τα αδιάλυτα σωματίδια που μπορούν να απομακρυνθούν και με ενδοκύτωση¹ στα κύτταρα του επιθηλίου και από μακροφάγα κύτταρα ενώ τα διαλυτά μεταφέρονται στο αίμα (US EPA, 2002).

Περιοχή κυψελίδων: Στην περιοχή των κυψελίδων τα σωματίδια υπόκεινται σε απορροφητικούς και μη μηχανισμούς απομάκρυνσης. Αναλυτικά οι μηχανισμοί απομάκρυνσης των σωματιδίων δίνονται στην Εικόνα 5. Ο κύριος μηχανισμός απομάκρυνσης τους είναι η φαγοκυττάρωση από τα κυψελιδικά μακροφάγα κύτταρα και η μετακίνηση τους με αυτά στην περιοχή όπου αρχίζει το στρώμα της βλέννας που κινείται προς τον φάρυγγα, όπως δίνεται στο αριστερό τμήμα της Εικόνα 5.

Η μετακίνηση των μακροφάγων στην περιοχή που αρχίζει το στρώμα της βλέννας γίνεται είτε απευθείας είτε με μεταφορά στο επιθήλιο των κυψελίδων και μέσω αυτού στους ενδιάμεσους ιστούς όπου έρχονται σε επαφή με περιοχές που έχουν βλεφαρίδες και εντοπίζονται κυρίως κοντά σε λεμφαγγεία. Τα σωματίδια στους ενδιάμεσους ιστούς μπορούν να φαγοκυτταρωθούν και να μεταφερθούν στο αίμα με τα τριχοειδή αγγεία της περιοχής ή να μεταφερθούν στο λεμφικό σύστημα και τελικά πάλι στο αίμα. Τέλος ένα μέρος των σωματιδίων που αρχικά αποθέτεται στους ενδιάμεσους ιστούς μπορεί να μεταφερθεί στο κυψελιδικό επιθήλιο και να απομακρυνθεί με τη βλέννα, στο λεμφικό σύστημα και να απομακρυνθεί στο αίμα ή να φαγοκυτταρωθεί και να απορροφηθεί μαζί με τα μακροφάγα κύτταρα στο αίμα (US EPA, 2002). Τα αδιάλυτα σωματίδια που δεν έχουν φαγοκυτταρωθεί από μακροφάγα κύτταρα μπορούν και να ενδοκυτωθούν στο επιθήλιο ακολουθώντας στη συνέχεια την πορεία που προαναφέρθηκε. Τέλος τα διαλυτά σωματίδια διαχέονται στα υγρά των κυψελιδικών αεραγωγών και απορροφώνται τελικά στο αίμα.

¹ Πρόσληψη συστατικού εντός του κυττάρου με εισβολή στην πλασματική μεμβράνη και εσωτερίκευση του σε ενδοκυτταρική κύστη (Hertel κ.α., 2001).



Εικόνα 5 Διάγραμμα πιθανών τρόπων καθαρισμού των σωματιδίων από την περιοχή των κυψελίδων για αδιάλυτα σωματίδια. Αριστερά φαίνεται η ανέλκυση σωματιδίων από το στρώμα βλέννας προς τον φάρυγγα απ' όπου καταλήγουν στο γαστρεντερικό σύστημα (Schlesinger, 1988; US EPA, 2002).

Τα σωματίδια που παραμένουν για αρκετό διάστημα στους αεραγωγούς του αναπνευστικού συστήματος μπορεί να βυθιστούν στο στρώμα της βλέννας και να μεταφερθούν σε μεγαλύτερο βάθος στο επιθήλιο. Εκεί μεταφέρονται πλέον με τις βλεφαρίδες. Ωστόσο υπάρχει περίπτωση να φτάσουν στα τοιχώματα των αεραγωγών (μεμβράνη βάσης) απ' όπου απομακρύνονται με ιδιαίτερα αργό ρυθμό (ICRP, 1994; Gehr κ.α., 2000).

Το μέγεθος και το σχήμα των σωματιδίων σχετίζεται κυρίως με τις θέσεις που θα αποτεθούν αρχικά και την ποσότητα τους σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού οπότε επηρεάζει εμμέσως τον καθαρισμό τους (Tran κ.α., 1999b). Ο ρυθμός απορρόφησης των σωματιδίων στο αίμα και ο ρυθμός διήθησης τους στις επιφάνειες του αναπνευστικού είναι αντιστρόφως ανάλογος του μεγέθους των σωματιδίων και εξαρτάται από την επιφάνεια τους και τις φυσικοχημικές ιδιότητες τους. Έτσι, τα μικρότερα σωματίδια εισχωρούν ευκολότερα στο ταχέως κινούμενο στρώμα της βλέννας και καταλήγουν τελικά στο υποκείμενο της βλέννας στρώμα που κινείται με αργότερο ρυθμό. Σε περίπτωση ωστόσο ασυνέχειας στο στρώμα της βλέννας τα μικρά σωματίδια μεταφέρονται στην περιοχή όπου κινούνται με τις βλεφαρίδες ενώ τα μεγάλα συσσωρεύονται στα σημεία ασυνέχειας (Asgharian, Hofmann και Miller, 2001).

Η μάζα μικρών σωματιδίων που βρίσκεται στο αναπνευστικό στο τέλος της περιόδου είναι σημαντική για τα περισσότερα τμήματα του αναπνευστικού συστήματος σε αντίθεση με τα

μεγάλα που με αρχικό σταθμό την επιφάνεια της εκτός θώρακα περιοχής μεταφέρονται στο γαστρεντερικό σύστημα. Η συσσωρευμένη μάζα παρουσιάζει ελάχιστο για σωματίδια διαμέτρου συσσωματώματος. Αυτό οφείλεται στο ρυθμό απομάκρυνσης τους αλλά στον μικρό ρυθμό δόσης τους (Martonen κ.α., 2005). Τα σωματίδια αυτού του μεγέθους παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά με τους πυρήνες σε όλο το ΑΑΣ εκτός από το γρήγορο στρώμα της βλέννας στην περιοχή των βρογχιολίων και στο στρώμα υπό του επιθηλίου. Σε αυτά τα τμήματα το μέγεθος των σωματιδίων φαίνεται πως επηρεάζει την απομάκρυνση περισσότερο απ' ότι στα υπόλοιπα τμήματα του αναπνευστικού.

Ένας ακόμα παράγοντας διαφοροποίησης του ρυθμού καθαρισμού έχει βρεθεί πως αποτελεί η διάρκεια έκθεσης (Gradon κ.α., 1996). Στην εκτός θώρακα περιοχή, το ταχύ στρώμα βλέννας στους βρόγχους και τα βρογχιόλια, τους λεμφαδένες που αποστραγγίζουν την ΕΤ περιοχή και το γαστρεντερικό σύστημα ο καθαρισμός εξαρτάται από τη διάρκεια της έκθεσης. Μεγαλύτερος ρυθμός απομάκρυνσης παρατηρείται στην περίπτωση υψηλότερης διάρκειας έκθεσης που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη δόση προς το γαστρεντερικό σύστημα και τους λεμφαδένες. Η επίδραση της διάρκειας έκθεσης στο ρυθμό καθαρισμού των σωματιδίων σχετίζεται με την δόση που έχει λάβει ο οργανισμός στο τέλος της περιόδου έκθεσης. Η απομάκρυνση ακόμα εξαρτάται από την πυκνότητα, την επιφανειακή σύσταση και από την διαλυτότητα των σωματιδίων ειδικά για την ΑΙ περιοχή καθώς η βασική μη απορροφητική διεργασία καθαρισμού είναι η απομάκρυνση από μακροφάγους (US EPA, 2002).

Οι βιολογικοί παράγοντες τροποποίησης του ρυθμού καθαρισμού διακρίνονται σε παροδικούς (π.χ. άσκηση) που επιδρούν κυρίως κατά την διάρκεια της έκθεσης και σχετίζονται με στιγμιαία έκθεση και σε μόνιμους όπως το φύλο και οι χρόνιες ασθένειες που σχετίζονται με χρόνια έκθεση. Το φύλο και η ηλικία του ατόμου επηρεάζουν τον καθαρισμό σωματιδίων έμμεσα επιδρώντας στην εναπόθεση τους, δηλαδή της αρχικές θέσεις τους στο αναπνευστικό σύστημα, αλλά και στο ρυθμό με τον οποίο πάλλονται οι κροσσοί των κυττάρων του επιθηλίου. Έχει βρεθεί πως ο ρυθμός αυτός αρχίζει να ελαττώνεται μετά την ηλικία των 20 ετών και σημαντικά μετά τα 40 έτη (Martonen κ.α., 2005). Όσον αφορά στη δραστηριότητα έχει βρεθεί πως αναπνέοντας με μεγάλο όγκο ροής ο ρυθμός καθαρισμού από την ΑΙ περιοχή αυξάνεται (US EPA, 2002). Ωστόσο, ο κύριος βιολογικός παράγοντας διαφοροποίησης του ρυθμού καθαρισμού είναι οι ασθένειες του αναπνευστικού συστήματος. Έτσι σε άτομα με χρόνια ιγμορίτιδα, ρινίτιδα ή κυστική ινωμάτωση ο ρυθμός καθαρισμού μέσω της ρινικής βλέννας είναι πιο αργός σε σχέση με υγιή άτομα όπως και αυτός μέσω της βρογχικής βλέννας για άτομα με βρογχικό καρκίνωμα, χρόνια βρογχίτιδα, άσθμα και διάφορες μολύνσεις του αναπνευστικού. Ο βήχας βέβαια για άτομα με παθήσεις του αναπνευστικού είναι ένας μηχανισμός καθαρισμού της ΤΒ περιοχής αλλά συχνά προκαλεί ερεθισμό. Ακόμα σε άτομα με χρόνια βρογχίτιδα αν και βρέθηκε πως ο καθαρισμός είναι υψηλότερος σε σχέση με υγιή άτομα μετά από 72 ώρες από την έκθεση αυτό σχετίζεται με την διαφοροποίηση στην εναπόθεση λόγω της έμφραξης τμημάτων του αναπνευστικού και όχι στο βήχα που σε

κάποιες περιπτώσεις μπορεί να δυσχεραίνει την κατάσταση (US EPA, 2002). Επιπλέον λόγος διαφοροποίησης είναι η ακεραιότητα του επιθηλίου των πνευμόνων που εξαρτάται από τις ασθένειες ή τον ερεθισμό λόγω εισπνοής ρύπων και φαρμακευτικών ουσιών και επηρεάζει τον ρυθμό μετεγκατάστασης των σωματιδίων (αυξάνεται αν υπάρχει βλάβη του επιθηλίου) (ICRP, 1994).

Τέλος, όσον αφορά στη διαφοροποίηση του καθαρισμού σωματιδίων ανάλογα με το είδος του οργανισμού, έχει βρεθεί πως η συσσώρευση σωματιδίων μεταξύ ανθρώπων και ποντικών αν εκφραστεί ως πλήθος σωματιδίων συναρτήσει της διαμέτρου του αεραγωγού παρουσιάζει την ίδια μορφή (Hofmann και Asgharian, 2003). Τα ποντίκια είναι το πιο σύνθητες πειραματόζωο σε τοξικολογικές μελέτες *in vivo*, με συμπεράσματα που ανάγονται συχνά στον ανθρώπινο οργανισμό (Gradon κ.α., 1996).

4.3.1. Υπολογισμός της απομάκρυνσης σωματιδίων από το ΑΑΣ

Ο καθαρισμός μιας περιοχής του αναπνευστικού από το υλικό που έχει εναποτεθεί δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{dR_i(t)}{dt} = -\lambda_i(t)R_i(t) \quad (\text{Εξ. 91})$$

όπου $\lambda_i(t)$ είναι ο στιγμιαίος ρυθμός καθαρισμού του υλικού από μια περιοχή i και $R_i(t)$ είναι η ποσότητα του υλικού στην περιοχή μετά από χρόνο t από την έκθεση.

Ο καθαρισμός των σωματιδίων εξαρτάται από το αρχικό σημείο απόθεσης αλλά και τις διαδρομές που θα ακολουθήσουν. Έτσι είναι σκόπιμο κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος να διακριθεί σε τμήματα που παρουσιάζουν παρόμοιο ρυθμό καθαρισμού (ICRP, 1994; Sturm και Hofmann, 2003α και 2003β; Tran κ.α., 1999α). Για την προσομοίωση της χρονικής μεταβολής του ρυθμού καθαρισμού, κάθε περιοχή διακρίνεται σε τμήματα απ' όπου τα σωματίδια απομακρύνονται με σταθερό ρυθμό. Ο διαχωρισμός που ακολουθεί βασίζεται στο μοντέλο HRTM της ICRP αλλά χρησιμοποιείται και από άλλα μοντέλα. Η περιοχή εκτός θώρακα διακρίνεται σε (α) το στρώμα βλέννας που καλύπτει το επιθήλιο (υγρά του αεραγωγού - sur) με βάθος 15μm (β) τα τοιχώματα του αεραγωγού όπου σωματίδια παραμένουν δεσμευμένα (seq) στους μακροφάγους, πρόκειται για το στρώμα υπό του επιθηλίου, πάχους 10μm (γ) το επιθήλιο του αεραγωγού όπου σωματίδια μπορεί να έχουν δεσμευτεί λόγω χημικών δεσμών (b). Η τραχειοβρογχική περιοχή διακρίνεται σε παρόμοια στρώματα που συμβολικά δίνονται ως seq και b τόσο στους βρόγχους όσο και στα βρογχιόλια και τα στρώματα gel και sol (ICRP, 1994). Το στρώμα gel είναι το στρώμα βλέννας που επικαλύπτει τις βλεφαρίδες του επιθηλίου ενώ το sol εκεί όπου οι βλεφαρίδες βυθίζονται στην αναπνευστική βλέννα, δηλαδή κάτω από το στρώμα gel. Το πάχος τους είναι 5 μm και 2 μm για το gel και 6 μm και 4μm για το sol, στους βρόγχους και τα βρογχιόλια αντίστοιχα. Τέλος η

περιοχή των κυψελίδων και των λέμφων θεωρούνται ενιαίες αφού τα τοιχώματα είναι τόσο λεπτά ώστε να μην επιτρέπουν ένα διαχωρισμό σε στρώματα ομογενούς συγκέντρωσης σωματιδίων. Τα στρώματα gel και sur καθαρίζουν επιφανειακά τους αεραγωγούς με ταχύ ρυθμό ενώ το sol έχει πιο μικρό ρυθμό καθαρισμού. Από τα τοιχώματα των αεραγωγών (seq) τα σωματίδια απομακρύνονται κυρίως πολύ αργά ενώ στο επιθήλιο συχνά θεωρείται πως δεν δεσμεύονται σωματίδια (ICRP, 1994). Στο μοντέλο των Sturm και Hofmann (2005) οι περιοχές των βρόγχων και βρογχιολίων διακρίνονται στο στρώμα gel της βλέννας και το στρώμα sol, στο επιθήλιο, τα μακροφάγα κύτταρα και τους τοπικούς λεμφαδένες.

Το πρώτο βήμα για τον υπολογισμό της συγκράτησης σωματιδίων είναι ο διαχωρισμός της εναποτιθέμενης ποσότητας τους στα τμήματα του αναπνευστικού που αναφέρθηκαν παραπάνω. Στο μοντέλο της ICRP το ποσοστό των σωματιδίων που καθιζάνει ανά τμήμα της αναπνευστικής οδού δίνεται στον Πίνακα 11.

Πίνακας 11: Κατανομή της εναπόθεσης μεταξύ τμημάτων κάθε περιοχής της αναπνευστικής οδού (ICRP, 1994).

Περιοχή εναπόθεσης	Τμήμα	Ποσοστό σωματιδίων που καθιζάνουν ανά τμήμα
ET ₂	ET _{2,sur} : Επιφανειακό στρώμα	0,9995
	ET _{seq} : Τοιχώματα αγωγών	0,0005
BB	BB ₁ : Ταχέως κινούμενο στρώμα βλέννας	0,993- f_s
	BB ₂ : Αργά κινούμενο στρώμα βλέννας	f_s
	BB _{seq} : Τοιχώματα αγωγών	0,007
bb	bb ₁ : Ταχέως κινούμενο στρώμα βλέννας	0,993- f_s
	bb ₂ : Αργά κινούμενο στρώμα βλέννας	f_s
	bb _{seq} : Τοιχώματα αγωγών	0,007
Al	Al ₁ : Κυψελίδες	0,3
	Al ₂ : Κυψελίδες	0,6
	Al ₃ : Κυψελίδες	0,1

Για την περιοχή των βρόγχων και των βρογχιολίων το κλάσμα f_s των ΑΣ που απομακρύνεται με αργό ρυθμό υπολογίζεται συναρτήσει της διαμέτρου των σωματιδίων με βάσει την εξίσωση (ICRP, 1994):

$$f_s = \begin{cases} 0,5 & \text{για } d_{ae} \leq 2,5\sqrt{\rho_p/\chi} \text{ } \mu\text{m} \\ 0,5\exp(-0,63(d_{ae}\sqrt{\chi/\rho_p} - 2,5)) & \text{για } d_{ae} > 2,5\sqrt{\rho_p/\chi} \text{ } \mu\text{m} \end{cases} \quad (\text{Εξ. 92})$$

όπου ρ_p η πυκνότητα των σωματιδίων, d_{ae} η αεροδυναμική τους διάμετρο και χ ο συντελεστής σχήματος (περιγράφεται στην ενότητα 4.4.).

Ωστόσο έχει βρεθεί πως τα παραπάνω ποσοστά δεν εξαρτώνται μόνο από την αεροδυναμική διάμετρο των σωματιδίων αλλά και από τη φυσική διάμετρο, την πυκνότητα των σωματιδίων, το εκτεθειμένο άτομο κ.λ.π. (Falk κ.α., 1999; Philison κ.α., 2000; Smith κ.α., 2007). Μια άλλη έκφραση για τον υπολογισμό των ποσοστών f_s είναι αυτή των Huston (1995):

$$f_s = \begin{cases} 0,58 & \text{για } d_e \leq 2,5 \text{ } \mu\text{m} \\ 0,58\exp(-0,76(d_e - 2,5)) & \text{για } d_e > 2,5 \text{ } \mu\text{m} \end{cases} \quad (\text{Εξ. 93})$$

Ενώ στο μοντέλο των Sturm και Hofmann (2003α και 2003β) το κλάσμα των σωματιδίων που απομακρύνεται αργά από μια γενιά i στην περιοχή των βρόγχων και βρογχιολίων δίνεται για σωματίδια με διάμετρο $d_e < 7 \mu\text{m}$ από τη σχέση:

$$f_s(i, d_e) = (a_1 i^4 - a_2 i^3 + a_3 i^2 - a_4 i) - k_i d_e = f_{st}(i, d_e) + f_{sr}(i, d_e) + f_{sm}(i, d_e) \quad (\text{Εξ. 94})$$

όπου f_{st} το κλάσμα των σωματιδίων που συσσωρεύονται στην επιφάνεια του επιθηλίου, f_{sr} το κλάσμα των σωματιδίων που επιστρέφουν στο στρώμα gel μετά από κάποιο χρονικό διάστημα και, f_{sm} το κλάσμα των σωματιδίων που δεσμεύονται από μακροφάγα κύτταρα. Οι τιμές των συντελεστών δίνονται υπό τη μορφή διαγραμμάτων για κάθε γενιά και διάμετρο σωματιδίων στο άρθρο Sturm και Hofmann (2003).

Για υπέρλεπτα σωματίδια με διαμέτρους από 1 ως 100 nm έχει προταθεί η σχέση (Hofmann κ.α., 2003β):

$$f_s = 0,77 - 0,12d_e \quad (\text{Εξ. 95})$$

Το ακριβές χρονικό διάστημα στο οποίο λαμβάνει χώρα ο καθαρισμός επηρεάζει την συνολική δόση στο αναπνευστικό σύστημα αλλά και αυτή που φθάνει στα υπόλοιπα όργανα. Στην ΕΤ περιοχή τα σωματίδια που καθιζάνουν στην πρόσθια ρινική περιοχή απομακρύνονται πολύ αργά με τη βλέννα (περίπου 2mm/h) και πιο αποτελεσματικά με το φτέρνισμα και το φύσημα της μύτης (Schlesinger, 1988). Ο χρόνος που απαιτείται ώστε ελαφρά διαλυτά σωματίδια να μεταφερθούν από το πρόσθιο στο μεταγενέστερο τμήμα είναι 10-20 λεπτά (US EPA, 2002). Για την περιοχή αυτή το μοντέλο της ICRP προτείνει ρυθμούς απομάκρυνσης ίσους με 100/ημέρα για τη μεταφορά των σωματιδίων από την πρόσθια ρινική κοιλότητα στο περιβάλλον με εξωτερικά μέσα, 100/d για ην απομάκρυνση από την περιοχή ET_2 με κατάποση και μεταφορά στο γαστρεντερικό σύστημα, και 0,001/d για μεταφορά από το επιθήλιο της περιοχής ET_2 στους τοπικούς λεμφαδένες. Δηλαδή περίπου το 58% των εναποτιθέμενων σωματιδίων απομακρύνονται γρήγορα στην περιοχή ET_2 ενώ το υπόλοιπο απομακρύνεται μόνο με εξωτερικά μέσα από την ET_1 . Βρέθηκε ωστόσο πως ένα μεγάλο μέρος των σωματιδίων (~60%) που καθιζάνουν στην περιοχή ET_1 απομακρύνονται μέσω της περιοχής ET_2 στο γαστρεντερικό σύστημα. Έτσι μια προσέγγιση που έχει προταθεί για την αντιμετώπιση αυτού του θέματος είναι αυτή των Etherington κ.α (1998). Η περιοχή ET_1 διακρίνεται στις περιοχές ET_{1A} και ET_{1B} , και η ET_2 στις περιοχές ET_{2A} και ET_{2B} από τις οποίες τα σωματίδια απομακρύνονται με γρήγορο (A) και αργό ρυθμό (B), αντίστοιχα. Οι τιμές για τα κλάσματα εναπόθεσης είναι 0,35, 0,34, 0,22 και 0,9 και για τους ρυθμούς απομάκρυνσης 3,88/d, 0,833/d, 143/d και ∞ . Τα αποτελέσματα στηρίζονται σε περιορισμένες μετρήσεις 9 ατόμων που αναπαύονταν ή εκτελούσαν ήπιες εργασίες για πέντε ημέρες σε αδιάλυτα σωματίδια με διάμετρο 3 μm .

Για τον υπολογισμό του καθαρισμού των σωματιδίων από την τραχειοβρογχική περιοχή των πνευμόνων μέσω της βλέννας και των κροσσών (mucociliary escalator) απαιτείται αρχικά η γνώση της ταχύτητας κίνησης του στρώματος της βλέννας. Αυτή υπολογίζεται για το μορφομετρικό μοντέλο του αναπνευστικού που χρησιμοποιείται στο κάθε μοντέλο καθαρισμού λαμβάνοντας υπόψη κάποιες από τις παραδοχές: (α) το πάχος του στρώματος είναι ίδιο μεταξύ πρόγονου και απόγονων κλάδων, (β) η παραγωγή βλέννας είναι ίση σε όλα τα τελικά βρογχιόλια, (γ) η παραγωγή και απορρόφηση της βλέννας από τους υπόλοιπους αεραγωγούς είναι μηδενική, (δ) η ταχύτητα της βλέννας είναι σταθερή σε κάθε αεραγωγό, και (ε) το πάχος του στρώματος της είναι πολύ μικρότερο από την διάμετρο του αγωγού. Ο Lee κ.α (1979) λαμβάνοντας την παραδοχή για το σταθερό πάχος του στρώματος βλέννας υπολόγισαν την ταχύτητα της βλέννας ανά γενιά z στο συμμετρικό μοντέλο Weibel A με την σχέση:

$$u_z = \frac{u_0 d_0}{2^z d_z} \quad (\text{Εξ. 96})$$

όπου u_0 η ταχύτητα της βλέννας στην τραχεία που είναι ίση με 5,5 mm/min, και d_0 και d_z οι διαμέτροι της τραχείας και των αεραγωγών της γενιάς z , αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 12. Ανάλογες προσπάθειες έγιναν από τους Yeates κ.α. (1982), Yu κ.α. (1981), Cuddihy και Yeh (1988). Πρόσφατα έγιναν προσπάθειες υπολογισμού της ταχύτητας της βλέννας σε διαφορετικές γεωμετρίες (π.χ. τρισδιάστατη απεικόνιση σε διακλάδωση μεταξύ των γενεών 3 και 4; Balazhazy κ.α., 2003) και μορφομετρικά μοντέλα (π.χ. Asgharian κ.α.

2001; επίλυση με διατήρηση του όγκου της βλέννας $u_z = u_0 d_0 / \sum_{i=1}^N d_z$ (Εξ. 97).

Αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 12 και όπως φαίνεται η ταχύτητα ροής της βλέννας ελαττώνεται από την τραχεία προς τα επόμενα τμήματα του αναπνευστικού συστήματος.

Γενικά ο ρυθμός καθαρισμού στην τραχειοβρογχική περιοχή του αναπνευστικού συστήματος είναι γρήγορος αλλά έχει βρεθεί πως κάποια αδιάλυτα σωματίδια παραμένουν για διάστημα μεγαλύτερο των 24 ωρών (US EPA, 2002). Έτσι η απομάκρυνση των σωματιδίων από αυτή την περιοχή διαθέτει μια γρήγορη και μια αργή συνιστώσα που σχετίζεται με σωματίδια που καθιζάνουν σε βρόγχους διαμέτρου μικρότερης του 1 mm και στις διακλαδώσεις τους όπου το στρώμα βλέννας παρουσιάζει συχνά ασυνέχεια (Schlesinger, 1988) καθώς και με σωματίδια που βυθίζονται στο πνευμονικό επιθήλιο και μεταφέρονται στους λεμφαδένες. Στο μοντέλο της HRTM της ICRP η διαδικασία αυτή προσομοιώνεται με το στρώμα sol και seq (οι ρυθμοί μεταφοράς κυμαίνονται από 0,01/d έως 0,03/d) και στο μοντέλο των Sturm και Hofmann (2005) με τα τμήματα sol, επιθήλιο και μακροφάγα κύτταρα (οι ρυθμοί μεταφοράς εξαρτώνται από τη διάμετρο των σωματιδίων και οι τιμές τους ποικίλλουν).

Όσον αφορά στην AI περιοχή υπάρχουν πολύ λίγα στοιχεία για το ρυθμό καθαρισμού της σε ανθρώπους αλλά είναι γνωστό ότι τα σωματίδια παραμένουν για μεγαλύτερο διάστημα σε αυτή από ότι σε τμήματα του αναπνευστικού που καθαρίζονται άμεσα με μεταφορά με τη

βλέννα (US EPA, 2002). Γενικά ο καθαρισμός της περιοχής περιγράφεται ως μια πολυφασική διαδικασία, όπου κάθε φάση αντιπροσωπεύει ένα διαφορετικό μηχανισμό καθαρισμού, με υψηλούς χρόνους παραμονής μετά την έκθεση. Ο καθαρισμός της περιοχής μέσω της βλέννας εξαρτάται από το αρχικό σημείο εναπόθεσης και το μέγεθος των σωματιδίων. Η πρόσληψη των σωματιδίων από τους μακροφάγους είναι ταχεία εκτός και αν είναι κυτοτοξικά όπως τα σωματίδια χαλαζία και αμιάντου (Schlesinger, 1988). Σε αυτή την περίπτωση δημιουργείται φλεγμονή στα κύτταρα του επιθηλίου και τους μακροφάγους κάτι που επιδρά στο ρυθμό μετακίνησης τους (Donaldson κ.α, 2000) αλλά και στον θάνατο τους με συνέπεια την απελευθέρωση των σωματιδίων που είχαν ήδη προσλάβει (Tran κ.α., 1999b). Ακόμα όσο αυξάνεται το φορτίο στην περιοχή και στα μακροφάγα κύτταρα επέρχεται κορεσμός τόσο περισσότερα σωματίδια είναι ελεύθερα να διεισδύσουν σε μεγαλύτερο βάθος στο επιθήλιο και να ακολουθήσουν κυρίως πορείες με μικρότερο ρυθμό καθαρισμού αλλά και να προκαλέσουν φλεγμονή (Schlesinger, 1988). Η φόρτωση των μακροφάγων με σωματίδια ελαττώνει το ρυθμό μεταφοράς τους ενώ η υπερφόρτωση οδηγεί στο θάνατο τους με τις συνέπειες που αναφέρθηκαν πριν (Tran κ.α., 1999α). Η μετεγκατάσταση των σωματιδίων στις λέμφους είναι ιδιαίτερα αργή και ο καθαρισμός τους από αυτές ακόμα πιο αργός με χρόνους ημίσειας ζωής δεκάδων ετών (ICRP, 1994).

Πίνακας 12 Ταχύτητα κίνησης του στρώματος βλέννας στην τραχειοβρογχική περιοχή του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος και αντίστοιχοι χρόνοι υποδιπλασιασμού (Asgarian κ.α., 2001; Lee κ.α., 1979).

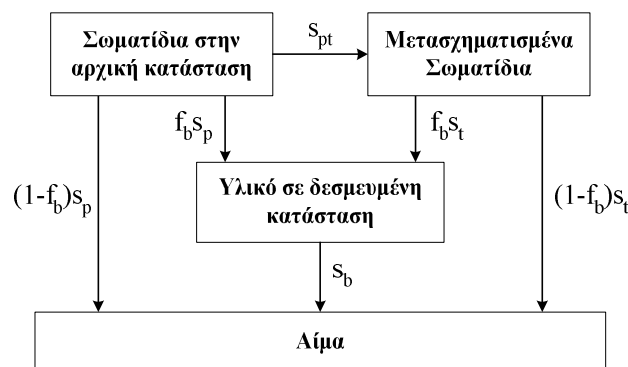
Γενιά	Ταχύτητα βλέννας (mm/min)			Χρόνος υποδιπλασιασμού (min)
	Τυπικής διαδρομής (Yeh, Schum, & Duggan, 1979)	Συμμετρικό (Yeh, Schum, & Duggan, 1979)	Weibel A (1963)	
0	5,5	5,5	5,5	15,1
1	3,24	3,55	4,1	8,1
2	2,45	2,36	3,0	4,4
3	1,67	1,71	2,2	2,4
4	1,06	1,08	1,4	6,4
5	0,602	0,649	0,88	8,4
6	0,397	0,391	0,55	11,3
7	0,232	0,242	0,34	15,7
8	0,134	0,148	0,21	21,3
9	0,084	0,0848	0,13	29,7
10	0,0545	0,0502	0,074	42,8
11	0,0346	0,0332	0,044	60,8
12	0,0229	0,0226	0,025	97,6
13	0,0147	0,0151	0,015	126,9
14	0,00924	0,00978	0,0082	195,2
15	0,00562	0,00368	0,0046	302,6
16	0,00312	0,00136		

Στο μοντέλο HRTM της ICRP η απομάκρυνση από την κυψελιδική περιοχή ακολουθεί εκθετική μείωση και διακρίνεται σε 3 στάδια ρυθμού, το γρήγορο με μετακίνηση με τους μακροφάγους στη βλέννα, το μέσης ταχύτητας με μεταφορά των μακροφάγων μέσω των ενδιάμεσων ιστών και τέλος την αργή απομάκρυνση με διάλυση (Schlesinger, 1988). Επιπλέον, έχουν αναπτυχθεί μοντέλα για την απομάκρυνση των σωματιδίων ειδικά από την περιοχή αυτή του ΑΑΣ (π.χ. Hsieh και Yu, 1998; Koch, 2001). Για παράδειγμα στο μοντέλο των Hsieh και Yu (1998) η εσωτερική δόση/κατακράτηση για σχεδόν αδιάλυτα μη τοξικά σωματίδια περιγράφεται με 2 εκθετικά με την εμπειρική εξίσωση:

$$R(t) = R_0 \exp(-\lambda t) = R_0 P_1 \exp(-\lambda_1 t) + R_0 P_2 \exp(-\lambda_2 t) \quad (\text{Εξ. 98})$$

όπου R_0 τα σωματίδια που βρίσκονται αρχικά στην περιοχή (lung burden), και P_1 , P_2 και λ_1 , λ_2 τα ποσοστά και οι ρυθμοί απομάκρυνσης για τα σωματίδια που καθαρίζονται με γρήγορο και αργό ρυθμό, αντίστοιχα. Οι τιμές για τους ρυθμούς απομάκρυνσης είναι $\lambda_1=0,0273/d$ (Εξ. 99) και $\lambda_2=0,0014 \exp(-0,14R_0)$ (Εξ. 100) για τις τιμές R_0 των μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή της εξίσωσης. Η απορρόφηση στο αίμα θεωρείται μηδενική.

Όσον αφορά στην απομάκρυνση με ανάληψη στο αίμα, γενικά πραγματοποιείται σε δύο στάδια, την διάσπαση των σωματιδίων σε συστατικά και την ανάληψη τους-διάλυση στο αίμα (ICRP, 1994). Η κινητική της απορρόφησης στο μοντέλο της ICRP δίνεται στο παρακάτω σχήμα και τυπικές τιμές για σωματίδια που απορροφώνται με αργό, γρήγορο και μέσο ρυθμό στο αίμα δίνονται στον Πίνακα 13.



Εικόνα 6 Μοντέλο που αναπαριστά τον χρονικά μεταβαλλόμενο ρυθμό απορρόφησης των σωματιδίων στο αίμα (ICRP, 1994).

Οι σχέσεις που συνδέουν τους διάφορους ρυθμούς είναι $s_p = s_s + f_r (s_r - s_s)$ (Εξ. 101),

$s_{pt} = (1 - f_r) (s_r - s_s)$ (Εξ. 102), και $s_t = s_s$. Από τους Bailey κ.α. (2003) προτείνεται η χρήση

των τιμών 0,2 και 0,01 για το κλάσμα f_r , και των τιμών $0,003$ και $8 \times 10^{-5} d^{-1}$ για τον ρυθμό s_s των σωματιδίων κλάσης M και S, αντίστοιχα. Για τον ρυθμό s_{rs} προτείνονται οι τιμές 15, 1, και $3 d^{-1}$ για σωματίδια κλάσης F, M, και S, αντίστοιχα.

Πίνακας 13: Τυπικοί παράμετροι απορρόφησης για σωματίδια τύπου F (Fast), M (Moderate) και S (Slow) (ICRP, 1994).

Ταξινόμηση κατά ICRP 30:	D (ημέρες)	W (εβδομάδες)	Y (χρόνια)
<i>Τύπος συμπεριφοράς υλικού σε απορρόφηση:</i>	<i>F (ταχεία)</i>	<i>M (μέτριας ταχύτητας)</i>	<i>S (αργή)</i>
Κλάσμα υλικού που διαλύεται γρήγορα, f_f	1	0,1	0,001
Ρυθμός διάλυσης, κατά προσέγγιση:			
Γρήγορα (d^{-1}), s_f	100	100	100
Αργά (d^{-1}), s_s	-	0,005	0,0001
Παράμετροι του μοντέλου			
Αρχικός ρυθμός διάλυσης (d^{-1}), s_p	100	10	0,1
Ρυθμός μετατροπής (d^{-1}), s_{pt}	0	90	100
Τελικός ρυθμός διάλυσης (d^{-1}), s_t	-	0,005	0,0001
Κλάσμα υλικού που παραμένει δεσμευμένο, f_b	0	0	0
Ρυθμός λήψης υλικού από την δεσμευμένη κατάσταση (d^{-1}), s_b	-	-	-

4.4. Το μοντέλο υπολογισμού εφαρμοσμένης και εσωτερικής δόσης αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα ExDoM

Το μοντέλο ExDoM αναπτύχθηκε για τον καθορισμό της εισπνεόμενης και εφαρμοσμένης δόσης σωματιδίων στο ΑΑΣ και της συσσώρευσης/κατακράτησης τους σε αυτό μετά από συγκεκριμένο χρόνο. Η εναπόθεση σωματιδίων στο ΑΑΣ υπολογίζεται με τη βοήθεια των ημιεμπειρικών εξισώσεων που προτείνονται στο μοντέλο του αναπνευστικού συστήματος (HRTM) της διεθνής υπηρεσίας ακτινοπροστασίας (ICRP). Έτσι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για έκθεση σε ινώδη σωματίδια ή σε χαλαζία (ICRP, 1994). Μπορεί να εφαρμοστεί για σωματίδια μονοδιάσπορα και πολυδιάσπορα με τιμές μέσης ισοδύναμης αεροδυναμικής διαμέτρου μάζας που κυμαίνονται από 0,001 μm έως 100 μm . Η εναπόθεση υπολογίζεται βάσει του μεγέθους με το οποίο τα σωματίδια εισέρχονται στο ΑΑΣ.

Η μορφολογία του αναπνευστικού συστήματος εισάγεται έμμεσα στο μοντέλο. Χρησιμοποιούνται μέσες τιμές των μορφομετρικών μοντέλων των Weibel (1963), Yeh και Schum (1980), και Phalen κ.α. (1985) για την τραχειοβρογχική περιοχή και τιμές από το μοντέλο των Hansen και Amraya (1975) για την κυψελιδική περιοχή σταθμισμένες για τιμή υπόλοιπης λειτουργικής χωρητικότητας ίσης με $3,3 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ σύμφωνα με τους Yu και Diu (1982) όπως και στο μοντέλο της ICRP (1994). Κάθε τμήμα της αναπνευστικής οδού θεωρείται ως κυλινδρικός αγωγός κατάλληλου διαμετρήματος και πάχους τοιχωμάτων. Το ΑΑΣ διακρίνεται σε 5 περιοχές που αναφέρθηκαν νωρίτερα, ET_1 (πρόσθια ρινική κοιλότητα),

ET₂ (ύστερη ρινική κοιλότητα, λάρυγγας, φάρυγγας και στόμα), BB (τραχεία και κύριοι βρόγχοι), bb (βρογχιόλια) και AI (κυψελίδες).

Η παράμετροι φυσιολογίας του εκτεθειμένου ατόμου που καθορίζονται από τη δραστηριότητα του και είναι ίσες με τις τυπικές τιμές του Πίνακα 10 για τα πρότυπα άτομα που δίνονται σε αυτόν. Τα χαρακτηριστικά των πρότυπων ατόμων δίνονται στον Πίνακα 14. Για διαφορετική δραστηριότητα οι παράμετροι V (ογκομετρική παροχή αέρα; mL/s) και V_T (όγκος που λαμβάνεται ανά εισπνοή; mL) υπολογίζονται από τον ρυθμό εισπνοής B (m³/h) και τη συχνότητα εισπνοών f (min⁻¹) με τις σχέσεις:

$$V_T = 10^6 \frac{B}{60f} \quad (\text{Εξ. 103}) \quad \text{και} \quad V = 2V_T \frac{f}{60} \quad (\text{Εξ. 104})$$

Πίνακας 14: Χαρακτηριστικά πρότυπων ατόμων (ICRP, 1994).

Παράμετρος	Εκτεθειμένο Άτομο							
	Αρσενικό		Θηλυκό		Παιδιά < 10ετών ανεξαρτήτως φύλου			
Ηλικία (έτη)	30	15	30	15	10	5	1	0,25
Ύψος (cm)	176	169	163	161	138	110	75	60
Βάρος (kg)	73	57	60	53	33	20	10	6
SF _t	1	1,04	1,08	1,09	1,26	1,55	2,20	2,68
SF _b	1	1,03	1,04	1,06	1,16	1,30	1,55	1,67
SF _A	1	1,07	1,07	1,13	1,31	1,63	2,30	2,58

Στον Πίνακα 14 δίνονται επιπλέον οι τιμές των παραμέτρων SF που εκφράζουν την ανατομική διαφοροποίηση μεταξύ ατόμων. Ειδικότερα, ως SF_t, SF_b και SF_A ορίζονται ο λόγος του χαρακτηριστικού μεγέθους των αεραγωγών στον ενήλικα Καυκάσιο άντρα (πρότυπο; 30 ετών, ύψος 1,76 m, βάρος 73 kg) προς το μέγεθος τους στο εκτεθειμένο άτομο. Οι παράμετροι ανατομίας και φυσιολογίας ενός ενήλικα Καυκάσιου άντρα που δίνονται στον Πίνακα 10, χρησιμοποιούνται ως τιμές αναφοράς. Ως χαρακτηριστικά μεγέθη των αεραγωγών σε σχέση με τις παραπάνω παραμέτρους ορίζονται η διάμετρος της τραχείας, του πρώτου βρογχιολίου (γενιά 9) και του πρώτου αναπνευστικού βρογχιολίου (γενιά 16). Για τα πρότυπα άτομα που δίνονται στον Πίνακα 10 οι τιμές των όρων SF_t, SF_b και SF_A που δίνονται στον Πίνακα 14 λαμβάνονται όπως είναι στο μοντέλο. Για διαφορετικά από τα πρότυπα άτομα οι τιμές των παραμέτρων ανατομίας υπολογίζονται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$Pa = Ah^2 + Bh + C \quad (\text{Εξ. 105})$$

όπου Pa είναι η παράμετρος που υπολογίζεται και h το ύψος του ατόμου σε cm. Οι τιμές των παραμέτρων A, B, και C δίνονται στον Πίνακα 15. Ακόμα, οι τυπικές τιμές του κλάσματος F_n του αέρα που εισπνέεται από τη μύτη για άτομα που εισπνέουν από τη μύτη ή το στόμα δίνονται στον Πίνακα 16. Η τιμή του κλάσματος F_n μπορεί να επιλεγεί από τον χρήστη.

Πίνακας 15 Οι τιμές των παραμέτρων A, B, και C που χρησιμοποιούνται στην εξίσωση 105 για τον υπολογισμό των παραμέτρων ανατομίας του αναπνευστικού συστήματος του εκτεθειμένου ατόμου.

Παράμετρος P	Άνδρας			Γυναίκα		
	A	B	C	A	B	C
FRC (mL)	0,0002	-0,0279	1,0353	0,0002	-0,0265	0,96
V _D (ET) (mL)	0,0031	-0,3175	10,907	0,0029	-0,2861	9,5306
V _D (BB) (mL)	0,0026	-0,2392	9,7143	0,0022	-0,1523	5,9635
V _D (bb) (mL)	0,0023	-0,2119	11,375	0,0029	-0,3225	16,098
SF _t	1,1354E-04	-4,0700E-02	4,6711	1,2800E-04	-4,3542E-02	4,7975
SF _b	2,3020E-05	-1,1168E-02	2,2567	2,3200E-05	1,1225E-02	2,2597
SF _A	7,8360E-05	-3,2100E-02	4,2381	8,0500E-05	-3,2543E-02	4,2585

Πίνακας 16 Οι τιμές του κλάσματος F_n του αέρα που εισπνέεται από τη μύτη για άτομα που εισπνέουν από τη μύτη ή το στόμα.

Δραστηριότητα	Εισπνοή από τη μύτη	Εισπνοή από το στόμα
Κατά τη διάρκεια του ύπνου	1	0,7
Ανάπαυση	1	0,7
Καθώς εκτελεί ήπια εργασία	1	0,4
Καθώς εκτελεί βαριές εργασίες	0,5	0,3

Η έκθεση κάθε περιοχής του ΑΑΣ περιορίζεται αρχικά με το εισπνεύσιμο κλάσμα. Στο μοντέλο χρησιμοποιούνται 2 διαφορετικές προσεγγίσεις για τον υπολογισμό του εισπνεύσιμου κλάσματος (n₀) συναρτήσει της αεροδυναμικής διαμέτρου (d_{ae}) των σωματιδίων. Η επιλογή τους εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου (U) στο περιβάλλον έκθεσης του ατόμου. Αναλυτικότερα για εισπνοή από μύτη ή στόμα σε ταχύτητες ανέμου από 1 – 9 m/s χρησιμοποιείται η σχέση (ICRP, 1994):

$$n_0 = 1 - 0,5 \left(1 - \left[7,6 \times 10^{-4} d_{ae}^{2,8} + 1 \right]^{-1} \right) + 1,0 \times 10^{-5} U^{2,75} \exp(0,055 d_{ae}) \quad (\text{Εξ. 106})$$

Για εισπνοή από την μύτη σε ταχύτητες ανέμου U μικρότερες από 1 m/s χρησιμοποιείται η εξίσωση (Menache, 1995):

$$n_0 = 1 - \left[1 + \exp(13,56 + 0,4343 \log(d_{ae})^{-4,88}) \right]^{-1} \quad (\text{Εξ. 107})$$

Τέλος για εισπνοή από το στόμα σε ταχύτητες ανέμου από μικρότερες από 1 m/s χρησιμοποιείται η εξίσωση (Brown, 2005):

$$n_0 = (1 + 0,44) \left[1 + 0,44 \exp(0,0195 d_{ae}) \right]^{-1} \quad (\text{Εξ. 108})$$

Στη συνέχεια το ποσοστό εναπόθεσης σωματιδίων σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος κατά την εισπνοή και εκπνοή υπολογίζεται θεωρώντας το αναπνευστικό σύστημα

ως μια σειρά από φίλτρα (9 για εισπνοή από την μύτη και 7 για εισπνοή από το στόμα) μέσα από τα οποία περνά φ ποσοστό του όγκου αέρα και κατακρατούνται σωματίδια με απόδοση η (Εικόνα 7). Η αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων λόγω υγροσκοπικότητας δεν λαμβάνεται υπόψη κι έτσι η εναπόθεση υπολογίζεται βάσει του μεγέθους με το οποίο τα σωματίδια εισέρχονται στο αναπνευστικό σύστημα. Στη συνέχεια ο υπολογισμός των ποσοστών εναπόθεσης γίνεται με τη βοήθεια των ημιεμπειρικών εξισώσεων της ICRP. Οι εξισώσεις αυτές έχουν προκύψει από πειραματικές μετρήσεις που έγιναν σε ενήλικες εθελοντές καθώς και σε ομοιώματα του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος. Καθορίζουν την απόθεση σωματιδίων λόγω καθίζησης, πρόσκρουσης και διασποράς σχετίζοντας τη με τις φυσικές ιδιότητες των σωματιδίων και την ροή του αέρα, δηλαδή τις παραμέτρους της φυσιολογίας.

Αναλυτικότερα, το ποσοστό του όγκου του αέρα φ που περνά από κάθε φίλτρο δίνεται από τις εξισώσεις της σελίδας για την εισπνοή και εκπνοή. Το πλήθος N των φίλτρων είναι 9 όταν εισπνέουμε και εκπνέουμε από τη μύτη και 7 όταν συμμετέχει μόνο το στόμα.

Εισπνοή: $\phi_j = 1$, για $j=0$

$$\phi_j = 1 - \frac{1}{V_T} \sum_{jj=0}^{j-1} v_{jj}, \text{ για } 1 \leq j \leq (N + 1)/2 \quad (\text{Εξ. 109})$$

Εκπνοή: $\phi_j = \phi_{N-j+1}$, για $j = (N + 3)/2, N$ (Εξ. 110)

Η εναπόθεση DE σε κάθε φίλτρο j δίνεται από εξίσωση:

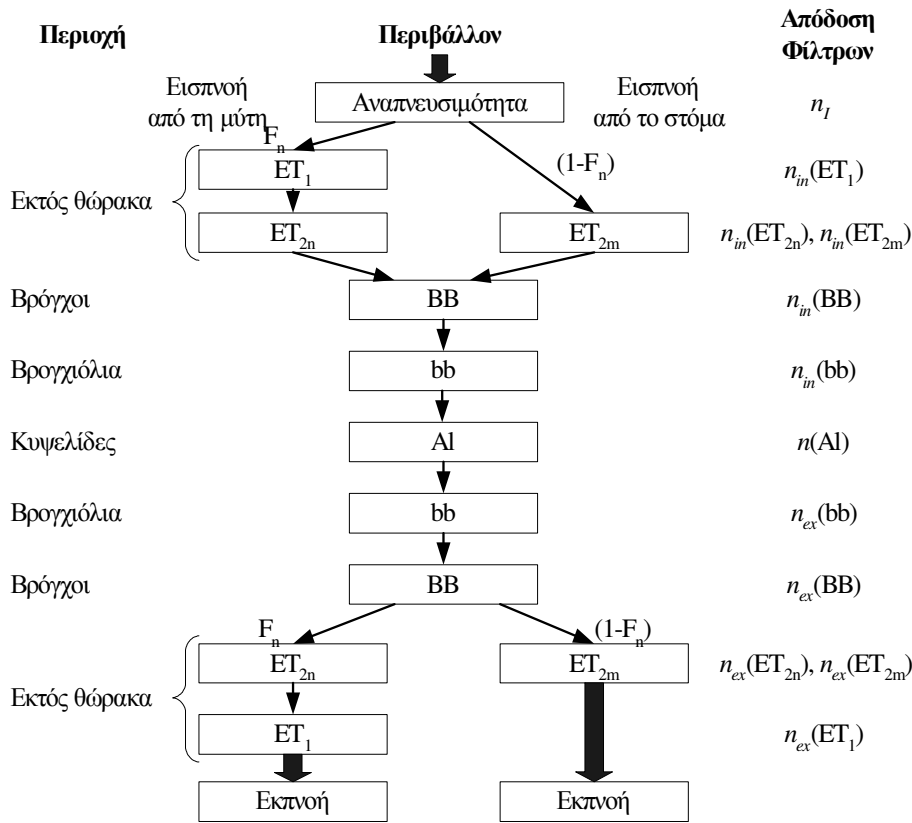
$$DE_j = n_j \phi_j \prod_{jj=0}^{j-1} (1 - n_{jj}) \text{ με } n_0 = 1 - n_i \quad (\text{Εξ. 111})$$

Το ποσοστό της μάζας σωματιδίων που αποθέεται σε κάθε περιοχή εκφράζεται με το n_j . Πριν εισέλθει ο αέρας στο πρώτο φίλτρο η συγκέντρωση σωματιδίων που μεταφέρει και η οποία θα αποτελέσει την πιθανή δόση στις περιοχές του αναπνευστικού ελαττώνεται με προ-φιλτράρισμα που επιτρέπει την είσοδο στο αναπνευστικό σύστημα μόνο του εσπνεύσιμου κλάσματος των σωματιδίων. Η εισπνευσσιμότητα συμβολίζεται με n_i και υπολογίζεται με τις εξισώσεις 106-108. Το ποσοστό που αποθέεται σε κάθε περιοχή αν δεν λάβουμε υπόψη το φιλτράρισμα από τους προγενέστερους αεραγωγούς υπολογίζεται ως άθροισμα του ποσοστού απόθεσης εξαιτίας της πρόσκρουσης, n_{ae} , και διασποράς, n_{th} . σύμφωνα με την εξίσωση:

$$n_i = (n_{ae}^2 + n_{th}^2)^{1/2} \quad (\text{Εξ. 112})$$

Με ae συμβολίζεται το αεροδυναμικό και με th το θερμοδυναμικό ισοδύναμο μέγεθος Τα ποσοστά n_{ae} και n_{th} υπολογίζονται με τις εξισώσεις που δίνονται στους Πίνακες 17-18. Όπως φαίνεται η γενική εξίσωση υπολογισμού είναι η $n = 1 - \exp(-aR^p)$ (Εξ. 113) όπου R είναι η παράμετρος από την οποία εξαρτάται η απόθεση, π.χ. το γινόμενο $d_{ae}^2 \dot{V}_n$ για την απόθεση στη μύτη λόγω πρόσκρουσης. Η παράμετρος R διαφοροποιείται ανάλογα το άτομο

χρησιμοποιώντας τον όρο SF που εκφράζει την ανατομική διαφοροποίηση των ατόμων. Οι όροι α και ρ είναι συντελεστές που προέρχονται από προσέγγιση πραγματικών πειραματικών καμπυλών με τις θεωρητικές καμπύλες. Ειδικά ο όρος α σε συνδυασμό με την τυπική απόκλιση εκφράζει το 95% όριο εμπιστοσύνης των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 7: Εμπειρική αναπαράσταση της εναπόθεσης σωματιδίων στις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος κατά τη διάρκεια μιας αναπνοής με τον αέρα να μεταφέρεται διαμέσου μιας σειράς από φίλτρα. Η αναπνοή μπορεί να πραγματοποιείται από τη μύτη (F_n το κλάσμα εισπνοής από τη μύτη) ή από το στόμα ($(1-F_n)$) ή και από τα δύο σε συνδυασμό. Το κλάσμα των εισπνευσίμων σωματιδίων ορίζεται ως εισπνευσιμότητα ενώ με n_{in} και n_{out} εκφράζεται η απόδοση των φίλτρων κατά την εισπνοή και εκπνοή αντίστοιχα (ICRP, 1994).

Στους μικρότερους αεραγωγούς του αναπνευστικού συστήματος η απόθεση εξαρτάται από τον χρόνο παραμονής του αέρα σε αυτές. Οι χρόνοι μετάβασης του αέρα στις περιοχές BB, bb και Al δίνονται στις εξισώσεις 114-116 που ακολουθούν.

$$t_B = \frac{V_D(BB)}{\dot{V}} \left(1 + \frac{0.5V_T}{FRC} \right) \quad (\text{Εξ. 114})$$

$$t_b = \frac{V_D(bb)}{\dot{V}} \left(1 + \frac{0.5V_T}{FRC} \right) \quad (\text{Εξ. 115})$$

$$t_A = \frac{V_T - V_D(ET) - [V_D(BB) + V_D(bb)] \left(1 + \frac{V_T}{FRC} \right)}{\dot{V}} \quad (\text{Εξ. 116})$$

Πίνακας 17: Προτεινόμενες τιμές παραμέτρων του μοντέλου εναπόθεσης για το κλάσμα του αέρα που λαμβάνεται με αναπνοή από μύτη, για οποιοδήποτε εκτεθειμένο άτομο, ως συναρτήσεις των μεταβλητών που σχετίζονται με την αναπνοή και την ανατομία (ICRP, 1994).

Φ Α Σ Η	Φίλτρο j	Περιοχή	Τοπική Απόδοση Εναπόθεσης, η_i						Κλάσμα Όγκου φ_j^a
			Αεροδυναμικά			Θερμοδυναμικά			
			$n_{ae} = 1 - \exp(-aR^p)$			$n_{th} = 1 - \exp(-aR^p)$			
			α	R	p	α	R	p	
Ε Ι Σ Π Ν Ο Η	1	ET ₁ ^b	$3,0 \times 10^{-4}$	$d_{ae}^2 \dot{V}_n SF_t^3$	1	18	$D(\dot{V}_n SF_t)^{-1/4}$	1/2	1
	2	ET ₂ ^c	$5,5 \times 10^{-5}$	$d_{ae}^2 \dot{V}_n SF_t^3$	1,17	15,1	$D(\dot{V}_n SF_t)^{-1/4}$	0,538	1
	3	BB	$4,08 \times 10^{-6}$	$d_{ae}^2 \dot{V} SF_t^{2,3}$	1,152	$22,02 SF_t^{1,24} \psi_{th}^d$	Dt _B	0,6391	$1 - \frac{V_D(ET)}{V_T}$
	4	bb	0,1147	$(0,056 + t_b^{1,5}) \times d_{ae}^{t_b^{-0,25}}$	1,173	$-76,8 + 167 SF_b^{0,65}$	Dt _b	0,5676	$1 - \frac{[V_D(ET) + V'_D(BB)]}{V_T}$
	5	AI	$0,146 \cdot SF_A^{0,98}$	$d_{ae}^2 t_A$	0,6495	$1710 + 103 SF_A^{2,13}$	Dt _A	0,6101	$1 - \frac{[V_D(ET) + V'_D(BB) + V'_D(bb)]}{V_T}$
Ε Κ Π Ν Ο Η	6	bb	0,1147	$(0,056 + t_b^{1,5}) \times d_{ae}^{t_b^{-0,25}}$	1,173	$-76,8 + 167 SF_b^{0,65}$	Dt _b	0,5676	$1 - \frac{[V_D(ET) + V'_D(BB)]}{V_T}$
	7	BB	$2,04 \times 10^{-6}$	$d_{ae}^2 \dot{V} SF_t^{2,3}$	1,152	$22,02 SF_t^{1,24} \psi_{th}^d$	Dt _B	0,6391	$1 - \frac{V_D(ET)}{V_T}$
	8	ET ₂ ^d	$5,5 \times 10^{-5}$	$d_{ae}^2 \dot{V}_n SF_t^3$	1,17	15,1	$D(\dot{V}_n SF_t)^{-1/4}$	0,538	1
	9	ET ₁ ^c	$3,0 \times 10^{-4}$	$d_{ae}^2 \dot{V}_n SF_t^3$	1	18	$D(\dot{V}_n SF_t)^{-1/4}$	1/2	1

Πίνακας 18: Προτεινόμενες τιμές παραμέτρων του μοντέλου εναπόθεσης για το κλάσμα του αέρα που λαμβάνεται με αναπνοή από το στόμα, για οποιοδήποτε εκτεθειμένο άτομο, ως συναρτήσεις των μεταβλητών που σχετίζονται με την αναπνοή και την ανατομία (ICRP, 1994).

Φ Α Σ Η	Φίλτρο j	Περιοχή	Τοπική Απόδοση Εναπόθεσης, η_i						Κλάσμα Όγκου φ_j^a						
			Αεροδυναμικά			Θερμοδυναμικά									
			$n_{ae} = 1 - \exp(-aR^p)$							$n_{th} = 1 - \exp(-aR^p)$					
			α	R	p	α	R	p							
Ε Ι Σ Π Ν Ο Η	1	ET ₂ ^c	$1,1 \times 10^{-4}$	$d_{ae}^2 (\dot{V}SF_t^3)^{0,6} (V_T SF_t^2)^{-0,2}$	1,4	9	$D(\dot{V}_n SF_t)^{-1/4}$	1/2	1						
	2	BB	$4,08 \times 10^{-6}$	$d_{ae}^2 \dot{V}SF_t^{2,3}$	1,152	$22,02SF_t^{1,24}\psi_{th}^d$	Dt_B	0,6391	$1 - \frac{V_D(ET)}{V_T}$						
	3	bb	0,1147	$(0,056 + t_b^{1,5}) \times d_{ae}^{t_b^{-0,25}}$	1,173	$-76,8 + 167 SF_b^{0,65}$	Dt_b	0,5676	$1 - \frac{[V_D(ET) + V'_D(BB)]}{V_T}$						
	4	AI	$0,146 \cdot SF_A^{0,98}$	$d_{ae}^2 t_A$	0,6495	$1710 + 103 SF_A^{2,13}$	Dt_A	0,6101	$1 - \frac{[V_D(ET) + V'_D(BB) + V'_D(bb)]}{V_T}$						
Ε Κ Π Ν Ο Η	5	bb	0,1147	$(0,056 + t_b^{1,5}) \times d_{ae}^{t_b^{-0,25}}$	1,173	$-76,8 + 167 SF_b^{0,65}$	Dt_b	0,5676	$1 - \frac{[V_D(ET) + V'_D(BB)]}{V_T}$						
	6	BB	$2,04 \times 10^{-6}$	$d_{ae}^2 \dot{V}SF_t^{2,3}$	1,152	$22,02SF_t^{1,24}\psi_{th}^d$	Dt_B	0,6391	$1 - \frac{V_D(ET)}{V_T}$						
	7	ET ₂ ^c	$1,1 \times 10^{-4}$	$d_{ae}^2 (\dot{V}SF_t^3)^{0,6} (V_T SF_t^2)^{-0,2}$	1,4	9	$D(\dot{V}_n SF_t)^{-1/4}$	1/2	1						

^a: όπου $V'_D(BB) = V_D(BB) \left(1 + \frac{V_T}{FRC}\right)$ (Εξ. 117) και $V'_D(bb) = V_D(bb) \left(1 + \frac{V_T}{FRC}\right)$ (Εξ. 118)

^b: $n_{ae} = 0,5[1 - 1/(aR^p + 1)]$ (Εξ. 119) και $n_{th} = 0,5[1 - \exp(-aR^p)]$ (Εξ. 120)

^c: $n_{ae} = 1 - 1/(aR^p + 1)$ (Εξ. 121) και $n_{th} = 1 - \exp(-aR^p)$ (Εξ. 122)

^d: ψ_{th} είναι ένας εμπειρικός συντελεστής για την προσομοίωση της εναπόθεσης μικρών σωματιδίων στους βρόγχους λόγω τυρβώδους ροής και υπολογίζεται με τη σχέση $\psi_{th} = 1 + 100 \exp\left[-\left[\log\left(100 + 10/d_{th}^{0,9}\right)\right]^2\right]$ (Εξ. 123)

Όπως φαίνεται στους παραπάνω πίνακες (17-18), στην περιοχή BB χρησιμοποιείται ένας επιπλέον όρος - συντελεστής στον υπολογισμό του κλάσματος μάζας που αποθέεται. Στην περιοχή των βρόγχων βρέθηκε πως η εναπόθεση δεν εξαρτάται από τον ρυθμό ροής. Έτσι ο συντελεστής ψ_{th} είναι ένας εμπειρικός συντελεστής για την προσομοίωση της εναπόθεσης μικρών σωματιδίων στους βρόγχους λόγω τυρβώδους ροής.

Η σημαντικότερη ωστόσο παράμετρος στον καθορισμό της εναπόθεσης είναι το μέγεθος του σωματιδίου το οποίο συχνά είναι γνωστό ως ισοδύναμη αεροδυναμική διάμετρος (λόγω των οργάνων συλλογής) ή ισοδύναμη κατ' όγκο διάμετρο. Για να υπολογιστεί η εναπόθεση του σωματιδίου λόγω διασποράς θα πρέπει να υπολογιστεί το ισοδύναμο θερμοδυναμικό μέγεθος του. Ο υπολογισμός πραγματοποιείται με μια διαδικασία δοκιμής και σφάλματος. Η αεροδυναμική με την θερμοδυναμική διάμετρο σχετίζονται με την εξίσωση:

$$d_{th} = d_{ae} \sqrt{\frac{\chi \rho_0}{\rho_p} \times \frac{C_c(d_{ae})}{C_c(d_{th})}} \quad (\text{Εξ. 124})$$

όπου ρ_p είναι η πυκνότητα του σωματιδίου ενώ $\rho_0 = 1 \text{ g/cm}^3$. Ακόμα, ο όρος χ σχετίζεται με το σχήμα του σωματιδίου και το πεδίο τιμών του είναι μεταξύ 1 (σφαίρα) και 2 (Hinds, 1999). Οι όροι $C_c(d_{th})$ και $C_c(d_{ae})$ εκφράζουν τον συντελεστή διόρθωσης Cunningham που δίνεται π.χ. για την ισοδύναμη διάμετρο κατά όγκο από την εξίσωση (Seinfeld και Pandis, 1998):

$$C_c(d_e) = 1 + (\lambda/d_e) \{2,514 + 0,8 \exp[-0,55(d_e/\lambda)]\} \quad (\text{Εξ. 125})$$

όπου $\lambda=0,0683 \text{ }\mu\text{m}$ το μέσο ελεύθερο μήκος των σωματιδίων του αέρα σε θερμοκρασία 37°C , 100% σχετική υγρασία και ατμοσφαιρική πίεση 76 cm Hg .

Γνωρίζοντας ότι η αεροδυναμική με την θερμοδυναμική διάμετρο σχετίζονται με την εξίσωση 124, θεωρούμε μια αρχική τιμή της θερμοδυναμικής διαμέτρου που ορίζεται ως:

$$d_e(1) = d_{ae} \sqrt{\frac{\chi}{\rho_p}} \quad (\text{Εξ. 126})$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται ως συντελεστής Cunningham για το σωματίδια διαμέτρου d_e . Το αποτέλεσμα αντικαθίσταται στην εξίσωση 124 και προκύπτει μια νέα ισοδύναμη θερμοδυναμική διάμετρος. Εάν είναι ίση με την $d_e(1)$ ή η διαφορά τους δεν ξεπερνά το καθορισμένο σφάλμα $dCd = |d_e(1) - d_e(2)|$ (Εξ. 127) τότε η διάμετρος αυτή αποτελεί το ισοδύναμο θερμοδυναμικό μέγεθος d_{th} και υπολογίζονται ο συντελεστής διάχυσης D και η παράμετρος ψ_{th} , διαφορετικά μεταβάλλουμε την αρχική τιμή του d_e κατά dCd και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία. Η εξίσωση υπολογισμού του συντελεστή διάχυσης είναι:

$$D = \frac{k \cdot C_c(d_{th}) \cdot T \cdot 1,0132 \times 10^{13}}{3\pi\mu \cdot d_{th}} \quad (\text{Εξ. 128})$$

όπου D είναι ο συντελεστής διάχυσης (cm^2/s), T η απόλυτη θερμοκρασία (310,15 K), k η σταθερά του Boltzmann ($0,013622779 \times 10^{-23}$) και μ το δυναμικό ιξώδες του αέρα ($1,90 \times 10^{-4}$ Poise).

Τέλος για πολύ μικρά σωματίδια, μοριακών διαστάσεων δηλαδή μικρότερα από $0,002 \mu\text{m}$ η θερμοδυναμική διάμετρος διορθώνεται σε:

$$d_{th} = d_e \left[1 + 3 \exp(-2,20 \times 10^3 d_e) \right] \quad (\text{Εξ. 129})$$

Στο μοντέλο το όριο που δεν πρέπει να ξεπερνά ο όρος dCd ώστε η διαδικασία επανάληψης και σφάλματος να σταματά έχει οριστεί ανάλογα την αεροδυναμική διάμετρο των σωματιδίων σε $10^{-4} \mu\text{m}$ για $d_{ae} \geq 1 \mu\text{m}$, σε $10^{-5} \mu\text{m}$ για $1 \mu\text{m} > d_{ae} \geq 0,1 \mu\text{m}$, σε $10^{-6} \mu\text{m}$ για $0,1 \mu\text{m} > d_{ae} \geq 0,01 \mu\text{m}$, σε $10^{-7} \mu\text{m}$ για $0,01 \mu\text{m} > d_{ae} \geq 0,001 \mu\text{m}$ και τέλος για $d_{ae} < 0,001 \mu\text{m}$ στα $10^{-8} \mu\text{m}$.

Η σωματιδιακή ύλη βρίσκεται στη φύση υπό τη μορφή αερολυμάτων που απαρτίζονται από πλήθος σωματιδίων με διαφορετικές διαμέτρους. Η λογαριθμική κανονική κατανομή χρησιμοποιείται για την απόδοση της κατανομής μάζας τους. Αναλυτικότερα, η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων πολυδιάσπορων αεροζόλ περιγράφεται μέσω συντελεστών που για την λογαριθμική κανονική κατανομή είναι η διάμεσος τιμή, μ , των διαμέτρων και η γεωμετρική σταθερή απόκλιση σ_g . Η σχέση που εκφράζει την bimodal λογαριθμική κανονική κατανομή των σωματιδίων που χρησιμοποιείται στο μοντέλο είναι (όπου a είναι το ποσοστό των μικρών σωματιδίων):

$$f(d_{ae}) = \frac{a}{\sqrt{2\pi} \ln(\sigma_{g,F})} \exp\left(-\frac{(\ln d_{ae} - \ln \mu_F)^2}{2 \ln \sigma_{g,F}^2}\right) + \frac{1-a}{\sqrt{2\pi} \ln(\sigma_{g,C})} \exp\left(-\frac{(\ln d_{ae} - \ln \mu_C)^2}{2 \ln \sigma_{g,C}^2}\right) \quad (\text{Εξ. 130})$$

Η διάμεσος τιμή των διαμέτρων μπορεί να αφορά τη μάζα ή το πλήθος τους (MMD-μάζα) και ορίζεται ως η διάμετρος για την οποία το 50% της μάζας των σωματιδίων αποτελείται από σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη από αυτή και το υπόλοιπο 50% από σωματίδια μικρότερης διαμέτρου. Ωστόσο τα συνήθη όργανα μέτρησης των σωματιδίων για τον προσδιορισμό της κατανομής της μάζας τους, συλλέγουν σωματίδια σε διακριτά μεγέθη ή περιοχές διαμέτρων (size bins), (McMurry, 2000). Η εξαγωγή των παραμέτρων της λογαριθμικής καμπύλης κατανομής πραγματοποιείται με την διαδικασία που περιγράφεται από τον Hinds (1999). Οι μετρήσεις του οργάνου συλλογής δίνουν μια καμπύλη που χωρίζεται σε διακριτά τμήματα. Από την καμπύλη αυτή διαπιστώνεται εάν το αεροζόλ χαρακτηρίζεται από δύο ή μια περιοχές μεγέθους (μικρά και μεγάλα σωματίδια) και υπολογίζεται το ποσοστό της μάζας των σωματιδίων κάθε περιοχής. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τη μέση διάμετρος μάζας ($d_{50\%}$) και τη διάμετρος στην οποία αντιστοιχεί το 84% (αθροιστικό ποσοστό) της μάζας υπολογίζεται η τυπική απόκλιση από τη σχέση:

$$\sigma_g = \frac{d_{84\%}}{d_{50\%}} = \frac{d_{50\%}}{d_{16\%}} = \left(\frac{d_{84\%}}{d_{16\%}} \right)^{1/2} \quad (\text{Εξ. 131})$$

Αν οι τιμές των παραμέτρων της λογαριθμικής κανονικής κατανομής των σωματιδίων είναι γνωστές μπορούν να δοθούν απ' ευθείας ως είσοδο στο μοντέλο. Παρόμοιες καμπύλες κατασκευάζονται συχνά και για το πλήθος των σωματιδίων. Ωστόσο τις περισσότερες φορές το πλήθος των μεγάλων σωματιδίων είναι τόσο μικρό σε σχέση με των μικρών που το κλάσμα τους δεν διακρίνεται εύκολα στα διαγράμματα. Έτσι το αεροζόλ θεωρείται εσφαλμένα πως αποτελείται μόνο από μικρά σωματίδια και στον καθορισμό δόσης δεν λαμβάνεται υπόψη μια πολύ μεγάλη ποσότητα μάζας (Schwela κ.α., 2002). Για τον υπολογισμό της δόσης και συσσώρευσης σωματιδίων σε αυτή την περίπτωση, το μοντέλο χρησιμοποιεί τις συγκεντρώσεις πλήθους και τις διαμέτρους αποκοπής του οργάνου συλλογής. Στην περίπτωση αυτή, αν οι τιμές των διαμέτρων αποκοπής που εισάγονται στο μοντέλο είναι διάμετροι ηλεκτρικής κινητικότητας (mobility diameter d_m ; η διάμετρος μιας σφαίρας που έχει την ίδια ταχύτητα κίνησης σε ένα σταθερό ηλεκτρικό πεδίο με το προς σωματίδιο αναφοράς; Flagan, 2001) το μοντέλο τις μετατρέπει σε αεροδυναμικές με την εξίσωση (ισχύει μόνο για σφαιρικά σωματίδια που $d_m = d_{ve}$; Khlystov κ.α., 2004; DeCarlo κ.α., 2004) (Εξ. 132):

$$d_{ae} = d_m \sqrt{\rho_p \times \frac{C_c(d_m)}{C_c(d_{ae})}}$$

Η εξίσωση επιλύεται με τη μέθοδο δοκιμής και σφάλματος που περιγράφηκε παραπάνω για τον υπολογισμό της θερμοδυναμικής διαμέτρου. Για σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη από 100 nm η εξίσωση μετατρέπεται σε $d_{ae} = d_m \sqrt{\rho_p}$ (Khlystov κ.α., 2004).

Η απόθεση των πολυδιάσπορων αεροζόλ στο αναπνευστικό σύστημα υπολογίζεται με την εξίσωση:

$$DE_A(MMAD, \sigma_g) = \sum_0^{\infty} DE(d_{ae}) p_A(d_{ae}) \Delta d_{ae} \quad (\text{Εξ. 133})$$

όπου p είναι το ποσοστό των σωματιδίων με διαμέτρους στην περιοχή Δd_{ae} και DE η εναπόθεση τους. Αναλυτικότερα, η υπολογιστική διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο περιλαμβάνει τον υπολογισμό του ποσοστού εναπόθεσης σε 500 σημεία μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής διαμέτρου. Η ελάχιστη τιμή λαμβάνεται ως $d_{ae}/2\sigma_g$ και η μέγιστη ως $2d_{ae}\sigma_g$ (99% διάστημα εμπιστοσύνης). Για κάθε τμήμα το ποσοστό της ολικής μάζας που αντιστοιχεί σε αυτό βρίσκεται από την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής. Το ποσοστό μάζας που αποτελείται από σωματίδια διαμέτρου έως d_{ae} δίνεται ως το ολοκλήρωμα της καμπύλης σε αυτό το σημείο:

$$F(d_{ae}) = \int_0^{d_{ae}} f(d_{ae}) d(d_{ae}) = 0,5 + 0,5 \operatorname{erf} \left(\frac{\ln(d_{ae}/\mu)}{\sqrt{2 \ln \sigma_g}} \right) \quad (\text{Εξ. 134})$$

Έτσι το ποσοστό (κλάσμα) των σωματιδίων σε κάθε διάστημα δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$p(d_{ae}) = F(d_{ae}) - F(d_{ae} - \Delta d_{ae}) \quad (\text{Εξ. 135})$$

Το βήμα της επανάληψης Δd_{ae} δίνεται ως το πηλίκο της διαφοράς μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής διαμέτρου προς το πλήθος των σημείων και τελικά η εναπόθεση του πολυδιάσπορου αεροζόλ δίνεται από την εξίσωση:

$$DE_A(MMAD, \sigma_g) = \sum_{\min}^{\max} DE(d_{ae}) [F(d_{ae}) - F(d_{ae} - \Delta d_{ae})] \quad (\text{Εξ. 136})$$

Για τον υπολογισμό του ποσοστού εναπόθεσης των σωματιδίων ο χρήστης πρέπει να παρέχει στο πρόγραμμα τις παραμέτρους ανατομίας και φυσιολογίας του ατόμου, το μέγεθος των σωματιδίων, το σχήμα και την κατανομή τους (τυπική απόκλιση σ_g). Το μοντέλο περιλαμβάνει τις τυπικές τιμές των παραμέτρων ανατομίας και φυσιολογίας για τα Καυκάσια άτομα διαφορετικών ηλικιών και φύλου που δίνονται στον Πίνακα 10.

Η πιθανή δόση ανά ώρα υπολογίζεται για έκθεση σε οποιοσδήποτε συνθήκες με τη βοήθεια της εξίσωσης (Εξ. 137):

$$D_{\text{pot}} = \sum_{i=1}^n B(n_{0,i} C_{A,i})$$

όπου D_{pot} είναι ο ρυθμός δόσης ($\mu\text{g}/\text{h}$), $C_{A,i}$ είναι η συγκέντρωση σωματιδίων μεγέθους i ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), B είναι ο ρυθμός εισπνοής (m^3/h), και $n_{0,i}$ είναι το εισπνεύσιμο κλάσμα σωματιδίων μέσης διαμέτρου i .

Στη συνέχεια ο ρυθμός εφαρμοσμένης δόσης (D_{app} ή H), δηλαδή η ποσότητα των εισπνεόμενων σωματιδίων που αποτίθεται στους ιστούς του αναπνευστικού συστήματος υπολογίζεται με την εξίσωση:

$$H = \sum_{i=1}^n B(n_{0,i} C_{A,i}) n_{i,j} \quad (\text{Εξ. 138})$$

όπου $n_{i,j}$ είναι η συγκράτηση (εναπόθεση) σωματιδίων μεγέθους i στην περιοχή j των πνευμόνων.

Το σενάριο έκθεσης μπορεί να περιλαμβάνει σταθερές ή μεταβαλλόμενες τιμές συγκεντρώσεων και δραστηριοτήτων. Το μοντέλο μπορεί να υπολογίσει την δόση στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα για μια περίοδο μεταβαλλόμενης έκθεσης αρκεί να του παρέχονται τα δεδομένα συγκέντρωσης και κατανομής των σωματιδίων. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να δίνονται ταυτόχρονα οι διαφορετικές παράμετροι φυσιολογίας ανάλογα την δραστηριότητα ως ωριαίες ή μέσες ημερήσιες τιμές. Η προσομοίωση δίνει ως αποτέλεσμα τον ωριαίο ρυθμό δόσης σωματιδίων σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος.

Η απομάκρυνση/μεταφορά των σωματιδίων λαμβάνει υπόψη τους μηχανισμούς μετακίνησης με την βλέννα, μετακίνηση με τις βλεφαρίδες των κυττάρων του επιθηλίου, διάχυση στο πνευμονικό επιθήλιο, φαγοκύτωση από μακροφάγα κύτταρα και διάλυση και ανάληψη

συστατικών στο αίμα. Αναλυτικότερα, ο καθαρισμός των σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα υπολογίζεται για διαλυτά και αδιάλυτα σωματίδια, που απορροφώνται ταχέως ή αργά στο αίμα και είναι μη τοξικά ή ινώδους μορφής. Τα σωματίδια απομακρύνονται είτε στο αίμα με απορρόφηση, είτε στο γαστρεντερικό σύστημα με κατάποση και τέλος στους λεμφαδένες μέσω των λεμφαγγείων. Στη μεταφορά τους περιλαμβάνεται τόσο η μετακίνηση των σωματιδίων στην αρχική τους μορφή όσο και αφού μετατραπούν/διαχωριστούν επιφανειακά με τη βλέννα ή φαγοκυτταρωμένα από μακροφάγα κύτταρα. Στην απορρόφηση περιλαμβάνεται τόσο η απορρόφηση των σωματιδίων στο αίμα σε αρχική μορφή (για υπέρλεπτα σωματίδια κυρίως) όσο και των διαλυτών συστατικών τους ή τμημάτων τους αφού υποστούν διαχωρισμό. Ο ρυθμός με τον οποίο απομακρύνονται εξαρτάται από την θέση εναπόθεσης τους, τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τους και τον χρόνο από την εναπόθεση έως την στιγμή που εξετάζεται. Οι μηχανισμοί μετακίνησης και απορρόφησης στο αίμα δρουν ανταγωνιστικά.

Ο καθαρισμός μιας περιοχής του αναπνευστικού από το υλικό που έχει εναποτεθεί δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{dR_i(t)}{dt} = -\lambda_i(t)R_i(t) \quad (\text{Εξ. 139})$$

όπου $\lambda_i(t)$ είναι ο στιγμιαίος ρυθμός καθαρισμού του υλικού από μια περιοχή i και $R_i(t)$ είναι η ποσότητα του υλικού στην περιοχή μετά από χρόνο t από την έκθεση.

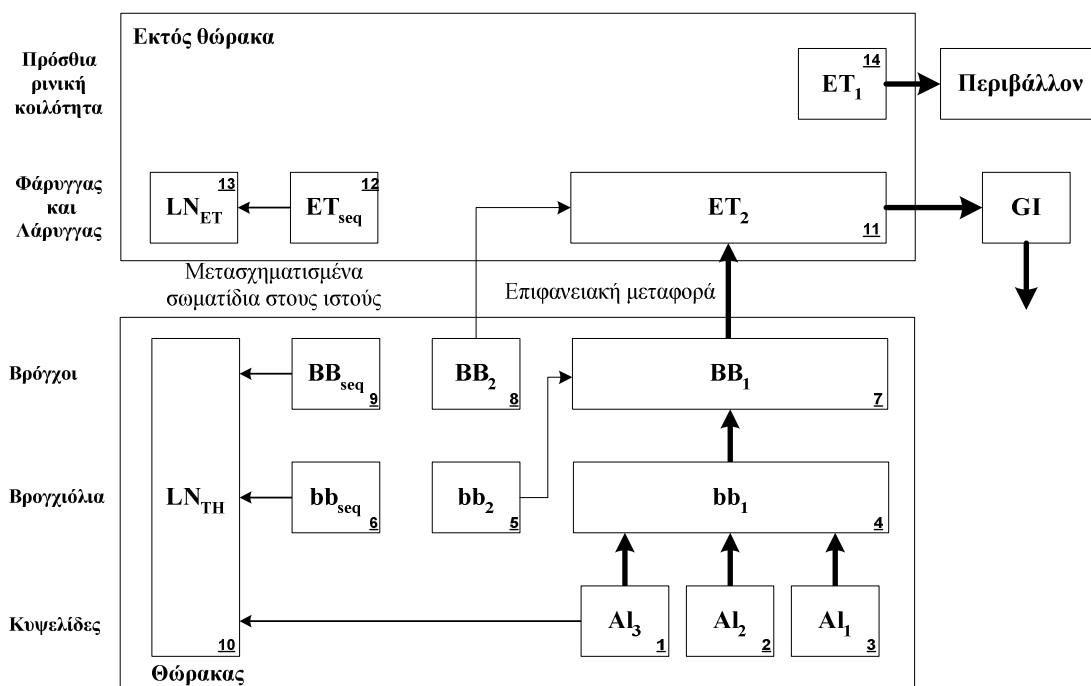
Σύμφωνα με το μοντέλο HRTM της ICRP οι ρυθμοί μεταφοράς (m) και απορρόφησης (s) είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους έτσι ο συνολικός ρυθμός καθαρισμού μιας περιοχής του αναπνευστικού δίνεται από το άθροισμα τους.

$$\lambda_i(t) = m_i(t) + s_i(t) \quad (\text{Εξ. 140})$$

Ακόμα θεωρείται πως οι ρυθμοί μεταφοράς των σωματιδίων είναι ίδιοι για όλα τα υλικά και πως ο ρυθμός απορρόφησης στο αίμα διαφέρει για κάθε υλικό αλλά είναι ο ίδιος για όλες τις περιοχές του αναπνευστικού, συμπεριλαμβάνοντας τους λεμφαδένες, εκτός της πρόσθιας ρινικής κοιλότητας.

Για την προσομοίωση της χρονικής μεταβολής του ρυθμού καθαρισμού, κάθε περιοχή διακρίνεται σε τμήματα απ' όπου τα σωματίδια απομακρύνονται με σταθερό μέσο, αργό ή γρήγορο ρυθμό. Το ποσοστό του υλικού που αντιστοιχεί σε κάθε τμήμα δόθηκε στον Πίνακα 11. Το κλάσμα f_s υπολογίζεται με τις εξισώσεις 93 και 95.

Η μεταφορά των σωματιδίων προς το φάρυγγα, απ' όπου οδηγούνται στο γαστρεντερικό σύστημα, και το περιβάλλον ακολουθεί την πορεία που διαγράφεται με τα βέλη στην Εικόνα 8. Οι τυπικές τιμές του ρυθμού μεταφοράς σε κάθε τμήμα της πορείας που ακολουθεί το σωματίδιο που περιλαμβάνει το μοντέλο δίνονται στον Πίνακα 19 μαζί με τον χρόνο ημιζωής του σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού.



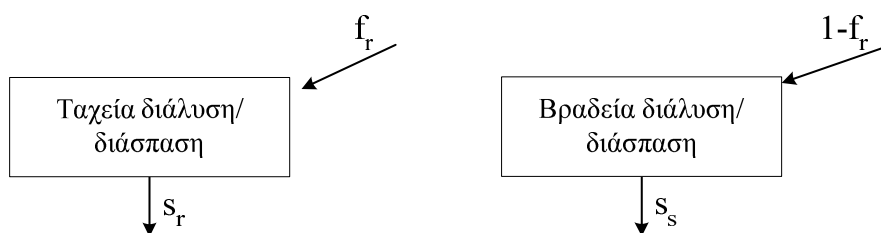
Εικόνα 8 Μοντέλο μεταφοράς σωματιδίων από κάθε περιοχή του αναπνευστικού, όπου κάθε περιοχή αποτελείται από τμήματα έτσι ώστε να εκφράζεται καλύτερα ο χρονικά μεταβαλλόμενος ρυθμός μεταφοράς (ICRP, 1994). Οι υπογραμμισμένοι αριθμοί αποτελούν δείκτη κάθε τμήματος του αναπνευστικού συστήματος (χρησιμοποιούνται στον Πίνακα 19).

Πίνακας 19 Ρυθμοί μεταφοράς σωματιδίων στα τμήματα του αναπνευστικού συστήματος (ICRP, 1994).

Ρυθμοί Καθαρισμού				
Μεταφορά	Από	Προς	Ρυθμός (d ⁻¹)	Χρόνος βιολογικής ημίσειας ζωής
$m_{1,4}$	Al ₁	bb ₁	0,02	35 d
$m_{2,4}$	Al ₂	bb ₁	0,001	700 d
$m_{3,4}$	Al ₃	bb ₁	0,0001	7000 d
$m_{3,10}$	Al ₃	LN _{TH}	0,00002	-
$m_{4,7}$	bb ₁	BB ₁	2	8 h
$m_{5,7}$	bb ₂	BB ₁	0,03	23 d
$m_{6,10}$	bb _{seq}	LN _{TH}	0,01	70 d
$m_{7,11}$	BB ₁	ET ₂	10	100 min
$m_{8,11}$	BB ₂	ET ₂	0,03	23 d
$m_{9,10}$	BB _{seq}	LN _{TH}	0,01	70 d
$m_{11,15}$	ET ₂	Γαστρεντερικό σύστημα (GI)	100	10 min
$m_{12,13}$	ET _{seq}	LN _{ET}	0,001	700 d
$m_{14,16}$	ET ₁	Περιβάλλον	1	17 h

Στο μοντέλο δεν υπολογίζεται η μεταφορά σωματιδιακής ύλης από την περιοχή ET1 προς το περιβάλλον γιατί ο ρυθμός της εξαρτάται από μη προβλεπόμενες παραμέτρους όπως η συχνότητα και η διάρκεια του βήχα (Chang κ.α., 1991).

Η απορρόφηση σωματιδίων στο αίμα διακρίνεται σε δύο στάδια, την διάλυση στα συστατικά τους που μπορούν να απορροφηθούν στο αίμα και την λήψη των συστατικών αυτών αλλά και απευθείας την απορρόφηση σωματιδίων στο αίμα. Επειδή η επίλυση της απομάκρυνσης σωματιδίων στο αίμα με τον τρόπο που δίνεται στην Εικόνα 6 απαιτεί υπολογιστική ισχύ και χρόνο το σύστημα μπορεί να απλοποιηθεί και να μοντελοποιηθεί όπως φαίνεται στο σχήμα της Εικόνας 9.



Εικόνα 9 Μοντέλο που αναπαριστά την απορρόφηση των σωματιδίων στο αίμα (ICRP, 1994), όπου f_r το κλάσμα της σωματιδιακής ύλης που διαλύεται γρήγορα, s_r ο ρυθμός ανάληψης στο αίμα της σωματιδιακής ύλης που διαλύεται γρήγορα, και s_s ο ρυθμός ανάληψης στο αίμα της σωματιδιακής ύλης που διαλύεται αργά.

Σημαντικοί παράγοντες καθορισμού του ρυθμού απορρόφησης είναι ο ρυθμός διάλυσης των σωματιδίων στα υγρά του πνεύμονα, στις εκκρίσεις και τους μακροφάγους καθώς και ο ρυθμός βιοχημικών αντιδράσεων του. Οι τυπικές τιμές για τις παραμέτρους απορρόφησης που περιλαμβάνει το μοντέλο για συστατικά ταξινομημένα βάσει της συμπεριφοράς τους στις κλάσεις F,M S υλικού σε απορρόφηση δόθηκαν στον Πίνακα 13. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει δικές του τιμές για τις παραμέτρους απορρόφησης εφόσον το επιθυμεί.

Στο μοντέλο ExDoM ο καθαρισμός σωματιδίων υπολογίζεται για σωματίδια που απορροφώνται γρήγορα, με μέση ταχύτητα ή αργά στο αίμα ή ρυθμό καθορισμένο από τον χρήστη. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 13 θεωρείται πως δεν δεσμεύεται υλικό σε καμία περιοχή του αναπνευστικού συστήματος. Τέλος, όπως και για την εναπόθεση έτσι και ο καθαρισμός πολυδιάσπορων αεροζόλ υπολογίζεται σε 20 βήματα για διαμέτρους που κυμαίνονται από $d_{ae}/2\sigma_g$ ως $2d_{ae}\sigma_g$.

Οι αλγόριθμοι υπολογισμού της εναπόθεσης και καθαρισμού των σωματιδίων συνδυάζονται στον υπολογισμό της εφαρμοσμένης και εσωτερικής δόσης. Όσον αφορά στον καθαρισμό των σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα, υπολογίζεται εμμέσως στο μοντέλο με τον καθορισμό της μάζας που έχει συσσωρευτεί κάθε στιγμή στα διάφορα τμήματα του αναπνευστικού συστήματος καθώς και με την ποσότητα που έχει μεταφερθεί στο γαστρεντερικό σύστημα και το αίμα.

Η συσσώρευση, R, μάζας σωματιδίων σε κάθε τμήμα j (1-15) του αναπνευστικού συστήματος υπολογίζεται με την γενική εξίσωση:

$$R_j = I_j + T_j$$

$$\frac{dI_j(t)}{dt} = \sum_{k=1}^{15} [m_{k,j} I_k(t) - (m_{j,k} + s_r) I_j(t)] + f_r H_i \quad (\text{Εξ. 141})$$

$$\frac{dT_j(t)}{dt} = \sum_{k=1}^{15} [m_{k,j} T_k(t) + (m_{j,k} + s_s) T_j(t)] + (1 - f_r) H_i$$

όπου m είναι ο ρυθμός μεταφοράς σωματιδίων (χρονικό βήμα⁻¹), f_r το κλάσμα της σωματιδιακής ύλης που διαλύεται γρήγορα, s_r ο ρυθμός ανάληψης στο αίμα της σωματιδιακής ύλης που διαλύεται γρήγορα και s_s ο ρυθμός ανάληψης στο αίμα της σωματιδιακής ύλης που διαλύεται αργά (χρονικό βήμα⁻¹) και τέλος ως δόση (H) ορίζεται η εφαρμοσμένη δόση που δέχεται το τμήμα του αναπνευστικού συστήματος στη μονάδα του χρόνου (μg/χρονικό βήμα). Τα τμήματα 14 και 15 δεν είναι αυτά που δίνονται στον Πίνακα 12 αλλά με 14 συμβολίζεται το γαστρεντερικό σύστημα και με 15 το αίμα. Η δόση σε κάθε τμήμα του αναπνευστικού είναι μηδενική για χρόνο μεγαλύτερο του χρόνου έκθεσης.

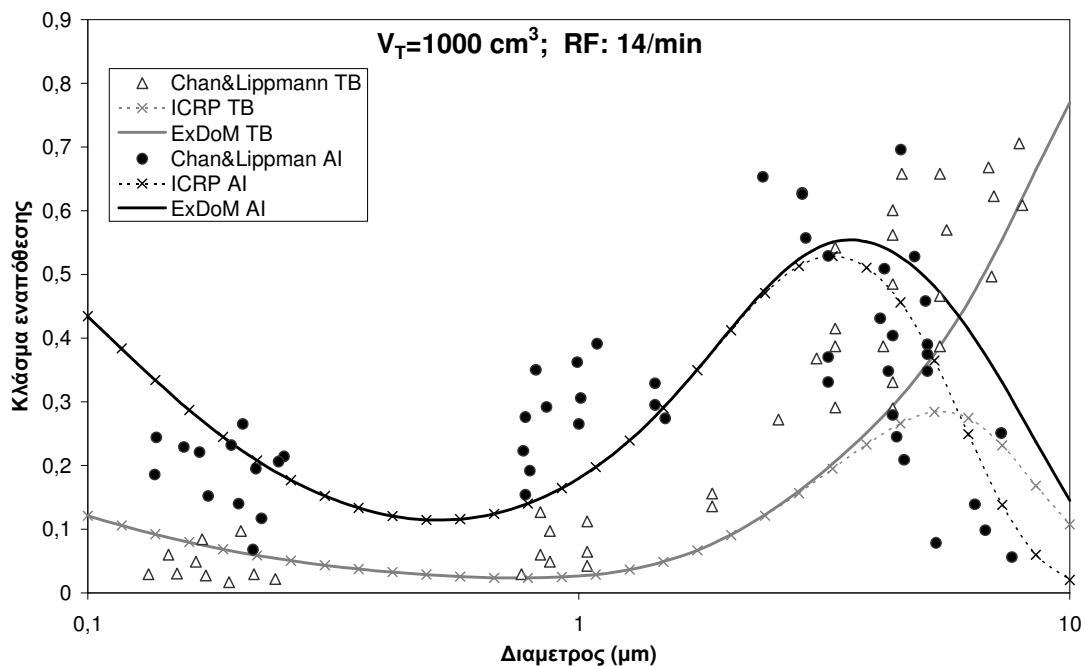
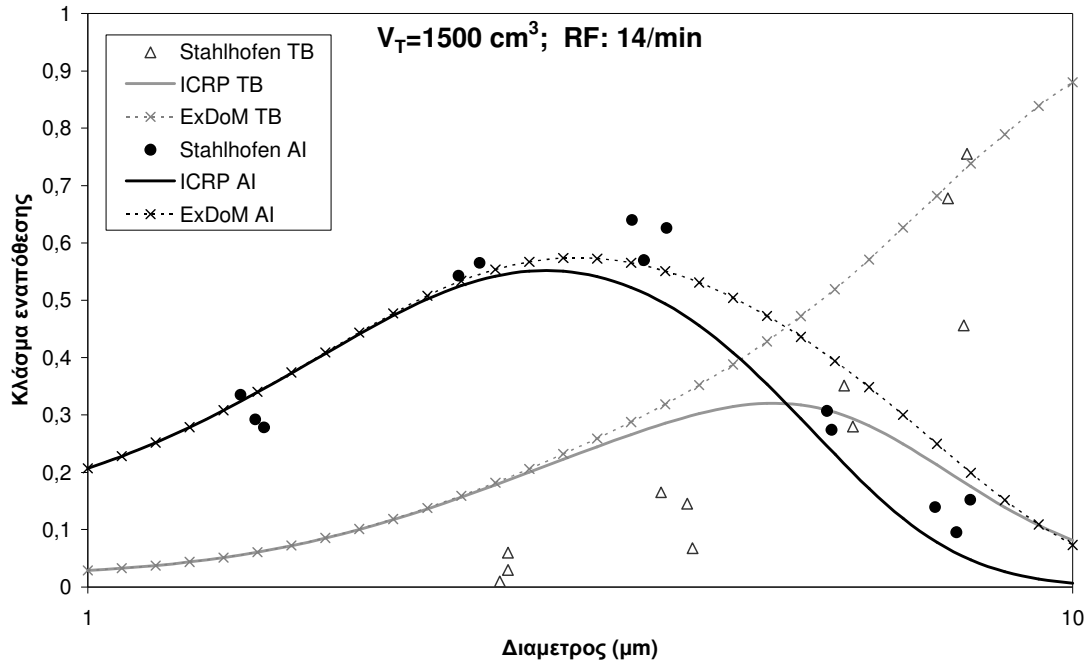
Το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων επιλύεται επαναληπτικά με την μέθοδο απαλοιφής Gauss και εκθετική αντικατάσταση με ρυθμούς μεταφοράς αυτούς που δίνονται στον Πίνακα 12 και ρυθμούς απορρόφησης αυτούς που δίνονται στον Πίνακα 13. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει τους δικούς του ρυθμούς εφόσον το επιθυμεί. Το χρονικό βήμα επίλυσης είναι ίσο με 1/συχνότητα εισπνοής για χρόνο μικρότερο του χρόνου έκθεσης και 1min για χρόνο μεγαλύτερο του χρόνου έκθεσης.

Τα αποτελέσματα εσωτερικής δόσης σε κάθε τμήμα δίνονται κατά την διάρκεια και μετά την έκθεση. Το μοντέλο ExDoM περιλαμβάνει υπολογισμό της συσσώρευσης για σταθερή και μεταβαλλόμενη έκθεση.

4.5. Αξιολόγηση του μοντέλου ExDoM με σύγκριση με πειραματικά δεδομένα από μετρήσεις και με υφιστάμενα μοντέλα

Η αξιολόγηση του μοντέλου ExDoM όσον αφορά στον υπολογισμό της εναπόθεσης έγινε συγκρίνοντας τις τιμές του με τα αποτελέσματα των μοντέλων LUDEP (LUng Dose Evaluation Program version 2.07, υλοποίηση του μοντέλου HRTM της ICRP; Birchall κ.α., 1991) και MPPD (Multiple Path Particle Model – μηχανιστικό μοντέλο; Price κ.α., 2002). Τα δύο παραπάνω μοντέλα συστήνονται από την διεθνή υπηρεσία ακτινοπροστασίας και το Ινστιτούτο για την δημόσια υγεία και το περιβάλλον (RIVM). Επιπλέον το μοντέλο συγκρίθηκε με πειραματικά δεδομένα εναπόθεσης των Chan και Lippman (1980) και Stahlhofen κ.α.

(1980, 1981, 1983). Τα παραπάνω πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε μη καπνίζοντες εθελοντές που εισέπνεαν από το στόμα (όγκος αέρα που λαμβάνεται ανά εισπνοή 1000 cm³ και 1500 cm³, αντίστοιχα, και διάρκεια εισπνοής 4 s).



Εικόνα 10 Εναπόθεση σωματιδίων στην τραχειοβρογχική και την κυφελιδική περιοχή της αναπνευστικής οδού, όπως υπολογίστηκε με τα μοντέλα ExDoM και HRTM της ICRP και από μετρήσεις των Chan και Lippman (1980) και Stahlhofen κ.α. (1980, 1981, 1983).

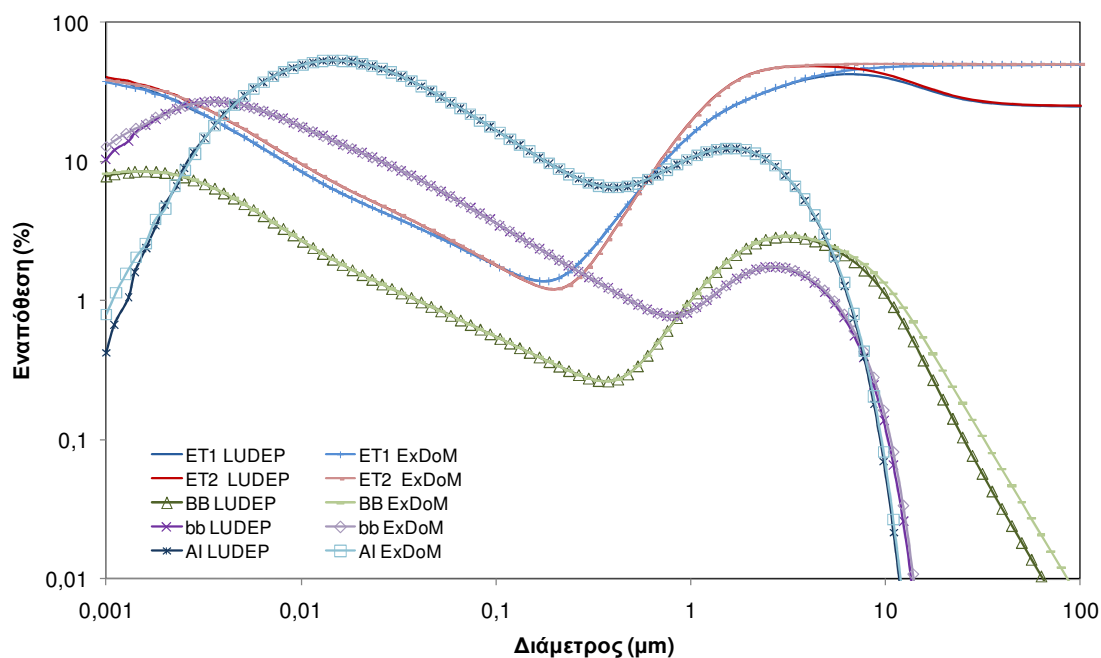
Οι δυνατότητες του μοντέλου ExDoM να προσομοιώνει τους μηχανισμούς εναπόθεσης και καθαρισμού σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα σχετίζονται με την ορθότητα και

εγκυρότητα του θεωρητικού μοντέλου HRTM της ICRP που υλοποιεί. Το μοντέλο αυτό έχει ελεγχθεί με πειραματικές μετρήσεις και προσομοιώσεις ετών και η ορθότητα του δεν εξετάζεται (ICRP, 1994; Reeks κ.α., 2002). Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί πως όσον αφορά στην εναπόθεση έχει βρεθεί ότι το μοντέλο θεωρεί τους αεραγωγούς του αναπνευστικού συστήματος ως ευθείες και δεν υπολογίζει με ακρίβεια την απόθεση στις διακλαδώσεις τους (Reeks κ.α., 2002). Στην Εικόνα 10 συγκρίνονται τα αποτελέσματα του μοντέλου ExDoM με τα πειραματικά δεδομένα που αναφέρθηκαν παραπάνω. Στην Εικόνα 10 δίνονται επιπλέον τα αποτελέσματα του μοντέλου HRTM της ICRP. Το μοντέλο ExDoM συμφωνεί με τα πειραματικά δεδομένα και τα προσεγγίζει καλύτερα από το μοντέλο της ICRP για ΑΣ με διάμετρο μεγαλύτερη από 2,5μm (αναλύεται παρακάτω).

Η ακρίβεια του μοντέλου σχετίζεται με τις ημιεμπειρικές εξισώσεις προσδιορισμού του κλάσματος εναπόθεσης και τις υπολογιστικές διαδικασίες που χρησιμοποιεί στην επίλυση τους. Έτσι το μοντέλο ExDoM συγκρίνεται ως προς τις δυνατότητες και την ακρίβεια του με το ημιεμπειρικό μοντέλο LUDEP που υλοποιεί την ίδια θεωρία. Το μοντέλο LUDEP (LUng Dose Evaluation Program) αποτελεί εμπορική εφαρμογή του μοντέλου HRTM και περιλαμβάνει τον υπολογισμό της εναπόθεσης, της δόσης, του καθαρισμού με μηχανικό τρόπο και της μεταφοράς στο αίμα και σε άλλα όργανα του ανθρώπινου σώματος ραδιενεργών σωματιδίων (Jarvis κ.α., 1996). Στην πραγματικότητα υπολογίζει τη δόση ραδιενεργού ακτινοβολίας α, β και γ στο ανθρώπινο σώμα βάσει της μεταφοράς και απομάκρυνσης των σωματιδίων λαμβάνοντας υπόψη τη σταδιακή μείωση της ακτινοβολίας τους. Αν και αποτελεί ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα καθορισμού δόσης αφορά μόνο στην ακτινοβολία που δέχεται ο οργανισμός από πρόσληψη ραδιενεργών στοιχείων και δεν παρέχει την δυνατότητα στο χρήστη να υπολογίσει την δόση και την συσώρευση στο ΑΑΣ για μη ραδιενεργά σωματίδια. Ακόμα, υπολογίζει το εισπνεύσιμο κλάσμα θεωρώντας μηδενική την ταχύτητα ανέμου στην εξίσωση ICRP criterion (Εξ. 106) και δεν περιλαμβάνει την επιλογή μεταβαλλόμενης έκθεσης. Ωστόσο δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να καθορίσει διάφορα σενάρια δραστηριοτήτων. Οι παράμετροι φυσιολογίας και ανατομίας έχουν τις τιμές αναφοράς για ενήλικα Καυκάσιο άντρα και ο υπολογισμός της εναπόθεσης και δόσης για άτομα άλλου φύλλου, ηλικίας και εθνικότητας μπορεί να γίνει μόνο με απ' ευθείας μεταβολή των παραμέτρων του. Για σωματίδια μικρότερα των 2nm δεν χρησιμοποιεί διόρθωση για το θερμοδυναμικά ισοδύναμο μέγεθος (Εξ. 129). Η μορφολογία του αναπνευστικού συστήματος δίνεται με μέσες τιμές των μορφομετρικών μοντέλων των Weibel (1963), Yeh και Schum (1980), και Phalen κ.α (1985) για την τραχειοβρογχική περιοχή και τιμές από το μοντέλο των Hansen και Ampraya (1975) για την κυψελιδική περιοχή σταθμισμένες για τιμή υπόλοιπης λειτουργικής χωρητικότητας ίσης με $3,3 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ σύμφωνα με τους Yu και Diu (1982) όπως και στο μοντέλο ExDoM.

Στην Εικόνα 11 δίνονται τα ποσοστά εναπόθεσης σε κάθε περιοχή του ΑΑΣ συναρτήσει της διαμέτρου των σωματιδίων που προκύπτουν με τα μοντέλα LUDEP και ExDoM (ενήλικος Καυκάσιος άνδρας σε ήπια εργασία). Παρατηρείται διαφοροποίηση μεταξύ των μοντέλων

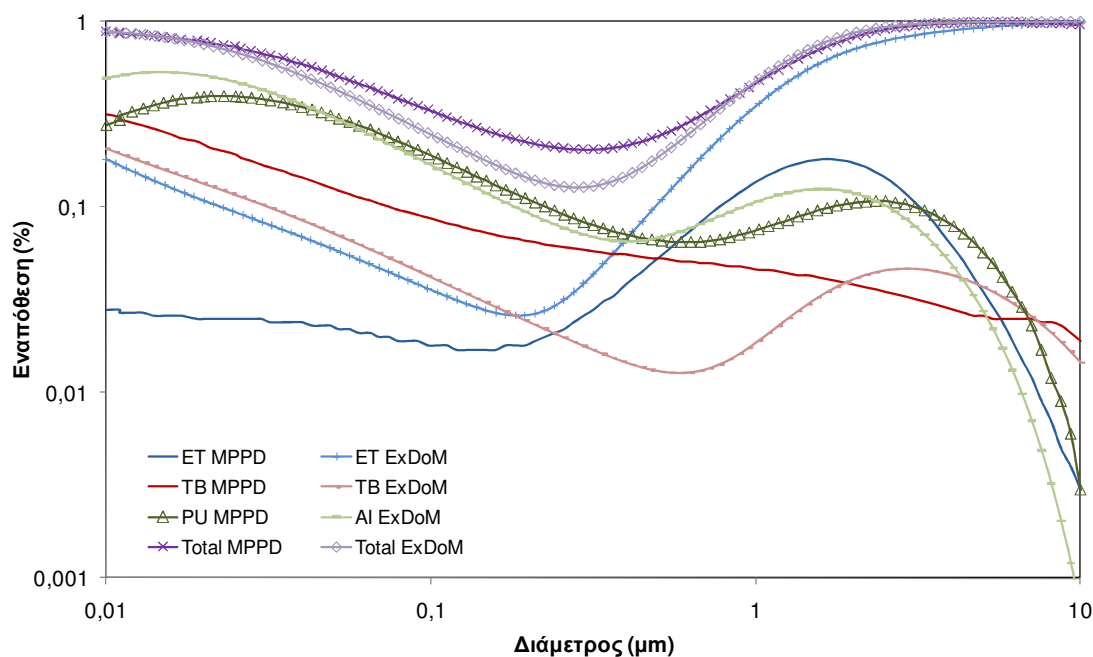
στην εναπόθεση για πολύ μικρά και πολύ μεγάλα σωματίδια. Η διαφορά εναπόθεσης για τα μεγάλα σωματίδια είναι υψηλή αλλά δεν είναι γνωστός ο τρόπος υπολογισμού της στο LUDEP. Ωστόσο για διαμέτρους ως 10 μm τα ποσοστά εναπόθεσης είναι σχεδόν ίσα και έτσι αν θεωρήσουμε το μοντέλο LUDEP ως μοντέλο αναφοράς το μοντέλο ExDoM μπορεί να εφαρμοστεί για έκθεση σε μη ραδιενεργά ΑΣ στην ατμόσφαιρα που ανήκουν στην κλίμακα μεγέθους των ΑΣ₁₀.



Εικόνα 11 Σύγκριση των ποσοστών εναπόθεσης σωματιδίων μεταξύ των μοντέλων ExDoM και LUDEP (ενήλικος Καυκάσιος άνδρας σε ήπια εργασία).

Επιπρόσθετα εξετάστηκε η διαφορά μεταξύ των ποσοστών εναπόθεσης του ημιεμπειρικού μοντέλου ExDoM και του θεωρητικού μοντέλου προσομοίωσης MPPD (Multiple Path Particle Model). Το μοντέλο MPPD μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της εναπόθεσης και καθαρισμού σωματιδίων με διαμέτρους από 0,01 μm - 20 μm στο αναπνευστικό σύστημα των ανθρώπων και των ποντικών. Σε κάθε αεραγωγό και στις διακλαδώσεις τους, η εναπόθεση υπολογίζεται με θεωρητικές εξισώσεις για την διασπορά, καθίζηση και πρόσκρουση των σωματιδίων (Asgharian, Hofmann και Bergmann, 2001). Το εισπνεύσιμο κλάσμα υπολογίζεται με την εξίσωση των Menache κ.α. (1995). Ο καθαρισμός των σωματιδίων από την τραχειοβρογχική περιοχή γίνεται με τη βλέννα ενώ στην κυψελιδική περιοχή χρησιμοποιείται το μοντέλο της ICRP (Asgharian Hofmann και Miller, 2001). Η δομή του ΑΑΣ περιγράφεται με το μοντέλο των Yeh και Schum (1980). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της εναπόθεσης μονοδιάσπορων και πολυδιάσπορων αεροζόλ για σταθερή και μεταβαλλόμενη έκθεση. Ωστόσο ο καθορισμός της συσσώρευσης σωματιδίων δεν μπορεί να υπολογιστεί σε περιπτώσεις μεταβαλλόμενης έκθεσης. Στην Εικόνα 12 δίνονται συγκριτικά τα κλάσματα εναπόθεσης σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος συναρτήσει της διαμέτρου των

σωματιδίων που υπολογίστηκαν με τα μοντέλα MPPD και ExDoM για ενήλικα Καυκάσιο άνδρα που εκτελεί ήπια εργασία.



Εικόνα 12 Σύγκριση των κλασμάτων εναπόθεσης σωματιδίων μεταξύ των μοντέλων ExDoM και MPPD (ενήλικος Καυκάσιος άνδρας σε ήπια εργασία).

Στις Εικόνες 10-12 φαίνεται επιπλέον η επίδραση των διαφόρων μηχανισμών στην εναπόθεση των σωματιδίων στις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος. Τα μικρά σωματίδια αποθέτονται λόγω διασποράς, τα μεγάλα με πρόσκρουση, καθίζηση και πιθανόν αναχαίπιση ενώ τα ΑΣ με ενδιάμεσες διαμέτρους δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από κάποιο μηχανισμό.

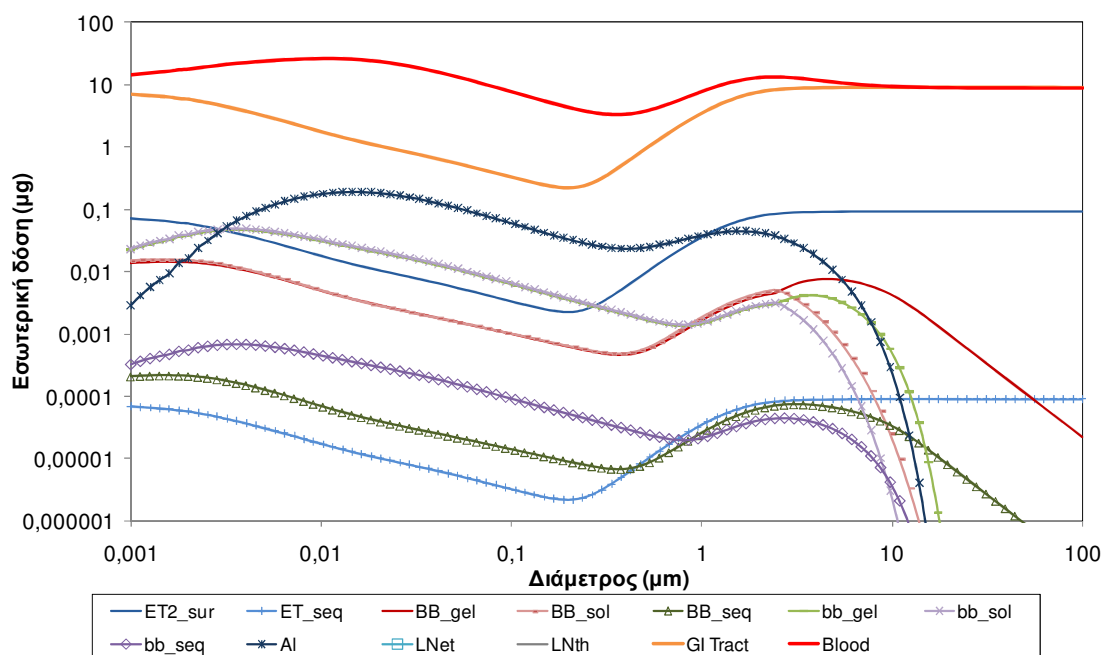
Τα αποτελέσματα της σύγκρισης για την εναπόθεση σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα ενήλικα Καυκάσιου άνδρα που εκτελεί ήπια εργασία (εισπνοή μόνο από τη μύτη) σε περιβάλλον με μηδενική ταχύτητα ανέμου και για σωματίδια σφαιρικά, με πυκνότητα 1 g/cm^3 και διάμετρο $5 \mu\text{m}$ δίνονται στον Πίνακα 20 για μονοδιάσπορο αεροζόλ και για πολυδιάσπορο με τυπική απόκλιση 2,5. Για σωματίδια με διάμετρο $5 \mu\text{m}$ τα αποτελέσματα για την ολική εναπόθεση στο ΑΑΣ του μοντέλου ExDoM είναι υψηλότερα από αυτά του μοντέλου LUDEP κατά 3,3% και μικρότερα κατά 0,1% από αυτά του μοντέλου MPPD. Η διαφορά με το μοντέλο LUDEP οφείλεται στο διαφορετικό εισπνεύσιμο κλάσμα για μηδενική ταχύτητα ανέμου. Για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες από 1 m/s τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων είναι ίσα, με εξαίρεση τα πολύ μικρά και τα πολύ μεγάλα σωματίδια για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Όσον αφορά στη διαφορά με το μοντέλο MPPD, αν και είναι πολύ μικρή, οφείλεται στον διαφορετικό τρόπο υπολογισμού των ποσοστών εναπόθεσης, και την διαφορετική μορφολογία του αναπνευστικού συστήματος. Για πολυδιάσπορα αεροζόλ η διαφορά με το μοντέλο LUDEP αυξάνεται σημαντικά σε 11,8% για την ολική εναπόθεση εξαιτίας των διαφορών στον τρόπο υπολογισμού της εναπόθεσης για πολύ μικρά σωματίδια

(<2nm) και του εισπνεύσιμου κλάσματος. Η διαφορά με το μοντέλο MPPD είναι 0,15% και οφείλεται στους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Πίνακας 20 Ποσοστά εναπόθεσης (%) μονοδιάσπορων και πολυδιάσπορων αεροζόλ με μέση διάμετρο 5μm ($\sigma_g = 2.5$) στα τμήματα του αναπνευστικού συστήματος, υπολογισμένα με τα μοντέλα ExDoM, LUDEP (HRTM) και MPPD. Οι τιμές στις παρενθέσεις δίνουν το ποσοστό των σωματιδίων που αποτίθενται στην μύτη για την εκτός θώρακα περιοχή και στην τραχεία και τους βρόγχους για την τραχειοβρογχική περιοχή.

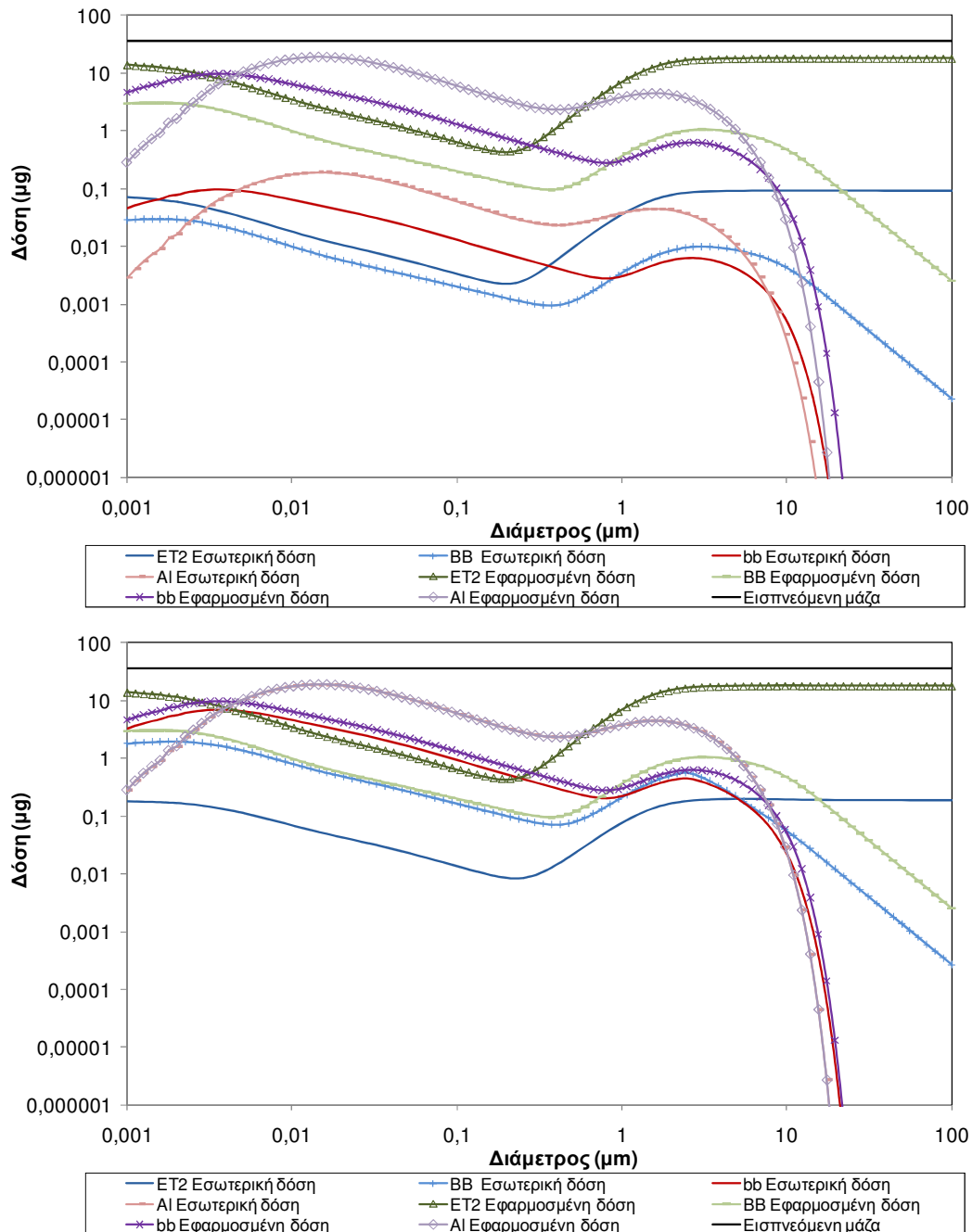
	5 μm			5 μm ($\sigma_g = 2,5$)		
	ExDoM	LUDEP	MPPD	ExDoM	LUDEP	MPPD
ET	92,76 (43,14)	89,78 (41,76)	91,00	85,41 (39,56)	75,73 (34,79)	84,10
TB	3,72 (2,57)	3,59 (2,48)	2,60	2,78 (1,88)	2,68 (1,80)	2,80
AI	2,77	2,68	5,80	4,45	4,46	5,60
Total	99,25	96,05	99,40	92,64	82,87	92,50

Η εσωτερική δόση σωματιδίων στο ΑΑΣ ενήλικα Καυκάσιου άνδρα που εκτελεί ήπια εργασία και εκτίθεται σε σωματίδια διαφορετικών διαμέτρων με μέση ημερήσια συγκέντρωση $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ για μία ημέρα σε ταχύτητα ανέμου 0m/s δίνεται στην Εικόνα 13. Επιπλέον δίνεται και η μάζα που έχει απομακρυνθεί στο αίμα, το γαστρεντερικό σύστημα ή στους λεμφαδένες. Τα σωματίδια θεωρείται πως διαλύονται και απορροφούνται γρήγορα στο αίμα.



Εικόνα 13 Εσωτερική δόση ΑΣ στο ΑΑΣ και μάζα που έχει απομακρυνθεί στο αίμα, το γαστρεντερικό σύστημα και τους λεμφαδένες για συστατικά που απορροφούνται γρήγορα στο αίμα. Η ερμηνεία των όρων του υπομνήματος δίνεται στον Πίνακα 11.

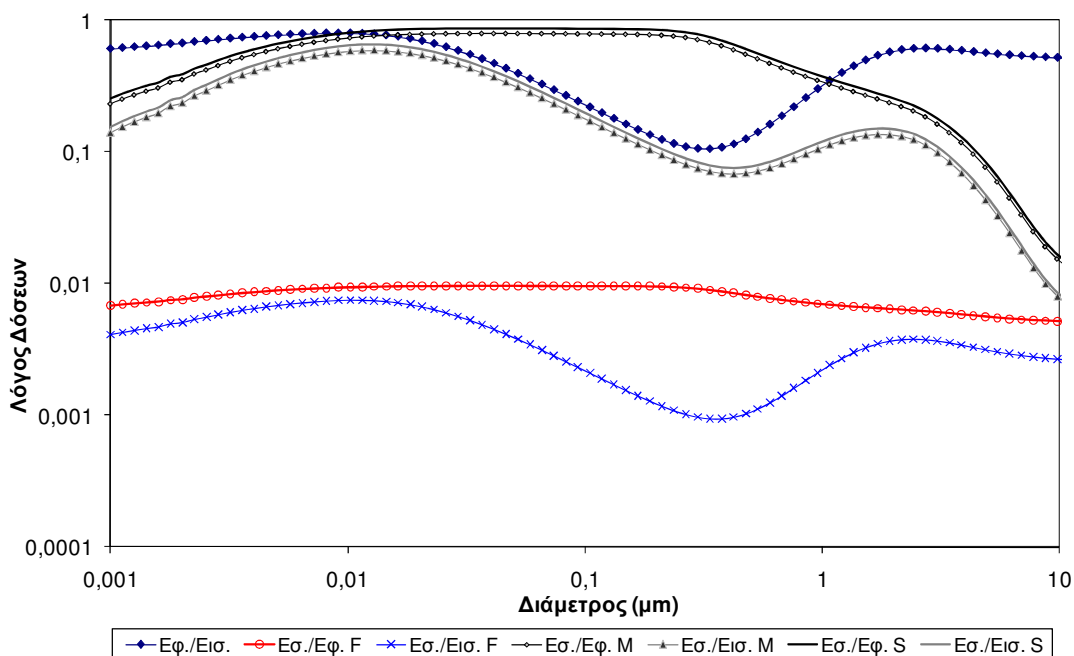
Τα αποτελέσματα του μοντέλου απομάκρυνσης για σωματίδια διαφόρων διαμέτρων συγκρίθηκαν με αποτελέσματα του μοντέλου MPPD για την εσωτερική δόση στην τραχειοβρογχική και κυψελιδική περιοχή του ΑΑΣ και στους λεμφαδένες. Τα αποτελέσματα τους διαφέρουν κι αυτό οφείλεται στον διαφορετικό τρόπο υπολογισμού της απομάκρυνσης στην τραχειοβρογχική περιοχή αλλά και της εφαρμοσμένης δόσης που δέχεται αρχικά το ΑΑΣ. Το μοντέλο απομάκρυνσης ακόμα αναμένεται να δίνει λίγο διαφορετικά αποτελέσματα από το HRTM εξαιτίας της διαφορετικής εφαρμοσμένης δόσης. Ωστόσο, το μοντέλο βασίζεται στο μοντέλο της HRTM



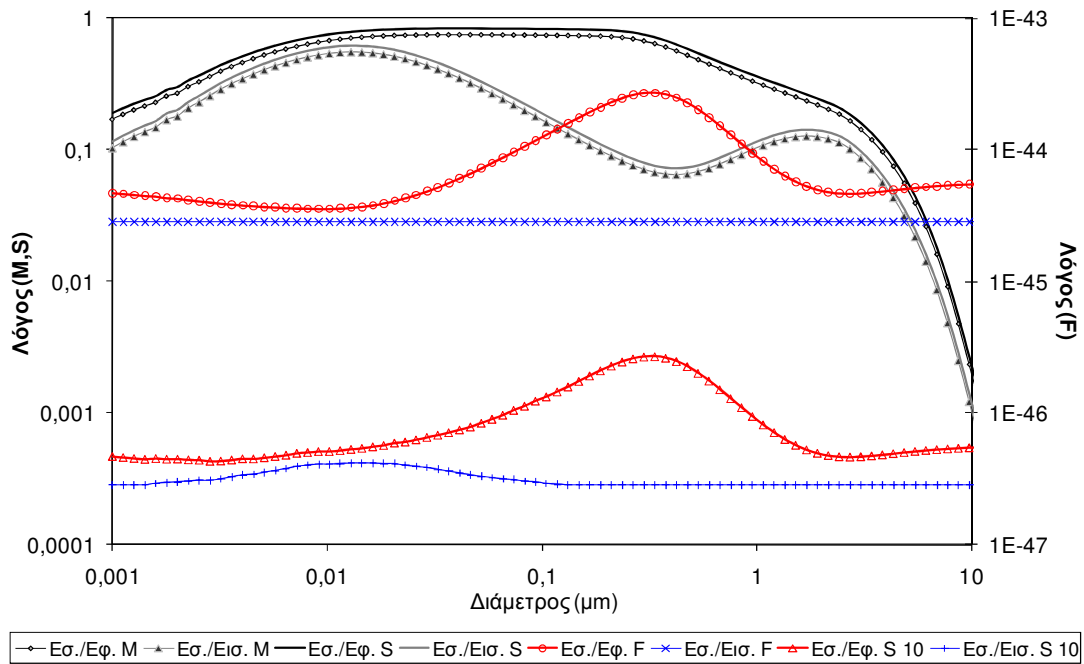
Εικόνα 14 Εισπνεόμενη, εφαρμοσμένη και εσωτερική δόση ΑΣ στο ΑΑΣ για συστατικά που απορροφούνται με γρήγορο και αργό ρυθμό και στο αίμα (ενήλικος Καυκάσιος άνδρας σε ήπια εργασία).

Με τη βοήθεια του μοντέλου ExDoM μπορεί να προσδιοριστεί η σχέση μεταξύ εισπνεόμενης, εφαρμοσμένης και εσωτερικής δόσης. Ένα παράδειγμα υπολογισμού δίνεται στην Εικόνα 13 για ενήλικο Καυκάσιο άνδρα που εκτελεί ήπια εργασία. Στα διαγράμματα της Εικόνα 14 δίνεται η εισπνεόμενη μάζα σωματιδίων, η εφαρμοσμένη και εσωτερική δόση για σωματίδια που λόγω της χημικής τους σύστασης απομακρύνονται με γρήγορο και αργό ρυθμό στο αίμα (χρησιμοποιώντας τις τυπικές τιμές ρυθμού απορρόφησης του Πίνακα 13).

Στην Εικόνα 15 δίνεται ένα παράδειγμα της επίδρασης της χημικής σύστασης και της διαμέτρου AS_{10} στην σχέση εισπνεόμενης, εφαρμοσμένης και εσωτερικής δόσης. Ωστόσο καθώς η απομάκρυνση των σωματιδίων εξαρτάται από το αρχικό φορτίο που δέχεται το ΑΑΣ η σχέση εσωτερικής με εφαρμοσμένη και εισπνεόμενη δόση μεταβάλλεται μετά το τέλος της έκθεσης. Στην Εικόνα 16 φαίνεται η επίδραση της χημικής σύστασης των σωματιδίων και της διαμέτρου τους στην σχέση εισπνεόμενης, εφαρμοσμένης και εσωτερικής δόσης για μέση ημερήσια συγκέντρωση $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ και $10\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1 ημέρα μετά το τέλος της έκθεσης. Για τα σωματίδια που απομακρύνονται με μέσο και αργό ρυθμό οι λόγοι παραμένουν σχεδόν αμετάβλητοι αφού ο χρόνος ημιζωής τους στο ΑΑΣ είναι πολύ μεγαλύτερος από τη 1 ημέρα. Ανάλογα διαγράμματα μπορούν να προκύψουν και για άλλες συνθήκες έκθεσης και εκτεθειμένο άτομα. Τα διαγράμματα αυτά δείχνουν την ανάγκη για την ύπαρξη ενός μοντέλου καθορισμού της εσωτερικής δόσης καθώς ο προσδιορισμός της δεν μπορεί να γίνει απλά με εμπειρικές εξισώσεις ειδικά σε περιπτώσεις μεταβαλλόμενης έκθεσης.



Εικόνα 15 Σχέση εισπνεόμενης, εφαρμοσμένης και εσωτερικής δόσης AS_{10} στο ΑΑΣ για συστατικά που απορροφούνται γρήγορα (F), με μέσο ρυθμό (M) και αργά (S) στο αίμα (έκθεση για 1 ημέρα με μέση συγκέντρωση $1\mu\text{g}/\text{m}^3$).



Εικόνα 16 Σχέση εισπνεόμενης, εφαρμοσμένης και εσωτερικής δόσης ΑΣ στο ΑΑΣ 1 ημέρα μετά το τέλος της έκθεσης για συστατικά που απορροφούνται γρήγορα (F), με μέσο ρυθμό (M) και αργά (S) στο αίμα (έκθεση για 1 ημέρα με μέση συγκέντρωση $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ και $10\mu\text{g}/\text{m}^3$).

5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1. Εφαρμογή 1: Εκτίμηση της έκλυσης ρύπων στην ατμόσφαιρα της ευρύτερης περιοχής Αθηνών (ΕΠΑ) από ανθρωπογενείς και φυσικές πηγές

Η ευρύτερη περιοχή Αθηνών αντιμετωπίζει πρόβλημα ατμοσφαιρικής ρύπανσης όπως και οι περισσότερες μητροπολιτικές περιοχές στον κόσμο. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της μεγάλης συγκέντρωσης πληθυσμού, της συσσώρευσης οικονομικών δραστηριοτήτων στην περιοχή, αλλά και της τοπογραφίας της (λεκανοπέδιο που περιβάλλεται από βουνά και είναι ανοιχτό προς τη θάλασσα μόνο στο Νότο) που ευνοεί την συσσώρευση ατμοσφαιρικών ρυπαντών στην πόλη. Επιπλέον κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού η αυξημένη ηλιακή ακτινοβολία οδηγεί σε υψηλά επίπεδα φωτοχημικής ρύπανσης της ατμόσφαιρας (ΥΠΕΚΑ, 2007). Η ποσοτικοποίηση της έκλυσης ρύπων στην ατμόσφαιρα της ΕΠΑ από ανθρώπινες και φυσικές πηγές είναι ένα σημαντικό βήμα για την βελτίωση της ποιότητας του αέρα στην περιοχή.

Στο παρελθόν έχουν κατασκευαστεί μητρώα εκπομπών για την Ελλάδα ή μόνο την ΕΠΑ χρησιμοποιώντας τόσο την τεχνική από την κορυφή προς τα κάτω όσο και την αντίστροφη. Αναλυτικότερα, ο Hayman κ.α. (2001) κατασκεύασαν μητρώα αέριων εκπομπών για μεγάλες αστικές περιοχές της νότιας Ευρώπης, συμπεριλαμβανομένης και της ΕΠΑ, χρησιμοποιώντας τεχνικές από την κορυφή προς τα κάτω στα πλαίσια του προγράμματος IMPRESAREO για την βελτίωση της χωρικής ανάλυσης των μητρώων εκπομπών αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα. Οι Aleksandropoulou και Lazaridis (2004) δημιούργησαν ένα μητρώο εκπομπών αέριων και σωματιδίων από ανθρωπογενείς και φυσικές πηγές για την Ελλάδα το οποίο εξετάστηκε όσον αφορά στην εγκυρότητα του από την Spyridaki κ.α. (2006). Ο Symeonidis κ.α. (2004) πραγματοποίησαν απογραφή των αέριων εκπομπών από τις οδικές μεταφορές στην Ελλάδα. Η Ρουρκου κ.α. (2007) ανέπτυξαν ένα μητρώο αέριων εκπομπών με χωρική και χρονική διακρίσιμότητα για την Νότια Βαλκανική χερσόνησο, και ο Symeonidis κ.α. (2008) υπολόγισαν τις εκπομπές των βιογενών ΠΟΕ στην ίδια περιοχή. Τέλος η Sotiropoulou κ.α. (2004) υπολόγισαν τις εκπομπές και την χωρική κατανομή των εκπομπών αμμωνίας από γεωργοκτηνοτροφικές δραστηριότητες στην ΕΠΑ. Πρόσφατα, ο Markakis κ.α. (2010) παρουσίασαν ένα μητρώο εκπομπών αέριων ρύπων από ανθρωπογενείς δραστηριότητες στην Ελλάδα. Τα παραπάνω μητρώα αέριων εκπομπών αφορούν παλιά έτη, καλύπτουν μερικώς τις πηγές εκπομπών ή/και τους ρύπους στην περιοχή και στα περισσότερα οι εκπομπές δεν διακρίνονται χωρικά, χρονικά και χημικά.

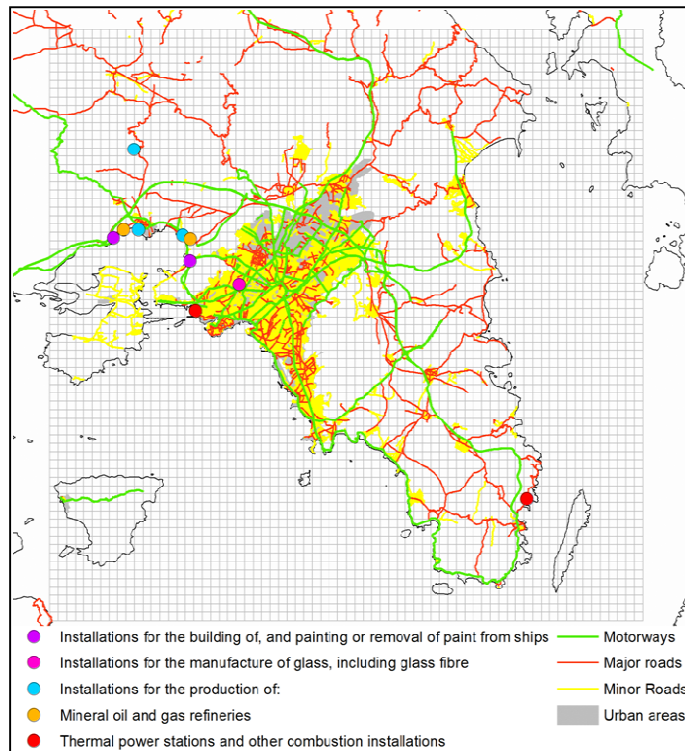
Στην συγκεκριμένη εφαρμογή δημιουργήθηκε ένα μητρώο εκπομπών αέριων ρύπων (NO_x, SO_x, NMVOCs, CO, NH₃) και σωματιδίων (A_{Σ_{2,5}} και A_{Σ_{2,5-10}}) από ανθρώπινες και φυσικές πηγές στην ατμόσφαιρα της ΕΠΑ. Οι εκπομπές διακρίνονται χωρικά, χρονικά και χημικά με τη

βοήθεια της εφαρμογής Sources που αναπτύχθηκε. Σε παλαιότερες εφαρμογές (Aleksandroulou κ.α., 2008) οι εκπομπές από ανθρώπινες δραστηριότητες αφορούσαν το έτος 2006 και η χωρική τους κατανομή είχε πραγματοποιηθεί με την απλή μέθοδο που αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2. Τα αποτελέσματα είχαν χρησιμοποιηθεί στο μοντέλο CMAQ για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων αερίων και σωματιδίων στην ατμόσφαιρα της ΕΠΑ στις 14/01/08. Με τη βοήθεια της εφαρμογής το μητρώο εκπομπών επικαιροποιήθηκε (έτος βάσης 2007) και η χωρική κατανομή τους υπολογίστηκε με τις μεθόδους που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2 χρησιμοποιώντας αντιπροσωπευτικά χωρικά δεδομένα (έτος βάσης 2007; Goodwin κ.α., 2009).

5.1.1. Σύντομη περιγραφή της περιοχής και των πηγών ρύπανσης

Οι εκπομπές εκτιμήθηκαν για την ΕΠΑ (Εικόνα 17; 4900 km² domain) που περιλαμβάνει την πόλη της Αθήνας με 2664776 κατοίκους, καθώς και πολλούς δήμους της Ανατολικής και Δυτικής Αττικής και την πόλη του Πειραιά με συνολικό πληθυσμό 1097034 κατοίκων (Ελληνική Στατιστική Αρχή, Απογραφή πληθυσμού 2001; ΕΛ.ΣΤΑΤ, 2002). Η πυκνότητα πληθυσμού στην ΕΠΑ κυμαίνεται από 1 έως 351 κατοίκους/km², με τις υψηλότερες τιμές να παρατηρούνται στην Αθήνα και τον Πειραιά (δεδομένα πυκνότητας πληθυσμού Popu01c1cn5, σε μορφή καννάβου με ανάλυση 100×100 m² από τον ΕΕΑ βασισμένα στην απογραφή πληθυσμού κατά τοπική διοικητική μονάδα των ετών 2000-2001; EC, 2009). Οι κύριες οικονομικές δραστηριότητες στην περιοχή, σε φθίνουσα σειρά βάσει του οικονομικά ενεργού πληθυσμού που απασχολείται σε αυτές, είναι οι υπηρεσίες και το εμπόριο, η βιομηχανία, οι κατασκευές, και σε πολύ μικρό ποσοστό η γεωργία, κτηνοτροφία και αλιεία (ΕΛ.ΣΤΑΤ, 2001).

Στην Εικόνα 17, δίνεται ακόμα ο χάρτης του οδικού δικτύου στην περιοχή μελέτης (πρόγραμμα Openstreetmap, 2009, συμπληρωμένα και τροποποιημένα ως προς τον τύπο των οδών. Τα στοιχεία αυτά έχουν βρεθεί σχετικά ακριβή σε σύγκριση με επίσημα στοιχεία από χάρτες της γεωγραφική υπηρεσίας στρατού; Kounadi, 2009). Οι οδικές μεταφορές είναι μια από τις σημαντικότερες πηγές ρύπανσης (υπεύθυνη για το 55% της ατμοσφαιρικής ρύπανσης) στην ΕΠΑ. Αναλυτικότερα, η ΕΠΑ έχει ένα πυκνό οδικό δίκτυο στο οποίο κυκλοφορούν περίπου 2 εκατομμύρια οχήματα (Diarouli κ.α., 2008). Επιπλέον, σημαντικές πηγές ρύπανσης στην περιοχή είναι η κεντρική θέρμανση τον χειμώνα (30%), και οι βιομηχανίες (15%). Οι τιμές συμμετοχής κάθε πηγής στην ατμοσφαιρική ρύπανση της ΕΠΑ βασίζονται σε στατιστικά στοιχεία κατανάλωσης καυσίμων (1995) και συντελεστές εκπομπής ρύπων του ΥΠΕΚΑ (Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής; πρώην ΥΠΕΧΩΔΕ, 2007).

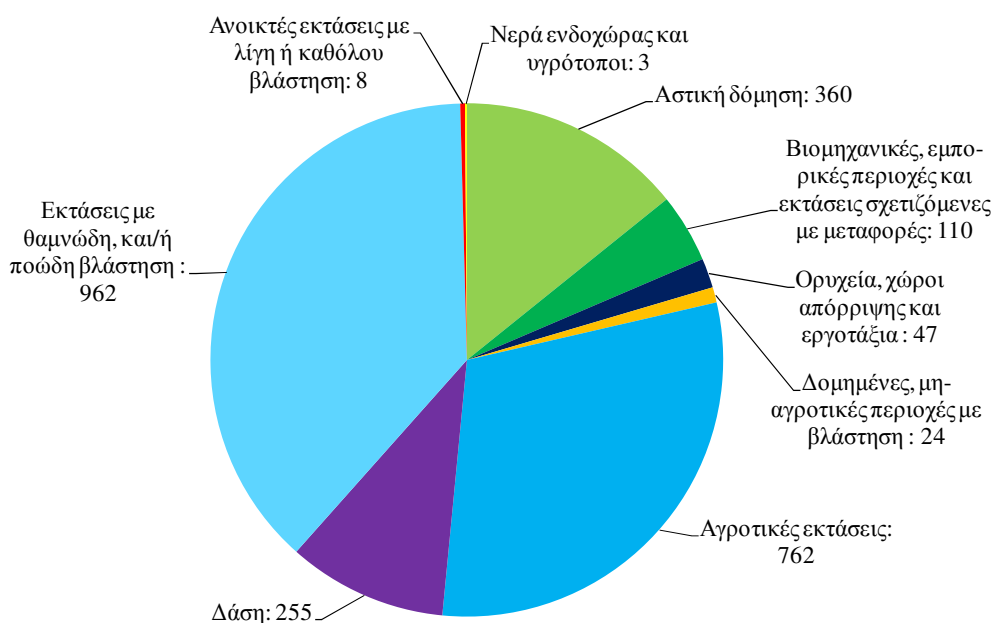


Εικόνα 17 Χάρτης της ΕΠΑ με τις μεγάλες σημειακές πηγές, τις αστικές ζώνες και το οδικό δίκτυο. Επιπλέον δίνεται το πλέγμα που καλύπτει την περιοχή μελέτης.

Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό μητρώο έκλυσης και μεταφοράς ρύπων (E-PRTR, 2009) υπάρχουν 10 μεγάλες σημειακές πηγές (LPS) που εκλύουν ρύπους (κύριοι ρύποι: NO_x , SO_x , ΠΟΕ, CO , NH_3 , και $\text{A}\Sigma_{10}$) στην ατμόσφαιρα της περιοχής μελέτης (δίνονται στην Εικόνα 17). Αναλυτικότερα, στην περιοχή υπάρχουν δύο εργοστάσια παραγωγής ενέργειας της Δ.Ε.Η., τρία εργοστάσια παραγωγής τσιμεντοκονιάματος και δομικών υλικών, μια μονάδα παραγωγής γυαλιού και προϊόντων του, δύο ναυπηγεία και δύο διυλιστήρια πετρελαίου. Οι περισσότερες από τις σημειακές πηγές βρίσκονται στην δυτική Αττική και τον Πειραιά, και ένα εργοστάσιο της Δ.Ε.Η. στην ανατολική Αττική. Στην περιοχή υπάρχουν τέσσερις ακόμα μεγάλες σημειακές πηγές εκπομπής ρύπων στην ατμόσφαιρα (μια μονάδα διαχείρισης αστικών απορριμμάτων, δύο μεγάλες μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, και μια μονάδα θερμικής επεξεργασίας νοσοκομειακών αποβλήτων) που ωστόσο σύμφωνα με το E-MEMP εκλύουν κυρίως μεθάνιο και υδράργυρο στην ατμόσφαιρα και έτσι δεν λαμβάνονται υπόψη στην παρούσα μελέτη.

Η γεωργία καθώς και η φυσική βλάστηση συμμετέχουν στην ατμοσφαιρική ρύπανση της περιοχής με την έκλυση NH_3 και ΠΟΕ. Η περιοχή στην Εικόνα 17 καλύπτεται κατά 51,56% από στεριά, από την οποία περίπου 21,4% είναι τεχνητές επιφάνειες, 30,1% καλύπτεται από αγροτικές εκτάσεις, 48,4% από δάση και ημι-φυσικές περιοχές και το υπόλοιπο 0,1% από εσωτερικά ύδατα (οι τιμές έχουν υπολογιστεί από τα στοιχεία εδαφοκάλυψης EEA Corine Land Cover; CLC2000, v12/2009 σε διανυσματική μορφή; EEA CLC2000; 2009). Η εδαφοκάλυψη στην ΕΠΑ δίνεται στην Εικόνα 18 σε km^2 που καλύπτονται από κάθε

κατηγορία, εκτός από τα νερά. Η βλάστηση είναι σχετικά πυκνή στην ανατολική Αττική ενώ στην δυτική Αττική και την Αθήνα είναι σχετικά αραιή. Οι αγροτικές περιοχές ταξινομούνται κυρίως ως ετερογενείς αγροτικές εκτάσεις με σύνθετες καλλιέργειες (53,7%) και περιοχές με φυσική βλάστηση (29,7%). Τα υπόλοιπα 126,65 km² καλύπτονται κυρίως από μη-αρδευόμενες αρόσιμες εκτάσεις (43,6%) και μόνιμους καρπούς (55,9%) από τους οποίους το 74% είναι αμπελώνες, 18,4% είναι ελαιώνες και 7,6% οπωρώνες. Επιπρόσθετα, οι φυσικές περιοχές καλύπτονται κυρίως από θαμνώδη και ποώδη βλάστηση (78,6%) ενώ 20,8% από δάση (90% κωνοφόρα) και μόλις 0,6% από γυμνούς θάμνους και εκτάσεις με αραιή βλάστηση.



Εικόνα 18 Η εδαφοκάλυψη των ηπειρωτικών εκτάσεων στην ΕΠΑ (km² που καλύπτονται από κάθε κατηγορία).

5.1.2. Χωρική και χρονική κατανομή των εκπομπών από ανθρωπογενείς πηγές ρύπανσης

Οι ανθρωπογενείς εκπομπές αποδόθηκαν στο πλέγμα υψηλής χωρικής διακριτότητας, με 70x70 πλεγματικά κελιά και χωρική ανάλυση 1x1 km² (LCC projection, false easting: 747635 m, false northing: 4202726 m, central meridian: 23.8179, standard parallel 1: 30, standard parallel 2: 60, scale factor: 1, latitude of origin: 37.9384, GCS_European_1950), που καλύπτει την ΕΠΑ (Εικόνα 17). Η χρονική διακριτότητα του μητρώου εκπομπών που κατασκευάστηκε είναι 1h, κατάλληλη για εισαγωγή των στοιχείων σε φωτοχημικά μοντέλα ποιότητας αέρα.

Οι ανθρωπογενείς εκπομπές εκτιμήθηκαν για το έτος 2007 και για τις 14/01/08 με έτος βάσης το 2007. Τα ετήσια δεδομένα εκπομπών (tn/yr) για τους ρύπους NO_x, SO_x, POE, CO, NH₃, AΣ_{2,5} και AΣ_{2,5-10} από τη βάση δεδομένων ΕΜΕΡ/LRTAP (πλεγματικά κελιά ΕΜΕΡ (103,44) έως (105,45); οι τιμές των εκπομπών για κάθε ρύπο ανά κελί του ΕΜΕΡ δίνονται στον Πίνακα 1 του Παρατήματος Β) κατανεμήθηκαν χωρικά στην περιοχής μελέτη. Στη συνέχεια οι ετήσιες εκπομπές κατανεμήθηκαν χρονικά για την εξαγωγή ωριαίων εκπομπών. Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε τόσο για την χωρική όσο και για την χρονική κατανομή των εκπομπών περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2. Επιπλέον των στοιχείων εδαφοκάλυψης, πυκνότητας πληθυσμού, τοποθεσίας και ποσότητας έκλυσης από μεγάλες σημειακές πηγές, που αναλύθηκαν παραπάνω (Εικόνα 1 του Παρατήματος Β), για την κατανομή των εκπομπών από ανθρωπογενείς πηγές χρησιμοποιήθηκαν συντελεστές βαρύτητας ανά κατηγορία πηγής και εδαφοκάλυψης που είχαν προκύψει παλαιότερα για τις εκπομπές στην περιοχή της Αττικής (Dore κ.α., 2001; Winiwarter κ.α., 2000 και 2001). Ο διαχωρισμός των εκπομπών AΣ₁₀ του μητρικού E-MEMP σε AΣ_{2,5} και AΣ_{2,5-10} πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τον λόγο εκπομπών AΣ_{2,5}/AΣ₁₀ από την βάση δεδομένων του ΕΜΕΡ/LRTAP (≈0,64 για την κατηγορία πηγών 1, ≈0,23 για την κατηγορία πηγών 3, ≈0,37 για την κατηγορία πηγών 4, και ≈0,65 για την κατηγορία πηγών 10) και από την βάση δεδομένων ΤΝΟ (≈0,63 για την κατηγορία πηγών 6; Berdowski κ.α., 1998).

Πίνακας 21 Πληθυσμός ζώων και συντελεστές εκπομπής αερίων και σωματιδίων από την εκτροφή τους.

Είδος	Αριθμός κεφαλών			Συντελεστής εκπομπής (kg/κεφαλή yr)				
	ΒΟΙΩΤΙΑ	ΕΥΒΟΙΑ	ΑΤΤΙΚΗ ^α	NH ₃	NO	ΠΟΕ	AΣ ₁₀	AΣ _{2,5}
Αγελάδες γαλακτοπαραγωγής	2053	1651	4243	34	0,0805	13,6		
Άλλα βοοειδή	2735	3173	1235	11,3	0,048	7,4	0,36	0,23
Προβατοειδή	143102	213154	137458	1,4	0,005	0,2	0,24	0,16
Αιγοειδή	110941	208007	68532	1,4	0,005			
Χοίροι	44943	76370	20583	11,98	0,0364	8,6		
Ιπποειδή	598	2368	1661	14,8	0,131		0,54	0,085
Κουνέλια	3909	16738	29818	0,02	0,0002		0,18	0,12
Όρνιθες	1877786	1999530	3585420	0,35	0,001367	0,3		
Άλλα πουλερικά	360	146	132	0,95	0,004	0,9	0,017	0,0021
Ινδιάνοι	474	968	1409	0,95	0,005	0,9	0,032	0,004
Χήνες	221	363	322	0,35	0,001	0,9	0,032	0,004
Πάπιες	619	1014	917	0,68	0,004	0,9	0,032	0,004
Περιστερία ^β	20534	21866	39207				0,032	0,004

^α Σύνολο νομών Αθηνών Ανατολικής Αττικής, Δυτικής Αττικής και Πειραιώς

^β≈1,08% των πουλερικών

Όπως αναφέρθηκε στη μεθοδολογία οι εκπομπές αμμωνίας από τη γεωργία έχουν βρεθεί υποεκτιμημένες στην βάση δεδομένων EMEP/LRTAP σε σύγκριση με το μητρώο εκπομπών για το έτος 1996 στην ΕΠΑ της Sotiropoulou κ.α. (2004). Έτσι οι εκπομπές NH₃ και ΠΟΕ από την γεωργία (χρήση λιπασμάτων, φυτά χωρίς τη χρήση λιπασμάτων και εκτροφή ζώων) υπολογίστηκαν με τη μέθοδο που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2. Οι συντελεστές εκπομπής λήφθηκαν από την Sotiropoulou κ.α. (2004) και τον Οδηγό απογραφής αερίων εκπομπών (EMEP/EEA, 2009). Ο πληθυσμός των ζώων κάθε νομού σύμφωνα με στοιχεία της βάσης δεδομένων της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής (ΕΛ.ΣΤΑΤ; τα κενά στοιχεία για το έτος 2007 συμπληρώθηκαν με στοιχεία του έτους 2006) μαζί με τους συντελεστές εκπομπής που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται στον Πίνακα 21. Σημειώνεται πως στο πλήθος των ζώων που δίνονται στον Πίνακα 21 περιλαμβάνονται και αυτά των μεγάλων κτηνοτροφικών μονάδων της περιοχής (δεν υπάρχουν χωριστά στοιχεία διαθέσιμα). Έτσι για την απόδοση των εκπομπών από την εκτροφή ζώων στις αγροτικές εκτάσεις της περιοχής μελέτης αφαιρούνται αρχικά οι εκπομπές των μεγάλων κτηνοτροφικών μονάδων που περιλαμβάνονται στο μητρώο E-MEMP.

Πίνακας 22 Αγροτικές εκτάσεις (ha) και ποσότητα (kg N) εφαρμοζόμενου λιπάσματος ανά έτος.

Είδος Καλλιέργειας (έκταση σε ha)	Έκταση ανά περιοχή (ha)			Λίπασμα (kg N/ha yr)
	ΒΟΙΩΤΙΑ	ΕΥΒΟΙΑ	ΑΤΤΙΚΗ ^α	
Σιτάρι	24954,3	12079,5	5799,7	170 ^β
Κριθάρι	1851	3914,4	1063,5	75
Καλαμπόκι	2499,5	1471,8	1	190
Άλλα δημητριακά	555	2104,9	270,4	85
Όσπρια	511	903,3	118,6	40
Κτηνοτροφικές Καλλιέργειες	11795,3	8253,2	2161,7	43,4
Βαμβάκι	27948,5	1612,1	750	170 ^β
Ηλίανθος	0	1	14	50
Ζαχαρότευτλα	0	2	0	140
Πατάτες	2665,3	3168,8	711,4	200
Δένδρα εσπεριδοειδή, και ελαιώνες	19203,2	29206,9	24294,3	300 ^γ
Δένδρα οπ,	20,6	393,3	126,9	57
Αμπέλια	3788,9	3580,8	7519,9	10
Λαχανικά	7894,8	5706,4	6743	170
Αγρανάπαυση	2941,1	12395,8	26442	4,3 ^δ
Αρωματικά φυτά	0	239,6	0	4,3 ^δ
Άγνωστα	0	5,7	0	4,3 ^δ

^α Σύνολο νομών Αθηνών, Ανατολικής Αττικής, Δυτικής Αττικής και Πειραιώς

^β Sotiropoulou κ.α., 2004

^γ FAO FertiStat, 2007

^δ Εκπεμπόμενη ποσότητα kg NH₃/ha

Η γεωργική έκταση που καταλαμβάνει κάθε είδος καλλιέργειας ανά νομό (μικρότερη χωρική μονάδα στη βάση δεδομένων της ΕΛ.ΣΤΑΤ.) σύμφωνα με την Ελληνική Στατιστική Αρχή το έτος 2007 στην ΕΠΑ μαζί με την ετήσια ποσότητα Ν που δέχονται (kg N/ha yr) δίνονται στον Πίνακα 22. Το ποσοστό του αζώτου στο λίπασμα που εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα ως αμμωνία θεωρήθηκε 5% (Sotiropoulou κ.α., 2004) ενώ οι ΠΟΕ που εκπέμπονται ανά kg εφαρμοσμένου Ν είναι $5,95539 \times 10^{-9}$ kg σύμφωνα με τον Οδηγό CORINAIR (EMEP/ΕΕΑ, 2009). Οι εκπομπές από τα φυτά σε περιοχές όπου δεν γίνεται χρήση λιπασμάτων θεωρούνται ίσες με 4,3 kg/ha (Sotiropoulou κ.α., 2004).

Οι εκπομπές κάθε τύπου υπολογίστηκαν χωριστά για κάθε νομό και στη συνέχεια μοιράστηκαν στις αγροτικές εκτάσεις του για την εξαγωγή του συντελεστή εκπομπής EF ανά επιφάνεια (km²), νομό και κατηγορία εδαφοκάλυψης.

5.1.3. Υπολογισμός των φυσικών εκπομπών

Οι φυσικές εκπομπές υπολογίστηκαν σε ωριαία βάση για τις 14/01/08, για κάθε χωρική μονάδα με διαφορετική εδαφοκάλυψη (στο αρχείο CLC2000) στην περιοχή μελέτης και μετά αποδόθηκαν στο πλέγμα με τη βοήθεια των εργαλείων χωρικής υπέρθεσης της εφαρμογής Sources. Τα μετεωρολογικά δεδομένα υπολογίστηκαν με τη βοήθεια του μοντέλου MM5 (Grell κ.α., 1994) σε κάθε κελί του πλέγματος που καλύπτει την περιοχή μελέτης (προσωπική επικοινωνία Α. Σφέτσος).

Για τον υπολογισμό των εκπομπών από την βλάστηση στην περιοχή μελέτης, χρησιμοποιήθηκαν συντελεστές εκπομπής και τιμές πυκνότητας φυλλώδους βιομάζας από τον Οδηγό Απογραφής EMEP/CORINAIR (SNAP 11), και τον Yay κ.α. (2005). Αναλυτικότερα, τα στοιχεία εδαφοκάλυψης συνδυάστηκαν με στοιχεία αναφορικά με τα επικρατέστερα είδη βλάστησης στην περιοχή (Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων; βάση δεδομένων για την ελληνική φύση ΦΙΛΟΤΗΣ) για την εύρεση των καταλληλότερων τιμών για κάθε κατηγορία εδαφοκάλυψης (Πίνακες 2-4 στο Παράρτημα Β). Χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές τιμές συντελεστών εκπομπής και πυκνότητας φυλλώδους βιομάζας για το ισοπρένιο, το τερπένιο και τις ΑΒΠΟΕ (μέρος των ολεφινών), καθώς επίσης για τη θερινή και χειμερινή περίοδο. Οι τιμές της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας υπολογίστηκαν με μετατροπή των τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στην επιφάνεια της γης που δίνει το μοντέλο MM5 (Κεφάλαιο 2). Ως νυχτερινές ώρες για τις 14/01/08 λήφθηκαν οι 00:00-07:00 και 18:00-00:00.

Επιπλέον υπολογίστηκαν οι εκπομπές ΒΠΟΕ για κάθε μήνα του έτους αναφοράς (2007) χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία που παρουσιάζεται στον Οδηγό απογραφής αερίων εκπομπών EMEP/CORINAIR (2007). Σύμφωνα με αυτή τη μεθοδολογία ο υπολογισμός των εκπομπών ΒΠΟΕ σε μηνιαία βάση μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας μέσες

μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας και τυπικές τιμές για τις ώρες με φως ημέρας ανά μήνα (εξαρτώνται από το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής και τιμές τους δίνονται στον Οδηγό) κατά τη διάρκεια των οποίων θεωρείται σταθερή ροή PAR ίση με $1000 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$. Οι υπολογισμοί έγιναν χρησιμοποιώντας τιμές ελάχιστης και μέγιστης μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας στην ΕΠΑ που υπολογίστηκαν από τα κλιματικά δεδομένα 5 μετεωρολογικών σταθμών της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας μέσα και γύρω της περιοχής ενδιαφέροντος (δεδομένα για τουλάχιστο 40 έτη των σταθμών σε Ελληνικό, Νέα Φιλαδέλφεια, Ελευσίνα, Τατόι και Τανάγρα). Στους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές συντελεστών εκπομπής και πυκνότητας φυλλώδους βιομάζας που αναφέρθηκαν παραπάνω.

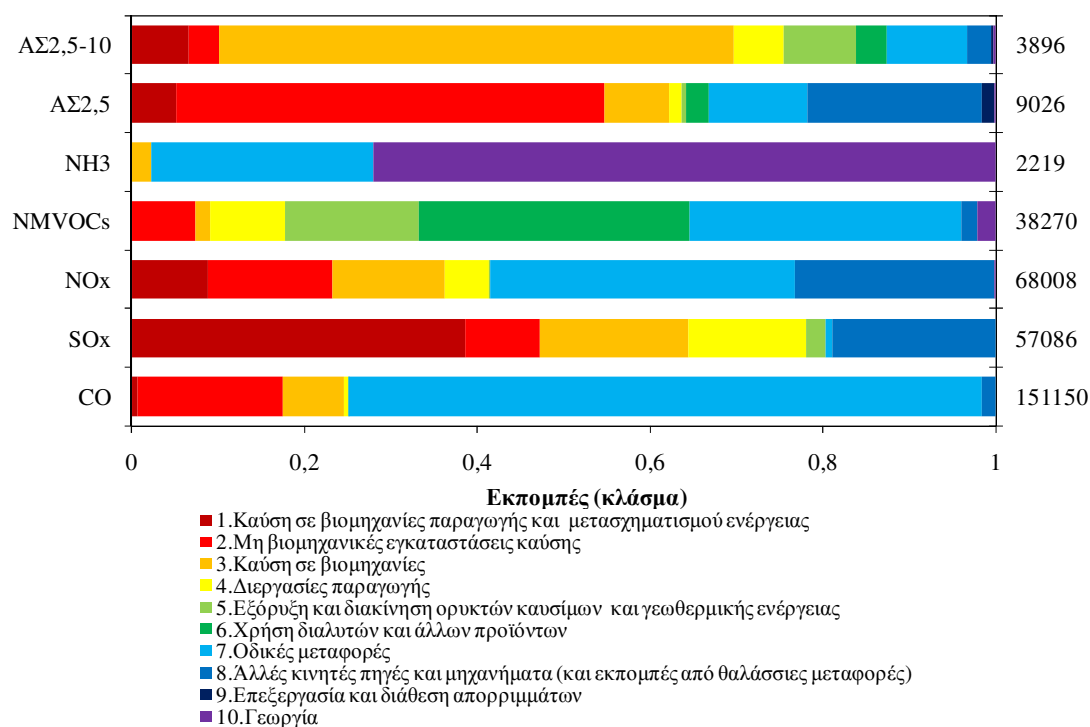
Οι εκπομπές σωματιδίων από την επιφάνεια της θάλασσας υπολογίστηκαν σύμφωνα με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2. Οι εκπομπές σκόνης εκτιμήθηκαν χρησιμοποιώντας τα στοιχεία υψής του εδάφους του Ευρωπαϊκού χάρτη Εδαφών (ESDB v2.0, 2004). Τα στοιχεία αυτά δίνονται είτε σε μορφή κυρίαρχης και δευτερεύουσας υψής του επιφανειακού στρώματος εδάφους ανά τύπο εδάφους σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση FAO-UNESCO, 1974 (CEC, 1985) ή σε μορφή προφίλ υψής του εδάφους με την περιεκτικότητα του σε άργιλο, λάσπη και άμμο. Βάσει των παραπάνω στοιχείων τα εδάφη της περιοχής μελέτης ταξινομήθηκαν σε εδάφη που είναι κυρίως αμμώδη και κυρίως λασπώδη και αργιλικά. Επιπλέον, υπολογίστηκε η μέγιστη τιμή f περιεκτικότητας του εδάφους σε άργιλο και λάσπη έτσι ώστε να υπολογιστούν οι μέγιστες πιθανές εκπομπές $A_{\Sigma_{10}}$ στην περιοχή μελέτης (χειρότερο σενάριο, $f = 0,35$). Οι τιμές επιφανειακής τραχύτητας ανά κατηγορία εδαφοκάλυψης βασίστηκαν σε στοιχεία του Mansell κ.α. (2004). Η τιμή του κατωφλιού της ταχύτητας τριβής για την προσέγγιση 1 υπολογίστηκε από την σχέση . Η παραδοχή αυτή έγινε καθώς δεν υπήρχαν διαθέσιμα στοιχεία υγρασίας στην ατμόσφαιρα για τις 14/01/08. Με βάση το ποσοστό περιεκτικότητας του εδάφους της περιοχής σε άργιλο (18 – 35 %), η τιμή του κατωφλιού υγρασίας του εδάφους θα είναι πάντα μικρότερη από την ατμοσφαιρική υγρασία ειδικά για το μήνα Ιανουάριο (μέση τιμή RH μεγαλύτερη 69%; δεδομένα EMY από σταθμούς στην Αττική την περίοδο 1995 – 1997). Ωστόσο, αυτό δεν επηρεάζει σημαντικά την εκπεμπόμενη ποσότητα σωματιδίων (ελάττωση κατά 4% για τα λεπτά και 5% για τα χονδρά σωματίδια σε τιμές $RH > 90\%$).

Για να υπολογιστεί η επίδραση των πυρκαγιών δασικών εκτάσεων στις εκπομπές ΒΠΟΕ και σκόνης από το έδαφος, εξετάστηκαν τα στοιχεία τοποθεσίας και περιμέτρου των δασικών εκτάσεων που κάηκαν την περίοδο 2000 – 2007 από το Ευρωπαϊκό Σύστημα Πληροφόρησης (EFFIS - European Forest Fire Information System) για τις δασικές πυρκαγιές. Τα στοιχεία αυτά προσαρμόστηκαν στην περιοχή μελέτης με τη βοήθεια προγράμματος ΓΠΣ (Εικόνα 2 στο Παράρτημα Β). Θεωρήθηκε πως οι εκτάσεις που κάηκαν πριν το 2007 είναι πλέον εκτάσεις με αραιή βλάστηση. Οι εκτάσεις που κάηκαν το 2007 θεωρήθηκε πως δεν εκπέμπουν καθόλου ΠΟΕ. Τέλος οι παραπάνω εκτάσεις θεωρήθηκαν εκτάσεις με αραιή

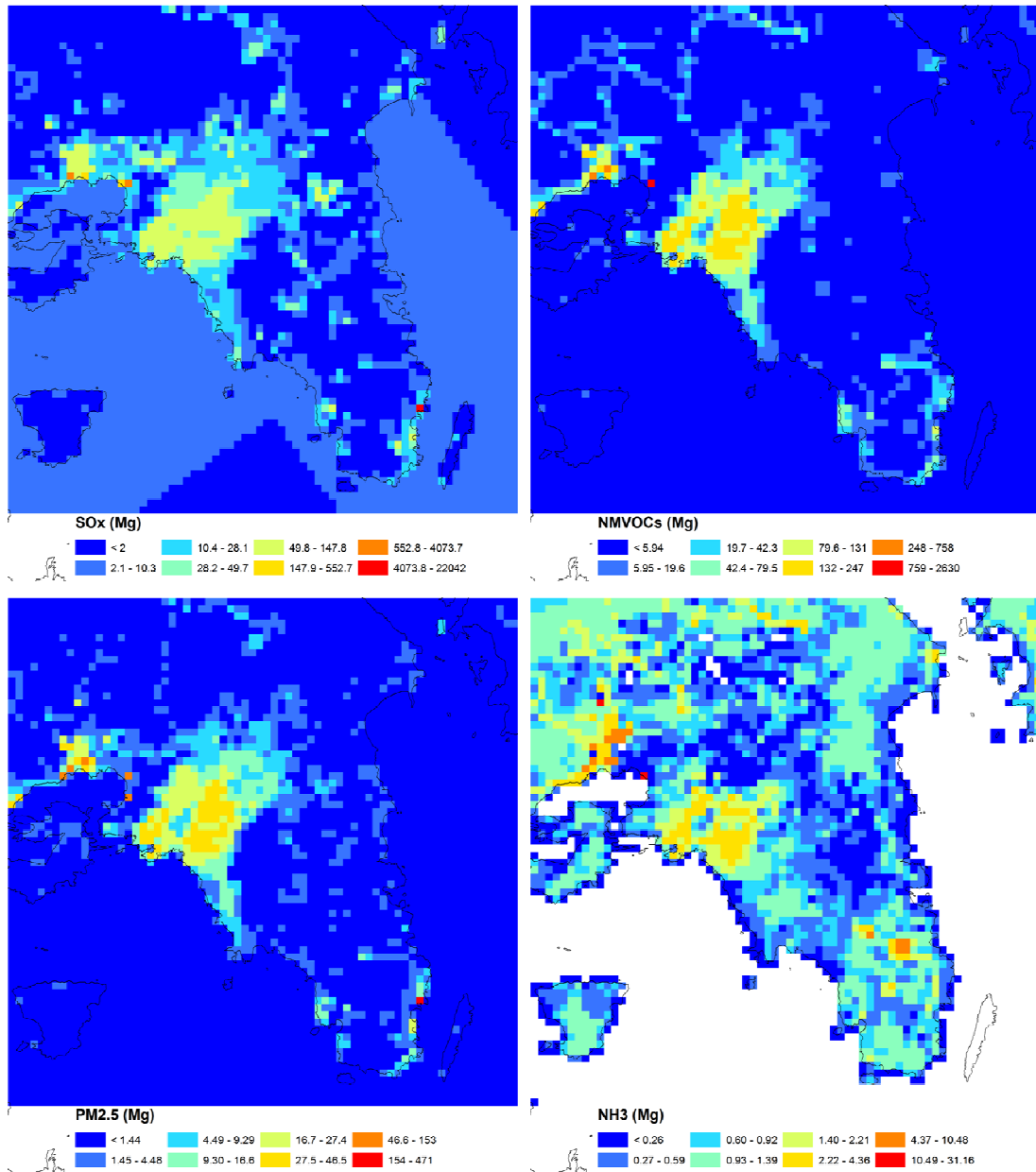
βλάστηση ή καμένες για την εκτίμηση των εκπομπών σκόνης με την πρώτη και δεύτερη προσέγγιση (Κεφάλαιο 2), αντίστοιχα.

5.1.4. Αποτελέσματα

Οι ανθρωπογενείς εκπομπές CO, SO_x, NO_x, ΠΟΕ, NH₃, ΑΣ_{2,5}, και ΑΣ_{2,5-10} στην ΕΠΑ κατά το έτος 2007 ήταν 151150, 57086, 68008, 38270, 2219, 9026, και 3896 Mg, αντίστοιχα (Εικόνα 19). Οι οδικές μεταφορές αποτελούν τη σημαντικότερη πηγή εκπομπών CO (73,3%) και NO_x (35,3%) στην περιοχή και σημαντική πηγή εκπομπών ΠΟΕ (31,6%) και NH₃ (25,7%). Οι άλλες κινητές πηγές και μηχανήματα συνεισφέρουν κατά 18,9% στις εκπομπές SO_x, 23,1% στις εκπομπές NO_x και κατά 20,1% στις εκπομπές ΑΣ_{2,5}. Στις μη βιομηχανικές μονάδες καύσης οφείλεται το 16,8% των εκπομπών CO και το 49,6% των εκπομπών ΑΣ_{2,5}. Η καύση σε βιομηχανίες εκλύει το 17,2% των εκπομπών SO_x, το 13% των εκπομπών NO_x και είναι η κύρια πηγή ανθρωπογενών ΑΣ_{2,5-10} (59,5%). Στις εκπομπές των ΑΣ_{2,5-10} συνεισφέρουν σημαντικά και η εξόρυξη και διακίνηση ορυκτών καυσίμων (8,5%), οι οδικές μεταφορές (9,3%) και η καύση σε βιομηχανίες παραγωγής ενέργειας (6,7%). Η καύση σε βιομηχανίες παραγωγής ενέργειας αποτελεί επίσης σημαντική πηγή εκπομπών SO_x και NO_x (38,5% και 8%, αντίστοιχα). Επιπλέον, από τη χρήση διαλυτών και άλλων προϊόντων εκλύεται το 31,3% των εκπομπών ΠΟΕ.



Εικόνα 19 Ανθρωπογενείς εκπομπές CO, SO_x, NO_x, ΠΟΕ, NH₃, ΑΣ_{2,5}, και ΑΣ_{2,5-10} στην ΕΠΑ το έτος 2007.



Εικόνα 20 Χωρική κατανομή των ανθρωπογενών εκπομπών SO_x, ΠΟΕ, ΑΣ_{2,5}, και NH₃ στην ΕΠΑ το έτος 2007.

Όπως φαίνεται στις Εικόνα 20α-γ, οι εκπομπές SO_x, ΠΟΕ και ΑΣ_{2,5} συγκεντρώνονται πάνω από το κυρίως οδικό δίκτυο, τις αστικές περιοχές της Αθήνας και του Πειραιά και τις βιομηχανικές περιοχές στην δυτική Αττική. Το ίδιο χωρικό πρότυπο (κατανομή) ακολουθούν και οι εκπομπές NO_x και CO. Η γεωργία/κτηνοτροφία είναι η σημαντικότερη πηγή NH₃ στην περιοχή, η οποία καλύπτεται σε ποσοστό περίπου 30.1% (~760km²) από αγροτικές εκτάσεις (η τιμή έχει εκτιμηθεί από τον χάρτη εδαφοκάλυψης ΕΕΑ CLC2000). Οι εκπομπές NH₃ ανέρχονται σε 1599 Mg/y (Εικόνα 20δ) και είναι συγκεντρωμένες πάνω από τα νησιά, το βορειοδυτικό και το ανατολικό τμήμα της περιοχής, όπου πραγματοποιούνται αγροτικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες. Από την άλλη μεριά οι εκπομπές NH₃ στο μητρώο the UNECE/EMEP από μια περιοχή μεγαλύτερης έκτασης από την περιοχή ενδιαφέροντος (τα

κελιά του πλέγματος EMEP που τέμνονται με την περιοχή ενδιαφέροντος) ήταν 883 Mg/y. Έτσι για το έτος 2007 οι εκπομπές NH₃ στο μητρώο UNECE/EMEP είναι υποεκτιμημένες, όπως και για το έτος 1996 σύμφωνα με το μητρώο εκπομπών NH₃ από την γεωργία (bottom up) της Sotiropoulou κ.α. (2004).

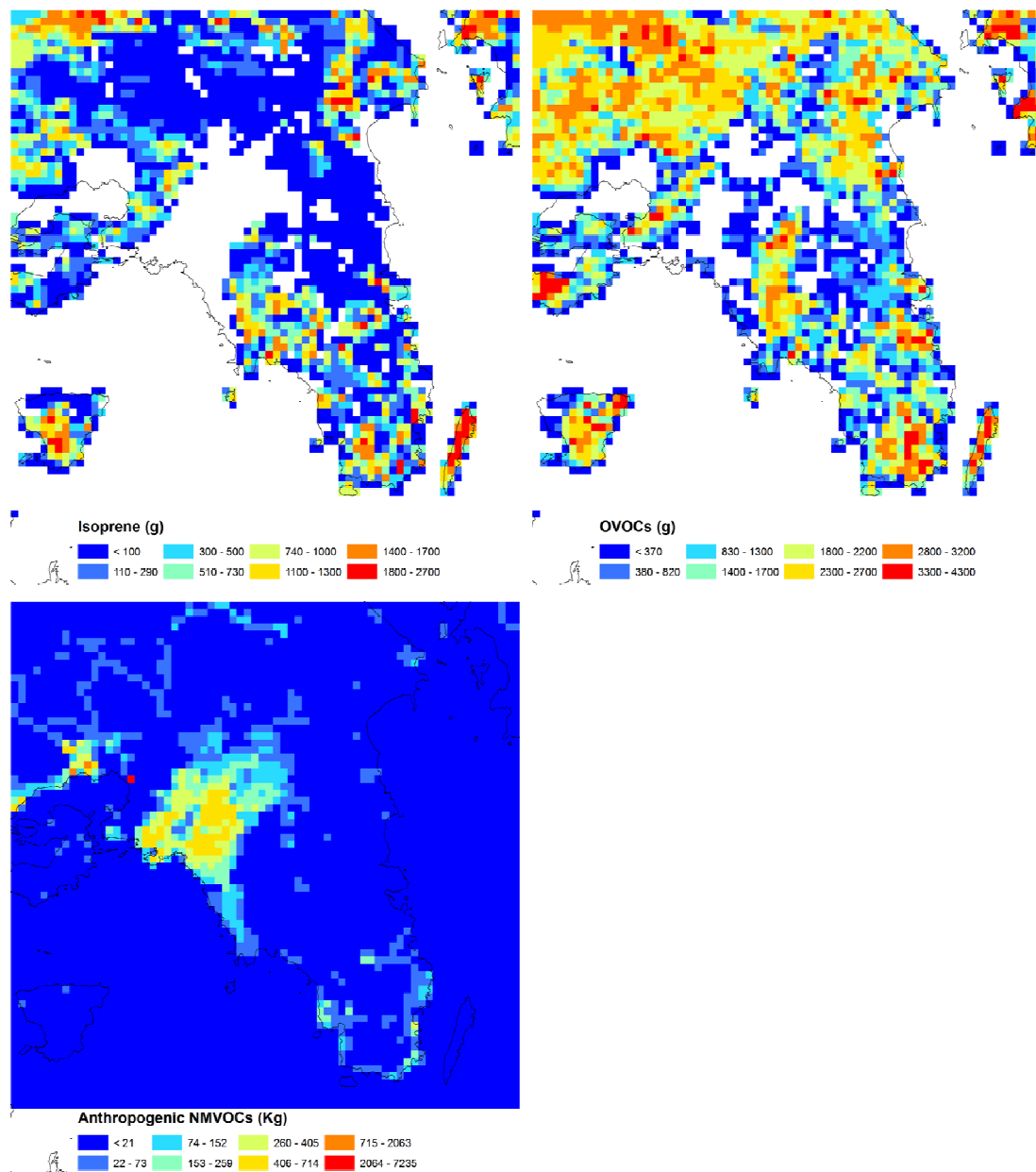
Στη συνέχεια η μεθοδολογία εφαρμόστηκε και για την εκτίμηση των εκπομπών μιας ημέρας (14/01/08). Τα μετεωρολογικά δεδομένα λήφθηκαν από το μοντέλο MM5 (Grell κ.α., 1994). Οι εκπομπές ανθρωπογενών, βιογενών και φυσικών εκπομπών στις 14/01/08 (Mg) παρουσιάζονται στον Πίνακα 23. Οι εκπομπές ισοπρενίου υπολογίστηκαν σε 0,83 Mg, των τερπενίων σε 0,84 Mg και των ΑΒΠΟΕ σε 3,82 Mg. Επιπρόσθετα, αν λάβουμε υπόψη την επίδραση των πυρκαγιών δασικών εκτάσεων των ετών 2000-2007 (Εικόνα 3 στο Παράρτημα Β), οι εκπομπές ΒΠΟΕ είναι για το έτος 2007 ελαττωμένες κατά 2% για το ισοπρένιο, 3% για το τερπένιο και κατά 6% για τις ΑΒΠΟΕ. Οι εκπομπές ισοπρενίου, τερπενίων και ΑΒΠΟΕ για μια τυπική (βάσει κλιματικών δεδομένων) ημέρα του Ιανουαρίου υπολογίστηκαν σε 0,78±0,2 Mg, 0,28±0,03 Mg, και 1,3±0,15 Mg, αντίστοιχα. Οι εκπομπές ισοπρενίου στις 14/01/08 συμφωνούν με τις παραπάνω τιμές. Ωστόσο οι εκπομπές τερπενίων και ΑΒΠΟΕ στις 14/01/08 είναι πολύ μεγαλύτερες από τις τιμές της τυπικής ημέρας. Αυτό οφείλεται στις διαφορές μεταξύ των τιμών των μετεωρολογικών παραμέτρων την 14/01/08 με την τυπικής ημέρας του Ιανουαρίου. Συγκεκριμένα η μέση ημερήσια θερμοκρασία και ροή PAR στις 14/01/08 υπολογίστηκαν από το μοντέλο MM5 σε 10±2,6 °C και 1133 μmol/m²s αντίστοιχα, ενώ οι τυπικές τιμές τους για μια ημέρα του Ιανουαρίου είναι 8,9±1,2 °C (μέση μηνιαία τιμή) και 1000 μmol/m²s, αντίστοιχα. Επιπλέον οι ώρες με φως ημέρας (PAR>200 μmol/m²s) υπολογίστηκαν σε 6,4 από το μοντέλο MM5, ενώ σύμφωνα με το τυπικό σενάριο είναι 8,2 τον Ιανουάριο στην ΕΠΑ (EMEP/CORINAIR, 2007).

Στην Εικόνα 21α φαίνεται ότι οι εκπομπές ισοπρενίου προκύπτουν κυρίως από το βόρειο τμήμα της περιοχής και το ανατολικό τμήμα της χερσονήσου όπου το έδαφος καλύπτεται κυρίως από δάση και άλλες φυσικές περιοχές, ενώ οι εκπομπές ΑΒΠΟΕ (Εικόνα 21β) εκλύονται από όλη την περιοχή εκτός από τις δομημένες εκτάσεις. Οι εκπομπές των ΒΠΟΕ συνολικά αποτελούν το 5% των εκπομπών ΠΟΕ που εκλύθηκαν από την ΕΠΑ στις 14/01/08. Άλλες σημαντικές πηγές εκπομπής ΠΟΕ την ημέρα αυτή ήταν η χρήση διαλυτών και οι οδικές μεταφορές, (Εικόνα 21γ) στις οποίες οφείλεται το 33,3%, και 24,8% των ολικών ΠΟΕ, αντίστοιχα. Η συμμετοχή των ΒΠΟΕ το καλοκαίρι είναι πολύ πιθανό να είναι μεγαλύτερη εξαιτίας της αύξησης της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας καθώς και της παράλληλης μείωσης των εκπομπών ΠΟΕ από την κεντρική θέρμανση (~15% των εκπομπών ΠΟΕ στις 14/01/08). Πράγματι, τα αποτελέσματα της εκτίμησης των εκπομπών ΒΠΟΕ σε μηνιαία βάση (Παράρτημα Β) έδειξαν πως η μέση συμμετοχή των εκπομπών ΒΠΟΕ στις ολικές εκπομπές ΠΟΕ από την ΕΠΑ είναι 10,7±1% κατά τη χειμερινή περίοδο (Οκτώβριος - Μάρτιος) και αυξάνεται σε 37,9±1,9% την θερινή περίοδο (Απρίλιος - Σεπτέμβριος). Η μεγαλύτερη ποσότητα ΒΠΟΕ από την ΕΠΑ εκλύεται τον Ιούλιο; οι εκπομπές του Ιανουαρίου

Πίνακας 23 Εκπομπές από την ΕΠΑ στις 14/01/08 (Mg).

Πηγή	CO	SOx	NOx	ΠΟΕ	NH ₃	ΑΣ _{2,5}	ΑΣ _{2,5-10}
Καύση σε βιομηχανίες παραγωγής ενέργειας	3,3	64,6	17,6	0	0	1,4	0,8
Μη βιομηχανικές εγκαταστάσεις καύσης	145,9	28,5	56,3	16,1	0	25,8	0,8
Καύση σε βιομηχανίες	31,9	29,3	26,5	2,0	0,2	2,0	6,9
Διεργασίες παραγωγής	1,9	21,4	9,6	9,1	0	0,4	0,6
Εξόρυξη και διακίνηση ορυκτών καυσίμων και γεωθερμικής ενέργειας	0,1	3,6	0,2	16,4	0	0,1	0,9
Χρήση διαλυτών και άλλων προϊόντων	0	0	0	36,1	0	0,7	0,4
Οδικές μεταφορές	262,8	1,1	56,7	26,8	1,4	2,4	0,9
Άλλες κινητές πηγές και μηχανήματα	6,4	28,6	41,6	1,8	0	4,8	0,3
Επεξεργασία και διάθεση απορριμμάτων	0	0	0	0	0	0,4	0,04
Γεωργία	0	0	0	0	3,4	0	0
Σύνολο ανθρωπογενών εκπομπών	452,3	177,1	208,5	108,3	4,9	37,9	11,6
Βιογενείς εκπομπές				5,5 (5,2)			
Σωματίδια θαλασσινού άλατος						12,6	56,7
Σωματίδια εδαφικής σκόνης						88,1-105,6 (87,2-108,4)	792,9-959,4 (785,2-975,2)
Σύνολο φυσικών εκπομπών				5,5		100,7-119,2	849,6-1016,1

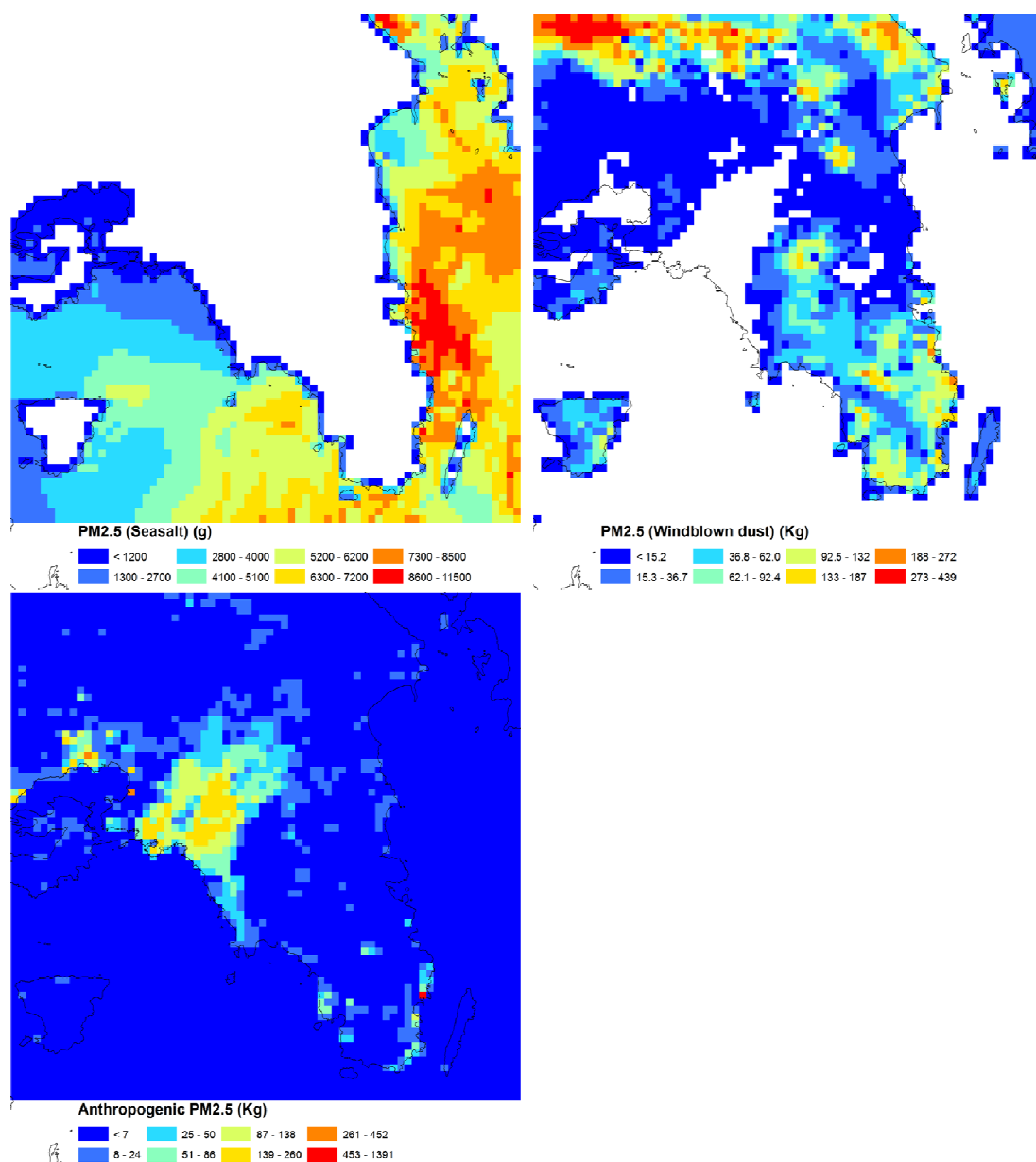
είναι μόλις το 2% (ισοπρένιο), 4%(τερπένιο) και 11%(ΑΒΠΟΕ) της ποσότητας που παράγεται κατά τη διάρκεια του Ιουλίου. Η ποσότητα ισοπρενίου, τερπενίων και ΑΒΠΟΕ που εκλύεται κατά την θερινή περίοδο είναι αντίστοιχα το $95\pm 0,4\%$, $92,7\pm 0,2\%$ και $83,2\pm 0,5\%$ των ετήσιων εκπομπών ΒΠΟΕ από την ΕΠΑ.



Εικόνα 21 Χωρική κατανομή των εκπομπών ισοπρενίου, ΑΒΠΟΕ και ανθρωπογενών ΠΟΕ, στην ΕΠΑ την 14/01/08.

Η συμμετοχή των σωματιδίων θαλασσινού άλατος στην ατμοσφαιρική ρύπανση της περιοχής από ΑΣ στις 14/01/08 ήταν μικρότερη από αυτή των ανθρωπογενών πηγών για τα ΑΣ_{2,5} και μεγαλύτερη για τα ΑΣ_{2,5-10}. Συγκεκριμένα, 12,6 Mg ΑΣ_{2,5} εκλύθηκαν από την επιφάνεια της θάλασσας με μέση τιμή ρυθμού εκπομπής ανά κελί καλυπτόμενο από θάλασσα τα 4,7 kg (Εικόνα 22α). Οι ανάλογες τιμές για τις εκπομπές ΑΣ_{2,5-10} ήταν 56,7 Mg και 20,5 kg,

αντίστοιχα. Επιπλέον οι εκπομπές σωματιδίων θαλασσινού άλατος για την υψηλότερη παρατηρούμενη ταχύτητα ανέμου στις 14/01/08 ($21,15 \text{ m s}^{-1}$) ήταν $4,5 \times 10^{-6} \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, ποσότητα που συμφωνεί και με τα αποτελέσματα άλλων ερευνητών (Athanasorouliou κ.α., 2008) για τις εκπομπές σωματιδίων θαλασσινού άλατος από την ανοιχτή θάλασσα στην περιοχή μελέτης. Από την άλλη μεριά, οι ανθρωπογενείς εκπομπές $\text{A}\Sigma_{2,5}$ (Εικόνα 7β) και $\text{A}\Sigma_{2,5-10}$ υπολογίστηκαν σε 39,1 Mg και 12,5 Mg, με συμμετοχή κυρίως από τον οικιακό (74%) και τον βιομηχανικό κλάδο (61%), αντίστοιχα. Ο ημερήσιος ρυθμός εκπομπής ανά κελί του πλέγματος κυμάνθηκε μεταξύ 0,03 και 1394 kg για τα $\text{A}\Sigma_{2,5}$ και από 0,002 έως 788 kg για τα $\text{A}\Sigma_{2,5-10}$.



Εικόνα 22 Χωρική κατανομή των εκπομπών $\text{A}\Sigma_{2,5}$ από την θάλασσα, το έδαφος και τις ανθρωπογενείς πηγές στην ΕΠΑ την 14/01/08.

Οι εκπομπές σκόνης από την επιφάνεια του εδάφους ξεπερνούν κατά πολύ τις εκπομπές $AS_{2,5}$ και $AS_{2,5-10}$ από όλες τις ανθρώπινες πηγές (Εικόνα 22β και γ). Ο ημερήσιος ρυθμός εκπομπής $AS_{2,5}$ και $AS_{2,5-10}$ ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο ήταν έως 439 kg και 3949 kg, αντίστοιχα. Αν λάβουμε υπόψη επιπλέον τις αλλαγές στην εδαφοκάλυψη εξαιτίας των πυρκαγιών δασικών εκτάσεων, οι εκπομπές σκόνης από το έδαφος για το έτος 2007 στην περιοχή μελέτης αυξάνονται κατά 1,65% για τα σωματίδια $AS_{2,5}$ και $AS_{2,5-10}$.

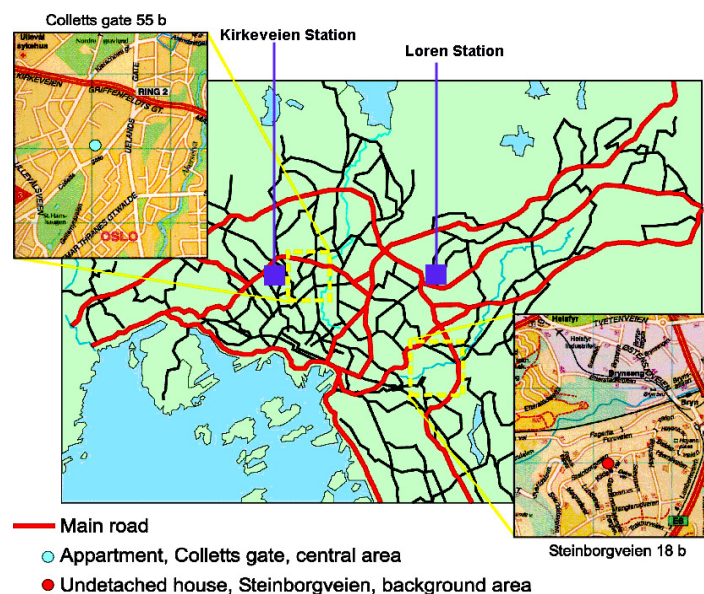
5.2. Εφαρμογή 2: Έκθεση σε εξωτερικούς και εσωτερικούς χώρους στο Όσλο Νορβηγίας σε ολικά σωματίδια και στα χημικά συστατικά τους

Η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στα Κεφάλαια 3 και 4, εφαρμόστηκε για την μελέτη της έκθεσης και δόσης ενός ατόμου σε ΑΣ στο Όσλο της Νορβηγίας. Αναλυτικότερα, στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης μετρήσεων συγκεντρώσεων μάζας ΑΣ_{2,5}, ΑΣ_{2,5-10} και ΑΣ₁₀, πλήθους υπέρλεπτων και λεπτών ΑΣ, και των χημικών συστατικών τους που πραγματοποιήθηκαν σε εξωτερικούς και εσωτερικούς χώρους δύο κατοικιών στο Όσλο της Νορβηγίας. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος Urban-Aerosol (Χαρακτηρισμός της ποιότητας αέρα στις πόλεις – Χημικά χαρακτηριστικά ΑΣ σε εσωτερικούς/εξωτερικούς χώρους και σχέση Πηγής – Εφαρμοσμένης δόσης) (Lazaridis κ.α., 2003) με κύριο στόχο τον καθορισμό των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών των ΑΣ σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους, που σχετίζονται με την ανθρώπινη έκθεση. Επιπλέον, εξετάζεται η επίδραση των φυσικών χαρακτηριστικών των ΑΣ και άλλων παραμέτρων (ρυθμός αερισμού, πηγές στον εσωτερικό χώρο, μετεωρολογικές παράμετροι) στον λόγο της συγκέντρωσης ΑΣ εσωτερικά της κατοικίας προς την συγκέντρωσή τους στον εξωτερικό χώρο. Η παραπάνω ανάλυση γίνεται και για τα χημικά συστατικά των ΑΣ_{2,5} και ΑΣ_{2,5-10} και εξετάζεται η διακύμανση των τιμών τους σε σχέση με πιθανές αλλαγές στην ατμόσφαιρα, στις πηγές στο αστικό περιβάλλον, και στις πηγές εσωτερικά της κατοικίας. Επιπρόσθετα οι διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων ΑΣ εξετάζονται σε σχέση με τις συγκεντρώσεις αερίων ρύπων κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

Ακόμα, εξετάζεται η σχέση μεταξύ των συγκεντρώσεων ΑΣ σε σταθερούς σταθμούς μέτρησης ποιότητας αέρα στην πόλη με τις συγκεντρώσεις ΑΣ εξωτερικά των κατοικιών, καθώς και αν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αντιπροσωπευτικές της έκθεσης ενός ατόμου. Υπολογίζεται η έκθεση και δόση ΑΣ και των συστατικών τους που δέχεται ένα πρότυπο άτομο με τη χρήση σεναρίου έκθεσης. Τέλος εξετάζεται η επίδραση των ατομικών δραστηριοτήτων και των εσωτερικών πηγών ρύπανσης στην έκθεση και δόση. Τα περισσότερα από τα αποτελέσματα της μελέτης έχουν δημοσιευτεί στα άρθρα Lazaridis κ.α., 2006; Lazaridis κ.α., 2008α; Aleksandropoulou κ.α., 2008α; Lazaridis κ.α., 2009 και σε πρακτικά συνεδρίων (Aleksandropoulou κ.α., 2004β; Smolik κ.α., 2005α; Lazaridis κ.α., 2005α, Lazaridis κ.α., 2005β; Glytsos κ.α., 2005; Lazaridis κ.α., 2007α; Lazaridis κ.α., 2007β, Aleksandropoulou κ.α., 2007, Aleksandropoulou κ.α., 2008β, Aleksandropoulou κ.α., 2008γ). Έτσι σε αυτό το Κεφάλαιο γίνεται μια παρουσίαση των μετρήσεων και συγκεντρωτικά των κυριότερων αποτελεσμάτων της μελέτης. Ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης παραπέμπεται στα άρθρα για περισσότερες λεπτομέρειες.

5.2.1. Σημεία δειγματοληψίας και περιγραφή μετρήσεων

Στα πλαίσια του προγράμματος Urban Aerosol πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ΑΣ και αερίων ρύπων σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους στην ευρύτερη περιοχή του Όσλο. Οι μετρήσεις έγιναν σε χειμερινές και θερινές περιόδους του 2002/2003. Αναλυτικότερα, οι μετρήσεις και οι δειγματοληψίες έγιναν στον εσωτερικό και εξωτερικό χώρο δύο κατοικιών, η μία σε προάστιο της πόλης (Steinborgveien-κατοικία 1; 4-18 Μαρτίου 2002 – ΠΧ, και 3-17 Ιουνίου 2002 - ΠΘ) και η άλλη στο κέντρο της πόλης (Colletts gate-κατοικία 2; 26 Αυγούστου – 9 Σεπτεμβρίου 2002 – ΚΘ, και 13-27 Ιανουαρίου 2003 - ΚΧ) (Εικόνα 23). Οι δύο κατοικίες επιλέχθηκαν με κριτήρια την ύπαρξη επίπλωσης και τουλάχιστο 2 δωματίων, την απόσταση από το κέντρο του Όσλο και την αποδοχή των ιδιοκτητών/ενοίκων που έπρεπε να μην καπνίζουν.



Εικόνα 23 Χάρτης του Όσλο με τα σημεία δειγματοληψίας στα προάστια (Steinborgveien) και στο κέντρο (Colletts gate), τις κεντρικές οδικές αρτηρίες και τους σταθερούς σταθμούς μέτρησης ποιότητας του αέρα Kirkeveien και Loren (Lazaridis κ.α., 2006)

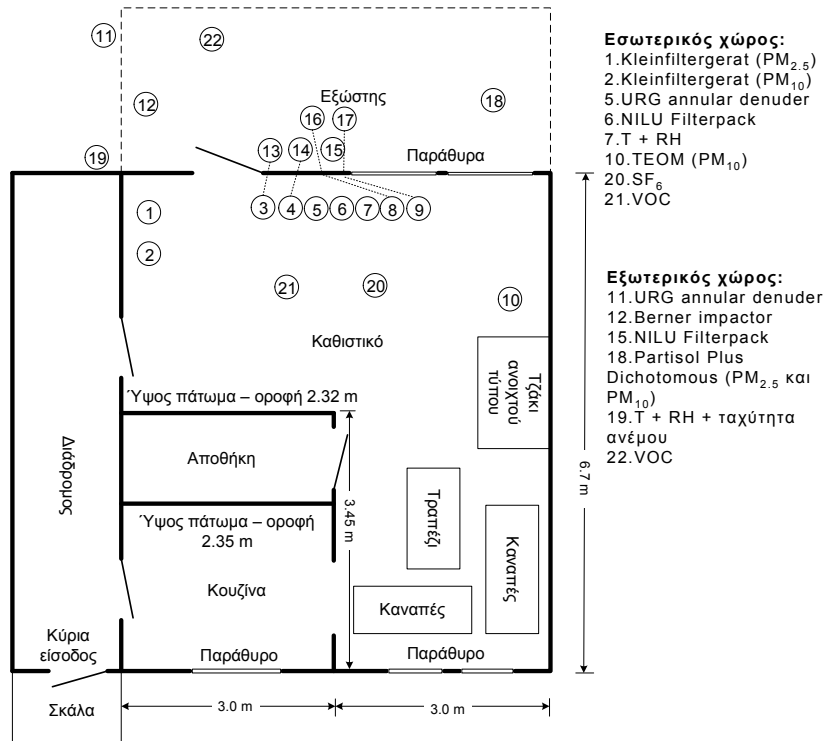
Η πρώτη κατοικία στο προάστιο του Όσλο είναι διώροφη, κατασκευασμένη από ξύλο το 1966 και στην βορειοανατολική πλευρά της ενώνεται με γειτονική κατοικία. Οι δύο όροφοι ενώνονται με εσωτερική σκάλα στο τέλος ενός διαδρόμου (είσοδος της κατοικίας) που οδηγεί στα δωμάτια του ισογείου. Το ισόγειο που αποτελείται από την κουζίνα, το καθιστικό και την αποθήκη, μπορεί να απομονωθεί από την υπόλοιπη κατοικία κλείνοντας απλά τις πόρτες προς τον διάδρομο. Το σκαρίφημα της κατοικίας και η θέση των οργάνων μέτρησης δίνονται στην Εικόνα 24. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων όλες οι πόρτες του ισογείου ήταν κλειστές και τα παράθυρα του καθιστικού άνοιγαν σε συγκεκριμένες περιόδους από την ομάδα που πραγματοποιούσε τις μετρήσεις. Έτσι μπορεί να θεωρηθεί πως στις περιόδους που δεν πραγματοποιούνταν δραστηριότητες εσωτερικά της κατοικίας και τα παράθυρα ήταν κλειστά,

ο αέρας στο χώρο του ισογείου (~90,46m³) ήταν καλά αναμειγμένος. Τα όργανα μέτρησης τοποθετήθηκαν στο καθιστικό της κατοικίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι το τζάκι που φαίνεται στο σκαρίφημα της Εικόνα 24 ήταν σφραγισμένο κατά την περίοδο των μετρήσεων.

Η κατοικία στο κέντρο της πόλης είναι ένα διαμέρισμα του 1^{ου} ορόφου, κατασκευασμένο το 1970 με κύρια υλικά το οπλισμένο σκυρόδεμα και τα τούβλα. Διαθέτει τέσσερα δωμάτια και έναν διάδρομο στο κέντρο του που οδηγεί σε αυτά. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων οι εσωτερικές πόρτες της κατοικίας χρησιμοποιήθηκαν για να απομονώσουν τους χώρους του διαμερίσματος. Όπως φαίνεται στο σκαρίφημα της κατοικίας στην Εικόνα 24, τα όργανα τοποθετήθηκαν στο υπνοδωμάτιο και με τη βοήθεια αγωγών που διέρχονταν από την εσωτερική πόρτα και από το παράθυρο πραγματοποιούνταν οι μετρήσεις του εσωτερικού και εξωτερικού αέρα, αντίστοιχα. Την χειμερινή περίοδο όλες οι εσωτερικές πόρτες εκτός από την πόρτα του υπνοδωματίου ήταν ανοιχτές προς το διάδρομο (98,36m³). Την θερινή περίοδο μετρήσεων όταν δεν ήταν κανείς στο χώρο η πόρτα του υπνοδωματίου παρέμενε ανοιχτή (ώστε να μην υπερθερμαίνονται τα όργανα μετρήσεων) και η πόρτα του καθιστικού κλειστή (39,15m³) ενώ όταν έφθανε η ομάδα των μετρήσεων γινόταν το αντίθετο. Σημειώνεται ότι η κατοικία ανακαινίστηκε μεταξύ των δύο περιόδων μετρήσεων.

Οι δυο κατοικίες δεν διέθεταν σύστημα μηχανικού εξαερισμού. Επιπλέον οι κατοικίες είχαν ξύλινο πάτωμα, μαγειρικές εστίες γκαζιού και τον χειμώνα λειτουργούσαν και στις δύο ηλεκτρικά καλοριφέρ. Κατά τις περιόδους των μετρήσεων δεν κατοικούσαν μόνιμα, ωστόσο γίνονταν καθημερινές επισκέψεις (~9:30 – 12:00 μ.μ.) από την ομάδα μετρήσεων για τον έλεγχο των οργάνων και την πραγματοποίηση μετρήσεων του ρυθμού αερισμού. Ακόμα, η ομάδα εκτελούσε κάποιες τυπικές οικιακές δραστηριότητες όπως μαγείρεμα, σκούπισμα, άναμμα κεριών, περπάτημα στον εσωτερικό χώρο, άνοιγμα των παραθύρων ώστε να εξεταστεί αργότερα η επίδραση τους στις παρατηρούμενες συγκεντρώσεις. Εξετάστηκε και η περίπτωση του καπνίσματος τσιγάρου και πούρου. Όλες οι δραστηριότητες καταγράφονταν σε ημερολόγιο που συνοψίζεται στον Πίνακα 24 για όλες τις περιόδους μετρήσεων.

Οι μετρήσεις ΑΣ περιλάμβαναν το σταθμικό προσδιορισμό της συγκέντρωσης ΑΣ (KleinfILTERGERÄT, NILU filterpack, DPP sampler, Denuder; παροχή σύμφωνα με το πρότυπο EN-12341; CEN, 1998), προσδιορισμό της συγκέντρωσης μάζας ΑΣ₁₀ σε πραγματικό χρόνο (TEOM) και της κατανομής πλήθους υπέρλεπτων (SMPS) και μεγαλύτερων σωματιδίων (APS) Τα όργανα μέτρησης και ο χώρος δειγματοληψίας δίνονται στον Πίνακα 25 για κάθε περίοδο μετρήσεων. Επιπλέον προσδιορίστηκε η κατανομή μεγέθους των ΑΣ₁₀ με τη βοήθεια προσκρουστή 8 σταδίων τύπου Berner (Lazaridis κ.α., 2006). Η μάζα και η κατανομή των υδατοδιαλυτών ιόντων (Na⁺, Cl⁻, Mg⁺, Ca²⁺, K⁺, SO₄²⁻, NH₄⁺, NO₃⁻, NH₄⁺) προσδιορίστηκε με ιοντική χρωματογραφία ή φασματομετρία στα δείγματα σε φίλτρα Teflon, ενώ του οργανικού (OC) και στοιχειακού (EC) άνθρακα με θερμο-οπτική ανάλυση (Birch 1996, 2002) στα δείγματα σε φίλτρα χαλαζία.



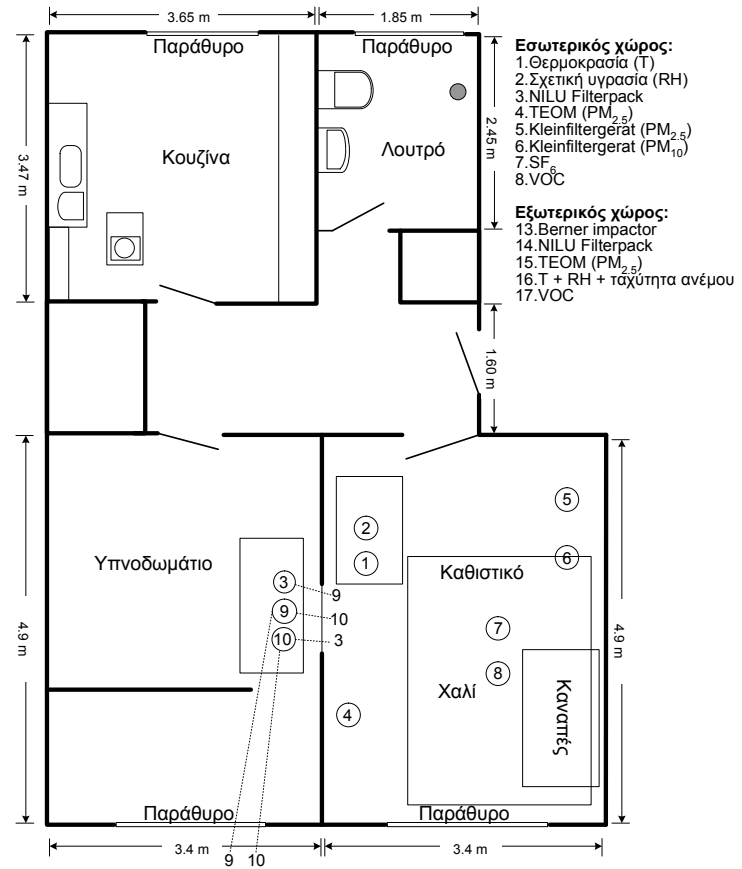
- Εσωτερικός χώρος:**
 1. Kleinfiltergerat (PM_{2.5})
 2. Kleinfiltergerat (PM₁₀)
 5. URG annular denuder
 6. NILU Filterpack
 7. T + RH
 10. TEOM (PM₁₀)
 20. SF₆
 21. VOC

- Εξωτερικός χώρος:**
 11. URG annular denuder
 12. Berner impactor
 15. NILU Filterpack
 18. Partisol Plus Dichotomous (PM_{2.5} και PM₁₀)
 19. T + RH + ταχύτητα ανέμου
 22. VOC

Εσωτερικά/Εξωτερικά

Τα παρακάτω όργανα μέτρησης πραγματοποιούσαν ταυτόχρονα δειγματοληψία του εσωτερικού και εξωτερικού αέρα:

- 3. Scanning Mobility Particle Sizer (3934C), (εξωτερικά 13)
- 4. Aerodynamic Particle Sizer (3320) (εξωτερικά 14)
- 8. NOx-monitor (εξωτερικά 16)
- 9. Ozone monitor (εξωτερικά 17)

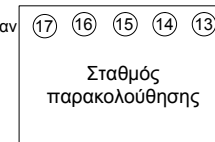


- Εσωτερικός χώρος:**
 1. Θερμοκρασία (T)
 2. Σχετική υγρασία (RH)
 3. NILU Filterpack
 4. TEOM (PM_{2.5})
 5. Kleinfiltergerat (PM_{2.5})
 6. Kleinfiltergerat (PM₁₀)
 7. SF₆
 8. VOC

- Εξωτερικός χώρος:**
 13. Berner impactor
 14. NILU Filterpack
 15. TEOM (PM_{2.5})
 16. T + RH + ταχύτητα ανέμου
 17. VOC

Εσωτερικά/Εξωτερικά

Τα παρακάτω όργανα μέτρησης τοποθετήθηκαν στο υπνοδωμάτιο, αλλά πραγματοποιούσαν ταυτόχρονα δειγματοληψία του εσωτερικού (καθιστικό) και εξωτερικού αέρα.
 9. Ozone monitor (εξωτερικά 11)
 10. NOx-monitor (εξωτερικά 12)



Εικόνα 24 Κατόψεις των κατοικιών στο Όσλο της Νορβηγίας με τα σημεία δειγματοληψίας του εσωτερικού και εξωτερικού αέρα (αναπροσαρμογή από Lazaridis κ.α., 2006).

Πίνακας 24 Ημερολόγιο δραστηριοτήτων κατά τις περιόδους μετρήσεων στο Όσλο (αναπροσαρμογή από Lazaridis κ.α., 2009).

	Πλήθος ατόμων, Χρόνος	Εξαερισμός μέσω του παραθύρου		Προετοιμασία φαγητού στην κουζίνα ^β	Χρήση απορρο- φητήρα ^α	Χρήση ηλεκτρικής σκούπας	Αναμμα κεριών ^γ	Κάπνισμα τσιγάρου ^δ	
		Καθιστ.	Κουζ. ^α						
Μάρτιος 2002 (ΠΧ)	4/3	2 (11:15-15:30)		✓					
	5/3	2 (09:40-12:40)		✓					
	6/3	2 (09:45-12:40) & 1 (11:50-12:45)		✓					
	7/3	2 (09:45-13:30) & 1 (12:30-13:30)	(1 h)		1 (10 min)	✓			
	8/3	2 (09:45-13:00)	✓		2 (30 min)	✓			
	9/3 ^ε	2 (09:45-13:00)	(1 h)		3 (10 min)	✓	10 min	2 (1 h)	
	10/3 ^ε	2 (09:45-13:00)	✓						
	11/3	2 (09:45-12:30)	✓						
	12/3	2 (09:40-12:30)	✓						
	13/3	2 (09:45-12:45) & 2 (10:45-12:15)	(1 h)		1 (15 min)			2 (1 h)	
	14/3	2 (09:45-12:20) & 10 (13:30-13:45)	✓		2 (30 min)				
	15/3	2 (09:45-12:30)	✓					1 (11:25), 1 (11:45)	
	Ιούνιος 2002 (ΠΘ)	3/6	4 (09:00-12:00)	(1 h)					
		4/6	4 (09:40-12:40) 6 (12:40-13:25)	(110 min) ^{στ}					
5/6		3 (09:40-12:20)	(100 min)						
6/6		3 (09:35-13:45)	(115 min)		1 (15 min)	✓			
7/6		3 (09:30-12:20)	(170 min)		2 (20 min)	✓			
8/6 ^ε		3 (09:40-12:35) 1 (15:25-15:30)	(110 min)		3 (20 min)	✓	10 min	2 (1 h)	
9/6 ^ε		3 (09:30-12:30)	(90 min)						
10/6		3 (09:30-12:00) 2 (13:00-13:30)	(90 min)						
11/6		3 (09:20-12:30)	(100 min) ^ς						
12/6		3 (09:40-11:30) 2 (11:30-12:15)	(75 min)		1 (20 min)			2 (1 h)	
13/6		3 (09:40-13:10)	(72 min)		2 (25 min)			1 (5 min)	
14/6		4 (09:45-10:30) 3 (10:30-12:30)	(75 min)						
Αύγουστος- Σεπτέμβριος 2002 (ΚΘ)		26/8	1 (09:00-10:00) 2 (10:00-14:00)		(3 h)				
		27/8	2 (09:30-13:45)						
	28/8	2 (09:30-13:15)							
	29/8	2 (09:40-14:00)	(1 h)	✓	1 (30 min)				
	30/8	2 (08:35-12:30) & 1 (09:10-10:05)		✓	2 (20 min)				
	31/8 ^ε	2 (09:40-13:05)	(1 h)	✓	3 (30 min)		10 min	2 (1 h)	
	1/9 ^ε	2 (09:40-12:10)							
	2/9	2 (09:50-12:15)							
	3/9	2 (09:50-12:15)							
	4/9	2 (09:40-12:45)	(1 h)		1 (30 min)			2 (1 h)	
	5/9	2 (09:50-12:25)			2 (20 min)				
	6/9	2 (09:50-12:25)						2 (12 min, 10 min)	
	Ιανουάριος 2003 (ΚΧ)	13/1	2 (09:45-13:10)						
		14/1	2 (09:30-13:10)						
15/1		2 (09:40-13:10)							
16/1		2 (09:30-12:03) 3 (12:03-12:45)	(20 min)	✓	1 (20 min)				
17/1		2 (09:30-13:05)		✓	2 (23 min)				
18/1 ^ε		2 (09:30-12:45)	(20 min)	✓	3 (15 min)		10 min	2 (1 h)	
19/1 ^ε		2 (09:45-12:45)							
20/1		2 (09:30-13:10)							
21/1		2 (09:30-13:15)							
22/1		2 (09:30-13:20)	(20 min)		1 (15 min)			2 (1 h)	
23/1		2 (09:30-11:05) 2 (11:05-13:15) & 3 (11:35-11:45)			2 (20 min)				
24/1		2 (09:25-13:15)						1 Πούρο (30 min)	

Σημείωση: & = Επιπλέον επισκέπτες; ^α Κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας του φαγητού εκτός αν σημειώνεται διαφορετική διάρκεια; ^β Δραστηριότητα (διάρκεια), Δραστηριότητες: 1-τηγάνισμα αβγών με μπέικον, 2-τηγάνισμα βιάφλας, 3-τηγάνισμα ψαριών; ^γ Αριθμός κεριών (διάρκεια); ^δ Αριθμός τσιγάρων (διάρκεια και χρόνος έναρξης); ^ε Οι ημερομηνίες που δίνονται με πλάγια γράμματα αφορούν σε Σαββατοκύριακο; ^{στ} Η μπαλκονόπορτα είναι ανοιχτή για 10 min; ^ς Τα παράθυρα σε όλα τα δωμάτια είναι ανοιχτά.

Περισσότερες λεπτομέρειες για την συλλογή και την χημική ανάλυση των δειγμάτων δίνονται στο άρθρο Lazaridis κ.α. (2008α). Επιπρόσθετα μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις O₃ (Ozone Analyzer, model 400A), και NO_x (ML@9841A Nitrogen Oxides Analyzer; Teledyne Monitor) και δείγματα αέρα αναλύθηκαν για Ολικές ΠΟΕ (Lazaridis κ.α., 2009). Τέλος κατά την περίοδο μετρήσεων καταγράφονταν η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία στον εσωτερικό και εξωτερικό χώρο, και προσδιορίστηκε ο ρυθμός διείσδυσης του εξωτερικού αέρα στον εσωτερικό χώρο (ρυθμός αερισμού) των κατοικιών με τη μέθοδο NILU (1995) χρησιμοποιώντας SF₆ σαν ιχνηθέτη.

Πίνακας 25 Όργανα μέτρησης ΑΣ σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους κατά τις περιόδους των μετρήσεων στο Όσλο (μερικώς από Lazaridis κ.α., 2008α).

Όργανο μέτρησης	Στάδια αποκοπής (κλάσμα ΑΣ ή διάμετρος (μm))	ΠΘ		ΠΧ		ΚΘ		ΚΧ	
		I ¹	O ²	I	O	I	O	I	O
TEOM® (1400α)	ΑΣ ₁₀	✓ ³	✓			✓	✓	✓	✓
KleinfILTERGERÄT	ΑΣ _{2,5} , ΑΣ ₁₀	✓ ³		✓		✓		✓ ⁴	
NILU filterpack	ΑΣ ₂ , ΑΣ ₂₋₁₀	✓	✓	✓	✓	✓ ⁴	✓ ⁴	✓ ⁴	✓ ⁴
DPP sampler	ΑΣ _{2,5} , ΑΣ _{2,5-10}		✓		✓		5		
Berner Impactor	0,09, 0,18, 0,35, 0,71, 1,41, 2,83, 5,66, 11,31		✓		✓		✓		✓
Denuder system	ΑΣ ₁₀	✓	✓	✓	✓				
APS (3320)	0,7 - 20	✓	✓						
SMPS(3934C)	0,0122 - 0,533	✓	✓						

Σημείωση: ¹Ι μετρήσεις στον εσωτερικό χώρο; ²Ο μετρήσεις σε εξωτερικό χώρο; ³Αραιά/Ελλιπή δεδομένα; ⁴σαν ΑΣ₁₀; ⁵βλάβη του οργάνου μέτρησης; Π: κατοικία στο προάστιο; Κ: κατοικία στο κέντρο; Θ: Θερινή περίοδος; Χ: Χειμερινή περίοδος.

5.2.2. Αποτελέσματα μετρήσεων και ανάλυση τους

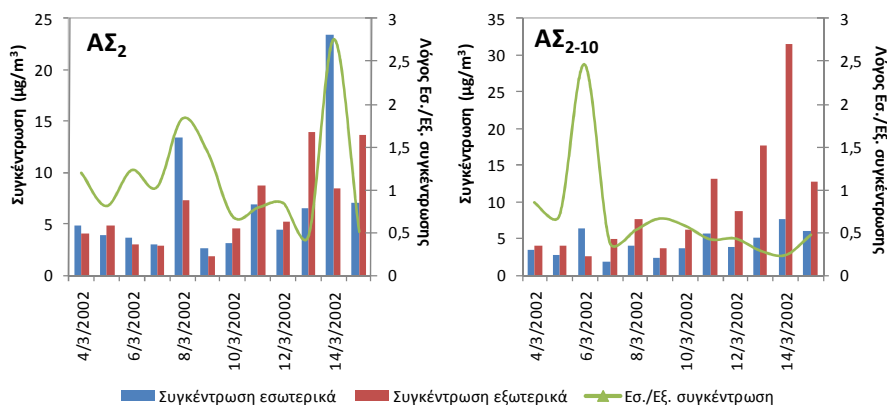
Στον Πίνακα 26 δίνονται τα περιγραφικά στατιστικά στοιχεία, που αφορούν στα αποτελέσματα των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο, της συγκέντρωσης των αερίων ρύπων και μάζας ΑΣ₁₀, και των μετεωρολογικών παραμέτρων. Ακόμα, στα διαγράμματα των Εικόνων 25-28 δίνονται οι συγκεντρώσεις μάζας ΑΣ₁₀ στον εσωτερικό και εξωτερικό χώρο των κατοικιών και η μέση τιμή του λόγου τους για κάθε ημέρα των περιόδων. Επιπλέον στα διαγράμματα σημειώνονται οι σημαντικότερες πηγές/δραστηριότητες εσωτερικά των κατοικιών.

Αρχικά εξετάστηκαν οι συγκεντρώσεις ΑΣ και αερίων ρύπων στον εξωτερικό χώρο και εκτιμήθηκαν οι πιθανές πηγές τους. Οι αέριοι ρύποι εξετάστηκαν μόνο από αυτή την άποψη, δηλαδή των ενδείξεων που δίνουν για τις πιθανές πηγές ΑΣ τόσο στον εξωτερικό όσο και στον εσωτερικό χώρο. Παρατηρήθηκε πως οι συγκεντρώσεις ΑΣ₁₀ και NO_x ήταν μεγαλύτερες κατά τη διάρκεια των χειμερινών μετρήσεων και στα δύο σημεία δειγματοληψίας. Αυτό πιθανά οφείλεται σε εκπομπές από την κεντρική θέρμανση των κτιρίων και στην ελαττωμένη σε σχέση με το καλοκαίρι ηλιακή ακτινοβολία. Στο διαμέρισμα στο κέντρο της πόλης οι τιμές των NO_x ήταν μεγαλύτερες από ότι στην κατοικία στο προάστιο τόσο κατά τη θερινή όσο και κατά

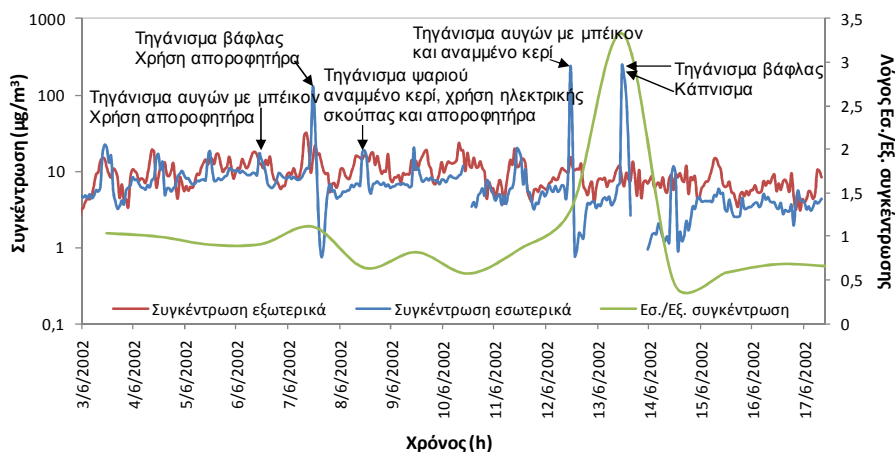
Πίνακας 26 Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία για την συγκέντρωση ΑΣ₁₀, O₃, NO₂, NO και τις τιμές των μετεωρολογικών παραμέτρων κατά τις περιόδους μετρήσεων (Lazaridis κ.α., 2006; 2007α; 2009).

	ΑΣ ₁₀ ¹			O ₃			NO ₂			NO			Θερμοκρασία (°C)		Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Σχετική Υγρασία (%)	
	Ο	Ι	Ι/Ο	Ο	Ι	Ι/Ο	Ο	Ι	Ι/Ο	Ο	Ι	Ι/Ο	Ο	Ι		Ο	Ι
Θερινή περίοδος στο προάστιο																	
Μέση τιμή	9,08	8,83 (5,73)	1,03 (0,69)	56,60	11,75	0,28	16,79	20,09	1,57	2,39	4,58	2,81	17,11	33,25	1,39	57,91	25,91
Διάμεσος	8,17	6,07 (5,68)	0,68 (0,64)	56,60	9,80	0,18	13,35	17,40	1,17	1,30	6,23	1,08	16,45	32,30	1,30	54,85	25,40
Τυπ. Απ.	3,97	21,04 (2,23)	2,53 (0,31)	24,93	8,79	0,42	11,60	8,14	0,99	4,40	41,60	5,33	4,57	4,52	0,74	20,22	4,46
5%	4,21	1,56 (1,74)	0,20 (0,24)	16,12	5,40	0,11	5,30	9,34	0,65	0,30	0,40	0,49	10,57	26,40	0,50	30,07	20,07
95%	16,33	16,87 (9,48)	1,80 (1,29)	96,40	25,24	0,65	39,39	33,16	3,66	8,30	18,20	9,78	24,80	40,04	2,80	91,84	33,60
Χειμερινή περίοδος στο προάστιο																	
Μέση τιμή				52,26	21,95	0,48	21,75	19,56	1,06	4,07	2,48	0,87	1,37	21,45	1,97	63,52	19,77
Διάμεσος				56,57	23,17	0,42	16,15	16,22	1,01	16,22	16,15	16,22	1,60	21,70	1,60	61,80	19,50
Τυπ. Απ.				21,37	8,35	0,35	16,99	13,50	0,61	13,50	16,99	13,50	3,16	2,08	1,28	19,22	3,33
5%				8,81	5,43	0,31	4,59	5,08	0,45	5,08	4,59	5,08	-4,40	17,20	0,39	36,13	14,90
95%				79,63	33,10	0,77	60,99	48,59	1,81	48,59	60,99	48,59	6,51	24,60	4,50	93,31	25,91
Θερινή περίοδος στο κέντρο																	
Μέση τιμή	5,19	12,40 (10,85)	2,15 (1,17)	40,33	6,74	0,18	20,19	15,26	0,97	4,54	2,61	0,96	18,11	27,29	0,70	69,16	41,56
Διάμεσος	4,94	7,63 (7,33)	1,30 (1,16)	39,80	6,40	0,14	16,10	14,00	0,94	1,40	1,30	0,91	17,50	27,20	0,70	71,90	41,80
Τυπ. Απ.	1,56	17,56 (15,70)	3,91 (0,73)	22,78	2,69	0,11	14,59	5,89	0,48	10,99	4,78	0,64	3,66	1,25	0,45	16,89	3,66
5%	3,11	1,35 (1,35)	0,27 (0,24)	5,64	3,60	0,08	5,78	8,50	0,34	0,30	0,20	0,24	12,90	25,30	0,10	38,14	35,00
95%	7,81	35,72 (27,83)	8,03 (2,46)	79,04	10,60	0,39	53,64	27,26	1,84	18,73	9,47	1,96	24,98	29,60	1,58	91,82	46,58
Χειμερινή περίοδος στο κέντρο																	
Μέση τιμή	12,34	13,47 (9,30)	1,62 (0,81)	23,41	7,56	0,98	39,21	33,32	2,53	22,83	20,21	1,69	1,24	21,40	0,69	84,59	24,16
Διάμεσος	10,42	8,91 (7,93)	0,83 (0,77)	19,40	6,20	0,38	34,90	31,90	0,51	4,15	3,85	1,00	2,30	21,50	0,50	89,40	24,90
Τυπ. Απ.	8,32	19,84 (6,81)	4,13 (0,39)	17,42	5,90	1,87	27,56	17,32	6,73	43,52	38,87	4,80	3,27	1,01	0,58	13,29	3,96
5%	4,13	2,88 (2,70)	0,33 (0,29)	2,90	3,36	0,20	4,64	7,46	0,02	0,40	0,40	0,23	-5,91	20,00	0,10	52,69	16,69
95%	28,44	29,26 (18,14)	3,58 (1,37)	53,70	14,12	3,71	93,78	59,15	12,06	103,76	94,23	4,30	4,91	23,00	1,90	96,60	29,80

Σημειώσεις: ¹Μετρήσεις με ΤΕΟΜ; Οι τιμές εσωτερικής συγκέντρωσης που περιλαμβάνονται από παρενθέσεις αφορούν σε περιόδους χωρίς δραστηριότητες στον εσωτερικό χώρο.



Εικόνα 25 Εσωτερικές και εξωτερικές συγκεντρώσεις μάζας AS_2 και AS_{10} και ο λόγος Εσ./Εξ. συγκεντρώσεων κατά την χειμερινή περίοδο μετρήσεων στην κατοικία σε προάστιο του Όσλο.



Εικόνα 26 Εσωτερικές και εξωτερικές συγκεντρώσεις μάζας AS_{10} και λόγος Εσ./Εξ. συγκεντρώσεων κατά την θερινή περίοδο μετρήσεων στην κατοικία σε προάστιο του Όσλο (αναπροσαρμογή από Lazaridis κ.α., 2006).



Εικόνα 27 Εσωτερικές και εξωτερικές συγκεντρώσεις μάζας AS_{10} και λόγος Εσ./Εξ. συγκεντρώσεων κατά την θερινή περίοδο μετρήσεων στο διαμέρισμα στο κέντρο του Όσλο (αναπροσαρμογή από Lazaridis κ.α., 2006).

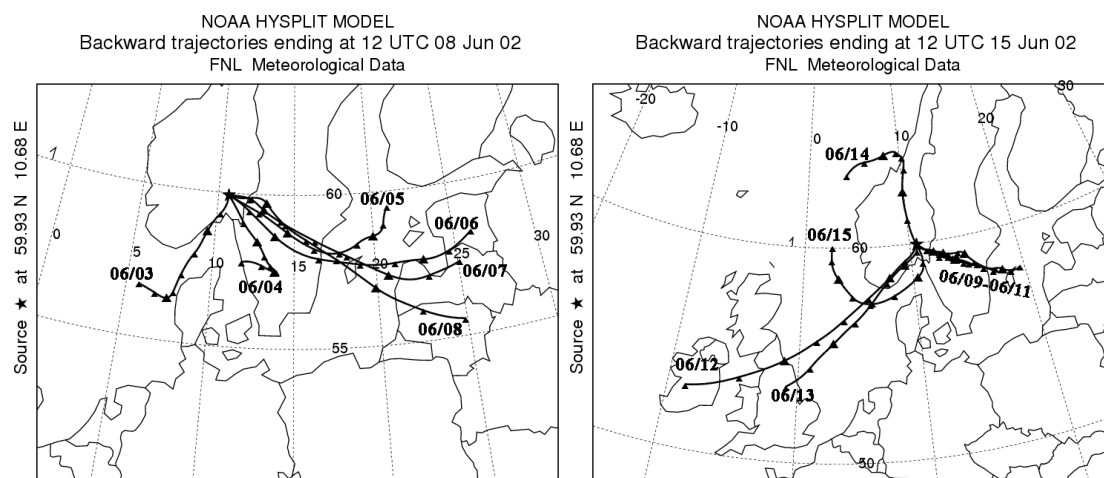


Εικόνα 28 Εσωτερικές και εξωτερικές συγκεντρώσεις μάζας AS_{10} και λόγος Εσ./Εξ. συγκεντρώσεων κατά την χειμερινή περίοδο μετρήσεων στο διαμέρισμα στο κέντρο του Όσλο (αναπροσαρμογή από Lazaridis κ.α., 2006).

τη χειμερινή περίοδο εξαιτίας της οδικής κυκλοφορίας. Τα παραπάνω συμπεράσματα για τις συγκεντρώσεις NO_x προέκυψαν με εξέταση της ωριαίας (24h) και ημερήσιας (σε διάστημα μιας εβδομάδας) διακύμανσης των τιμών τους για κάθε περίοδο μετρήσεων (Lazaridis κ.α., 2009). Αντίθετα με τα NO_x , οι συγκεντρώσεις O_3 ήταν μεγαλύτερες κατά τη διάρκεια των θερινών μετρήσεων εξαιτίας της έντονης ηλιακής ακτινοβολίας. Παρατηρήθηκε πως οι συγκεντρώσεις O_3 στο προάστιο και στο κέντρο της πόλης είχαν την ίδια ημερήσια διακύμανση αλλά ήταν μεγαλύτερες στο προάστιο ειδικά κατά τη διάρκεια της νύχτας πιθανά εξαιτίας της μεταφοράς τους εκεί από το κέντρο της πόλης (Εικόνες 1-4 στο Παράρτημα Γ).

Το τελευταίο βρέθηκε να ισχύει και για τις συγκεντρώσεις AS_{10} κατά τη θερινή περίοδο εξωτερικά της κατοικίας στο προάστιο. Πράγματι, από την εξέταση της διεύθυνσης και ταχύτητας του ανέμου σε συνδυασμό με συγκεντρώσεις AS_{10} από σταθερούς σταθμούς μέτρησης της ποιότητας αέρα στο Όσλο (Εικόνα 23), και των ανάδρομων τροχιών των αερίων μαζών στην περιοχή κατά την περίοδο 03-17/06/02 (Εικόνα 29) βρέθηκε πως μέρος της σωματιδιακής ρύπανσης στο προάστιο οφείλεται σε πηγές στο κέντρο της πόλης (οι μικρές τροχιές των αερίων μαζών στην Εικόνα 29 αποτελούν ένδειξη τοπικής ρύπανσης από πρωτογενή και δευτερογενή σωματίδια). Η υπόλοιπη οφείλεται σε θαλάσσια αεροζόλ, και σε σωματίδια που μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις (Lazaridis κ.α., 2006). Επιπλέον παρατηρήθηκε πως οι εξωτερικές συγκεντρώσεις AS_{10} ήταν μεγαλύτερες κατά τη διάρκεια των χειμερινών μετρήσεων και αυτό οφείλεται στις πηγές που αναφέρθηκαν παραπάνω για τα NO_x (Pearson R $AS_{10}/NO=0,65$ και $AS_{10}/NO_2=0,80$ για το διαμέρισμα στο κέντρο της πόλης). Επιπλέον, κατά τη διάρκεια του χειμώνα μέρος των σωματιδίων πιθανά οφείλεται σε εκπομπές από το μείγμα αλατιού που χρησιμοποιείται για τον πάγο στους δρόμους (σε μορφή σκόνης από τους δρόμους) και στις μεγαλύτερες εκπομπές θαλάσσιων αεροζόλ, όπως

φάνηκε και από τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης των σταθμικών μετρήσεων των σωματιδίων (Lazaridis κ.α., 2008α).

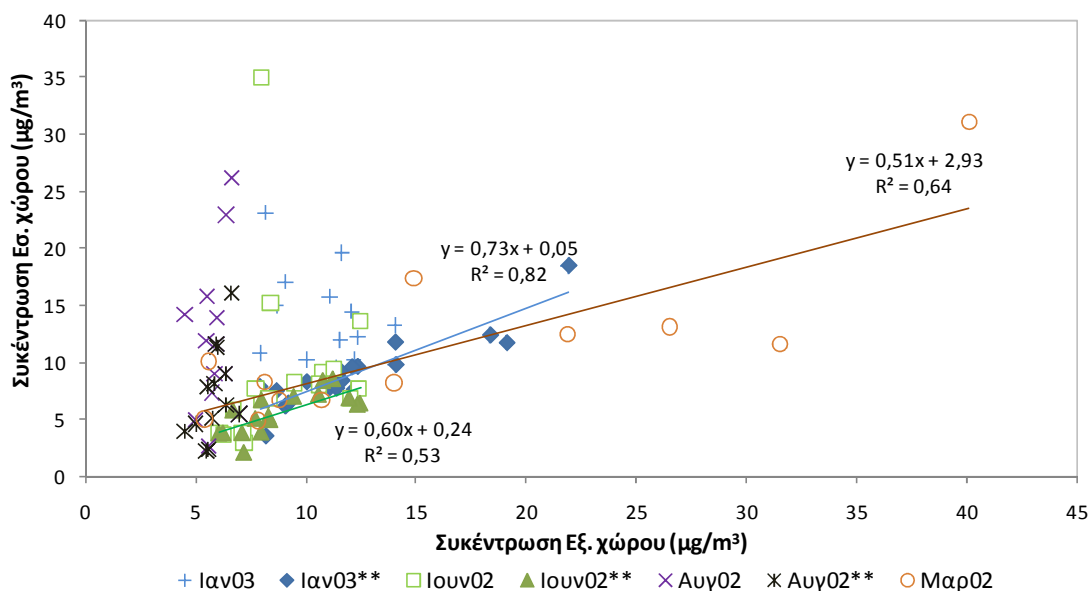


Εικόνα 29 Ανάδρομες τροχιές αερίων μαζών κατά την θερινή περίοδο μετρήσεων στην κατοικία στο προάστιο του Όσλο.

Οι συγκεντρώσεις O_3 στο εσωτερικό των κατοικιών ήταν τυπικά μικρότερες από τις εξωτερικές (Πίνακας 26) και σύμφωνα με τα αποτελέσματα ανάλυσης παλινδρόμησης πηγάζουν κύρια από την διείσδυση του εξωτερικού αέρα στο εσωτερικό των κατοικιών (Pearson R ΠΘ:0,70, ΠΧ:0,92, ΚΘ:0,75) (Lazaridis κ.α., 2009). Υψηλές τιμές παρατηρήθηκαν μόνο κατά την διάρκεια δραστηριοτήτων στον εσωτερικό χώρο και ειδικά για την χειμερινή περίοδο μετρήσεων στο διαμέρισμα στο κέντρο κατά την διάρκεια της νύχτας. Αυτό οφείλεται σε συσσώρευση του O_3 στον εσωτερικό χώρο εξαιτίας του μειωμένου εξαερισμού αλλά και στην νυχτερινή ελάττωση των εξωτερικών συγκεντρώσεων του. Για τα NO_2 και NO βρέθηκε πως οι συγκεντρώσεις τους εσωτερικά των κατοικιών κατά τις χειμερινές περιόδους ακολουθούσαν με κάποια χρονική καθυστέρηση τις εξωτερικές συγκεντρώσεις και είχαν πολύ υψηλές τιμές κατά τη διάρκεια του καπνίσματος και όταν υπήρχαν αναμμένα κεριά στο καθιστικό (Pearson R ΠΧ:0,96, ΚΧ:0,96, ΚΘ: 0,6).

Οι συγκεντρώσεις $A\bar{\Sigma}_{10}$ στο εσωτερικό των κατοικιών παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις όπως φαίνεται στις Εικόνες 25-28. Οι τιμές του ήταν μεγαλύτερες κατά τις χειμερινές περιόδους μετρήσεων εξαιτίας των μεγαλύτερων εξωτερικών τους συγκεντρώσεων αλλά και της συσσώρευσης τους εσωτερικά αφού ο εξαερισμός των κατοικιών ήταν περιορισμένος για εξοικονόμηση ενέργειας. Ακόμα, οι τιμές τους ήταν μικρότερες (λόγος Εσ./Εξ. <1) και ακολουθούσαν τις εξωτερικές συγκεντρώσεις με μικρή χρονική καθυστέρηση (Εικόνα 30) με εξαίρεση τις περιόδους που πραγματοποιούνταν δραστηριότητες στο εσωτερικό των κατοικιών συνήθως μεταξύ 9:30 π.μ. – 12:30 μ.μ.. Σε περιόδους με δραστηριότητες στο εσωτερικό των κατοικιών παρατηρήθηκε αύξηση της συγκέντρωσης $A\bar{\Sigma}_{10}$ έως και 100 φορές σε σχέση με την συγκέντρωση σταθερής κατάστασης (όπως υπολογίστηκε με το μοντέλο μικροπεριβάλλοντος; 24/01/03: κάπνισμα πούρου για 30 min; μέγιστη συγκέντρωση 5 min

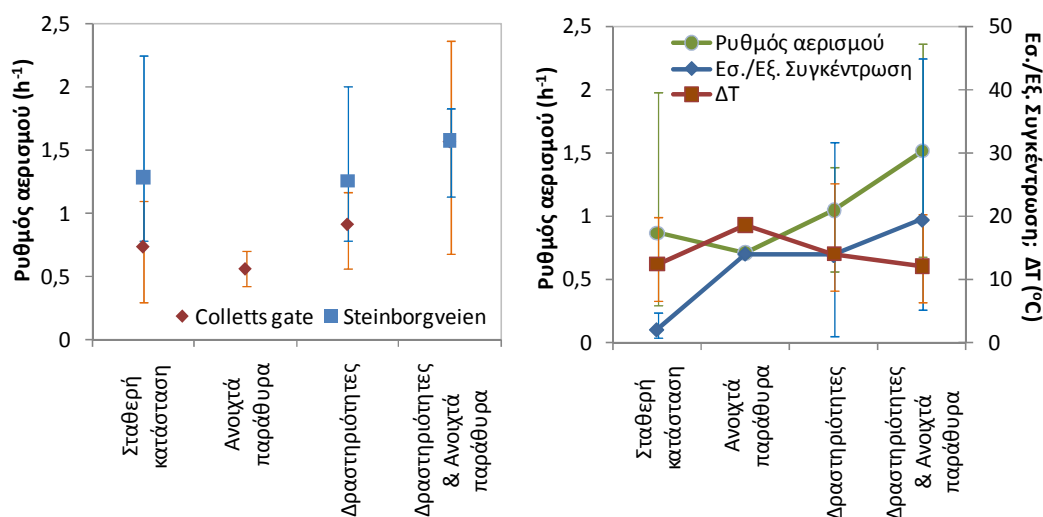
347,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Η τιμή του λόγου των εσωτερικών προς τις εξωτερικές συγκεντρώσεις έφτασε έως και 50 (24/01/03: κάπνισμα πούρου). Οι εσωτερικές συγκεντρώσεις μάζας $\text{A}\Sigma_{10}$ ήταν ιδιαίτερα υψηλές κατά τη διάρκεια του μαγειρέματος (έως και 60 φορές την εξωτερική συγκέντρωση) και του καπνίσματος. Επιπλέον παρατηρήθηκε πως η χρήση του απορροφητήρα κατά το τηγάνισμα βάφλας μείωσε σημαντικά την επίδραση της δραστηριότητας στην συγκέντρωση $\text{A}\Sigma_{10}$ (ΠΘ: αύξηση συγκέντρωσης με απορροφητήρα ~19 φορές; χωρίς απορροφητήρα ~62 φορές) ενώ αύξηση των συγκεντρώσεων μάζας στο εσωτερικό του σπιτιού καταγράφηκε σε όλες τις περιόδους με παρουσία ατόμων στο σπίτι και με περπάτημα (Lazaridis κ.α., 2006). Δεν ήταν δυνατό να βγουν συμπεράσματα όσον αφορά στην επίδραση της χρήσης ηλεκτρικής σκούπας και των αναμμένων κεριών στις συγκεντρώσεις μάζας $\text{A}\Sigma_{10}$. Παρόμοια αποτελέσματα για τις συγκεντρώσεις μάζας $\text{A}\Sigma_{10}$ κατά τη διάρκεια δραστηριοτήτων στον εσωτερικό χώρο έχουν βρεθεί σε άλλες μελέτες (π.χ. Koronen κ.α., 2001; Franck κ.α., 2003; Zhu κ.α., 2004)



Εικόνα 30 Σχέση εσωτερικής με εξωτερική συγκέντρωση $\text{A}\Sigma_{10}$.

Ο λόγος των συγκεντρώσεων Εσ./Εξ. των κατοικιών παρατηρήθηκε μεγαλύτερος τις εργάσιμες ημέρες από ότι τα Σαββατοκύριακα. Ωστόσο αυτό οφείλεται κυρίως στην μη εκτέλεση πολλών δραστηριοτήτων από την ομάδα των μετρήσεων κατά τη διάρκεια του Σαββατοκύριακου παρά σε ελάττωση των εξωτερικών συγκεντρώσεων των $\text{A}\Sigma_{10}$ (Lazaridis κ.α., 2006 – Πίνακας 1 στο Παράρτημα Γ). Στα διαγράμματα της Εικόνα 31 δίνεται ο ρυθμός αερισμού των κατοικιών κάτω από διαφορετικές συνθήκες στις δύο κατοικίες και αντίστοιχα για τις ίδιες συνθήκες ο λόγος Εσ./Εξ. συγκεντρώσεων και η θερμοκρασιακή διαφορά (ΔT) στα δύο περιβάλλοντα. Παρατηρήθηκε αρχικά ότι ο ρυθμός αερισμού ήταν μεγαλύτερος στην κατοικία στο προάστιο αλλά με μικρότερες διακυμάνσεις από τον ρυθμό αερισμού στο διαμέρισμα στο κέντρο. Αυτό οφείλεται στην παλαιότητα του κτιρίου, στο υλικό κατασκευής του, και πιθανά σε ελλιπή σφράγιση του παραθύρου από όπου διέρχονταν οι αγωγοί

δειγματοληψίας του εξωτερικού αέρα. Βρέθηκε ακόμα πως ο λόγος της Εσ./Εξ. συγκέντρωσης $A\Sigma_{10}$ κατά τις περιόδους μετρήσεων αυξανόταν ανάλογα με το ρυθμό αερισμού και πως σε σταθερές συνθήκες (κλειστά παράθυρα, καμία δραστηριότητα) μεταβαλλόταν ανάλογα της θερμοκρασιακής διαφοράς στα δύο περιβάλλοντα (Pearson R 0,81).

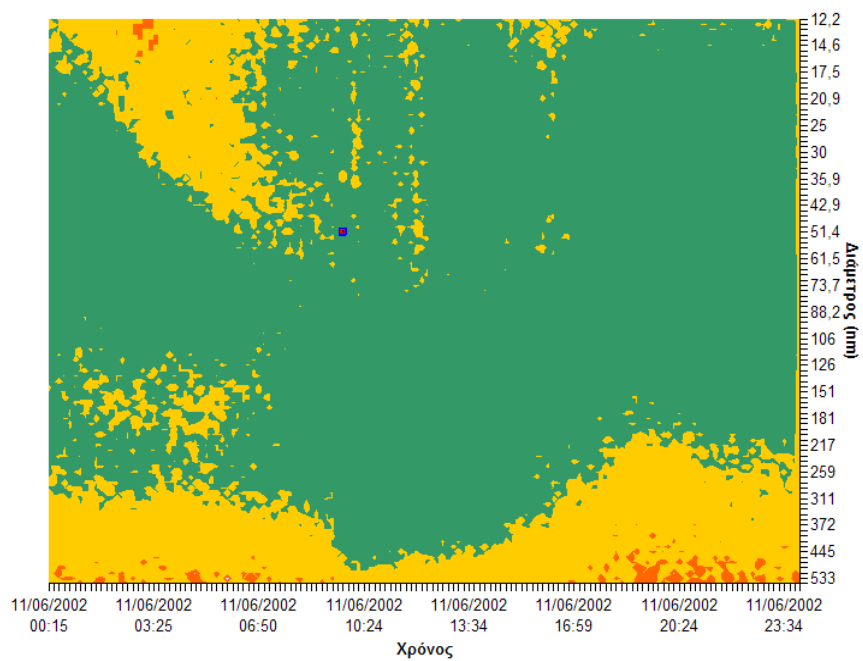
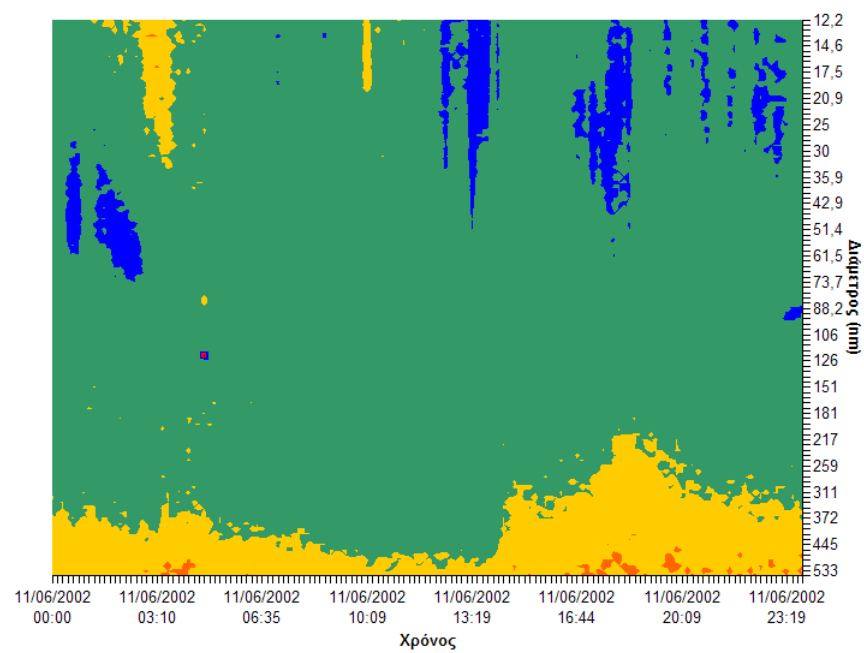


Εικόνα 31 (α) Σύγκριση του ρυθμού αερισμού υπό διάφορες συνθήκες στις δύο κατοικίες στο Όσλο. (β) Λόγος Εσ./Εξ. συγκέντρωσης $A\Sigma_{10}$, ρυθμός αερισμού και θερμοκρασιακή διαφορά ΔT ($T_{εσ} - T_{εξ}$) στα δύο περιβάλλοντα υπό διάφορες συνθήκες. Οι κάθετες γραμμές αντιστοιχούν στην ελάχιστη και μέγιστη τιμή κάθε περίπτωσης (αναπροσαρμοσμένο από Lazaridis κ.α., 2006).

Επιπλέον εξετάστηκε η επίδραση των μετεωρολογικών παραμέτρων (ταχύτητα ανέμου, θερμοκρασία, σχετική υγρασία) στον λόγο των συγκεντρώσεων στα δύο περιβάλλοντα χωριστά για κάθε περίοδο και χωριστά για κάθε ημέρα. Δε βρέθηκε σημαντική συσχέτιση του λόγου των συγκεντρώσεων με μετεωρολογικές παραμέτρους, ακόμα κι όταν εξετάστηκαν οι περίοδοι χωρίς δραστηριότητες εσωτερικά, παρά μόνο για τη μάζα $A\Sigma_{10}$ σε συγκεκριμένες ημέρες (με την ταχύτητα του ανέμου, την σχετική υγρασία στον εσωτερικό χώρο και την εξωτερική θερμοκρασία) σε συμφωνία με άλλες μελέτες (Chan, 2002). Επιπλέον, η συγκέντρωση του όζοντος βρέθηκε να επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας κατά την περίοδο ΠΘ. Η επίδραση των μετεωρολογικών παραμέτρων στον λόγο Εσ./Εξ. συγκέντρωσης $A\Sigma_{10}$ καλύπτεται από την επίδραση των άλλων παραμέτρων (ρυθμός αερισμού, δραστηριότητες και πηγές εσωτερικά). Ωστόσο οι μετεωρολογικές παράμετροι και η προέλευση των αερίων μαζών βρέθηκε πως επηρεάζουν την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων και την χημική τους σύσταση στον εξωτερικό χώρο και εσωτερικό αέρα (αναλύεται παρακάτω).

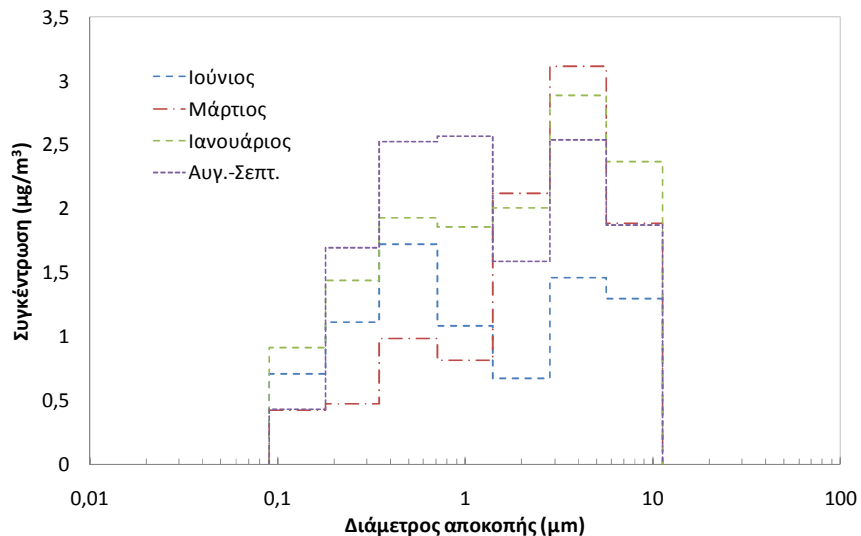
Από την εξέταση των συγκεντρώσεων αριθμού των υπέρλεπτων, λεπτών και χονδρών ΑΣ κατά την θερινή περίοδο στην κατοικία στα προάστια του Όσλο βρέθηκε πως οι τιμές τους στον εσωτερικό και εξωτερικό χώρο σχεδόν εξισώνονταν τα πρωινά. Αυτό γινόταν περίπου στις 9:30 π.μ. που έφθανε η ομάδα μετρήσεων στο χώρο και άνοιγε τα παράθυρα. Μετά την αποχώρηση της ομάδας από την κατοικία οι συγκεντρώσεις στα δύο περιβάλλοντα διαχωρίζονται (εξαιτίας εναπόθεσης στον εσωτερικό χώρο). Οι μέσες συγκεντρώσεις αριθμού υπέρλεπτων και λεπτών σωματιδίων (SMPS) κατά την περίοδο μετρήσεων στον εξωτερικό και εσωτερικό αέρα ήταν $4,50 \times 10^3 \pm 2,31 \times 10^3 \text{ \#/cm}^3$ και $4,11 \times 10^3 \pm 1,25 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$, αντίστοιχα. Οι μέσες τιμές 5 min κυμαίνονταν από $1,16 \times 10^3$ έως $1,44 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$ στον εξωτερικό αέρα και από $8,53 \times 10^2$ έως $1,70 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$ στον εσωτερικό αέρα. Κατά την εκτέλεση δραστηριοτήτων και ύπαρξης πηγών εσωτερικά της κατοικίας (μαγείρεμα, άναμμα κεριών, κάπνισμα) παρατηρούνται πολύ υψηλές τιμές στον αριθμό των υπέρλεπτων σωματιδίων (μέγιστη τιμή κατά τη διάρκεια: τηγανίσματος και κεριών στις 12/06/02 $1,21 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$; 1 τηγάνισμα και κάπνισμα στις 13/06/02 $1,7 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$ και $7,29 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$, αντίστοιχα) οι οποίες ελαττώνονται μετά το τέλος της δραστηριότητας (ανάλογα αποτελέσματα σε άλλες μελέτες π.χ. He κ.α., 2004; Wallace κ.α. 1996; Mitsakou κ.α., 2007; Yeung κ.α., 2008). Τις ημέρες που δεν πραγματοποιήθηκαν άλλες δραστηριότητες στον εσωτερικό χώρο πέρα από τον έλεγχο των οργάνων μέτρησης, παρατηρήθηκε πως η μέση αριθμητική συγκέντρωση των υπέρλεπτων σωματιδίων εσωτερικά ακολουθούσε την εξωτερική αλλά με χαμηλότερες τιμές ($R^2 = 0,98$; μέγιστη τιμή αριθμού $4,22 \times 10^3 \text{ \#/cm}^3$; Εικόνα 32). Αυτό οφείλεται στην περιορισμένη διείσδυση των υπέρλεπτων σωματιδίων από τον εξωτερικό χώρο και (Zhu κ.α., 2004; Mosley κ.α., 2001). Το ίδιο παρατηρήθηκε και για τα λεπτά και χονδρά ΑΣ (0,7 – 10 μm) από τις μετρήσεις του οργάνου APS ($R^2 = 0,98$ με εξαίρεση τα σωματίδια διαμέτρου 0,7-1,3 μm). Ο λόγος της εσωτερικής προς την εξωτερική συγκέντρωση σε περιόδους με πηγές στον εσωτερικό χώρο ήταν 0,5, 0,8 και 0,94 για σωματίδια με διάμετρο 10-100 nm, 100-300 nm, και >300 nm, αντίστοιχα. Για τα ίδια κλάσματα μεγέθους οι τιμές του λόγου σε περιόδους χωρίς πηγές ήταν 2,4, 6,1 και 6,5, αντίστοιχα.

Η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων στον εσωτερικό και εξωτερικό χώρο εξετάστηκε με τη βοήθεια των μετρήσεων αριθμητικής συγκέντρωσης και από τα αποτελέσματα των σταθμικών μετρήσεων με τον κρουστικό δειγματολήπτη 8 σταδίων. Παράδειγμα της κατανομής των υπέρλεπτων σωματιδίων στον εσωτερικό και εξωτερικό χώρο δίνεται στην Εικόνα 32. Στον εξωτερικό αέρα περίπου το 85% του αριθμού των σωματιδίων με διάμετρο <300nm έχουν διάμετρο <100 nm όπως έχει βρεθεί και για άλλες αστικές περιοχές στην Ευρώπη (Van Dingenen κ.α., 2004). Στον εσωτερικό αέρα το ποσοστό αυτό κυμαίνεται από 77% (χωρίς πηγές) έως 79% (με πηγές) ανάλογα με τις δραστηριότητες που εκτελούνται.



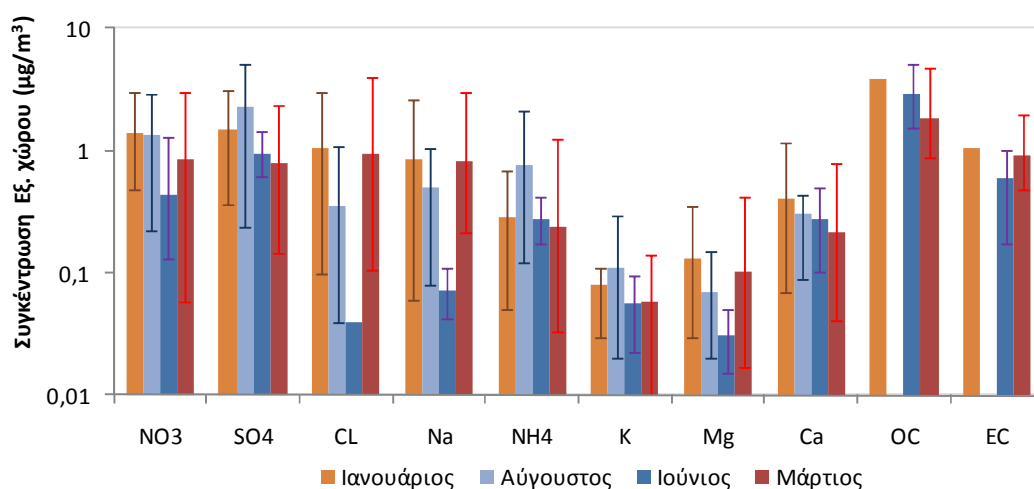
Εικόνα 32 Πλήθος λεπτών σωματιδίων στον εξωτερικό και εσωτερικό αέρα στις 11/06/02.

Οι κατανομές μεγέθους $A\Sigma_{10}$ στον εξωτερικό χώρο κατά τις περιόδους μετρήσεων, που προέκυψαν με τη σταθμική μέθοδο, δίνονται στο διάγραμμα της Εικόνα 33. Παρατηρήθηκε αύξηση του κλάσματος χονδρών σωματιδίων κατά τις χειμερινές περιόδους (ισχυροί άνεμοι, μεγαλύτερη RH, μικρότερη φωτοχημική δραστηριότητα), ενώ κατά τις θερινές περιόδους η μέση τιμή της μάζας χονδρών και λεπτών σωματιδίων ήταν περίπου ίση.

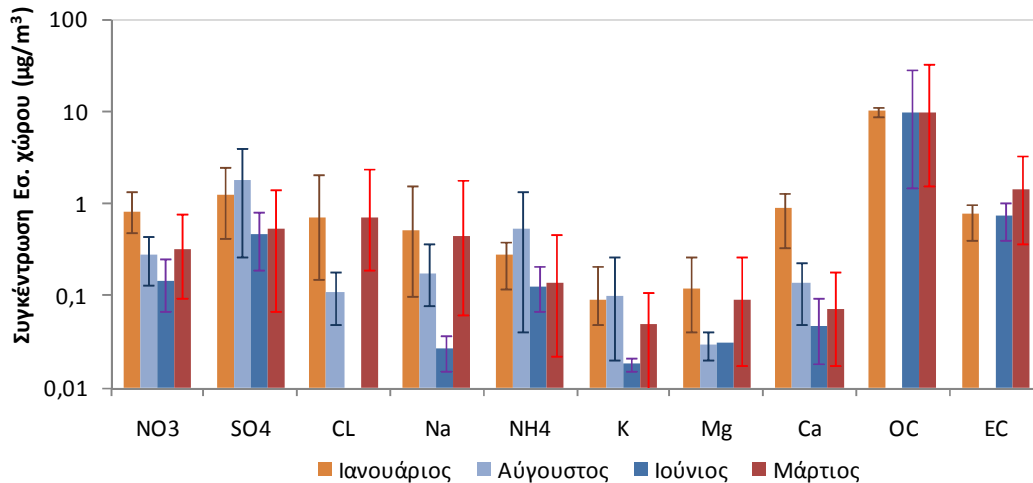


Εικόνα 33 Κατανομή μεγέθους σωματιδίων κατά τις περιόδους μετρήσεων στο Όσλο.

Όσον αφορά στη χημική σύσταση των σωματιδίων, εξετάστηκε η επίδραση των μετεωρολογικών παραμέτρων, της ημέρας και της προέλευσης των αερίων μαζών στα σημεία δειγματοληψίας, στις συγκεντρώσεις και την κατανομή των υδατοδιαλυτών ιόντων (NO_3^- , Na^+ , Cl^- , Mg^+ , Ca^{2+} , K^+ ; SO_4^{2-} , NH_4^+), οργανικού (OC) και στοιχειακού (EC) άνθρακα σε σωματίδια διαφορετικού μεγέθους στον εξωτερικό και εσωτερικό αέρα. Στις Εικόνες 34-35 δίνονται οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων ανόργανων ιόντων, στοιχειακού και οργανικού άνθρακα στα $A\Sigma_{10}$ κατά τις περιόδους μετρήσεων καθώς και η διακύμανση τους. Τα στοιχεία αυτά, μαζί με τη διάμεσο τιμή των συγκεντρώσεων και τη συσχέτιση (Pearson R^2) της εξωτερικής με την εσωτερική συγκέντρωση, δίνονται στους Πίνακες 2-5 του Παραρτήματος Γ.



Εικόνα 34 Συγκέντρωση συστατικών $A\Sigma_{10}$ στον εξωτερικό χώρο των κατοικιών κατά τις περιόδους μετρήσεων στο Όσλο.



Εικόνα 35 Συγκέντρωση συστατικών ΑΣ₁₀ στον εσωτερικό χώρο των κατοικιών κατά τις περιόδους μετρήσεων στο Όσλο.

Στον εξωτερικό αέρα, η συγκέντρωση Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , SO_4^{2-} , και NO_3^- ήταν μεγαλύτερη στο κέντρο της πόλης από ότι στο προάστιο σε όλες τις περιόδους μετρήσεων. Αυτό πιθανά οφείλεται στην αιώρηση εδαφικής σκόνης εξαιτίας της κίνησης οχημάτων και στις εκπομπές από τα οχήματα (Hildermann κ.α.,1991; Kleeman κ.α.,1998). Παρατηρούνται μεγάλες διακυμάνσεις στις συγκεντρώσεις Mg^{2+} , Cl^- , Na^+ κυρίως κατά τις χειμερινές περιόδους μετρήσεων. Η συγκέντρωση SO_4^{2-} και NH_4^+ ήταν μεγαλύτερη κατά την διάρκεια των θερινών μετρήσεων (τυπική συμπεριφορά/φωτοχημική δραστηριότητα) ενώ το αντίθετο παρατηρήθηκε για τις συγκεντρώσεις NO_3^- (Lazaridis κ.α., 2008α). Επιπλέον, η συγκέντρωση OC και EC ήταν μεγαλύτερη κατά τη θερινή περίοδο μετρήσεων (αποτέλεσμα από τις μετρήσεις στο προάστιο) το οποίο πιθανά οφείλεται στην παραγωγή δευτερογενώς οργανικών αεροζόλ όπως καταδεικνύεται από τον λόγο OC/EC (4,8; τιμές του >2 θεωρούνται ένδειξη ύπαρξης δευτερογενών οργανικών αεροζόλ στην ατμόσφαιρα; Chow κ.α., 1996). Τα στοιχεία που παρουσιάζονται στις Εικόνες 34-35 μαζί με τη διάμεσο τιμή των συγκεντρώσεων και τη συσχέτιση (R^2) της εσωτερικής με την εξωτερική συγκέντρωση δίνονται στους Πίνακες 1-4 του παραρτήματος Γ.

Οι μεταβολές των συγκεντρώσεων στον εξωτερικό αέρα οφείλονται σε μεταβολές των συνθηκών στην ατμόσφαιρα και των πηγών στο ευρύτερο αστικό περιβάλλον. Οι συγκεντρώσεις συστατικών που εκπέμπονται από την ίδια πηγή ή πηγές στην ίδια περιοχή συσχετίζονται. Έτσι για παράδειγμα για τις συγκεντρώσεις Mg^{2+} , Cl^- , Na^+ βρέθηκε πως οι συγκεντρώσεις τους σε όλες τις περιόδους μεταβάλλονταν με τον ίδιο τρόπο από μέρα σε ημέρα. Επιπλέον παρουσίαζαν τις μεγαλύτερες τιμές όταν οι αέριες μάζες προέρχονταν από θαλάσσιες περιοχές και κατά τις χειμερινές περιόδους όταν η ταχύτητα του ανέμου ήταν μεγάλη (οι τιμές R για όλες τις περιόδους μετρήσεων από 0,86 έως και 0,99; Lazaridis κ.α., 2008α). Επομένως μπορεί να θεωρηθεί ότι μέρος των παρατηρούμενων συγκεντρώσεων μάζας τους πηγάει από τις εκπομπές θαλάσσιων αεροζόλ και ειδικά για το χειμώνα πιθανά

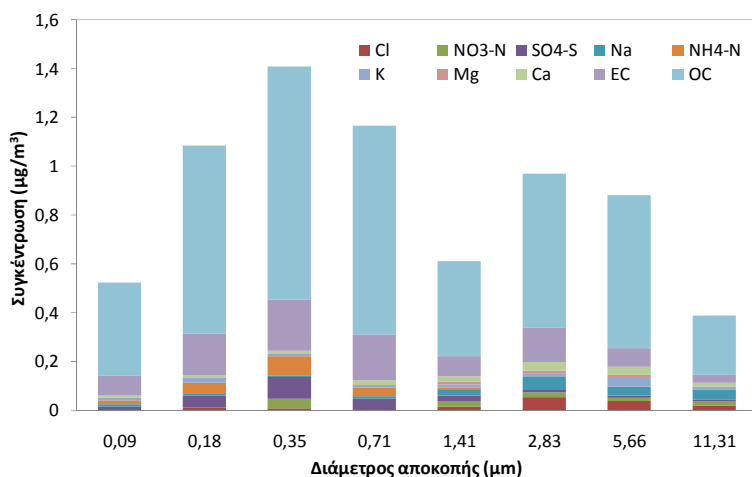
να προέρχεται και από την επαναιώρηση του άλατος που χρησιμοποιείται για τον πάγο στους δρόμους.

Με τον ίδιο τρόπο ελέγχθηκε η προέλευση των συγκεντρώσεων μάζας SO_4^{2-} , NH_4^+ και NO_3^- . Βρέθηκε συσχέτιση των τιμών του σε όλες τις περιόδους (R : 0,77 - 0,99) και πως οι τιμές τους ήταν μεγαλύτερες όταν οι αέριες μάζες προέρχονταν από περιοχές με αστικά κέντρα ή είχαν μικρές τροχιές. Ακόμα οι συγκεντρώσεις τους, μαζί με του K^+ , φάνηκε να επηρεάζονται από τοπικές πηγές και συγκεκριμένα από την οδική κυκλοφορία (χαμηλότερες τιμές τα Σαββατοκύριακα στις θερινές περιόδους). Το ίδιο προφίλ παρατηρήθηκε και για τις συγκεντρώσεις Ca^{2+} , που πιθανά συνδέεται με την μείωση της επαναιώρησης σκόνης από τους δρόμους (Hilderthmann κ.α.,1991; Kleeman κ.α.,1998). Κατά την διάρκεια της χειμερινής περιόδου στο σπίτι στο προάστιο μέρος των παρατηρούμενων συγκεντρώσεων φαίνεται να οφείλεται σε μια επιπλέον τοπική πηγή που πιθανά είναι η καύση ξύλων για τη θέρμανση. Ένδειξη γι αυτή την πηγή δίνεται από τη σχέση μεταξύ των συγκεντρώσεων των K^+ και NO_3^- ($R = 0,93$) όπως έχει βρεθεί σε παλαιότερες μελέτες (Wang κ.α., 2005). Η υπόθεση ύπαρξης δευτερογενών οργανικών αεροζόλ στην ατμόσφαιρα ειδικά κατά την θερινή περίοδο, υποστηρίζεται επιπλέον από την αύξηση των συγκεντρώσεων OC και EC τις ημέρες που οι αέριες μάζες προέρχονταν από την κεντρική Ευρώπη και την ελάττωση τους κατά τις ημέρες που προέρχονταν από θαλάσσιες περιοχές. Η ίδια μεταβολή παρατηρήθηκε και για τις συγκεντρώσεις SO_4^{2-} , NH_4^+ και NO_3^- .

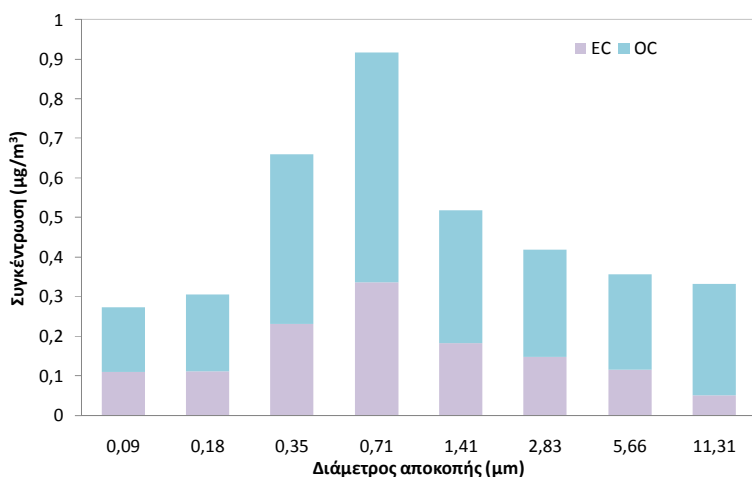
Η μέση συγκέντρωση των περισσότερων ιόντων ήταν μικρότερη εσωτερικά από ότι εξωτερικά των κατοικιών σε όλες τις περιόδους μετρήσεων. Ωστόσο η μέση συγκέντρωση τους εσωτερικά είναι για τα περισσότερα μεγαλύτερη κατά τις χειμερινές περιόδους εξαιτίας του περιορισμού στον εξαερισμό των κατοικιών που έχει ως αποτέλεσμα τη συσσώρευση τους. Οι διακυμάνσεις στις συγκεντρώσεις τους κατά τη διάρκεια των χειμερινών περιόδων οφείλονται κυρίως σε μεταβολές της συγκέντρωσης τους στον εξωτερικό χώρο (σύμφωνα με τους συντελεστές R^2 που παρουσιάζονται στους Πίνακες 2-5 του Παραρτήματος Γ; περισσότερες λεπτομέρειες δίνονται στο άρθρο Lazaridis κ.α., 2008α). Η συγκέντρωση OC ήταν μεγαλύτερη στον εσωτερικό χώρο από ότι στον εξωτερικό σε όλες τις περιόδους και παρατηρήθηκαν μεγάλες διακυμάνσεις στην τιμή της. Αντίθετα, η συγκέντρωση EC ήταν μεγαλύτερη στον εξωτερικό χώρο όπου κατά τις χειμερινές περιόδους ήταν περίπου ίση στο προάστιο και στο κέντρο της πόλης. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με παλαιότερες μελέτες για την σχέση των σωματιδίων άνθρακα σε εξωτερικούς και εσωτερικούς χώρους κατοικιών σε προάστια και στο κέντρο πόλεων (συνοψίζονται από τον Funasaka κ.α., 2000).

Προκειμένου να εκτιμηθεί η επίδραση των εξωτερικών συγκεντρώσεων των συστατικών στις εσωτερικές συγκεντρώσεις τους θα πρέπει να εξεταστεί αρχικά η δυνατότητα διείσδυσης τους στον εσωτερικό χώρο ακόμα και σε περιόδους που τα παράθυρα ήταν κλειστά. Η χημική σύσταση των μέσων κατανομών μεγέθους AS_{10} κατά τις περιόδους μετρήσεων δίνεται στις

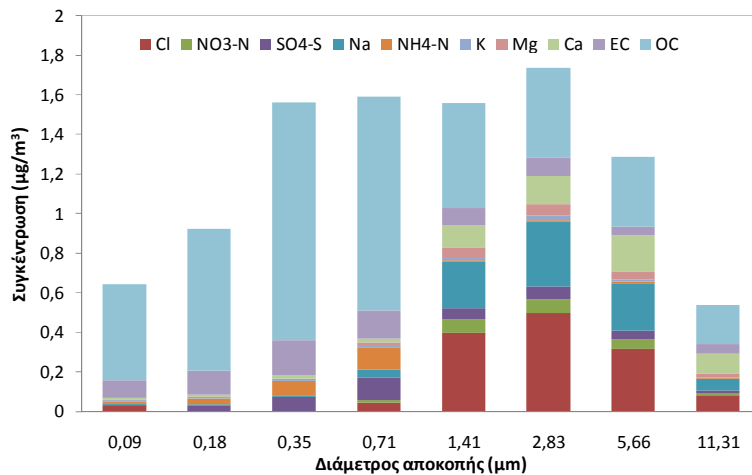
Εικόνες 36-38. Από τις κατανομές προκύπτει ότι OC, EC, SO_4^{2-} , και NH_4^+ βρέθηκαν κυρίως στα λεπτά σωματίδια (<1,41 μm) κατά τις περιόδους μετρήσεων ενώ τα συστατικά που προέρχονται κυρίως από το φλοιό της γης (Mg^+ , Ca^{2+}) και τα θαλάσσια αεροζόλ (Na^+ , Cl^-), ανιχνεύονται κυρίως στα μεγαλύτερα σωματίδια. Ιόντα K^+ και NO_3^- βρέθηκαν σε ίσες ποσότητες στις δύο κατηγορίες μεγέθους. Έτσι είναι περισσότερο πιθανό για τα OC, SO_4^{2-} , και NH_4^+ να εισέλθουν στον εσωτερικό χώρο από τον εξωτερικό αέρα από τα Na^+ , Cl^- , Mg^+ , και Ca^{2+} .



Εικόνα 36 Χημική σύσταση της μέσης κατανομής μεγέθους σωματιδίων στον εξωτερικό χώρο της κατοικίας στο προάστιο του Όσλο κατά την θερινή περίοδο μετρήσεων.



Εικόνα 37 Χημική σύσταση της μέσης κατανομής μεγέθους σωματιδίων στον εξωτερικό χώρο της κατοικίας στο προάστιο του Όσλο κατά την χειμερινή περίοδο μετρήσεων.



Εικόνα 38 Χημική σύσταση της μέσης κατανομής μεγέθους σωματιδίων στον εξωτερικό χώρο του διαμερίσματος στο κέντρο του Όσλο κατά την χειμερινή περίοδο μετρήσεων.

Τιμές του λόγου Εσ./Εξ. συγκέντρωσης για τα $A\Sigma_{2,5}$, $A\Sigma_{2,5-10}$ και $A\Sigma_{10}$ σε περιόδους με και χωρίς δραστηριότητες στον εσωτερικό χώρο καθώς και για διαφορετικούς ρυθμούς αερισμού δίνονται στις Εικόνες 5α-γ του Παραρτήματος Γ (αναλύονται στο άρθρο στο άρθρο Lazaridis κ.α., 2008α). Οι τιμές του λόγου συμφωνούν με τα αποτελέσματα παλαιότερων μελετών (Πίνακας 6 του Παραρτήματος Γ).

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω θεωρείται πως η διείσδυση του εξωτερικού αέρα είναι η σημαντικότερη πηγή των περισσότερων συστατικών στο εσωτερικό της κατοικίας και οι μεταβολές των τιμών τους καθορίζονται από τις μεταβολές των εξωτερικών συγκεντρώσεων και τον ρυθμό διείσδυσης. Ωστόσο για κάποια συστατικά (π.χ. Ca^{2+}) φαίνεται να υπάρχει επίδραση στην συγκέντρωσή τους από πηγές στον εσωτερικό χώρο σύμφωνα με τους λόγους Εσ./Εξ. συγκέντρωσης (αναλύεται στο άρθρο Lazaridis κ.α., 2008α). Βρέθηκε πως οι συγκεντρώσεις OC και EC στα $A\Sigma_{2,5-10}$ εσωτερικά της κατοικίας στο προάστιο ήταν πολύ υψηλότερες των εξωτερικών (λόγος 1,9) ακόμα και σε περιόδους χωρίς ρυπογόνες δραστηριότητες (κάπνισμα, μαγείρεμα, καύση κεριών). Ακόμα στο διαμέρισμα στο κέντρο της πόλης κατά την χειμερινή περίοδο ο λόγος Εσ./Εξ. συγκέντρωσης για τα K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} ήταν μεγαλύτερος του 1 πιθανά λόγω σκόνης που μεταφέρεται εσωτερικά από την ομάδα μετρήσεων ή των υλικών από την πρόσφατη ανακαίνιση του διαμερίσματος και της συσσώρευσης τους εσωτερικά λόγω χαμηλού εξαερισμού.

5.2.3. Υπολογισμός της εφαρμοσμένης και εσωτερικής δόσης

Στα πλαίσια της μελέτης εξετάστηκε η περίπτωση της έκθεσης ενός ενήλικα Καυκάσιου άνδρα στις μετρούμενες συγκεντρώσεις στο σπίτι στο προάστιο του Όσλο κατά την θερινή περίοδο. Ο υπολογισμός της εφαρμοσμένης και εσωτερικής δόσης στο αναπνευστικό σύστημα, το

αίμα, τους λεμφαδένες και το γαστρεντερικό σύστημα στις παραγράφους που ακολουθούν έγινε ώστε να εξεταστεί η σχέση έκθεσης δόσης και η επίδραση σε αυτή, των ατομικών δραστηριοτήτων και των εσωτερικών πηγών ρύπανσης. Επιπλέον, εξετάζεται η χρήση των μέσων ημερήσιων τιμών συγκέντρωσης και αυτών από σταθερούς σταθμούς μέτρησης ποιότητας αέρα ως αντιπροσωπευτικές της έκθεσης και δόσης των ατόμων μιας περιοχής (όπως συνήθως γίνεται στις επιδημιολογικές μελέτες; Wichmann κ.α., 2000; Lippmann κ.α., 2000; Pope κ.α., 2002; Neuberger κ.α., 2004; Dominici κ.α., 2005; Analitis κ.α., 2006; US EPA 2004).

Αρχικά, όπως αναφέρθηκε πριν, ορίστηκε ως εκτεθειμένο άτομο ο ενήλικας Καυκάσιος άνδρας με τις τυπικές παραμέτρους ανατομίας και φυσιολογίας που δίνονται στον Πίνακα 10. Τα σωματίδια θεωρήθηκαν σφαιρικά με πυκνότητα $1,5 \text{ g/cm}^3$ για τα ολικά σωματίδια, που αντιστοιχεί στην μέση πυκνότητα των ατμοσφαιρικών ΑΣ (Zhang κ.α., 2005; η τιμή της κυμαίνεται από $1,3$ έως $1,8 \text{ g/cm}^3$; Sioutas κ.α., 2000). Αν και έχει βρεθεί πως η πυκνότητα των ΑΣ σε εσωτερικούς χώρους μπορεί να διαφέρει σημαντικά από την εξωτερική (συνήθως είναι μικρότερη; Hinds, 1999), εξαιτίας των διαφορετικών πηγών στα δύο περιβάλλοντα θεωρήθηκε ίση και στα δύο περιβάλλοντα. Γι αυτό το λόγο και επιπλέον για να εξεταστεί η επίδραση της πυκνότητας στην εναπόθεση ΑΣ στο ΑΑΣ, πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί της δόσης στον εσωτερικό και τον εξωτερικό χώρο και για πυκνότητες $1,3 \text{ g/cm}^3$ και $1,8 \text{ g/cm}^3$. Για το οργανικό κλάσμα των σωματιδίων στον εξωτερικό χώρο η τιμή της πυκνότητας θεωρήθηκε ίση με $1,2 \text{ g/cm}^3$ (Turpin και Lim, 2001) και για το ανόργανο κλάσμα τους $1,8 \text{ g/cm}^3$. Η απορρόφηση των σωματιδίων στο αίμα θεωρείται πως γίνεται με γρήγορο ρυθμό.

Το σενάριο έκθεσης/δραστηριότητας του ατόμου βασίστηκε στο ημερολόγιο δραστηριοτήτων εσωτερικά και εξωτερικά της κατοικίας στο προάστιο του Όσλο που καταγράφηκε κατά την θερινή περίοδο μετρήσεων καθώς και στην τυπική κατανομή χρόνου μεταξύ δραστηριοτήτων, που έχει καταγραφεί από την Ευρωπαϊκή στατιστική υπηρεσία (Eurostat, 2004), την Νορβηγική στατιστική υπηρεσία (CBS Norway, 2002) και την μελέτη έκθεσης των Clench-Aas κ.α. (1999), για τους άνδρες Νορβηγούς (Aleksandroulou κ.α., 2008) (Πίνακας 27).

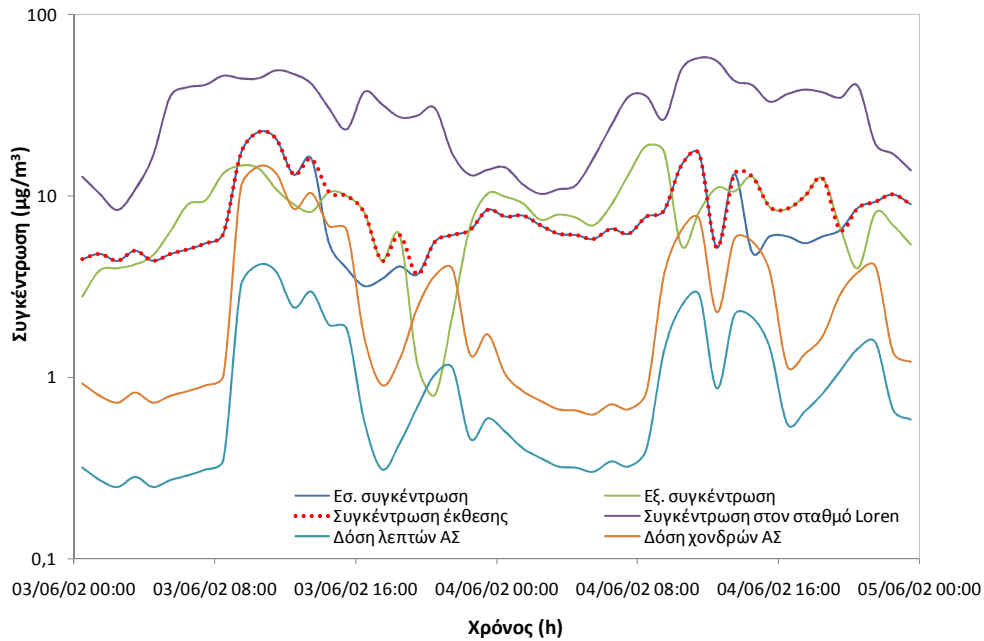
Πίνακας 27 Σενάριο δραστηριότητας εκτεθειμένου ατόμου.

Περιβάλλον έκθεσης	Ώρες παραμονής στο περιβάλλον	Δραστηριότητα	Διάρκεια (ώρες)	Ρυθμός εισπνοής (m^3/h)
Εσωτερικό	1 π.μ. – 9 π.μ.	Ύπνος	8	0,45
Εσωτερικό	9 π.μ. – 2 μ.μ.	Ήπια εργασία	5	1,5
Εξωτερικό	2 μ.μ. – 4 μ.μ.	Ήπια εργασία	2	1,5
Εξωτερικό	4 μ.μ. – 7 μ.μ.	Ανάπαυση	3	0,54
Εσωτερικό	7 μ.μ. – 10 μ.μ.	Ήπια εργασία	3	1,5
Εσωτερικό	10 μ.μ. – 1 π.μ.	Ανάπαυση	3	0,54
		Μέσος ημερήσιος ρυθμός εισπνοής		0,91

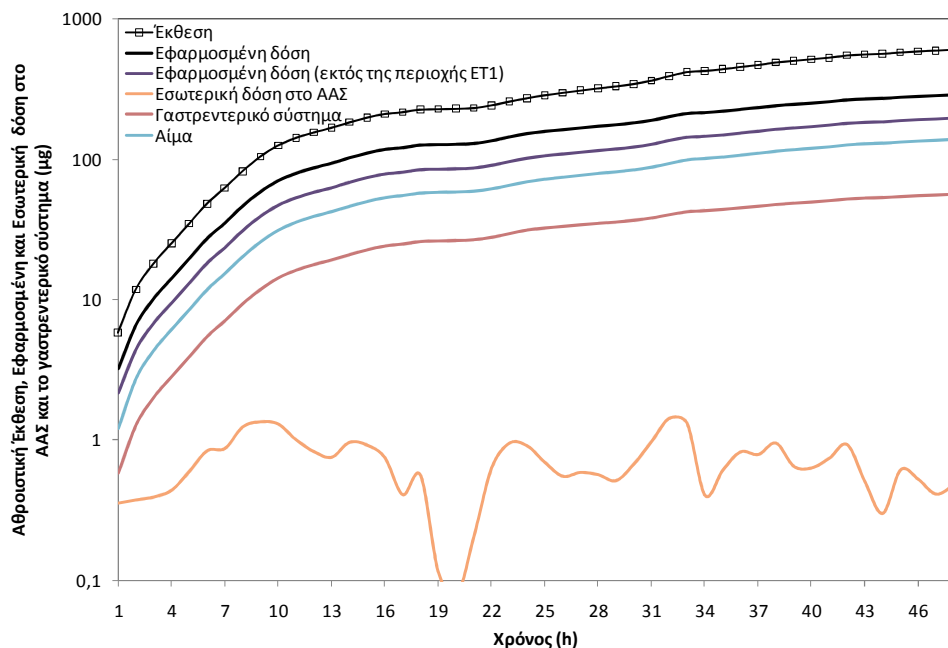
Εξαιτίας της έλλειψης στοιχείων για την κατανομή κατά μέγεθος, των συγκεντρώσεων AS_{10} που μετρήθηκαν σε πραγματικό χρόνο εσωτερικά και εξωτερικά της κατοικίας, επιλέχθηκαν μόνο οι δύο πρώτες ημέρες της περιόδου για την ανάλυση της σχέσης έκθεσης δόσης. Τις δύο πρώτες ημέρες της περιόδου τα χαρακτηριστικά της κατανομής μεγέθους μάζας σωματιδίων στον εσωτερικό και εξωτερικό χώρο μπορούν να θεωρηθούν ίδια. Η υπόθεση αυτή ελέγχθηκε τόσο με σύγκριση των τιμών συγκέντρωσης μάζας (λόγος Εσ./Εξ. συγκέντρωσης που αναφέρθηκαν νωρίτερα) όσο και με σύγκριση της αριθμητικής συγκέντρωσης των σωματιδίων (SMPS για $<615\text{nm}$; APS για $>0,542\mu\text{m}$) στα δύο περιβάλλοντα (Aleksandropoulou κ.α., 2008). Βρέθηκε πως οι διακυμάνσεις στον αριθμό των σωματιδίων στον εσωτερικό χώρο οφείλονται κατά 98% (R^2) στις αλλαγές των εξωτερικών συγκεντρώσεων. Η υπόθεση αυτή δεν αναμένεται να οδηγήσει σε μεγάλα σφάλματα στον υπολογισμό της δόσης αφού για σωματίδια διαμέτρου $0,125 - 16\mu\text{m}$ η φυσική δραστηριότητα του ατόμου επηρεάζει περισσότερο από ότι η διάμετρος την εναπόθεση σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα (Salma κ.α., 2002α και 2002β).

Τα αποτελέσματα για την εφαρμοσμένη δόση των ολικών AS_{10} στις 03/06/02 και 04/06/02 δίνονται στην Εικόνα 39, χωριστά για τα λεπτά και χονδρά σωματίδια. Μαζί δίνονται οι συγκεντρώσεις ΑΣ εσωτερικά και εξωτερικά της κατοικίας και στον σταθερό σταθμό μέτρησης ποιότητας αέρα Loren. Η μέση αεροδυναμική διάμετρος μάζας, η τυπική απόκλιση της κατανομής και το κλάσμα των λεπτών σωματιδίων υπολογίστηκαν με το μοντέλο ExDoM. Η μέση ωριαία εφαρμοσμένη δόση ΑΣ ήταν $5,2 \pm 0,1 \mu\text{g}/\text{h}$ και $3,5 \pm 0,1 \mu\text{g}/\text{h}$ στις 03/06/02 και 04/06/02, αντίστοιχα (η απόκλιση στις τιμές αφορά στη χρήση διαφορετικής πυκνότητας ΑΣ). Η δόση των χονδρών σωματιδίων είναι μεγαλύτερη αυτής των λεπτών αν και το ποσοστό των λεπτών ΑΣ στην ολική μάζα ήταν περίπου 50% και τις δύο ημέρες. Αυτό οφείλεται στην πολύ μικρή εναπόθεση στο ΑΑΣ των σωματιδίων με διαμέτρους $0,1 - 1 \mu\text{m}$ (η μέση αεροδυναμική διάμετρος μάζας των λεπτών σωματιδίων ήταν περίπου $0,21 \mu\text{m}$).

Η αθροιστική έκθεση στον εξωτερικό χώρο και η εφαρμοσμένη δόση ΑΣ μαζί με την εσωτερική δόση στο ΑΑΣ και την μάζα σωματιδίων που μεταφέρεται στο γαστρεντερικό σύστημα και το αίμα (ταχεία απορρόφηση) τις δύο πρώτες ημέρες της περιόδου ΠΘ (σταθερή φυσική δραστηριότητα) δίνονται στην Εικόνα 40. Από την εφαρμοσμένη δόση ΑΣ στο ΑΑΣ (εκτός της περιοχής ET1) περίπου ποσοστό 29% έχει μεταφερθεί στο γαστρεντερικό σύστημα και περίπου το 71% έχει απορροφηθεί στο αίμα στο τέλος της δεύτερης ημέρας. Η εσωτερική δόση ΑΣ στο ΑΑΣ είναι μόλις το 0,2% της εφαρμοσμένης. Τα αποτελέσματα αυτά, για τους λόγους που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 4 θα πρέπει να αντιμετωπίζονται με προσοχή καθώς περιέχουν μεγάλη αβεβαιότητα.



Εικόνα 39 Συγκέντρωση έκθεσης και δόση λεπτών και χονδρών σωματιδίων ΑΣ στο ΑΑΣ. Δίνονται ακόμα οι συγκεντρώσεις ΑΣ εσωτερικά και εξωτερικά της κατοικίας και στον σταθερό σταθμό μέτρησης ποιότητας αέρα Loren.



Εικόνα 40 Αθροιστική έκθεση, εφαρμοσμένη και εσωτερική δόση ΑΣ₁₀ στο ΑΑΣ την περίοδο 03-04/06/02. Δίνονται ακόμα η ποσότητα που μεταφέρεται στο γαστρεντερικό σύστημα και στο αίμα.

Η δόση υπολογίστηκε ακόμα χρησιμοποιώντας τις συγκεντρώσεις εξωτερικά της κατοικίας, τις συγκεντρώσεις στον σταθμό Loren και τις μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις (χρησιμοποιώντας τον μέσο ρυθμό εισπνοής και την μέση ταχύτητα ανέμου). Τα αποτελέσματα δίνονται στον

Πίνακα 28 (τα αποτελέσματα χωριστά για κάθε περιοχή του αναπνευστικού δίνονται στο άρθρο Aleksandropoulou κ.α., 2008α).

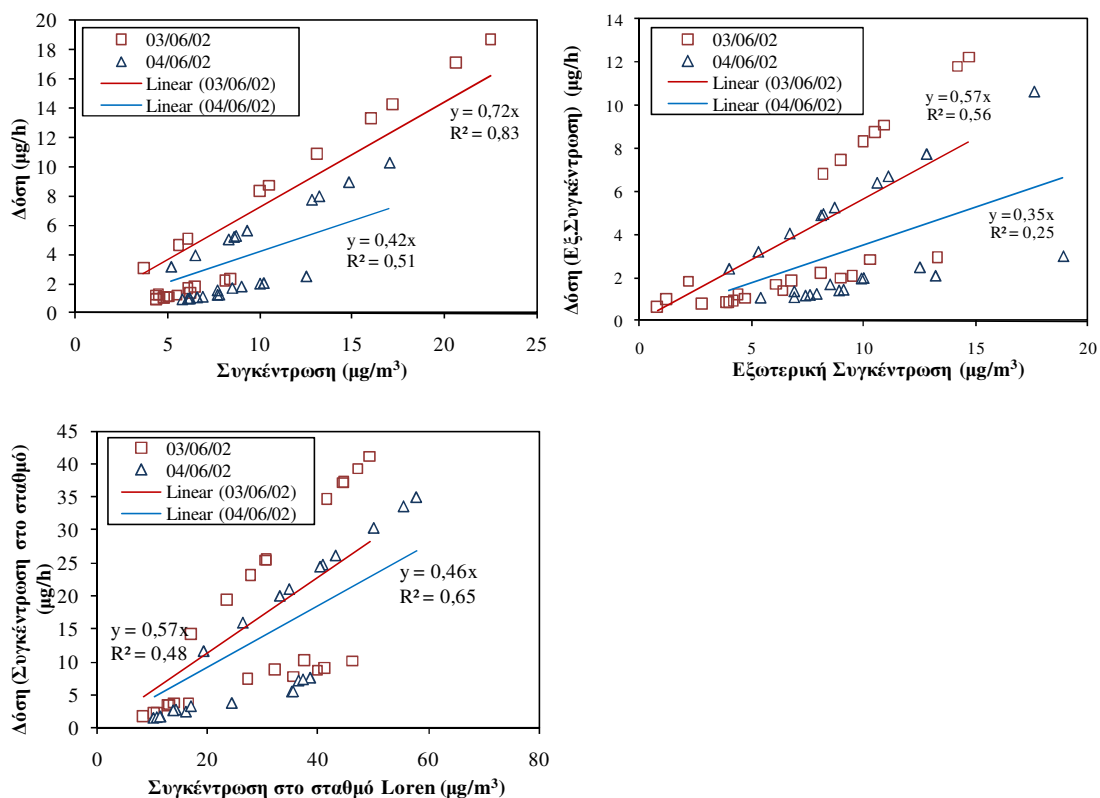
Πίνακας 28 Ημερήσια δόση (μg) λεπτών και χονδρών ΑΣ υπολογισμένη με τιμές της μέσης ωριαίας και ημερήσιας συγκέντρωσης έκθεσης.

Η δόση όπως υπολογίστηκε από:	Ημερομηνία	Λεπτά σωματίδια		Χονδρά σωματίδια	
		Μέσες ημερήσιες τιμές	Ωριαίες τιμές	Μέσες ημερήσιες τιμές	Ωριαίες τιμές
Συγκέντρωση έκθεσης	03/06/02	23,1	28,1	75,7	95,5
	04/06/02	22,3	24,0	54,2	59,3
Εξωτερική συγκέντρωση	03/06/02	19,9	20,9	65,2	69,8
	04/06/02	23,4	23,2	56,9	56,5
Συγκέντρωση στο σταθμό Loren	03/06/02	79,8	87,5	261,4	293,3
	04/06/02	74,0	85,7	180,3	214,4

Η συγκέντρωση στον σταθμό Loren κυμάνθηκε από 8,4 – 57,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, πολύ μεγαλύτερη των συγκεντρώσεων εσωτερικά (3,2 – 22,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) και εξωτερικά (0,8 – 18,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) της κατοικίας και επιπλέον δεν βρέθηκε συσχέτιση μεταξύ τους (Pearson R 0,46 και 0,4, αντίστοιχα). Αυτό οφείλεται στην εγγύτητα του σταθμού σε εκπομπές από οχήματα. Ωστόσο, έχει βρεθεί πως οι τιμές της συγκέντρωσης στον σταθμό Loren όσον αφορά στα ΑΣ_{2,5} ερμηνεύουν σε ποσοστό 83% τις διακυμάνσεις της συγκέντρωσης ΑΣ_{2,5} εξωτερικά της κατοικίας (Lazaridis κ.α., 2006). Η δόση, από έκθεση στις συγκεντρώσεις στον σταθμό Loren, υπολογίστηκε πολύ μεγαλύτερη της πραγματικής (δόση υπολογισμένη με τις συγκεντρώσεις έκθεσης εσωτερικά και εξωτερικά της κατοικίας). Στην περίπτωση χρήσης των μέσων ημερήσιων τιμών βρέθηκε επιπλέον υπερεκτιμημένη έως και 16%. Η δόση υπολογισμένη από τις μέσες ημερήσιες τιμές συγκέντρωσης έκθεσης και της εξωτερικής βρέθηκε υποεκτιμημένη τόσο για τα λεπτά όσο και για τα χονδρά σωματίδια (έως και 21% για τα χονδρά στις 03/06/02). Η διαφορά οφείλεται σε κάθε περίπτωση στο μεταβαλλόμενο τρόπο εισπνοής ανάλογα την δραστηριότητα του ατόμου κατά τη διάρκεια των δύο ημερών. Τα ίδια αποτελέσματα προέκυψαν και για τις δόσεις ανά περιοχή του αναπνευστικού. Η δόση των λεπτών ΑΣ ήταν μεγαλύτερη στο κατώτερο ΑΑΣ και των χονδρών στο ανώτερο. Αλλαγές στην πυκνότητα έδωσαν πολύ μικρές διαφορές στην τοπική δόση με εξαίρεση την δόση των λεπτών σωματιδίων στην κυψελιδική περιοχή (έως και 10%). Σύμφωνα με τα παραπάνω και λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορές των συγκεντρώσεων έκθεσης σε εσωτερικά και εξωτερικά περιβάλλοντα και την διαφοροποίηση στην ημερήσια δραστηριότητα μεταξύ ατόμων, η χρήση μέσων ημερήσιων τιμών είναι ικανοποιητική σε μελέτες δόσης και επικινδυνότητας των ΑΣ.

Όσον αφορά στη σχέση έκθεσης και δόσης εξετάστηκε αν είναι γραμμική όπως συνήθως θεωρείται στις επιδημιολογικές μελέτες. Τα αποτελέσματα με τη χρήση των διαφορετικών συγκεντρώσεων έκθεσης δίνονται στα διαγράμματα της Εικόνα 41. Σημειώνεται ότι οι τιμές στα διαγράμματα πάνω από τις γραμμές παλινδρόμησης αντιστοιχούν σε έκθεση κατά τη διάρκεια ήπιας εργασίας ενώ οι τιμές κάτω από αυτές σε έκθεση κατά τη διάρκεια του ύπνου

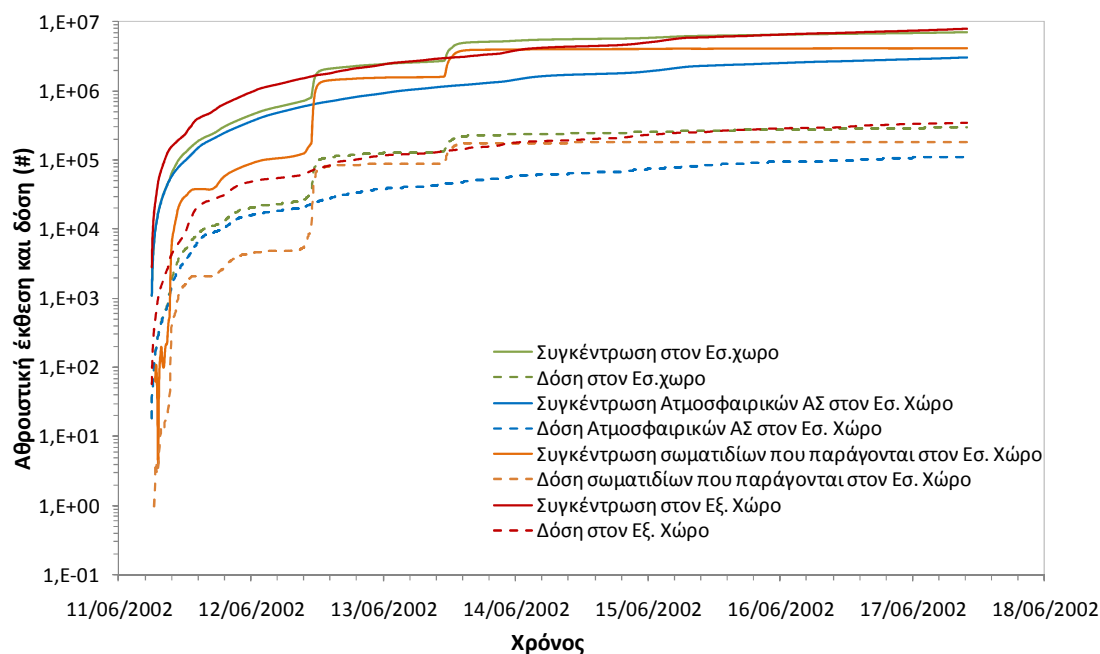
και της ανάπαυσης. Προκύπτει ότι η σχέση μεταξύ έκθεσης και δόσης δεν είναι γραμμική. Ακόμα και στην περίπτωση που υπολογίζεται με τις συγκεντρώσεις έκθεσης (περίπτωση α) η δόση δεν είναι ανάλογη της έκθεσης εξαιτίας της μεταβαλλόμενης δραστηριότητας του ατόμου (διαφορετικός ρυθμός εισπνοής). Στις 03/06/02 η τιμή του συντελεστή R^2 είναι υψηλή, ωστόσο αυτό οφείλεται στην συμφωνία μεταξύ των τιμών συγκέντρωσης και φυσικής δραστηριότητας του ατόμου. Η χρήση τιμών συγκέντρωσης από σταθερούς σταθμούς μέτρησης της ποιότητας του αέρα και εξωτερικών συγκεντρώσεων οδηγεί σε λανθασμένη εκτίμηση της δόσης.



Εικόνα 41 Σχέση μεταξύ έκθεσης και δόσης αιωρούμενων σωματιδίων.

Επιπλέον εξετάστηκε η επίδραση των πηγών στον εσωτερικό χώρο στην έκθεση και εφαρμοσμένη δόση σωματιδίων (αριθμητική συγκέντρωση). Η συγκέντρωση ατμοσφαιρικών ΑΣ στον εσωτερικό χώρο κατά την περίοδο 11-17/06/02 υπολογίστηκε με το μοντέλο μικροπεριβάλλοντος του Γλυτσός, Θ (2010). Τα αποτελέσματα για την αθροιστική έκθεση και δόση (ενήλικας Καυκάσιος άνδρας; σταθερή φυσική δραστηριότητα; εισπνοή από τη μύτη) δίνονται στην Εικόνα 42. Στον υπολογισμό της δόσης δεν λαμβάνεται υπόψη η αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων κατά την είσοδο τους στο ΑΑΣ λόγω υγροσκοπικότητας αλλά η δόση εκτιμάται σε σχέση με το μέγεθος στο οποίο εισπνέονται τα σωματίδια. Έτσι τα αποτελέσματα για την δόση των υπέρλεπτων σωματιδίων αναμένεται να είναι υπερεκτιμημένα (Mitsakou κ.α., 2007). Παρατηρείται πως η αθροιστική έκθεση εσωτερικά της κατοικίας ($7,22 \times 10^6$ σωματίδια) είναι αρκετά κοντά στην έκθεση εξωτερικά της κατοικίας ($7,98 \times 10^6$ σωματίδια) εξαιτίας της παραγωγής μεγάλου αριθμού σωματιδίων από δραστηριότητες και

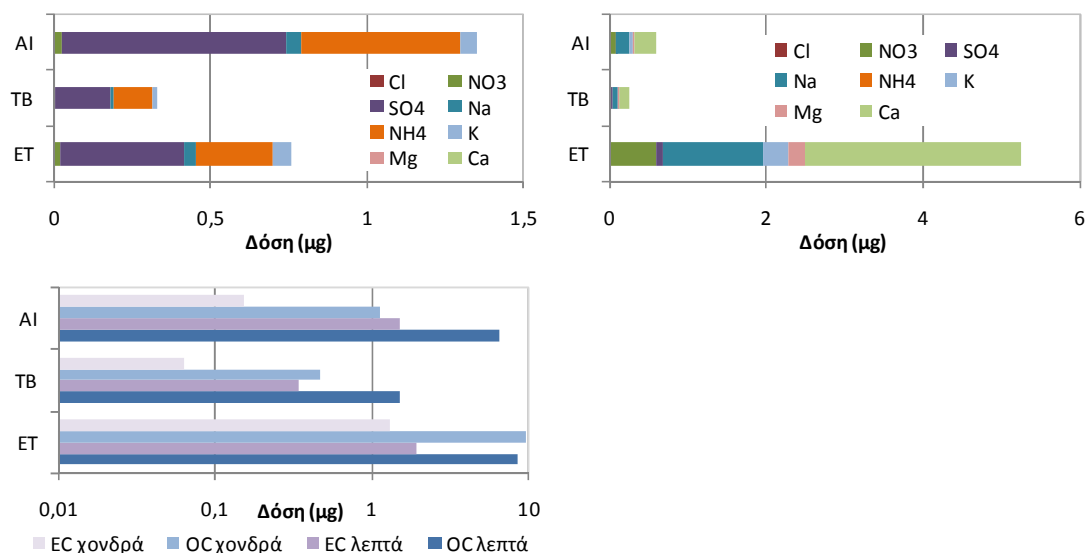
πηγές στον εσωτερικό χώρο. Η δόση στον εσωτερικό χώρο που οφείλεται σε πηγές υπολογίστηκε στα $1,84 \times 10^5$ σωματίδια. Ειδικά για τις 13/06/02 η δόση που οφείλεται στο τηγάνισμα και το κάπνισμα ενός τσιγάρου υπολογίστηκε σε $6,7 \times 10^4$ και $2,2 \times 10^4$ σωματίδια, αντίστοιχα (Aleksandropoulou κ.α., 2008γ).



Εικόνα 42 Έκθεση και εφαρμοσμένη δόση σωματιδίων στον εσωτερικό και εξωτερικό χώρο κατά την περίοδο 11-17/06/02. Δίνεται επιπλέον η έκθεση και δόση σε ατμοσφαιρικά ΑΣ εσωτερικά της κατοικίας και σε ΑΣ που παράγονται από πηγές στον εσωτερικό χώρο.

Επιπλέον εξετάστηκε η δόση των συστατικών των $ΑΣ_{10}$, κατά την θερινή περίοδο μετρήσεων στο σπίτι στο προάστιο του Όσλο. Ο υπολογισμός της έγινε μόνο για έκθεση στον εξωτερικό χώρο (θεωρώντας σταθερή φυσική δραστηριότητα για όλη την ημέρα), εξαιτίας της έλλειψης στοιχείων για την κατανομή των συστατικών στα σωματίδια διαφορετικών μεγεθών στον εσωτερικό χώρο. Τα χαρακτηριστικά της κατανομής μεγέθους υπολογίστηκαν με το μοντέλο ExDoM. Η εφαρμοσμένη δόση σε κάθε περιοχή του ΑΑΣ για τα χημικά συστατικά των σωματιδίων σε εξωτερικό περιβάλλον για τις 3 και 7 Ιουνίου 2002, δίνεται στην Εικόνα 43. Βρέθηκε πως τα Ca^{2+} , Cl^- , Mg^+ , K^+ και Na^+ βρίσκονται κυρίως σε σωματίδια που αποτίθενται στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα (εξαιτίας της κατανομής τους κυρίως σε χονδρά σωματίδια). Ακόμα η δόση NH_4^+ και SO_4^{2-} στην κυψελιδική περιοχή είναι περίπου ίση με την δόση στην εκτός θώρακα περιοχή. Η δόση OC και EC είναι μεγαλύτερη στην εκτός θώρακα περιοχή και βρέθηκε έως και 4 φορές μεγαλύτερη από την δόση των ανόργανων συστατικών. Ωστόσο τα λεπτά σωματίδια OC αποτελούν το 40% της μέσης ημερήσια εφαρμοσμένης δόσης στην κυψελιδική περιοχή. Από την μέση κατανομή μεγέθους των σωματιδίων κατά την διάρκεια της περιόδου προέκυψε ότι η εφαρμοσμένη δόση στο ΑΑΣ αποτελείται κατά 23%

από οργανικό και στοιχειακό άνθρακα κατά 37% από συστατικά για τα οποία δεν αναλύθηκαν τα σωματίδια και κατά 40% από τα ανόργανα υδατοδιαλυτά ιόντα. Αυτή η σχέση εκφράζει την επίδραση των διαφόρων πηγών στην εφαρμοσμένη δόση του ατόμου στο εξωτερικό περιβάλλον της κατοικίας στο προάστιο του Όσλο κατά την θερινή περίοδο μετρήσεων. Η δόση σε συγκεκριμένα συστατικά των ΑΣ έχει έως τώρα εκτιμηθεί από τους Karanasiou κ.α.(2008) για έκθεση σε βιομηχανικό περιβάλλον και από τον Salma κ.α. (2002) για έκθεση στην Βουδαπέστη.



Εικόνα 43 Εφαρμοσμένη δόση (α) των ανόργανων συστατικών των λεπτών και χονδρών σωματιδίων στις 03/06/02 και (β) των ανθρακικών συστατικών των σωματιδίων (EC:στοιχειακός άνθρακας και OC:οργανικός άνθρακας) στις 07/06/02.

5.3. Εφαρμογή 3: Έκθεση σε εξωτερικούς και εσωτερικούς χώρους στο Πολυτεχνείο Κρήτης και την περιοχή περιμετρικά του ιδρύματος

Η έκθεση σε ΑΣ και η δόση στο αναπνευστικό σύστημα ενός ατόμου σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους εξετάστηκαν στα πλαίσια της εφαρμογής 2 στο Όσλο της Νορβηγίας. Στην παραπάνω μελέτη χρησιμοποιήθηκαν τιμές συγκέντρωσης ΑΣ από σταθερούς σταθμούς μέτρησης ποιότητας του αέρα, και από μετρήσεις εξωτερικά και εσωτερικά της κατοικίας του εκτεθειμένου ατόμου σε συνδυασμό με σενάριο έκθεσης/δραστηριοτήτων για τον υπολογισμό της έκθεσης και δόσης του. Σε αυτό το κεφάλαιο, ο υπολογισμός της δόσης ΑΣ ενός ατόμου πραγματοποιείται με τη χρήση μετρήσεων ατομικής έκθεσης. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους του Πολυτεχνείου Κρήτης, στο εσωτερικό κατοικίας που βρίσκεται στην περιοχή περιμετρικά του ιδρύματος (Κουνουπιδιανά) και κατά την μεταφορά από την κατοικία προς το Πολυτεχνείο Κρήτης και αντίστροφα την περίοδο 11-18 Δεκεμβρίου, 2007. Ταυτόχρονα έγιναν μετρήσεις στο εσωτερικό και εξωτερικό της κατοικίας και την περιοχή του Πολυτεχνείου. Παρακάτω παρουσιάζεται η ανάλυση των μετρήσεων και των αποτελεσμάτων του μοντέλου δόσης και εξάγονται συμπεράσματα όσον αφορά στην επίδραση διαφόρων παραμέτρων στην έκθεση και δόση του εκτεθειμένου ατόμου καθώς και στη σχέση εξωτερικής, εσωτερικής και ατομικής έκθεσης.

5.3.1. Σημεία δειγματοληψίας και περιγραφή μετρήσεων

Οι μετρήσεις ατομικής έκθεσης σε αναπνεύσιμα σωματίδια (AS_4) πραγματοποιήθηκαν σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους του Πολυτεχνείου Κρήτης, στο εσωτερικό κατοικίας και κατά την μεταφορά από την κατοικία προς το Πολυτεχνείο Κρήτης και αντίστροφα. Αναλυτικότερα, οι συγκεντρώσεις AS_4 μετρήθηκαν σε γραφείο του 1^{ου} ορόφου του κτιρίου του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος και στον χώρο του Εργαστηρίου Ατμοσφαιρικών Αιωρούμενων Σωματιδίων στο ισόγειο του ίδιου κτιρίου. Το διαμέρισμα βρίσκεται στην περιοχή γύρω από το Πολυτεχνείο στον 1^ο όροφο κτιρίου επί της οδού Ελευθερίου Βενιζέλου (κεντρική οδική αρτηρία των Κουνουπιδιανών). Το εμβαδόν του είναι περίπου 40m², διαθέτει 3 δωμάτια που χωρίζονται με εσωτερικές πόρτες και βρίσκεται κοντά σε ζαχαροπλαστείο και 2 εστιατόρια/ψησταριές. Τα χαρακτηριστικά του διαμερίσματος επηρεάζουν τη σχέση εσωτερικής και εξωτερικής συγκέντρωσης καθώς και την μίξη του αέρα στο εσωτερικό του, ενώ η τοποθεσία του δίνει τις πηγές ρύπανσης από ΑΣ στην ατμόσφαιρα στην περιοχή του διαμερίσματος. Η θέση των χώρων δειγματοληψίας καθώς και η διαδρομή που ακολουθήθηκε για την μεταφορά από και προς το Πολυτεχνείο Κρήτης δίνονται στο σχήμα της Εικόνα 44. Οι μετρήσεις έγιναν με το όργανο SidePak AM510 (TSI; 0,001 – 20 mg/m³; 0,1 – 10 μm; ±1μg/m³; επιλέχθηκε χρονικό βήμα καταγραφής 1 min) με τη χρήση του κυκλώνα συλλογής αναπνεύσιμων σωματιδίων (10-mm Nylon Dorr-Oliver Cyclone) που τοποθετήθηκε στο ύψος του θώρακα του εκτεθειμένου ατόμου.

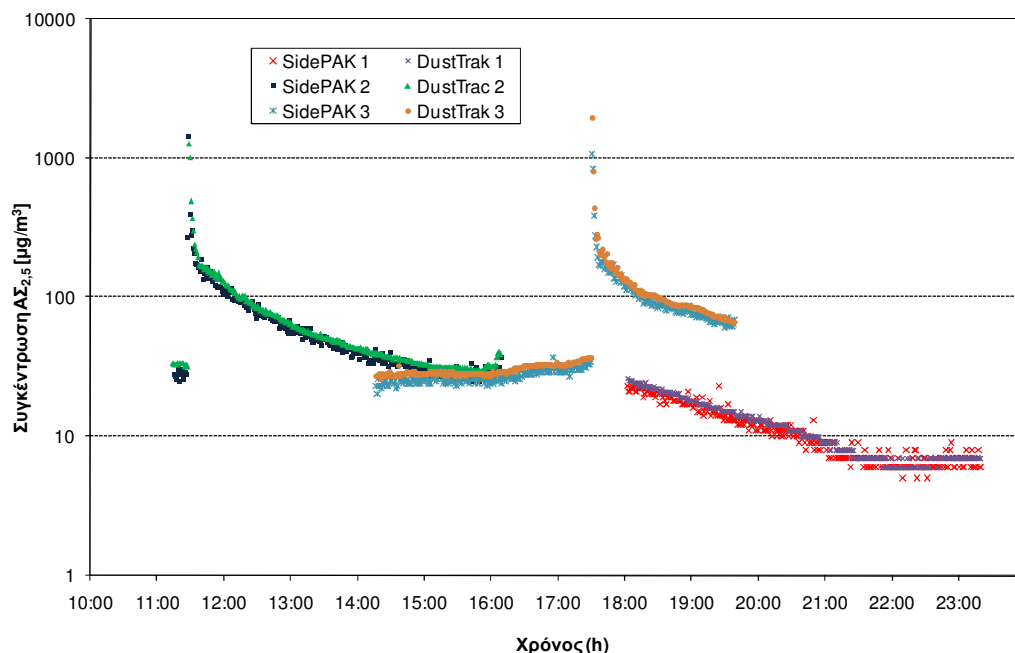


Εικόνα 44 Σημεία δειγματοληψίας AS_4 και AS_{10} στο Πολυτεχνείο Κρήτης και σε διαμέρισμα στην περιοχή περιμετρικά του την περίοδο 11-18 Δεκεμβρίου 2007. Δίνεται επιπλέον η διαδρομή του ατόμου από την κατοικία προς το Πολυτεχνείο Κρήτης και αντίστροφα .

Παράλληλα μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις των AS_{10} εσωτερικά και εξωτερικά της κατοικίας (2 DustTrak aerosol monitors; TSI Model 8520; $0,001 - 100 \text{ mg/m}^3$; $0,1 - 10 \text{ }\mu\text{m}$; $\pm 1\mu\text{g/m}^3$; επιλέχθηκε χρονικό βήμα καταγραφής 1 min). Τα όργανα τοποθετήθηκαν στο καθιστικό και η δειγματοληψία του εξωτερικού αέρα πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια αγωγού μέσω του παραθύρου (το οποίο σφραγίστηκε με κολλητική ταινία). Οι μετρήσεις στο διαμέρισμα περιλαμβάνουν τόσο περιόδους με τυπικές οικιακές δραστηριότητες και μαγείρεμα, όσο και μεγάλες περιόδους που το διαμέρισμα ήταν κενό. Οι μετρήσεις στο Πολυτεχνείο περιλαμβάνουν περιόδους με άτομα στο γραφείο ή το εργαστήριο και περιόδους όπου ήταν κενά, ακόμα περιλαμβάνουν περίοδο όπου διεξαγόταν διδασκαλία εργαστηριακού μαθήματος με αρκετούς φοιτητές και επισκέψεις στον ερευνητικό σταθμό του εργαστηρίου (Akrotiri research station).

Στην οροφή του σταθμού πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις κατανομής μεγέθους των AS_{10} με τη χρήση κρουστικού δειγματολήπτη (non-viable, 8 στάδια, Series 20-800, Thermo Scientific) με φίλτρα υαλονήματος (GF, 81mm; Schleicher&Schuell MicroScience GmbH) ως υπόστρωμα. Τα φίλτρα υαλονήματος είναι γνωστό πως συχνά οδηγούν σε υπερεκτίμηση της μάζας των AS εξαιτίας της απορρόφησης SO_2 , ωστόσο είναι τα προτεινόμενα από τον κατασκευαστή του δειγματολήπτη γιατί το σφάλμα στην μέτρηση θεωρείται μικρό λόγω της χαμηλής ροής με την οποία λειτουργεί ($1,7\text{m}^3/\text{h}$) και επιπλέον έχουν καλή απόδοση στην συλλογή σωματιδίων με διαστάσεις μικρότερες του $1\mu\text{m}$ (Thermo Electron Corporation, 2003; EMEP/CCC 2002). Οι δειγματοληψίες ήταν 24ωρες με χρόνο εκκίνησης την 15:00 τοπική ώρα. Τα φίλτρα πριν και μετά την δειγματοληψία διατηρούνταν σε κλειστούς δίσκους Petri για

24 h σε θερμοκρασία δωματίου και τη σχετική υγρασία του χώρου ζύγισης τους (Εργαστήριο Ατμοσφαιρικών Αιωρούμενων Σωματιδίων; Sartorius balance CP 225D, Sartorius AG, Goettingen, Germany; ανάλυση 0,01 mg).



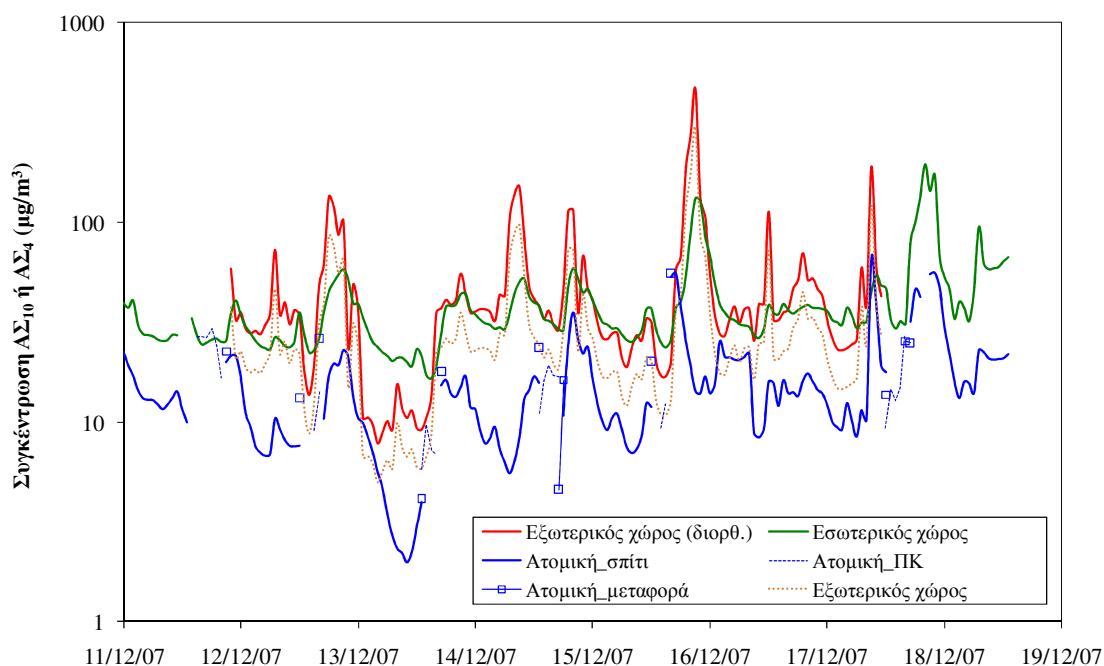
Εικόνα 45 Σύγκριση των συγκεντρώσεων $ΑΣ_{2,5}$ ($μg/m^3$) από τα όργανα SidePak και DustTrak κατά τις προκαταρκτικές μετρήσεις ελέγχου στο εσωτερικό της κατοικίας.

Κατά την περίοδο δειγματοληψίας οι δραστηριότητες του εκτεθειμένου ατόμου, ο χρόνος παραμονής του σε κάθε περιβάλλον και η αντίστοιχη φυσική δραστηριότητα καταγράφηκαν λεπτομερώς με τη βοήθεια ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής και καταρτίστηκε το ημερολόγιο δραστηριοτήτων. Πρέπει να σημειωθεί ότι πριν την έναρξη της περιόδου μετρήσεων όλα τα όργανα μέτρησης και η φωτογραφική μηχανή συγχρονίστηκαν, και επιπλέον πραγματοποιήθηκαν με όλα τα όργανα ταυτόχρονες μετρήσεις $ΑΣ_{10}$ και $ΑΣ_{2,5}$ για την σύγκριση των τιμών τους. Παράδειγμα δίνεται στην Εικόνα 45 όπου συγκρίνονται οι μετρήσεις των οργάνων SidePak και DustTrak-2 σε $ΑΣ_{2,5}$ στον εσωτερικό χώρο και φαίνεται πως οι μετρήσεις των δύο οργάνων συμφωνούν και επιπλέον πως μπορούν και τα δύο να καταγράψουν μεγάλες ξαφνικές αλλαγές της συγκέντρωσης (εδώ οι κορυφές οφείλονται σε κάπνισμα τσιγάρου). Ο συντελεστής συσχέτισης των τιμών συγκέντρωσης $ΑΣ_{2,5}$ από τα όργανα DustTrak και SidePak στο εσωτερικό της κατοικίας είναι 0,9. Επιπλέον, από την σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων των οργάνων DustTrak-1 (χρησιμοποιήθηκε για μετρήσεις στον εξωτερικό χώρο) και DustTrak-2 βρέθηκε πως το πρώτο δίνει συστηματικά χαμηλότερες τιμές συγκεντρώσεων από το δεύτερο (98% των τιμών κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ελέγχου). Ο συντελεστής συσχέτισης των τιμών των δυο DustTrak για μετρήσεις $ΑΣ_{10}$ είναι 0,75 και η μέση τιμή του λόγου των τιμών του DustTrak-2 προς του DustTrak-1 είναι 1,57 (οι τιμές του DustTrak – 2 θεωρούνται πιο αξιόπιστες βάσει σύγκρισης με τη μεθοδολογία

EN12341 (CEN, 1998) – προσωπική επικοινωνία J. Ondracek). Έτσι, στους πίνακες που ακολουθούν στην ανάλυση των μετρήσεων δίνονται οι τιμές των συγκεντρώσεων από το DustTrak-1 όπως μετρήθηκαν και διορθωμένες βάσει του παραπάνω συντελεστή.

5.3.2. Ανάλυση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων

Στην Εικόνα 46 δίνονται οι μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις $A\Sigma_{10}$ εσωτερικά και εξωτερικά του διαμερίσματος, καθώς και των $A\Sigma_4$ (στο Παράρτημα Δ δίνεται διάγραμμα με τις συγκεντρώσεις 1min). Στους εξωτερικούς χώρους η μέση ωριαία συγκέντρωση $A\Sigma_{10}$ κυμάνθηκε από 7,9 έως 464,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (χωρίς διόρθωση 5,0 – 296,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Παρατηρήθηκαν υψηλές τιμές νωρίς το πρωί λόγω της τοπικής οδικής κυκλοφορίας καθώς και αργά το απόγευμα και σε άλλες χρονικές στιγμές εξαιτίας της λειτουργίας της ψησταριάς. Η μέγιστη τιμή συγκέντρωσης 1-min ήταν 975 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Οι συγκεντρώσεις ήταν ιδιαίτερα χαμηλές ($21,8 \pm 19 \mu\text{g}/\text{m}^3$) στις 13/12/07 εξαιτίας βροχής. Οι τιμές αυτές συμφωνούν με παλαιότερες μετρήσεις συγκεντρώσεων $A\Sigma_{10}$ την χειμερινή περίοδο (2003/2004) στο σταθμό Ακρωτηρίου ($28,7 \pm 22,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (Lazaridis κ.α., 2008γ).



Εικόνα 46 Συγκεντρώσεις έκθεσης για $A\Sigma_{10}$ και $A\Sigma_4$ (ατομική) κατά την περίοδο μετρήσεων (μέσες ωριαίες τιμές; 11-18 Δεκεμβρίου, 2007).

Στο εσωτερικό της κατοικίας οι μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις $A\Sigma_{10}$ κυμάνθηκαν από 16,62 έως 194,83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Οι τιμές των συγκεντρώσεων εσωτερικά της κατοικίας ακολουθούν τις τιμές των εξωτερικών συγκεντρώσεων (Pearson R = 0,78 από τις μέσες ωριαίες τιμές; Pearson R = 0,62 από τις 1 min τιμές) αλλά παρατηρήθηκαν υψηλότερες τόσο σε περιόδους με δραστηριότητες εσωτερικά της κατοικίας όσο και σε περιόδους που το διαμέρισμα ήταν

κενό. Οι μέσες τιμές συγκεντρώσεων AS_{10} σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους καθώς και του λόγου τους σε περιόδους με δραστηριότητες και χωρίς στο σπίτι δίνονται στον Πίνακα 29. Πράγματι το 70% των τιμών του λόγου Εσ./Εξ. συγκεντρώσεων σε περιόδους που το σπίτι είναι κενό ήταν μεγαλύτερο του 1 πιθανά λόγω της συσσώρευσης τους εσωτερικά. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι κατά την περίοδο των μετρήσεων οι εκπομπές από την καμινάδα του εστιατορίου κατευθύνονταν προς τα παράθυρα του διαμερίσματος. Η εσωτερική συγκέντρωση ήταν επίσης αυξημένη κατά τη διάρκεια δραστηριοτήτων (σκούπισμα, μαγείρεμα και περπάτημα). Ωστόσο, η είσοδος του εξωτερικού αέρα είναι η σημαντικότερη πηγή AS_{10} στο σπίτι και άρα καθορίζει την έκθεση του ατόμου στον εσωτερικό χώρο.

Η ωριαία μέση συγκέντρωση των AS_4 κυμαινόταν από 2 έως 65,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Οι συγκεντρώσεις AS_4 μέσα στο διαμέρισμα (1 min: μέση τιμή 16,1±11,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; μέγιστη τιμή 211 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) σχετίζονται με τις εσωτερικές συγκεντρώσεις AS_{10} (Pearson R = 0,6) (στο παράρτημα Δ δίνεται διάγραμμα με τις συγκεντρώσεις 1min των AS_4 μαζί με τον ρυθμό εισπνοής του εκτεθειμένου ατόμου). Η μέση ωριαία συγκέντρωση των AS_4 στους χώρους του Πολυτεχνείου Κρήτης κυμάνθηκε από 5,7 έως 35,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 min: 2 - 526 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Η μέγιστη συγκέντρωση AS_4 στον χώρο εργασίας οφείλεται στο κάπνισμα ενός τσιγάρου για 4 λεπτά στο χώρο έξω από το γραφείο, ενώ οι υψηλές τιμές που καταγράφηκαν στις 12 Δεκεμβρίου οφείλονται στην παρουσία 8 φοιτητών στο χώρο για την διεξαγωγή εργαστηριακού μαθήματος (μέγιστη συγκέντρωση 1-min: 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Κατά τη μεταφορά από και προς το Πολυτεχνείο οι μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις κυμαίνονταν από 4,2 έως 55,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 min: 2 - 97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Επιπλέον εξετάστηκε η σχέση των τιμών ατομικής έκθεσης σε AS_4 με τις συγκεντρώσεις εσωτερικά και εξωτερικά της κατοικίας χωρίς ωστόσο να βρεθεί κάποια σημαντική συσχέτιση (Pearson $R < 0,6$).

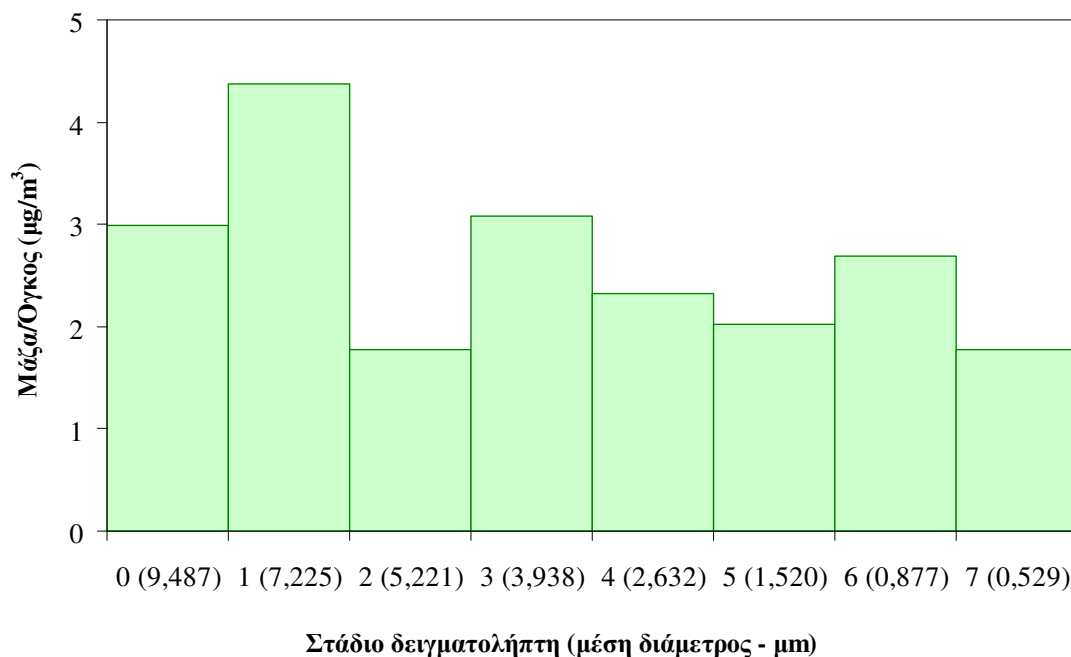
Πίνακας 29 Συγκεντρώσεις AS_{10} κατά την περίοδο μετρήσεων (11-18 Δεκεμβρίου, 2007 – μέσες ωριαίες τιμές).

	AS_{10}			Λόγος Εσ./Εξ. AS_{10}	
	Εξωτερικά ^α	Εσωτερικά	Εσωτερικά (χωρίς πηγές)	Με πηγές ^α	Χωρίς πηγές ^α
Μέση τιμή	48,6 (30,9)	40,2	36,4	1,06 (1,67)	1,25 (1,96)
Διάμεσος	35,5 (22,6)	33,1	26,3	0,98 (1,52)	1,18 (1,85)
Τυπική Απόκλιση	52,9 (40,0)	25,1	35,5	0,54 (0,93)	0,46 (0,78)

^α Στην παρένθεση δίνονται οι τιμές της συγκέντρωσης χωρίς διόρθωση

Η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων υπολογίστηκε από τις μετρήσεις με τη βοήθεια του μοντέλου ExDoM. Κατά την περίοδο των μετρήσεων η μέση διάμετρος του λεπτού κλάσματος σωματιδίων κυμαινόταν από 0,66 έως 0,79 μm και η μέση συνεισφορά τους στην ολική μάζα AS_{10} από 11% έως 39%. Οι τιμές αυτές συμφωνούν με παλαιότερες μετρήσεις σε χειμερινές

περιόδους στην περιοχή (21-27 Νοεμβρίου, 2006; συνεισφορά λεπτών σωματιδίων 13 - 55%; Σωφρονιάδης, 2007). Για το κλάσμα των χονδρών ΑΣ η μέση διάμετρος κυμαινόταν από 3,5 έως 4,9 μm και συνεισφορά τους στην ολική μάζα ΑΣ₁₀ ήταν σημαντική πιθανά λόγω οικοδομικών εργασιών και εκσκαφής που πραγματοποιούνταν στην περιοχή την συγκεκριμένη περίοδο. Η μέση κατανομή ΑΣ₁₀ κατά την περίοδο μετρήσεων δίνεται στην Εικόνα 47. Πρέπει να σημειωθεί ότι ίδια κατανομή σωματιδίων χρησιμοποιείται τόσο σε εξωτερικούς όσο και σε εσωτερικούς χώρους σε όλα τα περιβάλλοντα στον υπολογισμό της εναπόθεσης και δόσης των ΑΣ στο ΑΑΣ. Σε εσωτερικούς χώρους η κατανομή μπορεί να διαφέρει σημαντικά από την εξωτερική στο σταθμό ωστόσο επειδή η κύρια πηγή σωματιδίων στον εσωτερικό χώρο ήταν ο εξωτερικός αέρας η παραδοχή είναι αποδεκτή. Ακόμα, στους εξωτερικούς χώρους η προσέγγιση αυτή είναι αποδεκτή καθώς οι πηγές σωματιδίων δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των σημείων δειγματοληψίας (εξατμίσεις οχημάτων, επαναιωρούμενη σκόνη από την οδική κυκλοφορία, θαλάσσια υδροσταγονίδια και σκόνη από οικοδομικές και εργασίες εκσκαφής που πραγματοποιούνταν και στην περιοχή κοντά στο διαμέρισμα).

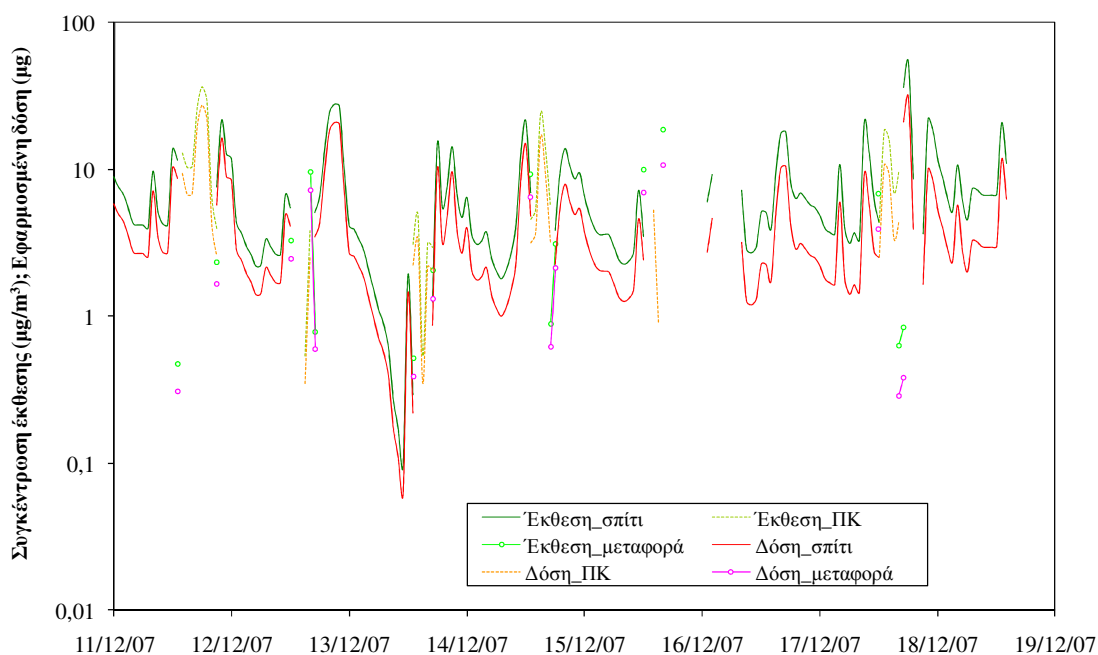


Εικόνα 47 Μέση κατανομή ΑΣ₁₀ κατά την περίοδο μετρήσεων (11-18 Δεκεμβρίου, 2007).

5.3.3. Ανάλυση της έκθεσης και δόσης

Ο υπολογισμός της έκθεσης και δόσης έγιναν με το μοντέλο ExDoM για ενήλικη Καυκάσια γυναίκα, θεωρώντας πως τα σωματίδια είναι σφαιρικά (συντελεστής σχήματος 1) και έχουν πυκνότητα 1,2 g/cm^3 (τυπική τιμή για την πυκνότητα σωματιδίων σε περιοχές με τα χαρακτηριστικά της περιοχής του Πολυτεχνείου Κρήτης – Smolik κ.α., 2003). Στην Εικόνα 48

δίνεται η συγκέντρωση έκθεσης και η εφαρμοσμένη δόση στο ΑΑΣ των αναπνεύσιμων σωματιδίων κατά την περίοδο των μετρήσεων.



Εικόνα 48 Ατομική έκθεση και εφαρμοσμένη δόση κατά την περίοδο μετρήσεων (11-18 Δεκεμβρίου, 2007).

Η συγκέντρωση έκθεσης και η διάρκεια παραμονής ήταν υψηλότερα στην κατοικία από ότι στην εργασία και την μεταφορά. Ωστόσο η μέση δόση ήταν υψηλή στην εργασία εξαιτίας του αυξημένου ρυθμού εισπνοής. Οι δραστηριότητες εσωτερικά του σπιτιού δεν επηρέασαν σημαντικά την συγκέντρωση ΑΣ₄ άρα και την έκθεση και δόση τους στο ΑΑΣ. Τα περιγραφικά στατιστικά στοιχεία για την έκθεση και τη δόση σε κάθε περιβάλλον έκθεσης δίνονται στον Πίνακα 30.

Πίνακας 30 Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία ωριαίας ατομικής έκθεσης ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) και εφαρμοσμένης δόσης (μg) αναπνεύσιμων σωματιδίων κατά την περίοδο των μετρήσεων.

	Κατοικία		Πολυτεχνείο Κρήτης		Μεταφορά	
	Συγκέντρωση	Δόση	Συγκέντρωση	Δόση	Συγκέντρωση	Δόση
Μέση τιμή	16,2	4,3	16,3	6,8	21,3	3,0
Διάμεσος	14,0	2,7	14,7	3,7	20,1	1,7
Τυπική Απόκλιση	11,0	4,5	7,6	6,8	12,4	3,2

^a Μέσος ημερήσιος χρόνος παραμονής

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε ένα ολοκληρωμένο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων για την εκτίμηση της έκθεσης του ανθρώπου σε ατμοσφαιρικά αιωρούμενα σωματίδια. Το σύστημα περιλαμβάνει εργαλεία για τον υπολογισμό των εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων και αερίων ρύπων στην ατμόσφαιρα, την μεταφοράς/μετατροπής και συσσώρευσης τους στο περιβάλλον, την εκτίμηση της έκθεσης του ατόμου σε εξωτερικές και εσωτερικές συγκεντρώσεις και τον υπολογισμό της εφαρμοσμένης και της εσωτερικής δόσης αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα.

Αναλυτικότερα, παρουσιάστηκε μεθοδολογία και αναπτύχθηκε μοντέλο για την δημιουργία μητρώων εκπομπών με την κατάλληλη χωρική, χρονική και χημική ανάλυση για την εισαγωγή τους σε μοντέλα διασποράς ή φωτοχημικά μοντέλα ποιότητας αέρα (μονάδα λογισμικού Sources). Η μεθοδολογία αξιοποιεί τα στοιχεία ανθρωπογενών εκπομπών που παραδίδει η Ελλάδα στα πλαίσια ευρωπαϊκών και διεθνών συμβάσεων (Κεφάλαιο 2) και ελαχιστοποιεί το πλήθος των απαιτούμενων δεδομένων που πρέπει να συγκεντρωθούν και διαμορφωθούν για την χωρική, χρονική και χημική κατανομή του μητρώου εκπομπών. Συγκεκριμένα γίνεται αναγωγή των ετήσιων ανθρωπογενών εκπομπών από πλέγμα διαστάσεων 50x50km² σε πλέγμα υψηλής χωρικής ανάλυσης χρησιμοποιώντας δεδομένα εδαφοκάλυψης, πυκνότητας πληθυσμού, τοποθεσίας και ποσότητας έκλυσης ρύπων από μεγάλες σημειακές πηγές και συντελεστές βαρύτητας για κάθε κατηγορία πηγής και εδαφοκάλυψης. Επιπλέον παρουσιάστηκε η μεθοδολογία που χρησιμοποιεί το μοντέλο για την εκτίμηση των φυσικών εκπομπών (ΒΠΟΕ, επαναιωρούμενη σκόνη και θαλάσσια υδροσταγονίδια) αξιοποιώντας τα στοιχεία εδαφοκάλυψης (landcover) και εδαφικών χαρακτηριστικών που δίνονται από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Περιβάλλοντος. Σημειώνεται ότι η μεθοδολογία είναι τροποποιημένη σε σχέση με την Οδηγία CORINAIR για την εκτίμηση των εκπομπών ΒΠΟΕ (ισοπρενίου, τερπενίων και άλλων ΠΟΥ), ενώ για τα σωματίδια εδαφικής σκόνης και θαλάσσιων υδροσταγονιδίων δεν περιλαμβάνεται μεθοδολογία στην Οδηγία CORINAIR.

Επιπρόσθετα, αναπτύχθηκε μονάδα λογισμικού (Transport) για την αναπαράσταση των πηγών ανά κατηγορία SNAP97 και εισαγωγή των εκπομπών τους στο μοντέλο ISC3LT για την εξαγωγή συγκεντρώσεων μακροχρόνιας έκθεσης σε ΑΣ σε πλέγμα αποδεκτών (που καθορίζει διαδραστικά ο χρήστης με το μοντέλο). Για την εύρεση των πιθανών πηγών των σωματιδίων σε περιπτώσεις που είναι γνωστές μόνο οι συγκεντρώσεις τους και/ή η χημική τους σύσταση αναπτύχθηκαν εργαλεία για την ανάλυση των τροχιών των αερίων μαζών και την ανάλυση αποδεκτών. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκε εργαλείο για την στατιστική επεξεργασία των τροχιών των αερίων μαζών τους σε συνδυασμό με τις παρατηρούμενες συγκεντρώσεις σωματιδίων στο εξωτερικό περιβάλλον για την αναγνώριση από τον χρήστη των ακραίων τιμών συγκεντρώσεων που πιθανώς να οφείλονται σε επεισόδια σκόνης από

την Βόρεια Αφρική ή/και σε μεταφορά αερίων μαζών από αστικές, βιομηχανικές και απομακρυσμένες περιοχές. Το παραπάνω, σε συνδυασμό με την ανάλυση αποδεκτών με την υλοποίηση του αλγορίθμου ORFA-PNNC παρέχουν ένα εργαλείο για την εύρεση των πηγών ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων στην περιοχή μελέτης. Επιπλέον για την εύρεση της συμμετοχής των εσωτερικών και εξωτερικών πηγών στις συγκεντρώσεις εντός μιας κατοικίας αναπτύχθηκε εργαλείο για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης σταθερής κατάστασης.

Αναπτύχθηκε μοντέλο για τον υπολογισμό της έκθεσης, της εισπνεόμενης, εφαρμοσμένης και εσωτερικής δόσης αιωρούμενων σωματιδίων και συγκεκριμένων χημικών συστατικών τους στο αναπνευστικό σύστημα ατόμου υπό συνθήκες μεταβαλλόμενης συγκέντρωσης, περιβάλλοντος έκθεσης και δραστηριοτήτων του εκτεθειμένου ατόμου (ExDoM). Το μοντέλο βασίζεται στον αλγόριθμο εναπόθεσης και απομάκρυνσης ΑΣ στο ΑΑΣ του μοντέλου δόσης ακτινοβολίας στο ΑΑΣ από έκθεση σε ραδιενεργά σωματίδια HRTM της ICRP και περιλαμβάνει προθήκες όσον αφορά σε:

- υπολογισμό της εφαρμοσμένης και εσωτερικής δόσης ατμοσφαιρικών ΑΣ για συνεχή έκθεση,
- χρήση σε περιπτώσεις μεταβαλλόμενης έκθεσης (με χρήση τιμών από μετρήσεις),
- εισαγωγή σεναρίου δραστηριότητας,
- υπολογισμό των παραμέτρων φυσιολογίας και ανατομίας του εκτεθειμένου ατόμου,
- υπολογισμό των χαρακτηριστικών της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων (χρήση πειραματικών δεδομένων), και
- υπολογισμό της δόσης για συγκεντρώσεις αριθμού σωματιδίων.

Επιπλέον το μοντέλο περιλαμβάνει τροποποιήσεις σε σχέση με το μοντέλο HRTM της ICRP που αφορούν στον:

- τρόπο υπολογισμού του εισπνεύσιμου κλάσματος,
- επιμερισμό των αποτιθέμενων σωματιδίων στα διάφορα τμήματα του αεραγωγού,
- υπολογισμό του κλάσματος σωματιδίων που διαλύονται γρήγορα στο αίμα, και
- υπολογισμό της απορρόφησης σωματιδίων με μέσο ή αργό ρυθμό στο αίμα.

Ο αλγόριθμος εναπόθεσης και απομάκρυνσης ΑΣ στο ΑΑΣ του μοντέλου HRTM έχει βρεθεί (Bolch κ.α., 2003; Bailey κ.α., 2003 και 2007; Smith κ.α., 2007) πως δεν υπολογίζει με ακρίβεια τα παραπάνω στοιχεία. Αν και ο αλγόριθμος τροποποιήθηκε έτσι ώστε να αποδίδει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις τιμές τους, εξακολουθεί να υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα στους ρυθμούς μηχανικής απομάκρυνσης και απορρόφησης των ΑΣ. Γι αυτό το λόγο το μοντέλο παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει διαφορετικές τιμές από τις τυπικές, στους ρυθμούς μετακίνησης των ΑΣ με τη βλέννα και απορρόφησης τους στο αίμα. Θα πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι συμπεράσματα που αφορούν στην ποσότητα ΑΣ που συσσωρεύεται σε διάφορα τμήματα του αναπνευστικού θα πρέπει να αντιμετωπίζονται με ιδιαίτερη προσοχή.

Με τη βοήθεια του μοντέλου STEDOM εξετάστηκαν οι κύριες πηγές σωματιδίων στην Ευρύτερη Περιοχή Αθηνών για το έτος 2007 και η συνεισφορά διαφορετικών πηγών στις συνολικές εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων και αερίων ρύπων μια χειμερινή ημέρα. Για την εφαρμογή χρειάστηκε να πραγματοποιηθεί βιβλιογραφική μελέτη για την εύρεση των κατάλληλων τιμών παραμέτρων για τον υπολογισμό των φυσικών εκπομπών (αντιστοίχιση κάθε κατηγορίας εδαφοκάλυψης με τιμές παραμέτρων βάσει των επικρατέστερων ειδών βλάστησης στην περιοχή, των εδαφικών χαρακτηριστικών, κλιματικών παραμέτρων κ.λ.π.) και συντελεστών βαρύτητας για τις ανθρωπογενείς εκπομπές. Βρέθηκε πως το μοντέλο Sources μπορεί να αποδώσει με ταχύτητα και αξιοπιστία την χωρική κατανομή των εκπομπών (πολλές και παλαιότερες εφαρμογές του μοντέλου). Επιπλέον βρέθηκε πως οι εκπομπές από την γεωργία που περιέχονται στο μητρώο EMEP/CLRTAP είναι υποεκτιμημένες και θα πρέπει να επικαιροποιηθούν. Η σημαντικότερη ανθρωπογενής πηγή ΑΣ στην ΕΠΑ για τα ΑΣ_{2,5} είναι η καύση από την κεντρική θέρμανση, και για τα ΑΣ_{2,5-10} είναι η καύση σε βιομηχανίες. Οι εκπομπές εδαφικής σκόνης ξεπερνούν κατά πολύ τις υπόλοιπες εκπομπές σωματιδίων μια χειμερινή ημέρα (αναμένεται αύξηση σε θερινές περιόδους) και αποτελούν τη σημαντικότερη πηγή εσπνεύσιμων σωματιδίων. Οι εκπομπές των ΒΠΟΕ (οδηγούν στην παραγωγή δευτερογενώς οργανικών ΑΣ) αποτελούν μικρό ποσοστό των εκπομπών ΠΟΕ για το χειμώνα, ωστόσο η συμμετοχή τους αυξάνεται σημαντικά σε θερινές περιόδους. Τέλος, οι πυρκαγιές δασικών εκτάσεων δεν επηρέασαν σημαντικά τις εκπομπές ΒΠΟΕ και εδαφικής σκόνης στην περιοχή (δεν περιλαμβάνονται στο μητρώο εκπομπών που κατασκευάστηκε ούτε στο μητρώο EMEP).

Για την μελέτη της επίδρασης συγκεκριμένων παραμέτρων στην συγκέντρωση, έκθεση και δόση ΑΣ και χημικών συστατικών τους εκτελέστηκαν δύο εφαρμογές του μοντέλου. Στην πρώτη εφαρμογή έγινε επεξεργασία των μετρήσεων πεδίου ΑΣ (συγκέντρωση ΑΣ_{2,5}, ΑΣ_{2,5-10}, ΑΣ₁₀ και πλήθους σωματιδίων) και αερίων ρύπων σε δύο κατοικίες στο Όσλο Νορβηγίας κατά τη διάρκεια χειμερινών και θερινών περιόδων. Για τον υπολογισμό της έκθεσης και δόσης χρησιμοποιήθηκε σενάριο δραστηριότητας το οποίο δημιουργήθηκε μετά από βιβλιογραφική μελέτη για την εύρεση του τυπικού προφίλ ημερήσιας δραστηριότητας των Νορβηγών, και του χρόνου παραμονής τους σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Η δεύτερη εφαρμογή αφορούσε στο σχεδιασμό και την πραγματοποίηση μελέτης έκθεσης ατόμου σε ΑΣ στην περιοχή του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η μελέτη περιλάμβανε την τέλεση σταθμικών μετρήσεων της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων στον μετεωρολογικό σταθμό του εργαστηρίου ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος για την περίοδο 11-18 Δεκεμβρίου, 2007. Επιπλέον, περιλάμβανε την πραγματοποίηση μετρήσεων εσωτερικής και εξωτερικής συγκέντρωσης ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων σε κατοικία που βρίσκεται στα όρια της Πολυτεχνειούπολης για την ίδια περίοδο, και μετρήσεων ατομικής έκθεσης σε αναπνεύσιμα σωματίδια στην περιοχή του Πολυτεχνείου, στο κτίριο του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος, στην κατοικία και κατά τη μεταφορά από αυτή προς το

Πολυτεχνείο Κρήτης και αντίστροφα. Από τις παραπάνω μελέτες προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Οι δραστηριότητες μέσα στο σπίτι (μαγείρεμα, άσκηση, σκούπισμα) επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις έκθεσης σε ΑΣ. Κατά τις περιόδους μετρήσεων ωστόσο η σημαντικότερη πηγή ΑΣ στον εσωτερικό χώρο παραμένει η είσοδος του εξωτερικού αέρα.
- Ο εξαερισμός της κατοικίας από τα παράθυρα, η κατασκευή (υλικά και σχεδιασμός) του κτιρίου, η τοποθεσία του, η εποχή, οι δραστηριότητες των ενοίκων και οι μετεωρολογικές παράμετροι επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις έκθεσης σε ΑΣ10 και χημικά συστατικά τους στον εσωτερικό χώρο.
- Οι συγκεντρώσεις από σταθμούς ποιότητας αέρα μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από τις συγκεντρώσεις σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους στους οποίους δραστηριοποιείται το άτομο και από τις συγκεντρώσεις στις οποίες εκτίθεται.
- Η σχέση μεταξύ έκθεσης και δόσης δεν είναι γραμμική όπως συχνά λαμβάνεται σε επιδημιολογικές μελέτες.
- Η χρήση τιμών συγκέντρωσης από σταθερούς σταθμούς μέτρησης της ποιότητα αέρα οδηγεί σε λανθασμένη εκτίμηση της δόσης.
- Λαμβάνοντας υπόψη τη διακύμανση των συγκεντρώσεων έκθεσης σε εσωτερικά και εξωτερικά περιβάλλοντα και την διαφοροποίηση στην ημερήσια δραστηριότητα μεταξύ ατόμων, η χρήση μέσων ημερήσιων τιμών είναι ικανοποιητική για τον υπολογισμό της δόσης.
- Η αύξηση της φυσικής δραστηριότητας (ρυθμός και συχνότητα εισπνοής) οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού δόσης για ΑΣ με διάμετρο μικρότερη από 0,3μm στην περιοχή ΑΙ και για ΑΣ με διάμετρο μεγαλύτερη από 0,7μm στην περιοχή ΕΤ.
- Σωματίδια που προέρχονται από φυσικές πηγές αποτίθενται κυρίως στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα.

Τα αποτελέσματα της εργασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση για την κατανόηση των παραμέτρων και μηχανισμών που επιδρούν στην έκθεση και δόση ΑΣ στο ΑΑΣ καθώς και για την ανάπτυξη κατάλληλων στρατηγικών μείωσης της έκθεσης σε ΑΣ και κατ' επέκταση των επιπτώσεων τους στην ανθρώπινη υγεία. Το μοντέλο STEDOM αντιμετωπίζει ολοκληρωμένα το πρόβλημα της διαχείρισης της ποιότητας του αέρα όσον αφορά σε αιωρούμενα σωματίδια εξετάζοντας τα πρώτα βήματα της αλυσιδωτής πορείας των ΑΣ που οδηγεί στις επιπτώσεις τους στην ανθρώπινη υγεία. Στα πλαίσια εξέλιξης της παρούσας εργασίας θα μπορούσαν να γίνουν επεκτάσεις του μοντέλου STEDOM και μελλοντική έρευνα που αφορούν σε:

- δημιουργία μοντέλου πληθυσμιακής έκθεσης,
- υπολογισμό των επιπτώσεων ΑΣ στην υγεία του πληθυσμού (π.χ. αύξηση νοσηρότητας, θνησιμότητας),

- χρήση χαρτών κινητικότητας του πληθυσμού στον υπολογισμό των εκπομπών και της έκθεσης,
- σύνδεση με υπάρχον μοντέλο μικροπεριβάλλοντος (Γλυτσος Θ., 2010),
- δυνατότητα χρήσης σεναρίων έκλυσης ρύπων - έκθεσης – απόκρισης,
- μελέτη της χημικής κατανομής των ΠΟΕ και ΑΣ στην ΕΠΑ,
- μελέτη του τρόπου και ρυθμού απομάκρυνσης ΑΣ από την περιοχή ET1 και του ρυθμού μεταφοράς τους στο γαστρεντερικό σύστημα, και
- χρήση προηγμένων τεχνικών ανάλυσης αποδεκτών.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Aarnio, P., Martikainen, J., Hussein, T., Valkama, I., Vehkamäki, H., Sogacheva, L., Harkonen, J., Karppinen, A., Koskentalo, T., Kukkonen, J., Kulmala, M. (2008). Analysis and evaluation of selected PM₁₀ pollution episodes in the Helsinki Metropolitan Area in 2002. *Atmospheric Environment* 42(17), 3992 - 4005.

Abd El Hady, M., Hofmann, W. and Bergmann, R. (1997). The effect of intersubject variability in lung morphometry on particle deposition. *Journal of Aerosol Science* 28, S623 – S624.

Abt, E., Suh, H.H., Catalano, P., Koutrakis, P. (2000). Relative contribution of outdoor and indoor particle sources to indoor concentrations. *Environmental Science and Technology* 34, 3579 - 3587.

Aleksandropoulou, V. and Lazaridis, M. (2004α). Spatial Distribution of Gaseous and Particulate Matter Emissions in Greece. *Water, Air & Soil Pollution* 153, 15 - 34.

Aleksandropoulou, V. Mitsakou, C. Housiadas, C. and Lazaridis, M. (2004β). Dose assessment based on realistic exposure scenarios in Oslo. *Journal of Aerosol Science* 35, S1213 - S1214. European Aerosol Conference 2004, Budapest, Hungary.

Aleksandropoulou, V. and Lazaridis, M. (2007). Development of a decision support tool for estimation of human exposure to particles (STEDOM) – A presentation of the stand alone exposure and dosimetry modules. European Aerosol Conference 2007, Salzburg, Austria.

Aleksandropoulou, V. Mitsakou, C. Housiadas, C. and Lazaridis, M. (2008α). Particulate Matter Exposure and Dose Relationships Derived from Realistic Exposure Scenarios. *Indoor and Built Environment* 17, 237 - 246.

Aleksandropoulou, V. and Lazaridis, M. (2008β). Estimation of human exposure and dose using an environment & health decision support tool (STEDOM). Proceedings of the International Conference Protection and Restoration of the Environment IX, Kefalonia, Greece.

Aleksandropoulou, V., Glytsos, T. and Lazaridis, M. (2008γ). Exposure to indoor and outdoor particulate matter and source-to-inhaled dose relationships. Proceedings of the European Aerosol Conference 2008, Thessaloniki, Greece.

Allen, A.G., Miguel, A.H. (1995). Indoor organic and inorganic pollutants: in-situ formation and dry deposition in Southeastern Brazil. *Atmospheric Environment* 29, 3519 - 3526.

Analitis, A., Katsouyanni, K., Dimakopoulou, K., Samoli, E., Nokolopoulos, A.K., Perasakis, Y., Touloumi, G., Schwartz, J., Anderson, H.R., Cambra, K., Forastiere, F., Zmirou, D., Vonk,

J.M., Clancy, L., Kriz, B., Bobvos, J. and Pekkanen, J. (2006). Short-term effects of ambient particles on cardiovascular and respiratory mortality. *Epidemiology* 17, 230 - 233.

Andersson-Sköld, Y. and Simpson, D. (2001). Secondary organic aerosol formation in northern Europe: A model study. *Journal of Geophysical Research* 106(D7), 7357 – 7374, doi:10.1029/2000JD900656.

Anjilvel, S. and Asgharian, B. (1995). A multiple-path model of particle deposition in the rat lung. *Fundamental and Applied Toxicology* 28, 41 - 50.

Asgharian, B., Hofmann, W. and Bergmann, R. (2001). Particle deposition in a multiple-path model of the human lung. *Aerosol Science & Technology* 34, 332 – 339.

Asgharian, B., Hofmann, W. and Miller, F.J. (2001). Mucociliary clearance of insoluble particles from the tracheobronchial airways of the human lung. *Journal of Aerosol Science* 32, 817 - 832.

Athanasopoulou, E., Tombrou, M., Pandis, S.N., and Russell, A.G. (2008). The role of sea-salt emissions and heterogeneous chemistry in the air quality of polluted coastal areas. *Atmospheric Chemistry and Physics* 8, 5755 – 5769.

Bailey, M.R., Ansoborlo, E., Guilmette, R.A. and Paquet, F. (2003). Practical application of the ICRP Human Respiratory Tract Model. *Radiation Protection Dosimetry* 105(1-4), 71 - 76.

Balashazy, I., Hofmann, W. and Lorine, M. (1999). Relative contributions of individual deposition mechanisms to total aerosol deposition in human airways. *Journal of Aerosol Science* 30, S729 – S730.

Balashazy, I., Farkas, A., Szoke, I., Hofmann, W. and Sturm, R. (2003). Simulation of deposition and clearance of inhaled particles in central human airways. *Radiation Protection Dosimetry* 105(1–4), 129 – 132.

Barrett, K., Larssen, S., Sundvor, I., Fjellsbø, L., Dusinka, M., de Leeuw, F., Fiala, J., Ostatnicka, J., Horalek, J., Cernikovskiy, L., Barmpas, F., Moussiopoulos, N., Vlahacostas, C. (2008) Health Impacts and Air pollution. An exploration of factors influencing estimates of air pollution impact upon the health of European citizens. ETC/ACC Technical Paper 2008/13. European Topic Centre on Air and Climate Change, Bithoven AH, The Netherlands.

Bartonova, A., Clench-Aas, J., Gram, F., Grønskei, K.E., Guerreiro, C., Larssen, S., Tønnesen, D.A. and Walker, S.E. (1999). Air pollution exposure monitoring and estimating Part V. Traffic exposure in adults. *Journal of Environmental Monitoring* 1, 337 – 340.

Berdowski, J.J.M., Mulder, W., Veldt, C., Visschedijk, A.J.H., and Zandveld, P.Y.J. (1997). Particulate matter emissions (PM10 - PM2.5 - PM0.1) in Europe in 1990 and 1993. TNO-report, TNO_MEP - R 96/472.

- Berdowski, J.J.M., Mulder, W., Veldt, C., Visschedijk, A.J.H., and Zandveld, P.Y.J. (1998). Particulate emissions (PM₁₀ -PM_{2.5} -PM_{0.1}) in Europe in 1990 and 1993. RIVM, Netherlands.
- Bergmann, R., Hofmann, W. and Koblinger, L. (1997). Particle deposition modelling in the human lung: Comparison between Monte Carlo and ICRP model predictions. *Journal of Aerosol Science* 28, S433 – S434.
- Bergmann, R. and Hofmann, W. (1999). Incorporation of intrasubject variability in particle deposition into ICRP lung model predictions. *Journal of Aerosol Science* 30, S715 – S716.
- Berner, A. and Lürzer, C. (1980). Mass size distributions of traffic aerosols at Vienna. *Journal of Physical Chemistry* 84, 2079 - 2083.
- Birch, M.E. and Cary, R.A. (1996). Elemental carbon-based method for monitoring occupational exposures to particulate diesel exhaust. *Aerosol Science & Technology* 23, 221 - 241.
- Birch, M.E. (2002). Occupational Monitoring of Particulate Diesel Exhaust by NIOSH Method 5040. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 17(6), 400 - 405.
- Birchall, A., Bailey, M.R. and James, A.C. (1991). LUDEP: A lung dose evaluation program. *Radiation Protection Dosimetry* 38(1-3), 167 - 174.
- Bone, T. (2000). The New ICRP Respiratory Tract And Systemic Models. Westinghouse Savannah River Company Report WSRC-MM-2000-00097.
- Borge, R., Lumberras, J., Vardoulakis, S., Kassomenos, P., Rodriguez, E. (2007). Analysis of long-range transport influences on urban PM₁₀ using two-stage atmospheric trajectory clusters. *Atmospheric Environment* 41, 4434 - 4450.
- Brauer, M., Koutrakis, P., Keeler, G.J., Spengler, J.D. (1991). Indoor and outdoor concentrations of inorganic acidic aerosols and gases. *Journal of the Air & Waste Management Association* 41(2), 171 - 181.
- Bree, L., Cassee, F.R. (2000). Toxicity of Ambient Air PM₁₀. A critical review of potentially causative PM properties and mechanisms associated with health effects. RIVM Report no. 650010 015. National Institute of Public Health and the Environment, Bilthoven BA, the Netherlands.
- Briggs, D. (2005). APMoSPHERE. Imperial College of Science, Technology and Medicine, London. www.apmosphere.org
- Brown, J.S. (2005). Particle inhalability at low wind speeds. *Inhalation Toxicology* 17, 831 - 837.

- Brunekreef, B. (1997). Air pollution and life expectancy: Is there a relation?. *Occupational and Environmental Medicine* 54, 781 – 784.
- Burke, J., Zufall, M. and Ozkaynak, H. (2001). A Population Exposure Model for Particulate Matter: Case Study Results for PM_{2.5} in Philadelphia, PA. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 11, 470 - 489.
- Cai, F.S. and Yu, C.P. (1988). Inertial and interceptional deposition of spherical particles and fibers in a bifurcation airway. *Journal of Aerosol Science* 19, 679 - 688.
- CBS Norway (2002). The Time Budget Surveys - Survey of level of living, time budget, Time Use Survey 2000. Central Bureau of Statistics Norway, Oslo.
- CEC (1985). Soil Map of the European Communities, 1:1,000,000. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- CEN (1998). Air Quality-Determination of the PM₁₀ Fraction of Suspended Particulate Matter. Reference Method and Field Test Procedure to Demonstrate Reference Equivalence of Measurement Methods. European Standard EN 12341. European Committee for Standardization, Brussels.
- Chan, A.T. (2002). Indoor-outdoor relationships of particulate matter and nitrogen oxides under different outdoor meteorological conditions. *Atmospheric Environment* 36, 1543 – 1551.
- Chan, T.L. and Lippmann, M. (1980). Experimental measurements and empirical modelling of the regional deposition of inhaled particles in humans. *American Industrial Hygiene Association Journal* 41, 399 – 409.
- Chang, I., Griffith, W., Shyr, L., Yeh, H., Cuddihy, G., Seiler, A. (1991). Software for the draft NCRP respiratory tract dosimetry model. *Radiation Protection Dosimetry* 38(1-3), 193 - 199.
- Cheng, Y.S. and Wang, C.S. (1975). Inertial deposition of particles in a bend. *Journal of Aerosol Science* 6, 139 - 145.
- Choi, Y.J. and Fernando, H.J.S. (2008). Implementation of a windblown dust parameterization into MODELS-3/CMAQ: Application to episodic PM events in the US/Mexico border. *Atmospheric Environment* 42, 6039 - 6046.
- Chow, J.C., Watson, J.G., Lu, Z., Lowenthal, D.H., Frazier, C.A., Solomon, P.A., Thuillier, R.H., Magliano, K. (1996). Descriptive analysis of PM_{2.5} and PM₁₀ at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX. *Atmospheric Environment* 30 (12), 2079 - 2112.
- Clench-Aas, J., Bartonova, A., Bøhler, T., Grønskei, K.E., Sivertsen, B. and Larssen, S. (1999α). Air pollution exposure monitoring and estimating Part I. Integrated air quality monitoring system. *Journal of Environmental Monitoring* 1, 313 – 319.

Clench-Aas, J., Bartonova, A., Grønskei, K. E. and Walker, S.E. (1999β). Air pollution exposure monitoring and estimating Part IV. Urban exposure in children. *Journal of Environmental Monitoring* 1, 333 – 336.

Clench-Aas, J., Bartonova, A., Grønskei, K. E., Hagen, L. O., Braathen, O. and Walker, S.E. (1999γ). Air pollution exposure monitoring and estimating Part VI. Ambient exposure of adults in an industrialised region. *Journal of Environmental Monitoring* 1, 341 – 347.

Cowherd, C., Muleski, G.E., Englehart, P.J. and Gillette, D.A. (1985). Rapid Assessment of Exposure to Particulate Emissions from Surface Contamination Sites. Report EPA/600/8-85/002. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington DC.

Cox, D.R. (1972). Regression models and life-tables. *Journal of the Royal Statistical Society Series B* 34(2), 187 – 220.

Cuddihy, R.G., and Yeh, H.C. (1988). Respiratory tract clearance of particles and substances dissociated from particles. In U. Mohr (Ed.), *Inhalation Toxicology: The design and interpretation of inhalation studies and their use in risk assessment* (pp. 169-193). Springer-Verlag, Berlin.

Darquenne, C. (2001). A realistic two-dimensional model of aerosol transport and deposition in the alveolar zone of the human lung. *Journal of Aerosol Science* 32, 1161 – 1174.

Dean, W.R. (1928). The stream-line motion of fluid in a curved pipe. *Philosophical Magazine Series 7* 5(30), 673 - 695.

DeCarlo, P.F., Slowik, J.G. Worsnop, D.R. Davidovits, P. and Jimenez, J.L. (2004). Particle morphology and density characterization by combined mobility and aerodynamic diameter measurements. Part 1: Theory. *Aerosol Science and Technology* 38(12), 1185 - 1205.

Diapouli, E., Grivas, G., Chaloulakou, A. and Spyrellis, N. (2008). PM10 and Ultrafine Particles Counts In-Vehicle and On-Road in the Athens Area. *Water, Air & Soil Pollution Focus* 8, 89-97.

Dockery, D.W., Pope, C.A., Xu, X., Spengler, J.D., Ware, J.H., Fay, M.E., Ferris, B.G., Speizer, F.A. (1993). An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *The New England Journal of Medicine* 329, 1753 - 1759.

Dominici, F., McDermott, A., Daniels, M., Zeger, S.L. and Samet, J.M. (2005). Revised analyses of the national morbidity, mortality, and air pollution study: mortality among residents of 90 cities. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A Current Issues* 68, 1071-1092.

Donaldson, K., Stone, V., Gilmour, P.S., Brown, D.M., MacNee, W. (2000). Ultrafine Particles: Mechanisms of Lung Injury. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A* 358, 2741 - 2749.

Dore, C., Goodwin, J., Hayman, G., and Winiwarter, W. (2001). IMPRESAREO - Improving the Spatial Resolution of Air Emission Inventories Using Earth Observation Data, WP 5000: Development of the Method for More General Application to Urban Air Quality Issues; WP6000: Evaluation, Validation and Refinement of Spatially Resolved Inventories for a Range of Urban Pollutants. AEAT/ENV/R/0462, Culham.

Draxler, R.R., Rolph, G.D. (2003). HYSPLIT (HYbrid single particle Lagrangian integrated trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website. NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD. /<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>

EEA CLC2000 (2009). Corine land cover 2000 (CLC2000) 100 m - version 12/2009. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2000-clc2000-100-m-version-12-2009/>

EC (2009). Population density disaggregated with Corine land cover 2000 (Popu01clcv5). European Commission –DG, Joint Research Centre. <http://dataservice.eea.europa.eu/dataservice>.

EFFIS, European Forest Fire Information System. <http://effis-viewer.jrc.ec.europa.eu/wmi/viewer.html>

Egan, M.J. and Nixon, W. (1985). A model of aerosol deposition in the lung for use in inhalation dose assessments. *Radiation Protection Dosimetry* 11(1), 5 - 17.

EMEP (1999). Transboundary Photo-oxidants in Europe. EMEP Summary Report 2/99.

EMEP/CCC (2002). EMEP manual for sampling and chemical analysis. EMEP/CCC-Report 1/95. Norwegian Meteorological Institute, Oslo, Norway.

EMEP/CLRTAP (2009). EMEP Centre on Emission Inventories and Projections (CEIP), Emission used in EMEP models from Greece during 2007. <http://www.ceip.at/emission-data-webdab/emissions-used-in-emep-models/>

EMEP/EEA (2009). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook – 2009. EEA Technical Report, 9/2009.

EMEP-MS/W (2003). Transboundary Acidification, Eutrophication and Ground Level Ozone in Europe, Part I Unified EMEP model description. EMEP Status Report 2003. Norwegian Meteorological Institute, Oslo, Norway.

EPER (2008). European Pollutant Emission Register. <http://eper.eea.europa.eu/eper>.

E-PRTR (2009). European Pollutant Release and Transfer Register data base v1, as published on 09 Nov 2009. <http://prtr.ec.europa.eu>.

Escudero, M., Querol, X., Avila, A., Cuevas, E. (2007). Origin of the exceedances of the European daily PM limit value in regional background areas of Spain. *Atmospheric Environment* 41, 730 - 744.

ESDB v2.0 (2004), The European Soil Database distribution version 2.0, European Commission and the European Soil Bureau Network, EUR 19945 EN.

Etherington, G., Smith, J.R.H., Bailey, M.R., Dorrian, M.D., Shutt, A.L. and Youngman, M.J. (1998). Deposition and clearance of inhaled particles in the human nasal passage: implications for dose assessment. *Radiation Protection Dosimetry* 79(1-4), 249 – 252.

Eurostat (2004). How Europeans spend their time. Everyday life of women and men, Data 1998-2002. Office for Official Publications of the European Communities (ISBN 92-894-7235-9), Luxembourg.

Falk, R., Philipson, K., Svartengren, M., Bergmann, R., Hofmann, W., Jarvis, N., Bailey, M. and Camner, P. (1999). Assessment of long-term bronchiolar clearance of particles from measurements of lung retention and theoretical estimates of regional deposition. *Experimental Lung Research* 25(6), 495 - 516.

FAO–UNESCO (1974). FAO–UNESCO Soil Map of the World. Volume I: Legend. UNESCO, Paris.

Fitzgerald, J.W. (1975). Approximation formulas for the equilibrium size of an aerosol particle as a function of its dry size and composition and the ambient relative humidity. *Journal of Applied Meteorology* 14, 1044–1049.

Flagan, R.C. (2001). Electrical Techniques. In Baron, P.A. and Willeke, K. (Ed.), *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications* (pp. 537 - 568). John Wiley, New York.

Franck, U., Herbarth, O., Wehner, B., Wiedensohler, A. and Manjarrez, M. (2003). How do the indoor size distributions of airborne submicron and ultrafine particles in the absence of significant indoor sources depend on outdoor distributions? *Indoor Air* 13, 174 - 181.

Fuchs, N.A. (1964). *The mechanics of aerosols*. Pergamon Press, New York.

Funasaka, K., Miyazaki, T., Tsuruho, K., Tamura, K., Mizuno, T. and Kuroda, K. (2000). Relationship between Indoor and Outdoor Carbonaceous Particulates in Roadside Households. *Environmental Pollution* 110(1), 127 - 134.

Fung, Y.C. (1990). *Biomechanisms. Motion, Flow, Stress, and Growth*. Springer-Verlag, New York.

Gehr P., Geiser M., Hof V.I., Schurch S. (2000). Surfactant-Ultrafine Particle Interactions: What We Can Learn from PM10 Studies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A* 358, 2707 - 2718.

Georgopoulos, P.G., Wang, S.W., Vyas, V.M., Sun, Q., Burke, J., Vedantham, R., McCurdy, T. and Ozkaynak, H. (2005). A source-to-dose assessment of population exposures to fine PM and ozone in Philadelphia, PA, during a summer 1999 episode. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 15(5), 439 - 457.

Georgopoulos, P.G., Liou, P.J. (2006). From a theoretical framework of human exposure and dose assessment to computational system implementation: the Modeling ENvironment for TOtal Risk Studies (MENTOR). *Journal of Toxicology and Environmental Health B* 9(6), 457 – 483.

Georgopoulos, P.G. (2008). A Multiscale Approach for Assessing the Interactions of Environmental and Biological Systems in a Holistic Health Risk Assessment Framework *Water Air Soil Pollution Focus* 8, 3 - 21.

Geron, C., Guenther, A. and Pierce, T. (1994). An improved model for estimating emissions of volatile organic compounds from forests in the eastern United States. *Journal of Geophysical Research* 99, 12773 - 12792.

Glytsos, T., Aleksandropoulou, V., Smolik, J. and Lazaridis, M. (2005). Estimating the strength of indoor sources using a comprehensive microenvironmental model. *Proceedings of the European Aerosol Conference 2005*, Ghent, Belgium.

Goo, J. and Kim, C.S. (2003). Theoretical analysis of particle deposition in human lungs considering stochastic variations of airway morphology. *Journal of Aerosol Science* 34, 585-602.

Goodwin, J., Adams, M., Pye, S., and Vestreng, V. (2009). Spatial Emissions Mapping. In Goodwin, J., EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook – 2009. Technical Report No 9/2009. European Environmental Agency

Gormley, P.G. and Kennedy, M. (1949). Diffusion from a stream flowing through a cylindrical tube. *Proceedings of the Royal Irish Academy* A52, 163 - 169.

Gradon, L., Pratsinis, E., Prodgorski, A., Scott, S. and Panda, S. (1996). Modeling retention of inhaled particles in rat lungs including toxic and overloading effects. *Journal of Aerosol Science* 27(3), 487 – 503.

Gradon, L. and Prodgorski, A. (1999). Deposition and retention of fine and ultrafine particles in the pulmonary region of human lungs. Normal and Pathological cases. *Journal of Aerosol Science* 30, S801 - S802.

- Grell, G., Dudhia, J. and Stauffer, D.R. (1994). A description of the fifth generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). NCAR Technical Note TN-398. National Center for Atmospheric Research., Boulder Colorado, US.
- Grini, A., Myhre, G., Sundet, J. and Isaksen, I. (2002). Modeling the annual cycle of sea-salt in the global 3D model Oslo CTM2: Concentrations, Fluxes, and Radiative Impact. *Journal of Climate* 15(13), 1717 - 1730.
- Grivas, G., Chaloulakou, A., Kassomenos, P. (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. *The Science of the total environment* 389(1), 165 - 77.
- Guenther, A.B., Zimmerman, P.R., Harley, P.C., Monson, R.K. and Fall, R. (1993). Isoprene and monoterpene rate variability: model evaluations and sensitivity analyses. *Journal of Geophysical Research* 98(D7), 12609 – 12617.
- Guenther, A., Zimmerman, P., Wildermuth, M. (1994). Natural volatile organic compound emission rate estimates for U.S. woodland landscapes. *Atmospheric Environment* 28(6), 1197 - 1210.
- Guenther, A., Greenberg, J., Helmig, D., Klinger, L., Vierling, L., Zimmerman, P. and Geron, C. (1996). Leaf, branch, stand and landscape scale measurements of volatile organic compound fluxes from U.S. woodlands. *Tree Physiology* 16, 17 - 24.
- Guerreiro, C., Clench-Aas, J. and Bartonova, A. (1999). Air pollution exposure monitoring and estimating Part III. Development of new types of air quality indicators. *Journal of Environmental Monitoring* 1, 327 - 332.
- Haber, S. and Tsuda, A. (1998). The effect of flow generated by rhythmically expanding pulmonary acinus on aerosol dynamics. *Journal of Aerosol Science* 29, 309 - 322.
- Hanninen, O.O., Kruize, H., Lebet, E. and Jantunen, M. (2003). EXPOLIS Simulation Model: PM_{2.5} application and comparison with measurements in Helsinki. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 13, 74 - 85.
- Hanninen, O.O., Lebet, E., Ilacqua, V., Katsouyanni, K., Kunzli, N., Sram, R.J. and Jantunen, M. (2004). Infiltration of ambient PM_{2.5} and levels of indoor generated non-ETS PM_{2.5} in residences of four European cities. *Atmospheric Environment* 38, 6411 - 6423.
- Hansen, J.E., Ampaya, E.P. (1975). Human air space shapes, sizes, areas, and volumes. *Journal of Applied Physiology* 38(6), 990 - 995.

- Hardin, J.C., Yu, J.C., Patterson, J.L. and Triple, W.Jr. (1980). The pressure-flow relation in bronchial airways on expiration. In D.J. Schneck (Ed.), *Biofluid Mechanics* (pp. 39-55). Plenum Press, New York.
- Harrison, R.M. and Yin, J. (2000). Particulate Matter in the Atmosphere: Which Particle Properties are Important for its Effects on Health? *The Science of the Total Environment* 249, 85 - 101.
- Hashish, A.H., Fleming, J.S., Conway, J., Halson, P., Moore, E., Williams, T.J., Bailey, A.G., Nassim, M. and Holgate, S.T. (1998). Lung deposition of particles by airway generation in healthy subjects: three-dimensional radionuclide imaging and numerical model predictions. *Journal of Aerosol Science* 29(1/2), 205 - 215.
- Hayman, G., Bartzis, J., Dore, C., Ekstrand, S., Goodwin, J., Licotti, C., Olsson, B., Rabasco, C., Sjodin, A., Steinnocher, K., Tamponi, M., Vlachogiannis, D., and Winiwarer, W. (2001). IMPRESAREO - Improving the Spatial Resolution of Air Emission Inventories Using Earth Observation Data. Final Report AEATyENVyRy0693. AEA Technology, Culham, UK.
- He, C., Morawska, L., Hitchins, J. and Gilbert, D. (2004). Contribution from indoor sources to particle number and mass concentrations in residential houses. *Atmospheric Environment* 38, 3405 - 3415.
- HEI (2003). Revised Analyses of Time-Series Studies of Air Pollution and Health. Special Report 8/5/03. Health Effects Institute, Boston MA, US.
- Heistracher, T. and Hofmann, W. (1995). Physiologically realistic models of bronchial airway bifurcations. *Journal of Aerosol Science* 26, 497 - 509.
- Hertel, O., De Leeuw, F., Raaschou-Nielsen, O., Jensen, S., Gee, D., Herbarth, O., Pryor, S., Palmgren, F., Olsen, E. (2001). Human exposure to outdoor air pollution. *Pure and Applied Chemistry* 73(6), 933 - 958.
- Hess M., Koepke P. and Schult I. (1998). Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79, 831 - 844.
- Heyder, J. (1975). Gravitational deposition of aerosol particles within a system of randomly oriented tubes. *Journal of Aerosol Science* 6(2), 133 - 137.
- Hildermann, L.M., Markowski, G.R., Cass, G.R. (1991). Chemical composition of emissions from urban sources of fine organic aerosol. *Environmental Science & Technology* 25(4), 744 - 759.
- Hinds, W.C. (1999). *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*. John Wiley & Sons, New York.

- Hoek, G., Kos, G.P.A., Harrison, R., de Hartog, J., Meliefste, K., ten Brink, H., Katsouyanni, K., Karakatsani, A., Lianou, M., Kotronarou, A., Kavouras, I., Pekkanen, J., Vallius, M., Kulmala, M., Puustinen, A., Thomas, S., Meddings, C., Ayresi, J., van Wijnen, J., and Hameri, K. (2008). Indoor-outdoor relationships of particle number and mass in four European cities. *Atmospheric Environment* 42(1), 156 - 169.
- Hofmann, W. and Koblinger, L. (1992). Monte-carlo modeling of aerosol deposition in human lungs. Part II: comparison with experimental data. *Journal of Aerosol Science* 23, 51 - 63.
- Hofmann, W., Asgharian, B., and Winkler-Heil, R. (2002). Intersubject variability in particle deposition in human lungs. *Journal of Aerosol Science* 33, 219 - 235.
- Hofmann, W. and Asgharian, B. (2003). The effect of lung structure on mucosilliary clearance and particle retention in human and rat lungs. *Toxicological Sciences* 73, 448 - 456.
- Hofmann, W., Sturm, R., Winkler-Heil, R. and Pawlak, E. (2003). Stochastic model of ultrafine particle deposition and clearance in the human respiratory tract. *Radiation Protection Dosimetry* 105(1-4), 77 - 80.
- Horsfield, K., Dart, G., Olso, D.E., Filley, G.F. and Cumming, G. (1971). Models of the human bronchial tree. *Journal of Applied Physiology* 31(2), 207 - 217.
- Hsieh, T.H. and Yu, C.P. (1998). Two-phase pulmonary clearance of insoluble particles in mammalian species. *Inhalation Toxicology* 10, 121 - 130.
- Huang, H.C., Lim, J., Tao, Z., Choi, H., Patten, K., Kunkel, K., Xu, M., Zhu, J., Liang, X.Z., Williams, A., Caughey, M., Wuebbles, D.J., Wang, J. (2008). Impacts of long-range transport of global pollutants and precursor gases on U.S. air quality under future climatic conditions. *Journal of Geophysical Research* 113(D19307). doi:10.1029/2007JD009469.
- Hussein, T., Glytsos T., Ondráček, J., Dohányosová, P., Ždímal, V., Hämeri, K., Lazaridis, M., Smolík, J., Kulmala, M. (2006). Particle size characterization and emission rates during indoor activities in a house. *Atmospheric Environment* 40, 4285 - 4307.
- Huston, T.E. (1995). Quantifying uncertainties in lung dosimetry with application to plutonium oxide aerosols. Academic dissertation. University of Florida, Gainesville FL, US.
- ICRP - International Commission on Radiological Protection (1994). Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. *Annals of the ICRP* 24 (4). Pergamon, Oxford.
- ICRP - International Commission on Radiological Protection (2002). Guide for the Practical Application of the ICRP Human Respiratory Tract Model. *Annals of the ICRP* 32 (1-2). Pergamon, Oxford.

- Ingham, D.B. (1975). Diffusion of aerosol from a stream flowing through a cylindrical tube. *Journal of Aerosol Science* 6, 125 - 132.
- Ingham, D.B. (1991). Diffusion of aerosol in the entrance region of a smooth cylindrical tube. *Journal of Aerosol Science* 22, 253 - 257.
- Jang, M., Kamens, R.M. (1999). Newly characterized products and composition of secondary aerosols from the reaction of α -pinene with ozone. *Atmospheric Environment* 33, 459 - 474.
- Jantunen, M. (1998). Assessing the benefits and costs of air pollution research: Benzene exposure in the San Francisco Bay area. *Atmospheric Environment* 32(6), 1135 - 1136.
- Jarvis, N.S., Birchall, A., James, A.C., Bailey, M.R. and Dorrian, M.D. (1996). LUDEP 2.0: Personal Computer Program for Calculating Internal Doses Using the ICRP Publication 66 Respiratory Tract Model. National Radiological Protection Board NRPB-SR287, Chilton, UK.
- Jones, N.C., Thornton, C.A., Mark, D., and Harrison, R.M. (2000). Indoor/outdoor relationships of particulate matter in domestic homes with roadside, urban and rural locations. *Atmospheric Environment* 34, 2603 - 2612.
- Jorba O., Perez, C. Rocadenbosch, F. and Baldasano, J.M. (2004). Cluster Analysis of 4-Day Back Trajectories Arriving in the Barcelona Area (Spain) from 1997 to 2002. *Journal of Applied Meteorology* 43(6), 887 - 901.
- Karanasiou, A., Eleftheriadis, K., Vratolis, S., Zarbas, P., Mihalopoulos, N., Mitsakou, C., Housiadas, C., Lazaridis, M., Ondracek, J., Dzumbova, L. (2008). Size distributions of inorganic species and their inhaled dose in the industrial workplace aerosol. *Water Air and Soil Pollution Focus* 8, 71 - 76.
- Karl, M., Guenther, A., Koble, R., Leip, A. and Seufert, G. (2009). A new European plant-specific emission inventory of biogenic volatile organic compounds for use in atmospheric transport models. *Biogeosciences* 6(6), 1059 - 1087.
- Kaskaoutis, D.G., Kosmopoulos, P., Kambezidis, H.D., Nastos, P. (2007). Investigation of the Saharan dust events over Athens in the period 2000-2005. Abstracts of the ACCENT Workshop, Bremen, Germany.
- Katsouyanni, K., Schwartz, J., Spix, C., Touloumi, G., Zmirou, D., Zanobetti, A., Wojtyniak, B., Vonk, J.M., Tobias, A., Ponka, A., Medina S., Bacharova, L. and Anderson, H.R. (1996). Short-term effects of air pollution on health: a European approach using epidemiologic time series data: the APHEA protocol. *Journal of Epidemiology and Community Health* 50, S12 - S18.
- Katsouyanni, K., Touloumi, G., Samoli, E., Gryparis, A., Le Tatre, A., Monopolis, Y., Rossi, G., Zmirou D., Ballester F., Boumghar, A., Anderson, H. Wojtyniak, B., Paldy, A., Barunstein,

- R., Pekkanen, J., Schnidler, C. and Schwartz, J. (2001). Confounding effect modification in the short-term effects of ambient particles on total mortality: results from 29 European cities within the APHEA 2 project. *Epidemiology* 12, 521 - 531.
- Khlystov, A., Stanier, C. and Pandis, S.N. (2004). An algorithm for combining electrical mobility and aerodynamic size distributions data when measuring ambient aerosol. *Aerosol Science and Technology* 38, S229 - S238.
- Kim, C.S. and Jaques, P.A. (2000). Respiratory Dose of Inhaled Ultrafine Particles in Healthy Adults. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A* 358(1775), 2693 - 2705.
- Kleeman, M.J., Cass, G.R. (1998). Source contributions to the size and composition distribution of urban particulate air pollution. *Atmospheric Environment* 32, 2803 - 2816.
- Klein, H., Wind, P. and van Loon, M. (2004). Transboundary air pollution by main pollutants (S, N, O₃) and PM Country reports 2004. Report for Greece. MSC/W Data Note, 1/04. Norwegian Meteorological Institute, Oslo, Norway.
- Klepeis, N.E., Nelson, W.C., Ott, W R., Robinson, J.P., Tsang, A.M., Switzer, P., Behar, J.V., Hern, S.C. and Engelmann, W.H. (2001). The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 11, 231 - 252.
- Koblinger, L. and Hofmann, W. (1985). Analysis of human lung morphometric data for stochastic aerosol deposition calculations. *Physics in Medicine and Biology* 30(6), 541 - 556.
- Koblinger, L., Hofmann, W. (1990). Monte Carlo modeling of aerosol deposition in human lungs. Part I: simulation of particle transport in a stochastic lung structure. *Journal of Aerosol Science* 21, 661 - 674.
- Kocak, M., Mihalopoulos, N., Kubilay, N. (2007). Contributions of natural sources to high PM₁₀ and PM_{2.5} events in the eastern Mediterranean. *Atmospheric Environment* 41(18), 3806 - 3818.
- Kocak, M., Mihalopoulos, N., Kubilay, N. (2009). Origin and source regions of PM₁₀ in the Eastern Mediterranean atmosphere. *Atmospheric Research* 92(4), 464 - 474.
- Koch, W. and Stöber, W. (2001). A simple pulmonary retention model accounting for dissolution and macrophage-mediated removal of deposited polydisperse particles. *Inhalation Toxicology* 13, 129 - 148.
- Koponen, I.K., Asmi, A., Keronen, P., Puhto, K., Kulmala, M. (2001). Indoor air measurement campaign in Helsinki, Finland 1999 - The effect of outdoor air pollution on indoor air. *Atmospheric Environment* 35, 1465 - 1477.

- Korc, M., Fudala, J., Klis, C. (2009). Estimation of wind blown dust emissions in Europe and its vicinity. *Atmospheric Environment* 43(7), 1410 - 1420.
- Kounadi, O. (2009). Assessing the quality of OpenStreetMap data. MSc dissertation at the Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering. University College of London, UK.
- Kousa, A., Kukkonen, J., Karrppinen, A., Aarnio, P. and Koskentalo, T. (2002 α). A model for evaluating the population exposure to ambient air pollution in an urban area. *Atmospheric Environment* 36, 2109 - 2119.
- Kousa, A., Oglesby, L., Koistinen, K., Kunzli, N. And Jantunen, M. (2002 β). Exposure chain of urban air PM_{2.5} – associations between ambient fixed site, residential outdoor, indoor, workplace and personal exposures in four European cities in the EXPOLIS-study. *Atmospheric Environment* 36, 3031 - 3039.
- Kousa, A., Aarnio, P., Kukkonen, J., Riikonen, K., Alaviippola, B., Kauhaniemi, M., Karrppinen, A., Elolähde, T. and Koskentalo, T. (2005). Refinement of a deterministic population exposure model, and its application for predicting the exposures of PM_{2.5} in Helsinki in 2002. *Proceedings of the Urban Air Quality Conference, Valencia, Spain.*
- Krewski, D., Burnett, R.T., Goldberg, M.S., Hoover, K., Siemiatycki, J., Jerrett, M., Abrahamowicz, M. and White, W.H. (2000) Reanalysis of the Harvard Six Cities Study and the American Cancer Society Study of Particulate Air Pollution and Mortality. HEI Special Report. The Health Effects Institute, US.
- Kuempel, E.D., O'Flaherty, E.J., Stayner, L.T., Smith, R.J., Green, F.H.Y. and Vallyathan, V. (2001). A biomathematical model of particle clearance and retention in the lungs of coal miners. I. Model development. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 34, 69 - 87.
- Lachenmyer, C. and Hidy, G.M. (2000). Urban measurements of outdoor-indoor PM_{2.5} concentrations and personal exposure in the deep south. Part I. Pilot study of mass concentrations for nonsmoking subjects. *Aerosol Science & Technology* 32, 34 - 51.
- Laden, F., Neas, L.M., Dockery, D.W., Schwartz, J. (2000). Association of fine particulate matter from different sources with daily mortality in six U.S. cities. *Environmental Health Perspectives* 108(10), 941 - 947.
- Landahl, H.D. (1950). On the removal of airborne droplets by the human respiratory tract. I. The lung. *Bulletin of Mathematical Biophysics* 12, 43 - 56.
- Lavender, K.A. (1999). Marine Exhaust Emissions, Quantification Study – Mediterranean Sea. Report no. 99/EE/7044. Lloyds Register Engineering Services, London, UK.

Lazaridis, M., Broday, D., Hov, O. and Georgopoulos, P. (2001). Integrated exposure and dose modelling and analysis system. 3. Deposition of inhaled particles in the human respiratory tract. *Environmental Science and Technology* 35, 3727 - 3734.

Lazaridis, M., Dahlin, E., Hansen, J.E., Smolik, J., Schmidbauer, N., Moravec, P., Zdímal, V., Hermansen, O., Glytsos, T., Svendby, T., Dye, C. (2003). Indoor/Outdoor particulate matter measurements in two residential houses in Oslo, Norway. *Journal of Aerosol Science*, S1367 - S1368. Proceedings of the European Aerosol Conference, Madrid, Spain.

Lazaridis, M., Aleksandropoulou, V., Dahlin, E., Smolík, J., Ždímal, V., Katsivela, E., Glytsos, T. and Hansen, J.E. (2005α). Characterization of Indoor/Outdoor particulate matter physico-chemical characteristics in two residential houses in Oslo, Norway: An Overview. Proceedings of the 5th International Conference on Urban Air Quality, Valencia, Spain.

Lazaridis, M., Aleksandropoulou, V., Smolík, J., Glytsos, T., Katsivela, E. and Dahlin, E. (2005β). Indoor/outdoor particulate matter physicochemical characteristics in two residential houses. Proceedings of the European Aerosol Conference 2005, Ghent, Belgium.

Lazaridis, M., Aleksandropoulou, V., Smolík, J., Hansen, J.E., Glytsos, T., Kalogerakis, N. and Dahlin, E. (2006). Physico-chemical characterisation of indoor/outdoor particulate matter in two residential houses in Oslo, Norway: Measurements overview and physical properties – URBAN-AEROSOL Project. *Indoor Air* 16, 282 - 295.

Lazaridis, M. and Aleksandropoulou, V. (2007α). Indoor/Outdoor Particulate matter chemical characteristics and source-to-inhaled dose relationships – URBAN AEROSOL Project: Overview of results for Oslo, Norway. Proceedings of the 6th International Conference on Urban Air Quality, Limassol, Cyprus.

Lazaridis, M., Aleksandropoulou, V., Hanssen, J.E., Dye, C., Eleftheriadis, K. and Katsivela, E. (2007β). Sources and variability of major chemical species in the indoor and outdoor aerosol in two houses in Oslo, Norway. Proceedings of the 1st International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics (CEMEPE), Skiathos island, Greece.

Lazaridis, M., Aleksandropoulou, V., Hanssen, J.E., Dye, C., Eleftheriadis, K. and Katsivela, E. (2008α). Inorganic and carbonaceous components in indoor/outdoor particulate matter in two residential houses in Oslo, Norway. *Journal of the Air & Waste Management Association* 58(3), 346 - 356.

Lazaridis, M., Latos, M., Aleksandropoulou, V., Hov, Ø, Papayannis, A. and Tørseth, K (2008β). Contribution of forest fire emissions to atmospheric pollution in Greece. *Air Quality, Atmosphere and Health* 1(3), 143 – 158.

M. Lazaridis, L. Dzumbova, I. Kopanakis, J. Ondracek, T. Glytsos, V. Aleksandropoulou, A. Voulgarakis, E. Katsivela, N. Mihalopoulos and K. Eleftheriadis (2008γ). PM10 and PM2.5

levels in the Eastern Mediterranean (Akrotiri Research station, Crete, Greece). *Water Air & Soil Pollution* 189, 85-101.

Lazaridis, M. and Aleksandropoulou, V. (2009). Sources and variability of indoor and outdoor gaseous aerosol precursors (O₃, NO_x and VOCs). *Water Air & Soil Pollution Focus* 9(1-2), 3 – 13.

Lebowitz, M.D., O'Rourke, M.K., Gordon, S., Moschandreas, D. and Nishioka, M. (1995). Population based exposure measurements in Arizona: a phase I field study in support of the national human exposure assessment survey. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 5, 297 - 235.

Lee, P.S., Gerrity, T.R., Hass, F.J. and Lourenco, R.V. (1979). A model for tracheobronchial clearance of inhaled particles in man and a comparison with data. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 26(11), 624 - 630.

Levy, J.I., Hammitt, J.K., Spengler, J.D. (2000). Estimating the mortality impacts of particulate matter: What can be learned from between study variability? *Environmental Health Perspectives* 108(2), 109 - 117.

Lioy, P.J. (1990). Assessing total human exposure to contaminants. *Environmental Science & Technology* 24(7), 938 – 945.

Lippmann, M, Ito, K. (2000). Contributions that epidemiological studies can make to the search for a mechanistic basis for the health effects of ultrafine and larger particles: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A* 358(1775), 2787 - 2797.

Liu, M., Westphal, D.L. (2001). A study of the sensitivity of simulated mineral dust production to model resolution. *Journal of Geophysical Research* 106(D16), 18099 – 18112, doi:10.1029/2000JD900711.

Long, C.M., Suh, H.H. and Koutrakis, P. (2000). Characterization of Indoor Particle Sources Using Continuous Mass and Size Monitors. *Journal of the Air & Waste Management Association* 50, 1236 – 1250.

Long, C.M., Suh, H.H., Catalano, P.J., and Koutrakis P. (2001). Using time- and size-resolved particulate data to quantify indoor penetration and deposition behaviour. *Environmental Science & Technology* 35, 2089 - 2099.

Lunden, M.M., Thatcher, T.L., Hering, S.V., Brown, N.J. (2003). Use of time- and chemically resolved particulate data to characterize the infiltration of outdoor PM_{2.5} into a residence in the San Joaquin Valley. *Environmental Science & Technology* 37, 4724 - 4732.

- Maes, J., Vliegen, J., Van de Vel, K., Janssen, S., Deutsch, F., De Ridder, K., and Mensink, C. (2009). Spatial surrogates for the disaggregation of CORINAIR emission inventories. *Atmospheric Environment* 43, 1246 - 1254.
- Mahura, A.G., Jaffe, D., Andres, R., and Merrill, J. (1999). Atmospheric transport pathways from the Bilibino nuclear power plant to Alaska. *Atmospheric Environment* 33(30), 5115 - 5122.
- Mansell, G., Wolf, M., Gillies, J., Barnard, W., and Omary, M. (2004). Final Report: Determining Fugitive Dust Emissions from Wind Erosion. Prepared for Western Governors' Association (WRAP) by ENVIRON International Corporation, US.
- Markakis, K., Poupkou, A., Melas, D., Tzoumaka, P., and Petrakakis, M. (2010). A Computational Approach Based on GIS Technology for the Development of an Anthropogenic Emission Inventory of Gaseous Pollutants in Greece. *Water, Air, & Soil Pollution* 207(1), 157 - 180.
- Martonen, T.B. and Gibby, D. (1982). Computer models of aerosol deposition in two human tracheobronchial geometries. *Computers and Biomedical Research* 15(5), 425 - 433.
- Martonen, T.B., Bell, K.A., Phalen, R.F., Wilson, A.F. and Ho, A. (1982). Growth rate measurements and deposition modeling of hygroscopic aerosols in human tracheobronchial models. *Annals of Occupational Hygiene* 26, 93 - 108.
- Martonen, T.B., Zhang, Z. and Yang, Y. (1996). Particle diffusion with entrance effects in a smooth-walled cylinder. *Journal of Aerosol Science* 27, 139 - 150.
- Martonen, T.B., Rosati, J.A., Isaacs, K.K. (2005). Modeling deposition of inhaled particles. In Ruzer, L.S., Harley, N.H. (Ed.), *Aerosols handbook: measurement, dosimetry, and health effects*. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Mauderly, J.L. and Chow, J.C. (2008). Health effects of organic aerosols. *Inhalation Toxicology* 20(3), 257 - 288.
- McCurdy, T., Geln, G., Smith, L. and Lakkadi, Y. (2000). The National Exposure Research Laboratory's Consolidated Human Activity Database. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 10, 566 - 578.
- McMury, P.H. (2000). A review of atmospheric aerosol measurements. *Atmospheric Environment* 34, 1959 - 1999.
- Menache, M.G., Miller, F.J., Raabe, O.G. (1995). Particle inhalability curves for humans and small laboratory animals. *Annals of Occupational Hygiene* 39, 317 - 328.
- Meng, Q.Y., Turpin, B.J., Korn, L., Weisel, C.P., Morandi, M., Colome, S., Zhang, J., Stock, T., Spektor, D., Winer, A., Zhang, L., Lee, J.H., Giovanetti, R., Cui, W., Kwon, J., Alimokhtari,

- S., Shendell, D., Jones, J., Farrar, C., and Maberti, S. (2005). Influence of ambient (outdoor) sources on residential indoor and personal PM_{2.5} concentrations: Analyses of RIOPA data. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 15, 17 - 28.
- Mitsakou, C., Helmis, C. and Housiadas, C. (2005). Eulerian modeling of lung deposition with sectional representation of aerosol dynamics. *Journal of Aerosol Science* 36, 75 - 94.
- Mitsakou, C., Housiadas, C., Eleftheriadis, K., Vratolis, S., Helmis, C., Asimakopoulos, D. (2007). Lung deposition of fine and ultrafine particles outdoors and indoors during a cooking event and a no activity period. *Indoor Air* 17, 143 - 152.
- Monahan, E.C., Spiel, D.E. and Davidson, K.L. (1986). A model of marine aerosol generation via whitecaps and wave disruption. In Monahan, E.C. and MacNiocail, G. (Ed.), *Oceanic Whitecaps* (pp. 167 - 174). The Netherlands, Reidel, Dordrecht.
- Morawska, L., He, C., Hitchins, J., Mengersen, K. and Gilbert, D. (2003). Characteristics of particle number and mass concentrations in Brisbane, Australia. *Atmospheric Environment* 37(30), 4195 - 4203.
- Moskal, A. and Gradon, L. (2002). Temporary and spatial deposition of aerosol particles in the upper human airways during breathing cycle. *Journal of Aerosol Science* 33, 1525 - 1539.
- Mosley, R.B., Greenwell, D.J., Sparks, L.E., Guo, Z., Tucker, W.G., Fortmann, R., Whitfield, C. (2001). Penetration of ambient fine particles into the indoor environment. *Aerosol Science & Technology* 34, 127 - 136.
- MRI (2005). Analysis of fine fraction of particulate matter in fugitive dust. WRAP Project No.110397. Midwest Research Institute, US.
- Nazaroff, W.W., Weschler, C.J. (2004 α). Cleaning products and air fresheners; exposure to primary and secondary air pollutants. *Atmospheric Environment* 38, 2841 - 2865.
- Nazaroff, W.W. (2004 β). Indoor particle dynamics, *Indoor Air* 14 (S7), 175 - 183.
- Neuberger, M., Schimekc, M. G., Horak, F. Jr., Moshammerb, H., Kundib, M., Frischerd, T., Gomisceka, B., Puxbauma, H., Hauck, H. and AUPHEP-Team (2004). Acute effects of particulate matter on respiratory diseases, symptoms and functions: epidemiological results of the Austrian Project on Health Effects of Particulate Matter (AUPHEP). *Atmospheric Environment* 38, 3971 - 3981.
- NILU (1995). The NILU tracer gas technique. Factsheet 8-1995 E. Norwegian Institute for Air Research. <http://www.nilu.no>
- NIOSH (1994). NIOSH Manual of Analytical methods (NMAM), 4th ed., method 5040. DHHS (NIOSH) Publication No. 94-113. National Institute for Occupational Safety and Health, Cincinnati, US.

NRPB (2004). Particle deposition in the vicinity of power lines and possible effects on health: Report of an independent advisory group on non-ionising radiation and its ad hoc group on corona ions. National Radiological Protection Board, Oxfordshire, England.

Oldham, M.J., Phalen, R.F. and Heistracher, T. (2000). Computational fluid dynamic predictions and experimental results for particle deposition in an airway model. *Aerosol Science & Technology* 32, 61 - 71.

Openstreetmap data (2009). www.openstreetmap.org

Ozeki, T., Oqawa, N. (2004). Inclusion of chemical constrains in factor analysis to extract a unique set of solutions from spectroscopic and environmental data. *Chemometrics and intelligent laboratory systems* 71, 61 - 72.

Ozkaynak, H, Spengler, J (1996). The role of outdoor particulate matter in assessing total human exposure. In Wilson, R. and Spengler, J. (Ed.), *Particles in our Air: Concentrations and health effects* (pp. 63 - 84). Harvard University Press, Cambridge MA.

Paatero, P. and Tapper, U. (1994). Positive matrix factorization: A non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values. *Environmetrics* 5, 111 – 126.

Palma, T., Vasu, A.B. and Hetes, R.G. (1999). Total Risk Integrated Methodology (TRIM). *Air and Waste Management Association - EM Magazine* March, 30-34.

Park, S. and In, H. (2003). Parameterization of dust emission for the simulation of the yellow sand (Asian dust) event observed in March 2002 in Korea. *Journal of Geophysical Research* 108 (D19), 4618, doi:10.1029/2003JD003484.

Park, S.S. and Wexler, A.S. (2007). Particle deposition in the pulmonary region of the human lung: A semi-empirical model of single breath transport and deposition. *Journal of Aerosol Science* 38, 228 - 245.

Pedley, T.J., Schroter, R.C. and Sudlow, M.F. (1970 α). Energy losses and pressure drop in models of human airways. *Respiration Physiology* 9, 371 - 386.

Pedley, T.J., Schroter, R.C. and Sudlow, M.F. (1970 β). The prediction of pressure drop and variation of resistance within the human bronchial airways. *Respiration Physiology* 9, 387 - 405.

Phalen, R., Cuddihy, R., Fisher, G., Moss, O., Schelinger, R., Swift, D., Yeh, H. (1991). Main features of the proposed NCRP respiratory tract model. *Radiation Protection Dosimetry* 38, 179 - 184.

Phalen, R.F., Oldham, M.J., Beaucage, C.B., Crocker, T.T., Mortensen, J.D. (1985). Postnatal enlargement of human tracheo-bronchial airways and implications for particle deposition. *The Anatomical Record* 212 (4), 368 - 380.

Philipson, K., Falk, R., Svartengren, M., Jarvis, N., Bailey, M., Bergmann, R., Hofmann, W. and Camner, P. (2000). Does lung retention of inhaled particles depend on their geometric diameter? *Experimental Lung Research* 26(6), 437 - 455.

Pich, J. (1972). Theory of gravitational deposition of particles from laminar flows in channels. *Journal of Aerosol Science* 3, 351 - 361.

Pierce, T., Lamb, B. and van Meter, A. (1990). Development of a biogenic emissions inventory system for regional scale air pollution models. Proceedings of the 83rd Air and Waste Management Association Annual Meeting, Pittsburgh Penn., US

Placet, M., Mann, C.O., Gilbert, R.O., Niefer, M.J. (2000). Emissions of ozone precursors from stationary sources: a critical review. *Atmospheric Environment* 34, 2183 - 2204.

Pope, C.A., Thun, M.J., Namboodiri, M.M., Dockery, D.W., Evans, J.S., Speizer, F.E. and Heath, Jr. D.W. (1995). Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of U. S. adults. *American Journal of Respiratory Critical Care Medicine* 151, 669 - 674.

Pope, C.A., Burnett, R.T., Thun, M.J., Calle, E.E., Krewski, D., Ito, K., Thurston, G.D. (2002). Lung Cancer, Cardio-pulmonary mortality and Long-term exposure to fine particulate air pollution. *Journal of American Medical Association* 287(9), 1132 - 1141.

PORG (1993). Ozone in the United Kingdom 1993. Third Report of the United Kingdom Photochemical Oxidants Review Group. UK Dept. of the Environment, London, UK.

Poupkou, A., Symeonidis, P., Ziomas, I., Melas, D., Markakis, K. (2007). A spatially and temporally disaggregated anthropogenic emission inventory in the southern Balkan region. *Water, Air, and Soil Pollution* 185(1-4), 335-348.

Price, O.T., Asgharian, B., Miller, F.J., Cassee, F.R., Winter-Sorkina R. (2002). Multiple Path Particle Dosimetry model (MPPD v1.0): A model for human and rat airway particle dosimetry. RIVM rapport 650010030. National Institute of Public Health and the Environment, Bilthoven AH, the Netherlands.

Price, P.S., Chaisson, C.F., Koontz, M., Wilkes, C., Ryan, B., Macintosh, D., Georgopoulos, P.G. (2003). Construction of a Comprehensive Chemical Exposure Framework Using Person Oriented Modeling. Prepared by The Lifeline Group for The Exposure Technical Implementation Panel, American Chemistry Council. Contract Number 1338. http://www.thelifelinegroup.org/LifeLine/Documents/comprehensive_chemical_exposure_framework.pdf

Querol, X., Alastuey, A., Rodriguez, S., Viana, M.M., Artinano, B., Salvador, P., Mantilla, E., Garcia do Santos, S., Fernandez Patier, R., de La Rosa, J., Sanchez de la Campa, A., Menendez, M., Gil, J.J. (2004). Levels of particulate matter in rural, urban and industrial sites in Spain. *The Science of the Total Environment* 334-335, 359 - 376.

Reeks, M.W., Jones, A. and Drossinos, Y. (2002). The ICRP model of the human respiratory tract: a brief summary relating to lung deposition. Technical Note No.I.02.77. European Commission, Joint Research Centre.

Robinson, R.J. and Yu, C.P. (2001). Deposition of cigarette smoke particles in the human respiratory tract. *Aerosol Science & Technology* 34, 202 – 215.

Rodriguez, S., Querol, X., Alastuey, A., Kallos, G., Kakaliagou, O. (2001). Saharan dust contributions to PM₁₀ and TSP levels in southern and Eastern Spain. *Atmospheric Environment* 35(14), 2433 - 2447.

Rolph, G.D. (2003). Real-time Environmental Applications and Display sYstem (READY) Website. NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring MD. <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>

Salma, I., Balashazy, I., Winkler-Heil, R., Hofmann, W., Zaray, G. (2002 α). Effect of particle mass size distribution on the deposition of aerosols in the human respiratory system. *Journal of Aerosol Science* 33, 119 - 132.

Salma, I., Balashazy, I., Hofmann, W., Zaray, G. (2002 β). Effect of physical exertion on the deposition of urban aerosols in the human respiratory tract. *Journal of Aerosol Science* 33, 983 - 997.

Salvador, P., Artinano, B., Alonso, D.G., Querol, X., Alastuey, A. (2004). Identification and characterisation of sources of PM₁₀ in Madrid (Spain) by statistical methods. *Atmospheric Environment* 38(3), 435–447.

Salvador, P., Artinano, B., Querol, X., Alastuey, A. (2008). A combined analysis of backward trajectories and aerosol chemistry to characterise long-range transport episodes of particulate matter: The Madrid air basin, a case study. *The Science of the Total Environment* 390, 495 – 506.

Salvador, P., Artinano, B., Pio, C., Afonso, J., Legrand, M., Puxbaum, H., Hammer, S. (2010). Evaluation of aerosol sources at European high altitude background sites with trajectory statistical methods. *Atmospheric Environment* 44(19), 2316 - 2329.

Salvi, S. and Holgate, T. (1999). Mechanisms of particulate matter toxicity. *Clinical and Experimental Allergy* 29, 1187 - 1194.

Samet, J.M., Zeger, S.L., Dominici, F., Curriero, F., Coursac, I., Dockery, D.M., Schwartz, J. and Zanobetti, A. (2000). The National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study, Part II: Morbidity and Mortality from Air Pollution in the United States. Research Report 94. Health Effects Institute, Cambridge MA.

Schlesinger, R. (1988). Biological Disposition of Airborne Particles: Basic Principles and Application to Vehicular Emissions. In Watson, A.Y., Bates, R.R. and Kennedy, D. (Ed.), Air Pollution, the Automobile, and Public Health (pp. 239 - 298). National Academy Press, Washington DC.

Schlesinger, R.B. (1995). Toxicological evidence for health effects from inhaled particulate pollution: does it support the human experience? *Inhalation Toxicology* 7, 99 - 109.

Schneider, T., Jensen, K.A., Clausen, P.A., Afshari, A., Gunnarsen, L., Wahlin, P., Glasius, M., Palmgren, F., Nielsen, O.J. and Fogh, C.L. (2004). Prediction of indoor concentration of 0.5-4 μm particles of outdoor origin in an uninhabited apartment. *Atmospheric Environment* 38, 6349 - 6359.

Schwartz, J. (1994). What are people dying of on high air pollution days? *Environmental Research* 64, 26 - 35.

Schwarz, U., Wickert, B., Obermeier, A, and Friedrich, R. (1999). Generation of Atmospheric Emission Inventories in Europe with High Spatial and Temporal Resolution. In Borrell, P.M. and Borrell P. (Ed.), Proceedings of EUROTRAC Symposium 98. WITpress, Southampton.

Schwela, D., Morawska, L., Kotzias, D. (2002). Guidelines for concentration and exposure-response measurement of fine and ultra fine particulate matter for use in epidemiological studies. European Communities, World Health Organization. <http://whqlibdoc.who.int/hq/2002/a76621.pdf>

Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (1998). Atmospheric Chemistry and Physics - From Air Pollution to Climate Change. John Wiley & Sons, New York.

Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2006). Atmospheric Chemistry and Physics - From Air Pollution to Climate Change (2nd Edition). John Wiley & Sons, New York.

Siegmann, K., Scherrer, L., Siegmann, H.C. (1999). Physical and chemical properties of airborne nanoscale particles and how to measure the impact on human health. *Journal of Molecular Structure: Theochem* 458(1), 191 - 201.

Simeonidis, P., Sanida, G., Ziomas, I. and Kourtidis, K. (1999). An estimation of the spatial and temporal distribution of biogenic non-methane hydrocarbon emissions in Greece. *Atmospheric Environment* 33, 3791 - 3801.

Simpson, D., Guenther, A., Hewitt, C.N. and Steinbrecher, R. (1995). Biogenic emissions in Europe 1. Estimates and uncertainties. *Journal of Geophysical Research* 100(D11), 22875 - 22890.

Sinclair, J.D., Psota-Kelty, L.A., Weschler, C.J., Shields, H.C. (1990). Measurement and modeling of airborne concentrations and indoor surface accumulation rates of ionic substances at Neenah, Wisconsin. *Atmospheric Environment* 24, 627 - 638.

Singh, A., Nocerino, J. (2002). Robust estimation of mean and variance using environmental data sets with below detection limit observations. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 60(1-2), 69 - 86.

Singh, H.B. (1995). *Composition, Chemistry, and Climate of the Atmosphere*. John Wiley & Sons, New York.

Sioutas, C., Kim, S., Chang, M., Terrell, L.L., Gong, H.Jr. (2000). Field evaluation of a modified DataRAM MIE scattering monitor for real-time PM_{2.5} mass concentration measurements. *Atmospheric Environment* 34, 4829 - 4838.

Smith, J.R.H., Bailey, M.R., Etherington, G., Shutt, A.L. and Youngman, M.J. (2007). Further study of the effect of particle size on slow particle clearance from the bronchial tree. *Radiation Protection Dosimetry* 127(1-4), 35 - 39.

Smith, M.H., Park, P.M. and Consterdine, I.E. (1993). Marine aerosol concentration and estimated fluxes over the sea. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 119(512), 809 - 824.

Smolík, J., Zdímal, V., Schwarz, J., Lazaridis, M., Havranek, V., Eleftheriadis, K., Mihalopoulos, N. and Colbeck, I. (2003). Size resolved mass concentration and elemental composition of atmospheric aerosols over the eastern Mediterranean. *Atmospheric Chemistry and Physics* 3, 2207 - 2216.

Smolík, J., Zdímal, V., Schwarz, J., Lazaridis, M., Dohányosová, P., Aleksandropoulou, V. and Glytsos, T. (2005 α). Indoor/Outdoor aerosol measurements at different activities indoors. *Proceedings of the 5th International Conference on Urban Air Quality, Valencia, Spain*.

Smolík, J., Lazaridis, M., Moravec, P., Schwarz, J., Zaripov, S.K., Zdímal, V. (2005 β). Indoor Aerosol Particle Deposition in an Empty Office. *Water, Air & Soil Pollution* 165, 301 - 312.

Soong, T.T., Nicolaidis, P., Yu, C.P. and Soong, S.C. (1979). A statistical description of the human tracheobronchial tree geometry. *Respiration Physiology* 37(2), 161 - 172.

Sotiropoulou, R.E., Tagaris E. and Pilinis C. (2004). An estimation of the spatial distribution of agricultural ammonia emissions in the Greater Athens Area. *The Science of the Total Environment* 318(1-3), 159 - 169.

Spyridaki, A., Lazaridis, M., Eleftheriadis, K., Smolik, J., Mihalopoulos, N. and Aleksandropoulou, V. (2006). Modelling and evaluation of size resolved aerosol

characteristics in the Eastern Mediterranean during the SUB-AERO project. *Atmospheric Environment* 40, 6261 - 6275.

Stahlhofen, W., Gebhart, J. and Heyder, J. (1980). Experimental determination of the regional deposition of aerosol particles in the human respiratory tract. *American Industrial Hygiene Association Journal* 41, 385 - 398.

Stahlhofen, W., Gebhart, J. and Heyder, J. (1981). Biological variability of regional deposition of aerosol particles in the human respiratory tract. *American Industrial Hygiene Association Journal* 42, 348 - 352.

Stahlhofen, W. (1983). New Regional Deposition Data of the Human Respiratory Tract. *Journal of Aerosol Science* 14, 186 - 188.

Steinbrecher, R., Smiatek, G., Koble, R., Seufert, G., Theloke, J., Hauff, K., Ciccioli, P., Vautard, R., Curci, G. (2009). Intra- and inter-annual variability of VOC emissions from natural and semi-natural vegetation in Europe and neighbouring countries. *Atmospheric Environment* 43(7), 1380 - 1391.

Stohl, A. (1998). Computation, accuracy, and applications of trajectories – A review and bibliography. *Atmospheric Environment* 32(6), 947 - 966.

Stradling, N., Bailey, M., Birchall, A., Etherington, G., Hodgson, A., Fritsch, P., Poncy, J.-L., Newton, D., Kreyling, W., Ansolobro, E., Guilmette, R. (2000). Clearance of radioactivity deposited in the respiratory tract to blood: Progress in a multinational interspecies comparison project. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 243(2), 323 - 337.

Stuart, B.O. (1984). Deposition and Clearance of Inhaled Particles. *Environmental Health Perspectives* 55, 369 - 390.

Sturm, R. and Hofmann, W. (2003 α). A multi-compartment model for bronchial clearance of insoluble particles in human lung. *Abstracts of the European Aerosol Conference 2003*, S389 – S390.

Sturm, R. and Hofmann, W. (2003 β). Mechanistic interpretation of the slow bronchial clearance phase. *Radiation Protection Dosimetry* 105(1-4), 101 - 104.

Sturm, R. and Hofmann, W. (2005). Visualization of the Three-Dimensional Particle Deposition Patterns in the Lung Derived from Monte Carlo Modeling: Methodology and Various Applications. *Computers in Biology and Medicine* 35, 41 - 56.

Sturm, R., Hofmann, W. (2006). A multi-compartment model for slow bronchial clearance of insoluble particles-extension of the ICRP human respiratory tract models. *Radiation Protection Dosimetry* 118(4), 384 - 394.

Sturm, R. (2007). A computer model for the clearance of insoluble particles from the tracheobronchial tree of the human lung. *Computers in Biology and Medicine* 37, 680 - 690.

Su, W.H. (1996). Indoor Air Pollution Resources. *Conservation and Recycling* 16, 77 - 91.

Symeonidis, P., Ziomas, I. and Proyou, A. (2004). Development of an emission inventory system from transport in Greece. *Environmental Modelling and Software* 19(4), 413 - 421.

Symeonidis, P., Poupkou, A., Gkantou, A., Melas, D., Yay, D., Pouspourika, E. and Balis, D. (2008). Development of a computational system for estimating biogenic NMVOCs emissions based on GIS technology. *Atmospheric environment* 42(8), 1777 - 1789.

Taulbee, D.B. and Yu, C.P. (1975). A theory of aerosol deposition in the human respiratory tract. *Journal of Applied Physiology* 38, 77 - 85.

Thatcher, T.L. and Layton, D.W. (1995). Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence. *Atmospheric Environment* 29, 1487 - 1497.

Thurston, G.D. and Spengler, J.D. (1985). A quantitative assessment of source contributions to inhalable particulate matter pollution in Metropolitan Boston. *Atmospheric Environment* 19(1), 9 - 25.

Tran, C., Jones, A., Cullen, R. (1999 α). Mathematical modelling of the retention and clearance of low-toxicity particles in the lung. *Inhalation Toxicology* 11, 1059 - 1076.

Tran, C., Jones, A., Cullen, R. (1999 β). Exploration of the mechanisms of retention and clearance of low-toxicity particles in the rat lung using a mathematical model. *Inhalation Toxicology* 11, 1077 - 1108.

Trozzi, C., Piscitello, E., Lena, F. (2003). Modeling area, line and point sources for ISC model: methodology, computer interface and case studies. *Proceedings of the 12th International Emission Inventory Conference - Emission Inventories - Applying New Technologies*, San Diego CA, US.

Tsyro, S. (2002). First estimates of the effect of aerosol dynamics in the calculation of PM₁₀ and PM_{2.5}. EMEP MSC-W Note 4/02. The Norwegian Meteorological Institute, Oslo, Norway.

Turpin, B.J., Lim, H.J. (2001). Species contributions to PM_{2.5} mass concentrations: Revisiting common assumptions for estimating organic mass. *Aerosol Science & Technology* 35(1), 602 - 610.

Turpin, B.J., Weisel, C.P., Morandi, M., Colome, S., Stock, T., Eisenreich, S., Buckley, B. (2007). Relationships of Indoor, Outdoor, and Personal Air (RIOPA): Part II. Analyses of Concentrations of Particulate Matter Species. HEI Research Report 130. NUATRC Research Report10. Health Effects Institute, Boston MA, and Mickey Leland National Urban Air Toxics Research Center, Houston TX, US.

UK Department of Health (2001). Committee on the Medical Effects of Air Pollutants (COMEAP). Statement and Report on Long-Term Effects of Particles on Mortality. www.doh.gov.uk/comeap/index.htm.

UN (2009). Guidelines for reporting emission data under the convention on Long-range transboundary air pollution. United Nations ECE/EB.AIR/97. Economic and Social Council.

UN FAO FertiStat (2007). Fertilizer Use Statistics, Data for Greece during 1999/2000. <http://www.fao.org/ag/agl/fertistat/>

US EPA (1985). Compilation of Air Pollution Emission Factors, AP-42. US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.

US EPA (1995 α). User's guide for the Industrial Source Complex (ISC3) dispersion models Volume I – User Instructions. Report EPA-454/B-95-003a. Office of Air Quality Environmental Protection Planning and Standards. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.

US EPA (1995 β). User's guide for the Industrial Source Complex (ISC3) dispersion models Volume II – Description of model algorithms. Report EPA-454/B-95-003b. Office of Air Quality Environmental Protection Planning and Standards. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.

US EPA (2000). User's guide for the assessment system for population exposure nationwide (ASPEN, version 1.1) model. Report EPA-454/R-00-017. Office of Air Quality Environmental Protection Planning and Standards. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.

US EPA: 2002. Air Quality Criteria for Particulate Matter. Report EPA/600/P-99/002aC. U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.

US EPA (2003). The HEM-Screen User's Guide. Human Exposure Model-Screen, Version 2003 (Beta). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.

US EPA (2004). Air Quality Criteria for Particulate matter. Reports EPA/600/P-99/002aF, EPA/600/P-99/002bF. National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Development. U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.

US EPA (2007 α). The HAPEM6 User's Guide. Hazardous Air Pollutant Exposure Model, Version 6. Office of Air Quality Planning and Standards. US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.

US EPA (2007 β). The HEM-3 User's Guide. HEM-3 Human Exposure Model Version 1.1.0 (AERMOD version). EPA Contract 68-D-06-119. Sector Based Assessment Group. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.

US EPA (2008). Total Risk Integrated Methodology (TRIM) Air Pollutants Exposure Model Documentation (TRIM.Expo / APEX, Version 4.3). Volume I: User's Guide. Report EPA-452/B-08-001a. Office of Air Quality Planning and Standards. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.

US EPA (2009). Integrated Science Assessment for Particulate Matter. Report EPA/600/R-08/139F. National Center for Environmental Assessment-RTP Division. Office of Research and Development. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.

Van Dingenen, R., Raes, F., Putaud, J.P., Baltensperger, U., Charron, A., Facchini, M.C., Decesari, S., Fuzzi, S., Gehrig, R., Hansson, H.S., Harrison, R.M., Hüglin, C., Jones, A.M., Laj, P., Lorbeer, G., Maenhaut, W., Palmgren, F., Querol, X., Rodriguez, S., Schneider, J., Brink, H., Tunved, P., Tørseth, K., Wehner, B., Weingartner, E., Wiedensohler, A. and Wählin, P. (2004). A European aerosol phenomenology-1: physical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe. *Atmospheric Environment* 38, 2561 - 2577.

Venkataraman, C. and Kao, A. (1999). Comparison of particle lung doses from the fine and coarse fractions of urban PM-10 aerosols. *Inhalation Toxicology* 11, 151 - 169.

Viana, M., Querol, X., Alastuey, A., Gangoiti, G., Menendez, M. (2003). PM levels in the Basque Country (Northern Spain): analysis of a 5 yr data record and interpretation of seasonal variations. *Atmospheric Environment* 37 (21), 2879 - 2891.

Walker, S.E., Slørdal, L.H., Guerreiro, C., Gram, F. and Grønskei, K.E. (1999). Air pollution exposure monitoring and estimating Part II. Model evaluation and population exposure. *Journal of Environmental Monitoring* 1, 321 - 326.

Wallace, L. (1996). Indoor Particles: A Review. *Journal of the Air & Waste Management Association* 46, 98 - 126.

Wallace, L. (2000). Correlations of personal exposure to particles with outdoor air measurements: A review of recent studies. *Aerosol Science & Technology* 32, 15 - 25.

Wallace, L. (2006). Indoor Sources of Ultrafine and Accumulation Mode Particles: Size Distributions, Size-Resolved Concentrations, and Source Strengths. *Aerosol Science & Technology* 40, 348 – 360.

Wang, C.S. (1975). Gravitational deposition of particles from laminar flows in inclined channels. *Journal of Aerosol Science* 6, 191 - 204.

Wang, Y., Zhuang, G., Tang, A., Yuan, H., Sun, Y., Ghen, S., Zheng, A. (2005). The ion chemistry and the source of PM_{2.5} aerosol in Beijing. *Atmospheric Environment* 39, 3771 - 3784.

- Watson, J.G., Zhu, T., Chow, J.C., Engelbrecht, J.P., Fujita, E.M. and Wilson, W.E. (2002). Receptor modeling application framework for particle source apportionment. *Chemosphere* 49 (9), 1093 - 1136.
- Watson, J.G., Chen L.W.A., Chow, J.C., Doraiswamy, P., Lowenthal, D.H. (2008). Source apportionment: findings from the U.S. Supersites Program. *Journal of the Air & Waste Management Association* 58(2), 265 - 288.
- Weibel, E. (1963). *Morphometry of the human lung*. Academic Press, New York.
- Weisel, C.P., Zhang, J., Turpin, B.J., Morandi, M.T., Colome, S., Stock, T.H., Spektor, D.M., Korn, L., Winer, A., Alimokhtari, S., Kwon, J., Mohan, K., Harrington, R., Giovanetti, R., Cui, W., Afshar, M., Maberti, S., Shendell, D. (2005). Relationship of Indoor, Outdoor and Personal Air (RIOPA) study: study design, methods and quality assurance/control results. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 15, 123 - 137.
- Weschler, C.J. and Shields, H.C. (1997). Potential reactions among indoor pollutants. *Atmospheric Environment* 31, 3487 - 3495.
- Westphal, D.L., Toon, O.B., Carlson, T.N. (1987). A two-dimensional numerical investigation of the dynamics and microphysical of Saharan Dust Storms. *Journal of Geophysical Research* 92(D3), 3027 – 3049, doi:10.1029/JD092iD03p03027.
- WHO (2006). WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulphur dioxide. Global update 2005. World Health Organization, Switzerland, Geneva.
- Wichmann, H.E, Peters, A. (2000). Epidemiological evidence of ultrafine particle exposure. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A* 358(1775), 2751 - 2768.
- Wilson, W.E., Mage, D.T., Grant, L.D. (2000). Estimating separately personal exposure to ambient and nonambient particulate matter for epidemiology and risk assessment: why and how. *Journal of the Air & Waste Management Association* 50, 1167 - 1183.
- Winiwarter, W., Ekstrand, S., Johansson, D. (2000). IMPRESAREO – Improving the Spatial Resolution of Air Emission Inventories Using Earth Observation Data. WP4000 - Evaluation, Validation and Refinement of Spatially Resolved NO_x Inventories. Seibersdorf Research Report OEFZS-S-0080.
- Winiwarter, W., Vlachogiannis, D., Gounaris, N., Bartzis, J., Ekstrand, S., Tamponi, M., Maffei, G., Licotti, C., Dore, C. and Hayman, G. (2001). Final Method Evaluation: Development of Spatially Resolved Emission Inventories for Milan and Athens. WP8000 of the EC research project IMPRESARIO. Seibersdorf Research Report ARC-S-0154.

- Winiwarter, W., Kuhlbusch, T.A.J, Viana, M. and Hitzenberger, R. (2009). Quality considerations of European PM emission inventories. *Atmospheric Environment* 43(25), 3819 - 3828.
- Wu, J., Lurmann, F., Winer, A., Lu, R., Turco, R. and Funk, T. (2005). Development of an individual exposure model for application to the Southern California children's health study. *Atmospheric Environment* 39, 259 - 273.
- Yay, O.D., Poupkou, A., Symeonidis, P., Gkantou, A., Melas, D. and Döğeroğlu, T. (2005). Biogenic Emissions of Volatile Organic Compounds from Turkey. *Proceeding of the Third International Symposium on Air Quality Management at Urban, regional and Global Scales, Istanbul, Turkey.*
- Yeates, D.B., Gerrity, T.R. and Garrard, C.S. (1982). Characteristics of tracheobronchial deposition and clearance in man. *The Annals of Occupational Hygiene* 26(2), 245 - 257.
- Yeh, H.C. (1974). Use of heat transfer analogy for a mathematical model of respiratory tract deposition. *Bulletin of Mathematical Biology* 36, 105 - 116.
- Yeh, H.C., Schum, G.T.M. and Duggan, M.T. (1979). Anatomic models of the tracheobronchial and pulmonary regions of the rat. *Anatomical Record* 195, 483 - 492.
- Yeh, H.C., Schum, G.M. (1980). Models of human lung airways and their application to inhaled particle deposition. *Bulletin of Mathematical Biology* 42, 461 - 480.
- Yeung, L.L., To, W.M. (2008). Size Distributions of the Aerosols Emitted from Commercial Cooking Processes. *Indoor and Built Environment* 17(3), 220 - 229.
- Yu, C.P., Nicolaidis, P. and Soong, T.T. (1979). Effect of random airway sizes on aerosol deposition. *American Industrial Hygiene Association Journal* 40(11), 999 - 1005.
- Yu, C.P. (1981). A model of particle clearance in human tracheobronchial tree. *Proceedings of 34th ACEMB, Houston TX, US.*
- Yu, C.P., Diu, C.K. and Soong, T.T. (1981). Statistical analysis of aerosol deposition in nose and mouth. *American Industrial Hygiene Association Journal* 42(10), 726 - 733.
- Yu, C.P., Diu, C.K. (1982). A comparative study of aerosol deposition in different lung models. *American Industrial Hygiene Association Journal* 43(1), 54 - 65.
- Yu, C.P. (1985). Theories of electrostatic lung deposition of inhaled aerosols. *The Annals of Occupational Hygiene* 29(2), 219 - 227.
- Zhang, L., Asgharian, B. and Anjilvel, S. (1997). Inertial deposition of particles in the human upper airway bifurcations. *Journal of Aerosol Science & Technology* 26, 97 - 110.

Zhang, Q., Canagaratna, M.R., Jayne, J.T., Worsnop, D.R., Jimenez, J.L. (2005). Time- and size-resolved chemical composition of submicron particles in Pittsburgh-Implications for aerosol sources and processes. *Journal of Geophysical Research* 110 (D07S09), doi:10.1029/2004JD004649.

Zhang, Z., Kleinstreuer, C. and Kim, C.S. (2002). Cyclic micron-size particle inhalation and deposition in a triple bifurcation lung airway model. *Journal of Aerosol Science* 33, 257 - 281.

Zhu, Y., Hinds, W.C., Krudysz, M., Kuhn, T., Froines, J., Sioutas, C. (2004). Penetration of freeway ultrafine particles into indoor environments. *Journal of Aerosol Science* 36, 303 - 322.

Απόφαση 85/338/ΕΟΚ. Απόφαση του Συμβουλίου της 27ης Ιουνίου 1985 για την έγκριση προγράμματος εργασίας της Επιτροπής σχετικά με ένα πειραματικό σχέδιο για τη συλλογή, το συντονισμό και τη συναρμογή πληροφοριών που αφορούν την κατάσταση του περιβάλλοντος και των φυσικών πόρων στην Κοινότητα.

Γλυτσός, Θ. (2010). Χαρακτηρισμός της ποιότητας του αέρα σε εσωτερικούς χώρους με χρήση μικροπεριβαλλοντικών μοντέλων. Διδακτορική διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος.

ΕΛ.ΣΤΑΤ. (2001). Οικονομικώς ενεργός πληθυσμός κατά διψήφιο κλάδο οικονομικής δραστηριότητας και φύλο. Σύνολο Ελλάδος, αστικές και αγροτικές περιοχές γεωγραφικά διαμερίσματα κατά αστικές, αγροτικές περιοχές και νομοί. <http://www.statistics.gr>

ΕΛ.ΣΤΑΤ. (2002). Απογραφή πληθυσμού 2001. Πραγματικός πληθυσμός κατά φύλο και ομάδες ηλικιών. Σύνολο Ελλάδος, Γεωγραφικές ζώνες (NUTS I), περιφέρειες (NUTS II), νομοί, δήμοι/κοινότητες και δημοτικά/κοινοτικά διαμερίσματα. <http://www.statistics.gr>

ΕΛ.ΣΤΑΤ. (2002). Πραγματικός πληθυσμός. Νομοί, δήμοι, κοινότητες, δημοτικά και κοινοτικά διαμερίσματα και οικισμοί. Φ.Ε.Κ. 715 Β΄/12-6-2002. <http://www.statistics.gr>

ΕΛ.ΣΤΑΤ. Βάση δεδομένων της Ελληνικής στατιστικής αρχής. Έρευνα: Ζωικό Κεφάλαιο – Κατηγορία ζώου - Πληθυσμός κατά Γεωγραφική Θέση.

Κανονισμός (ΕΚ) αριθ. 166/2006 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 18ης Ιανουαρίου 2006 για τη σύσταση ευρωπαϊκού μητρώου έκλυσης και μεταφοράς ρύπων και για την τροποποίηση των οδηγιών 91/689/ΕΟΚ και 96/61/ΕΚ του Συμβουλίου. Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης ΕΕ L 33.

Καραθανάσης, Στ. (2007). Ατμοσφαιρική Ρύπανση, Φωτοχημικά μοντέλα ποιότητας του αέρα, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα.

Οδηγία 2008/1/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 15ης Ιανουαρίου 2008, σχετικά με την ολοκληρωμένη πρόληψη και έλεγχο της ρύπανσης. Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης ΕΕ L 24.

Οδηγία 2008/50/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 21ης Μαΐου 2008 για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη. Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης ΕΕ L 152.

Παπαδάκη, Ε. και Βελεγράκη, Μ. (2007). Η Ανοσολογία του Αναπνευστικού Συστήματος. Πνεύμων 20(4), 372 - 383.

Σωφρονιάδης, Σ., Λαζαρίδης, Μ. (2007). Μέτρηση τροποσφαιρικού όζοντος και αιωρούμενων σωματιδίων στην περιοχή Ακρωτηρίου των Χανίων. Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος. Βιβλιοθήκη του Πολυτεχνείου Κρήτης, ΔΙΠ 1852. <http://www.library.tuc.gr/artemis/DT2008-0119/DT2008-0119.pdf>

ΥΠΕΧΩΔΕ (2007). Η ατμοσφαιρική ρύπανση στην Αθήνα. Έκθεση 2006. Τμήμα Ποιότητας Ατμόσφαιρας, Δ/ση Ελέγχου Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης και Θορύβου (ΕΑΡΘ) του ΥΠΕΧΩΔΕ. <http://www.ypeka.gr>

Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων - Ministry of Rural Development and Food, The current situation of Greek Forestry. www.minagric.gr

ΦΙΛΟΤΗΣ - FILOTIS: Database for the natural environment of Greece. <http://www.itia.ntua.gr/filotis>

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΕΣ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

A. ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

a. ΣΕ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ

M. Lazaridis, V. Aleksandropoulou, J. Smolík, J.E. Hansen, T. Glytsos, N. Kalogerakis and E. Dahlin. Physico-chemical characterisation of indoor/outdoor particulate matter in two residential houses in Oslo, Norway: Measurements overview and physical properties – URBAN-AEROSOL Project. *Indoor Air* 16, 282-295 (2006).

M. Lazaridis, V. Aleksandropoulou, J.E. Hanssen, C. Dye, K. Eleftheriadis and E. Katsivela. Inorganic and carbonaceous components in indoor/outdoor particulate matter in two residential houses in Oslo, Norway. *Journal of the Air & Waste Management Association* 58 (3), 346-356 (2008).

V. Aleksandropoulou, C. Mitsakou, C. Housiadas, and M. Lazaridis. Particulate Matter Exposure and Dose Relationships Derived from Realistic Exposure Scenarios. *Indoor and Built Environment* 17, 237-246 (2008).

M. Lazaridis and V. Aleksandropoulou. Sources and variability of indoor and outdoor gaseous aerosol precursors (O₃, NO_x and VOCs). *Water Air & Soil Pollution Focus* 9 (1-2), 3-13 (2009).

V. Aleksandropoulou and M. Lazaridis. Development and application of a model (ExDoM) for calculating the respiratory tract dose and retention of particles under variable exposure conditions. *Air Quality, Atmosphere & Health* (υπό κρίση)

V. Aleksandropoulou, K. Tørseth and M. Lazaridis. Atmospheric emission inventory for natural and anthropogenic sources and spatial emission mapping for the Greater Athens Area (GAA). *Water Air & Soil Pollution* (υπό κρίση)

V. Aleksandropoulou, T. Glytsos and M. Lazaridis. Contribution from indoor sources and outdoor air infiltration to particle number concentration and lung dose indoors (υπό προετοιμασία)

b. ΣΕ ΒΙΒΛΙΑ/ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΩΝ ΜΕ ΚΡΙΣΗ

V. Aleksandropoulou, C. Mitsakou, C. Housiadas and M. Lazaridis. Dose assessment based on realistic exposure scenarios in Oslo. *Journal of Aerosol Science* S2, 1213-1214 (2004). European Aerosol Conference 2004, Budapest, Hungary 6-10 September 2004.

J. Smolík, V. Ždímal, J. Schwarz, M. Lazaridis, P. Dohányosová, V. Aleksandropoulou and T. Glytsos. Indoor/Outdoor aerosol measurements at different activities indoors. Proceedings of the 5th International Conference on Urban Air Quality, Valencia, Spain 29-31 March 2005.

M. Lazaridis, V. Aleksandropoulou, E. Dahlin, J. Smolík, V. Ždímal, E. Katsivela, T. Glytsos, and J.E. Hansen. Characterization of Indoor/Outdoor particulate matter physico-chemical characteristics in two residential houses in Oslo, Norway: An Overview. Proceedings of the 5th International Conference on Urban Air Quality, Valencia, Spain 29-31 March 2005.

M. Lazaridis, V. Aleksandropoulou, J. Smolík, T. Glytsos, E. Katsivela and E. Dahlin. Indoor/outdoor particulate matter physicochemical characteristics in two residential houses. Proceedings of the European Aerosol Conference 2005, Ghent, Belgium August 28–2 September 2005.

T. Glytsos, V. Aleksandropoulou, J. Smolik and M. Lazaridis. Estimating the strength of indoor sources using a comprehensive microenvironmental model. Proceedings of the European Aerosol Conference 2005, Ghent, Belgium 28 August –2 September 2005.

M. Lazaridis and V. Aleksandropoulou. Indoor/Outdoor Particulate matter chemical characteristics and source-to-inhaled dose relationships – URBAN AEROSOL Project: Overview of results for Oslo, Norway. Proceedings of the 6th International Conference on Urban Air Quality, Limassol, Cyprus 27-29 March 2007.

M. Lazaridis, V. Aleksandropoulou, J.E. Hanssen, C. Dye, K. Eleftheriadis and E. Katsivela. Sources and variability of major chemical species in the indoor and outdoor aerosol in two houses in Oslo, Norway. Proceedings of the 1st International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics (CEMEPE), Skiathos island, Greece 24-28 June 2007.

V. Aleksandropoulou and M. Lazaridis. Development of a decision support tool for estimation of human exposure to particles (STEDOM) – A presentation of the stand alone exposure and dosimetry modules. European Aerosol Conference 2007, Salzburg, Austria 9-14 September 2007.

V. Aleksandropoulou and M. Lazaridis. Estimation of human exposure and dose using an environment & health decision support tool (STEDOM). Proceedings of the International

Conference Protection and Restoration of the Environment IX, Kefalonia, Greece 29 June – 3 July 2008.

V. Aleksandropoulou, T. Glytsos and M. Lazaridis. Exposure to indoor and outdoor particulate matter and source-to-inhaled dose relationships. Proceedings of the European Aerosol Conference 2008, Thessaloniki, Greece 24-29 August 2008.

V. Aleksandropoulou and M. Lazaridis. Atmospheric emission inventory from natural and anthropogenic sources and spatial emission mapping for the greater Athens area (GAA). CEST2009: B-17-24, September 2009.

B. ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΕΜΜΕΣΑ ΣΧΕΤΙΖΟΜΕΝΕΣ ΜΕ ΤΗ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΚΑΙ ΑΛΛΕΣ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

a. ΣΕ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ

V. Aleksandropoulou and M. Lazaridis (2004). Spatial distribution of gaseous and particulate matter emissions in Greece, *Water, Air & Soil Pollution* 153, 15-34.

M. Lazaridis, A. Spyridaki, S. Solberg, J. Smolík, V. Zdímal, K. Eleftheriadis, V. Aleksandropoulou, Ø. Hov and P.G. Georgopoulos (2005). Mesoscale modeling of combined aerosol and photo-oxidant processes in the Eastern Mediterranean. *Atmospheric Chemistry and Physics* 5, 927-940.

A. Spyridaki, M. Lazaridis, K. Eleftheriadis, J. Smolík, N. Mihalopoulos and V. Aleksandropoulou (2006). Modelling and evaluation of size-resolved aerosol characteristics in the Eastern Mediterranean during the SUB-AERO project. *Atmospheric Environment* 40, 6261-6275.

M. Lazaridis, L. Dzumbova, I. Kopanakis, J. Ondracek, T. Glytsos, V. Aleksandropoulou, A. Voulgarakis, E. Katsivela, N. Mihalopoulos and K. Eleftheriadis (2008). PM10 and PM2.5 levels in the Eastern Mediterranean (Akrotiri Research station, Crete, Greece). *Water Air & Soil Pollution* 189, 85-101.

M. Lazaridis, M. Latos, V. Aleksandropoulou, Ø. Hov, A. Papayannis, and K. Tørseth (2008). Contribution of Forest Fire Emissions to Atmospheric Pollution in Greece. *Air Quality, Atmosphere and Health* 1 (3), 143-158.

b. ΣΕ ΒΙΒΛΙΑ/ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΩΝ ΜΕ ΚΡΙΣΗ

V. Aleksandropoulou and M. Lazaridis. Chemical characterization of ambient particles in Oslo metropolitan area and received human dose. Proceedings of the International Conference Protection and Restoration of the Environment VII, Mykonos, Greece June 28–July 1 2004.

A. Stavridou, V. Aleksandropoulou, M. Lazaridis. A study of indoor air quality using the simulation model MIAQ. Proceedings of the International Conference Protection and Restoration of the Environment VII, Mykonos, Greece June 28–July 1 2004.

M. Lazaridis, V. Aleksandropoulou, K.E. Yttri and K. Tørseth. Measurements of Particulate Matter Inside the EMEP framework during 2004. Proceedings of the NOSA 2006 Aerosol symposium, combined with the X Finnish National Aerosol Symposium, Finnish-Czech Aerosol Symposium, and BACCI workshop, Helsinki, Finland 8-10 November 2006. Report series in Aerosol Science 83, 205-206.

A. Spyridaki, V. Aleksandropoulou, M. Latos, F. Flatoy and M. Lazaridis. Contribution of natural emissions to ambient aerosol concentration levels in the eastern Mediterranean. Proceedings of the European Aerosol Conference 2007, Salzburg, Austria 9-14 September 2007.

D.E. Karava, V. Alexandropoulou, M. Lazaridis and E. Katsivela. Influence of the vehicular traffic on the air pollution levels in the city of Chania, Greece. Proceedings of the International Conference Protection and Restoration of the Environment IX, Kefalonia, Greece 29 June – 3 July 2008.

K. Eleftheriadis, S. Vratolis, A. Karanasiou, S. Andronopoulos, A. Sfetsos, N. Gounaris, T. Maggos, C. Vasilakos, P. Neofytou, C. Housiadas, A. Papayannis, G. Tsaknakis, G. Georgoussis, G. Avdikos, K. Chontidiadis, Y. Roukoutakis, G. Vernardos, M. Sofianopoulos, V. Alexandropoulou, M. Lazaridis, E. Kostenidou and S.N. Pandis. Development of an operational mapping system for the fine aerosol mass concentration and the estimated population exposure in Attica, Greece. Proceedings of the European Aerosol Conference 2008, Thessaloniki, Greece 24-29 August 2008.

c. ΣΕ ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΑΙ ΒΙΒΛΙΑ

Transboundary particulate matter in Europe: Status 2006. EMEP Status Report 4/06, Joint CCC & MSC-W, 2006. Editors: Karl Espen Yttri and Wenche Aas.

Measurements of particulate matter, 2004. EMEP/CCC-Report 3/2006. Editors: Karl Espen Yttri and Wenche Aas.

Preventive Conservation Strategies for Protection of Organic Objects in Museums, Historic Buildings and Archives, Final Report, 2006. Editor: Elin Dahlin.

Συμμετοχή στη συγγραφή των κεφαλαίων:

- Αέριοι ρύποι εσωτερικών χώρων: Ραδόνιο (χαρακτηριστικά, έκθεση και δόση),
- Έκθεση των ανθρώπων σε αέριους ρύπους εσωτερικών χώρων,
- Επιπτώσεις ρυπαντών εσωτερικών χώρων στην υγεία, και
- Ποιότητα αέρα σε ειδικά περιβάλλοντα εσωτερικών χώρων.

που περιλαμβάνονται στο βιβλίο: Μ. Λαζαρίδης (2008). Ποιότητα αέρα σε εσωτερικούς χώρους. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ

ΑΝΑΠΝΕΥΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Πίνακας Α.1 Κλάσμα εναπόθεσης σωματιδίων λόγω πρόσκρουσης.

	Γεωμετρία	Ροή αέρα	Ποσοστό εναπόθεσης
Landahl (1950)	αγωγός με γωνία 90°		[1]
Yeh (1974)	ομαλή κύρτωση	στρωτή στρωματική	[2]
Cheng και Wang (1975)	ομαλή κύρτωση	ιδεατή στρωματική αξονική ταχύτητα γραμμικά με την καμπύλη του αγωγού στις άκρες	[3α] [3β]
Martonen (1982)	ομαλή κύρτωση	στρωτή στρωματική ομογενής ανατάραξη	[4] [5]
Egan και Nixon (1985)	ομαλά τοιχώματα, ευθείς αγωγοί		[6]
Cai και Yu (1988)	απλή συμμετρική διακλάδωση	ομοιόμορφη ή Poiseuille	[7] περιλαμβάνεται και η αναχαίτιση
Zhang κ.α. (1997)		διφασική Poiseuille	[8] [8] με όριο το 0,7 για την επιλογή των δύο εξισώσεων

$$St = \tau_p / \tau_a, \quad \tau_p = \frac{mC_c}{\mu K}, \quad \beta = St \frac{l}{d} \theta_b$$

$$[1] P = \frac{150St}{\frac{d}{36\mu l} + 150St}$$

$$[2] P = \begin{cases} \frac{2}{\pi} (\arcsin \beta + \beta \sin(\arccos \beta)) & \beta < 1 \\ 1 & \beta \geq 1 \end{cases}$$

[3α]

$$P = 1 - \frac{\Delta}{\pi} \left[\left(\frac{\exp(2f_0) \sin^2 \theta_b}{f_1^2} - 1 \right) \left((\Delta^{-2} + 1)f_2 - \frac{f_2^3}{3} \right) + \Delta^{-1} \left(\frac{\exp(2f_0) \sin^2 \theta_b}{f_1^2} + 1 \right) \left(f_2 \sqrt{1 - f_2^2} + \arcsin f_2 \right) \right]$$

$$\tan \theta_b = \frac{f_1}{f_3}, \quad f_1 = \sin(Bf_0) \left[\sinh(Af_0) + \frac{A^3}{A^2 + B^2} \sinh(Af_0) \right] + \frac{B^3}{A^2 + B^2} \cos(Bf_0) \sinh(Af_0),$$

$$f_2 = \sqrt{1 - \frac{\Delta^{-2} (f_1 - \exp(f_0) \sin \theta_b)^2}{(f_1 + \exp(f_0) \sin \theta_b)^2}},$$

$$f_3 = \cos(Bf_0) \left[\cosh(Af_0) + \frac{A^3}{A^2 + B^2} \sinh(Af_0) \right] + \frac{B^3}{A^2 + B^2} \sin(Bf_0) \cosh(Af_0), \quad A = \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1 + r^2}}{2}},$$

$$B = \frac{\Gamma}{2A}, \quad \Gamma = 8St \Delta \frac{l}{d}$$

$$[3\beta] P = 2\beta \left(\frac{2}{\pi} + \Delta + \frac{4\Delta^2}{3\pi} \right)$$

$$[4] P = \frac{2}{\pi} \left(\beta \sqrt{1 - \beta^2} + \arcsin \beta \right)$$

$$[5] P = 1 - \exp\left(-\frac{4\beta}{\pi}\right)$$

$$[6] P = \begin{cases} 4St^2 & \text{εισπνοή} \\ 1 - \exp\left(-1,884 \times 10^{-5} \frac{\bar{u}^2 \tau_p l}{\nu Re^{0,375} d}\right) & \text{εκπνοή} \end{cases}$$

$$[7] P = \begin{cases} \frac{4 \sin \theta_b}{\pi} \frac{d_d}{d_p} \left(St \frac{l}{d}\right) p & \text{plug flow} \\ \frac{8 \sin(\theta_b f_1)}{d_d} \frac{f_0}{d_p} \left(St \frac{l}{d}\right) & \text{Poiseuille flow} \end{cases}$$

$$f_0 = \pi - \left[\frac{\pi}{4} + \left(\frac{5\pi}{4} - \frac{8}{3} \right) \cos^2 \theta_b \right] \left(\frac{d_d}{d_p} \right)^2$$

$$f_1 = 1 - \frac{1 + \sin \theta_b - (3\pi - 11) \cos^2 \theta_b}{3} \left(\frac{d_d}{d_p} \right)^2 +$$

$$\left[\left(\frac{2}{3} - \frac{\pi}{8} \right) \cos^2 \theta_b + \frac{\sin^2 \theta_b}{5} + \left(6 - \frac{15\pi}{8} \right) \cos^4 \theta_b + \left(\frac{7}{15} - \frac{\pi}{8} \right) \sin^2 \theta_b \cos^2 \theta_b \right] \left(\frac{d_d}{d_p} \right)^4$$

$$[8] P = \begin{cases} 0,000425 \exp \left[22,7 \left(\frac{StC_c}{5} \right)^{0,832} \right] Re^{1/3} \sin \theta_b & \frac{StC_c}{2} < 0,04 \\ \left(0,19 - 1,94 \exp \left[-3,28 \left(\frac{StC_c}{5} \right)^{1,585} \right] \right) Re^{1/3} \sin \theta_b & \frac{StC_c}{2} > 0,04 \end{cases}$$

Πίνακας Α.2 Κλάσμα εναπόθεσης σωματιδίων λόγω καθίζησης.

	Γεωμετρία	Ροή αέρα	Ποσοστό εναπόθεσης
Landahl (1950)		στροβιλώδης	[1]
Fuchs (1964) και Pich (1972)		Poiseuille	[2]
Fuchs (1964) και Beeckmans (1965)		ομογενής ανατάραξη	[3]
Wang (1975)	κεκλιμένος αγωγός	Poiseuille	[4α] $0 \leq \theta_g \leq \theta_{cr1}$ [4β] $\theta_{cr1} \leq \theta_g \leq \theta_{cr2}$ P=0 $\theta_{cr2} < \theta_g \leq \pi/2$ [4γ] $\theta_g < 0, \alpha_4 < 1$
Heyder (1975) Martonen (1982)	κεκλιμένος αγωγός	στρωτή στρωματική	[5]

$$\beta = \frac{u_s \cos \theta_g}{\bar{u} - u_s \sin \theta_g} \frac{l}{d}$$

$$[1] P = 1 - \exp(-1,6\beta)$$

$$[2] P = \frac{2}{\pi} \left((2f_0 - f_0^{1/3}) \sqrt{1 - f_0^{2/3}} + \arcsin f_0^{1/3} \right) \text{ με } f_0 = \frac{3}{4} \beta$$

$$[3] P = 1 - \exp\left(-\frac{4}{\pi} \beta\right)$$

[4α]

$$P = \frac{1}{\pi} \left[3\sqrt{\alpha_1(1-\alpha_1)} + \arcsin \sqrt{1-\alpha_1} + (1-9\alpha_1^2) \arcsin \sqrt{\frac{1-\alpha_1}{1+3\alpha_1}} - 2\sqrt{\alpha_2(1-\alpha_2)}(1-2\alpha_2) - 2 \arcsin \sqrt{1-\alpha_2} \right]$$

$$\alpha_1 = \frac{\sin \theta_g}{3 \left(2 \frac{\bar{u}}{u_s} - \sin \theta_g \right)}, \quad \alpha_2 = \frac{\left(\frac{3}{\sqrt{2}} \frac{u_s}{\bar{u}} \frac{l}{d} \cos \theta_g \right)^{2/3}}{2 - \frac{\bar{u}}{u_s} \sin \theta_g}, \quad 0 = \sin^3 \theta_{cr1} - \frac{243}{2} \frac{\bar{u}}{u_s} \left(\frac{l}{d} \right)^2 (1 - \sin^2 \theta_{cr1})$$

[4β]

$$P \approx \frac{1}{\pi} \left[(1+3\alpha_1) \sqrt{1-\alpha_3^2} \left(\alpha_3 + \frac{4\alpha_2^{3/2}}{\sqrt{1+3\alpha_1}} - \sqrt{\alpha_3^2 - \frac{3\alpha_1}{1+3\alpha_1}} \right) + (1-9\alpha_1^2) \arcsin \sqrt{1-\alpha_3^2} - \arcsin \sqrt{(1+3\alpha_1)(1-\alpha_3^2)} \right]$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{16} \left[\frac{u_s}{\bar{u}} \frac{d}{l} \frac{\sin^2 \theta_g}{\cos \theta_g} - \sqrt{\frac{1}{6} \frac{u_s}{\bar{u}} \sin \theta_g} + 28 \frac{l}{d} \cot \theta_g \right]$$

$$0 = \cos^2 \theta_{cr2} - \frac{4}{3} \frac{\bar{u}}{u_s} \frac{d}{l} \cos \theta_{cr2} - \frac{1}{12} \left(\frac{d}{l} \right)^2 \sin^2 \theta_{cr2} - \frac{1}{2} \frac{d}{l} \sin 2\theta_{cr2} + \frac{1}{18} \frac{u_s}{\bar{u}} \left(\frac{d}{l} \right)^2 \sin^3 \theta_{cr2}$$

$$[4\gamma] P = 1 - \frac{1}{\pi} \left[2 - \arcsin \sqrt{1-\alpha_4^2} - \frac{\sqrt{1-\alpha_4^2}}{1 - \frac{u_s}{\bar{u}} \sin \theta_g} \left[3 \frac{u_s}{\bar{u}} \frac{l}{d} \cos \theta_g - \left(2 - \frac{u_s}{\bar{u}} \sin \theta_g \right) \alpha_4 \right] \right], \text{ με } \alpha_4 = \frac{3}{4} \beta$$

$$[5] P = \frac{2}{\pi} \left(\beta \sqrt{1-\beta^2} + \arcsin \beta \right)$$

Πίνακας Α.3 Κλάσμα εναπόθεσης σωματιδίων λόγω διάχυσης.

	Γεωμετρία	Ροή αέρα	Ποσοστό εναπόθεσης
Gormley και Kennedy (1949)	ομαλός ευθύς αγωγός	Poiseuille	[1α] $Pe \gg 1, Ped/l \ll 1$ [1β] $Pe \gg 1, Ped/l \gg 1$
Fuchs (1964)	ευθύς αγωγός	στροβιλώδης	[2]
Yeh (1974)	ευθύς αγωγός	στρωματική στο σημείο εισόδου στροβιλώδης αναπτυσσόμενη στροβιλώδης αναπτυσσόμενη	[3α] $100 < Ped/l < 5000$ [3β] $2300 < Re$ [3γ] $10 < d/l < 400$
Ingham (1975)	ομαλός ευθύς αγωγός	στρωτή στρωματική στρωτή στρωματική Poiseuille	[4α] $Pe \gg 1$ [4β] $Pe \gg 1, Ped/l \gg 4$ [4γ] $Pe \gg 1$
Ingham (1991)	κυκλικός αγωγός	στρωματική αναπτυσσόμενη	[5] $Pe \gg 1, l/dRe \ll 1$
Martonen κ.α (1996)	κυκλικός αγωγός	στρωματική αναπτυσσόμενη	[6] $Sc \gg 1, Re \gg 1$

$$Sc = \frac{\nu}{D}, Pe = \frac{\bar{u}d}{D}, \Lambda = \frac{l}{dPe}$$

$$[1\alpha] P = 1 - (0,819 \exp(-14,63\Lambda) + 0,0976 \exp(-89,22\Lambda) + 0,0325 \exp(-228\Lambda))$$

$$[1\beta] P = 6,41\Lambda^{2/3} - 4,8\Lambda - 1,123\Lambda^{4/3}$$

$$[2] P = 1 - \exp\left(-0,035 Re^{-1/8} Sc^{-3/4} \left(\frac{l}{d}\right)^2\right),$$

$$[3\alpha] P = 1 - \exp\left(-6,464 Pe^{-2/3} \left(\frac{l}{d}\right)^{2/3}\right),$$

$$[3\beta] P = 1 - \exp\left(-0,464 \frac{Re^{2/3} - 125}{Re} Sc^{-2/3} \frac{l}{d} \left(1 + \left(\frac{d}{l}\right)^{2/3}\right)\right),$$

$$[3\gamma] P = 1 - \exp\left(-0,144 Re^{-0,2} Sc^{-2/3} \left(\frac{l}{d}\right)^{0,946}\right),$$

[4α]

$$P = 1 - (0,692 \exp(-23,132\Lambda) + 0,131 \exp(-121,89\Lambda) + 0,0534 \exp(-299,55\Lambda) + 0,124 \exp(-36,505\Lambda^{1/2}))$$

$$[4\beta] P = 4 \left(2 \sqrt{\frac{\Lambda}{\pi}} - \Lambda\right)$$

[4γ]

$$P = 1 - (0,819 \exp(-14,63\Lambda) + 0,0976 \exp(-89,22\Lambda) + 0,0325 \exp(-228\Lambda) + 0,0509 \exp(-125,9\Lambda^{2/3}))$$

$$[5] P = 4,458\Lambda^{5/9} Sc^{-1/9}$$

$$[6] P = 3,46\Lambda^{1/2} Sc^{-1/6}$$

Πίνακας Α.4 Κλάσμα εναπόθεσης σωματιδίων λόγω καθίζησης και διάχυσης στις κυψελίδες.

	Γεωμετρία	Ροή αέρα	Ποσοστό εναπόθεσης
Taulbee και Yu (1975)	κομμένη σφαίρα		[1α] Διάχυση [1β] Καθίζηση
Koblinger και Hofmann (1990)	σφαίρα	πλήρης ανάμειξη αέρα μέσα στις κυψελίδες καμία ανάμειξη αέρα μέσα στις κυψελίδες (αρχικά τα σωματίδια έχουν διάμετρο $d^* < d_a$)	[2α] Καθίζηση [2β] Διάχυση [2γ] Καθίζηση [2δ] Διάχυση

$$[1\alpha] P = \sqrt{\frac{16D}{\pi d_a \bar{u}}}$$

$$[1\beta] P = \frac{4u_s}{\bar{u}}$$

$$[2\alpha] P = \begin{cases} \frac{u_s t}{2d_a} \left(3 - \left(\frac{u_s t}{d_a} \right)^2 \right) & \frac{u_s t}{d_a} < 1 \\ 1 & \frac{u_s t}{d_a} \geq 1 \end{cases}$$

$$[2\beta] P = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} \exp\left(-\frac{4Dk^2\pi^2 t}{d_a^2}\right)$$

$$[2\gamma] P = \begin{cases} 0 & \frac{2}{A} \leq 1 - B \\ \frac{1 - B^{-3}}{2} + \frac{24A^2(1 + B^2) + 3A^4(1 - B^2)^2 - 208}{32(AB)^3} & 1 - B < \frac{2}{A} < 1 + B \\ 1 & \frac{2}{A} \geq 1 + B \end{cases} \quad \text{όπου} \quad \begin{cases} A = \frac{d_a}{u_s t} \\ B = \frac{d^*}{d_a} \end{cases}$$

$$[2\delta] P = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1}}{k^2} \left[\frac{1}{k\pi^2} \sin \frac{k\pi d^*}{d_a} - \frac{d^*}{\pi d_a} \cos \frac{k\pi d^*}{d_a} \right] \exp\left(-\frac{4Dk^2\pi^2 t}{d_a^2}\right)$$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΕΦΑΡΜΟΓΗ 1 - ΕΚΠΟΜΠΕΣ

Πίνακας Β.1 Ετήσιες ανθρωπογενείς εκπομπές (Mg) σε περιοχή που περιλαμβάνει την ΕΠΑ και αποτελείται από τα κελιά του πλέγματος ΕΜΕΡ (103,44), (103,45), (104,44), (104,45), (104,46), (105,44) και (105,45).

Πηγή	CO	SOx	NOx	ΠΟΕ	NH3	ΑΣ _{2,5}	ΑΣ _{2,5-10}
Καύση σε βιομηχανίες παραγωγής ενέργειας	1453,43	25319,99	4445,01	198,15	0	355,37	199,57
Μη βιομηχανικές εγκαταστάσεις καύσης	34104,57	6671,78	13169,89	3773,09	0	6022,68	185,15
Καύση σε βιομηχανίες	1996,62	11194,19	4442,62	770,34	0	769,2	2655,5
Διεργασίες παραγωγής	706,26	474,48	40,99	1119,6	0	60,77	102,53
Εξόρυξη και διακίνηση ορυκτών καυσίμων και γεωθερμικής ενέργειας	63,84	2150,04	118,97	9705,62	0	83,83	539,79
Χρήση διαλυτών και άλλων προϊόντων	0	0	0	16141,61	0	0	0
Οδικές μεταφορές	142865,56	590,29	30920,42	15577,99	735,72	1142,97	448,33
Άλλες κινητές πηγές και μηχανήματα	2468,86	7834,05	12803,77	558,32	0	1879,07	111,82
Επεξεργασία και διάθεση απορριμμάτων	0	0	0	0	0	178,51	18,53
Γεωργία	379,67	0	17,06	0	883,55	64,5	34,37
Σύνολο ανθρωπογενών εκπομπών	184038,81	54234,82	65958,73	47844,72	1619,27	10556,9	4295,59
Εκπομπές από τα πλοία	1550,08	10555,45	13792,01	558,52	0	1125,96	62,53

Πίνακας Β.2 Κατηγορίες εδαφοκάλυψης Corine Land Cover 2000 στην Ελλάδα.

Κατηγορία 1	Κατηγορία 2	Κατηγορία 3	CLC κωδικός
Δομημένες εκτάσεις	Αστική δόμηση	Συνεχής αστική δόμηση	111
		Ασυνεχής αστική δόμηση	112
	Βιομηχανικές, εμπορικές περιοχές και εκτάσεις σχετιζόμενες με μεταφορές	Εμπορικές ή βιομηχανικές μονάδες	121
		Οδικό και σιδηροδρομικό δίκτυο και σχετιζόμενες εκτάσεις	122
		Λιμάνι	123
		Αεροδρόμιο	124
	Ορυχεία, χώροι απόρριψης και εργοτάξια	Ορυχεία	131
		Χώροι απόρριψης	132
	Δομημένες, μη-αγροτικές περιοχές με βλάστηση	Εργοτάξια οικοδομής	133
		Αστικές πράσινες εκτάσεις	141
Αθλητικές εγκαταστάσεις και χώροι αναψυχής		142	
Μη-αρδευόμενη αρόσιμη γη		211	
Αγροτικές εκτάσεις	Αρόσιμη γη	Μόνιμα αρδευόμενη γη	212
		Ορυζώνες	213
		Αμπελώνες	221
	Μόνιμοι καρποί	Όπωροφόρα δέντρα και εκτάσεις με άλλους καρπούς	222
		Ελαιώνες	223
	Βοσκότοποι	Βοσκότοποι	231
	Ετερογενείς αγροτικές εκτάσεις	Ετήσια φυτά σχετιζόμενα με μόνιμους καρπούς	241
		Σύνθετες καλλιέργειες	242
		Γη που καλύπτεται κυρίως από γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	243
		Δάσος πλατύφυλλων	311
Δάση και άλλες φυσικές περιοχές	Δάση	Δάσος κωνοφόρων	312
		Μικτό δάσος	313
		Φυσικό λιβάδι	321
	Εκτάσεις με θαμνώδη, και/ή ποώδη βλάστηση	Τυρφώδης έκταση ή/και χερσότοπος	322
		Σκληρόφυλλη βλάστηση	323
		Μεταβατικές δασώδεις - θαμνώδεις εκτάσεις	324
		Ακτές, αμμόλοφοι, αμμοθίνες	331
	Ανοικτές εκτάσεις με λίγη ή καθόλου βλάστηση	Γυμνοί βράχοι	332
		Εκτάσεις με αραχή βλάστηση	333
		Καμένες εκτάσεις	334
Υγρότοποι	Εσωτερικοί υγρότοποι	Έλη ενδοχώρας	411
	Παράκτιοι υγρότοποι	Αλυρό έλος	421
		Αλυκή	422
Υδάτινα σώματα	Νερά ενδοχώρας	Ρέοντα ύδατα	511
		Υδάτινα σώματα	512
		Παράκτια λιμνοθάλασσα	521
	Θαλάσσια νερά	Εκβολές ποταμών	522
		Θάλασσα	523

Πίνακας Β.3 Συντελεστές βαρύτητας για την χωρική ανάλυση των εκπομπών.

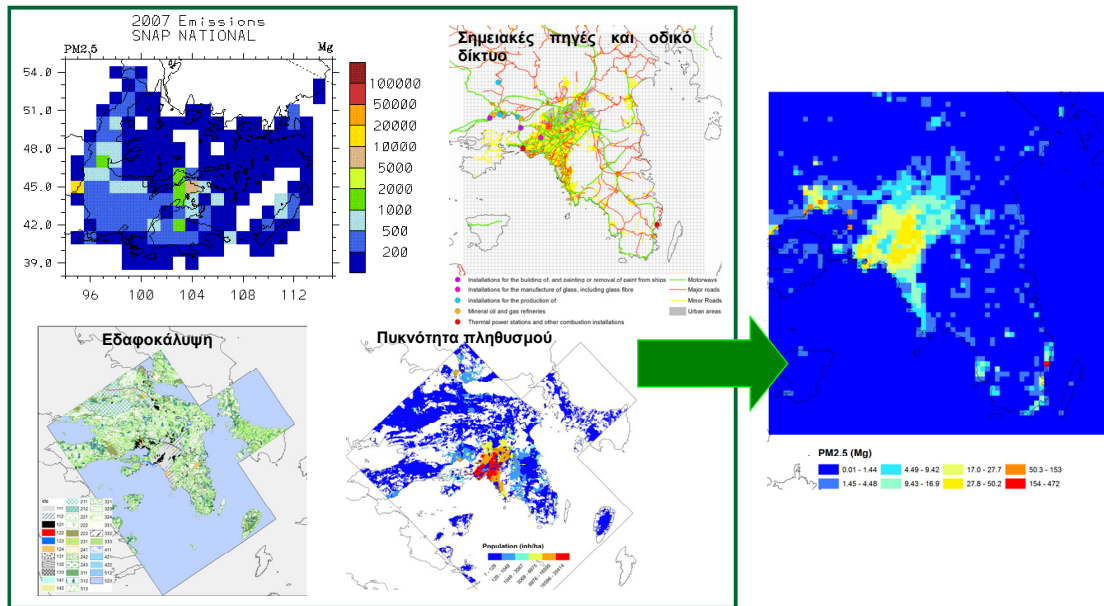
Κατηγορία εδαφικάλυψης	Μη βιομηχανικές εγκαταστάσεις καύσης	Καύση σε βιομηχανίες, στην εξόρυξη και διακίνηση ορυκτών καυσίμων	Οδικές μεταφορές	Άλλες κινητές πηγές και μηχανήματα
Έκταση με συνεχή αστική δόμηση	1	0,2	1	2,2
Έκταση με ασυνεχή αστική δόμηση	0,5	0,01	0,3	0,81
Βιομηχανική περιοχή	0,02	1	0,2	1,22
Λιμάνι	0	0,05	0	0,05
Αεροδρόμιο	0	0,05	0	1,05
Αγροτική έκταση	0,03	0	0,03	0,06
Φυσική περιοχή	0,01	0	0,01	0,02

Πίνακας Β.4 Συντελεστές εκπομπής (Σ.Ε.) και τιμές πυκνότητας βιομάζας (Β.) ανά κατηγορία εδαφοκάλυψης, που χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό των εκπομπών ισοπρενίου (ΙΣΟΠ.), τερπενίων (ΤΕΡΠ.) και άλλων βιογενών ΠΟΕ (ΑΒΠΟΕ) στην ΕΠΑ, για τη θερινή (Θ) και χειμερινή (Χ) περίοδο. Για τις υπόλοιπες κατηγορίες εδαφοκάλυψης οι τιμές θεωρούνται μηδενικές.

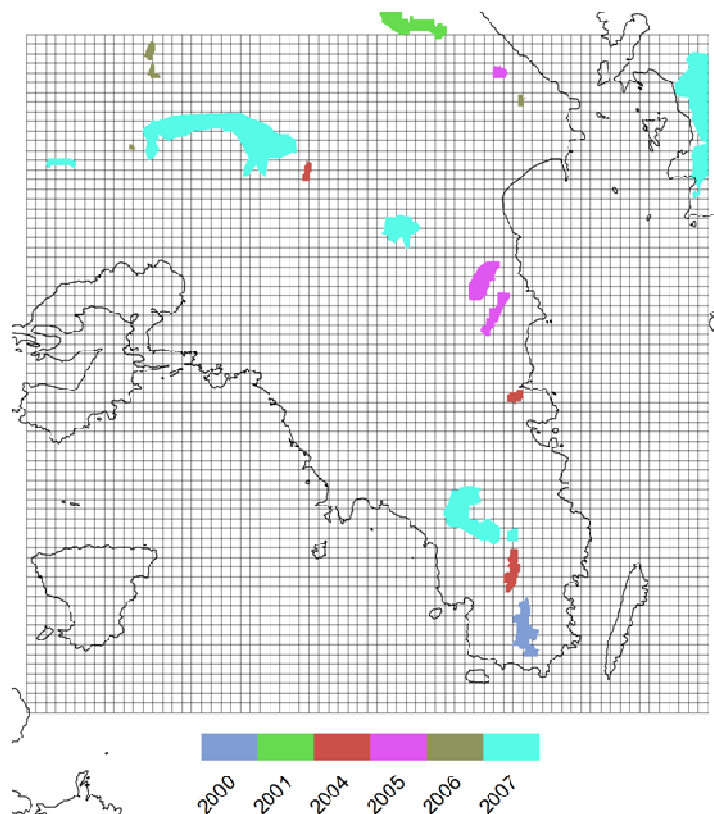
Κατηγορία 1	Κατηγορία 2	Κατηγορία 3	Β. ΙΣΟΠ.		Σ.Ε. ΙΣΟΠ.		Β. ΤΕΡΠ.		Σ.Ε.-ΤΕΡΠ.		Β.-ΑΒΠΟΕ		Σ.Ε.-ΑΒΠΟΕ		
			Θ	Χ	Θ	Χ	Θ	Χ	Θ	Χ	Θ	Χ	Θ	Χ	
Δομημένες εκτάσεις	Δομημένες, μη-αγροτικές περιοχές με βλάστηση	Αστικές πράσινες εκτάσεις	0	0	0	0	400	200	0,1	0,1	400	200	1,5	1,5	
		Αθλητικές εγκαταστάσεις και χώροι αναψυχής													
Αγροτικές εκτάσεις	Αρόσιμη γη	Μη-αρδευόμενη αρόσιμη γη	818	409	1,541	1,54	818	409	0,225	0,225	818	409	1,5	1,5	
		Μόνιμα αρδευόμενη γη	668	334	0,09	0,09	868	434	0,123	0,123	868	434	1,5	1,5	
	Μόνιμοι καρποί	Αμπελώνες	533	0,1	6,623	0,1	641	109	0,392	0,8	641	109	1,482	1,5	
		Οπωροφόρα δέντρα και εκτάσεις με άλλους καρπούς	30	30	60	60	30	30	0,2	0,2	30	30	1,5	1,5	
		Ελαιώνες	200	200	0	0	0	100	0	0	200	200	1,5	1,5	
	Βοσκότοποι	Βοσκότοποι	424	0	0,103	0	524	0	0,186	0,1	524	50	1,478	1,5	
	Ετερογενείς αγροτικές εκτάσεις	Ετήσια φυτά σχετιζόμενα με μόνιμους καρπούς	180	0	0,15	0	180	0	0,49	0	180	0	1,37	0	
		Σύνθετες καλλιέργειες													
		Γη που καλύπτεται κυρίως από γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	668	334	0,09	0,09	868	434	0,12	0,123	868	434	1,5	0,5	
	Δάση και άλλες φυσικές περιοχές	Δάση	Δάσος πλατύφυλλων	320	0	60	0	320	0	0,2	0	320	0	1,5	0
Δάσος κωνοφόρων			900	500	0	0	900	0	3	3	900	500	1,5	1,5	
Μικτό δάσος			232	125	32	8	465	38	1,713	2,163	465	358	1,5	1,5	
Εκτάσεις με θαμνώδη, και/ή ποώδη βλάστηση		Φυσικό λιβάδι	150	75	8	8	350	175	0,34	0,34	350	175	1,5	1,5	
		Τυρφώδης έκταση ή/και χερσότοπος	350	175	8	8	350	175	0,6	0,65	350	175	1,5	1,5	
		Σκληρόφυλλη βλάστηση	400	400	8	8	400	400	0,6	0,65	400	400	1,5	1,5	
		Μεταβατικές δασώδεις - θαμνώδεις εκτάσεις	552	223	11,674	0,09	685	289	0,135	0,123	685	289	1,5	1,5	
Ανοικτές εκτάσεις με λίγη ή καθόλου βλάστηση		Ακτές, αμμόλοφοι, αμμοθίνες	200	100	8	8	200	100	0,65	0,65	900	100	1,5	1,5	
		Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	150	75	8	8	350	175	0,34	0,34	350	175	1,5	1,5	
Υγρότοποι		Εσωτερικοί υγρότοποι	Έλη ενδοχώρας	350	175	8	8	350	175	0,65	0,65	0	0	0	0

Πίνακας Β.5 Τιμές του συντελεστή διόρθωσης (R), φυτοκάλυψης (CF), της δυνατότητας διάβρωσης (Τύπος περιοχής – Απεριόριστη-ασταθής, Περιορισμένη-σταθερή) και του μήκους επιφανειακής τραχύτητας (z_0 - cm) που χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό των εκπομπών σκόνης στην ΕΠΑ.

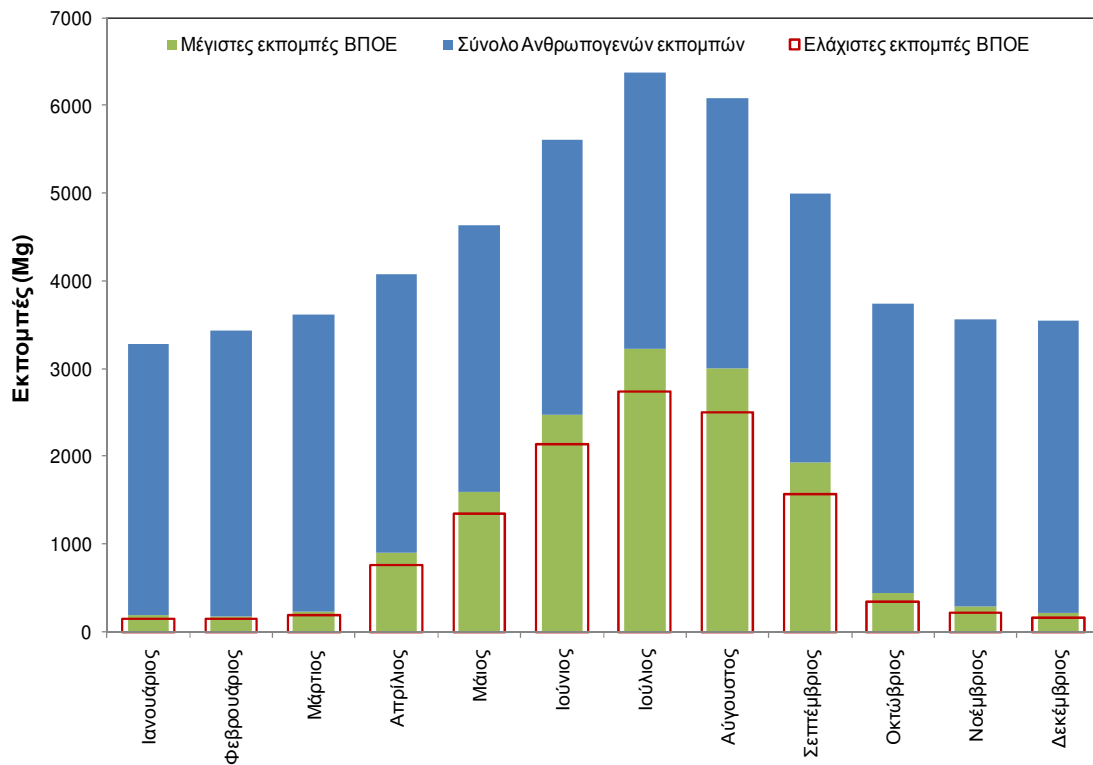
Κατηγορία 1	Κατηγορία 2	Κατηγορία 3	z_0	R	Τύπος περιοχής	CF	
Δομημένες εκτάσεις	Αστική δόμηση	Συνεχής αστική δόμηση	100	1	Π	0,07	
		Ασυνεχής αστική δόμηση	100	1	A	1	
	Βιομηχανικές, εμπορικές περιοχές και εκτάσεις σχετιζόμενες με μεταφορές	Εμπορικές ή βιομηχανικές μονάδες		100	1	Π	0,07
		Οδικό και σιδηροδρομικό δίκτυο και σχετιζόμενες εκτάσεις		100	1	Π	0,07
		Λιμάνι		100	1	Π	0,07
		Αεροδρόμιο		100	1	Π	0,07
	Ορυχεία, χώροι απόρριψης και εργοτάξια	Ορυχεία		100	1	A	1
		Χώροι απόρριψης		100	1	A	1
		Εργοτάξια οικοδομής		100	1	A	1
	Δομημένες, μη-αγροτικές περιοχές με βλάστηση	Αστικές πράσινες εκτάσεις		100	1	A	0,07
Αθλητικές εγκαταστάσεις και χώροι αναψυχής		100	1	Π	0,07		
Αγροτικές εκτάσεις	Αρόσιμη γη	Μη-αρδευόμενη αρόσιμη γη	0,031	0,4	A	1	
	Μόνιμοι καρποί	Αμπελώνες	100	0,5	A	0,645	
		Οπωροφόρα δέντρα και εκτάσεις με άλλους καρπούς		100	0,5	A	0,645
		Ελαιώνες		100	0,5	A	0,645
	Βοσκότοποι	Βοσκότοποι	0,031	0,5	A	0,269	
	Ετερογενείς αγροτικές εκτάσεις	Σύνθετες καλλιέργειες		0,031	0,5	A	1
		Γη που καλύπτεται κυρίως από γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης		0,1	0,5	A	1
Δάση και άλλες φυσικές περιοχές	Δάση	Δάσος πλατύφυλλων	100	0,9	Π	0,07	
		Δάσος κωνοφόρων	100	0,9	Π	0,07	
		Μικτό δάσος	100	0,9	Π	0,07	
	Εκτάσεις με θαμνώδη, και/ή ποώδη βλάστηση	Φυσικό λιβάδι		0,1	0,6	Π	0,195
		Σκληρόφυλλη βλάστηση		0,05	0,7	Π	0,7
		Μεταβατικές δασώδεις - θαμνώδεις εκτάσεις		0,05	0,8	Π	0,07
	Ανοικτές εκτάσεις με λίγη ή καθόλου βλάστηση	Ακτές, αμμόλοφοι, αμμοθίνες		0,002	0,1	A	0,7
		Γυμνοί βράχοι		0,002	0,1	A	1
		Εκτάσεις με αραιή βλάστηση		0,002	0,1	A	0,7
Καμένες εκτάσεις		0,002	0,1	Π	1		



Εικόνα Β.1 Παράδειγμα της χωρικής κατανομής ανθρωπογενών εκπομπών. Αριστερά δίνονται οι εκπομπές στο πλέγμα του EMEP και τα στατιστικά χωρικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή του χάρτη εκπομπών με υψηλή χωρική ανάλυση (δεξιά).



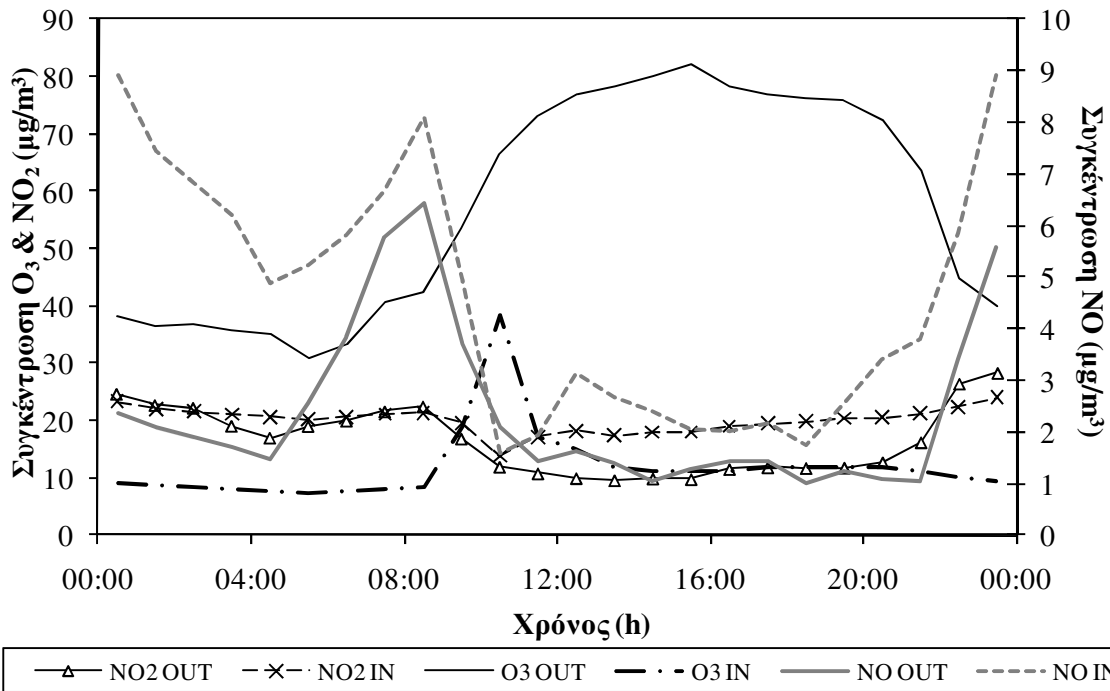
Εικόνα Β.2 Δασικές εκτάσεις στις οποίες εκδηλώθηκαν πυρκαγιές την περίοδο 2000 – 2007.



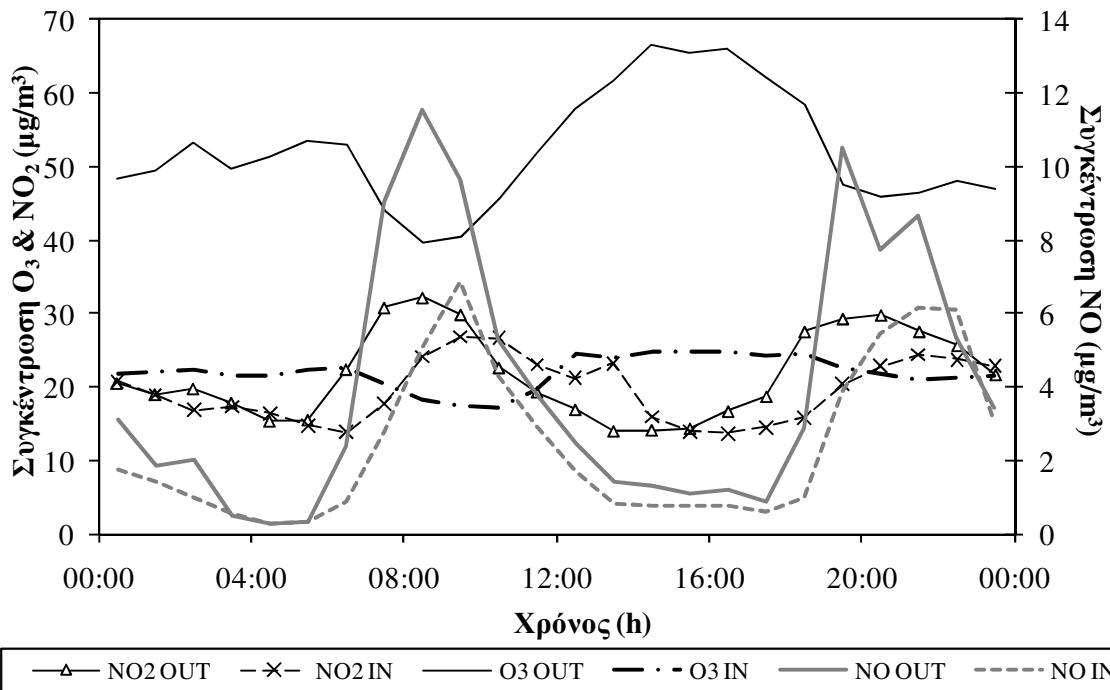
Εικόνα Β.3 Μηνιαίες εκπομπές ΠΟΕ από ανθρωπογενείς και φυσικές πηγές στην ΕΠΑ το έτος 2007. Οι μέγιστες και ελάχιστες εκπομπές ΒΠΟΕ αντιστοιχούν σε ελάχιστες και μέγιστες μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

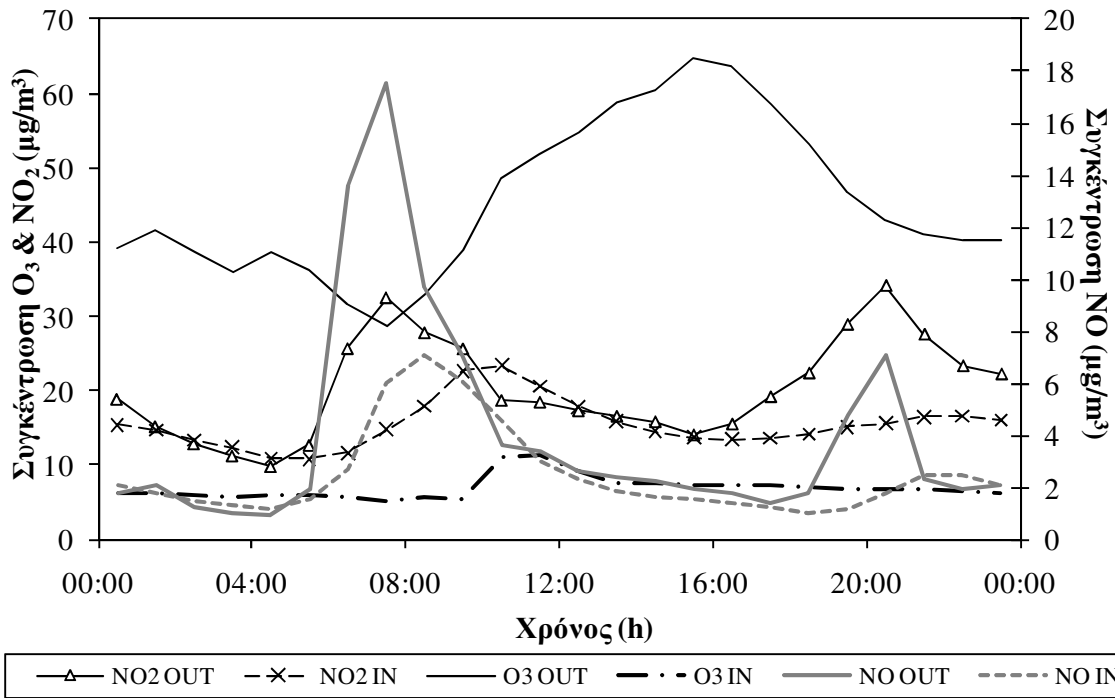
ΕΦΑΡΜΟΓΗ 2



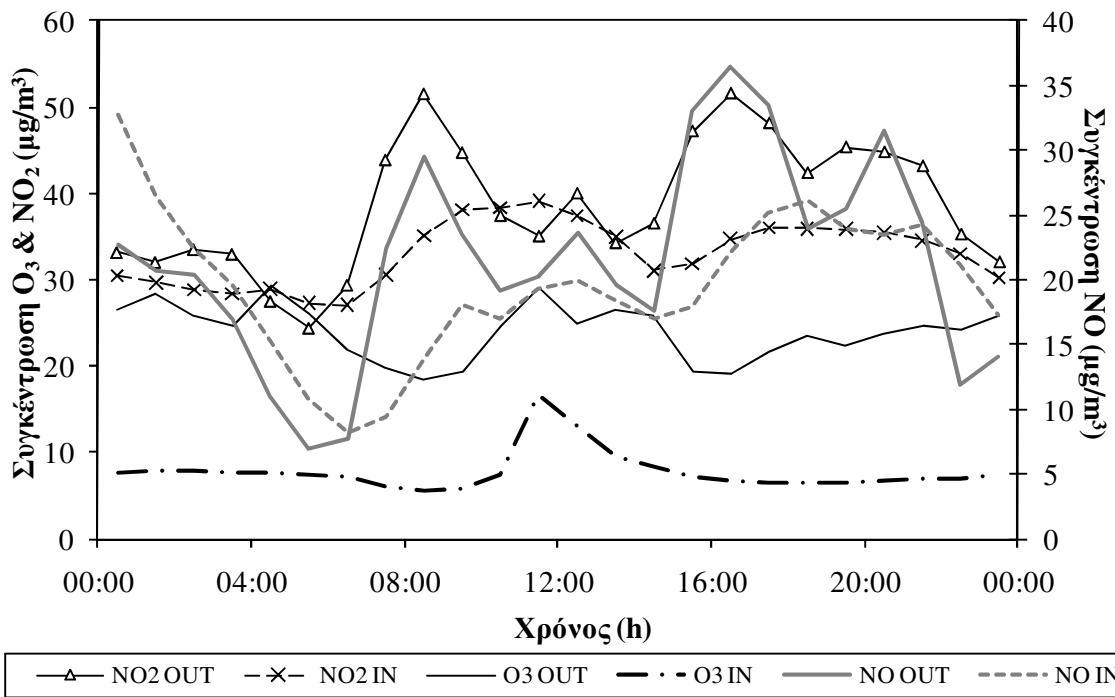
Εικόνα Γ.1 Συγκεντρώσεις NO₂, NO και O₃ στον εξωτερικό και εσωτερικό χώρο της κατοικίας στο προάστιο του Όσλο κατά τη θερινή περίοδο μετρήσεων.



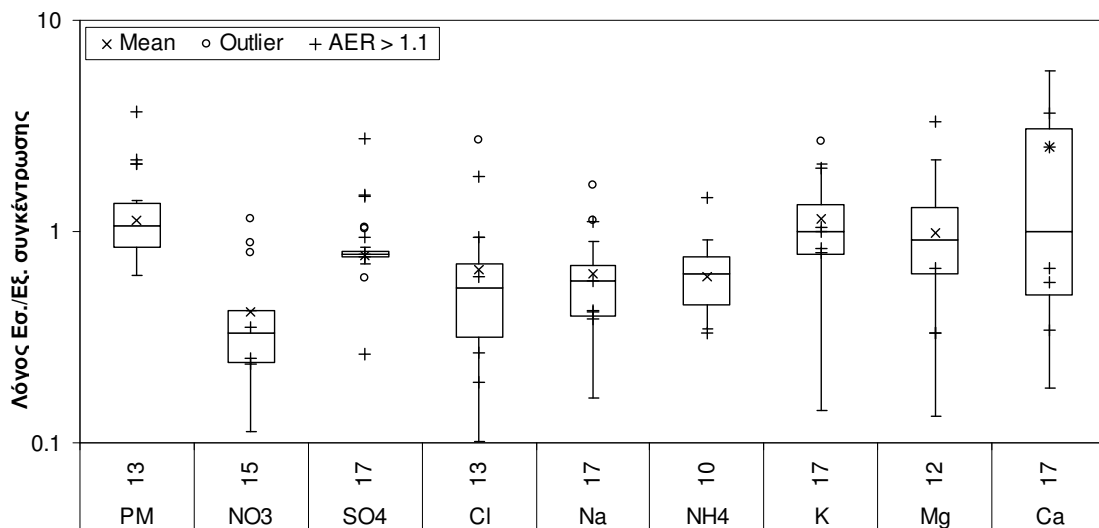
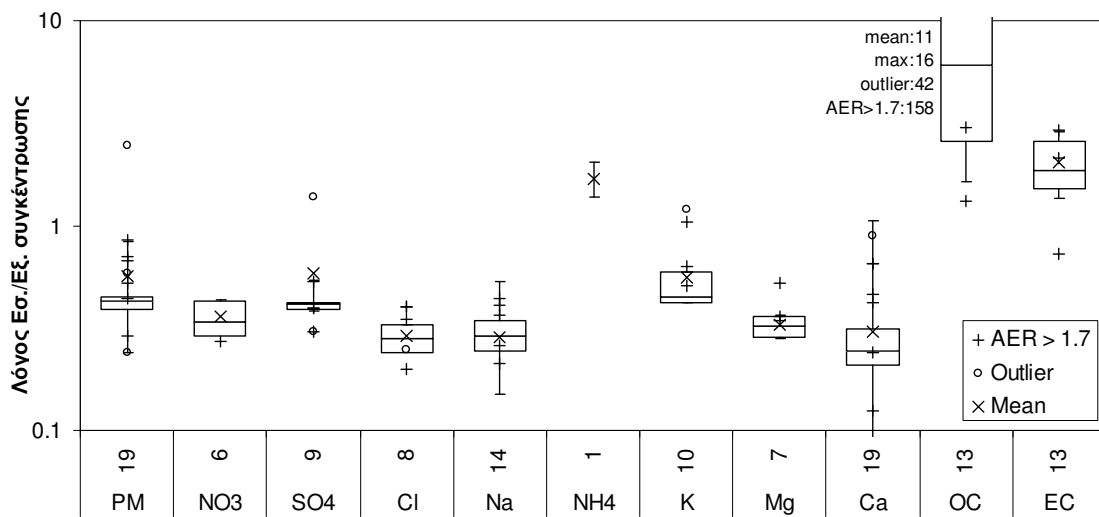
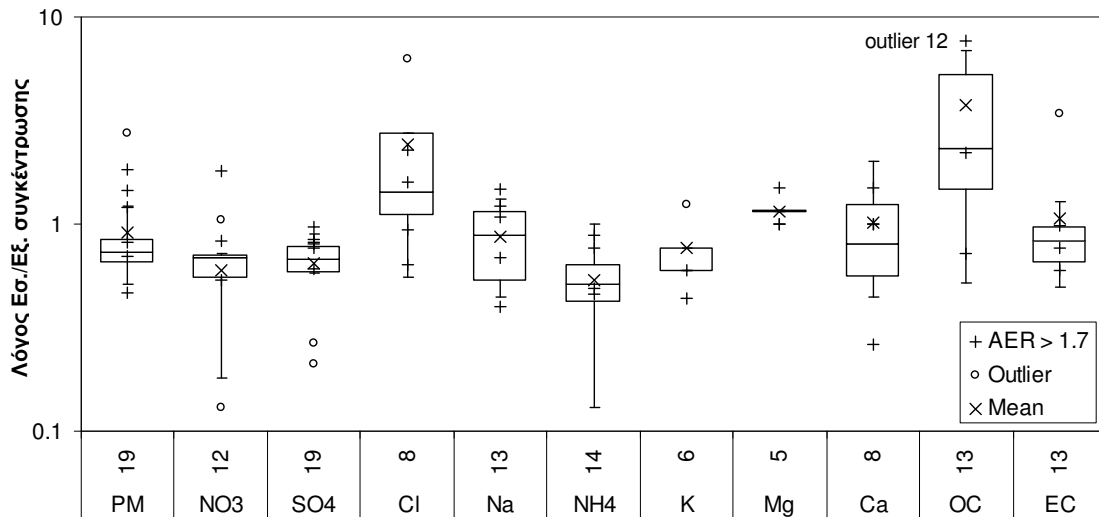
Εικόνα Γ.2 Συγκεντρώσεις NO₂, NO και O₃ στον εξωτερικό και εσωτερικό χώρο της κατοικίας στο προάστιο του Όσλο κατά τη χειμερινή περίοδο μετρήσεων.



Εικόνα Γ.3 Συγκεντρώσεις NO₂, NO και O₃ στον εξωτερικό και εσωτερικό χώρο του διαμερίσματος στο κέντρο του Όσλο κατά τη θερινή περίοδο μετρήσεων.



Εικόνα Γ.4 Συγκεντρώσεις NO₂, NO και O₃ στον εξωτερικό και εσωτερικό χώρο του διαμερίσματος στο κέντρο του Όσλο κατά τη χειμερινή περίοδο μετρήσεων.



Εικόνα Γ.5 Λόγος Εσωτερικής/Εξωτερικής συγκέντρωσης, σε περιόδους με και χωρίς πηγές στον εσωτερικό χώρο, των συστατικών των (α) $ΑΣ_{2,5}$ και (β) $ΑΣ_{2,5-10}$ κατά τις περιόδους ΠΘ και ΠΧ και (γ) $ΑΣ_{10}$ κατά τις περιόδους ΚΘ και ΚΧ. Οι τιμές των κουτιών αφορούν σε περιόδους με μικρό ρυθμό αερισμού (AER); οι τιμές σε περιόδους με υψηλό ρυθμό αερισμού δίνονται με το σήμα +.

Πίνακας Γ.1 Μέση συγκέντρωση ΑΣ₁₀ (μg/m³) και τιμή του λόγου Εσ./Εξ. συγκέντρωσης για τις εργάσιμες ημέρες και τα Σαββατοκύριακα κατά τις περιόδους μετρήσεων (α) ΠΘ, (β) ΚΘ και (γ) ΚΧ.

	Εργάσιμες ημέρες		Σαββατοκύριακο	
	Με δραστηριότητες στον εσωτερικό χώρο	Χωρίς δραστηριότητες στον εσωτερικό χώρο	Με δραστηριότητες στον εσωτερικό χώρο	Χωρίς δραστηριότητες στον εσωτερικό χώρο
(α)	ΠΘ			
ΑΣ ₁₀ (μg/m ³) Εσ. / Εξ.	10.77 / 9.26	5.67 / 9.26	5.84 / 9.04	5.28 / 9.04
Λόγος Εσ./Εξ.	1.20	0.60	0.64	0.59
(β)	ΚΘ			
ΑΣ ₁₀ (μg/m ³) Εσ. / Εξ.	12.41 / 5.25 14.75 / 5.95	5.61 / 5.25 9.66 / 5.95	11.88 / 5.47 5.68 / 6.29	2.22 / 5.47 5.59 / 6.29
Λόγος Εσ./Εξ.	2.42 2.39	1.06 1.59	2.17 0.89	0.41 0.87
(γ)	ΚΧ			
ΑΣ ₁₀ (μg/m ³) Εσ. / Εξ.	14.24 / 10.88	9.14 / 10.88	10.69 / 10.93	7.53 / 10.93
Λόγος Εσ./Εξ.	1.37	0.77	1.03	0.69

Πίνακας Γ.2 Χημική σύσταση της συγκέντρωσης μάζας (μg/m³) ανόργανων και ανθρακικών ΑΣ_{2,5} (λεπτά) και ΑΣ_{2,5-10} (χονδρά) κατά την χειμερινή (Μάρτιος 2002) περίοδο μετρήσεων στην κατοικία στο προάστιο του Όσλο.

Συστατικό	Συγκέντρωση εσωτερικά (μg/m ³)				Συγκέντρωση εξωτερικά (μg/m ³)				R ² Εσ./Εξ. συγκέντρωσης
	N	Μέση τιμή	Διάμεσος τιμή	Πεδίο τιμών	N	Μέση τιμή	Διάμεσος τιμή	Πεδίο τιμών	
(α)	ΑΣ_{2,5}								
PM ^α	12	7	4,6	2,60 - 23,50	12	6,5	5	1,80 - 13,90	0,74
NO ₃ ⁻	10	0,2	0,2	0,10 - 0,48	12	0,5	0,3	0,06 - 2,14	-
SO ₄ ²⁻	12	0,4	0,4	0,07 - 0,89	12	0,5	0,5	0,09 - 1,59	0,45
Cl ⁻	8	0,3	0,2	0,09 - 1,22	10	0,2	0,1	0,01 - 0,94	0,94
Na ⁺	12	0,2	0,1	0,02 - 0,98	12	0,2	0,1	0,03 - 0,87	0,98
NH ₄ ⁺	8	0,1	0,1	0,02 - 0,17	11	0,2	0,2	0,03 - 1,05	-
K ⁺	7	0,03	0,03	0,02 - 0,06	4	0,06	0,04	0,03 - 0,10	-
Mg ²⁺	6	0,05	0,04	0,02 - 0,14	5	0,05	0,04	0,03 - 0,12	0,98
Ca ²⁺	6	0,03	0,03	0,02 - 0,05	9	0,04	0,02	0,02 - 0,08	-
OC	7	5,2 ^β	3	1,19 - 18,30	7	1,1 ^γ	1	0,49 - 2,66	0,79
EC	7	0,8 ^β	0,6	0,25 - 1,95	7	0,7 ^γ	0,4	0,33 - 1,53	0,59
(β)	ΑΣ_{2,5-10}								
PM ^α	12	4,4	4	1,90 - 7,60	12	10	7	2,60 - 31,60	-
NO ₃ ⁻	5	0,2	0,3	0,10 - 0,29	10	0,4	0,2	0,11 - 1,02	0,94
SO ₄ ²⁻	9	0,2	0,1	0,05 - 1,01	12	0,3	0,2	0,06 - 0,73	0,74
Cl ⁻	8	0,35	0,3	0,07 - 1,15	12	0,8	0,6	0,07 - 3,09	0,98
Na ⁺	12	0,2	0,1	0,03 - 0,81	12	0,6	0,5	0,18 - 2,18	0,98
NH ₄ ⁺	1	0,3	0,3	-	1	0,2	0,2	-	-
K ⁺	8	0,02	0,02	0,01 - 0,05	11	0,04	0,03	0,01 - 0,10	-
Mg ²⁺	7	0,04	0,03	0,02 - 0,12	12	0,08	0,1	0,02 - 0,29	0,98
Ca ²⁺	12	0,06	0,05	0,02 - 0,15	12	0,2	0,1	0,04 - 0,71	0,90
OC	7	4,6 ^β	3,8	0,36 - 14,02	7	0,7 ^γ	0,6	0,04 - 2,08	-
EC	7	0,7 ^β	0,6	0,04 - 1,40	7	0,2 ^γ	0,2	0,14 - 0,44	-

Σημείωση: ^αNILU filterpack; ^βKleinfILTERGERAT; ^γPPD sampler; N: πλήθος δειγμάτων με συγκέντρωση μεγαλύτερη του ορίου ανίχνευσης; OC: Οργανικός άνθρακας; EC: Στοιχειακός άνθρακας.

Πίνακας Γ.3 Χημική σύσταση της συγκέντρωσης μάζας ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ανόργανων και ανθρακικών $\text{A}\Sigma_{2,5}$ (λεπτά) και $\text{A}\Sigma_{2,5-10}$ (χονδρά) κατά την θερινή (Ιούνιος 2002) περίοδο μετρήσεων στην κατοικία στο προάστιο του Όσλο.

Συστατικό	Συγκέντρωση εσωτερικά ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				Συγκέντρωση εξωτερικά ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				R^2 Εσ./Εξ. συγκέντρωσης
	N	Μέση τιμή	Διάμεσος τιμή	Πεδίο τιμών	N	Μέση τιμή	Διάμεσος τιμή	Πεδίο τιμών	
(α) $\text{A}\Sigma_{2,5}$									
PM ^α	8	5,1	4,7	3,90 - 6,60	8	7,6	7	6,30 - 9,50	0,77
NO ₃ ⁻	3	0,1	0,1	0,07 - 0,12	5	0,2	0,1	0,09 - 0,41	-
SO ₄ ²⁻	8	0,5	0,4	0,19 - 0,79	8	0,8	0,7	0,55 - 1,30	0,55
Cl ⁻	0	ND	ND	-	0	ND	ND	-	-
Na ⁺	1	0,02	0,02	-	4	0,03	0,03	0,02 - 0,04	-
NH ₄ ⁺	7	0,12	0,1	0,07 - 0,20	8	1,3	0,2	0,17 - 0,43	0,85
K ⁺	2	0,02	0,02	0,02 - 0,02	8	0,02	0,02	0,02 - 0,04	-
Mg ²⁺	1	0,03	0,03	-	0	ND	ND	-	-
Ca ²⁺	2	0,03	0,03	0,02 - 0,03	5	0,05	0,05	0,04 - 0,06	-
OC	7	4,6 ^β	2,6	0,71 - 14,06	9	2,1 ^γ	1,3	1,13 - 3,20	-
EC	7	0,4 ^β	0,4	0,20 - 0,50	9	0,5 ^γ	0,5	0,17 - 0,84	-
(β) $\text{A}\Sigma_{2,5-10}$									
PM ^α	8	2,6	2,6	1,30 - 4,00	8	5,9	5,5	1,50 - 10,10	-
NO ₃ ⁻	3	0,1	0,1	0,07 - 0,13	8	0,3	0,2	0,13 - 1,17	-
SO ₄ ²⁻	0	ND	ND	-	8	0,1	0,1	0,07 - 0,16	-
Cl ⁻	0	ND	ND	-	1	0,04	0,04	-	-
Na ⁺	2	0,02	0,02	0,02 - 0,02	6	0,05	0,04	0,03 - 0,09	-
NH ₄ ⁺	0	ND	ND	-	0	ND	ND	-	-
K ⁺	2	0,02	0,02	0,02 - 0,02	7	0,04	0,04	0,02 - 0,06	-
Mg ²⁺	0	ND	ND	-	8	0,03	0,03	0,02 - 0,05	-
Ca ²⁺	8	0,04	0,05	0,02 - 0,06	8	0,2	0,2	0,10 - 0,44	-
OC	7	5,2 ^β	2,7	0,79 - 14,65	9	0,9 ^γ	0,6	0,35 - 1,91	-
EC	7	0,4 ^β	0,4	0,21 - 0,52	9	0,1 ^γ	0,2	0,11 - 0,21	-

Σημείωση: ^αNILU filterpack; ^βKleinfILTERGERAT; ^γPPD sampler; N: πλήθος δειγμάτων με συγκέντρωση μεγαλύτερη του ορίου ανίχνευσης; OC: Οργανικός άνθρακας; EC: Στοιχειακός άνθρακας; ND: δεν ανιχνεύθηκε.

Πίνακας Γ.4 Χημική σύσταση της συγκέντρωσης μάζας ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ανόργανων και ανθρακικών $\text{A}\Sigma_{10}$ κατά τη θερινή (Αύγουστος - Σεπτέμβριος 2002) περίοδο μετρήσεων στην κατοικία στο κέντρο του Όσλο.

Συστατικό	Συγκέντρωση εσωτερικά ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				Συγκέντρωση εξωτερικά ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				R^2 Εσ./Εξ. συγκέντρωσης
	N	Μέση τιμή	Διάμεσος τιμή	Πεδίο τιμών	N	Μέση τιμή	Διάμεσος τιμή	Πεδίο τιμών	
PM ^α	5	16,4 ^β	18	8 - 27	4	14,1 ^γ	14	5,2 - 23,2	-
NO ₃ ⁻	10	0,3	0,3	0,13 - 0,44	12	1,3	1,1	0,22 - 2,88	0,46
SO ₄ ²⁻	11	1,8	1,7	0,27 - 4,02	12	2,2	2,2	0,24 - 5,16	0,81
Cl ⁻	7	0,1	0,1	0,05 - 0,18	12	0,35	0,3	0,04 - 1,08	-
Na ⁺	10	0,2	0,2	0,08 - 0,37	12	0,5	0,4	0,08 - 1,04	0,59
NH ₄ ⁺	9	0,5	0,4	0,04 - 1,36	10	0,8	0,6	0,12 - 2,10	0,69
K ⁺	10	0,1	0,1	0,02 - 0,26	12	0,1	0,1	0,02 - 0,29	0,64
Mg ²⁺	5	0,03	0,02	0,02 - 0,04	12	0,07	0,1	0,02 - 0,15	-
Ca ²⁺	10	0,1	0,1	0,05 - 0,23	12	0,3	0,3	0,09 - 0,44	-
OC	0	ND	ND	-	0	ND	ND	-	-
EC	0	ND	ND	-	0	ND	ND	-	-

Σημείωση: ^αNILU filterpack; ^βKleinfILTERGERAT; ^γBerner Impactor; N: πλήθος δειγμάτων με συγκέντρωση μεγαλύτερη του ορίου ανίχνευσης; OC: Οργανικός άνθρακας; EC: Στοιχειακός άνθρακας; ND: δεν ανιχνεύθηκε.

Πίνακας Γ.5 Χημική σύσταση της συγκέντρωσης μάζας ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ανόργανων και ανθρακικών ΑΣ₁₀ κατά τη χειμερινή (Ιανουάριος 2003) περίοδο μετρήσεων στην κατοικία στο κέντρο του Όσλο.

Συστατικό	Συγκέντρωση εσωτερικά ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				Συγκέντρωση εξωτερικά ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				R ² Εσ./Εξ. συγκέντρωσης
	N	Μέση τιμή	Διάμεσος τιμή	Πεδίο τιμών	N	Μέση τιμή	Διάμεσος τιμή	Πεδίο τιμών	
PM ^α	12	20,6 ^α	19,5	15 - 29	12	16,2 ^α	16,5	11 - 21	-
NO ₃ ⁻	8	0,8	0,8	0,49 - 1,33	12	1,4	1,2	0,49 - 3,01	-
SO ₄ ²⁻	12	1,2	1,1	0,42 - 2,52	12	1,5	1,3	0,36 - 3,09	0,98
Cl ⁻	12	0,7	0,6	0,15 - 2,04	11	1,1	1,1	0,10 - 3,05	0,87
Na ⁺	12	0,5	0,4	0,10 - 1,59	12	0,9	0,6	0,06 - 2,63	0,98
NH ₄ ⁺	4	0,3	0,3	0,12 - 0,38	12	0,3	0,2	0,05 - 0,69	-
K ⁺	12	0,1	0,1	0,05 - 0,21	12	0,1	0,1	0,03 - 0,11	-
Mg ²⁺	12	0,12	0,1	0,04 - 0,27	10	0,13	0,1	0,03 - 0,35	0,81
Ca ²⁺	12	0,9	0,9	0,33 - 1,31	12	0,4	0,3	0,07 - 1,16	-
OC	3	10 ^β	9,8	8,9 - 11,3	1	3,8	3,8	-	-
EC	3	0,8 ^β	0,9	0,4 - 1	1	1	1	-	-

Σημείωση: ^αNILU filterpack; ^βKleinfILTERGERAT; ^γBerner Impactor; N: πλήθος δειγμάτων με συγκέντρωση μεγαλύτερη του ορίου ανίχνευσης; OC: Οργανικός άνθρακας; EC: Στοιχειακός άνθρακας; ND: δεν ανιχνεύθηκε.

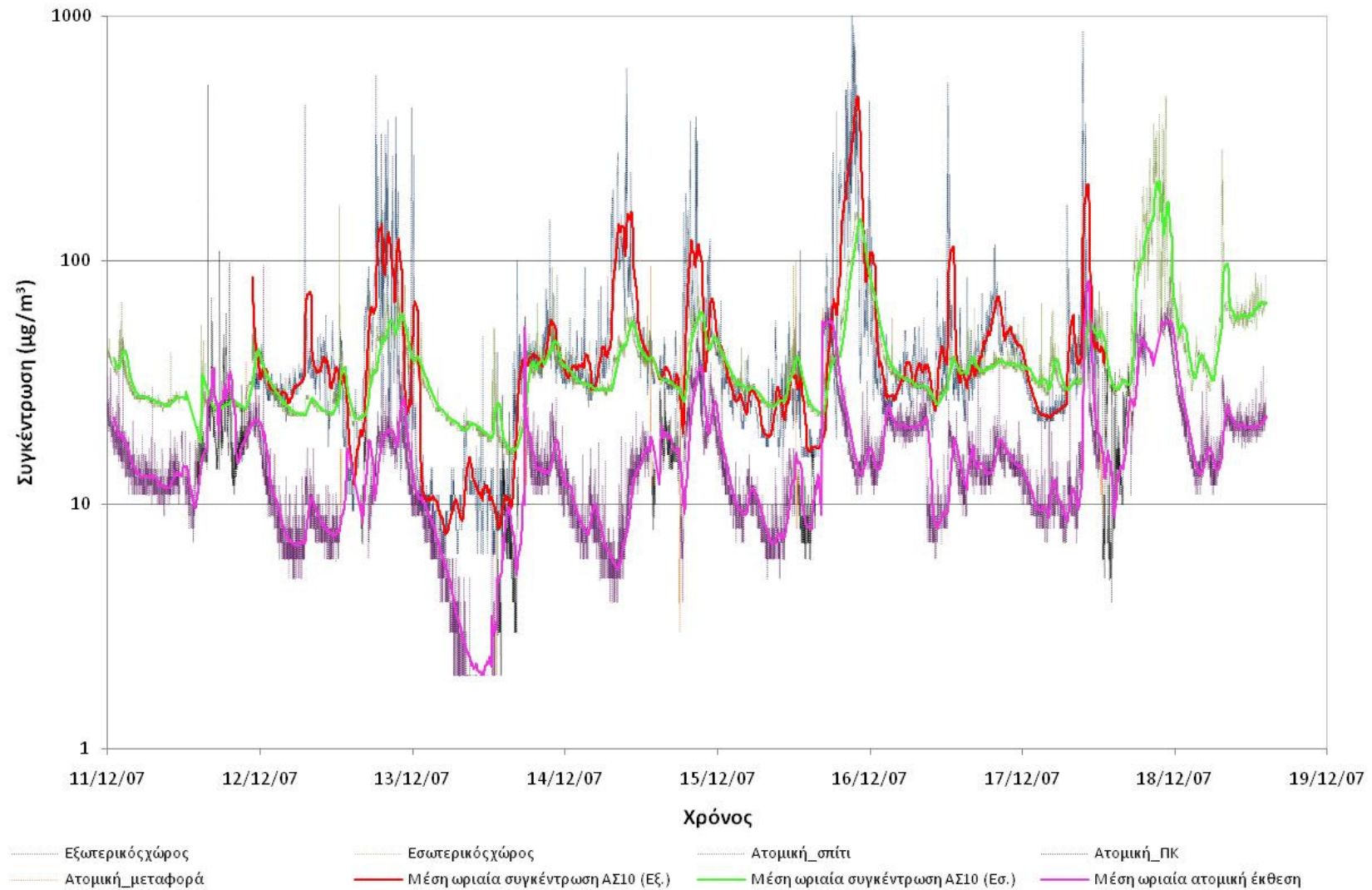
Πίνακας Γ.6 Τιμές του λόγου εσωτερικής προς εξωτερικής συγκέντρωσης ΑΣ και συστατικών τους σε παλαιότερες μελέτες που δίνονται στην βιβλιογραφία.

Περιοχή	Περίοδος	Συστατικό	Τιμές λόγου	Παρατηρήσεις	Βιβλιογραφική πηγή
Νοτιοδυτική Βιρτζίνια & Κονέκτικατ	1994-95 1995-98	ΑΣ _{2,5} SO ₄ ²⁻	1,03±0,71 0,74±0,53	281 κατοικίες, 24h, και οι δύο τιμές αφορούν σε θερινές περιόδους	Leaderer κ.α., 1999
Χονγκ Κονγκ	2002-03	ΑΣ _{2,5} OC EC	0,8 1,02 0,8	5 περιβάλλοντα δίπλα σε δρόμους, 3 NV & 2MV, 24h	Ho κ.α., 2004
Αμερικανική Μελέτη PTEAM		ΑΣ _{2,5}	0,4-0,6	Απουσία πηγών εσωτερικά, NV (0,3-1),	Wallace κ.α., 1993
Χιούστον (Τέξας), Λος Άντζελες, (Καλιφόρνια), και Ελίζαμπεθ (Νιου Τζέρσεϊ)	1999-01	ΑΣ _{2,5}	<1 στο 54-71% των κατοικιών ανά πολιτεία	114 κατοικίες, 48h	Meng κ.α., 2005
Σάο Πάολο & Campinas	1993	K ⁺ , Cl ⁻ , NH ₄ ⁺ , SO ₄ ²⁻ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , και NO ₃ ⁻	d <3 μm: 3,19, ~8,5, 0,64, 0,87, 1,44, ~1,5, ~1,5, και ~2 d >3μm: ~1,5, ~1,5, <1, <1, <1, <1, και <1	3 γραφεία, 2 εστιατόρια και 1 ξενοδοχείο	Allen κ.α., 1995
Coachella Valley	2000	ΑΣ _{2,5} ΑΣ _{2,5-10} OC σε ΑΣ _{2,5} EC σε ΑΣ _{2,5}	1,03±0,29 0,66±0,27 1,77±0,36 0,85±0,46	Έρημος Καλιφόρνιας, 13 κατοικίες, 23h	Geller κ.α., 2002
Βοστώνη	2003-05	ΑΣ _{2,5}	Διάμεσος τιμή 1,14	58 δείγματα, 3-4ημερών	Baxter κ.α., 2007
Ελβετία		ΑΣ ₁₀ (NS) ΑΣ ₁₀ (S) ΑΣ _{2,5}	0,7 >1,8 0,54-1,23	17 κατοικίες, NV, 48-72h	Monn κ.α., 1997
Οσάκα, Ιαπωνία	1994-97	OC σε ΑΣ ₂ EC σε ΑΣ ₂ EC σε ΑΣ ₂₋₁₀	R: 0,72-1,8, B: 1-1,1 R: 0,62-0,85, B: 0,88-0,91 R: 1,3-1,5, B: 1,3-1	10 κατοικίες, οι τιμές αφορούν σε κατοικίες δίπλα σε δρόμους κεντρικών αστικών περιοχών και προαστίων (R) και τιμές υποβάθρου (B)	Funasaka κ.α., 2000
Ηνωμένο Βασίλειο, περιοχή του Μπέρμιγχαμ	1997-98	SO ₄ ²⁻ σε ΑΣ ₁₀ EC σε ΑΣ ₁₀ OC σε ΑΣ ₁₀	0,6-0,8 0,8-4,3 4,2-7,7	9 κατοικίες, δίπλα σε δρόμο, αστική και αγροτική περιοχή, NV, S, ρυθμός ανταλλαγής αέρα 0,15 – 1,67 h ⁻¹	Jones κ.α., 2000
Λος Άντζελες, Καλιφόρνια	2001-02	SO ₄ ²⁻ σε ΑΣ _{2,5} NO ₃ ⁻ σε ΑΣ _{2,5}	0,87 ~0,23	14 κτίρια, διάμεσος τιμή ρυθμού ανταλλαγής αέρα 0,63 h ⁻¹	Samat κ.α., 2006

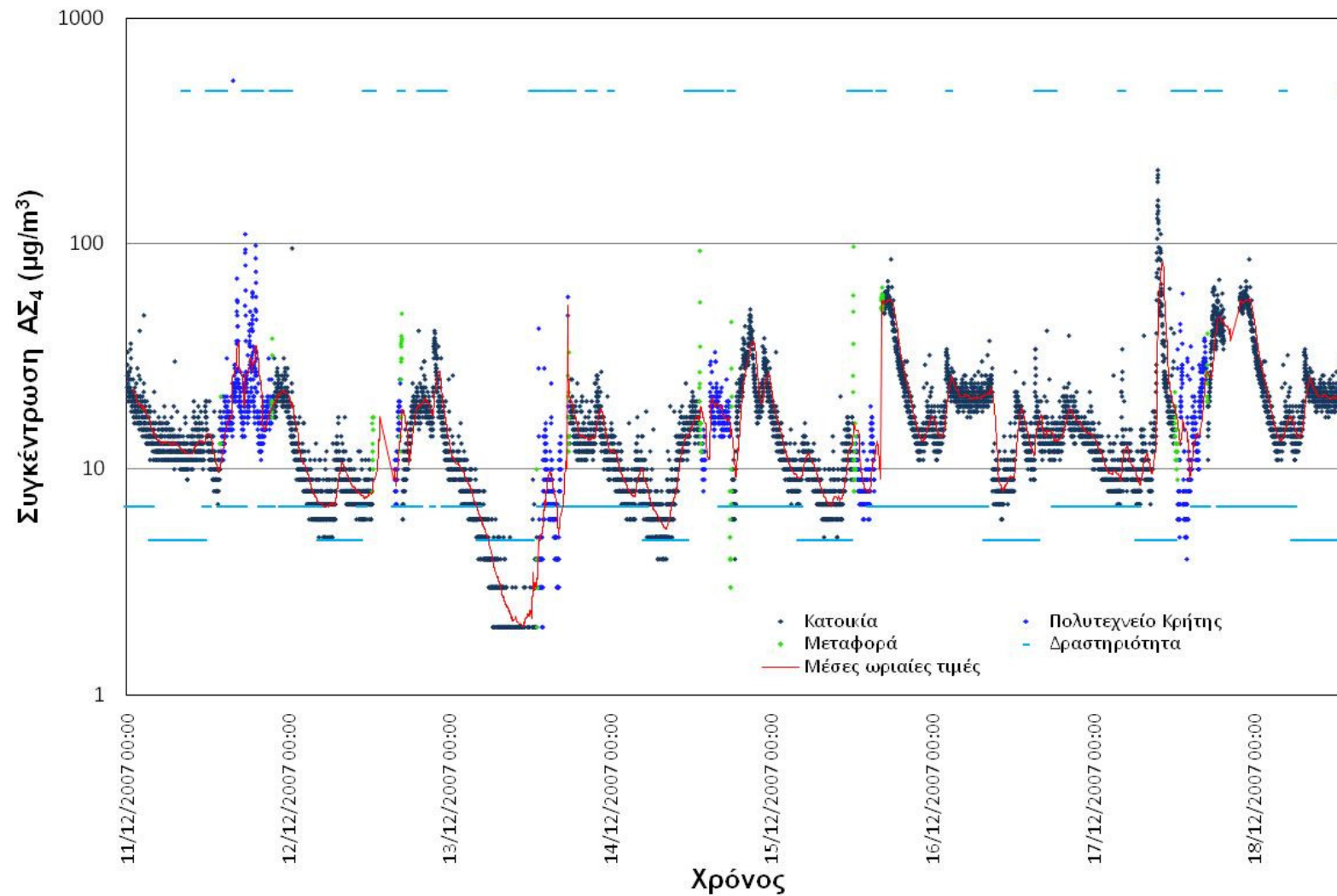
Σημειώσεις PTEAM: Particle Total Exposure Assessment Methodology; NV: φυσικός αερισμός. MV: μηχανικός αερισμός; NS: Περιβάλλον χωρίς καπνίζοντες, S: Περιβάλλον με καπνίζοντες; d: διάμετρος.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

ΕΦΑΡΜΟΓΗ 3



Εικόνα Δ.1 Μέσες τιμές 1-μίν της συγκέντρωσης ΑΣ₁₀ και ΑΣ₄.



Εικόνα Δ.2 Μέσες τιμές 1-min και 1h της συγκέντρωσης έκθεσης σε ΑΣ₄ μαζί με τον ρυθμό εισπνοής του εκτεθειμένου ατόμου (δραστηριότητα).

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Οι επιπτώσεις της αέριας ρύπανσης στην υγεία ως αποτέλεσμα της αλυσίδας γεγονότων που ξεκινούν από την εκπομπή των ρύπων (τροποποιημένο από Lioy κ.α., 1990).....	3
Εικόνα 2 Ανατομία του αναπνευστικού συστήματος (ICRP, 1994).	48
Εικόνα 3 Διάγραμμα των κλασμάτων του όγκου αέρα που εισέρχεται στους πνεύμονες. TLC = ο μέγιστος όγκος του αέρα στους πνεύμονες στην εισπνοή (Total Lung Capacity), VC = (Vital Capacity), RV = (Residual Volume), FRC = ο όγκος αέρα που παραμένει στους πνεύμονες μετά από την εκπνοή (Functional Residual Capacity), IRV = (Inspiratory Reverse Volume), ERV = (Expiratory Reverse Volume), V_T = ο όγκος αέρα κάθε εισπνοής (Tidal volume), IC = (Inspiratory Capacity) (Schlesinger, 1988).	56
Εικόνα 4 Μηχανισμοί εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα.....	63
Εικόνα 5 Διάγραμμα πιθανών τρόπων καθαρισμού των σωματιδίων από την περιοχή των κυψελίδων για αδιάλυτα σωματίδια. Αριστερά φαίνεται η ανέλκυση σωματιδίων από το στρώμα βλέννας προς τον φάρυγγα απ' όπου καταλήγουν στο γαστρεντερικό σύστημα (Schlesinger, 1988; US EPA, 2002).	70
Εικόνα 6 Μοντέλο που αναπαριστά τον χρονικά μεταβαλλόμενο ρυθμό απορρόφησης των σωματιδίων στο αίμα (ICRP, 1994).	77
Εικόνα 7: Εμπειρική αναπαράσταση της εναπόθεσης σωματιδίων στις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος κατά τη διάρκεια μιας αναπνοής με τον αέρα να μεταφέρεται διαμέσου μιας σειράς από φίλτρα . Η αναπνοή μπορεί να πραγματοποιείται από τη μύτη (F_n το κλάσμα εισπνοής από τη μύτη) ή από το στόμα ($1 - F_n$) ή και από τα δύο σε συνδυασμό. Το κλάσμα των εισπνεύσιμων σωματιδίων ορίζεται ως εισπνευσσιμότητα ενώ με n_{in} και n_{out} εκφράζεται η απόδοση των φίλτρων κατά την εισπνοή και εκπνοή αντίστοιχα (ICRP, 1994).	82
Εικόνα 8 Μοντέλο μεταφοράς σωματιδίων από κάθε περιοχή του αναπνευστικού, όπου κάθε περιοχή αποτελείται από τμήματα έτσι ώστε να εκφράζεται καλύτερα ο χρονικά μεταβαλλόμενος ρυθμός μεταφοράς (ICRP, 1994). Οι υπογραμμισμένοι αριθμοί αποτελούν δείκτη κάθε τμήματος του αναπνευστικού συστήματος (χρησιμοποιούνται στον Πίνακα 19).	90
Εικόνα 9 Μοντέλο που αναπαριστά την απορρόφηση των σωματιδίων στο αίμα (ICRP, 1994), όπου f_r το κλάσμα της σωματιδιακής ύλης που διαλύεται γρήγορα, s_r ο ρυθμός ανάληψης στο αίμα της σωματιδιακής ύλης που διαλύεται γρήγορα, και s_s ο ρυθμός ανάληψης στο αίμα της σωματιδιακής ύλης που διαλύεται αργά.	91
Εικόνα 10 Εναπόθεση σωματιδίων στην τραχειοβρογχική και την κυψελιδική περιοχή της αναπνευστικής οδού, όπως υπολογίστηκε με τα μοντέλα ExDoM και HRTM της ICRP και από μετρήσεις των Chan και Lippman (1980) και Stahlhofen κ.α. (1980, 1981, 1983).	93

Εικόνα 11 Σύγκριση των ποσοστών εναπόθεσης σωματιδίων μεταξύ των μοντέλων ExDoM και LUDEP (ενήλικος Καυκάσιος άνδρας σε ήπια εργασία).	95
Εικόνα 12 Σύγκριση των κλασμάτων εναπόθεσης σωματιδίων μεταξύ των μοντέλων ExDoM και MPPD (ενήλικος Καυκάσιος άνδρας σε ήπια εργασία).	96
Εικόνα 13 Εσωτερική δόση ΑΣ στο ΑΑΣ και μάζα που έχει απομακρυνθεί στο αίμα, το γαστρεντερικό σύστημα και τους λεμφαδένες για συστατικά που απορροφούνται γρήγορα στο αίμα. Η ερμηνεία των όρων του υπομνήματος δίνεται στον Πίνακα 11. ...	97
Εικόνα 14 Εισπνεόμενη, εφαρμοσμένη και εσωτερική δόση ΑΣ στο ΑΑΣ για συστατικά που απορροφούνται με γρήγορο και αργό ρυθμό και στο αίμα (ενήλικος Καυκάσιος άνδρας σε ήπια εργασία).	98
Εικόνα 15 Σχέση εισπνεόμενης, εφαρμοσμένης και εσωτερικής δόσης ΑΣ ₁₀ στο ΑΑΣ για συστατικά που απορροφούνται γρήγορα (F), με μέσο ρυθμό (M) και αργά (S) στο αίμα (έκθεση για 1 ημέρα με μέση συγκέντρωση 1μg/m ³).	99
Εικόνα 16 Σχέση εισπνεόμενης, εφαρμοσμένης και εσωτερικής δόσης ΑΣ στο ΑΑΣ 1 ημέρα μετά το τέλος της έκθεσης για συστατικά που απορροφούνται γρήγορα (F), με μέσο ρυθμό (M) και αργά (S) στο αίμα (έκθεση για 1 ημέρα με μέση συγκέντρωση 1μg/m ³ και 10μg/m ³).	100
Εικόνα 17 Χάρτης της ΕΠΑ με τις μεγάλες σημειακές πηγές, τις αστικές ζώνες και το οδικό δίκτυο. Επιπλέον δίνεται το πλέγμα που καλύπτει την περιοχή μελέτης.	103
Εικόνα 18 Η εδαφοκάλυψη των ηπειρωτικών εκτάσεων στην ΕΠΑ (km ² που καλύπτονται από κάθε κατηγορία).	104
Εικόνα 19 Ανθρωπογενείς εκπομπές CO, SO _x , NO _x , ΠΟΕ, NH ₃ , ΑΣ _{2,5} , και ΑΣ _{2,5-10} στην ΕΠΑ το έτος 2007.	109
Εικόνα 20 Χωρική κατανομή των ανθρωπογενών εκπομπών SO _x , ΠΟΕ, ΑΣ _{2,5} , και NH ₃ στην ΕΠΑ το έτος 2007.	110
Εικόνα 21 Χωρική κατανομή των εκπομπών ισοπρενίου, ΑΒΠΟΕ και ανθρωπογενών ΠΟΕ, στην ΕΠΑ την 14/01/08.	113
Εικόνα 22 Χωρική κατανομή των εκπομπών ΑΣ _{2,5} από την θάλασσα, το έδαφος και τις ανθρωπογενείς πηγές στην ΕΠΑ την 14/01/08.	114
Εικόνα 23 Χάρτης του Όσλο με τα σημεία δειγματοληψίας στα προάστια (Steinborgveien) και στο κέντρο (Colletts gate), τις κεντρικές οδικές αρτηρίες και τους σταθερούς σταθμούς μέτρησης ποιότητας του αέρα Kirkeveien και Loren (Lazaridis κ.α., 2006)	117
Εικόνα 24 Κατόψεις των κατοικιών στο Όσλο της Νορβηγίας με τα σημεία δειγματοληψίας του εσωτερικού και εξωτερικού αέρα (αναπροσαρμογή από Lazaridis κ.α., 2006).	119
Εικόνα 25 Εσωτερικές και εξωτερικές συγκεντρώσεις μάζας ΑΣ ₂ και ΑΣ ₁₀ και ο λόγος Εσ./Εξ. συγκεντρώσεων κατά την χειμερινή περίοδο μετρήσεων στην κατοικία σε προάστιο του Όσλο.	123
Εικόνα 26 Εσωτερικές και εξωτερικές συγκεντρώσεις μάζας ΑΣ ₁₀ και λόγος Εσ./Εξ. συγκεντρώσεων κατά την θερινή περίοδο μετρήσεων στην κατοικία σε προάστιο του Όσλο (αναπροσαρμογή από Lazaridis κ.α., 2006).	123

Εικόνα 27 Εσωτερικές και εξωτερικές συγκεντρώσεις μάζας $A_{Σ_{10}}$ και λόγος Εσ./Εξ. συγκεντρώσεων κατά την θερινή περίοδο μετρήσεων στο διαμέρισμα στο κέντρο του Όσλο (αναπροσαρμογή από Lazaridis κ.α., 2006).	123
Εικόνα 28 Εσωτερικές και εξωτερικές συγκεντρώσεις μάζας $A_{Σ_{10}}$ και λόγος Εσ./Εξ. συγκεντρώσεων κατά την χειμερινή περίοδο μετρήσεων στο διαμέρισμα στο κέντρο του Όσλο (αναπροσαρμογή από Lazaridis κ.α., 2006).	124
Εικόνα 29 Ανάδρομες τροχιές αερίων μαζών κατά την θερινή περίοδο μετρήσεων στην κατοικία στο προάστιο του Όσλο.	125
Εικόνα 30 Σχέση εσωτερικής με εξωτερική συγκέντρωση $A_{Σ_{10}}$	126
Εικόνα 31 (α) Σύγκριση του ρυθμού αερισμού υπό διάφορες συνθήκες στις δύο κατοικίες στο Όσλο. (β) Λόγος Εσ./Εξ. συγκέντρωσης $A_{Σ_{10}}$, ρυθμός αερισμού και θερμοκρασιακή διαφορά ΔT ($T_{εσ} - T_{εξ}$) στα δύο περιβάλλοντα υπό διάφορες συνθήκες. Οι κάθετες γραμμές αντιστοιχούν στην ελάχιστη και μέγιστη τιμή κάθε περίπτωσης (αναπροσαρμοσμένο από Lazaridis κ.α., 2006).	127
Εικόνα 32 Πλήθος λεπτών σωματιδίων στον εξωτερικό και εσωτερικό αέρα στις 11/06/02.	129
Εικόνα 33 Κατανομή μεγέθους σωματιδίων κατά τις περιόδους μετρήσεων στο Όσλο.	130
Εικόνα 34 Συγκέντρωση συστατικών $A_{Σ_{10}}$ στον εξωτερικό χώρο των κατοικιών κατά τις περιόδους μετρήσεων στο Όσλο.	130
Εικόνα 35 Συγκέντρωση συστατικών $A_{Σ_{10}}$ στον εσωτερικό χώρο των κατοικιών κατά τις περιόδους μετρήσεων στο Όσλο.	131
Εικόνα 36 Χημική σύσταση της μέσης κατανομής μεγέθους σωματιδίων στον εξωτερικό χώρο της κατοικίας στο προάστιο του Όσλο κατά την θερινή περίοδο μετρήσεων.	133
Εικόνα 37 Χημική σύσταση της μέσης κατανομής μεγέθους σωματιδίων στον εξωτερικό χώρο της κατοικίας στο προάστιο του Όσλο κατά την χειμερινή περίοδο μετρήσεων.	133
Εικόνα 38 Χημική σύσταση της μέσης κατανομής μεγέθους σωματιδίων στον εξωτερικό χώρο του διαμερίσματος στο κέντρο του Όσλο κατά την χειμερινή περίοδο μετρήσεων.	134
Εικόνα 39 Συγκέντρωση έκθεσης και δόση λεπτών και χονδρών σωματιδίων ΑΣ στο ΑΑΣ. Δίνονται ακόμα οι συγκεντρώσεις ΑΣ εσωτερικά και εξωτερικά της κατοικίας και στον σταθερό σταθμό μέτρησης ποιότητας αέρα Loren.	137
Εικόνα 40 Αθροιστική έκθεση, εφαρμοσμένη και εσωτερική δόση $A_{Σ_{10}}$ στο ΑΑΣ την περίοδο 03-04/06/02. Δίνονται ακόμα η ποσότητα που μεταφέρεται στο γαστρεντερικό σύστημα και στο αίμα.	137
Εικόνα 41 Σχέση μεταξύ έκθεσης και δόσης αιωρούμενων σωματιδίων.	139
Εικόνα 42 Έκθεση και εφαρμοσμένη δόση σωματιδίων στον εσωτερικό και εξωτερικό χώρο κατά την περίοδο 11-17/06/02. Δίνεται επιπλέον η έκθεση και δόση σε ατμοσφαιρικά ΑΣ εσωτερικά της κατοικίας και σε ΑΣ που παράγονται από πηγές στον εσωτερικό χώρο.	140
Εικόνα 43 Εφαρμοσμένη δόση (α) των ανόργανων συστατικών των λεπτών και χονδρών σωματιδίων στις 03/06/02 και (β) των ανθρακικών συστατικών των σωματιδίων (EC:στοιχειακός άνθρακας και OC:οργανικός άνθρακας) στις 07/06/02.	141

Εικόνα 44 Σημεία δειγματοληψίας ΑΣ ₄ και ΑΣ ₁₀ στο Πολυτεχνείο Κρήτης και σε διαμέρισμα στην περιοχή περιμετρικά του την περίοδο 11-18 Δεκεμβρίου 2007. Δίνεται επιπλέον η διαδρομή του ατόμου από την κατοικία προς το Πολυτεχνείο Κρήτης και αντίστροφα	143
Εικόνα 45 Σύγκριση των συγκεντρώσεων ΑΣ _{2,5} (μg/m ³) από τα όργανα SidePak και DustTrak κατά τις προκαταρκτικές μετρήσεις ελέγχου στο εσωτερικό της κατοικίας.	144
Εικόνα 46 Συγκεντρώσεις έκθεσης για ΑΣ ₁₀ και ΑΣ ₄ (ατομική) κατά την περίοδο μετρήσεων (μέσες ωριαίες τιμές; 11-18 Δεκεμβρίου, 2007).	145
Εικόνα 47 Μέση κατανομή ΑΣ ₁₀ κατά την περίοδο μετρήσεων (11-18 Δεκεμβρίου, 2007)...	147
Εικόνα 48 Ατομική έκθεση και εφαρμοσμένη δόση κατά την περίοδο μετρήσεων (11-18 Δεκεμβρίου, 2007).	148

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Χωρική διάσταση και δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την απόδοση των ανθρωπογενών εκπομπών στο πλέγμα της περιοχής μελέτης.	20
Πίνακας 2 Χημική σύσταση πτητικών υδρογονανθράκων. Πηγή: EMEP (1999).	24
Πίνακας 3 Κατηγορίες πηγών εκπομπής ΑΣ _{2,5} για το έτος 1999 και συντελεστές για τη χημική σύσταση των εκπομπών ΑΣ _{2,5} . Πηγή: Andersson-Sköld and Simpson (2001).	24
Πίνακας 4 Συντελεστές ημερήσιας διακύμανσης αερίων ρύπων ανά κατηγορία πηγής, στην Ελλάδα. Πηγή: Vestreng κ.α. (EMEP-MSC/W, 2003; Klein κ.α., 2004).	25
Πίνακας 5 Τιμές της παραμέτρου ρ για τον υπολογισμό της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος έκλυσης εκπομπών από σημειακή πηγή (US EPA, 1995β).	36
Πίνακας 6 Εξισώσεις υπολογισμού ανύψωσης πλουμίου στη μορφή $\Delta h = Exbusa$	37
Πίνακας 7 Μήκος τραχύτητας ανά κατηγορία εδαφοκάλυψης στο μοντέλο ISCLT3 (US EPA, 1995β).	42
Πίνακας 8: Διαστάσεις του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος σύμφωνα με το μοντέλο Weibel A, για πνεύμονες ενηλίκων με όγκο 4800 mL και περίπου $\frac{3}{4}$ διάταση λόγω της αναπνοής (Fung, 1990; ICRP, 1994).	53
Πίνακας 9: Σύγκριση μορφολογικών μοντέλων του ΑΑΣ για υπόλοιπη λειτουργική χωρητικότητα πνευμόνων 300 mL ($\approx \frac{1}{2}$ του όγκου των πνευμόνων). (d: Διάμετρος, l: Μήκος, n: Πλήθος ανά γενιά)	54
Πίνακας 10: Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων ανατομίας και φυσιολογίας που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα (ICRP, 1994).	58
Πίνακας 11: Κατανομή της εναπόθεσης μεταξύ τμημάτων κάθε περιοχής της αναπνευστικής οδού (ICRP, 1994).	73
Πίνακας 12 Ταχύτητα κίνησης του στρώματος βλέννας στην τραχειοβρογχική περιοχή του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος και αντίστοιχοι χρόνοι υποδιπλασιασμού (Asgharian κ.α., 2001; Lee κ.α., 1979).	76
Πίνακας 13: Τυπικοί παράμετροι απορρόφησης για σωματίδια τύπου F (Fast), M (Moderate) και S (Slow) (ICRP, 1994).	78
Πίνακας 14: Χαρακτηριστικά πρότυπων ατόμων (ICRP, 1994).	79
Πίνακας 15 Οι τιμές των παραμέτρων A, B, και C που χρησιμοποιούνται στην εξίσωση 105 για τον υπολογισμό των παραμέτρων ανατομίας του αναπνευστικού συστήματος του εκτεθειμένου ατόμου.	80
Πίνακας 16 Οι τιμές του κλάσματος F_n του αέρα που εισπνέεται από τη μύτη για άτομα που εισπνέουν από τη μύτη ή το στόμα.	80
Πίνακας 17: Προτεινόμενες τιμές παραμέτρων του μοντέλου εναπόθεσης για το κλάσμα του αέρα που λαμβάνεται με αναπνοή από μύτη, για οποιοδήποτε εκτεθειμένο άτομο, ως συναρτήσεις των μεταβλητών που σχετίζονται με την αναπνοή και την ανατομία (ICRP, 1994).	83

Πίνακας 18: Προτεινόμενες τιμές παραμέτρων του μοντέλου εναπόθεσης για το κλάσμα του αέρα που λαμβάνεται με αναπνοή από το στόμα, για οποιοδήποτε εκτεθειμένο άτομο, ως συναρτήσεις των μεταβλητών που σχετίζονται με την αναπνοή και την ανατομία (ICRP, 1994).	84
Πίνακας 19 Ρυθμοί μεταφοράς σωματιδίων στα τμήματα του αναπνευστικού συστήματος (ICRP, 1994).	90
Πίνακας 20 Ποσοστά εναπόθεσης (%) μονοδιάσπορων και πολυδιάσπορων αεροζόλ με μέση διάμετρο 5μm ($\sigma_g = 2.5$) στα τμήματα του αναπνευστικού συστήματος, υπολογισμένα με τα μοντέλα ExDoM, LUDEP (HRTM) και MPPD. Οι τιμές στις παρενθέσεις δίνουν το ποσοστό των σωματιδίων που αποτίθενται στην μύτη για την εκτός θώρακα περιοχή και στην τραχεία και τους βρόγχους για την τραχειοβρογχική περιοχή.	97
Πίνακας 21 Πληθυσμός ζώων και συντελεστές εκπομπής αερίων και σωματιδίων από την εκτροφή τους.	105
Πίνακας 22 Αγροτικές εκτάσεις (ha) και ποσότητα (kg N) εφαρμοζόμενου λιπάσματος ανά έτος.	106
Πίνακας 23 Εκπομπές από την ΕΠΑ στις 14/01/08 (Mg).	112
Πίνακας 24 Ημερολόγιο δραστηριοτήτων κατά τις περιόδους μετρήσεων στο Όσλο (αναπροσαρμογή από Lazaridis κ.α., 2009).	120
Πίνακας 25 Όργανα μέτρησης ΑΣ σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους κατά τις περιόδους των μετρήσεων στο Όσλο (μερικώς από Lazaridis κ.α., 2008α).	121
Πίνακας 26 Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία για την συγκέντρωση ΑΣ ₁₀ , O ₃ , NO ₂ , NO και τις τιμές των μετεωρολογικών παραμέτρων κατά τις περιόδους μετρήσεων (Lazaridis κ.α., 2006; 2007α; 2009).	122
Πίνακας 27 Σενάριο δραστηριότητας εκτεθειμένου ατόμου.	135
Πίνακας 28 Ημερήσια δόση (μg) λεπτών και χονδρών ΑΣ υπολογισμένη με τιμές της μέσης ωριαίας και ημερήσιας συγκέντρωσης έκθεσης.	138
Πίνακας 29 Συγκεντρώσεις ΑΣ ₁₀ κατά την περίοδο μετρήσεων (11-18 Δεκεμβρίου, 2007 – μέσες ωριαίες τιμές).	146
Πίνακας 30 Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία ωριαίας ατομικής έκθεσης (μg/m ³) και εφαρμοσμένης δόσης (μg) αναπνεύσιμων σωματιδίων κατά την περίοδο των μετρήσεων.	148

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Έκθεση

- C: η συγκέντρωση ΑΣ (μονάδες συγκέντρωσης, π.χ. $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Ex: συνολική έκθεση (συγκέντρωση \times χρόνος)
n: το πλήθος των διαφορετικών περιβαλλόντων στα οποία εκτίθεται το άτομο
t: η διάρκεια παραμονής (χρόνος)
δείκτης i: εκτεθειμένο άτομο
δείκτης j: περιβάλλον

Εκπομπές ρύπων στην ατμόσφαιρα

- A: έκταση γεωγραφικής μονάδας (μονάδες επιφάνειας π.χ. km^2)
CF: συντελεστής διόρθωσης των εκπομπών εξαιτίας της φυτοκάλυψης ή/και της παρουσίας αδιάβρωτων στοιχείων (αδιάστατο)
 C_L : συντελεστής διόρθωσης για διακυμάνσεις της ηλιακής ακτινοβολίας
 C_T : συντελεστής διόρθωσης για διακυμάνσεις της θερμοκρασίας
D: πυκνότητα φυλλώδης βιομάζας (g ξηρής φυλλώδης βιομάζας/ m^2)
E: εκπεμπόμενη ποσότητα ρύπου (μάζα/χρόνος, π.χ. $\text{Mg}/\text{έτος}$)
E: ρυθμός εκπομπής AS_{10} από το έδαφος ($\text{g}/\text{cm}^2\text{s}$)
E: ρυθμός εκπομπής ΒΠΟΕ (σε $\mu\text{g C}/\text{m}^2\text{h}$)
EF: συντελεστής εκπομπής ανά μονάδα επιφάνειας ($\text{Mg}/\text{km}^2\text{έτος}$ ή g/m^2)
ER: ρυθμός εκπομπής στην πορεία του επεισοδίου σκόνης ($\text{g}/\text{m}^2\text{h}$)
f: κλάσμα περιεκτικότητας του επιφανειακού στρώματος του εδάφους σε λάσπη και άργιλο
F: ροή σωματιδίων ($\text{σωματίδια}/\text{m}^2\text{s}$)
 F_a : κατακόρυφη ροή εκπομπών σκόνης ($\text{g}/\text{cm}^2\text{s}$)
l: μήκος του γεωγραφικού στοιχείου δρόμου (km)
L: φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (PAR; $\mu\text{mol photons}/\text{m}^2\text{s}$ στα 400 - 700 nm).
 M_d : μάζα ξηρού σωματιδίου (kg)
pop: πληθυσμός (αριθμός κατοίκων)
r: ακτίνα υγρού σωματιδίου (μm)
R: σταθερά των αερίων (8,314 J/K mol)
R: συντελεστής διόρθωσης/ελάττωσης που εξαρτάται από την εδαφοκάλυψη για τον υπολογισμό των εκπομπών εδαφικής σκόνης
 r_d : ακτίνα ξηρού σωματιδίου (μm)
RH: σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας (%)
RRF: συντελεστής αναφόρτισης της επιφάνειας (αδιάστατο)
T: διάρκεια επεισοδίου εκπομπής εδαφικής σκόνης (h)
T: θερμοκρασία φυλλώματος (K)
 T_s : τυπική θερμοκρασία (303 K)
U: ταχύτητα τριβής (cm/s)

U_z : κατώφλι ταχύτητας τριβής (cm/s)
 u : ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10 m από την επιφάνεια της θάλασσας (m/s)
 u_z : ταχύτητα του ανέμου (m/s) σε ύψος z (m)
 w : υγρασία της ατμόσφαιρας
 w' : κατώφλι υγρασίας του εδάφους
 wf : συντελεστής βαρύτητας των εκπομπών
 z_0 : μήκος επιφανειακής τραχύτητας (m)
 α : αδιάστατος συντελεστής που εξαρτάται από την υφή του εδάφους και την ταχύτητα τριβής του ανέμου ($10^{-3} - 10^{-4}$)
 γ : αδιάστατη περιβαλλοντική παράμετρος (συντελεστής διόρθωσης)
 δείκτης h : τιμή παραμέτρου σε ωριαία βάση
 δείκτης i : γεωγραφική/χωρική μονάδα
 δείκτης j : ρύπος
 δείκτης k : κατηγορία πηγών
 δείκτης l : κατηγορία εδαφοκάλυψης
 δείκτης x : αρχική χωρική μονάδα, αντιστοιχεί σε κελί του πλέγματος EMEP ή σε νομό/περιφέρεια
 δείκτης y : τιμή παραμέτρου σε ετήσια βάση
 ϵ : συντελεστής εκπομπής για κάθε είδος βλάστησης
 κ : σταθερά von Karman (= 0,4)
 ρ : πυκνότητα ξηρού θαλάσσιου άλατος ($\sim 2200 \text{ kg/m}^3$)

Διασπορά ρύπων στην ατμόσφαιρα

D : όρος εξασθένησης
 f : συχνότητα εμφάνισης
 F_b και F_m : παράμετροι ροής λόγω θερμικής άνωσης και ορμής, αντίστοιχα (m^4/s^3)
 F_d : ροή σωματιδίων στο έδαφος λόγω ξηρής εναπόθεσης ($\mu\text{g}/\text{m}^2\text{s}$)
 h_e : ενεργό ύψος της καμινάδας (m)
 h_s : φυσικό ύψος καμινάδας (m)
 K : συντελεστής για τη μετατροπή των μονάδων (τυπική τιμή 10^6 για ρυθμό εκπομπής σε g/s και συγκέντρωση σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
 p : παράμετρος που εξαρτάται από την κατηγορία ευστάθειας της ατμόσφαιρας και την περιοχή γύρω από την πηγή
 Q : ρυθμός εκπομπής (μάζα ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνο ή μάζα ανά μονάδα χρόνου)
 R : ακτινική απόσταση του αποδέκτη από πλευρική υποθετική σημειακή πηγή
 r : ακτινική συνιστώσα από την αρχή των αξόνων
 s : παράμετρος σταθερότητας (s^{-2})
 S : συνάρτηση ομαλοποίησης τιμών
 U_r : ταχύτητα στα 10m (m/s)
 u_{ref} : ταχύτητα ανέμου (m/s) στο ύψος αναφοράς z_{ref} (m)

u_s : μέση ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της καμινάδας (m/s)
 V : κατακόρυφο όριο
 v_d : ταχύτητα εναπόθεσης (m/s)
 V_{dn} : κατακόρυφο όριο υπολογισμένο λαμβάνοντας υπόψη την ξηρή εναπόθεση
 v_g : ταχύτητα βαρυτικής καθίζησης (m/s)
 x : απόσταση από την προσήνεμη πλευρά από το κέντρο της πηγής ως στον αποδέκτη μετρημένη κατά μήκος του άξονα του πλουμίου (m ή km)
 x_f : απόσταση στην οποία το πλούμιο φτάνει στο μέγιστο ύψος του (m)
 x_y : πλευρική εικονική απόσταση (m)
 y : πλευρική απόσταση του αποδέκτη από τον άξονα του πλουμίου (m)
 z_i : ύψος στρώματος ανάμιξης (m)
 z_r : ύψος του αποδέκτη από το έδαφος (m)
 A : ενεργός επιφάνεια πηγής (km²)
 Δh : ανύψωση πλουμίου (m)
 ΔT_c : κρίσιμη διαφορά θερμοκρασίας (K)
 δείκτης i : κατηγορία ταχύτητας ανέμου
 δείκτης j : κατηγορία διεύθυνσης ανέμου
 δείκτης k : κατηγορία ευστάθειας
 δείκτης l : εποχή
 $\Delta\theta'$: πλάτος τομέα (ακτίνια)
 ϵ : συντελεστής διαφυγής
 θ : γωνιακή συνιστώσα θέσης, μετρείται από το Βορά με τη φορά των δεικτών του ρολογιού
 σ_z και σ_{ze} : τυπική απόκλιση και διορθωμένη τυπική απόκλιση της κατακόρυφης κατανομής της συγκέντρωσης (m)
 T_s : θερμοκρασία πλουμίου (K)
 T_a : θερμοκρασία αέρα (K)
 φ_i : κλάσμα των σωματιδίων στην κατηγορία μεγέθους i
 χ : συγκέντρωση στο έδαφος (μg/m³)
 ψ : ρυθμός εξασθένησης (s⁻¹)

Ανάλυση αποδεκτών

C : πίνακας loadings
 c : πλήθος ρύπων
 D : αρχικός πίνακας δεδομένων
 n : πλήθος ανεξάρτητων πηγών
 R : πίνακας scores
 r : πλήθος δειγμάτων

Ανάλυση τροχιών των αερίων μαζών

d : απόσταση από τον αποδέκτη

R: ακτίνα της γής (6371 km)

λ: γεωγραφικό μήκος

φ: γεωγραφικό πλάτος

Μοντέλο μικροπεριβάλλοντος

C: συγκέντρωση ΑΣ στο μικροπεριβάλλον ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

k: ρυθμός απομάκρυνσης των ΑΣ από τον αέρα λόγω καθίζησης (h^{-1})

n: πλήθος χρονικών βημάτων

p: λόγος διείσδυσης

Q: ρυθμός εκπομπής ΑΣ από εσωτερικές πηγές ($\mu\text{g}/\text{h}$)

V: όγκος ομογενή αέρα στον εσωτερικό χώρο (m^3)

a: ρυθμός εξαερισμού ή ανταλλαγής αέρα με το περιβάλλον (h^{-1})

ΔT: χρονικό βήμα με σταθερή κατάσταση

Αναπνευστικό σύστημα – Δόση ΑΣ

C_f : συντελεστής τριβής

A: διατομή αεραγωγού (cm^2)

B : ρυθμός εισπνοής (m^3/h)

C: συγκέντρωση σωματιδίων ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

C_c : συντελεστής Cunningham

c_k : συντελεστής διόγκωσης της γενιάς

$d(z)$: διάμετρος αεραγωγών γενιάς z (cm)

d: διάμετρος αγωγού του αναπνευστικού συστήματος (cm)

D: συντελεστής διάχυσης (cm^2/s)

d_0 : διάμετρος τραχείας (cm)

d_{16} : διάμετρος του πρώτου αναπνευστικού βρογχιολίου (cm)

d_9 : διάμετρος του πρώτου βρογχιολίου (cm)

d_a : διάμετρος κυψελίδας

d_{ae} : αεροδυναμική διάμετρος σωματιδίου (μm)

D_{app} ή H: ρυθμός εφαρμοσμένης δόσης ($\mu\text{g}/\text{h}$)

DE: κλάσμα εναπόθεσης ΑΣ σε κάθε περιοχή (φίλτρο) του ΑΑΣ

d_e : φυσική ή άλλη ισοδύναμη διάμετρος σωματιδίου (cm ή μm)

d_m : mobility διάμετρος ΑΣ

d_p : διάμετρος σωματιδίου (cm)

D_{pot} : ρυθμός δυναμική δόσης ($\mu\text{g}/\text{h}$)

d_{th} : θερμοδυναμική διάμετρος ΑΣ (μm)

e: στοιχειώδες φορτίο

f: συχνότητα εισπνοής (εισπνοές/min)

F_n : κλάσμα αέρα που εισπνέεται από τη μύτη

f_r : κλάσμα σωματιδιακής ύλης που διαλύεται γρήγορα

f_r : κλάσμα σωματιδιακής ύλης που παραμένει δεσμευμένο
 f_s : κλάσμα σωματιδιακής ύλης που απομακρύνεται με αργό ρυθμό
 h : ύψος ατόμου (cm)
 k : σταθερά Boltzmann ($0,013622779 \times 10^{-23}$)
 K_n : αριθμός Knudsen
 $l(z)$: μήκος αεραγωγών γενιάς z (cm)
 l : μήκος αεραγωγού (cm)
 L : ρυθμός εναπόθεσης ανά μονάδα μήκους του αεραγωγού
 m : ρυθμός μηχανικής μεταφοράς ΑΣ στο ΑΑΣ (d^{-1})
 $n(z)$: πλήθος αεραγωγών ανά γενιά z
 n_0 : εισπνεύσιμο κλάσμα
 n_{ae} , και n_{th} : ποσοστά απόθεσης ΑΣ εξαιτίας πρόσκρουσης και διασποράς, αντίστοιχα
 $n_{i,j}$: συγκράτηση (εναπόθεση) σωματιδίων μεγέθους i στην περιοχή j των πνευμόνων
 P : ποσοστό εναπόθεσης
 Pe : αριθμός Peclet
 Q : παροχή αέρα (cm^3/s).
 r : ακτίνα γωνίας διακλάδωσης αεραγωγών
 R : διάμετρος κύρτωσης (cm)
 R : συσσωρευμένη ποσότητα ΑΣ σε περιοχή του ΑΑΣ
 $S(z)$: ολική επιφάνεια αεραγωγών γενιάς z (cm^2)
 s : ρυθμός απορρόφησης ΑΣ στο ΑΑΣ (d^{-1})
 s_b : ρυθμός λήψης δεσμευμένου υλικού (d^{-1})
 Sc : αριθμός Schmidt
 SF : παράμετροι που εκφράζουν την ανατομική διαφοροποίηση μεταξύ ατόμων
 s_p : αρχικός ρυθμός διάλυσης (d^{-1})
 s_{pt} : ρυθμός μετατροπής (d^{-1})
 s_r : ταχύς ρυθμός διάλυσης (d^{-1})
 s_s : αργός ρυθμός διάλυσης (d^{-1})
 s_t : τελικός ρυθμός διάλυσης (d^{-1})
 Stk : αριθμού Stokes των σωματιδίων:
 t : χρόνος μετά την έκθεση
 t_B , t_b και t_A : χρόνοι μετάβασης του αέρα στις περιοχές BB, bb και AI
 \bar{u} : μέση ταχύτητα αέρα στον αεραγωγό (cm/s)
 U : ταχύτητα ανέμου στο περιβάλλον έκθεσης του ατόμου (m/s)
 u_0 : ταχύτητα της βλέννας στην τραχεία (mm/min)
 u_s : ταχύτητα εναπόθεσης σωματιδίων (cm/s).
 V : ογκομετρική παροχή αέρα (mL/s)
 $V(z)$: ολικός όγκος αεραγωγών γενιάς z (cm^3)
 V_j : όγκος της περιοχής j του ΑΑΣ
 $V_{n,k}$: ο μέσος όγκος του αεραγωγού n της γενιάς k (cm^3)

V_T : όγκος που λαμβάνεται ανά εισπνοή (mL)
x: απόσταση από την τραχεία
 x_e : μήκος εισόδου
z: πλήθος φορτίων ανά σωματίδιο
α: ποσοστό λεπτών σωματιδίων
δείκτης z: γενιά ΑΑΣ
 ΔP : πτώση πίεσης κατά μήκος των αεραγωγών
 ϵ_0 : διηλεκτρική σταθερά του κενού
 θ_b : γωνία διακλάδωσης των αεραγωγών (°)
 θ_g : γωνία της δύναμης της βαρύτητας (°)
λ: μέσο ελεύθερο μήκος των σωματιδίων του αέρα (=0,0683 μm σε θερμοκρασία 37°C, 100% σχετική υγρασία και ατμοσφαιρική πίεση 76 cm Hg)
λ: στιγμιαίος ρυθμός καθαρισμού
 μ_C ή μ_F : διάμεσος τιμή λογαριθμικής κανονικής κατανομής για χονδρά (C) και λεπτά (F) ΑΣ
 μ : δυναμικό ιξώδες του αέρα ($1,90 \times 10^{-4}$ Poise)
 ν : κινηματικό ιξώδες αέρα (cm^2/s)
N: πλήθος φίλτρων
 ρ_0 : πυκνότητα αέρα (g/cm^3)
 ρ_p : πυκνότητα σωματιδίου (g/cm^2)
 σ_g : γεωμετρική σταθερή απόκλιση λογαριθμικής κανονικής κατανομής
 τ ή τ_p : particle relaxation time (s)
T: απόλυτη θερμοκρασία (310,15 K)
 T_{in} και T_{ex} : διάρκεια εισπνοής και εκπνοής
 ϕ : ποσοστό του όγκου αέρα που διαρρέει μια περιοχή (φίλτρο) του ΑΑΣ
 χ : συντελεστής σχήματος σωματιδίων
 ψ_{th} : εμπειρικός συντελεστής για την προσομοίωση της εναπόθεσης μικρών σωματιδίων στους βρόγχους λόγω τυρβώδους ροής