



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**«Έκθεση και επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία σε
χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων από
αιωρούμενα σωματίδια»**

**ΧΑΛΒΑΤΖΑΚΗ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑ
Μηχ. Περιβάλλοντος, Msc**

Επιβλέπων Καθηγητής

Μιχαήλ Λαζαρίδης

Χανιά, 2016

Επταμελής εξεταστική επιτροπή:

Μ. Λαζαρίδης, Καθηγητής, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης (Επιβλέπων)

Ν. Καλογεράκης, Καθηγητής, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης (Μέλος τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής)

Χ. Χουσιάδας, Ερευνητής Α΄, Ινστιτούτο Πυρηνικών & Ραδιολογικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Ενέργειας & Ασφάλειας (ΙΠΡΕΤΕΑ), ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος (Μέλος τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής)

Ι. Τσομπανάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης

Δ. Βενιέρη, Επίκουρη Καθηγήτρια, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης

Δ. Κολοκοτσά, Επίκουρη Καθηγήτρια, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης

Ε. Κατσιβελα, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Μηχανικών Φυσικών Πόρων & Περιβάλλοντος, ΤΕΙ Κρήτης

Ευχαριστίες

Η παρούσα διδακτορική διατριβή με τίτλο «Έκθεση και επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων από αιωρούμενα σωματίδια» εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ατμοσφαιρικών Αιωρούμενων Σωματιδίων της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Περιβαλλοντική και Υγειονομική Μηχανική», υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Μιχαήλ Λαζαρίδη. Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου Μιχαήλ Λαζαρίδη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε από την αρχή της διατριβής και την πολύτιμη συνεισφορά του με υποδείξεις κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής τον Καθηγητή Νικόλαο Καλογεράκη και τον Ερευνητή Α' Χρήστο Χουσιάδα για τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσαν στο να μελετήσουν τη διατριβή και για τις παρατηρήσεις τους. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα άλλα τέσσερα μέλη της επταμελούς επιτροπής, τον Αναπληρωτή Καθηγητή Ιωάννη Τσομπανάκη, την Επίκουρη Καθηγήτρια Δανάη Βενιέρη, την Επίκουρη Καθηγήτρια Διονυσία Κολοκοτσά και την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ελευθερία Κατσίβελα, για την ευγενική διάθεση τους να μελετήσουν και να αξιολογήσουν την εργασία αυτή.

Επιπλέον θα ήθελα να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στο Δρ. Ηλία Κοπανάκη για την πολύτιμη βοήθεια του στις πειραματικές μετρήσεις. Επίσης αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω τον Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος κ. Νικόλαο Νικολαΐδη και τη συνεργάτιδα του κα. Maria-Liliana Saru για τη βοήθεια στη χημική ανάλυση για την εύρεση των μετάλλων της αιωρούμενης σωματιδιακής σκόνης. Επίσης την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια κα. Ελευθερία Κατσίβελα και τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Νικόλαο Λυδάκη–Σημαντήρη για την παροχή υλικοτεχνικής υποδομής για την πραγματοποίηση μέρους των πειραματικών μετρήσεων στο Εργαστήριο Περιβαλλοντικής Χημείας και Βιοχημικών Διεργασιών του Τμήματος Μηχανικών Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος του ΤΕΙ Κρήτης.

Για την προσφορά πολύτιμων δεδομένων τα οποία ήταν απαραίτητα για την εκπόνηση της εργασίας αυτής θα ήθελα ιδιαίτερα να ευχαριστήσω τον κ. Μιχαήλ Κονταξάκη (Διευθυντή ΧΥΤ και υπεύθυνο γραφείου προγραμματισμού) και τον κ. Κωνσταντίνο Πατεράκη (Διευθυντή Εργοστασίου Μηχανικής Ανακύκλωσης και Κομποστοποίησης). Ευχαριστώ επίσης τη Δρ. Βικτωρία Αλεξανδροπούλου για τις πολύτιμες επιστημονικές συμβουλές που μου πρόσφερε σε θέματα δοσιμετρίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω συνολικά όλους τους συναδέλφους στο Εργαστήριο Ατμοσφαιρικών Αιωρούμενων Σωματιδίων της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, κατ' αρχήν τον Δρ. Θεόδωρο Γλυτσό, καθώς και τους υποψηφίους Διδάκτορες Έλενα Μαμμή-Γαλάνη, Norbert Serfozo και Σοφία-Ειρήνη Χατουτσίδου. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Υπολογιστών Μάνο Παπαγιαννάκη για τη δημιουργία του γραφικού περιβάλλον διεπαφής χρήστη (GUI) και της δυναμικής ιστοσελίδας στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής του εργασίας στη Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Ελευθερία Χαλβατζάκη
Χανιά, Φεβρουάριος 2016

Περίληψη-Στόχοι διατριβής

Η έκθεση των ανθρώπων σε αιωρούμενα σωματίδια αποτελεί αντικείμενο έντονου επιστημονικού ενδιαφέροντος λόγω των επιπτώσεων τους στην ανθρώπινη υγεία. Οι υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων που καταγράφονται σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ), καθώς και η συσχέτιση που αυτές παρουσιάζουν με αρνητικά συμπτώματα στην ανθρώπινη υγεία, ανέδειξαν την ανάγκη μελέτης της προσωπικής έκθεσης και δόσης σε αιωρούμενα σωματίδια που προέρχονται από ΧΥΤΑ.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στους εργαζόμενους της μονάδας διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων. Η μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων αποτελείται από τον Χώρο Υγειονομικής Ταφής (ΧΥΤ) και από το Εργοστάσιο Μηχανικής Ανακύκλωσης και Κομποστοποίησης (ΕΜΑΚ). Για τον υπολογισμό της εσωτερικής δόσης αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο σώμα πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις συγκεντρώσεων μάζας αιωρούμενων σωματιδίων, μετρήσεις κατανομής μεγέθους της μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων και χημικές αναλύσεις για την περιεκτικότητα των αιωρούμενων σωματιδίων σε μέταλλα.

Επίσης, υπολογίστηκαν οι ρυθμοί εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους της μονάδας. Φυσικές διεργασίες (αιολική διάβρωση) και ανθρώπινες δραστηριότητες (κίνηση των απορριμματοφόρων και χειροδιαλογή απορριμμάτων) επίσης εξετάστηκαν. Η μελέτη διαφόρων δραστηριοτήτων στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων και η επίδραση τους στην ατμοσφαιρική ρύπανση εξετάστηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Συγκεκριμένα, οι ρυθμοί εκπομπής των εξωτερικών χώρων χρησιμοποιήθηκαν ως παράμετροι εισόδου σε μοντέλο διασποράς για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων σε εξωτερικούς χώρους. Η σημαντικότερη πηγή αιωρούμενων σωματιδίων στους εξωτερικούς χώρους της μονάδας διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων είναι η επαναιώρηση σκόνης λόγω της κίνησης των απορριμματοφόρων σε δρόμους. Επιπλέον, εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων δημιουργούνται από την αιολική διάβρωση των σωρών του κομπόστ και της χωματοκάλυψης του ΧΥΤ (landfill cover).

Τα αιωρούμενα σωματίδια εισέρχονται στον ανθρώπινο οργανισμό κυρίως μέσω της αναπνευστικής οδού. Τα σωματίδια που εναποτίθενται στο αναπνευστικό σύστημα μεταφέρονται στη συνέχεια στο υπόλοιπο σώμα. Η προσομοίωση των μηχανισμών με τους οποίους τα αιωρούμενα σωματίδια εισέρχονται στον οργανισμό, εναποτίθενται, συσσωρεύονται και μεταφέρονται στη συνέχεια στο υπόλοιπο σώμα πραγματοποιείται με μοντέλα δοσιμετρίας.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε ένα μοντέλο δοσιμετρίας (ExDoM2) για τον υπολογισμό της εσωτερικής δόσης των αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο σώμα. Το μοντέλο ExDoM2 αποτελείται από ένα αναθεωρημένο μοντέλο εναπόθεσης/απομάκρυνσης σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα (αναβαθμισμένη έκδοση του ExDoM) και από ένα φαρμακοκινητικό (PBPK) μοντέλο. Το αναθεωρημένο μοντέλο εναπόθεσης/απομάκρυνσης σωματιδίων ενσωματώνει νέους μηχανισμούς καθαρισμού σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα και χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της εναποτιθέμενης δόσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα, την κατακράτηση/συσσώρευση (retention) τους σε αυτό, τη μεταφορά τους στον οισοφάγο (γαστρεντερικό σύστημα) και στους λεμφαδένες και την απορρόφηση τους στο αίμα. Το PBPK μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για τη μεταφορά των μετάλλων (As, Pb, Cd, Cr και Mn) που περιέχουν τα αιωρούμενα σωματίδια από το αίμα στο ανθρώπινο σώμα (π.χ. συκώτι, καρδιά, νεφροί, εγκέφαλος, γαστρεντερικό σύστημα).

Η σημαντικότερη διαφορά στο μοντέλο ExDoM2 που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας από τα υπόλοιπα μοντέλα (π.χ. ExDoM, MPPD) που έχουν αναπτυχθεί στη διεθνή βιβλιογραφία είναι ότι ενσωματώνει ένα PBPK μοντέλο για συγκεκριμένα μέταλλα (As, Pb, Cd, Cr και Mn) που περιέχουν τα αιωρούμενα σωματίδια. Επιπλέον, το μοντέλο εναπόθεσης/απομάκρυνσης σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα του ExDoM2 ενσωματώνει νέους μηχανισμούς καθαρισμού σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα με βάση το αναθεωρημένο μοντέλο της Διεθνούς Επιτροπής Ακτινοπροστασίας (ICRP) και επιπλέον επιτρέπει στο χρήστη να εισάγει διαφορετικές μετρήσεις κατανομής μεγέθους σωματιδίων (ανά ώρα) για τον καθορισμό ρεαλιστικού σεναρίου έκθεσης του ανθρώπου σε διαφορετικά μικροπεριβάλλοντα κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εφαρμογή του μοντέλου ExDoM2 προήλθαν από μετρήσεις πεδίου στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων. Επιλέχθηκαν προς μελέτη τέσσερις κατηγορίες ατόμων: (α) εργαζόμενοι στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου (β) εργαζόμενοι στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής (πρώτη βάρδια), (γ) εργαζόμενοι στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής (δεύτερη βάρδια) και (δ) μη-εργαζόμενοι στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων. Ο σκοπός της χρήσης διαφορετικών σεναρίων έκθεσης είναι να καθορίσει εάν η δόση σωματιδίων των εργαζομένων στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων είναι αυξημένη σε σύγκριση με εκείνη του γενικού πληθυσμού της περιοχής.

ABSTRACT

The human exposure to particulate matter is a subject of increasing scientific interest due to the effects of particulate matter on human health. The high concentrations of particulate matter observed in landfills and the adverse health effects associated with high particulate matter concentrations make the study of personal exposure and consequent dose from particulate matter present in landfill sites necessary.

The current study focus of workers in the waste management facility of the Prefecture of Chania. The waste management facility of the Prefecture of Chania consists of the landfill and the Mechanical Recycling and Composting Plant. For the calculation of the internal particle dose in the human body were performed particle mass concentrations measurements, particle mass size distributions measurements and chemical analyzes for the determination of the metal content in the particulate matter.

In addition, indoor and outdoor particulate matter emission rates were estimated. Natural process (wind erosion) and anthropogenic process (movement of refuse trucks and manual sorting of waste) were also examined. The study of the different activities in the waste management facility of the Prefecture of Chania and their influence on the air pollution were examined in the current work. In particular, the outdoor emission rates were used as input parameter to a dispersion model in order to calculate the outdoor particulate matter concentrations. The most important source of particulate matter in the outdoor waste management facility of the Prefecture of Chania is the resuspension of dust due to refuse truck movement on roads. In addition, particulate matter emissions generated by wind erosion of compost piles and landfill cover.

Particulate matter enters the human body mainly through the respiratory tract. The deposited particles in the respiratory tract transferred to the rest of the body. Simulation of the mechanisms through which the particulate matter entering the body, are deposited, accumulated and transferred to the rest of the body performed from dosimetry models. In the current study developed a dosimetry model (ExDoM2) for calculating internal dose of particles in the human body. The ExDoM2 model consists of a revised respiratory tract

deposition/clearance model (updated version of the ExDoM) and a pharmacokinetic (PBPK) model. The revised respiratory tract deposition/clearance model incorporating new particle clearance mechanisms in the respiratory tract and was used to calculate the deposited dose of particles in the respiratory tract, the retention of particles in the respiratory tract, the transport of particles to the oesophagus (gastrointestinal tract) and lymph nodes, and the absorption to blood. The PBPK model was used for the transport of metals (As, Pb, Cd, Cr and Mn) from the blood in the human body (e.g. liver, heart, kidneys, brain, gastrointestinal tract).

The major difference in the ExDoM2 model developed in the current study compared to other models (e.g. ExDoM, MPPD) in the scientific literature is that it incorporates a PBPK module for specific metals (As, Pb, Cd, Cr and Mn) of particles. In addition, the respiratory tract deposition/clearance model of the ExDoM2 incorporating new particle clearance mechanisms in the respiratory tract based on the revised model of the ICRP and also allows the user to enter different particle size distribution measurements (per hour) for determining realistic human exposure at different microenvironments during the day.

The input data for the model implementation were derived from field measurements in the waste management facility of the Prefecture of Chania. They were selected four categories of exposed individuals: (a) workers at the outdoor weighing facility, (b) workers at the indoor site of manual waste sorting (first shift), (c) workers at the indoor site of manual waste sorting (second shift) and (d) non-workers in the waste management facility of the Prefecture of Chania. The objective of using different exposure scenarios is to determine whether the particulate matter dose of workers in the waste management facility of the Prefecture of Chania is increased compared to that of the general population in the area.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
ΧΩΡΟΙ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗΣ ΤΑΦΗΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ.....	1
1.1. <i>Εισαγωγή στη διαχείριση των αστικών στερεών απορριμμάτων</i>	<i>1</i>
1.2. <i>Εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων από χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων.....</i>	<i>3</i>
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	6
ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ.....	6
2.1. <i>Εισαγωγή στα αιωρούμενα σωματίδια.....</i>	<i>6</i>
2.2. <i>Πηγές αιωρούμενων σωματιδίων</i>	<i>9</i>
2.3. <i>Χημική σύσταση αιωρούμενων σωματιδίων</i>	<i>10</i>
2.4. <i>Πρότυπα ποιότητας αέρα για αιωρούμενα σωματίδια.....</i>	<i>12</i>
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	14
ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ...	14
3.1. <i>Εισαγωγή στα μοντέλα διασποράς.....</i>	<i>14</i>
3.2. <i>Εισαγωγή στο μοντέλο διασποράς της Αμερικανικής Υπηρεσίας Προστασίας του Περιβάλλοντος</i>	<i>15</i>
3.3. <i>Επίδραση μετεωρολογικών παραμέτρων στη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων.....</i>	<i>17</i>
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	20
ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΡΑΣΗΣ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΑΝΑΠΝΕΥΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	20

4.1. Περιγραφή της ανατομίας και φυσιολογίας του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος	20
4.2. Μηχανισμοί εναπόθεσης αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα	22
4.3. Μηχανισμοί απομάκρυνσης σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα	23
4.4. Οι επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα	25

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 528

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΔΟΣΗΣ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΣΩΜΑ (EXDOM2)28

5.1. Εισαγωγή-περίληψη του μοντέλου	28
5.2. Ανάπτυξη αναθεωρημένου μοντέλου εναπόθεσης/απομάκρυνσης σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα	30
5.3. Ανάπτυξη φαρμακοκινητικού (PBPK) μοντέλου.....	40
5.4. Δεδομένα εισόδου για το μοντέλο ExDoM2	58

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 662

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΣΤΑΘΜΟΥ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ ...62

6.1. Περιγραφή περιοχής μελέτης	62
6.2. Περιγραφή σταθμού υποβάθρου.....	64

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 766

ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ66

7.1.	Περιγραφή οργάνων μέτρησης μετεωρολογικών παραμέτρων.....	66
7.2.	Μεθοδολογία εκτίμησης κλάση ισορροπίας.....	67
7.3.	Μεθοδολογία εκτίμησης ύψους ανάμιξης	68
7.4.	Αποτελέσματα μετεωρολογικών παρατηρήσεων	70

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 878

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ.....78

8.1.	Περιγραφή οργάνων μέτρησης συγκέντρωσης μάζας αιωρούμενων σωματιδίων	78
8.1.1.	Όργανο μέτρησης συγκέντρωσης μάζας αιωρούμενων σωματιδίων FH 62 I-R.....	78
8.1.2.	Φορητά όργανα μέτρησης συγκέντρωσης μάζας αιωρούμενων σωματιδίων (Dustrack).....	79
8.2.	Περιγραφή οργάνων μέτρησης κατανομής μεγέθους σωματιδίων και περιεκτικότητας βαρέων μετάλλων στα αιωρούμενα σωματίδια.....	80
8.2.1.	Διαχωριστής πρόσκρουσης σωματιδίων οκτώ σταδίων (Andersen impactor)	80
8.2.2.	Φασματοφωτόμετρο μάζας με επαγωγική σύζευξη πλάσματος (ICP-MS).....	81
8.3.	Μεθοδολογία πειραματικών μετρήσεων	82
8.3.1.	Μεθοδολογία μέτρησης της συγκέντρωσης μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων.....	82
8.3.2.	Μεθοδολογία μέτρησης της κατανομής μεγέθους της μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων.....	83
8.3.3.	Μεθοδολογία μέτρησης της χημικής σύστασης (μέταλλα) των αιωρούμενων σωματιδίων.....	84

8.4.	Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων.....	85
8.4.1.	Αποτελέσματα συγκεντρώσεων μάζας αιωρούμενων σωματιδίων στο σταθμό υποβάθρου	85
8.4.2.	Αποτελέσματα συγκεντρώσεων μάζας αιωρούμενων σωματιδίων στον ΕΜΑΚ Χανίων.....	86
8.4.3.	Αποτελέσματα κατανομή μεγέθους μάζας αιωρούμενων σωματιδίων στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων.....	88
8.4.4.	Αποτελέσματα της περιεκτικότητας των αιωρούμενων σωματιδίων σε μέταλλα στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων.....	91

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9100

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΡΥΘΜΩΝ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ100

9.1.	Μεθοδολογία εκτίμησης ρυθμών εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων σε εξωτερικούς χώρους	100
9.1.1.	Εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων που προκαλούνται από την κίνηση των απορριμματοφόρων.....	100
9.1.2.	Εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων που προκαλούνται από τον άνεμο	101
9.1.3.	Εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων που προκαλούνται από τον άνεμο σε σωρούς υλικών	102
9.2.	Μεθοδολογία εκτίμησης ρυθμών εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους.....	103

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10105

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΡΥΘΜΩΝ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ105

10.1. Εφαρμογή μεθοδολογίας εκτίμησης ρυθμών εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων που προκαλούνται από την κίνηση των απορριμματοφόρων	105
10.2. Εφαρμογή μεθοδολογίας εκτίμησης ρυθμών εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων που προκαλούνται από τον άνεμο	109
10.3. Εφαρμογή μεθοδολογίας εκτίμησης ρυθμών εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων που προκαλούνται από τον άνεμο σε σωρούς υλικών	111
10.4. Εφαρμογή μοντέλου ισοζυγίου μάζας	113
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11	117
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	117
11.1. Προετοιμασία δεδομένα εισόδου για το μοντέλο διασποράς.....	117
11.2. Αποτελέσματα μοντέλου διασποράς.....	119
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12	126
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑΣ (EXDOM2) ΣΤΗ ΜΟΝΑΔΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ ΤΟΥ Ν. ΧΑΝΙΩΝ	126
12.1. Εφαρμογή μοντέλου ExDoM2 για εργαζόμενο στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου	126
12.2. Εφαρμογή μοντέλου ExDoM2 για εργαζόμενο στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής	145
12.3. Σύγκριση μοντέλου ExDoM2 με υφιστάμενα μοντέλα δοσιμετρίας.....	161
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 13	169
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ..	169
13.1. Συμπεράσματα	169

13.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	174
13.3. Συμβολή της έρευνας και στοιχεία καινοτομίας.....	175
13.4. Δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια	177
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 14	179
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	179
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	190
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	190
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	192
ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ICRP ΓΙΑ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ	192
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ	195
ΡΥΘΜΟΙ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΑΙΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΟΓΚΟΙ ΟΡΓΑΝΩΝ.....	195
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ	198
ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ RBK ΜΟΝΤΕΛΟ	198
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε	201
ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ	201
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ζ	203
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ExDoM2 ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟΥΣ ΣΤΟΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΧΩΡΟ ΧΕΙΡΟΔΙΑΛΟΓΗΣ (2^η ΒΑΡΔΙΑ)	203

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Οι κυριότερες ανθρωπογενείς και φυσικές πηγές εκπομπής μετάλλων (ιχνοστοιχείων και βαρέων μετάλλων) (Βαλαβανίδης, 2003).....	11
Πίνακας 2: Οριακές τιμές για τα PM_{10} και $PM_{2,5}$ (Οδηγία 2008/50/ΕΚ).....	12
Πίνακας 3: Προτεινόμενα όρια από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO, 2006).....	13
Πίνακας 4: Βασικές παράμετροι ανατομίας του αναπνευστικού συστήματος για ενήλικες άνδρες και γυναίκες (ICRP, 1994).....	32
Πίνακας 5: Διαφοροποίηση των τιμών F_R , V_T και B ανάλογα με τη σωματική δραστηριότητα και το φύλο του εκτιθέμενου ατόμου (ICRP, 1994).....	35
Πίνακας 6: α) Τυπικές παράμετροι απορρόφησης για σωματίδια τύπου F (γρήγορη), M (μέτρια), ή S (αργή) που βασίζονται στην ICRP(1994) και β) οι τυπικές παράμετροι απορρόφησης που βασίζονται στην ICRP(2015).....	38
Πίνακας 7: Οι παράμετροι εισόδου που χρησιμοποιούνται στο PBPK μοντέλο για το As (Liao κ.ά., 2008; Chou κ.ά., 2009).....	45
Πίνακας 8: Οι παράμετροι εισόδου και οι συντελεστές κατανομής οργάνου/αίματος που χρησιμοποιούνται στο PBPK μοντέλο για τον Pb (Sharma κ.ά., 2005).....	48
Πίνακας 9: Συντελεστές κατανομής P_i για το Mn (Schroeter κ.ά., 2011).....	50
Πίνακας 10: Εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο ExDoM2 για το Cd (υιοθετήθηκαν/προσαρμόστηκαν από Kjellstrom και Nordberg, 1978).....	53
Πίνακας 11: Παράμετροι που χρησιμοποιούνται στο ExDoM2 για το Cd (υιοθετήθηκαν/προσαρμόστηκαν από Kjellstrom και Nordberg, 1978).....	54
Πίνακας 12: Οι σημαντικότερες παράμετροι εισόδου που χρησιμοποιούνται στο PBPK μοντέλο για το Cr^{3+} (O'Flaherty κ.ά., 2001).....	56
Πίνακας 13: Κλάσεις ισορροπίας κατά τροποποιημένο Pasquill (Mohan και Siddiqui, 1998).....	68
Πίνακας 14: Τιμές συντελεστών (X,Y) σε συνάρτηση των κλάσεων ισορροπίας.....	69
Πίνακας 15: Ώρες βροχής για τους μήνες Μάρτιο (Άνοιξη), Αύγουστο (Καλοκαίρι), Σεπτέμβριο (φθινόπωρο) και Δεκέμβριο (χειμώνας) του έτους 2010.....	74

Πίνακας 16: Συγκεντρώσεις μετάλλων (ng/m^3) στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου που προσδιορίστηκαν για τα 9 στάδια συλλογής σωματιδιακής ύλης με τον προσκρουστήρα Andersen.....	92
Πίνακας 17: Συγκεντρώσεις μετάλλων (ng/m^3) στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής που προσδιορίστηκαν για τα 9 στάδια συλλογής σωματιδιακής ύλης.....	95
Πίνακας 18: Ρυθμοί εκπομπής PM_{10} (μέσες τιμές) κατά τη διάρκεια μιας εργάσιμης μέρας.	115
Πίνακας 19: Σενάριο δραστηριότητας εκτιθέμενου ατόμου.....	127
Πίνακας 20: Σενάριο δραστηριότητας των τριών εκτιθέμενων ατόμων.....	146

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Πυραμίδα ιεράρχησης των επιλογών διαχείρισης στερεών απορριμμάτων σύμφωνα με την οδηγία 2008/98/ΕΚ.	1
Εικόνα 2: Κατάταξη αιωρούμενων σωματιδίων ανάλογα με τον τρόπο σχηματισμού τους (Seinfeld και Pandis, 2006).	6
Εικόνα 3: Σχηματικό διάγραμμα κατανομής του ατμοσφαιρικού αερολύματος σε σχέση με τις πηγές εκπομπής και τις κύριες διεργασίες σχηματισμού αιωρούμενων σωματιδίων (Finlaynson –Pitts και Pitts, 2000; Γεντεκάκης, 2003; Λαζαρίδης, 2008).	8
Εικόνα 4: Δομή μοντέλου διασποράς ISC3-ST για επιφανειακή πηγή.....	16
Εικόνα 5: Επίδραση της ατμοσφαιρικής ισορροπίας στις συγκεντρώσεις από μια ανυψωμένη πηγή. α. Ουδέτερη στρωμάτωση, b. Ευσταθείς συνθήκες, c. Ασταθείς συνθήκες (Μελάς, 2007).	18
Εικόνα 6: Ανατομία αναπνευστικού συστήματος (Tu κ.ά., 2013).	20
Εικόνα 7: Μηχανισμοί εναπόθεσης αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα (Hussain, 2011).	22
Εικόνα 8: Μηχανισμοί απομάκρυνσης σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα (Hussain, 2011).	24
Εικόνα 9: Επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα (Pope and Dockery, 2006; Anderson κ.ά., 2012).	26
Εικόνα 10: Διαίρεση του αναπνευστικού συστήματος σε περιοχές με βάση την ICRP.	31
Εικόνα 11: Αντιστοίχιση του κάθε φίλτρου με τις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος (αριστερά: εισπνοή από τη μύτη (1-9 φίλτρα), δεξιά: εισπνοή από το στόμα (1-7 φίλτρα)). ...	32
Εικόνα 12: (α) Μοντέλο καθαρισμού σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα που βασίζεται στην ICRP (1994) και (β) Αναθεωρημένο μοντέλο καθαρισμού σωματιδίων που βασίζεται στην ICRP (2015). Οι αριθμοί είναι οι ρυθμοί μεταφοράς (d^{-1}) σε κάθε τμήμα της πορείας που ακολουθεί το σωματίδιο.	36
Εικόνα 13: Σχηματική αναπαράσταση του PBPK μοντέλου για το As.	42
Εικόνα 14: Σχηματική απεικόνιση του πολυδιασμερισματικού PBPK μοντέλου για τον Pb. ...	46
Εικόνα 15: Σχηματική απεικόνιση του PBPK μοντέλου για το Mn.	49

Εικόνα 16: Σχηματική αναπαράσταση του κινητικού μοντέλου για το Cd (υιοθετήθηκε/προσαρμόστηκε από Kjellstrom και Nordberg, 1978). A: αέρας, G: πρόσληψη στο γαστρεντερικό, E1: πνεύμονες (συγκεκριμένα κυψελιδική περιοχή), E2: έντερα, B1: πλάσμα, B2: ερυθρά αιμοσφαίρια, B3: μεταλλοθειονίνη, T: υπόλοιπο σώμα, L: συκώτι, K: νεφροί, F: κόπρανα, U: ούρα.	52
Εικόνα 17: Σχηματική αναπαράσταση των διαμερισμάτων/τμημάτων του PBPK μοντέλου για το Cr.	55
Εικόνα 18: Διάγραμμα ροής του μοντέλου ExDoM2.	58
Εικόνα 19: Τα δεδομένα εισόδου που εισάγονται στο μοντέλο ExDoM2 μέσω του γραφικού περιβάλλον διεπαφής χρήστη (GUI).	59
Εικόνα 20: Η μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων (Πηγή: Google Earth).	62
Εικόνα 21: Σταθμός υποβάθρου της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης (Πηγή: Google Earth).	65
Εικόνα 22: Αντιστοιχία μοιρών και διεύθυνσης ανέμου.	67
Εικόνα 23: Όργανο μέτρησης συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων (Thermo, 2003).	78
Εικόνα 24: Φορητά όργανα μέτρησης συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων της TSI (TSI, 2010; TSI, 2012).	79
Εικόνα 25: Διαχωριστής πρόσκρουσης σωματιδίων οκτώ σταδίων (Andersen impactor).	80
Εικόνα 26: Τοποθέτηση δειγματολήπτη Andersen στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής.	83
Εικόνα 27: Λευκές οβίδες κατασκευασμένες από οργανικό πολυμερές (πλαστικό) Teflon.	84
Εικόνα 28: Οι οχτώ κύριες διαδρομές στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων.	107
Εικόνα 29: Χωματοκάλυψη (landfill cover) ΧΥΤ Χανίων (Πηγή: Google Earth).	110
Εικόνα 30: Πλατεία ωρίμανσης κομπόστ (Πηγή: Google Earth).	111
Εικόνα 31: Διαστάσεις (μέσες τιμές) σωρού στην πλατεία ωρίμανση.	112

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Μέση ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα ($^{\circ}\text{C}$) για τους μήνες Μάρτιο (Άνοιξη), Αύγουστο (Καλοκαίρι), Σεπτέμβριο (φθινόπωρο) και Δεκέμβριο (χειμώνας).	71
Διάγραμμα 2: Μέση ημερήσια διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου (km/h) για τους μήνες Μάρτιο (Άνοιξη), Αύγουστο (Καλοκαίρι), Σεπτέμβριο (φθινόπωρο) και Δεκέμβριο (χειμώνας).	72
Διάγραμμα 3: Ανεμολογικά ροδογράμματα για τους μήνες Μάρτιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο.	73
Διάγραμμα 4: Μέση ημερήσια διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2) για τους μήνες Μάρτιο (Άνοιξη), Αύγουστο (Καλοκαίρι), Σεπτέμβριο (φθινόπωρο) και Δεκέμβριο (χειμώνας).	75
Διάγραμμα 5: Μέση ημερήσια διακύμανση της κλάση ισορροπίας για τους μήνες Μάρτιο (Άνοιξη), Αύγουστο (Καλοκαίρι), Σεπτέμβριο (φθινόπωρο) και Δεκέμβριο (χειμώνας).	76
Διάγραμμα 6: Μέση ημερήσια διακύμανση του ύψους ανάμιξης (m) για τους μήνες Μάρτιο (Άνοιξη), Αύγουστο (Καλοκαίρι), Σεπτέμβριο (φθινόπωρο) και Δεκέμβριο (χειμώνας).	76
Διάγραμμα 7: Ημερήσιες συγκεντρώσεις PM_{10} ($\mu\text{g/m}^3$) από τον σταθμό του Πολυτεχνείου Κρήτης για τους μήνες Μάρτιο (Άνοιξη), Αύγουστο (Καλοκαίρι), Σεπτέμβριο (Φθινόπωρο) και Δεκέμβριο (Χειμώνας).	86
Διάγραμμα 8: Μέση ημερήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων μάζας των PM_{10} ($\mu\text{g/m}^3$) στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής του ΕΜΑΚ Χανίων.	87
Διάγραμμα 9: Κατανομή μάζας (ποσοστό μάζας) αιωρούμενων σωματιδίων στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου.	89
Διάγραμμα 10: Κατανομή μάζας (ποσοστό μάζας) αιωρούμενων σωματιδίων στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής.	90
Διάγραμμα 11: Δείκτες εμπλουτισμού (EF) σε δείγματα από τον εξωτερικό χώρο ζυγιστηρίου και τον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής.	98
Διάγραμμα 12: Μέση ημερήσια διακύμανση των απορριμματοφόρων/φορτηγών που εισέρχονται στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων για τους μήνες Μάρτιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο.	108

Διάγραμμα 13: Μέση ημερήσια διακύμανση του ρυθμού εκπομπής των PM_{10} που προκαλούνται από την κίνηση των φορτηγών για τους μήνες Μάρτιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο.	109
Διάγραμμα 14: Μέση ημερήσια διακύμανση του ρυθμού εκπομπής των PM_{10} που προκαλούνται από τον άνεμο για τους μήνες Μάρτιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο.	110
Διάγραμμα 15: Μέση ημερήσια διακύμανση του ρυθμού εκπομπής των PM_{10} που προκαλούνται από τον άνεμο για τους μήνες Μάρτιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο.	112
Διάγραμμα 16: Εβδομαδιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων μάζας των PM_{10} ($\mu g/m^3$) στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής του ΕΜΑΚ Χανίων.	114
Διάγραμμα 17: Σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τις πειραματικές μετρήσεις	115
Διάγραμμα 18: Συγκεντρώσεις PM_{10} ($\mu g/m^3$) στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων τις καθημερινές και τα Σαββατοκύριακα για τον μήνα Μάρτιο.	120
Διάγραμμα 19: Συγκεντρώσεις PM_{10} ($\mu g/m^3$) στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων τις καθημερινές και τα Σαββατοκύριακα για τον μήνα Αύγουστο.	122
Διάγραμμα 20: Συγκεντρώσεις PM_{10} ($\mu g/m^3$) στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων τις καθημερινές και τα Σαββατοκύριακα για τον μήνα Σεπτέμβριο.	123
Διάγραμμα 21: Συγκεντρώσεις PM_{10} ($\mu g/m^3$) στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων τις καθημερινές και τα Σαββατοκύριακα για τον μήνα Δεκέμβριο.	124
Διάγραμμα 22: Ημερήσιες συγκεντρώσεις έκθεσης PM_{10} ($\mu g/m^3$) των εργαζομένων με βάση το σενάριο έκθεσης/δραστηριότητας του Πίνακα 19.	127
Διάγραμμα 23: Αθροιστική μηνιαία εναποτιθέμενη δόση στις πέντε περιοχές του αναπνευστικού συστήματος ενός ενήλικα άνδρα που εργάζεται στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου.	128
Διάγραμμα 24: Η αθροιστική εναποτιθέμενη δόση στο αναπνευστικό σύστημα, η κατακράτηση στο αναπνευστικό σύστημα, η μάζα των σωματιδίων που μεταφέρεται στον οισοφάγο, στους λεμφαδένες και απορροφάται στο αίμα (μέτριος ρυθμός απορρόφησης).	130
Διάγραμμα 25: Ημερήσιες συγκεντρώσεις έκθεσης των εργαζομένων σε PM_{Pb} , PM_{Mn} , και PM_{Cr} ($\mu g/m^3$) με βάση το σενάριο έκθεσης/δραστηριότητας του Πίνακα 17.	133

Διάγραμμα 26: Δόση μολύβδου (μg) στο ανθρώπινο σώμα ενός ενήλικα άνδρα που εργάζεται στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου.....	135
Διάγραμμα 27: Δόση μαγγανίου (μg) στο ανθρώπινο σώμα ενός ενήλικα άνδρα που εργάζεται στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου.....	137
Διάγραμμα 28: Δόση χρωμίου (μg) στο ανθρώπινο σώμα ενός ενήλικα άνδρα που εργάζεται στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου.....	139
Διάγραμμα 29: Αθροιστική μηνιαία εναποτιθέμενη δόση στο αναπνευστικό σύστημα για τους μήνες Μάρτιο (Άνοιξη), Αύγουστο (Καλοκαίρι), Σεπτέμβριο (φθινόπωρο) και Δεκέμβριο (χειμώνας).....	142
Διάγραμμα 30: Η μέση ημερήσια εναποτιθέμενη δόση των $PM_{\text{μετάλλων}}$ στο αναπνευστικό σύστημα, η κατακράτηση τους στο αναπνευστικό σύστημα και η μεταφορά τους στον οισοφάγο και στο αίμα.	144
Διάγραμμα 31: Ημερήσιες συγκεντρώσεις έκθεσης PM_{10} ($\mu g/m^3$) των εργαζομένων με βάση το σενάριο έκθεσης/δραστηριότητας του Πίνακα 20.....	147
Διάγραμμα 32: Αθροιστική ημερήσια εναποτιθέμενη δόση στο αναπνευστικό σύστημα.	149
Διάγραμμα 33: Η αθροιστική εβδομαδιαία εναποτιθέμενη δόση των PM_{10} στο αναπνευστικό σύστημα, η κατακράτηση τους στο αναπνευστικό σύστημα και η μεταφορά τους στον οισοφάγο, στο αίμα και στο περιβάλλον.....	150
Διάγραμμα 34: Ημερήσιες συγκεντρώσεις έκθεσης των εργαζομένων σε PM_{Pb} , PM_{Mn} , και PM_{Cr} ($\mu g/m^3$) με βάση το σενάριο έκθεσης/δραστηριότητας του Πίνακα 20.....	152
Διάγραμμα 35: Εβδομαδιαία εσωτερική δόση μετάλλων (Pb, Cr και Mn) στο ανθρώπινο σώμα.....	154
Διάγραμμα 36: Ημερήσια εργασιακή εναποτιθέμενη δόση (μg) στο αναπνευστικό σύστημα για τα αιωρούμενα σωματίδια που περιέχουν μέταλλα.....	156
Διάγραμμα 37: Η μάζα των $PM_{\text{μετάλλων}}$ που μεταφέρεται στον οισοφάγο, απορροφάται στο αίμα και κατακρατείται στο αναπνευστικό σύστημα στο τέλος της 1 ^η βάρδιας.	158
Διάγραμμα 38: Μέση ημερήσια εργασιακή εναποτιθέμενη δόση (μg) στο αναπνευστικό σύστημα για τα (α) PM_{10} και για τα (β) αιωρούμενα σωματίδια που περιέχουν μέταλλα ($PM_{\text{Μέταλλα}}$).....	160
Διάγραμμα 39: Ποσοστό εναπόθεσης στον αναπνευστικό σύστημα (ET, TB, AI) για έναν ενήλικα άνδρα που εκτελεί ήπια εργασία σε περιβάλλον με ταχύτητα ανέμου 1 m/s και	

εκτίθεται σε πολυδιάσπορα σωματίδια ($\sigma_g=2,5$) με πυκνότητα $1,5 \text{ g/cm}^3$ και συντελεστής σχήματος 1 (σφαιρικά σωματίδια)..... 162

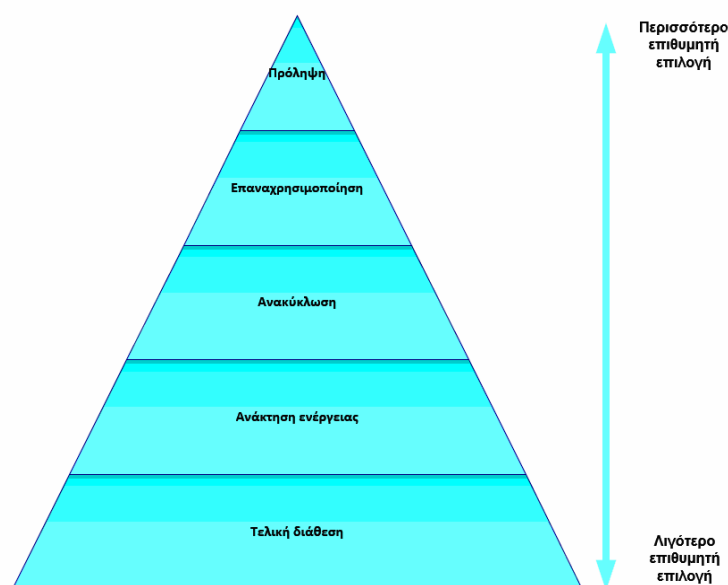
Διάγραμμα 40: Ποσοστό εναπόθεσης στην ET_1 και ET_2 περιοχή για έναν ενήλικα άνδρα που εκτελεί ήπια εργασία σε περιβάλλον με ταχύτητα ανέμου 1 m/s και εκτίθεται σε πολυδιάσπορα σωματίδια ($\sigma_g=2,5$) με πυκνότητα $1,5 \text{ g/cm}^3$ και συντελεστής σχήματος 1 (σφαιρικά σωματίδια)..... 164

Διάγραμμα 41: Σύγκριση μοντέλου ExDoM2 με το μοντέλο ExDoM..... 166

ΧΩΡΟΙ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗΣ ΤΑΦΗΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ

1.1. Εισαγωγή στη διαχείριση των αστικών στερεών απορριμμάτων

Τις τελευταίες δεκαετίες, η συγκέντρωση του πληθυσμού σε μεγάλα αστικά κέντρα, η άνοδος του βιοτικού επιπέδου και η υπερκατανάλωση προκάλεσαν την αύξηση των παραγόμενων αστικών στερεών απορριμμάτων. Τα αστικά στερεά απορρίμματα αποτελούν ένα ετερογενές μείγμα υλικών, όπως είναι τα υπολείμματα τροφών, τα πλαστικά, το χαρτί, το γυαλί, τα μέταλλα, το ξύλο κ.ά. Η διαχείριση των αστικών στερεών απορριμμάτων είναι το σύνολο των δραστηριοτήτων προσωρινής αποθήκευσης, συλλογής, μεταφοράς, επεξεργασίας, αξιοποίησης, επαναχρησιμοποίησης ή τελικής διάθεσης σε φυσικούς αποδέκτες (Παναγιωτακόπουλος, 2002). Το νομοθετικό πλαίσιο (Οδηγία 2008/98/ΕΚ) που ισχύει στα κράτη-μέλη για τη διαχείριση των αστικών στερεών απορριμμάτων βασίζεται στην ιεράρχηση των επιλογών διαχείρισης (Εικόνα 1).



Εικόνα 1: Πυραμίδα ιεράρχησης των επιλογών διαχείρισης στερεών απορριμμάτων σύμφωνα με την οδηγία 2008/98/ΕΚ.

Η λιγότερη επιθυμητή επιλογή για τη διαχείριση των απορριμμάτων σύμφωνα με την οδηγία 2008/98/EK είναι η διάθεση τους σε χώρους υγειονομικής ταφής ενώ η περισσότερη επιθυμητή είναι η πρόληψη (π.χ. μείωση της παραγόμενης ποσότητας απορριμμάτων, μείωση των αρνητικών επιπτώσεων των παραγόμενων απορριμμάτων στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη υγεία, μείωση της περιεκτικότητας των υλικών και προϊόντων σε επικίνδυνες ουσίες). Η σωστή διαχείριση των απορριμμάτων έχει σαν στόχο την προστασία της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος.

Στον Ελλαδικό χώρο υπάρχει έντονο πρόβλημα στη διαχείριση των απορριμμάτων και ιδιαίτερα στην τελική τους διάθεση. Τις τελευταίες δεκαετίες, γίνονται συνεχώς προσπάθειες να μειωθεί η ποσότητα των στερεών απορριμμάτων που καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής. Πρώτα από όλα γίνεται διαλογή και ένα μεγάλο ποσοστό από χρήσιμα υλικά όπως το γυαλί, το χαρτί, τα πλαστικά και τα μέταλλα οδηγούνται για ανακύκλωση. Η ανακύκλωση των απορριμμάτων παίζει ένα σημαντικό ρόλο για την προστασία του περιβάλλοντος. Με αυτή τη διαδικασία επιτυγχάνεται μείωση της ποσότητας των απορριμμάτων που οδηγείται προς τελική διάθεση και παράλληλα πραγματοποιείται αξιοποίηση των ανακυκλώσιμων υλικών.

Επίσης, εκτός από τα ανακυκλώσιμα υλικά υπάρχουν και άλλα υλικά όπως το οργανικό κλάσμα που οδηγείται για κομποστοποίηση αφού αναμιχθεί με τεμαχισμένα κλαδιά. Είναι μια διαδικασία όπου το οργανικό κλάσμα αποδομείται βιολογικά υπό ελεγχόμενες συνθήκες με αποτέλεσμα τη σταδιακή του μετατροπή του σε κομπόστ (υλικό βιολογικά σταθερό το οποίο χρησιμοποιείται σαν εδαφοβελτιωτικό).

Επίσης, είναι αναγκαία η σωστή οργάνωση της διαδικασίας απόρριψης των απορριμμάτων. Ο τρόπος διάθεσης των απορριμμάτων στην Ελλάδα προκαλεί σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον ενώ μπορεί να αποτελέσει και κίνδυνο για τη δημόσια υγεία. Η σωστή διάθεση των στερεών απορριμμάτων στο έδαφος πρέπει να γίνεται σε έναν οργανωμένο χώρο ταφής, με τέτοιες προδιαγραφές ώστε να μη γίνεται ρύπανση περιβάλλοντος καθώς και με σωστή διαχείριση για την αξιοποίηση των παραπροϊόντων. Όμως, ακόμα και στην περίπτωση της χρήσης μεθόδων ελεγχόμενης απόθεσης των απορριμμάτων, κατά την οποία η απόθεση των απορριμμάτων γίνεται σε

χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ), δεν λείπουν τα προβλήματα διαρροών προς το περιβάλλον.

Η απόθεση των απορριμμάτων σε ΧΥΤΑ είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος διάθεσης απορριμμάτων στον κόσμο (Chai κ.ά., 2007; Prechthai κ.ά., 2008). Σε ένα ΧΥΤΑ τα απορρίμματα εναποτίθενται σε στρώσεις, συμπιέζονται με τη βοήθεια μηχανημάτων και επικαλύπτονται με χώμα. Οι τεχνολογίες που εφαρμόζονται σε ένα ΧΥΤΑ μειώνουν σημαντικά το ρυπαντικό φορτίο που διαφεύγει στο περιβάλλον όμως δεν μπορούν να οδηγήσουν σε πλήρη αποφυγή διαρροών προς το περιβάλλον. Τα πιο σημαντικά προβλήματα που σχετίζονται με την ταφή των απορριμμάτων είναι η παραγωγή στραγγισμάτων, βιοαερίου και αιωρούμενων σωματιδίων. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στα αιωρούμενα σωματίδια.

1.2. Εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων από χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων

Τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους ρύπους της ατμόσφαιρας, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν ποικίλες επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία. Τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν μια ευρεία ποικιλία πηγών τόσο φυσικές (π.χ. πυρκαγιές, Σαχάρας σκόνη) όσο και ανθρωπογενείς (π.χ. οδικές μεταφορές, βιομηχανία, ΧΥΤΑ, καύση, εξόρυξη ορυκτών). Οι εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων από ΧΥΤΑ μπορεί να μην είναι κυρίαρχες πηγές περιέχουν όμως σημαντικές ποσότητες τοξικών και βλαπτικών ουσιών (π.χ. βαρέα μέταλλα) με αποτέλεσμα να δημιουργούν τοπικό περιβαλλοντικό κίνδυνο και επιβαρυντικές επιπτώσεις στην ποιότητα του αέρα. Επιπλέον, οι εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων από ΧΥΤΑ εκλύονται από χαμηλό ύψος με επιβαρυντικές επιπτώσεις στην υγεία των εργαζομένων και των κατοίκων της ευρύτερης περιοχής. Για αυτόν τον λόγο υπάρχει έντονο επιστημονικό ενδιαφέρον για τις εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων από ΧΥΤΑ και τη συμβολή τους στην τοπική ατμοσφαιρική ρύπανση.

Επομένως, είναι σημαντικό να εξεταστεί η επίδραση των διάφορων δραστηριοτήτων ενός ΧΥΤΑ στη ρύπανση του ατμοσφαιρικού αέρα με αιωρούμενα σωματίδια. Οι σημαντικότερες πηγές αιωρούμενων σωματιδίων

σε έναν ΧΥΤΑ είναι (Chalvatzaki κ.ά., 2012; Chalvatzaki κ.ά., 2015): (α) η επαναιώρηση σκόνης λόγω της κίνησης των απορριμματοφόρων σε δρόμους (χωματόδρομους και μη), (β) η επαναιώρηση σκόνης λόγω της αιολικής διάβρωσης της χωματοκάλυψης του ΧΥΤΑ και διάφορων άλλων επιφανειών χώματος και (γ) η επαναιώρηση σκόνης λόγω της αιολικής διάβρωσης σε σωρούς υλικών (π.χ. κομπόστ).

Η Αμερικανική υπηρεσία προστασίας του περιβάλλοντος παρέχει συντελεστές εκπομπών για ένα πολύ μεγάλο αριθμό πηγών ατμοσφαιρικής ρύπανσης, μεταξύ των οποίων για δρόμους και για σωρούς υλικών. Η Αμερικανική υπηρεσία προστασίας του περιβάλλοντος χρησιμοποιεί τους συντελεστές εκπομπής AP-42 για τον υπολογισμό των ρυθμών εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων εξαιτίας της κίνησης των απορριμματοφόρων σε δρόμους (λεπτομέρειες στην Ενότητα 9.1.1) και εξαιτίας της αιολικής διάβρωσης σε σωρούς υλικών (λεπτομέρειες στην Ενότητα 9.1.3).

Οι Westbrook και Sullivan (2007) διαπίστωσαν ότι η πλειοψηφία των υπολογιζόμενων εκπομπών PM_{10} (αιωρούμενα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 10 μm) από ΧΥΤΑ προέρχεται από την κίνηση των απορριμματοφόρων πάνω στους δρόμους (χωματόδρομους και μη). Αυτό οφείλεται στις αξιοσημείωτες ποσότητες σκόνης που υπάρχουν πάνω στους δρόμους. Η σκόνη αυτή προέρχεται από: (α) τη σκόνη που μεταφέρεται πάνω στα ελαστικά των οχημάτων, (β) τη σκόνη που καθιζάνει από την ατμόσφαιρα, (γ) τη φθορά της επιφάνειας του ίδιου του δρόμου που διέρχονται τα απορριμματοφόρα και (δ) τη σταδιακή αποσάθρωση τμημάτων των απορριμματοφόρων (π.χ. φθορά ελαστικών και φρένων). Επιπλέον, οι Han κ.ά. (2011) αναφέρουν αυξημένες συγκεντρώσεις PM_{10} σε δείγματα σκόνης που συλλέχθηκαν σε έναν ΧΥΤΑ στην Κορέα χρησιμοποιώντας κινητή μεθοδολογία δειγματοληψίας. Η κινητή μεθοδολογία δειγματοληψίας που χρησιμοποιήθηκε από τους Han κ.ά. (2011) συλλέγει επαναιωρούμενη σκόνη από τους δρόμους του ΧΥΤΑ. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε ένα αυτοκίνητο στο οποίο τοποθετήθηκε μια είσοδος δειγματοληψίας (inlet sampling) πίσω από το μπροστινό λάστιχο και άλλη μια είσοδος δειγματοληψίας στο μπροστινό προφυλακτήρα.

Η έκθεση σε επαναιωρούμενη σκόνη δρόμου έχει συσχετιστεί με αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία και έχει επίσης συνδεθεί με αυξημένο

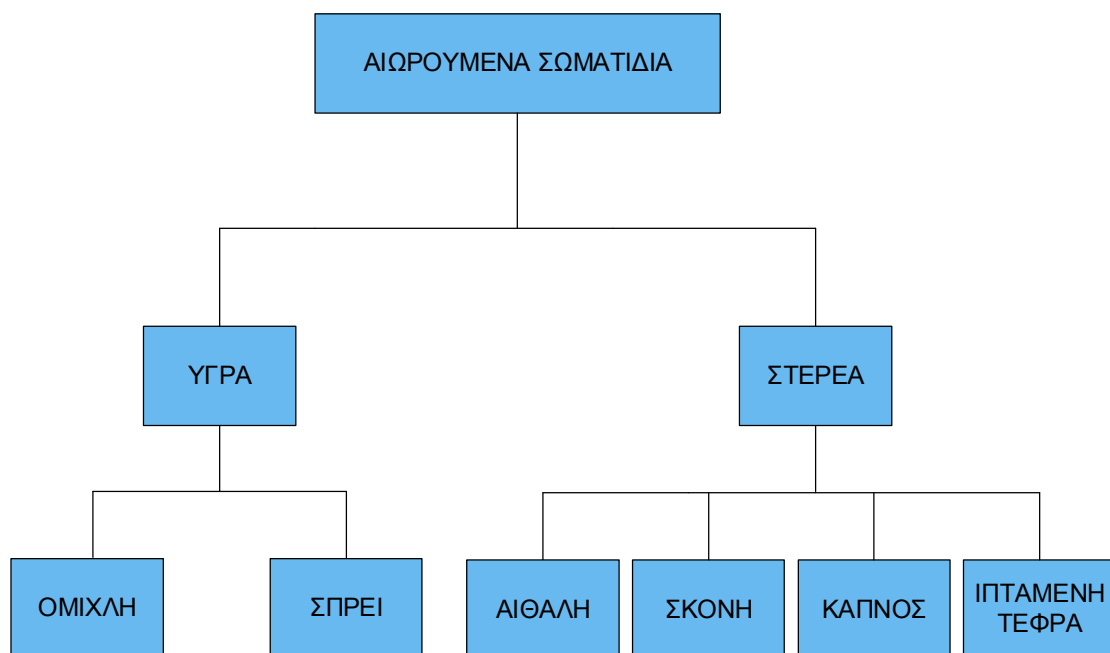
κίνδυνο για ασθένειες του αναπνευστικού συστήματος. Επιπλέον, τα αιωρούμενα σωματίδια που εκπέμπονται από έναν ΧΥΤΑ περιέχουν βαρέα μέταλλα λόγω της φύσης των υλικών (π.χ. μπαταρίες) που εναποτίθενται σε έναν ΧΥΤΑ. Οι Han κ.ά. (2011) εντόπισαν αυξημένη συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων που περιέχουν βαρέα μέταλλα σε δείγματα σκόνης που συλλέχτηκαν σε έναν ΧΥΤΑ σε σύγκριση με μια κατοικημένη περιοχή. Τα βαρέα μέταλλα που περιέχουν τα αιωρούμενα σωματίδια είναι τοξικά και επικίνδυνα για την υγεία των εργαζομένων και των κατοίκων της ευρύτερης περιοχής. Επίσης, οι Vega κ.ά. (2001) εντόπισαν βαρέα μέταλλα σε δείγμα γεωλογικού υλικού που συλλέχτηκε από τη χωματοκάλυψη ενός ΧΥΤΑ στην πόλη του Μεξικού. Η παρουσία βαρέων μετάλλων στη χωματοκάλυψη ενός ΧΥΤΑ οφείλεται στην αποσύνθεση των απορριμμάτων που έχουν αποτεθεί στο ΧΥΤΑ με αποτέλεσμα τη ρύπανση του χώματος.

Οι εκπομπές σκόνης λόγω της αιολικής διάβρωσης και της κυκλοφορίας των απορριμματοφόρων μπορεί να μειωθεί σημαντικά εάν η επιφάνεια είναι υγρή. Επομένως, το πρόβλημα της δημιουργίας αιωρούμενων σωματιδίων συνήθως βρίσκει μερικώς την επίλυση του μέσω της διαβροχής των επιφανειών που εκπέμπουν αιωρούμενα σωματίδια, της έκπλυσης των τροχών των απορριμματοφόρων και της επίστρωσης όπου είναι δυνατόν των επιφανειών χώματος (Chalvatzaki κ.ά, 2010).

ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

2.1. Εισαγωγή στα αιωρούμενα σωματίδια

Με τον όρο αιωρούμενα σωματίδια εννοούμε τα στερεά ή υγρά σωματίδια που βρίσκονται στον αέρα και έχουν διαμέτρους που κυμαίνονται από 2 nm μέχρι 200 μm (Λαζαρίδης, 2008). Τα αιωρούμενα σωματίδια είναι δυνατόν να γίνουν το μέσο μεταφοράς διαφόρων χημικών στοιχείων και ενώσεων καθώς και βιολογικών ρύπων. Τα βασικά χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων είναι το μέγεθος, η χημική τους σύσταση και η κατάσταση στην οποία βρίσκονται, υγρή ή στερεή (Λαζαρίδης, 2008).



Εικόνα 2: Κατάταξη αιωρούμενων σωματιδίων ανάλογα με τον τρόπο σχηματισμού τους (Seinfeld και Pandis, 2006).

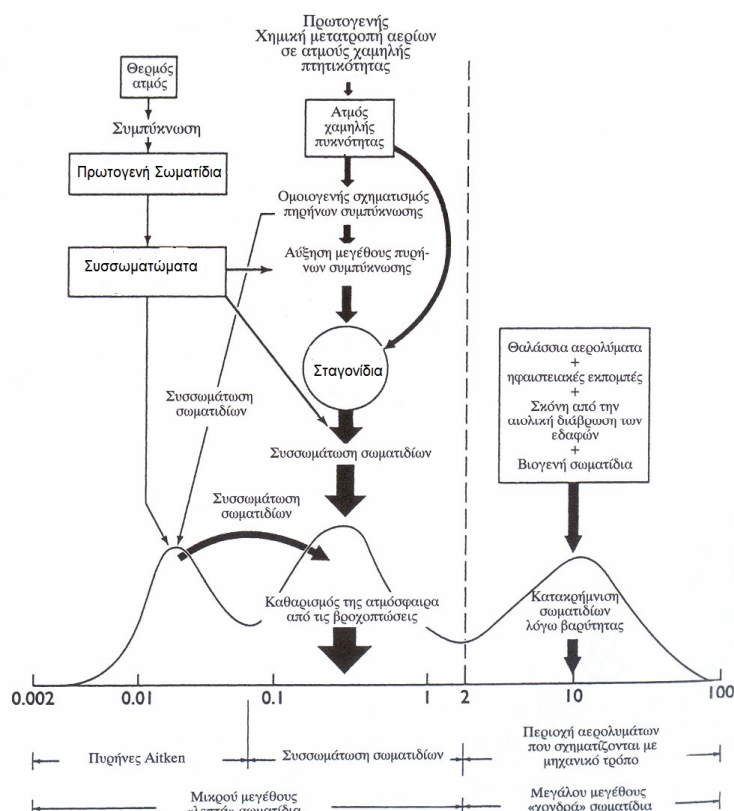
Ανάλογα με τον τρόπο σχηματισμού τους, τα αιωρούμενα σωματίδια κατατάσσονται σε (Εικόνα 2):

- **Ομίχλη:** Υγρά σωματίδια ή σταγονίδια που δημιουργούνται από τη συμπύκνωση ατμών.
- **Σπρέι:** Υγρά σωματίδια που μορφοποιούνται από το ράντισμα υγρών, όπως τα φυτοφάρμακα και τα παρασιτοκτόνα.
- **Αιθάλη:** Μικρά στερεά σωματίδια τα οποία περιέχουν άνθρακα και σχηματίζονται από την ατελή καύση υλικών που περιέχουν άνθρακα.
- **Σκόνη:** Μικρά στερεά σωματίδια που προκύπτουν από τη θραύση μεγαλύτερων μαζών κατά τη διάρκεια διαδικασιών όπως η σύνθλιψη και η τριβή.
- **Καπνός:** Μικρά στερεά σωματίδια που προκύπτουν από την ατελή καύση οργανικών υλών όπως το κάρβουνο, ο καπνός και το ξύλο.
- **Ιπτάμενη τέφρα:** Μικρά, μη καύσιμα ορυκτά ή μεταλλικά σωματίδια που εκπέμπονται από τις καπνοδόχους κατά την καύση κάρβουνου.

Το μέγεθος των σωματιδίων είναι η πιο σημαντική παράμετρος για τον χαρακτηρισμό της συμπεριφοράς των σωματιδίων. Σύμφωνα με τη σειρά μεγέθους τα σωματίδια διακρίνονται σε (Λαζαρίδης, 2008; Γεντεκάκης, 2003; Friedlander, 2000):

- Πυρήνες μορίων των 10 \AA ($10 \text{ \AA} = 1 \text{ nm}$).
- Σταγονίδια νεφών και σωματίδια σκόνης διαμέτρου μέχρι $100 \text{ }\mu\text{m}$.
- Σωματίδια προερχόμενα από συσσώρευση με διάμετρο $0,1 \text{ }\mu\text{m} < d < 1-3 \text{ }\mu\text{m}$ που δημιουργούνται κατά τη συσσωμάτωση μικρότερων σωματιδίων ή από τη συμπύκνωση αερίων.
- Λεπτόκοκκα σωματίδια (fine particles) στα οποία περιλαμβάνονται οι κατηγορίες συσσώρευσης και πυρηνοποίησης ($0,1 \text{ }\mu\text{m} < d \leq 2,5 \text{ }\mu\text{m}$).
- Χονδρόκοκκα σωματίδια (coarse particles) $2,5 \text{ }\mu\text{m} < d \leq 10 \text{ }\mu\text{m}$

Δύο είναι οι μηχανισμοί εισαγωγής των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, είτε εκπέμπονται και αιωρούνται κατευθείαν στην ατμόσφαιρα ή παράγονται δευτερογενώς στην ατμόσφαιρα μέσω χημικών αντιδράσεων και των μηχανισμών της συμπύκνωσης και της πυρηνοποίησης. Στην Εικόνα 3 παρουσιάζονται οι διεργασίες σχηματισμού σωματιδίων στην ατμόσφαιρα οι οποίοι καθορίζουν το μέγεθος τους.



Εικόνα 3: Σχηματικό διάγραμμα κατανομής του ατμοσφαιρικού αερολύματος σε σχέση με τις πηγές εκπομπής και τις κύριες διεργασίες σχηματισμού αιωρούμενων σωματιδίων (Finlaynson –Pitts και Pitts, 2000; Γεντεκάκης, 2003; Λαζαρίδης, 2008).

Στην ατμόσφαιρα έχουν ανιχνευθεί τυπικές συγκεντρώσεις μάζας αιωρούμενων σωματιδίων από $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ για μη ρυπασμένο αέρα έως και $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ για αέρα που έχει ρυπανθεί (Friedlander, 2000). Τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην ορατότητα, στην ατμόσφαιρα, στις ατμοσφαιρικές διεργασίες, στη βροχόπτωση καθώς και στο κλίμα, είτε σε τοπική είτε σε παγκόσμια κλίμακα. Ειδικότερα οι επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στη δημόσια υγεία αποτελούν αντικείμενο μελέτης τις τελευταίες δεκαετίες.

2.2. Πηγές αιωρούμενων σωματιδίων

Τα αιωρούμενα σωματίδια στην ατμόσφαιρα είναι δυνατό να εκπεμφθούν είτε από φυσικές πηγές είτε από ανθρωπογενείς πηγές. Οι σημαντικότερες φυσικές πηγές είναι (Kiehl και Rodhe, 1995):

- Η διάβρωση του εδάφους.
- Η θάλασσα.
- Τα ηφαίστεια.
- Οι φυσικές πυρκαγιές.
- Η άμμος της Σαχάρας (ειδικότερα στην περιοχή της Μεσογείου).

Οι σημαντικότερες πηγές αιωρούμενων σωματιδίων από ανθρωπογενείς δραστηριότητες είναι (Pacyna, 1995; Seinfeld και Pandis, 2006) :

- Η καύση υγρών και στερεών καύσιμων υλών.
- Οι βιομηχανικές δραστηριότητες που εκπέμπουν σωματίδια κατά την παραγωγική τους διαδικασία, όπως για παράδειγμα μονάδες παραγωγής τσιμέντου.
- Η κίνηση των οχημάτων σε ασφαλτωμένους και μη δρόμους.
- Οι αγροτικές δραστηριότητες.
- Οι διαδικασίες κατασκευής δρόμων, οικοδομών κ.ά.
- Εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η καύση αστικών απορριμμάτων.
- Επεξεργασία και διάθεση απορριμμάτων.

Σε παγκόσμια κλίμακα υπερτερούν οι εκπομπές από φυσικές πηγές. Αντίθετα, σε τοπική κλίμακα μπορεί να υπερτερούν οι ανθρωπογενείς εκπομπές. Οι ανθρωπογενείς εκπομπές οδηγούν τοπικά σε υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων με αποτέλεσμα τη δημιουργία ατμοσφαιρικών επεισοδίων ρύπανσης. Οι ανθρωπογενείς πηγές μπορούν περαιτέρω να διακριθούν σε σταθερές και κινητές. Στην πρώτη κατηγορία περιλαμβάνονται κυρίως καμινάδες (οικιακής θέρμανσης ή βιομηχανίας) και χωματερές ενώ στη δεύτερη κατηγορία συγκαταλέγονται κατά κύριο λόγο οι εκπομπές από μεταφορικά μέσα.

2.3. Χημική σύσταση αιωρούμενων σωματιδίων

Η χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό τους εξαιτίας της δυνατότητας αναγνώρισης της πηγής των αιωρούμενων σωματιδίων από τη χημική τους σύσταση. Επιπλέον, η χημική σύσταση (π.χ. μέταλλα) των αιωρούμενων σωματιδίων συμβάλει στην τοξικότητα των αιωρούμενων σωματιδίων (Karanasiou κ.ά., 2007). Τα κύρια συστατικά των αιωρούμενων σωματιδίων, αν και τα ποσοστά συμμετοχής τους στην συνολική σωματιδιακή μάζα διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή, είναι: (Harrison και Yin, 2000):

- Θειικά άλατα
- Νιτρικά άλατα
- Αμμωνιακά άλατα
- Χλωριόντα
- Οργανικός άνθρακας
- Στοιχειακός άνθρακας
- Γεωλογικά υλικά
- Βιολογικά υλικά
- Μέταλλα

Γενικά η χημική σύσταση των λεπτών σωματιδίων διαφέρει αρκετά σε σύγκριση με αυτά των χονδρών. Τα στοιχεία που συνδέονται με φυσικές πηγές βρίσκονται συνήθως στα χονδρά σωματίδια ενώ τα στοιχεία που εκπέμπονται από ανθρωπογενείς πηγές βρίσκονται συνήθως στα λεπτά σωματίδια (Alvarez κ.ά., 2004). Τα λεπτά σωματίδια περιέχουν θειικές και αμμωνιακές ενώσεις, υδρογονάνθρακες, στοιχειακό άνθρακα, τοξικά μέταλλα (π.χ. εξασθενές χρώμιο) και νερό. Αντίθετα τα χονδρά σωματίδια περιέχουν πυρίτιο, σίδηρο, ασβέστιο, αργίλιο και σωματίδια προερχόμενα από τη θάλασσα και το έδαφος (Hinds, 1999). Νιτρικές ενώσεις και ιχνοστοιχεία μπορούν να βρεθούν και στις δύο κατηγορίες (Seinfeld και Pandis, 2006; Samara και Voutsas, 2005). Κάποια από τα συστατικά των σωματιδίων (αμμωνιακά άλατα, θειικά άλατα και νιτρικά άλατα) είναι λιγότερο τοξικά, ενώ άλλα, όπως τα οργανικά υλικά και τα μέταλλα μετάπτωσης, έχουν

χαρακτηρισθεί ως άκρως επικίνδυνα (Schwarze κ.ά., 2006). Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι κυριότερες ανθρωπογενείς και φυσικές πηγές με βάση τη χημική σύνθεση των αιωρούμενων σωματιδίων.

Πίνακας 1: Οι κυριότερες ανθρωπογενείς και φυσικές πηγές εκπομπής μετάλλων (ιχνοστοιχείων και βαρέων μετάλλων) (Βαλαβανίδης, 2003).

Μέταλλο	Φυσικές πηγές	Ανθρωπογενείς πηγές
Αρσενικό (As)	1. Ηφαίστεια	1. Χρήση ζιζανιοκτόνων 2. Καύση γαιάνθρακα
Βανάδιο (V)	-	1. Καύση πετρελαίου
Κάδμιο (Cd)	1. Διάβρωση εδάφους 2. Ηφαίστεια 3. Πυρκαγιές 4. Θαλάσσιο σπρέι	1. Καύση απορριμμάτων 2. Καύση καυσίμων 3. Διαδικασίες παραγωγής χάλυβα, μολύβδου κ.ά.
Μαγγάνιο (Mn)	1. Διάβρωση εδάφους 2. Αιώρηση σκόνης	1. Καύση βενζίνης με μόλυβδο 2. Καύση γαιάνθρακα
Μόλυβδος (Pb)	1. Ηφαίστεια 2. Πυρκαγιές 3. Αποσάθρωση βράχων	1. Φυτοφάρμακα 2. Αποτέφρωση απορριμμάτων 3. Εξόρυξη μετάλλων 4. Καύση υγρών καυσίμων 5. Καύση άνθρακα
Νικέλιο (Ni)	1. Διάβρωση εδάφους 2. Αιώρηση σκόνης 3. Μετεωρίτες	1. Καύση καυσίμων 2. Μεταλλουργικές εργασίες παραγωγής Νικελίου
Σίδηρος (Fe)	1. Διάβρωση εδάφους 2. Αιώρηση σκόνης	1. Καύση άνθρακα 2. Κυκλοφορία οχημάτων
Χρώμιο (Cr)	1. Διάβρωση εδάφους 2. Αιώρηση σκόνης	1. Κυκλοφορία οχημάτων

Η ατμοσφαιρική ρύπανση από αιωρούμενα σωματίδια που περιέχουν βαρέα μέταλλα είναι από τα πιο ανησυχητικά προβλήματα στην επιστημονική κοινότητα (Alvarez κ.ά., 2004). Είναι ευρέως αναγνωρισμένο ότι ορισμένα μέταλλα, όπως ο μόλυβδος (Pb), το κάδμιο (Cd) και το αρσενικό (As) είναι ιδιαίτερα τοξικά σε συγκεκριμένες δόσεις.

2.4. Πρότυπα ποιότητας αέρα για αιωρούμενα σωματίδια

Για τη διασφάλιση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα έχουν θεσπιστεί από διάφορες χώρες και οργανισμούς πρότυπα ποιότητας του αέρα. Η Ελλάδα, ως μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, υποχρεούται να παρακολουθεί και να ελέγχει τα επίπεδα των αιωρούμενων σωματιδίων με διάμετρο μικρότερη των 10 μm (PM_{10}) ώστε να μην υπερβαίνουν το όριο των 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ που θέτει η οδηγία 1999/30/EK ως ετήσια οριακή τιμή. Η οδηγία 1999/30 εκδόθηκε από το συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης την 22^α Απριλίου 1999. Η παραπάνω οδηγία έχει ενσωματωθεί στην Ελληνική Νομοθεσία με την πράξη Υπουργικού Συμβουλίου 34/30-05-2002 που δημοσιεύτηκε στο ΦΕΚ 125Α/5-6-2002 .

Η φυσική συνέχεια της Κοινοτικής Οδηγίας 1999/30/EK είναι η Κοινοτική Οδηγία 2008/50/EK που τέθηκε σε εφαρμογή 21 Μαΐου 2008. Στην καινούργια οδηγία προστέθηκαν και τα $\text{PM}_{2,5}$. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα όρια που έχει θέσει η Ευρωπαϊκή κοινότητα για τα PM_{10} και τα $\text{PM}_{2,5}$. Οι ημερομηνίες 01/01/2015 και 01/01/2020 είναι οι ημερομηνίες κατά την οποία πρέπει να έχει επιτευχθεί η οριακή αυτή τιμή.

Πίνακας 2: Οριακές τιμές για τα PM_{10} και $\text{PM}_{2,5}$ (Οδηγία 2008/50/EK).

Αιωρούμενα σωματίδια	Οριακές τιμές	
	24 ώρες	Ημερολογιακό έτος
PM_{10}	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
$\text{PM}_{2,5}$	-	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (01/01/2015) 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (01/01/2020)

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι εκτός από την Ευρωπαϊκή Κοινότητα και ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO) προτείνει κατευθυντήριες τιμές. Στον Πίνακα 3 φαίνονται τα όρια που προτείνει ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO, 2006) για τα $\text{PM}_{2,5}$ και τα PM_{10} .

Πίνακας 3: Προτεινόμενα όρια από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO, 2006).

Αιωρούμενα σωματίδια	Κατευθυντήριες τιμές	
	24 ώρες	Ημερολογιακό έτος
PM ₁₀	50 µg/m ³	20 µg/m ³
PM _{2,5}	25 µg/m ³	10 µg/m ³

Για την επαγγελματική έκθεση, η Διοίκηση Επαγγελματικής Ασφάλειας και Υγείας (OSHA) του Αμερικανικού Υπουργείου Εργασίας έχει καθιερώσει 8-h επιτρεπόμενο όριο έκθεσης 15.000 µg/m³ για τα ολικά αιωρούμενα σωματίδια (TSP). Για τα PM₁₀ έχει καθιερώσει 8-h επιτρεπόμενο όριο έκθεσης 5.000 µg/m³.

Επίσης, ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας έχει εισηγηθεί κατευθυντήριες τιμές για την παρουσία βαρέων μετάλλων στα αιωρούμενα σωματίδια. Οι κατευθυντήριες τιμές που έχουν προταθεί από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας έχουν εγκριθεί από την Ευρωπαϊκή Κοινότητα (οδηγίες 1999/30/EK (για Pb) και 2004/107/EK (για As και Cd). Οι ετήσιες οριακές τιμές για την προστασία της ανθρώπινης υγείας είναι ίσες με 0,06 και 0,05 µg/m³ για το As και το Cd (σε ισχύ από την 31^η Δεκεμβρίου 2012), αντίστοιχα. Για τον Pb η ετήσια οριακή τιμή ορίστηκε σε 0,5 µg/m³ (σε ισχύ από την 1^η Ιανουαρίου 2005). Επιπροσθέτως, ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO, 2000) πρότεινε κατευθυντήρια τιμή για την προστασία της ανθρώπινης υγείας για το Mn ίση με 0,15 µg/m³. Για το συνολικό Cr και το Cr³⁺ δεν έχει προταθεί κατευθυντήρια τιμή ενώ για το Cr⁶⁺ δεν υπάρχει ασφαλές επίπεδο με βάση τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας. Ωστόσο υπάρχει η οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης 2006/15/EK η οποία ορίζει ενδεικτική οριακή τιμή για Cr²⁺ και Cr³⁺ ίση με 2000 µg/m³ για 8 ώρες επαγγελματικής έκθεσης. Με βάση τον OSHA η 8-h οριακή τιμή επιτρεπτής έκθεσης για επαγγελματική έκθεση σε As, Cd, Pb, Cr⁶⁺, Cr³⁺ και Mn είναι 10, 5, 50, 5, 50 και 5000 µg/m³, αντίστοιχα.

ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

3.1. Εισαγωγή στα μοντέλα διασποράς

Τα μοντέλα διασποράς αποτελούν εργαλείο αποτίμησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, δεδομένου σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα είναι σε θέση να δώσουν μια πλήρη εικόνα της ποιότητας της ατμόσφαιρας σε μια περιοχή. Ο όρος διασπορά (dispersion) χρησιμοποιείται για να δηλώσει τη μεταφορά και την εξάπλωση στην ατμόσφαιρα ενός ρύπου ο οποίος εκπέμπεται από κάποια πηγή (π.χ. σημειακή, επιφανειακή). Τα μοντέλα διασποράς έχουν πολύ μεγάλο αριθμό εφαρμογών. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται (Μουσιόπουλος, 1999):

- Για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα.
- Για την περιβαλλοντική αδειοδότηση βιομηχανικών μονάδων (μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων).
- Για την κατασκευή έργων τα οποία σχετίζονται με την αέρια ρύπανση (αεροδρόμια, αυτοκινητόδρομοι).
- Για τη βραχυπρόθεσμη πρόγνωση των επιπέδων των αέριων ρύπων. Αυτή είναι απαραίτητη ώστε να λαμβάνονται μέτρα αποφυγής των επεισοδίων ρύπανσης.
- Για τη διαχείριση του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος. Τα μοντέλα διασποράς είναι κατάλληλα εργαλεία για να προβλέψουν τις επιπτώσεις διάφορων μέτρων αντιρρύπανσης.
- Για την πληροφόρηση των πολιτών για την ποιότητα του αέρα και για πιθανά επεισόδια αυξημένης ρύπανσης.
- Για την έρευνα.

Τα μοντέλα διασποράς, μπορούν να διακριθούν με βάση το είδος της μαθηματικής τους προσέγγισης που χρησιμοποιούν για τη διεξαγωγή των υπολογισμών. Τα μοντέλα διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες: μοντέλα ανύψωσης του θυσάνου, Γκαουσιανά μοντέλα, αριθμητικά μοντέλα (numerical models), στατιστικά ή στοχαστικά μοντέλα, ημι-εμπειρικά μοντέλα, Ευρηλιανά μοντέλα (Eulerian models) και Λανγκρασιανά μοντέλα (Lagrangian models). Η ανάλυση τους ξεφεύγει από τους στόχους της διατριβής.

3.2. Εισαγωγή στο μοντέλο διασποράς της Αμερικανικής Υπηρεσίας Προστασίας του Περιβάλλοντος

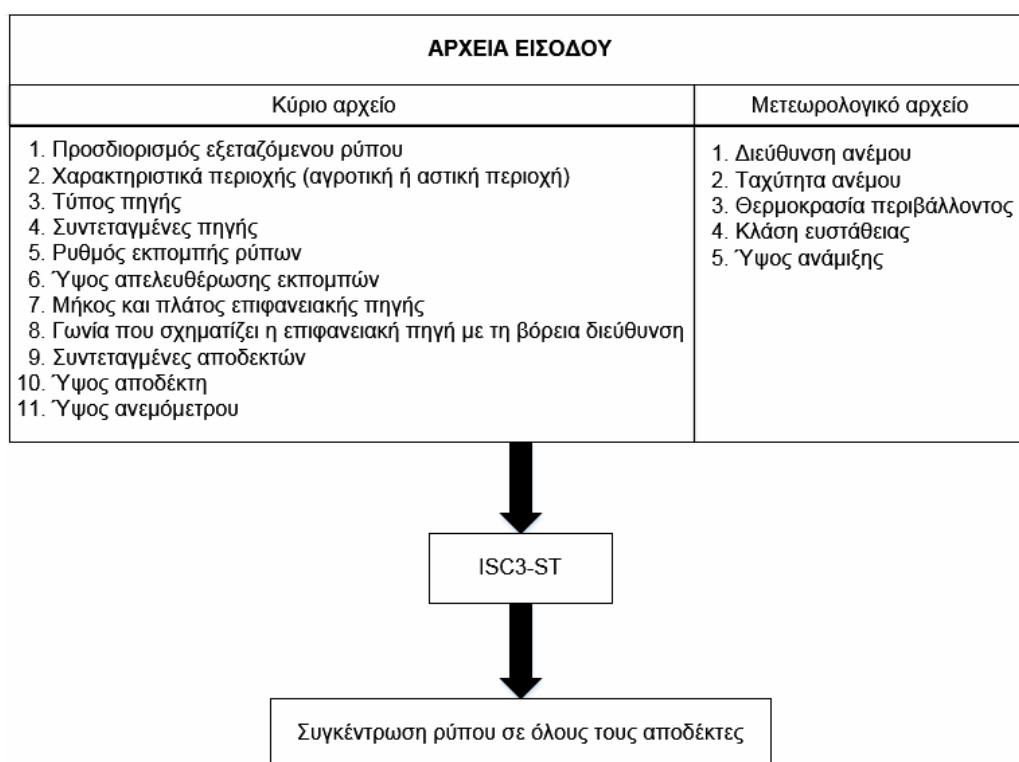
Το μοντέλο ISC3 είναι Γκαουσιανό μοντέλο το οποίο βασίζεται στην εξίσωση θυσάνου του Gauss και αναπτύχθηκε από την Αμερικανική Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος (US EPA, 1995). Η εξίσωση θυσάνου του Gauss αποτελεί τη δημοφιλέστερη μεθοδολογία υπολογισμού της ατμοσφαιρικής διασποράς. Επομένως, τα Γκαουσιανά μοντέλα αποτελούν το πιο σύνηθες μοντέλο για τον υπολογισμό της διασποράς ρύπων. Σκοπός του μοντέλου ISC3 είναι ο υπολογισμός των συγκεντρώσεων των ρύπων σε επιλεγμένες περιοχές ενδιαφέροντος όπου τοποθετούνται αποδέκτες.

Για περιπτώσεις όπου η περίοδος υπολογισμού είναι από μια ημέρα μέχρι μερικούς μήνες χρησιμοποιείται το μοντέλο ISC3-ST (ωριαία αποτελέσματα, ημερήσια αποτελέσματα) ενώ για περιπτώσεις μεγάλης χρονικής διάρκειας χρησιμοποιείται το μοντέλο ISC3-LT (ετήσια αποτελέσματα). Στην παρούσα διατριβή χρειάζονται ωριαίες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων. Επομένως, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο ISC3-ST. Το μοντέλο έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει πολλαπλών τύπων πηγές. Οι πηγές κατηγοριοποιούνται σε τέσσερις τύπους: (1) Σημειακές, (2) Επιφανειακές, (3) Όγκου και (4) Ανοιχτού φρέατος. Οι γραμμικές πηγές μπορούν να θεωρηθούν σαν μια αλληλουχία πηγών όγκου ή σαν επιμήκεις επιφανειακές πηγές (US EPA, 1995).

Για την εφαρμογή του μοντέλου ISC3-ST απαιτούνται δύο βασικά αρχεία: (1) το κύριο αρχείο και (2) το μετεωρολογικό αρχείο. Το κύριο αρχείο περιέχει πληροφορίες για την πηγή (πχ συντεταγμένες πηγής, τύπος πηγής), πληροφορίες για τους αποδέκτες (πχ συντεταγμένες αποδεκτών, ύψος

αποδέκτη), πληροφορίες για το μετεωρολογικό σταθμό (πχ ύψος ανεμόμετρου) και επιλογές για το αρχείο εξόδου. Το μετεωρολογικό αρχείο περιέχει δεδομένα για την ταχύτητα του ανέμου, τη θερμοκρασία του αέρα, τη διεύθυνση του ανέμου, την κλάση ισορροπίας και το ύψος ανάμιξης.

Χρειάζονται επιπλέον μετεωρολογικές μεταβλητές για τον υπολογισμό της ξηρής και υγρής εναπόθεσης, όπως η ταχύτητα τριβής, το μήκος monin-Obukhov (λεπτομέρειες στην Ενότητα 7.3.), το μήκος τραχύτητας της επιφάνειας, ο κωδικός βροχόπτωσης (π.χ. 1 για ασθενής βροχή, 2 για μέτρια βροχή και 3 για δυνατή βροχή) και ο ρυθμός βροχόπτωσης. Τα παραπάνω στοιχεία εισαγωγής χρησιμοποιούνται από το μοντέλο διασποράς για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων των ρύπων σε όλους τους αποδέκτες. Στην Εικόνα 4 παρουσιάζεται η δομή του μοντέλου διασποράς ISC3-ST.



Εικόνα 4: Δομή μοντέλου διασποράς ISC3-ST για επιφανειακή πηγή.

Το μοντέλο διασποράς της Αμερικανικής Υπηρεσίας Προστασίας του Περιβάλλοντος (ISC3) είναι δημοφιλές για την απλότητα του και για το μικρό όγκο δεδομένων εισαγωγής. Επίσης, προσφέρεται δωρεάν από την Αμερικανική υπηρεσία προστασίας του περιβάλλοντος. Αρκετές μελέτες έχουν χρησιμοποιήσει το μοντέλο ISC3 (Kumar κ.ά., 1999; Hanna κ.ά., 2001;

Silverman κ.ά., 2007; Faulkner κ.ά., 2008). Το μοντέλο ISC3 έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει πολλαπλών τύπων πηγές όπως, σημειακές, επιφανειακές, όγκου και ανοιχτού φρέατος, σε αντίθεση με άλλα μοντέλα (π.χ. μοντέλο RAM) τα οποία χρησιμοποιούν μόνο σημειακές ή επιφανειακές πηγές. Το μοντέλο ISC3 είναι ευέλικτο στην κατασκευή πολικών και καρτεσιανών αποδεκτών παρέχοντας στο χρήστη τη δυνατότητα να προσδιορίσει πολλαπλούς αποδέκτες σε μία μόνο εφαρμογή και να συνδυάσει πολικούς και καρτεσιανούς αποδέκτες στην ίδια πάντα εφαρμογή. Η δυνατότητα αυτή είναι χρήσιμη στις εφαρμογές εκείνες που χρειάζεται ένα αραιό πλέγμα για όλη την περιοχή προσομοίωσης και ένα πιο πυκνό πλέγμα σε μια συγκεκριμένη περιοχή όπου αναμένονται μέγιστες τιμές συγκεντρώσεων ρύπων.

Επίσης, το μοντέλο ISC3 είναι πιο χρήσιμο για την ανάλυση μικρής εμβέλειας μεταφοράς ρύπων (εντός 20 χιλιομέτρων) από την πηγή (Silverman κ.ά., 2007). Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του μοντέλου ISC3 σε σύγκριση με άλλα μοντέλα διασποράς (π.χ. AERMOD και ADMS) είναι η ευκολία στη χρήση του και η γρήγορη απόκριση του (Hanna κ.ά., 2001). Επιπλέον, μικρός όγκο μετεωρολογικών δεδομένων εισόδου απαιτούνται από το μοντέλο ISC3 σε σύγκριση με άλλα μοντέλα διασποράς (π.χ. AERMOD) (Hanna κ.ά., 2001).

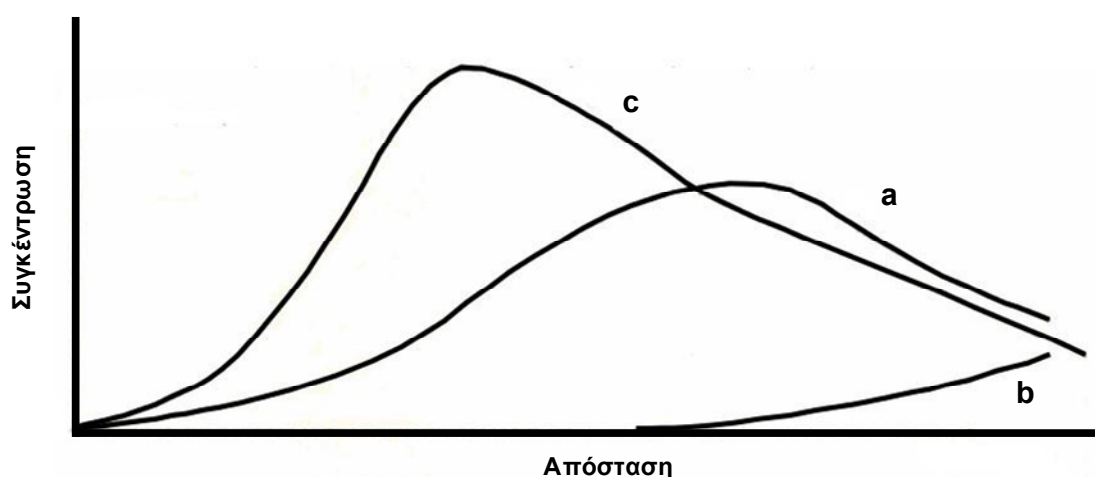
3.3. Επίδραση μετεωρολογικών παραμέτρων στη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων

Οι μετεωρολογικές παράμετροι επηρεάζουν τα επίπεδα των ρύπων στην ατμόσφαιρα (Briggs κ.ά., 2008). Η ταχύτητα του ανέμου προσδιορίζει το πόσο γρήγορα θα απομακρυνθούν οι ρύποι από το σημείο εκπομπής. Η άπνοια ή οι άνεμοι χαμηλής έντασης δεν ευνοούν τη διασπορά των ρύπων, οπότε συντελούν στην αύξηση των επιπέδων ρύπανσης κοντά στην πηγή (Chaloulakou κ.ά., 2003). Η διεύθυνση του ανέμου καθορίζει την περιοχή προς την οποία θα μεταφερθούν οι ρύποι στην ατμόσφαιρα. Τα επίπεδα ρύπανσης σε κάποια συγκεκριμένη περιοχή μπορεί να αλλάξουν σε περίπτωση που η διεύθυνση του ανέμου μεταβληθεί. Επομένως, η διεύθυνση

του ανέμου σχετίζεται άμεσα με την επιβάρυνση μιας συγκεκριμένης περιοχής (Van der Wal και Janssen, 2000).

Επιπλέον, η βροχόπτωση είναι μια σημαντική μετεωρολογική παράμετρος. Η βροχόπτωση ευνοεί τον τακτικό καθαρισμό της ατμόσφαιρας από τα αιωρούμενα σωματίδια. Οι σταγόνες της βροχής συμπαρασύρουν τα σωματίδια με αποτέλεσμα αυτά να επικάθονται στην επιφάνεια του εδάφους. Αυτό πραγματοποιείται με την ενσωμάτωση των σωματιδίων στα υδροσταγονίδια και την απόπλυσή τους με τη βροχή.

Το ύψος ανάμιξης επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αραίωση των ρύπων. Όσο πιο ψηλά εκτείνεται τόσο μεγαλύτερη αραίωση των ρύπων επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των τυρβώδων στροβίλων. Όσο μεγαλύτερη αραίωση ρύπων επιτυγχάνεται τόσο μικρότερες είναι οι συγκεντρώσεις αυτών κοντά στο έδαφος. Όταν το ύψος ανάμιξης είναι μικρό η αραίωση των ρύπων είναι μικρή. Οι ρύποι τείνουν να συγκεντρώνονται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, όποτε οι συγκεντρώσεις των ρύπων θα είναι μεγαλύτερες κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Επίσης, η κλάση ισορροπίας είναι μια σημαντική παράμετρος που επηρεάζει τη συγκέντρωση των ρύπων (Εικόνα 5).



Εικόνα 5: Επίδραση της ατμοσφαιρικής ισορροπίας στις συγκεντρώσεις από μια ανυψωμένη πηγή. a. Ουδέτερη στρωμάτωση, b. Ευσταθείς συνθήκες, c. Ασταθείς συνθήκες (Μελάς, 2007).

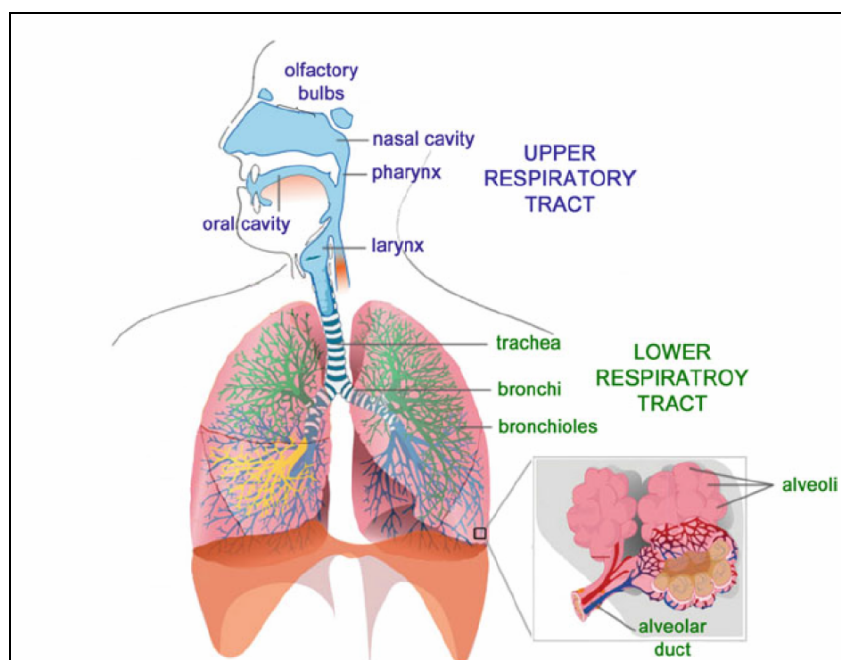
Η ατμοσφαιρική ισορροπία έχει άμεση επίπτωση στο μέγεθος των στροβίλων που επικρατούν. Σε συνθήκες μεγάλης αστάθειας οι τυρβώδεις στρόβιλοι είναι μεγαλύτεροι και η διάχυση έντονη, ενώ σε συνθήκες

ευστάθειας επικρατούν μικροί στρόβιλοι και η διάχυση γίνεται πολύ αργά. Επίσης, σε συνθήκες ευστάθειας το ύψος του οριακού στρώματος είναι μικρότερο. Επομένως, οι μετεωρολογικές παράμετροι επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη διασπορά (οριζόντια μεταφορά) και τη διάχυση (κατακόρυφη μεταφορά) των ρύπων στην ατμόσφαιρα.

ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΡΑΣΗΣ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΑΝΑΠΝΕΥΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

4.1. Περιγραφή της ανατομίας και φυσιολογίας του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος

Οι ρύποι εισέρχονται στον οργανισμό μέσω της εισπνοής, της κατάποσης και της δερματικής επαφής. Η εισπνοή αποτελεί την κυρίαρχη οδό έκθεσης σε αιωρούμενα σωματίδια, ιδιαίτερα στο εργασιακό περιβάλλον. Το αναπνευστικό σύστημα αποτελείται από το ανώτερο και το κατώτερο αναπνευστικό σύστημα (Εικόνα 6).



Εικόνα 6: Ανατομία αναπνευστικού συστήματος (Τυ κ.ά., 2013).

Το ανώτερο αναπνευστικό σύστημα περιλαμβάνει τα όργανα που βρίσκονται στην εκτός θώρακα περιοχή. Τα βασικά όργανα του ανώτερου αναπνευστικού συστήματος είναι (Τυ κ.ά., 2013):

- **Ρινική κοιλότητα:** Η ρινική κοιλότητα ρυθμίζει τη θερμοκρασία και την υγρασία του εισπνεόμενου αέρα. Επίσης καθαρίζει τον αέρα από μεγάλου μεγέθους σωματίδια.
- **Φάρυγγας:** Ο φάρυγγας συνδέει την πρόσθια ρινική κοιλότητα με τον λάρυγγα και τη στοματική κοιλότητα με τον οισοφάγο.
- **Λάρυγγας:** Ο λάρυγγας χρησιμεύει ως αεραγωγός και ως φωνητικό όργανο. Η βλεννογόνος του λάρυγγα χρησιμεύει για να απομακρύνει τα ξένα σωματίδια και για να ρυθμίζει τη θερμοκρασία και την υγρασία του εισπνεόμενου αέρα (τα ίδια φυσιολογικά χαρακτηριστικά με τη ρινική κοιλότητα).

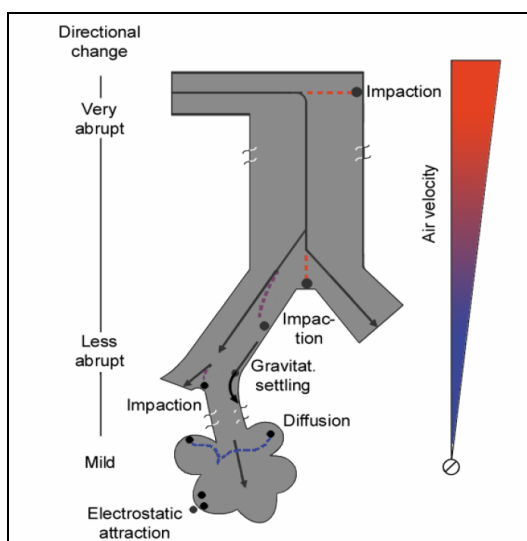
Το κατώτερο αναπνευστικό συστήματος περιλαμβάνει τα όργανα που βρίσκονται σχεδόν εξ ολοκλήρου μέσα σε αυτή. Τα βασικά όργανα τους κατώτερου αναπνευστικού συστήματος είναι (Τυ κ.ά., 2013):

- **Τραχεία:** Αποτελεί τη συνέχεια του λάρυγγα με μήκος 11-14 cm. Στο εσωτερικό της καλύπτεται από βλεννογόνο η οποία εμποδίζει την είσοδο σε ξένα σωματίδια. Τα ξένα σωματίδια αυτά απομακρύνονται από τις αναπνευστικές οδούς με το βήχα.
- **Βρόγχοι:** Η τραχεία διαιρείται σε 2 κύριους βρόγχους με τοιχώματα ίδιας κυτταρικής σύστασης με την τραχεία. Ο δεξιός βρόγχος εισέρχεται στο δεξιό πνεύμονα ενώ ο αριστερός βρόγχος εισέρχεται στον αριστερό πνεύμονα .
- **Κυψελίδες:** Οι πνεύμονες ενός ενήλικα άνθρωπου περιλαμβάνουν περίπου 300 εκατομμύρια κυψελίδες με συνολική επιφάνεια 70-80 m² (για την ανταλλαγή αερίων). Τα σωματίδια που φθάνουν σε αυτή την περιοχή έχουν μικρό μέγεθος.

Στα μοντέλα εναπόθεσης σωματιδίων το αναπνευστικό σύστημα προσομοιώνεται από ένα σύστημα αεραγωγών που συνδέονται μεταξύ τους σε συγκεκριμένα σημεία διακλάδωσης. Η διακλάδωση του αεραγωγού μεγαλύτερης διαμέτρου πραγματοποιείται συνήθως διχοτομικά, δηλαδή ένας κύριος κλάδος (πρόγονος) διαιρείται σε δυο παρακλάδια (απόγονοι).

4.2. Μηχανισμοί εναπόθεσης αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα

Με τον όρο εναπόθεση σωματιδίων αναφέρεται η απομάκρυνση των σωματιδίων από την αέρια φάση (αιωρούμενη κατάσταση) και η μεταφορά (την προσκόλληση) τους στα τοιχώματα των αεραγωγών του αναπνευστικού συστήματος μέσω διαφόρων μηχανισμών εναπόθεσης (Εικόνα 7).



Εικόνα 7: Μηχανισμοί εναπόθεσης αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα (Hussain, 2011).

Οι πιο σημαντικοί μηχανισμοί εναπόθεσης αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα είναι (Hussain, 2011):

- **Πρόσκρουση (Impactation):** Τα σωματίδια δεν μπορούν να ακολουθήσουν τις γραμμές ροής όταν αυτές αλλάζουν απότομα κατεύθυνση και εναποτίθενται στα τοιχώματα των αεραγωγών. Αυτός ο μηχανισμός παρατηρείται στη ρινοφαρυγγική και τραχειοβρογχική περιοχή.
- **Καθίζηση (Sedimentation):** Η καθίζηση προκαλείται από τη βαρύτητα. Όταν η επίδραση της βαρύτητας είναι μεγαλύτερη της αντίστασης του αέρα τα σωματίδια εγκαταλείπουν τις γραμμές ροής και καθιζάνουν. Αυτός ο μηχανισμός παρατηρείται στα βρογχιόλια και στην κυψελιδική περιοχή.

- **Διάχυση (Diffusion):** Η διάχυση προκαλείται από την κίνηση Brown και είναι ο μηχανισμός εναπόθεσης σωματιδίων λόγω της σύγκρουσης με μόρια αέρα. Αυξημένη εναπόθεση σωματιδίων λόγω διάχυσης παρατηρείται κυρίως στην κυψελιδική περιοχή.

Άλλοι μηχανισμοί εναπόθεσης μικρότερης σημασίας είναι η ηλεκτροστατική καθίζηση (αφορά ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια) και η αναχαίτιση-ενσφήνωση (φυσική επαφή των σωματιδίων με τα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού).

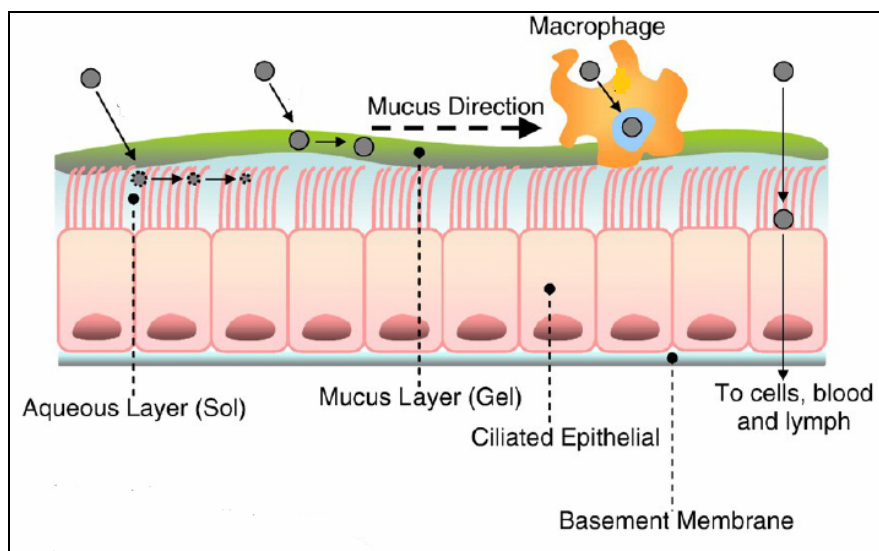
4.3. Μηχανισμοί απομάκρυνσης σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα

Ο ανθρώπινος οργανισμός έχει δημιουργήσει μηχανισμούς άμυνας για την απομάκρυνση των σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα. Διαφορετικοί μηχανισμοί απομάκρυνσης λειτουργούν σε διαφορετικές περιοχές του αναπνευστικού συστήματος. Οι πιο σημαντικοί μηχανισμοί απομάκρυνσης είναι (ICRP 1994; Hussain, 2011):

- **Μηχανικός καθαρισμός (mechanical clearance):** Ο μηχανικός καθαρισμός αφορά: φτέρνισμα, βήχα και φύσημα της μύτης. Εμφανίζεται κυρίως στην εκτός θώρακα περιοχή.
- **Καθαρισμός μέσω της βλέννας (Mucociliary clearance):** Είναι ο κύριος μηχανισμός απομάκρυνσης αδιάλυτων σωματιδίων στην τραχειοβρογχική περιοχή. Η απομάκρυνση πραγματοποιείται με το στρώμα της βλέννας. Το στρώμα της βλέννας κινείται προς τον λάρυγγα όπου η βλέννα καταπίνεται προς το γαστρεντερικό σύστημα ή αφαιρείται μέσω απόπτωσης.
- **Καθαρισμός από τα μακροφάγα κύτταρα (Macrophage-mediated clearance):** Είναι ο κύριος μηχανισμός απομάκρυνσης στην κυψελιδική περιοχή. Η απομάκρυνση των σωματιδίων από την κυψελιδική περιοχή γίνεται μέσω της φαγοκύτωσης (από τα μακροφάγα κύτταρα) και τη μετακίνηση τους (με τη βλέννα) στα βρογχιόλια. Εάν η ανοδική μετακίνηση προς τα βρογχιόλια δεν είναι δυνατή κατευθύνονται προς το κυκλοφορικό ή το λεμφικό σύστημα. Ο

καθαρισμός από τα μακροφάγα κύτταρα θεωρείται αργός μηχανισμός απομάκρυνσης και μπορεί να χρειαστούν χρόνια για να καθαρίσει την κυψελιδική περιοχή από τα εναποτιθέμενα σωματίδια.

- **Απορρόφηση στο αίμα (absorption into the blood):**
Πραγματοποιείται σε δύο στάδια: (α) τη διάλυση (dissolution) των σωματιδίων σε συστατικά που μπορούν να απορροφηθούν στο αίμα και την (β) ανάληψη/πρόσληψη (uptake) αυτών των συστατικών στο αίμα. Στην απορρόφηση περιλαμβάνεται και η απευθείας απορρόφηση των σωματιδίων στο αίμα (κυρίως για υπέρλεπτα σωματίδια). Η απορρόφηση των σωματιδίων στο αίμα παρατηρείται σε όλες τις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος εκτός από την πρόσθια ρινική κοιλότητα.



Εικόνα 8: Μηχανισμοί απομάκρυνσης σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα (Hussain, 2011).

Επίσης, 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. Ως αποτέλεσμα μεταφέρονται με τις βλεφαρίδες (ICRP, 1994). Επομένως, με τους παραπάνω μηχανισμούς απομάκρυνσης (Εικόνα 8), πραγματοποιείται καθαρισμός των εναποτιθέμενων σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα προς το γαστρεντερικό σύστημα, τους τοπικούς λεμφαδένες, το αίμα και ακολούθως σε όλο τον ανθρώπινο οργανισμό (ICRP, 1994).

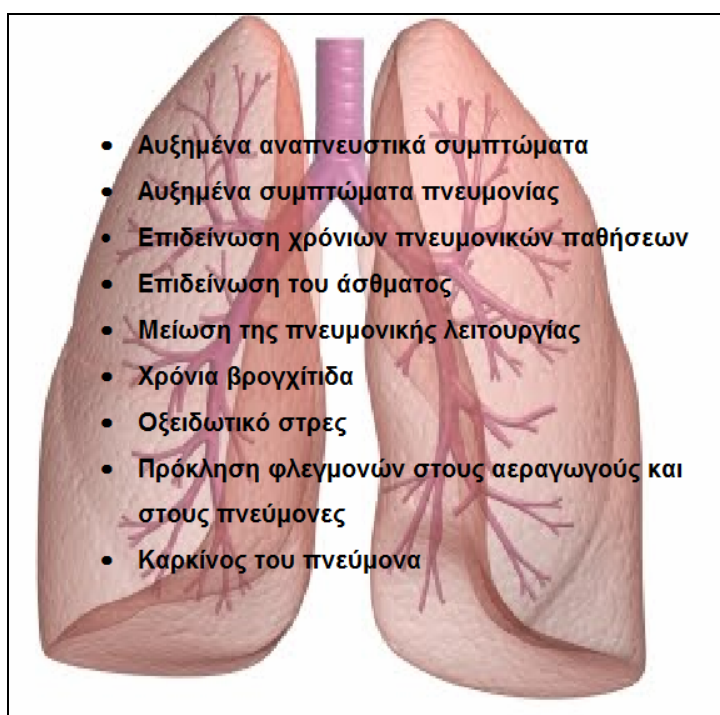
4.4. Οι επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα

Τα τελευταία χρόνια το ερευνητικό ενδιαφέρον επικεντρώνεται στις επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα (Anderson κ.ά., 2012; Ruzer και Hurley, 2012). Μάλιστα μελέτες έχουν δείξει ότι η έκθεση των ανθρώπων σε αιωρούμενα σωματίδια (συγκεκριμένα στα λεπτά σωματίδια) είναι πιο επικίνδυνη από ότι η έκθεση σε άλλους ατμοσφαιρικούς ρύπους (Vedal, 1997). Δεδομένα από επιδημιολογικές μελέτες έχουν συνδέσει τη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων στο περιβάλλον με αρνητικές επιπτώσεις στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα (Brunekreef και Forsberg, 2005; Pope και Dockery, 2006; Anderson κ.ά., 2012). Οι επιδημιολογικές μελέτες εξετάζουν τη σχέση ανάμεσα στην έκθεση των ανθρώπων σε έναν ρύπο (στην παρούσα εργασία τα αιωρούμενα σωματίδια) και τα αποτελέσματα που προκαλεί αυτή η έκθεση στην ανθρώπινη υγεία.

Αύξηση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων προκαλεί αύξηση της θνησιμότητας (Pope κ.ά., 2002; Pope και Dockery, 2006; Anderson κ.ά., 2012). Συγκεκριμένα μια πιθανή αύξηση στη συγκέντρωση των εισπνεύσιμων (inhaled) σωματιδίων κατά $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ θα προκαλέσει 1% αύξηση στην πρόωρη θνησιμότητα (Dockery κ.ά., 1993; Schwartz κ.ά., 1996). Επίσης, ευρήματα από επιδημιολογικές μελέτες δείχνουν πως η βραχυχρόνια έκθεση σε μεγάλες συγκεντρώσεις σωματιδίων μπορούν να έχουν δυσμενέστερες επιπτώσεις στην υγεία από ότι η μακροχρόνια έκθεση σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις (Michaels και Kleinman, 2000).

Οι επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα συνδέονται, εκτός από τη συγκέντρωσή τους στην ατμόσφαιρα, με το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων. Το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων συνδέεται άμεσα με την ικανότητά τους να διεισδύουν και να εναποτίθενται στο αναπνευστικό σύστημα. Γενικά όσο μικρότερη διάμετρο έχει ένα σωματίδιο τόσο πιο βαθιά μπορεί να εισχωρήσει στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου και να φτάσει στην κυψελιδική περιοχή (Pope και Dockery, 2006; Milford κ.ά., 2013).

Τα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 0,1 μm είναι ιδιαίτερα επιβλαβή για την ανθρώπινη υγεία καθώς είναι αρκετά μικρά ώστε να διαπερνούν τις μεμβράνες της αναπνευστικής οδού και να εισέρχονται στην κυκλοφορία του αίματος ή να μεταφέρονται μέσω των οσφρητικών νεύρων στον εγκέφαλο (Pöschl, 2005). Όσον αφορά στα χονδρά σωματίδια, εναποτίθενται στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα (Milford κ.ά., 2013). Οι επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα παρουσιάζονται στην Εικόνα 9.



Εικόνα 9: Επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα (Pope and Dockery, 2006; Anderson κ.ά., 2012).

Η έκθεση σε PM_{10} συσχετίζεται περισσότερο με αναπνευστικά προβλήματα (όπως το άσθμα), ενώ η έκθεση σε $\text{PM}_{2,5}$ συσχετίζεται με καρδιαγγειακά νοσήματα (Mutlu κ.ά., 2007). Επιπλέον, η έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια αυξάνει τις εισαγωγές στα νοσοκομεία, τους πρόωρους θανάτους, την ιατροφαρμακευτική περίθαλψη και τις ημέρες της μειωμένης παραγωγικότητας. Επομένως, η επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων στην ανθρώπινη υγεία είναι σημαντική.

Οι επιπτώσεις των σωματιδίων στην υγεία συνδέονται άμεσα, όχι μόνο με το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων (το οποίο είναι καθοριστικό τόσο για τη διείσδυση και την απόθεση τους στο αναπνευστικό σύστημα) αλλά και με τη χημική τους σύσταση η οποία διαφέρει ανάλογα με την πηγή από την οποία προέρχονται. Σύμφωνα με τους Laden κ.ά. (2000) διαπιστώθηκε αύξηση στην ημερήσια θνησιμότητα κατά 3,4% όταν οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων που εκπέμπονταν από τα οχήματα αυξάνονταν κατά $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Αυτό οφείλεται στα μεταλλικά στοιχεία των αιωρούμενων σωματιδίων που εκπέμπονταν από τα οχήματα. Η παρουσία μεταλλικών στοιχείων στα αιωρούμενα σωματίδια αποτέλεσε αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας εξαιτίας των δυσμενών επιπτώσεων που επιφέρει στην υγεία του ανθρώπου η εισπνοή μεταλλικών στοιχείων. Έχει αποδειχθεί ότι τα μεταλλικά στοιχεία των αιωρούμενων σωματιδίων προκαλούν βλάβες στο αναπνευστικό σύστημα λόγω της τοξικότητάς τους (Pritchard κ.ά., 1996; Ruzer και Hurley, 2012).

Η Αμερικανική υπηρεσία προστασίας του περιβάλλοντος έχει δημιουργήσει ένα ολοκληρωμένο σύστημα πληροφοριών κινδύνου (IRIS). Το IRIS είναι ένα πρόγραμμα που αξιολογεί πληροφορίες σχετικά με τις επιπτώσεις στην υγεία που μπορεί να προκύψουν από την έκθεση σε περιβαλλοντικούς ρύπους. Για την εισπνοή βαρέων μετάλλων (As, Cr^{6+} , Cd, Ni) έχει καθορίσει τρία επίπεδα κινδύνου για την πιθανότητα σχηματισμού καρκίνου (1:10.000, 1:100.000 και 1:1.000.000). Η πιθανότητα σχηματισμού καρκίνου είναι 1:10.000 όταν εκτίθεται (μέσω της εισπνοής) σε συγκεντρώσεις ίσες με $20 \text{ ng}/\text{m}^3$ για το As, $8 \text{ ng}/\text{m}^3$ για το Cr^{6+} , $60 \text{ ng}/\text{m}^3$ για το Cd, και $400 \text{ ng}/\text{m}^3$ για το Ni. Η πιθανότητα σχηματισμού καρκίνου είναι 1:100.000 λόγω της εισπνοής βαρέων μετάλλων σε συγκεντρώσεις ίσες με $2 \text{ ng}/\text{m}^3$ για το As, $0,8 \text{ ng}/\text{m}^3$ για το Cr^{6+} , $6 \text{ ng}/\text{m}^3$ για το Cd, και $40 \text{ ng}/\text{m}^3$ για το Ni. Η πιθανότητα σχηματισμού καρκίνου είναι 1:1.000.000 όταν εκτίθεται (μέσω της εισπνοής) σε συγκεντρώσεις ίσες με $0,2 \text{ ng}/\text{m}^3$ για το As, $0,08 \text{ ng}/\text{m}^3$ για το Cr^{6+} , $0,6 \text{ ng}/\text{m}^3$ για το Cd και $4 \text{ ng}/\text{m}^3$ για το Ni (US-EPA, 1986; US-EPA, 2005). Επομένως, τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων τα οποία επηρεάζουν την επικινδυνότητά τους στην ανθρώπινη υγεία είναι η συγκέντρωση, το μέγεθος και η χημική τους σύσταση.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΔΟΣΗΣ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΣΩΜΑ (ExDoM2)

5.1. Εισαγωγή-περίληψη του μοντέλου

Για τον προσδιορισμό της εσωτερικής δόσης των αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο σώμα αναπτύχθηκε ένα αναθεωρημένο μοντέλο εναπόθεσης/απομάκρυνσης σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα (αναβαθμισμένη έκδοση του ExDoM (Exposure-Dose Model; Αλεξανδροπούλου, 2010)) και ένα φαρμακοκινητικό (PBPK) μοντέλο για τη μεταφορά των βαρέων μετάλλων, που περιέχουν τα αιωρούμενα σωματίδια, από το αίμα στο ανθρώπινο σώμα (π.χ. συκώτι, καρδιά, νεφροί, εγκέφαλος, γαστρεντερικό σύστημα, οστά) (Chalvatzaki και Lazaridis, 2015).

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ενοποίηση του αναθεωρημένου μοντέλου εναπόθεσης/απομάκρυνσης σωματιδίων από το αναπνευστικό και του PBPK μοντέλου σε μοντέλο υπολογισμού της εσωτερικής δόσης στο ανθρώπινο σώμα (ExDoM2). Στην Ενότητα 5.2 αναλύεται το αναθεωρημένο μοντέλο εναπόθεσης/απομάκρυνσης σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα (ενσωματώνοντας νέους μηχανισμούς καθαρισμού σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα) ενώ στην Ενότητα 5.3 αναλύεται το PBPK μοντέλο.

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί αρκετά μοντέλα υπολογισμού της δόσης σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα στη διεθνή βιβλιογραφία (ICRP, 1994; RIVM, 2002; Salma κ.ά., 2002; Mitsakou κ.ά., 2005; Αλεξανδροπούλου, 2010). Οι περισσότερες από τις μέχρι σήμερα ερευνητικές προσπάθειες στον τομέα αυτό περιορίζονται στον υπολογισμό της εναποτιθέμενης δόσης των αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα ή της απομάκρυνσης των αιωρούμενων σωματιδίων μετά την

απόθεση. Επομένως, η σημαντικότερη διαφορά του μοντέλου ExDoM2 (Chalvatzaki και Lazaridis, 2015) που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας από τα υπόλοιπα μοντέλα (π.χ. ExDoM, MPPD) είναι ότι ενσωματώνει ένα PBPK μοντέλο για τη μεταφορά των βαρέων μετάλλων (As, Pb, Cd, Cr και Mn) που περιέχουν τα αιωρούμενα σωματίδια από το αίμα στο ανθρώπινο σώμα.

Επιπλέον, το μοντέλο εναπόθεσης/απομάκρυνσης σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα του μοντέλου ExDoM2 ενσωματώνει νέους μηχανισμούς καθαρισμού σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα με βάση το μοντέλο της ICRP (2015) και επιτρέπει στο χρήστη να εισάγει διαφορετικές μετρήσεις κατανομής μεγέθους σωματιδίων (ανά ώρα) για τον καθορισμό ρεαλιστικού σεναρίου έκθεσης του ανθρώπου σε διαφορετικά μικροπεριβάλλοντα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Οι μετρήσεις κατανομής μεγέθους σωματιδίων χρησιμοποιούνται από το μοντέλο ExDoM2 για τον υπολογισμό της μέσης αεροδυναμικής διαμέτρου μάζας (MMAD) και της τυπικής απόκλισης (s_g) της κατανομής μεγέθους σωματιδίων χρησιμοποιώντας τη μέθοδο που περιγράφεται από τον Hinds (1999).

Σύμφωνα με τη μέθοδο του Hinds (1999), κατασκευάζεται ένα διάγραμμα με τις διαμέτρους των αιωρούμενων σωματιδίων (σε λογαριθμική κλίμακα ο άξονας x) συναρτήσει του αθροιστικού ποσοστού μάζας (άξονας y). Από το διάγραμμα αυτό προκύπτει η μέση διάμετρος μάζας ($d_{50\%}$ ή MMAD) και η διάμετρος στην οποία αντιστοιχεί το 84% (αθροιστικό ποσοστό) της μάζας. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τη μέση διάμετρο ($d_{50\%}$) και τη διάμετρο στην οποία αντιστοιχεί το 84% (αθροιστικό ποσοστό) της μάζας υπολογίζεται η τυπική απόκλιση από τη σχέση:

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

Το μοντέλο ExDoM2 παρέχει τη δυνατότητα να εκτιμήσεις τις παραμέτρους MMAD, s_g χωριστά για κάθε κλάσμα (λεπτά και χονδρά σωματίδια). Επίσης και το μοντέλο ExDoM χρησιμοποιεί τη μέθοδο του Hinds (1999), όμως το μοντέλο ExDoM δεν επιτρέπει στο χρήστη να εισάγει διαφορετικές μετρήσεις κατανομής μεγέθους σωματιδίων (ανά ώρα) για τον καθορισμό ρεαλιστικού σεναρίου έκθεσης του ανθρώπου σε διαφορετικά μικροπεριβάλλοντα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αυτή τη δυνατότητα την

παρέχει μόνο το μοντέλο ExDoM2. Το μοντέλο ExDoM2 κατασκευάστηκε σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB. Το μοντέλο ExDoM2 επιτρέπει στο χρήστη να εισάγει τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου σε γραφικό περιβάλλον διεπαφής χρήστη (GUI) και σε αρχεία Excel. Στην Ενότητα 5.4 αναλύονται τα δεδομένα εισόδου που χρειάζονται για την εφαρμογή του μοντέλου.

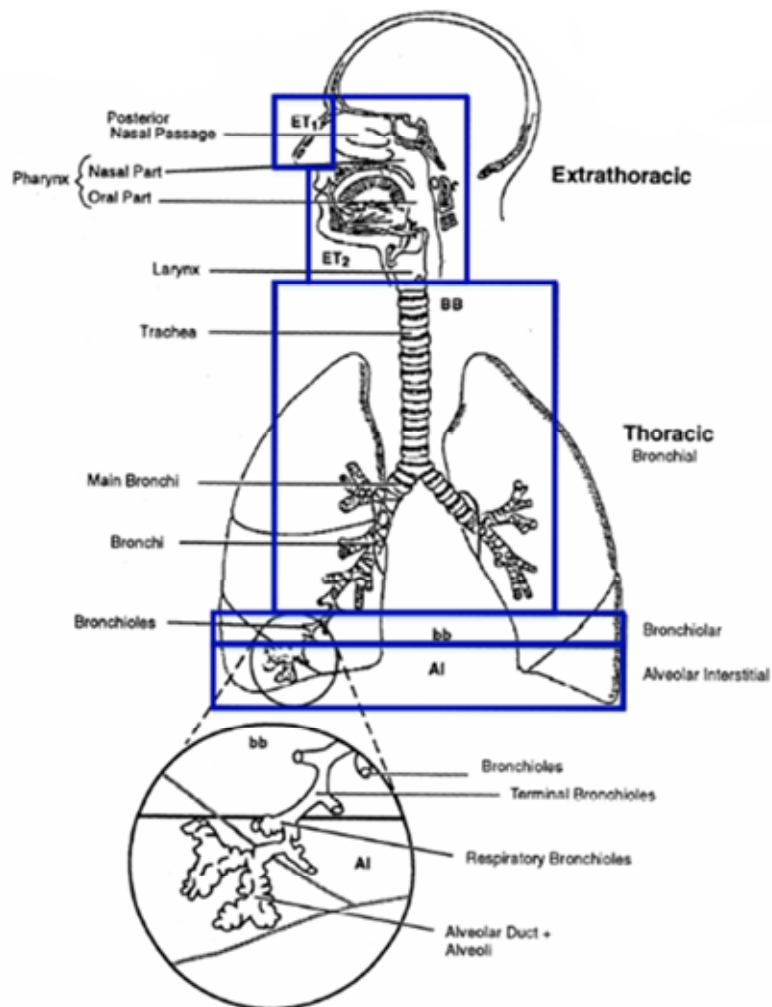
5.2. Ανάπτυξη αναθεωρημένου μοντέλου εναπόθεσης/απομάκρυνσης σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα

Το μοντέλο εναπόθεσης/απομάκρυνσης σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα του ExDoM2 βασίστηκε στο αναθεωρημένο μοντέλο του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος (HRTM) της Διεθνούς Υπηρεσίας Ακτινοπροστασίας (ICRP, 2015) και στο μοντέλο ExDoM που αναπτύχθηκε από τη Δρ. Β. Αλεξανδρόπουλου (Αλεξανδροπούλου, 2010). Το μοντέλο ExDoM είναι η μοντελοποίηση του HRTM (αρχική έκδοση) της ICRP (1994) σε προγραμματιστικό περιβάλλον Fortran. Επομένως, το μοντέλο εναπόθεσης/απομάκρυνσης σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα που αναπτύχθηκε για το ExDoM2 αποτελεί την αναβάθμιση του μοντέλου ExDoM ενσωματώνοντας νέους μηχανισμούς καθαρισμού σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα με βάση τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε από την ICRP (2015).

Το μοντέλο του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος αποτελείται από ένα μοντέλο εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα και ένα μοντέλο απομάκρυνσης σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα. Η ICRP (2015) τις περισσότερες και σημαντικότερες αλλαγές τις πραγματοποίησε στο μοντέλο καθαρισμού σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα. Επομένως, η παρούσα εργασία επικεντρώνεται περισσότερο στο μοντέλο απομάκρυνσης σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα που βασίζεται στα καινούργια δεδομένα σχετικά με τον καθαρισμό των σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα.

Για τον υπολογισμό της εναποτιθέμενης δόσης το αναπνευστικό σύστημα διαιρείται σε δυο περιοχές (Εικόνα 10): η εκτός θώρακα περιοχή (ET) και η θωρακική περιοχή (TH). Η εκτός θώρακα περιοχή (ET) διαιρείται περαιτέρω στην ET₁ περιοχή (πρόσθια ρινική κοιλότητα) και στην ET₂ περιοχή

(ύστερη ρινική κοιλότητα, λάρυγγα και φάρυγγα). Η θωρακική περιοχή (πνεύμονες) διαιρείται σε BB (τραχεία και βρόγχοι), bb (βρογχιόλια) και AI (κυψελιδική περιοχή).



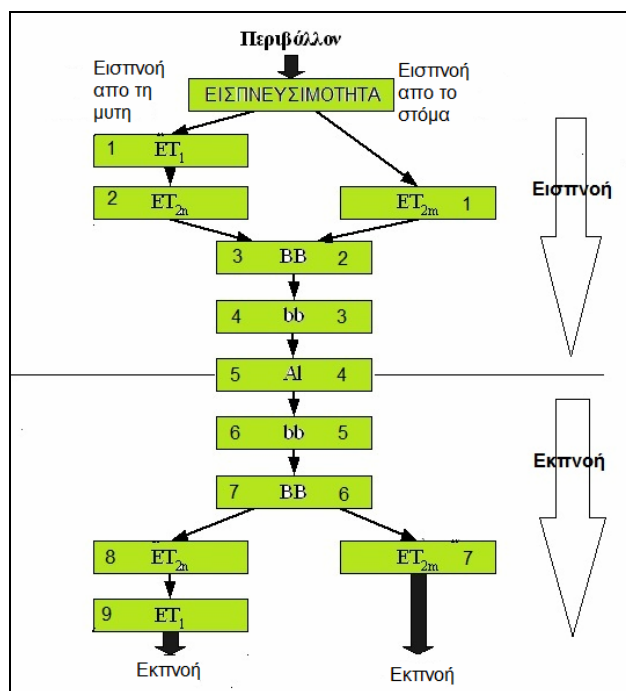
Εικόνα 10: Διάρθρωση του αναπνευστικού συστήματος σε περιοχές με βάση την ICRP.

Οι βασικές παράμετροι ανατομίας που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο εναπόθεσης/απομάκρυνσης σωματιδίων από το αναπνευστικό παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Βασικές παράμετροι ανατομίας του αναπνευστικού συστήματος για ενήλικες άνδρες και γυναίκες (ICRP, 1994).

Παράμετρος	Εκτιθέμενο Άτομο	
	Άνδρας	Γυναίκα
FRC : Υπόλοιπη λειτουργική χωρητικότητα (mL)	3301	2681
V_D(ET) : Ανατομικά νεκρός όγκος της ET περιοχής (mL)	50	40
V_D(BB) : Ανατομικά νεκρός όγκος της τραχείας και των βρόγχων(mL)	49	40
V_D(bb) : νεκρός όγκος βρογχολίων (mL)	47	44
d₀ :διάμετρος τραχείας (cm)	1,65	1,53
d₉ :διάμετρος του πρώτου βρογχιόλιου (cm)	0,165	0,159
d₁₆ : διάμετρος του πρώτου αναπνευστικού βρογχιόλιου (cm)	0,051	0,048

Για να μοντελοποιηθεί η εναπόθεση των σωματιδίων, το αναπνευστικό σύστημα αντιμετωπίζεται ως μια σειρά από φίλτρα (κατά την εισπνοή και την εκπνοή). Όταν η εισπνοή γίνεται από τη μύτη το πλήθος των φίλτρων είναι 9 ενώ όταν η εισπνοή γίνεται από το στόμα το πλήθος των φίλτρων είναι 7. Στην Εικόνα 11 γίνεται η αντιστοίχιση του κάθε φίλτρου με τις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος (ICRP, 1994).



Εικόνα 11: Αντιστοίχιση του κάθε φίλτρου με τις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος (αριστερά: εισπνοή από τη μύτη (1-9 φίλτρα), δεξιά: εισπνοή από το στόμα (1-7 φίλτρα)).

Η εναπόθεση των σωματιδίων υπολογίζεται με τη βοήθεια των ημιεμπειρικών εξισώσεων που προτείνονται από την ICRP (1994). Οι εξισώσεις αυτές έχουν προκύψει από πειραματικές μετρήσεις που έγιναν σε ενήλικες εθελοντές. Η εναπόθεση DE σε κάθε φίλτρο j υπολογίζεται από (ICRP, 1994):

$$DE_j = n_j \phi_j \prod_{jj=0}^{j-1} (1 - n_{jj}) \quad (2)$$

όπου n_j είναι η απόδοση του j φίλτρου, ϕ_j είναι το ποσοστό του όγκου του αέρα που περνά από το j φίλτρο και n_0 είναι η απόδοση προ-φιλτραρίσματος (prefiltration efficiency). Με το προ-φιλτράρισμα επιτρέπεται η είσοδος στο αναπνευστικό σύστημα μόνο του εισπνεύσιμου κλάσματος των σωματιδίων. Με την απόδοση του κάθε φίλτρου εκφράζεται το ποσοστό της μάζας των σωματιδίων που αποτίθεται σε κάθε φίλτρο.

Το ποσοστό της μάζας των σωματιδίων που αποτίθεται σε κάθε φίλτρο υπολογίζεται από τις εξισώσεις της ICRP (1994) που προέρχονται από καμπύλες προσέγγισης πειραματικών δεδομένων λαμβάνοντας υπόψη τους μηχανισμούς εναπόθεσης των σωματιδίων (πρόσκρουση, καθίζηση και διάχυση). Το ποσοστό της μάζας των σωματιδίων που αποτίθεται σε κάθε φίλτρο υπολογίζεται με την εξίσωση (ICRP, 1994):

$$n_j = (n_{ae}^2 + n_{th}^2)^{1/2} \quad (3)$$

όπου n_{ae} είναι το ποσοστό απόθεσης εξαιτίας της πρόσκρουσης και της καθίζησης, n_{th} είναι το ποσοστό απόθεσης εξαιτίας της διάχυσης των σωματιδίων (Brown κίνηση). Οι εξισώσεις υπολογισμού των n_{ae} και n_{th} δίνονται στους Πίνακες B1 (για εισπνοή από τη μύτη) και B2 (για εισπνοή από το στόμα) του παραρτήματος B. Επίσης, στους ίδιους Πίνακες δίνονται οι εξισώσεις για τον υπολογισμό του ποσοστού του όγκου του αέρα που περνά από το j φίλτρο (ϕ_j).

Η εισπνευσιμότητα (n_i) σε ταχύτητες ανέμου από 1-10 m/s (για εισπνοή από τη μύτη ή το στόμα) υπολογίζεται από την εξίσωση (ICRP, 1994):

$$n_i = 1 - 0,5 \left(1 - \left[7,6 \times 10^{-4} \times d_{ae}^{2,8} + 1 \right]^{-1} \right) + 1,0 \times 10^{-5} \times u^{2,75} \times \exp(0,055 \times d_{ae}) \quad (4)$$

όπου d_{ae} είναι η αεροδυναμική διάμετρος των σωματιδίων (μm) και u είναι η ταχύτητα του ανέμου (m/s).

Για ταχύτητες ανέμου μικρότερες από 1 m/s χρησιμοποιείται η εξίσωση (5) για εισπνοή από τη μύτη και η εξίσωση (6) για εισπνοή από το στόμα (Menache, 1995; Brown, 2005; Αλεξανδροπούλου, 2010):

$$n_I = 1 - \left[1 + \exp(13,56 + 0,4343 \times \log(d_{ae})^{-4,88}) \right]^{-1} \text{ για εισπνοή από τη μύτη} \quad (5)$$

$$n_I = (1 + 0,44) \times \left[1 + 0,44 \times \exp(0,0195 \times d_{ae}) \right]^{-1} \text{ για εισπνοή από το στόμα} \quad (6)$$

όπου d_{ae} είναι η αεροδυναμική διάμετρος των σωματιδίων (μm).

Επομένως, το ποσοστό εναπόθεσης στις πέντε περιοχές του αναπνευστικού συστήματος (για εισπνοή από τη μύτη) υπολογίζεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$DE_{ET_1} = DE_1 + DE_9 \quad (7)$$

$$DE_{ET_2} = DE_2 + DE_8 \quad (8)$$

$$DE_{BB} = DE_3 + DE_7 \quad (9)$$

$$DE_{bb} = DE_4 + DE_6 \quad (10)$$

$$DE_{AI} = DE_5 \quad (11)$$

όπου DE_j είναι το ποσοστό εναπόθεσης της περιοχής j του αναπνευστικού συστήματος.

Στην αναθεωρημένη έκδοση (ICRP, 2015) δημιουργήθηκε μία πιο ακριβής αναπαράσταση της εναπόθεσης στην ET περιοχή. Σύμφωνα με νέες πειραματικές μελέτες (Smith κ.ά., 2011) έδειξαν ότι τα σωματίδια που εναποτίθενται στην ET περιοχή κατανέμονται 65% στην ET_1 περιοχή και 35% στην ET_2 περιοχή. Επομένως, η ICRP (2015) πρότεινε για εισπνοή από τη μύτη να αθροιστούν τα ποσοστά εναπόθεσης στις περιοχές ET_1 και ET_2 (να υπολογιστούν με βάση το αρχικό HRTM) και στη συνέχεια να κατανεμηθεί το 65% στην ET_1 περιοχή και το 35% στην ET_2 περιοχή.

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο ρυθμός δόσης των σωματιδίων ($\mu\text{g/h}$) με τη βοήθεια της εξίσωσης (Αλεξανδροπούλου, 2010):

$$H = \sum BC_i DE_{i,j} \quad (12)$$

όπου C_i είναι η συγκέντρωση σωματιδίων μεγέθους i ($\mu\text{g/m}^3$), $DE_{i,j}$ είναι το ποσοστό εναπόθεσης σωματιδίων μεγέθους i στην περιοχή j των πνευμόνων και B είναι ο ρυθμός εισπνοής (m^3/h).

Ο ρυθμός εισπνοής B (m^3/h) είναι ο εισπνεόμενος όγκος αέρα στη μονάδα του χρόνου και υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$B = f_R \times V_T \times 0,06 \quad (13)$$

όπου f_R είναι το πλήθος των εισπνοών ανά λεπτό, V_T ο όγκος του αέρα που λαμβάνεται ανά εισπνοή (L) και 0,06 είναι ο συντελεστής μετατροπή από L/min σε m^3/h . Οι τιμές f_R , V_T και B διαφοροποιούνται ανάλογα με τη σωματική δραστηριότητα και το φύλο του εκτιθέμενου ατόμου (Πίνακας 5).

Πίνακας 5: Διαφοροποίηση των τιμών F_R , V_T και B ανάλογα με τη σωματική δραστηριότητα και το φύλο του εκτιθέμενου ατόμου (ICRP, 1994).

Παράμετρος	Εκτιθέμενο Άτομο	
	Άνδρας	Γυναίκα
Ύπνος		
B (m^3/h)	0,45	0,32
V_T (L)	0,625	0,444
F_R (εισπνοές/min)	12	12
Ανάπαυση		
B (m^3/h)	0,54	0,39
V_T (L)	0,750	0,464
F_R (εισπνοές/min)	12	14
Ήπια εργασία		
B (m^3/h)	1,5	1,25
V_T (L)	1,250	0,992
F_R (εισπνοές/min)	20	21
Βαριά εργασία		
B (m^3/h)	3	2,7
V_T (L)	1,923	1,364
F_R (εισπνοές/min)	26	33

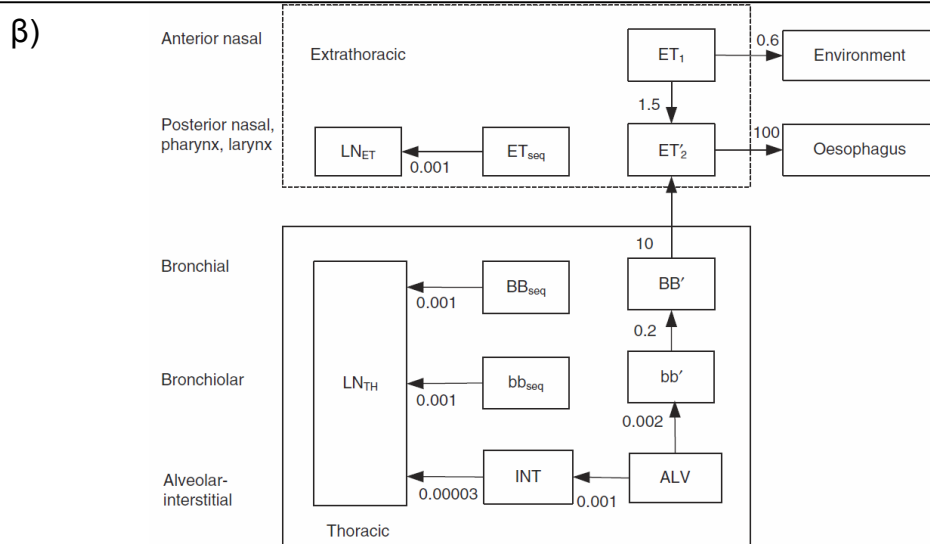
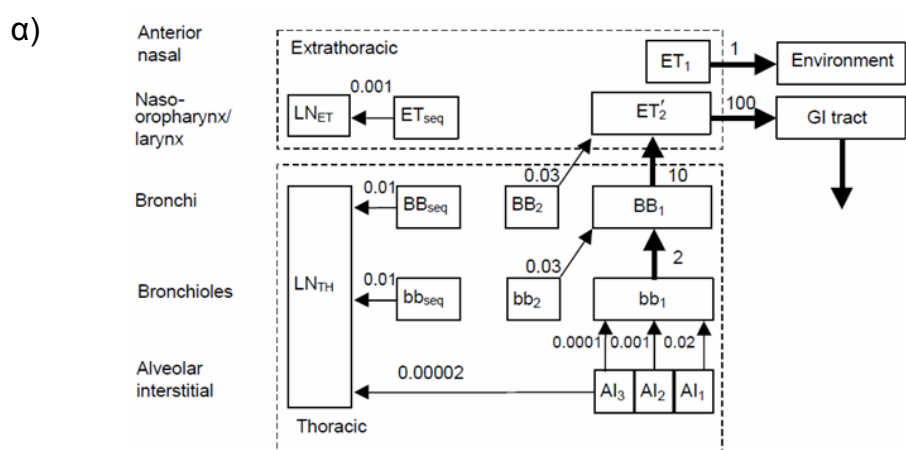
Η εναπόθεση DE των πολυδιάσπορων αεροζόλ (τα σωματίδια που τα απαρτίζουν ποικίλουν σε διαστάσεις) υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$DE(MMAD, \sigma_g) = \sum_{\min}^{\max} DE(d_{ae}) [F(d_{ae}) - F(d_{ae} - \Delta d_{ae})] \quad (14)$$

όπου $F(d_{ae})$ είναι το ποσοστό μάζας που αποτελείται από σωματίδια διαμέτρου έως d_{ae} και Δd_{ae} είναι το βήμα της επανάληψης. Η υπολογιστική διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο περιλαμβάνει τον υπολογισμό

του ποσοστού εναπόθεσης σε 500 σημεία μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής διαμέτρου (Αλεξανδροπούλου, 2010).

Οι περισσότερες και σημαντικότερες αλλαγές που έγιναν στην ICRP (2015) πραγματοποιήθηκαν στο μοντέλο καθαρισμού σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα. Πρόσφατες μελέτες (Smith κ.ά., 2011; Gregoratto κ.ά., 2010) παρέχουν καινούργια δεδομένα σχετικά με τον καθαρισμό των σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα. Στην Εικόνα 12α περιγράφεται το μοντέλο καθαρισμού σωματιδίων που βασίζεται στην ICRP (1994) ενώ στην Εικόνα 12β περιγράφεται το αναθεωρημένο μοντέλο καθαρισμού σωματιδίων που βασίζεται στην ICRP (2015).



Εικόνα 12: (α) Μοντέλο καθαρισμού σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα που βασίζεται στην ICRP (1994) και (β) Αναθεωρημένο μοντέλο καθαρισμού σωματιδίων που βασίζεται στην ICRP (2015). Οι αριθμοί είναι οι ρυθμοί μεταφοράς (d^{-1}) σε κάθε τμήμα της πορείας που ακολουθεί το σωματίδιο.

Οι κυριότερες αλλαγές στο αναθεωρημένο μοντέλο καθαρισμού σωματιδίων είναι (ICRP, 2015):

- Πιο ρεαλιστική μεθοδολογία καθαρισμού από την ET_1 περιοχή. Με βάση πρόσφατες πειραματικές μελέτες παρατηρείται μεταφορά σωματιδίων από την ET_1 περιοχή στην ET'_2 περιοχή.
- Αντικατάσταση των τριών τμημάτων (AI_1 , AI_2 , AI_3) της AI περιοχής από ένα τμήμα (ALV).
- Τα τμήματα που χρησιμοποιούνται για να αντιπροσωπεύσουν την κατακράτηση των σωματιδίων που έχουν εκκαθαριστεί αργά (τμήματα BB_2 και bb_2 στην Εικόνα 12a) στις BB και bb περιοχές δεν περιλαμβάνονται πλέον στο αναθεωρημένο μοντέλο καθαρισμού. Επομένως, ένα μόνο τμήμα BB' αντικαθιστά τα τμήματα BB_1 και BB_2 και ένα τμήμα bb' αντικαθιστά τα τμήματα bb_1 και bb_2 .
- Προσθήκη τμήματος ενδιάμεσων ιστών (INT) μέσω του οποίου τα σωματίδια κατευθύνονται στους λεμφαδένες της θωρακικής περιοχής (LN_{th}).
- Αναθεωρημένοι ρυθμοί μεταφοράς (π.χ. μειώθηκε ο ρυθμός μεταφοράς από την ET_1 περιοχή προς το περιβάλλον).
- Αυξάνεται το ποσοστό των σωματιδίων που δεσμεύονται (sequestered) στα τοιχώματα των αεραγωγών της εκτός θώρακας περιοχής (ET_{seq}) από 0,05% σε 0,2%.
- Μειώθηκε το ποσοστό των σωματιδίων που δεσμεύονται (sequestered) στα τοιχώματα των αεραγωγών της θωρακικής περιοχής (BB_{seq} και bb_{seq}) από 0,7% σε 0,2%.
- Αναθεωρημένες παράμετροι απορρόφησης (Πίνακας 6).

Ο ρυθμός μεταφοράς των σωματιδίων σε άλλα σημεία του αναπνευστικού συστήματος εξαρτάται από την περιοχή που έχουν εναποτεθεί τα σωματίδια και όχι από τη χημική σύσταση των σωματιδίων. Από την άλλη πλευρά, η απορρόφηση στο αίμα εξαρτάται από τη χημική σύσταση των σωματιδίων. Σε όλες τις περιοχές τους αναπνευστικού (εκτός της ET_1 περιοχή) λαμβάνει χώρα η απορρόφηση των σωματιδίων στο αίμα. Η

συμπεριφορά απορρόφησης των σωματιδίων κατατάσσεται σε τρεις κύριες κατηγορίες: F (γρήγορη), M (μέτρια) ή S (αργή).

Επομένως, ο συνολικός ρυθμός καθαρισμού μιας περιοχής του αναπνευστικού με βάση την ICRP δίνεται από την εξίσωση:

$$\lambda_i(t) = m_i(t) + s_i(t) \quad (15)$$

όπου m είναι ο ρυθμός μεταφοράς και s είναι ο ρυθμός απορρόφησης.

Στον Πίνακα 6α παρουσιάζονται οι τυπικές παράμετροι απορρόφησης για σωματίδια τύπου F (γρήγορη), M (μέτρια), ή S (αργή) που βασίζονται στην ICRP (1994) ενώ στον Πίνακα 6β παρουσιάζονται οι τυπικές παράμετροι απορρόφησης που βασίζονται στην ICRP (2015).

Πίνακας 6: α) Τυπικές παράμετροι απορρόφησης για σωματίδια τύπου F (γρήγορη), M (μέτρια), ή S (αργή) που βασίζονται στην ICRP(1994) και β) οι τυπικές παράμετροι απορρόφησης που βασίζονται στην ICRP(2015).

α) Παράμετροι απορρόφησης με βάση την ICRP (1994)				
Τύπος συμπεριφοράς υλικού σε απορρόφηση:	F (ταχεία) (π.χ. PM_{Pb})	M (μέτριας ταχύτητας) (π.χ. PM_{As} , PM_{Mn})	S (αργή) (π.χ. PM_{Cd} , PM_{Cr})	
Κλάσμα υλικού που διαλύεται γρήγορα, f_r	1	0,1	0,001	
Ρυθμός διάλυσης, κατά προσέγγιση:				
Γρήγορα(d^{-1}), s_r	100	100	100	
Αργά(d^{-1}), s_s	-	0,005	0,0001	
Κλάσμα υλικού που παραμένει δεσμευμένο, f_b	0	0	0	
Ρυθμός λήψης υλικού από τη δεσμευμένη κατάσταση (d^{-1}), s_b	-	-	-	
β) Παράμετροι απορρόφησης με βάση την ICRP (2015)				
Τύπος συμπεριφοράς υλικού σε απορρόφηση:	F (ταχεία)	M (μέτριας ταχύτητας) (π.χ. PM_{As} , PM_{Mn})	S (αργή) (π.χ. PM_{Cd} , PM_{Cr})	* PM_{Pb}
Κλάσμα υλικού που διαλύεται γρήγορα, f_r	1	0,2	0,01	1
Ρυθμός διάλυσης, κατά προσέγγιση:				
Γρήγορα(d^{-1}), s_r	30	3	3	100
Αργά(d^{-1}), s_s	-	0,005	0,0001	-
Κλάσμα υλικού που παραμένει δεσμευμένο, f_b	0	0	0	0
Ρυθμός λήψης υλικού από τη δεσμευμένη κατάσταση (d^{-1}), s_b	-	-	-	-

* Για τα αιωρούμενα σωματίδια που περιέχουν μόλυβδο (PM_{Pb}) οι παράμετροι απορρόφησης βασίζονται στην ICRP (in advanced drafting). Occupational intakes of radionuclides: Part 3. Ann. ICRP

Ο καθαρισμός μιας περιοχής του αναπνευστικού από τα σωματίδια που έχουν εναποτεθεί, με βάση τα καινούργια δεδομένα σχετικά με τον καθαρισμό των σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα, εκφράζεται με βάση τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\frac{dR_{ALV}(t)}{dt} = -(m_{ALV,INT} + m_{ALV,bb'} + s) \times R_{ALV}(t) \quad (16)$$

$$\frac{dR_{INT}(t)}{dt} = -(m_{INT,LN_{th}} + s) \times R_{INT}(t) \quad (17)$$

$$\frac{dR_{bb'}(t)}{dt} = -(m_{bb',BB'} + s) \times R_{bb'}(t) \quad (18)$$

$$\frac{dR_{bb_{seq}}(t)}{dt} = -(m_{bb_{seq},LN_{th}} + s) \times R_{bb_{seq}}(t) \quad (19)$$

$$\frac{dR_{BB'}(t)}{dt} = -(m_{BB',ET_2} + s) \times R_{BB'}(t) \quad (20)$$

$$\frac{dR_{BB_{seq}}(t)}{dt} = -(m_{BB_{seq},LN_{th}} + s) \times R_{BB_{seq}}(t) \quad (21)$$

$$\frac{dR_{LN_{th}}(t)}{dt} = -s \times R_{LN_{th}}(t) \quad (22)$$

$$\frac{dR_{ET_1}(t)}{dt} = -(m_{ET_1,ET_2} + m_{ET_1,environment}) \times R_{ET_1}(t) \quad (23)$$

$$\frac{dR_{ET_2'}(t)}{dt} = -(m_{ET_2',Oesophagus} + s) \times R_{ET_2'}(t) \quad (24)$$

$$\frac{dR_{ET_{seq}}(t)}{dt} = -(m_{ET_{seq},LN_{ET}} + s) \times R_{INT}(t) \quad (25)$$

$$\frac{dR_{LN_{ET}}(t)}{dt} = -s \times R_{LN_{ET}}(t) \quad (26)$$

όπου R_j είναι η μάζα των σωματιδίων σε κάθε περιοχή j του αναπνευστικού συστήματος μετά από χρόνο t , m είναι ο ρυθμός μεταφοράς των σωματιδίων και s είναι ο ρυθμός απορρόφησης των σωματιδίων στο αίμα.

Η μάζα των σωματιδίων που συγκρατείται σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος και η μάζα των σωματιδίων που μεταφέρεται στον οισοφάγο και στο αίμα υπολογίζεται με την εξίσωση (27) για το κλάσμα των σωματιδίων που διαλύεται γρήγορα και με την εξίσωση (28) για το κλάσμα των σωματιδίων που διαλύεται αργά:

$$\frac{dI_j(t)}{dt} = \sum_{k=1}^{13} [m_{k,j} \times I_k(t) - (m_{j,k} + s_r) \times I_j(t)] + f_r \times H_j(t) \quad (27)$$

$$\frac{dT_j(t)}{dt} = \sum_{k=1}^{13} [m_{k,j} \times T_k(t) - (m_{j,k} + s_s) \times T_j(t)] + (1 - f_r) \times H_j(t) \quad (28)$$

όπου m είναι ο ρυθμός μεταφοράς των σωματιδίων από το διαμέρισμα k στο j ($m_{k,j}$) ή το αντίθετο ($m_{j,k}$), f_r είναι το κλάσμα υλικού που διαλύεται γρήγορα, $(1 - f_r)$ είναι το κλάσμα υλικού που διαλύεται αργά, s_r είναι ο ταχύς ρυθμός διάλυσης, το s_s είναι ο αργός ρυθμός διάλυσης, H_j είναι η δόση που εφαρμόζεται στο διαμέρισμα j κατά το χρόνο t , I είναι η μάζα των σωματιδίων (για τα σωματίδια που διαλύονται γρήγορα) που συγκρατείται μετά από χρόνο t , το T είναι η μάζα των σωματιδίων (για τα σωματίδια που διαλύονται αργά) που συγκρατείται μετά από χρόνο t .

Ως εκ τούτου, η μάζα σωματιδίων που συγκρατείται μετά από χρόνο t στο διαμέρισμα j υπολογίζεται ως το άθροισμα των σωματιδίων που διαλύονται αργά (T) και των σωματιδίων που διαλύονται γρήγορα (I). Το κλάσμα των σωματιδίων που διαλύεται ταχέως (f_r) και αργά ($1 - f_r$), εξαρτάται από τον τύπο της συμπεριφοράς απορρόφησης (Πίνακας 6β). Τα αποτελέσματα από το μοντέλο καθαρισμού σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου για το PBPK μοντέλο.

5.3. Ανάπτυξη φαρμακοκινητικού (PBPK) μοντέλου

Αναπτύχθηκε ένα φαρμακοκινητικό (PBPK) μοντέλο που βασίζεται στη φυσιολογία του ανθρώπινου οργανισμού για τη μεταφορά των βαρέων μετάλλων, που περιέχουν τα αιωρούμενα σωματίδια, από το αίμα στο ανθρώπινο σώμα (π.χ. συκώτι, καρδιά, νεφροί, εγκέφαλος, γαστρεντερικό σύστημα και οστά). Η φαρμακοκινητική εξετάζει την απορρόφηση, την κατανομή, το μεταβολισμό και την απέκκριση των ουσιών στο σώμα. Η γενική ιδέα της PBPK μοντελοποίησης είναι η μαθηματική περιγραφή των φυσιολογικών, φυσικοχημικών και βιοχημικών διεργασιών που καθορίζουν τη φαρμακοκινητική συμπεριφορά μιας ένωσης. Το PBPK μοντέλο παρέχει ένα σύνολο εξισώσεων που προσομοιώνουν τη χρονική πορεία (time course) των ουσιών σε διάφορα όργανα του ανθρώπινου σώματος. Επίσης, η PBPK μοντελοποίηση βοηθάει στην κατανόηση της τοξικότητας των μετάλλων.

Το PBPK μοντέλο του ExDoM2 αναπτύχθηκε για τα εξής μέταλλα: αρσενικό (As), μόλυβδος (Pb), κάδμιο (Cd), χρώμιο (Cr) και Μαγγάνιο (Mn). Τα μέταλλα As, Pb, Cd και Cr είναι μέσα στα 5 κορυφαία μέταλλα στη συχνότητα καταγραφής (site frequency count) από την υπηρεσία καταγραφή τοξικών ουσιών και ασθενειών (ATSDR). Επίσης, τα μέταλλα As, Pb και Cd είναι μέσα στις 10 κορυφαίες επικίνδυνες ουσίες προτεραιότητας (ATSDR, 2013). Ως επικίνδυνες ουσίες προτεραιότητας θεωρούνται εκείνες που αποτελούν το μεγαλύτερο κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία.

Το PBPK μοντέλο που αναπτύχθηκε βασίζεται στις παρακάτω μελέτες: (1) Chou κ.ά. (2009) για το As, (2) Sharma κ.ά. (2005) για τον Pb, (3) Kjellstrom και Nordberg (1978) για το Cd, (4) Schroeter κ.ά. (2011) για το Mn και (5) O'Flaherty κ.ά. (2001) για το Cr. Στο PBPK μοντέλο, το σώμα υποδιαιρείται σε διάφορα διαμερίσματα/τμήματα που εκπροσωπούν συγκεκριμένα όργανα ή ομοιογενείς ομάδες ιστών που συνδέονται από αιμοφόρα αγγεία (Yang κ.ά., 2010). Η συμπεριφορά των μετάλλων j σε κάθε ομάδα ιστών ή οργάνων i μπορεί να περιγραφεί από ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξης:

$$\frac{dA_{i,j}}{dt} = Q_i (C_{a,j} - C_{v,i}^j) - \text{Μεταβολισμός}_{i,j} - \text{απέκκριση}_{i,j} \quad (29)$$

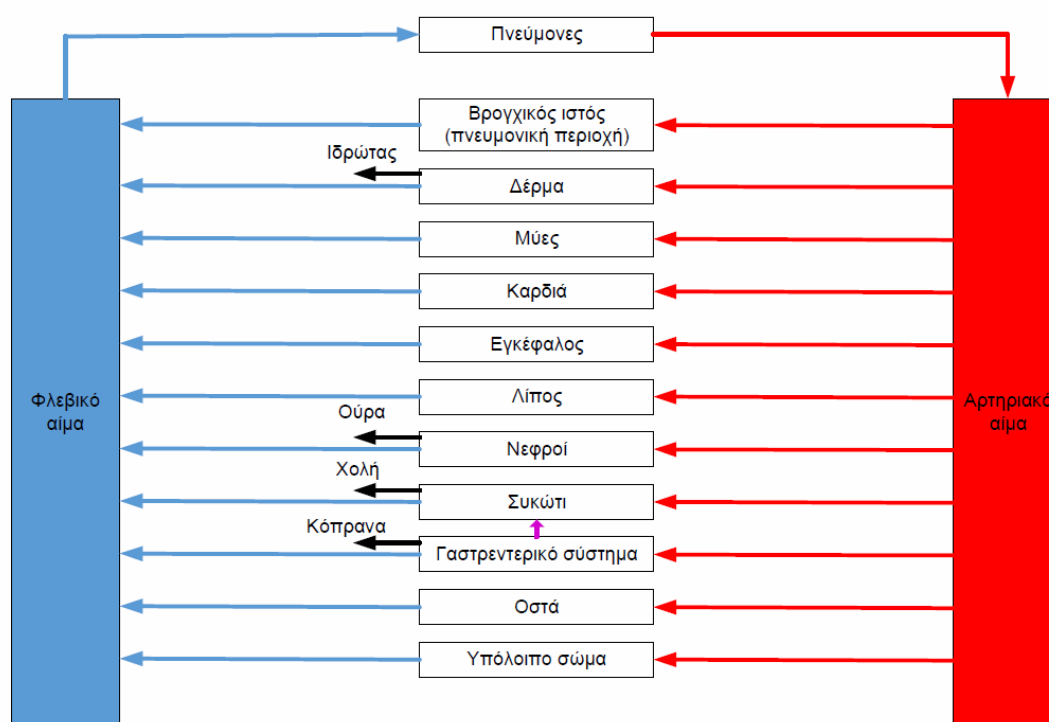
όπου $A_{i,j}$ είναι η δόση του μετάλλου j στο όργανο i (μg), Q_i είναι ο ρυθμός ροής του αίματος στο όργανο i (L/h), $C_{a,j}$ είναι η συγκέντρωση του μετάλλου j στο αρτηριακό αίμα ($\mu\text{g/L}$) και $C_{v,i}^j$ είναι η συγκέντρωση του μετάλλου j στο φλεβικό αίμα που εξέρχεται από το όργανο i ($\mu\text{g/L}$). Στους Πίνακες Γ1 και Γ2 του Παραρτήματος Γ παρουσιάζονται οι ρυθμοί ροής του αίματος στα όργανα ανάλογα με τη σωματική δραστηριότητα και οι όγκοι των οργάνων για ενήλικες άνδρες και γυναίκες.

Αρσενικό (As)

Το PBPK μοντέλο για το As που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο ExDoM2 βασίστηκε στη μελέτη των Chou κ.ά. (2009). Στο PBPK μοντέλο των Chou κ.ά. (2009) πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες τροποποιήσεις για την ενσωμάτωση του στο μοντέλο ExDoM2: (1) πρόσθεση επιπλέον οργάνων (π.χ. μύες, λίπος) με βάση τη μελέτη των Liao κ.ά. (2008), (2) χρησιμοποίηση

στοιχείων ανατομίας (όγκοι οργάνων) και φυσιολογίας (ρυθμός ροής αίματος σε κάθε όργανο) της ICRP (2003) για ενήλικες άνδρες και γυναίκες, (3) διαφοροποίηση του ρυθμού ροής του αίματος ανάλογα με τη σωματική δραστηριότητα, το φύλο και την ηλικία του εκτιθέμενου ατόμου και (4) πρόσθεση βρογχικού ιστού με βάση την ICRP (2003). Με βάση την ICRP (2003) παρατηρείται αιματική κυκλοφορία στο βρογχικό ιστό.

Το PBPΚ μοντέλο για το As αποτελείται από τα εξής όργανα/ιστούς (Εικόνα 13): Πνεύμονες, συκώτι, νεφροί, αίμα (αρτηριακό και φλεβικό αίμα), γαστρεντερικό σύστημα, δέρμα, μύες, λίπος, καρδιά, εγκέφαλος, οστά και υπόλοιπα όργανα. Κάθε όργανο συνδέεται με τη ροή αίματος.



Εικόνα 13: Σχηματική αναπαράσταση του PBPΚ μοντέλου για το As.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στο ExDoM2 για το As υιοθετήθηκαν/προσαρμόστηκαν από τις εξισώσεις των Chou κ.ά. (2009) και των Liao κ.ά. (2008). Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικότερες εξισώσεις για το τρισθενές αρσενικό (As^{3+}):

$$\begin{aligned} \frac{dA_{Liver}^{3+}}{dt} = & Q_{Liver} \times \left(C_{arterial}^{3+} - \frac{C_{Liver}^{3+}}{P_{Liver}^{3+}} \right) + Q_{GI} \times \left(\frac{C_{GI}^{3+}}{P_{GI}^{3+}} - \frac{C_{Liver}^{3+}}{P_{Liver}^{3+}} \right) + (k_1 \times C_{Liver}^{5+} - k_2 \times C_{Liver}^{3+}) \times V_{Liver} - \frac{V_{max,liver}^{3+ \rightarrow MMA} \times C_{Liver}^{3+}}{K_{m,liver}^{3+ \rightarrow MMA} + C_{Liver}^{3+}} - \dots \\ & \frac{V_{max,liver}^{3+ \rightarrow DMA} \times C_{Liver}^{3+}}{K_{m,liver}^{3+ \rightarrow DMA} + C_{Liver}^{3+}} - W_{Biliary} \times C_{Liver}^{3+} \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \frac{dA_{kid}^{3+}}{dt} = & Q_{kid} \times \left(C_{arterial}^{3+} - \frac{C_{kid}^{3+}}{P_{kid}^{3+}} \right) + (k_1 \times C_{kid}^{5+} - k_2 \times C_{kid}^{3+}) \times V_{kid} - \frac{V_{max,kid}^{3+ \rightarrow MMA} \times C_{kid}^{3+}}{K_{m,kid}^{3+ \rightarrow MMA} + C_{kid}^{3+}} - \frac{V_{max,kid}^{3+ \rightarrow DMA} \times C_{kid}^{3+}}{K_{m,kid}^{3+ \rightarrow DMA} + C_{kid}^{3+}} - \dots \\ & W_{kid} \times \frac{C_{kid}^{3+}}{P_{kid}^{3+}} \end{aligned} \quad (31)$$

$$\frac{dA_{Skin}^{3+}}{dt} = Q_{Skin} \times \left(C_{arterial}^{3+} - \frac{C_{Skin}^{3+}}{P_{Skin}^{3+}} \right) + (k_1 \times C_{Skin}^{5+} - k_2 \times C_{Skin}^{3+}) \times V_{Skin} - W_{Skin} \times C_{Skin}^{3+} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \frac{dA_{GI}^{3+}}{dt} = & Q_{GI} \times \left(C_{arterial}^{3+} - \frac{C_{GI}^{3+}}{P_{GI}^{3+}} \right) - Q_{GI} \times \left(\frac{C_{GI}^{3+}}{P_{GI}^{3+}} - \frac{C_{Liver}^{3+}}{P_{Liver}^{3+}} \right) + (k_1 \times C_{GI}^{5+} - k_2 \times C_{GI}^{3+}) \times V_{GI} - W_{GI} \times C_{GI}^{3+} + \dots \\ & H_{HRTM_GI}^{3+} \end{aligned} \quad (33)$$

$$\frac{dA_{Muscle}^{3+}}{dt} = Q_{Muscle} \times \left(C_{arterial}^{3+} - \frac{C_{Muscle}^{3+}}{P_{Muscle}^{3+}} \right) + (k_1 \times C_{Muscle}^{5+} - k_2 \times C_{Muscle}^{3+}) \times V_{Muscle} \quad (34)$$

$$\frac{dA_{PBPK_Lung}^{3+}}{dt} = Q_{Lung} \times \left(C_{arterial}^{3+} - \frac{C_{Lung}^{3+}}{P_{Lung}^{3+}} \right) + (k_1 \times C_{Lung}^{5+} - k_2 \times C_{Lung}^{3+}) \times V_{Lung} \quad (35)$$

$$A_{Lung} = A_{PBPK_Lung} + A_{HRTM_Lung} \quad (36)$$

$$\frac{dA_{Fat}^{3+}}{dt} = Q_{Fat} \times \left(C_{arterial}^{3+} - \frac{C_{Fat}^{3+}}{P_{Fat}^{3+}} \right) + (k_1 \times C_{Fat}^{5+} - k_2 \times C_{Fat}^{3+}) \times V_{Fat} \quad (37)$$

$$\frac{dA_{Heart}^{3+}}{dt} = Q_{Heart} \times \left(C_{arterial}^{3+} - \frac{C_{Heart}^{3+}}{P_{Heart}^{3+}} \right) + (k_1 \times C_{Heart}^{5+} - k_2 \times C_{Heart}^{3+}) \times V_{Heart} \quad (38)$$

$$\frac{dA_{Brain}^{3+}}{dt} = Q_{Brain} \times \left(C_{arterial}^{3+} - \frac{C_{Brain}^{3+}}{P_{Brain}^{3+}} \right) + (k_1 \times C_{Brain}^{5+} - k_2 \times C_{Brain}^{3+}) \times V_{Brain} \quad (39)$$

$$\frac{dA_{PBPK_Other\ tissues}^{3+}}{dt} = Q_{Other\ tissues} \times \left(C_{arterial}^{3+} - \frac{C_{Other\ tissues}^{3+}}{P_{Other\ tissues}^{3+}} \right) + (k_1 \times C_{Other\ tissues}^{5+} - k_2 \times C_{Other\ tissues}^{3+}) \times V_{Other\ tissues} \quad (40)$$

$$A_{Other\ tissues} = A_{PBPK_Other\ tissues} + A_{HRTM_Lymph\ nodes} \quad (41)$$

όπου A_i είναι η δόση του As^{3+} στο όργανο i (μmol), Q_i είναι η ροή αίματος στο όργανο i (L/h), $C_{arterial}$ είναι η συγκέντρωση του As^{3+} στο αρτηριακό αίμα ($\mu\text{mol/L}$), C_i είναι η συγκέντρωση του As^{3+} στο όργανο i ($\mu\text{mol/L}$), P_i είναι ο συντελεστής κατανομής οργάνου/αίματος του οργάνου i , $V_{max,i}^{As^{3+} \rightarrow MMA}$ είναι η μέγιστη ταχύτητα αντίδρασης για τη μεθυλίωση του As^{3+} σε μονομεθυλοαρσίνιο (MMA) στο όργανο i ($\mu\text{mol/h}$), $V_{max,i}^{As^{3+} \rightarrow DMA}$ είναι η μέγιστη ταχύτητα αντίδρασης για τη μεθυλίωση του As^{3+} σε διμεθυλοαρσίνιο (DMA)

στο όργανο i ($\mu\text{mol/h}$), $K_{m,i}^{As^{3+} \rightarrow MMA}$ είναι η σταθερά Michaelis-Menten για τη μεθυλίωση του As^{3+} σε μονομεθυλοαρσίνιο (MMA) στο όργανο i ($\mu\text{mol/L}$), $K_{m,i}^{As^{3+} \rightarrow DMA}$ είναι η σταθερά Michaelis-Menten για τη μεθυλίωση του As^{3+} σε διμεθυλοαρσίνιο (DMA) στο όργανο i ($\mu\text{mol/L}$), $W_{biliary}$ είναι η ποσότητα της χολής που απεκκρίνεται ανά ώρα (L/h), W_i είναι η ποσότητα του νερού που απεκκρίνεται ανά ώρα από το όργανο i (L/h), V_i είναι ο όγκος του οργάνου i (L), H_{HRTM_GI} είναι ο ρυθμός δόση των $PM_{As^{3+}}$ στο γαστρεντερικό σύστημα από το αναθεωρημένο μοντέλο εναπόθεσης/απομάκρυνσης (HRTM) του ExDoM2 ($\mu\text{mol/h}$), A_{HRTM_Lung} είναι η δόση των $PM_{As^{3+}}$ στους πνεύμονες από το αναθεωρημένο μοντέλο εναπόθεσης/απομάκρυνσης σωματιδίων του ExDoM2 (μmol), A_{PBPK_Lung} είναι η δόση του As^{3+} στους πνεύμονες από το PBPK μοντέλο (μmol), $A_{HRTM_lymph\ nodes}$ είναι η δόση των $PM_{As^{3+}}$ στους λεμφαδένες από το αναθεωρημένο μοντέλο εναπόθεσης/απομάκρυνσης σωματιδίων του ExDoM2 (μmol), $A_{PBPK_Other\ tissues}$ είναι η δόση του As^{3+} στο υπόλοιπο σώμα (π.χ. λεμφαδένες) από το PBPK μοντέλο (μmol).

Τα τελικά αποτελέσματα μετατρέπονται από μmol σε μg . Οι εξισώσεις για το πεντασθενές αρσενικό (As^{5+}) παρουσιάζονται στο Παράρτημα Δ. Στον Πίνακα 7 παρουσιάζονται οι παράμετροι εισόδου που χρησιμοποιούνται στο PBPK μοντέλο για το As (Liao κ.ά., 2008; Chou κ.ά., 2009). Εξετάζοντας τον Πίνακα 7 προκύπτει ότι η βιομετατροπή του As^{3+} στο ανθρώπινο σώμα αποτελείται από οξειδώσεις/αναγωγές και δύο αντιδράσεις μεθυλίωσης. Η μεθυλίωση είναι η μετατροπή του As^{3+} σε λιγότερα τοξικά προϊόντα (MMA, DMA). Η μεθυλίωση του As^{3+} λαμβάνει χώρα στο συκώτι και στους νεφρούς, σύμφωνα με την κινητική Michaelis-Menten.

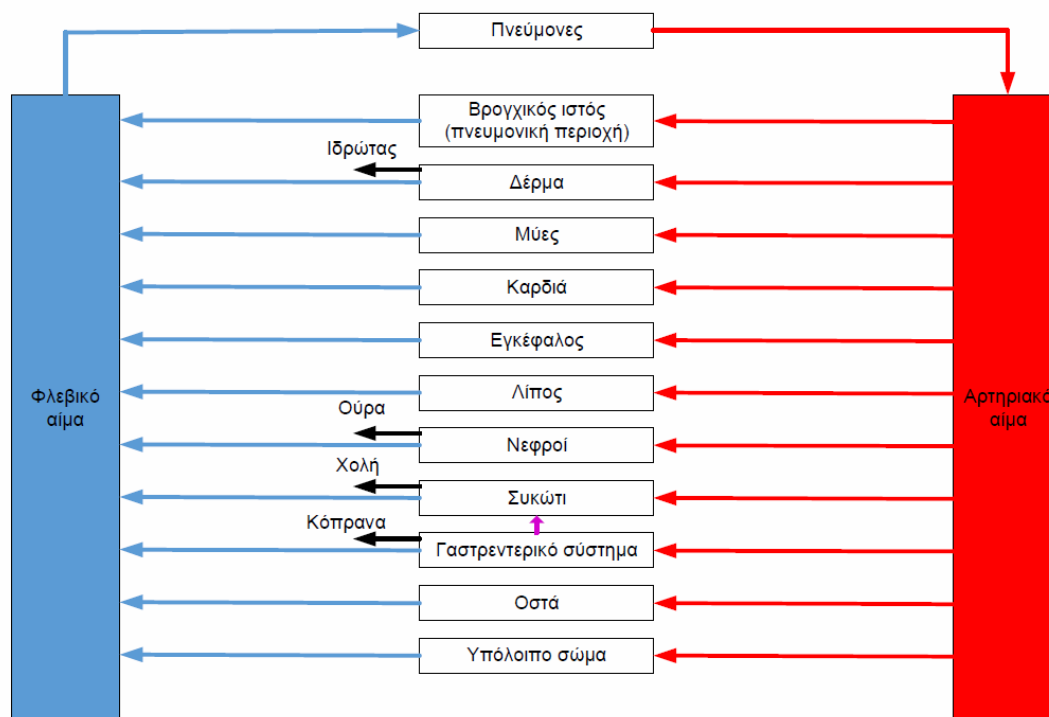
Πίνακας 7: Οι παράμετροι εισόδου που χρησιμοποιούνται στο PBPK μοντέλο για το As (Liao κ.ά., 2008; Chou κ.ά., 2009).

Παράμετροι Εισόδου για As		
Αναγωγή: k_1 (1/h)	1,37	
Οξειδωση: k_2 (1/h)	1,83	
	$As^{3+} \rightarrow MMA$	$As^{3+} \rightarrow DMA$
Συκώτι (Liver)		
V_{max} (μmol/h)	11,2	22,2
K_m (μmol/h)	100	100
Νεφροί (Kidneys)		
V_{max} (μmol/h)	7,5	10
K_m (μmol/h)	100	100
Όργανα	Συντελεστής κατανομής οργάνου/αίματος για As	Το ποσοστό του νερού που απεκκρίνεται σε κάθε όργανο (%)
Δέρμα (Skin)	2,5	20
Νεφροί (Kidneys)	4,2	60
Ήπαρ (Liver)	5,3	
Γαστρεντερικό σύστημα (GI tract)	2,8	8
Μύες (Muscles)	2,6	
Πνεύμονες (Lungs)	4,2	12
Καρδιά (Heart)	2,6	
Εγκέφαλος (Brain)	2,6	
Λίπος (Fat)	0,3	
Οστά (Bones)	0,3	
Υπόλοιπο σώμα (Other tissues)	2,43	

Μόλυβδος (Pb)

Για την ενσωμάτωση του PBPK μοντέλου των Sharma κ.ά. (2005) στο ExDoM2 μοντέλο πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες τροποποιήσεις: (1) αφαίρεση της έκθεσης των ανθρώπων σε Pb μέσω της διατροφής, (2) χρησιμοποίηση παραμέτρων ανατομίας (όγκοι οργάνων) και φυσιολογίας (ρυθμός ροής αίματος σε κάθε όργανο) ανάλογα με το φύλο και την ηλικία του εκτιθέμενου ατόμου, (3) εξέταση της επίδρασης της σωματικής δραστηριότητας του εκτιθέμενου ατόμου στο ρυθμό ροής του αίματος σε κάθε όργανο και (4) πρόσθεση επιπλέον οργάνων. Με βάση τις παραπάνω

τροποποιήσεις το PBPK μοντέλο για τον Pb αποτελείται από τα εξής όργανα/ιστούς (Εικόνα 14): Πνεύμονες, συκώτι, νεφροί, αίμα (αρτηριακό και φλεβικό αίμα), γαστρεντερικό σύστημα, δέρμα, μύες, λίπος, καρδιά, εγκέφαλος, οστά και υπόλοιπα όργανα.



Εικόνα 14: Σχηματική απεικόνιση του πολυδιαμερισματικού PBPK μοντέλου για τον Pb.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο ExDoM2 για τον Pb (υιοθετήθηκαν/προσαρμόστηκαν από τις εξισώσεις των Sharma κ.ά. (2005)):

$$\frac{dA_{kid}}{dt} = Q_{kid} \times (C_{arterial} - C_{ven,kid}) - KE_{kid} C_{kid} V_{kid} \quad (42)$$

$$\frac{dA_{skin}}{dt} = Q_{skin} \times (C_{arterial} - C_{ven,skin}) - KE_{skin} C_{skin} V_{skin} \quad (43)$$

$$\frac{dA_{GI}}{dt} = Q_{GI} \times (C_{arterial} - C_{ven,GI}) - Q_{GI} \times (C_{ven,GI} - C_{ven,liver}) + H_{HRTM_GI} \quad (44)$$

$$\frac{dA_{Liver}}{dt} = Q_{Liver} \times (C_{arterial} - C_{ven,liver}) + Q_{GI} \times (C_{ven,GI} - C_{ven,liver}) - KE_{Li} C_{Li} V_{Li} \quad (45)$$

$$\frac{dA_{Heart}}{dt} = Q_{Heart} \times (C_{arterial} - C_{ven,Heart}) \quad (46)$$

$$\frac{dA_{Muscle}}{dt} = Q_{Muscle} \times (C_{arterial} - C_{ven,muscle}) \quad (47)$$

$$\frac{dA_{Brain}}{dt} = Q_{Brain} \times (C_{arterial} - C_{ven,brain}) \quad (48)$$

$$\frac{dA_{Fat}}{dt} = Q_{Fat} \times (C_{arterial} - C_{ven,Fat}) \quad (49)$$

$$\frac{dA_{PBPK_Lung}}{dt} = Q_{Lung} \times (C_{arterial} - C_{ven,lung}) \quad (50)$$

$$A_{Lung} = A_{PBPK_Lung} + A_{HRTM_Lung} \quad (51)$$

$$\frac{dA_{bone}}{dt} = Q_{bone} \times (C_{arterial} - C_{ven,bone}) \quad (52)$$

$$\frac{dA_{PBPK_other\ tissues}}{dt} = Q_{other\ tissues} \times (C_{arterial} - C_{ven,other\ tissues}) \quad (53)$$

$$A_{Other\ tissues} = A_{PBPK_other\ tissues} + A_{HRTM_Lymph\ nodes} \quad (54)$$

$$C_{ven,i} = 0,55 \times Cp_{ven,i} + 0,45 \times Cp_{ven,i} \times \left(1 + \frac{BIND}{KBIND + Cp_{ven,i}} \right) \quad (55)$$

$$Cp_{ven,i} = \frac{C_i}{P_i} \quad (56)$$

όπου A_i είναι η δόση του Pb στο όργανο i (μg), Q_i είναι η ροή αίματος στο όργανο i (L/h), $C_{arterial}$ είναι η συγκέντρωση του Pb στο αρτηριακό αίμα ($\mu g/L$), C_i είναι η συγκέντρωση του Pb στο όργανο i ($\mu g/L$), $C_{ven,i}$ είναι η συγκέντρωση του Pb στο φλεβικό αίμα που εξέρχεται από το όργανο i ($\mu g/L$), H_{HRTM_GI} είναι ο ρυθμός δόσης των PM_{Pb} στο γαστρεντερικό σύστημα από το αναθεωρημένο μοντέλο εναπόθεσης/απομάκρυνσης (HRTM) του ExDoM2 ($\mu g/h$), A_{HRTM_Lung} είναι η δόση των PM_{Pb} στους πνεύμονες από το αναθεωρημένο μοντέλο εναπόθεσης/απομάκρυνσης σωματιδίων του ExDoM2 (μg), A_{PBPK_Lung} είναι η δόση του Pb στους πνεύμονες από το PBPK μοντέλο (μg), $A_{HRTM_lymph\ nodes}$ είναι η δόση των PM_{Pb} στους λεμφαδένες από το αναθεωρημένο μοντέλο εναπόθεσης/απομάκρυνσης σωματιδίων του ExDoM2 (μg), $A_{PBPK_Other\ tissues}$ είναι η δόση του Pb στο υπόλοιπο σώμα (π.χ. λεμφαδένες) από το PBPK μοντέλο (μg), KE_i είναι ο συντελεστής κάθαρσης από το όργανο i (1/h), V_i είναι ο όγκος του οργάνου i (L), P_i είναι ο συντελεστής κατανομής οργάνου/αίματος του οργάνου i , $BIND$ είναι η μέγιστη χωρητικότητα των ερυθροκυττάρων να δεσμεύουν Pb ($\mu g/L$), $KBIND$ είναι η σταθερά ημικορεσμού για την κατανομή του Pb μεταξύ του αίματος και του πλάσματος ($\mu g/L$).

Οι παράμετροι εισόδου και οι συντελεστές κατανομής οργάνου/αίματος για κάθε όργανο παρουσιάζονται στον Πίνακα 8 (Sharma κ.ά. 2005). Στον Πίνακα 8 παρατηρείται ότι ο μέγιστος συντελεστής κατανομής ιστού/ αίματος

για τον Pb εμφανίζεται στα οστά (1000). Ο συντελεστής κατανομής ιστού/αίματος σχετίζεται με την κατακράτηση του μετάλλου στον ιστό. Επομένως, παρόλο που ο ρυθμός ροής του αίματος στα οστά είναι χαμηλός, η δόση του Pb στα οστά είναι υψηλή λόγω του υψηλού συντελεστή κατανομής ιστού/αίματος (Chalvatzaki κ.ά., 2014; Chalvatzaki και Lazaridis, 2015).

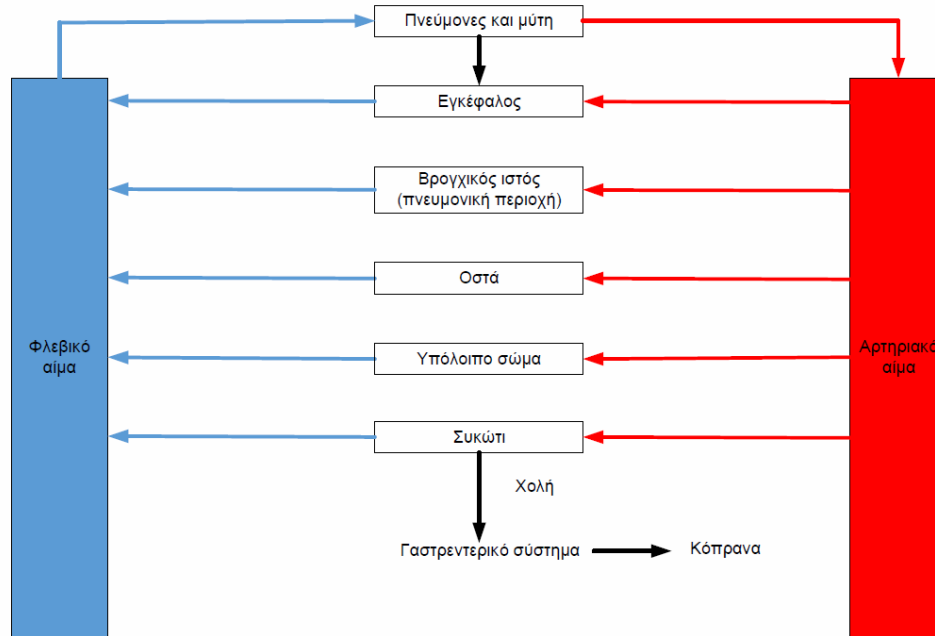
Πίνακας 8: Οι παράμετροι εισόδου και οι συντελεστές κατανομής οργάνου/αίματος που χρησιμοποιούνται στο PBPK μοντέλο για τον Pb (Sharma κ.ά., 2005).

Παράμετροι Εισόδου για Pb	
KE_{liv} (1/h)	0,0083
KE_{GI} (1/h)	0,0013
KE_{kid} (1/h)	0,0196
KE_{skin} (1/h)	0,0175
BIND (μg/L)	2700
KBIND (μg/L)	7,5
Όργανα	Συντελεστής κατανομής οργάνου/αίματος
Δέρμα (Skin)	20
Νεφροί (Kidney)	100
Ήπαρ (Liver)	100
Γαστρεντερικό σύστημα (GI tract)	100
Μύες (Muscles)	20
Πνεύμονες (Lung)	100
Καρδιά (Heart)	100
Εγκέφαλος (Brain)	100
Λίπος (Fat)	20
Οστά (Bone)	1000

Μαγγάνιο (Mn)

Το PBPK μοντέλο για το Mn βασίστηκε στη μελέτη των Schroeter κ.ά. (2011) και αποτελείται από τα εξής όργανα/ιστούς (Εικόνα 15): Πνεύμονες, συκώτι, αίμα (αρτηριακό και φλεβικό αίμα), οστά, εγκέφαλος και υπόλοιπα όργανα. Στο PBPK μοντέλο για το Mn παρατηρείται μεταφορά του Mn από την ΕΤ₁ περιοχή στον εγκέφαλο. Οι βασικότερες τροποποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο PBPK μοντέλο για το Mn είναι: (1) χρησιμοποίηση στοιχείων ανατομίας και φυσιολογίας της ICRP (2003), (2) μεταβολή του

ρυθμού ροής του αίματος ανάλογα με τη σωματική δραστηριότητα του εκτιθέμενου ατόμου και (3) ενσωμάτωση αιματικής κυκλοφορίας στο βρογχικό ιστό με βάση την ICRP (2003).



Εικόνα 15: Σχηματική απεικόνιση του PBPK μοντέλου για το Mn.

Με βάση τις παραπάνω τροποποιήσεις παρουσιάζονται οι βασικότερες εξισώσεις του PBPK μοντέλου για το Mn (προσαρμόστηκαν από τις εξισώσεις των Schroeter κ.ά.):

$$\frac{dA_{brain}}{dt} = Q_{brain} \times \left(C_{arterial} - \frac{C_{brain}}{P_{brain}} \right) + kNPOB \times A_{ET1} \quad (57)$$

$$\frac{dA_{bone}}{dt} = Q_{bone} \times \left(C_{arterial} - \frac{C_{bone}}{P_{bone}} \right) \quad (58)$$

$$\frac{dA_{PBPK_Lung}}{dt} = Q_{Lung} \times \left(C_{arterial} - \frac{C_{Lung_PBPK}}{P_{Lung}} \right) \quad (59)$$

$$A_{Lung} = A_{PBPK_Lung} + A_{HRTM_Lung} \quad (60)$$

$$\frac{dA_{PBPK_other\ tissues}}{dt} = Q_{other\ tissues} \times \left(C_{arterial} - \frac{C_{other\ tissues}}{P_{other\ tissues}} \right) + H_{HRTM_GI} \quad (61)$$

$$A_{Other\ tissues} = A_{PBPK_other\ tissues} + A_{HRTM_Lymph\ nodes} \quad (62)$$

$$\frac{dA_{Liver}}{dt} = Q_{Liver} \times \left(C_{arterial} - \frac{C_{Liver}}{P_{Liver}} \right) - k_{bile} \times C_{ven,liver} \quad (63)$$

$$kNPOB = 0,012 \times \text{Βάρους σώματος}^{-0,25} \quad (64)$$

όπου A_i είναι η δόση του Mn στο όργανο i (μg), Q_i είναι ο ρυθμός ροής του αίματος στο όργανο i (L/h), C_{arterial} είναι η συγκέντρωση του Mn στο αρτηριακό αίμα ($\mu\text{g/L}$), k_{NPOB} είναι ο καθαρισμός από την ET_1 περιοχή στον εγκέφαλο ($1/\text{h}$), A_{ET_1} είναι η δόση του Mn στην ET_1 περιοχή από το αναθεωρημένο μοντέλο εναπόθεσης/ απομάκρυνσης σωματιδίων του ExDoM2 (μg), k_{bile} είναι ο ρυθμός απέκκρισης της χολής (L/h), $H_{\text{HRTM_GI}}$ είναι ο ρυθμός δόσης των PM_{Mn} στο γαστρεντερικό σύστημα από το αναθεωρημένο μοντέλο εναπόθεσης/απομάκρυνσης (HRTM) του ExDoM2 ($\mu\text{g/h}$), $A_{\text{HRTM_Lung}}$ είναι η δόση των PM_{Mn} στους πνεύμονες από το αναθεωρημένο μοντέλο εναπόθεσης/απομάκρυνσης σωματιδίων του ExDoM2 (μg), $A_{\text{PBPk_GI}}$ είναι η δόση του Mn στο γαστρεντερικό σύστημα από το PBPk μοντέλο (μg), $A_{\text{PBPk_Lung}}$ είναι η δόση του Mn στους πνεύμονες από το PBPk μοντέλο (μg), $A_{\text{HRTM_lymph nodes}}$ είναι η δόση των PM_{Mn} στους λεμφαδένες από το αναθεωρημένο μοντέλο εναπόθεσης/απομάκρυνσης σωματιδίων του ExDoM2 (μg), $A_{\text{PBPk_Other tissues}}$ είναι η δόση του Mn στο υπόλοιπο σώμα (π.χ. λεμφαδένες, νεφροί, γαστρεντερικό σύστημα, Μύες) από το PBPk μοντέλο (μg), P_i είναι ο συντελεστής κατανομής οργάνου/αίματος του οργάνου i .

Στον Πίνακα 9 παρουσιάζονται οι συντελεστές κατανομής P_i για το Mn (Schroeter κ.ά., 2011). Ο συντελεστής κατανομής P_i θεωρείται σημαντική παράμετρος για τα PBPk μοντέλα επειδή σχετίζεται με την κατακράτηση του μετάλλου στον όργανο. Όσο μεγαλύτερο είναι ο συντελεστής κατανομής P_i τόσο μεγαλύτερη είναι η κατακράτηση του μετάλλου στο όργανο i .

Πίνακας 9: Συντελεστές κατανομής P_i για το Mn (Schroeter κ.ά., 2011).

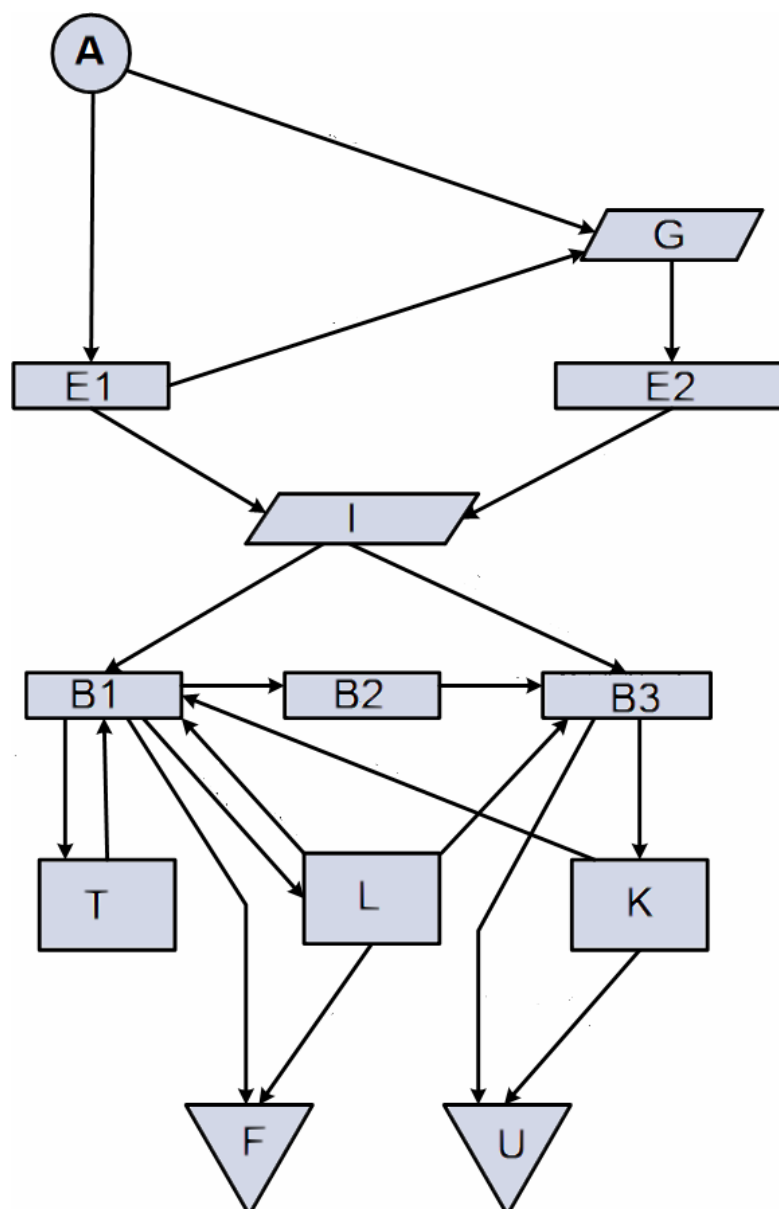
Όργανα	Συντελεστής κατανομής οργάνου/αίματος για το Mn
Ήπαρ (Liver)	1
Πνεύμονες (Lungs)	1
Εγκέφαλος (Brain)	1
Οστά (Bone)	0,5
Υπόλοιπο σώμα (Other tissues)	1

Κάδμιο (Cd)

Το κινητικό μοντέλο για το Cd που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο ExDoM2 βασίστηκε στη μελέτη των Kjellstrom και Nordberg (1978). Το μοντέλο των Kjellstrom και Nordberg (1978) ενσωματώνει και μοντέλο εναπόθεσης/απομάκρυνσης σωματιδίων (που περιέχουν Cd) στο αναπνευστικό σύστημα. Στο μοντέλο του Kjellstrom και Nordberg (1978) πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες τροποποιήσεις: (1) αφαίρεση της έκθεσης των ανθρώπων σε Cd μέσω της διατροφής και (2) μεταβολή του ποσοστού εναπόθεσης των σωματιδίων στην πνευμονική περιοχή (συντελεστής C2) με βάση την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων.

Ο συντελεστής C2 αλλάζει ώστε η δόση των σωματιδίων που περιέχουν Cd στην πνευμονική περιοχή (συγκεκριμένα στην κυψελιδική περιοχή) του μοντέλου των Kjellstrom και Nordberg (1978) να είναι ίση με τη δόση των σωματιδίων που περιέχουν Cd στην κυψελιδική περιοχή του αναθεωρημένου μοντέλου εναπόθεσης/απομάκρυνσης σωματιδίων του μοντέλου ExDoM2. Με αυτή την τροποποίηση το μοντέλο των Kjellstrom και Nordberg (1978) λαμβάνει υπόψη την κατανομή μεγέθους σωματιδίων. Το μοντέλο για το Cd είναι διαφορετικό από τα προηγούμενα μέταλλα λόγω της μακράς βιολογικής ημίσεια ζωής στο σώμα (αποβάλλεται δύσκολα) και της αργής απορρόφησης στο αίμα.

Το κινητικό μοντέλο για το Cd αποτελείται από τα εξής όργανα/ιστούς (Εικόνα 16): Πνεύμονες (συγκεκριμένα κυψελιδική περιοχή), ήπαρ, νεφροί, αίμα, γαστρεντερικό σύστημα και υπόλοιπα όργανα. Το αίμα διαιρείται σε τρία τμήματα/διαμερίσματα: (1) το τμήμα του πλάσματος όπου το Cd δεσμεύεται (binds) στη λευκωματίνη ή σε άλλο οργανικό συστατικό, (2) το τμήμα των ερυθρών αιμοσφαιρίων και το (3) τμήμα όπου το Cd δεσμεύεται στη μεταλλοθειονίνη των ερυθρών αιμοσφαιρίων. Η μεταλλοθειονίνη είναι μια χαμηλού μοριακού βάρους πρωτεΐνη που εμπλέκεται στη μεταφορά του Cd στο σώμα. Το «σύμπλοκο» καδμίου-μεταλλοθειονίνη μεταφέρεται στους νεφρούς.



Εικόνα 16: Σχηματική αναπαράσταση του κινητικού μοντέλου για το Cd (υιοθετήθηκε/προσαρμόστηκε από Kjellstrom και Nordberg, 1978). A: αέρας, G: πρόσληψη στο γαστρεντερικό, E1: πνεύμονες (συγκεκριμένα κυψελιδική περιοχή), E2: έντερα, B1: πλάσμα, B2: ερυθρά αιμοσφαίρια, B3: μεταλλοθειονίνη, T: υπόλοιπο σώμα, L: συκώτι, K: νεφροί, F: κόπρανα, U: ούρα.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο ExDoM2 για το Cd παρουσιάζονται στον Πίνακα 10. Η συσσώρευση του Cd σε κάθε διαμέρισμα υπολογίζεται με επαναληπτική διαδικασία (αριθμητική λύση). Οι Συντελεστές C1 έως C20 του Cd ελήφθησαν από τους Kjellstrom και Nordberg (1978) βάσει εμπειρικών δεδομένων από ζώα και ανθρώπους. Οι συντελεστές C1 έως C19 παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.

Πίνακας 10: Εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο ExDoM2 για το Cd (υιοθετήθηκαν/προσαρμόστηκαν από Kjellstrom και Nordberg, 1978)

Όργανα/ιστοί	Εξίσωση
Πνεύμονες (συγκεκριμένα κυψελιδική περιοχή) (E_1 , μg)	$\frac{dE_1}{dt} = C_2 A - E_1 (C_3 + C_4)$ (65)
Έντερα (E_2 , μg)	$\frac{dE_2}{dt} = C_5 [C_1 A + C_4 E_1] - C_6 E_2$ (66)
Συνολική πρόσληψη (Total intake) (I , μg)	$I = C_3 E_1 + C_6 E_2$ (67)
I_2 (μg)	$I_2 = C_7 I \leq C_8$ (68)
I_1 (μg)	$I_1 = I - I_2$ (69)
Πλάσμα (B_1 , μg)	$B_1 = I_1 + C_{10} T + C_{13} L + C_{18} K$ (70)
Ερυθρά αιμοσφαίρια (B_2 , μg)	$\frac{dB_2}{dt} = C_X B_1 - C_{16} B_2$ (71)
Μεταλλοθειονίνη (B_3 , μg)	$B_3 = I_2 + C_{14} L + C_{16} B_2$ (72)
Συνολικό αίμα (B_4 , μg)	$B_4 = B_2 + C_{20} [B_1 + B_3]$ (73)
Συκώτι (L , μg)	$\frac{dL}{dt} = C_{12} B_1 - L (C_{13} + C_{14} + C_{15})$ (74)
Νεφροί (K , μg)	$\frac{dK}{dt} = C_{17} B_3 - K (C_{18} + C_{19})$ (75)
Υπόλοιπο σώμα (T , μg)	$\frac{dT}{dt} = C_9 B_1 - C_{10} T$ (76)
Κόπρανα (F , μg)	$F = C_{11} B_1 + C_{15} L$ (77)
Ούρα (U , μg)	$U = B_3 (1 - C_{17}) + C_{19} K$ (78)

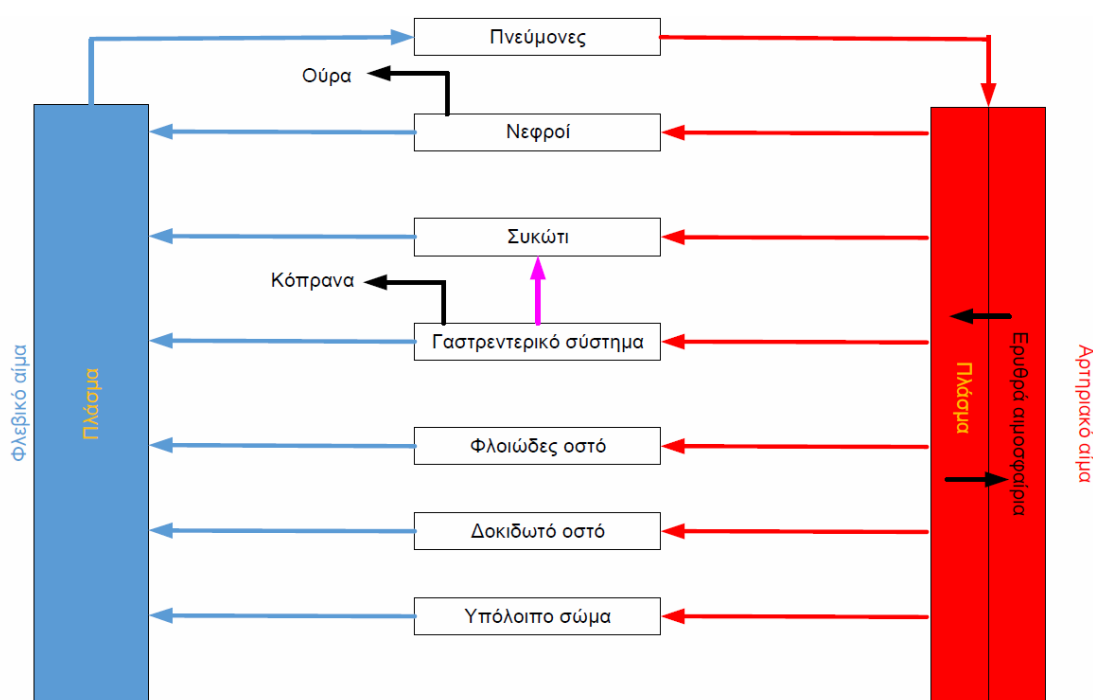
Πίνακας 11: Παράμετροι που χρησιμοποιούνται στο ExDoM2 για το Cd (υιοθετήθηκαν/προσαρμόστηκαν από Kjellstrom και Nordberg, 1978).

Σύμβολο	Τιμή	Περιγραφή
C_1	0,4-0,9*	Το κλάσμα κατάποσης (fraction swallowed) μετά τον καθαρισμό από τη ρινοφαρυγγική και τραχειοβρογχική περιοχή
C_2	0,1-0,3**	Το κλάσμα της εισπνεόμενης σκόνης (fraction of inhaled dust) που εναποτίθενται στην κυψελιδική περιοχή
C_3	0,05 (d^{-1})	Σταθερά ρυθμού (rate constant) για την απορρόφηση στο σύστημα από την κυψελιδική περιοχή
C_4	$0,1 \times C_3$ (d^{-1})	Σταθερά ρυθμού (rate constant) για καθαρισμό από την κυψελιδική περιοχή στο γαστρεντερικό σύστημα
C_5	0,048	Το κλάσμα που απορροφάται στα έντερα (E2)
C_6	0,05 (d^{-1})	Σταθερά ρυθμού για την απορρόφηση στο σύστημα από το γαστρεντερικό σύστημα
C_7	0,25	Κλάσμα του Cd που απορροφάται από το σύστημα και προσλαμβάνεται από το B3 (μεταλλοθειονίνη)
C_8	1 ($\mu g d^{-1}$)	Μέγιστος ρυθμός (maximum rate) που προσλαμβάνεται από το B3
C_9	0,44	Το κλάσμα που μεταφέρεται (fraction transferred) από το B1 (ερυθρά αιμοσφαίρια) στο T (υπόλοιπο σώμα)
C_{10}	$1,4 \times 10^{-4}$ (d^{-1})	Σταθερά ρυθμού (rate constant) για μεταφορά από το T (υπόλοιπο σώμα) στο B1(ερυθρά αιμοσφαίρια)
C_{11}	0,27	Το κλάσμα που μεταφέρεται (fraction transferred) από το B1 (πλάσμα) στο F (κόπρανα)
C_{12}	0,25	Το κλάσμα που μεταφέρεται (fraction transferred) από το B1 (πλάσμα) στο L (συκώτι)
C_{13}	$3,0 \times 10^{-5}$ (d^{-1})	Σταθερά ρυθμού (rate constant) για μεταφορά από το L (συκώτι) στο B1(πλάσμα)
C_{14}	$1,6 \times 10^{-4}$ (d^{-1})	Σταθερά ρυθμού για μεταφορά από το L (συκώτι) στο B3 (μεταλλοθειονίνη)
C_{15}	$5,0 \times 10^{-5}$ (d^{-1})	Σταθερά ρυθμού για μεταφορά από το L (συκώτι) στο F (κόπρανα)
C_{16}	0,012 (d^{-1})	Σταθερά ρυθμού (rate constant) για μεταφορά από το B2 (ερυθρά αιμοσφαίρια) στο B3 (μεταλλοθειονίνη)
C_{17}	0,95	Το κλάσμα που μεταφέρεται (fraction transferred) από το B3 (μεταλλοθειονίνη) στο K (νεφροί)
C_{18}	$1,0 \times 10^{-5}$ (d^{-1})	Σταθερά ρυθμού για μεταφορά από το K (νεφροί) στο B1(πλάσμα)
C_{19}	$1,4 \times 10^{-4}$ (d^{-1})	Σταθερά ρυθμού για μεταφορά από το K (νεφροί) στο U (ουρά)
C_{20}	0,1	Το κλάσμα του B1 και B3 στο σύνολο του αίματος
C_X	$1 - C_9 - C_{11} - C_{12}$	Το κλάσμα που μεταφέρεται (fraction transferred) από το B1 στο B2

*προτεινόμενη τιμή 0,7 από Kjellstrom και Nordberg (1978), ** Ο συντελεστής C_2 αλλάζει ώστε η δόση των σωματιδίων που περιέχουν κάδμιο στην πνευμονική περιοχή (συγκεκριμένα στην κυψελιδική περιοχή) του μοντέλου των Kjellstrom και Nordberg (1978) να είναι ίση με τη δόση των σωματιδίων που περιέχουν κάδμιο στην κυψελιδική περιοχή του αναθεωρημένου μοντέλου εναπόθεσης/ απομάκρυνσης σωματιδίων του μοντέλου ExDoM2.

Χρώμιο (Cr)

Το PBPK μοντέλου του O'Flaherty κ.ά. (2001) χρησιμοποιείται για την κατάποση του Cr μέσω της τροφής και του νερού. Το PBPK μοντέλο για το Cr αποτελείται από τα εξής όργανα/ιστούς (Εικόνα 17): Πνεύμονες, συκώτι, νεφροί, αίμα (αρτηριακό και φλεβικό αίμα), γαστρεντερικό σύστημα, εγκέφαλος, οστά (δοκιδωτό και φλοιώδη οστό) και υπόλοιπα όργανα. Στο PBPK μοντέλο των O'Flaherty κ.ά. (2001) πραγματοποιηθήκαν οι ακόλουθες τροποποιήσεις ώστε να μπορέσει να ενσωματωθεί στο μοντέλο ExDoM2: (1) αφαίρεση της έκθεσης των ανθρώπων σε Cr μέσω της διατροφής (κατανάλωσης τροφής και νερού), (2) προσαρμογή των εξισώσεων για να λαμβάνει υπόψη την έκθεση των ανθρώπων σε Cr (σε σωματιδιακή μορφή) μέσω της εισπνοής και (3) χρησιμοποίηση όγκων οργάνων της ICRP (2003).



Εικόνα 17: Σχηματική αναπαράσταση των διαμερισμάτων/τμημάτων του PBPK μοντέλου για το Cr.

Η αναγωγή του εξασθενούς χρωμίου (Cr^{6+}) σε τρισθενές χρώμιο (Cr^{3+}) και η διαφορετική κινητική του Cr^{3+} και του Cr^{6+} είναι σημαντικοί καθοριστικοί παράγοντες της διάθεσης και της τοξικότητας του Cr. Η αναγωγή του Cr^{6+} σε Cr^{3+} λαμβάνει χώρα σε όλους τους ιστούς με εξαίρεση τα οστά, το γαστρεντερικό σύστημα και τους πνεύμονες. Η αναγωγή μοντελοποιείται ως

μια διεργασία πρώτης τάξης. Σε γενικές γραμμές, η κινητική συμπεριφορά του Cr είναι συνεπής με την κατανόηση των παραγόντων που ρυθμίζουν την απορρόφηση, την κατανομή, και την απέκκριση (O'Flaherty κ.ά., 2001). Στον Πίνακα 12 παρουσιάζονται οι σημαντικότερες παράμετροι εισόδου που χρησιμοποιούνται στο PBPΚ μοντέλο για το Cr³⁺ (O'Flaherty κ.ά., 2001)

Πίνακας 12: Οι σημαντικότερες παράμετροι εισόδου που χρησιμοποιούνται στο PBPΚ μοντέλο για το Cr³⁺ (O'Flaherty κ.ά., 2001).

Παράμετροι εισόδου για Cr ³⁺	
KIN3 (L/hr)	0,125
KOUT3 (L/hr)	0,125
KGI3 (1/hr)	0,010
KREDK _{Liver} (1/h)	20,83
KREDK _{Kidney} (1/h)	20,83
KRED _{Red_cell} (1/h)	0,292
KINRBC3 (L/h)	0,500
KOUTRBC3 (L/h)	0,500
CR3	5

Οι εξισώσεις των O'Flaherty κ.ά. (2001) για το Cr³⁺ προσαρμόστηκαν ώστε να ενσωματωθούν στο μοντέλο ExDoM2 και στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικότερες εξισώσεις:

$$\frac{dA_{Liver}^{3+}}{dt} = KIN3 \times C_{Plasma}^{3+} - KOUT3 \times C_{Liver}^{3+} + KGI3 \times A_{GI_tract}^{3+} + KREDK_{Liver} \times A_{Liver}^{6+} \quad (79)$$

$$\frac{dA_{kidney}^{3+}}{dt} = KIN3 \times C_{Plasma}^{3+} - KOUT3 \times C_{kidney}^{3+} + KREDK_{kidney} \times A_{kidney}^{6+} \quad (80)$$

$$\frac{dA_{Red_cell}^{3+}}{dt} = KINRBC3 \times C_{Plasma}^{3+} - KOUTRBC3 \times C_{Red_cell}^{3+} + KRED_{Red_cell} \times A_{Red_cell}^{6+} \quad (81)$$

$$\frac{dA_{Cortical_bone}^{3+}}{dt} = CR3 \times CBFR \times C_{Plasma}^{3+} - CBRR \times C_{Cortical_bone}^{3+} \quad (82)$$

$$\frac{dA_{Trabecular_bone}^{3+}}{dt} = CR3 \times 0,65 \times BFR \times C_{Plasma}^{3+} - CBRR \times C_{Trabecular_bone}^{3+} \quad (83)$$

$$\frac{dA_{PBPΚ_Other_tissues}^{3+}}{dt} = KIN3 \times C_{Plasma}^{3+} - KOUT3 \times C_{kidney}^{3+} \quad (84)$$

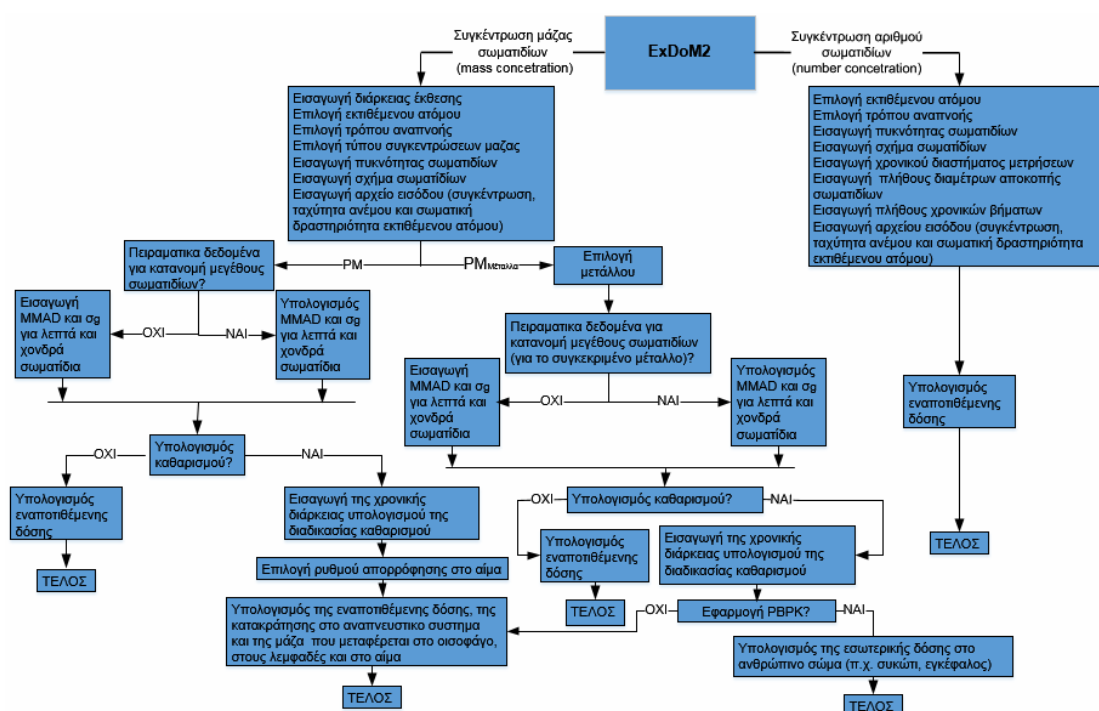
$$A_{Other_tissues}^{3+} = A_{PBPΚ_Other_tissues}^{3+} + A_{HRTM_Lymph_nodes}^{3+} \quad (85)$$

όπου A_i^{3+} είναι η δόση του Cr³⁺ στο όργανο i (μg), KIN3 είναι ο ρυθμός καθαρισμού του Cr³⁺ από το πλάσμα στα όργανα (L/h), KOUT3 είναι ο ρυθμός καθαρισμού του Cr³⁺ από τα όργανα (L/h), C_{plasma}^{3+} είναι η συγκέντρωση του

Cr^{3+} στο πλάσμα ($\mu\text{g/L}$), $C_{\text{Red_cell}}^{3+}$ είναι η συγκέντρωση του Cr^{3+} στα ερυθρά αιμοσφαίρια ($\mu\text{g/L}$), C_i^{3+} είναι η συγκέντρωση του Cr^{3+} στο όργανο i ($\mu\text{g/L}$), KREDK_i είναι ο ρυθμός αναγωγής του Cr^{6+} σε Cr^{3+} στο όργανο i ($1/\text{h}$), A_i^{6+} είναι η δόση του Cr^{6+} στο όργανο i (μg), KINRBC3 είναι ο ρυθμός καθαρισμού του Cr^{3+} από το πλάσμα στα ερυθρά αιμοσφαίρια (L/h), KOUTRBC3 είναι ο ρυθμός καθαρισμού του Cr^{3+} από τα ερυθρά αιμοσφαίρια στο πλάσμα, CBFR είναι ο ρυθμός σχηματισμού του φλοιώδους ιστού (L/h), CBRR είναι ο ρυθμός επαναρρόφησης (resorption rate) του φλοιώδους ιστού (L/h), $A_{\text{HRTM_lymph_nodes}}^{3+}$ είναι η δόση των $\text{PM}_{\text{Cr}}^{3+}$ στους λεμφαδένες από το αναθεωρημένο μοντέλο εναπόθεσης/απομάκρυνσης σωματιδίων (HRTM) του ExDoM2 (μg), $A_{\text{PBPk_Other_tissues}}^{3+}$ είναι η δόση του Cr^{3+} στο υπόλοιπο σώμα (π.χ. λεμφαδένες, μύες, δέρμα) από το PBPk μοντέλο (μg). Οι εξισώσεις και οι παράμετροι εισόδου που χρησιμοποιούνται στο PBPk μοντέλο για το Cr^{6+} παρουσιάζονται στο Παράρτημα Δ.

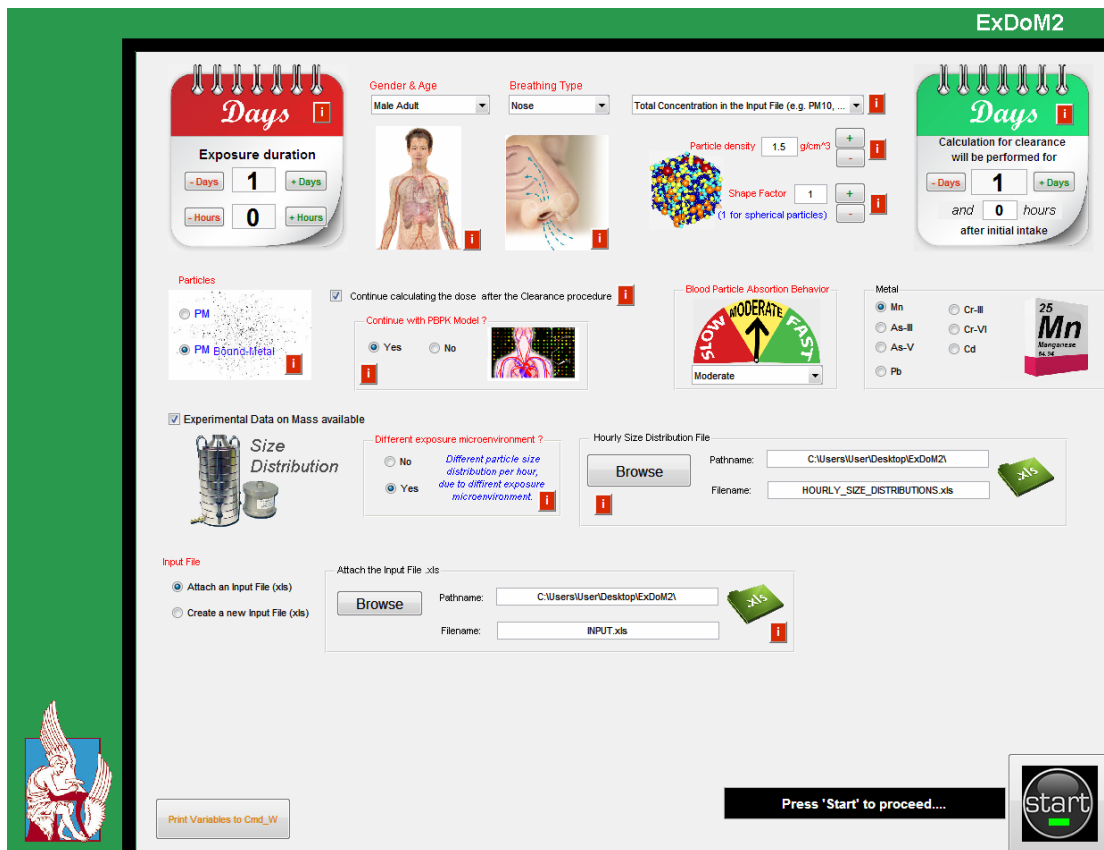
5.4. Δεδομένα εισόδου για το μοντέλο ExDoM2

Το μοντέλο ExDoM2 πραγματοποιήθηκε με την ενοποίηση του μοντέλου εναπόθεσης/απομάκρυνσης σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα (HRTM) και του φαρμακοκινητικού (PBPK) μοντέλου. Με την ενοποίηση δημιουργήθηκε το μοντέλο υπολογισμού της εσωτερικής δόσης σωματιδίων στο ανθρώπινο σώμα (ExDoM2). Στην Εικόνα 18 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του ExDoM2.



Εικόνα 18: Διάγραμμα ροής του μοντέλου ExDoM2.

Το μοντέλο ExDoM2 επιτρέπει στο χρήστη να εισάγει τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου σε γραφικό περιβάλλον διεπαφής χρήστη (GUI) και σε αρχεία Excel. Τα αναγκαία δεδομένα εισόδου (για συγκέντρωση μάζας) που εισάγονται στο μοντέλο ExDoM2 μέσω του γραφικού περιβάλλον διεπαφής χρήστη (GUI) απεικονίζεται στην Εικόνα 19.



Εικόνα 19: Τα δεδομένα εισόδου που εισάγονται στο μοντέλο ExDoM2 μέσω του γραφικού περιβάλλον διεπαφής χρήστη (GUI)*.

Τα δεδομένα εισόδου που εισάγονται στο μοντέλο ExDoM2 μέσω του γραφικού περιβάλλον επαφής χρήστη (GUI) είναι:

- Διάρκεια έκθεσης του εκτιθέμενου ατόμου.
- Επιλογή εκτιθέμενου ατόμου (π.χ. ενήλικας άνδρας).
- Επιλογή του τρόπου αναπνοής του εκτιθέμενου ατόμου. Με βάση τον τρόπο αναπνοής οι άνθρωποι χαρακτηρίζονται ως άτομα που εισπνέουν μόνο από τη μύτη (nose breathers) ή ως άτομα που εισπνέουν από το στόμα και τη μύτη (mouth breathers) (ICRP, 2002).
- Είδος σωματιδίων (PM ή PM_{μέταλλα}). Ο χρήστης επιλέγει αν το μοντέλο ExDoM2 θα εφαρμοστεί γενικά για αιωρούμενα σωματίδια ή για

* Το γραφικό περιβάλλον διεπαφής χρήστη (GUI) δημιουργήθηκε από τον Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Υπολογιστών Μ. Παπαγιαννάκη στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής του εργασίας με τίτλο «Δημιουργία μία φιλικής προς τον χρήστη γραφικής πλατφόρμας για το μοντέλο ExDoM2 (Exposure Dose Model2) και η εφαρμογή του στο μετρώ της Αθήνας». Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος. Πολυτεχνείο Κρήτης, 2015.

αιωρούμενα σωματίδια που περιέχουν συγκεκριμένα μέταλλα (As, Pb, Cd, Cr και Mn).

- Επιλογή τύπου δεδομένων συγκεντρώσεων μάζας. Αν ο χρήστης διαθέτει δεδομένα συνολικής συγκέντρωσης μάζας (π.χ. PM_{10} ή PM_{15}) ή δεδομένα μόνο για χονδρά και λεπτά σωματίδια.
- Η πυκνότητα των σωματιδίων σε g/cm^3 .
- Το σχήμα των σωματιδίων (1 για σφαιρικά σωματίδια).
- Επιλογή για το αν ο χρήστης επιθυμεί να συνεχίσει την εφαρμογή υπολογίζοντας τη δόση στο αναπνευστικό σύστημα μετά τον καθαρισμό (clearance).
- Εισαγωγή της χρονικής διάρκειας υπολογισμού της διαδικασίας καθαρισμού.
- Επιλογή ρυθμού απορρόφησης των σωματιδίων στο αίμα.
- Επιλογή για το αν ο χρήστης επιθυμεί να συνεχίσει την εφαρμογή χρησιμοποιώντας το PBPK μοντέλο.
- Επιλογή μετάλλου για την εφαρμογή του PBPK μοντέλου.
- Επιλογή για τον αν ο χρήστης διαθέτει δεδομένα για την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων από μετρήσεις με δειγματολήπτη (π.χ προσκρουστήρα Andersen).
- Το πλήθος των σταδίων του δειγματολήπτη.
- Εισαγωγή του επιθυμητού σημείου αποκοπής της κατανομής σωματιδίων για τα λεπτά σωματίδια.
- Επιλογή για το αν υπάρχουν διαφορετικές κατανομές μεγέθους ανά ώρα λόγω των διαφορετικών χώρων έκθεσης (πχ το εκτιθέμενο άτομο 07:00-13:00 βρίσκεται σε ΧΥΤΑ ενώ 00:00-07:00 βρίσκεται σε εσωτερικό χώρο).
- Εισαγωγή αρχείο εισόδου
- Εισαγωγή πειραματικών δεδομένων κατανομής μεγέθους σωματιδίων

Επίσης πρέπει να εισαχθούν δυο αρχεία στο μοντέλο που περιέχουν απαραίτητα δεδομένα για τη συγκέντρωση/κατανομή των σωματιδίων και χαρακτηριστικά της έκθεσης. Το πρώτο αρχείο Excel (αρχείο εισόδου) περιέχει τα εξής δεδομένα: τη συγκέντρωση των σωματιδίων, την ταχύτητα

του αέρα καθώς επίσης και το επίπεδο σωματικής άσκησης του εκτιθέμενου ατόμου. Το δεύτερο αρχείο Excel περιέχει την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΣΤΑΘΜΟΥ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ

6.1. Περιγραφή περιοχής μελέτης

Η περιοχή που μελετάμε βρίσκεται στη θέση «Κορακιά» Ακρωτηρίου Χανίων, νότια της χαράδρας του Κουρουπητού, συνολικής έκτασης 235,5 στρεμμάτων. Στο χώρο αυτό βρίσκεται η μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων. Η μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων αποτελείται από το Χώρο Υγειονομικής Ταφής (ΧΥΤ) και από το Εργοστάσιο Μηχανικής Ανακύκλωσης και Κομποστοποίησης (ΕΜΑΚ) (Εικόνα 20). Η Διαδημοτική Επιχείρηση Διαχείρισης Στερεών Απορριμμάτων (ΔΕΔΙΣΑ) έχει αναλάβει τη διαχείριση της μονάδας.



Εικόνα 20: Η μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων (Πηγή: Google Earth).

Η μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων αποτελείται από τα εξής τμήματα (Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Χανίων, 2006; Προσωπική επικοινωνία με τον κ. Μ. Κονταξάκη):

- **Κεντρική πύλη εισόδου.** Τα απορριμματοφόρα εισέρχονται εντός του περιφραγμένου χώρου της μονάδας διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων διερχόμενα από την κεντρική πύλη εισόδου. Η κεντρική πύλη εισόδου είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και τηλεχειριζόμενη.
- **Ζυγιστήριο.** Η ζύγιση των εισερχομένων φορτηγών γίνεται μέσω γεφυροπλαστίγγων. Η ηλεκτρονική γεφυροπλάστιγγα εδράζεται εντός φρεατίου από μπετόν και έχει δυναμικότητα 60 tn με υποδιαίρεση των 10 kg. Επίσης διαθέτει πλατφόρμα από ενισχυμένο χαλύβδινο έλασμα καταλλήλων διαστάσεων ώστε να είναι δυνατή η ζύγιση όλων των τύπων οχημάτων που θα μεταφέρουν υλικά από και προς τη μονάδα.
- **Κτίριο υποδοχής.** Στο κτίριο υποδοχής γίνεται η εκκένωση των απορριμματοφόρων και η παραλαβή των σύμμεικτων απορριμμάτων (πράσινος κάδος). Τα απορριμματοφόρα αδειάζουν το φορτίο τους στις δεξαμενές του κτιρίου υποδοχής απορριμμάτων. Στη συνέχεια με τη βοήθεια αρπαγής τοποθετούνται στο κινούμενο δάπεδο, ενώ η διάνοιξη των σάκων γίνεται μέσω του σχίστη. Επιπλέον, στο κτίριο υποδοχής απομακρύνονται τα ογκώδη αντικείμενα που υπάρχουν στα εισερχόμενα σύμμεικτα απορρίμματα.
- **Κτίριο μηχανικής διαλογής και χειροδιαλογής.** Στο κτίριο μηχανικής διαλογής και χειροδιαλογής πραγματοποιείται ο διαχωρισμός των εισερχόμενων σύμμεικτων απορριμμάτων (πράσινος κάδος) και των ανακυκλώσιμων υλικών (μπλε κάδος) προς παραγωγή τεσσάρων κλασμάτων. Τα διαχωρισμένα ανακυκλώσιμα υλικά (χαρτί, πλαστικό, αλουμίνιο και σιδηρούχα μέταλλα) διαμορφώνονται σε δέματα έτοιμα για τη εμπορική τους διάθεση. Από την επεξεργασία προκύπτει και ένα κλάσμα πλούσιο σε οργανική ύλη το οποίο οδηγείται στη μονάδα ταχείας κομποστοποίησης προς περαιτέρω επεξεργασία.
- **Κτίριο κομποστοποίησης.** Στο κτίριο κομποστοποίησης εισέρχεται το οργανικό κλάσμα μαζί με την ποσότητα κλαδιών και χόρτων (κλαδοκάθαρα) που έχουν συγκεντρωθεί από τη ΔΕΔΙΣΑ. Τα κλαδοκάθαρα μέσω τεμαχιστή και δοσομετρητή αναμειγνύονται με το οργανικό υλικό. Τα κλαδοκάθαρα λόγω του υψηλού κυτταρινικού και λιγνινικού περιεχομένου τους αυξάνουν σημαντικά το χουμικό

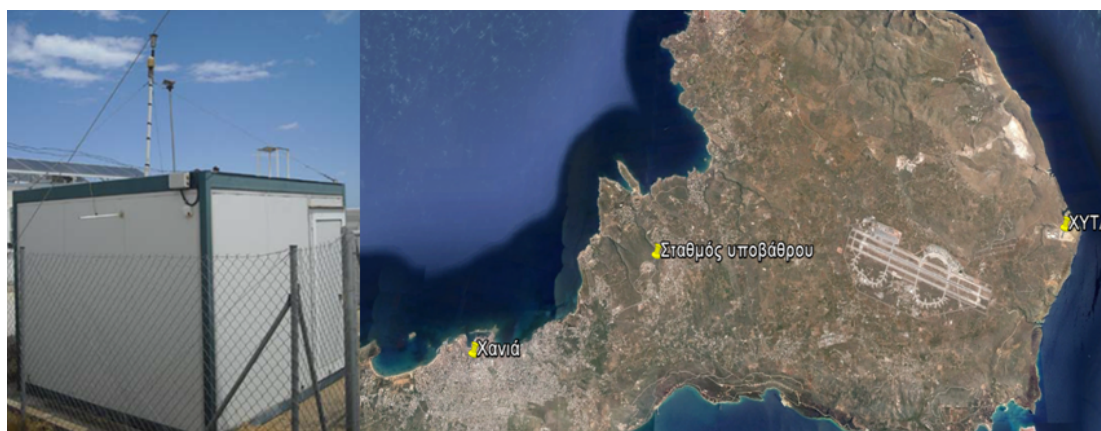
περιεχόμενο του τελικού προϊόντος και επίσης δρουν ως υλικά ρυθμιστικά του πορώδους (bulking agents) διευκολύνοντας την ομοιόμορφη διέλευση του αέρα. Η Ταχεία Κομποστοποίηση πραγματοποιείται σε αντιδραστήρα λιπασματοποίησης υπό ταυτόχρονο αερισμό και ανάδευση.

- **Κτίριο ραφινάρισματος.** Το παραγόμενο κομπόστ από τη μονάδα κομποστοποίησης οδηγείται προς ραφινάρισμα. Η διαδικασία αυτή συνίσταται στο διαχωρισμό του κομπόστ από ξένες προσμίξεις καθώς και από τα μη πλήρως κομποστοποιημένα οργανικά στερεά.
- **Πλατεία ωρίμανσης (χουμοποίησης) του κομπόστ.** Το κομπόστ μετά το ραφινάρισμα οδηγείται στην πλατεία ωρίμανση (χουμοποίησης) όπου διαστρώνεται σε μορφή σωρών. Το υλικό παραμένει εκεί για διάστημα 13-18 εβδομάδων, προκειμένου να ολοκληρωθούν οι διεργασίες ωρίμανσης πριν την τελική του διάθεση στην αγορά.
- **Κτίριο αποθήκευσης κομπόστ.** Μετά την πλατεία ωρίμανσης το κομπόστ αποθηκεύεται σε κλειστή αποθήκη για διάστημα 4 εβδομάδων προκειμένου να ολοκληρωθεί η ωρίμανση του. Στη συνέχεια ενσακίζεται και αποθηκεύεται μέχρι τη διάθεση του στην αγορά.
- **Μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.** Για την ασφαλή διάθεση των στραγγισμάτων αλλά και των υγρών που προέρχονται από την επεξεργασία των απορριμμάτων.
- **Χώρος υγειονομικής ταφής.** Ο χώρος υγειονομική ταφή δέχεται καθημερινά 174 τόνοι απορριμμάτων.
- **Κτίριο διοίκησης.**

6.2. Περιγραφή σταθμού υποβάθρου

Ο σταθμός υποβάθρου βρίσκεται στο Ακρωτήριο και ανήκει στο Εργαστήριο Ατμοσφαιρικών Αιωρούμενων Σωματιδίων της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ο σταθμός βρίσκεται 11 km μακριά

από τη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων και 5 km μακριά από τα Χανιά (Εικόνα 21).



Εικόνα 21: Σταθμός υποβάθρου της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης (Πηγή: Google Earth).

Οι παράμετροι που μετρούνται στο σταθμό αναφοράς είναι η θερμοκρασία, η υγρασία, η ταχύτητα του ανέμου, η διεύθυνση του ανέμου, η ηλιακή ακτινοβολία, η βροχόπτωση και η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων (PM_{10} ή $PM_{2.5}$ ανάλογα με την κεφαλή που έχει τοποθετηθεί στο όργανο). Στο σταθμό υποβάθρου τα όργανα πραγματοποιούν συνεχείς μετρήσεις των παραπάνω παραμέτρων. Η περιγραφή των οργάνων που χρησιμοποιούνται στο σταθμό αναφοράς περιγράφονται στην Ενότητα 7.1 για τις μετεωρολογικές μετρήσεις και στην Ενότητα 8.1.1 για τις μετρήσεις των αιωρούμενων σωματιδίων. Στην περιοχή του σταθμού δεν υπάρχουν ψηλά δέντρα τα οποία θα μπορούσαν να επηρεάσουν τις μετεωρολογικές μετρήσεις. Υπάρχει όμως ένα κτίριο με ύψος γύρω στα 15 m σε απόσταση 50 m από το σταθμό.

ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

7.1. Περιγραφή οργάνων μέτρησης μετεωρολογικών παραμέτρων

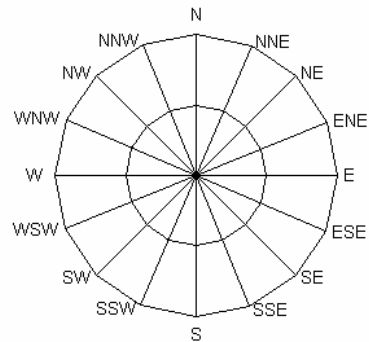
Για την καταγραφή μετρήσεων θερμοκρασίας και υγρασίας χρησιμοποιήθηκε το όργανο «Combined Temperature/ Humidity sensor in shelter 3030» του οίκου Theodor Friedrichs & Co. Ο αισθητήρας της θερμοκρασίας αποτελείται από μία αντίσταση από πλατίνα Pt 100. Η μέτρηση της θερμοκρασίας βασίζεται στην αλλαγή της ηλεκτρικής αντίστασης που εμφανίζει η πλατίνα ενώ η μέτρηση της υγρασίας γίνεται από το υγρόμετρο και βασίζεται στη μεθοδολογία των αντιστάσεων. Το εύρος θερμοκρασιών που μπορεί να καταγράψει ο αισθητήρας είναι από -40°C έως $+60^{\circ}\text{C}$ ενώ το εύρος υγρασίας που μπορεί να καταγράψει είναι από 0% έως 100% (Theodor Friedrichs & Co).

Για την καταγραφή της ταχύτητας του ανέμου χρησιμοποιήθηκε ανεμόμετρο κυπέλου «Wind speed sensor type 4034» του οίκου Theodor Friedrichs & Co. Η αρχή λειτουργίας του ανεμόμετρου κυπέλου βασίζεται σε 3 κύπελλα τα οποία είναι στερεωμένα στις άκρες ακτινωτών βραχιόνων. Η περιστροφή των κυπέλλων και του στελέχους τους δημιουργεί μία σειρά από παλμούς ανάκλασης και απορρόφησης, των οποίων η συχνότητα είναι ανάλογη της ταχύτητας του ανέμου. Σε ένα εύρος συχνοτήτων 0 έως 600 Hz αντιστοιχεί ένα εύρος ταχυτήτων από 0 έως 60 m/s. Η ελάχιστη ταχύτητα στην οποία μπορεί να λειτουργήσει το όργανο είναι τα 0,3 m/s και η μέγιστη είναι τα 60 m/s (Theodor Friedrichs & Co).

Για την καταγραφή της διεύθυνσης του ανέμου χρησιμοποιήθηκε το όργανο «Wind direction sensor type 4122» του οίκου Theodor Friedrichs & Co. Το όργανο αποτελείται από έναν ανεμοδείκτη. Όταν ο ανεμοδείκτης κινείται εμφανίζεται ένα αντίστοιχο ψηφιακό σήμα (ανάλογα με τη διεύθυνση

του ανέμου). Το εύρος μετρήσεων του οργάνου είναι από 0 έως 360 μοίρες. Στην Εικόνα 22 παρουσιάζεται η αντιστοιχία μοιρών και διεύθυνσης ανέμου.

Διεύθυνση ανέμου	Μοίρες
N	348,75 - 11,25
NNE	11,25 - 33,75
NE	33,75 - 56,25
ENE	56,25 - 78,75
E	78,75 - 101,25
ESE	101,25 - 123,75
SE	123,75 - 146,25
SSE	146,25 - 168,75
S	168,75 - 191,25
SSW	191,25 - 213,75
SW	213,75 - 236,25
WSW	236,25 - 258,75
W	258,75 - 281,25
WNW	281,25 - 303,75
NW	303,75 - 326,25
NNW	326,25 - 348,75



Εικόνα 22: Αντιστοιχία μοιρών και διεύθυνσης ανέμου.

7.2. Μεθοδολογία εκτίμησης κλάση ισορροπίας

Για την εκτίμηση της κλάσης ισορροπίας χρησιμοποιούνται οι καταγεγραμμένες μετρήσεις από το μετεωρολογικό σταθμό υποβάθρου. Με βάση τον Πίνακα 13 εκτιμώνται ποιοτικά οι κλάσεις ισορροπίας σε σχέση με τις καιρικές συνθήκες σε ωριαία βάση. Ο Πίνακας 13 περιέχει έξι κλάσεις ισορροπίας για πέντε κλάσεις ανέμων επιφανείας, τρεις κλάσεις ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας και τρεις κλάσεις νέφωσης κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Πίνακας 13: Κλάσεις ισορροπίας κατά τροποποιημένο Pasquil (Mohan και Siddiqui, 1998).

Wind speed (m s ⁻¹)	Daytime ^a incoming solar radiation (W m ⁻²)				Within 1 h before sunset or after sunrise ^b	Nighttime cloud amount (oktas)		
	(m s ⁻¹) strong (>600)	Moderate (300–600)	Slight (<300)	Overcast		0–3	4–7	8
≤ 2.0	A	A–B	B	C	D	F or G ^c	F	D
2.0–3.0	A–B	B	C	C	D	F	E	D
3.0–5.0	B	B–C	C	C	D	E	D	D
5.0–6.0	C	C–D	D	D	D	D	D	D
> 6.0	C	D	D	D	D	D	D	D

Οι κλάσεις ισορροπίας του Πίνακα 13 αντιπροσωπεύουν τις παρακάτω συνθήκες:

- A: Πολύ ασταθείς συνθήκες
- B: Μέτρια ασταθείς συνθήκες
- C: Ελαφρά ασταθείς συνθήκες
- D: Ουδέτερες συνθήκες
- E: Ελαφρά ευσταθείς συνθήκες
- F: Μέτρια ευσταθείς συνθήκες

Νύχτα χαρακτηρίζεται η περίοδος μία ώρα πριν τη δύση μέχρι μία ώρα μετά την ανατολή του ηλίου.

7.3. Μεθοδολογία εκτίμησης ύψους ανάμιξης

Το ύψος ανάμιξης (h) υπολογίζεται σε συνάρτηση των κλάσεων ισορροπίας (Panofsky και Dutton, 1984; Garratt, 1994; Zannetti, 1990):

$$h = 0,17 \times \left(\frac{u_*}{f} \right) \quad \text{για ουδέτερες συνθήκες (D)} \quad (86)$$

$$h = 0,4 \times \left(\frac{u_* \times L}{f} \right)^{0,5} \quad \text{για ευσταθείς συνθήκες (E,F)} \quad (87)$$

$$h = 0,4 \times (-L) \left(\frac{1}{0,6} \times \left(1,3 \times \left(1 - 3 \times \frac{z}{L} \right) \right) \right)^3 \quad \text{για ασταθείς συνθήκες (A,B,C)} \quad (88)$$

όπου u_* είναι η ταχύτητα τριβής (m/s), f είναι η κοριόλις παράμετρος (s⁻¹), L είναι το μήκος Monin-Obukhov (m) και z είναι το ύψος του ανεμόμετρου (m).

Η κοριόλις παράμετρος (coriolis parameter) υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$f = 2 \times \Omega \times \eta \mu \phi \quad (89)$$

όπου Ω είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφή της Γής και ϕ το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής που μελετάμε.

Το μήκος monin-Obukhov (L) υπολογίζεται από την εξίσωση (Golder, 1972):

$$\frac{1}{L} = X + Y \times \log z_0 \quad (90)$$

όπου z_0 είναι το μήκος τραχύτητας (m), X και Y είναι συντελεστές όπου οι τιμές τους εξαρτάται από την κλάση ισορροπίας (Πίνακας 14).

Πίνακας 14: Τιμές συντελεστών (X, Y) σε συνάρτηση των κλάσεων ισορροπίας (Golder, 1972):

ΚΛΑΣΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ	ΤΙΜΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ	
		X	Y
A	Εξαιρετικά Ασταθείς	-0,096	0,029
B	Μέτρια Ασταθείς	-0,037	0,029
C	Ελαφρώς Ασταθείς	-0,002	0,018
D	Ουδέτερες	0	0
E	Ελαφρώς Ευσταθείς	0,004	-0,018
F	Μέτρια Ευσταθείς	0,035	-0,036

Η ταχύτητα τριβής (u^*) υπολογίζεται από την εξίσωση (Dyer, 1974; Fatogoma και Jacko, 2002):

$$u^* = \frac{0,4 \times u}{\ln(z/z_0) - \Psi_m\{z/L\} + \Psi_m\{z_0/L\}} \quad (91)$$

όπου u είναι η ταχύτητα του ανέμου (m/s) και Ψ_m είναι οι δυναμικές παράμετροι ισορροπίας.

Οι δυναμικές παράμετροι ισορροπίας (Ψ_m) υπολογίζονται σε συνάρτηση των κλάσεων ισορροπίας (Fatogoma και Jacko, 2002):

- Για ασταθείς συνθήκες (A,B,C) ισχύουν οι τύποι:

$$\Psi_m\{z/L\} = 2 \ln\left(\frac{1+\mu}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+\mu^2}{2}\right) - 2 \tan^{-1} \mu + \pi/2 \quad (92)$$

$$\psi_m\{z_0/L\} = 2 \ln\left(\frac{1+\mu_0}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+\mu_0^2}{2}\right) - 2 \tan^{-1} \mu_0 + \pi/2 \quad (93)$$

όπου $\mu = (1-16 \times z/L)^{1/4}$ και $\mu_0 = (1-16 \times z_0/L)^{1/4}$

- Για ευσταθείς συνθήκες (E,F) ισχύουν οι τύποι:

$$\Psi_m\{z/L\} = -5 (z/L) \quad (94)$$

$$\Psi_m\{z_0/L\} = -5 (z_0/L) \quad (95)$$

- Για ουδέτερες συνθήκες (D) ισχύουν οι τύποι:

$$\Psi_m\{z/L\} = 0 \quad (96)$$

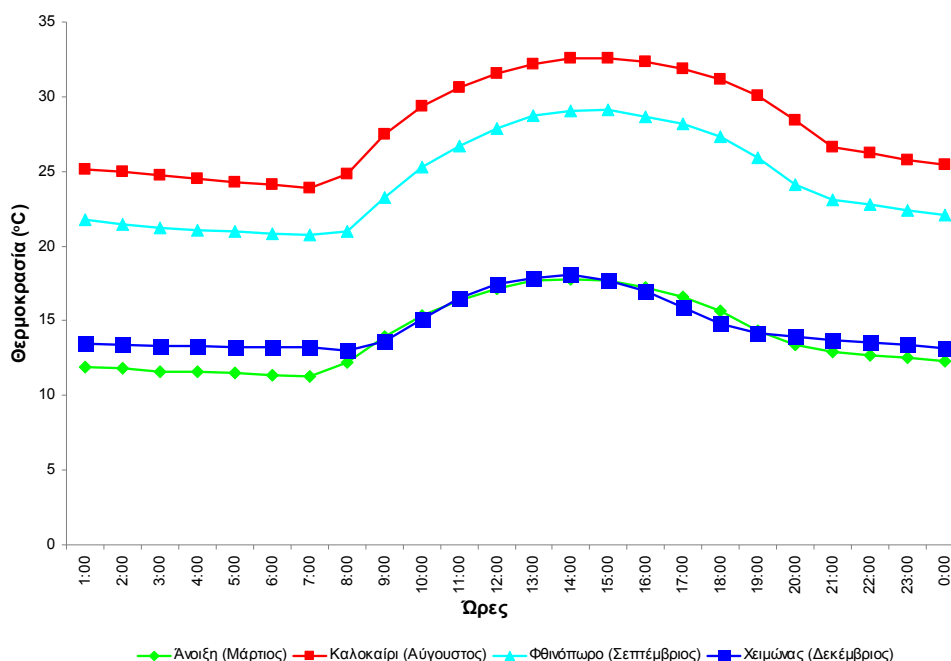
$$\Psi_m\{z_0/L\} = 0 \quad (97)$$

7.4. Αποτελέσματα μετεωρολογικών παρατηρήσεων

Η συμβολή των μετεωρολογικών παραμέτρων στη ρύπανση είναι σημαντική, καθώς αυτές επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη διαμόρφωση των επιπέδων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Αυτές οι παράμετροι είναι η ταχύτητα ανέμου, η διεύθυνση ανέμου, η θερμοκρασία, η ηλιακή ακτινοβολία, η βροχόπτωση, το ύψος ανάμιξης και η κλάση ισορροπίας. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τα μετεωρολογικά δεδομένα από το μετεωρολογικό σταθμό του Πολυτεχνείου Κρήτης για τους μήνες Μάρτιο (Άνοιξη), Αύγουστο (Καλοκαίρι), Σεπτέμβριο (Φθινόπωρο) και Δεκέμβριο (Χειμώνας) του έτους 2010. Το έτος 2010 είναι το έτος εφαρμογής του μοντέλου διασποράς λόγω των διαθέσιμων στοιχείων για τις διαδρομές των απορριμματοφόρων που δόθηκαν από τον κ. Μ. Κονταξάκη (Διευθυντή ΧΥΤ και υπεύθυνο γραφείου προγραμματισμού). Επιλέχθηκε ένας μήνας για κάθε εποχή με βάση τις διαδρομές των απορριμματοφόρων. Συγκεκριμένα επιλέχθηκε ο μήνας με τις περισσότερες διαδρομές φορτηγών για κάθε εποχή.

Στο Διάγραμμα 1 παρουσιάζεται η μέση ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα για τους μήνες Μάρτιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο. Σύμφωνα με το Διάγραμμα 1 η θερμοκρασία του αέρα αυξάνει προοδευτικά από την ανατολή του ήλιου μέχρι τις μεσημεριανές ώρες, για να ελαττωθεί στη συνέχεια μέχρι την ανατολή του ήλιου. Η θερμοκρασία του αέρα κυμαίνεται από $11,3^{\circ}\text{C}$ (07:00) έως $17,8^{\circ}\text{C}$ (14:00) για τον Μάρτιο, από $23,9^{\circ}\text{C}$ (07:00) έως $32,6^{\circ}\text{C}$ (14:00) για τον Αύγουστο, από $20,7^{\circ}\text{C}$ (07:00)

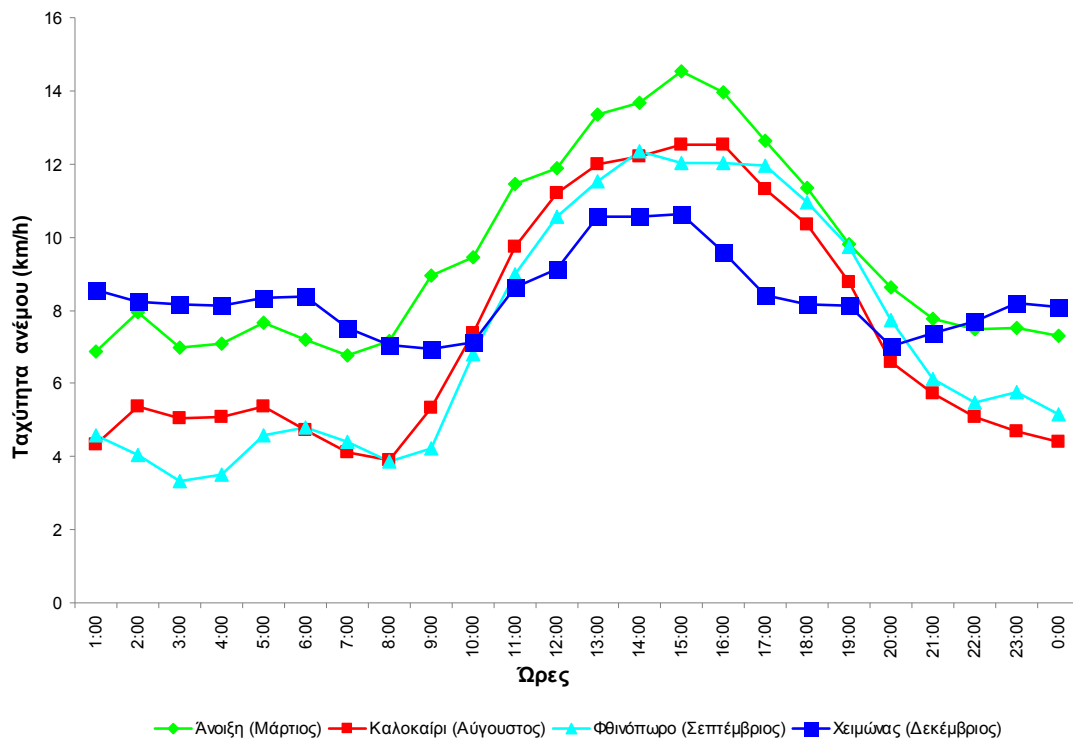
έως 29,1 °C (15:00) για τον Σεπτέμβριο και από 13,0 °C (08:00) έως 18,1 °C (14:00) για τον Δεκέμβριο. Η ελαχίστη θερμοκρασία του αέρα παρατηρείται τη στιγμή της ανατολής (ή λίγο αργότερα) ενώ η μέγιστη τιμή παρατηρείται κατά τις μεσημεριανές ώρες. Η θερμοκρασία του αέρα κυμαίνεται στα ίδια περίπου επίπεδα για τους μήνες Μάρτιο και Δεκέμβριο. Η μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα είναι ίση με 14,0°C, 27,9°C, 24,3°C και 14,7 °C για τους μήνες Μάρτιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο.



Διάγραμμα 1: Μέση ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα (°C) για τους μήνες Μάρτιο (Άνοιξη), Αύγουστο (Καλοκαίρι), Σεπτέμβριο (φθινόπωρο) και Δεκέμβριο (χειμώνας).

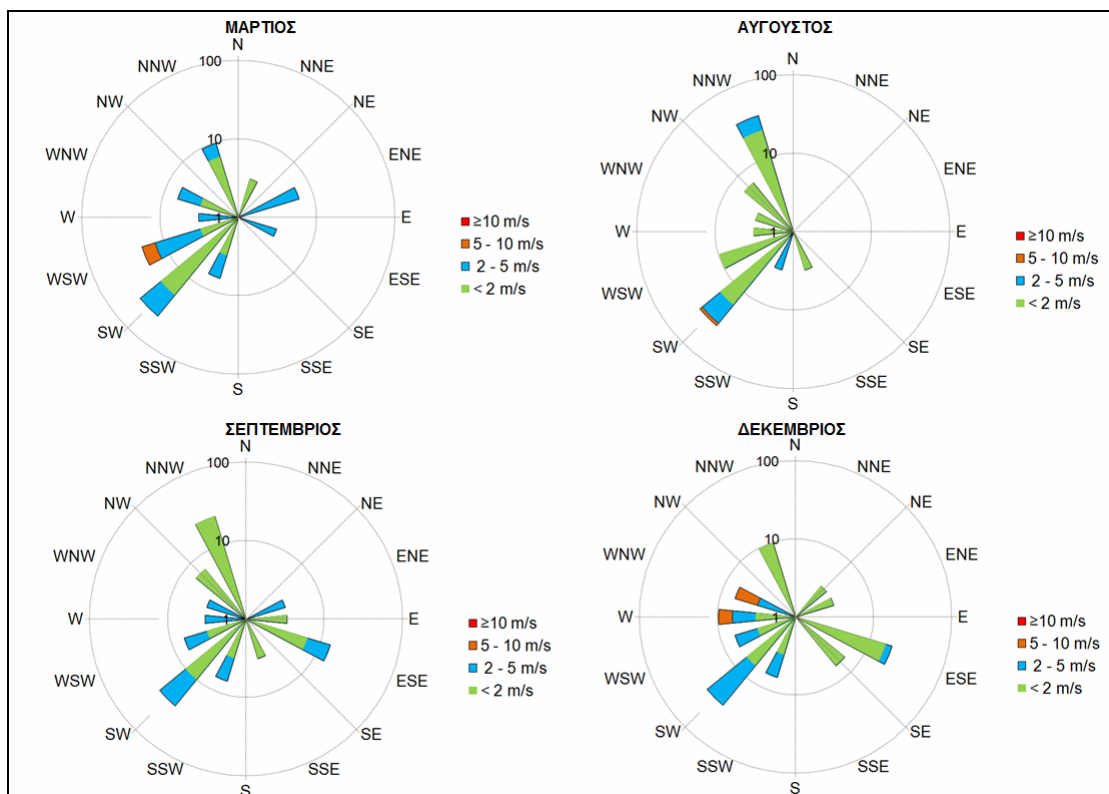
Η ημερήσια μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου είναι επίσης σημαντική στη διαμόρφωση των επιπέδων των PM₁₀. Στο Διάγραμμα 2 παρουσιάζεται η διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου κατά τη διάρκεια μιας μέσης τυπικής ημέρας για τους μήνες Μάρτιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο. Γενικά ο άνεμος έχει μεγαλύτερες ταχύτητες κατά τη διάρκεια της ημέρας και μικρότερες τη νύχτα. Η μέση ωριαία ταχύτητα του ανέμου κυμαίνεται από 6,8 km/h (07:00) έως 14,5 km/h (15:00) για τον Μάρτιο, από 3,9 km/h (08:00) έως 12,5 km/h (15:00) για τον Αύγουστο, από 3,3 km/h (03:00) έως 12,3 km/h (14:00) για τον Σεπτέμβριο και από 6,9 km/h (09:00) έως 10,6 km/h (15:00) για τον Δεκέμβριο. Η ταχύτητα του ανέμου κυμαίνεται στα ίδια περίπου επίπεδα για τους μήνες Αύγουστο και Σεπτέμβριο. Οι μέγιστες τιμές

παρατηρούνται κατά τις μεσημεριανές ώρες. Η μέση μηνιαία ταχύτητα του ανέμου είναι ίση με 9,5 km/h, 7,4 km/h, 7,3 km/h και 8,4 km/h για τους μήνες Μάρτιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο.



Διάγραμμα 2: Μέση ημερήσια διακύμανση ταχύτητας του ανέμου (km/h) για τους μήνες Μάρτιο (Άνοιξη), Αύγουστο (Καλοκαίρι), Σεπτέμβριο (φθινόπωρο) και Δεκέμβριο (χειμώνας).

Η διεύθυνση του ανέμου καθορίζει την περιοχή προς την οποία θα μεταφερθούν οι ρύποι στην ατμόσφαιρα. Επομένως, η διεύθυνση ανέμου σχετίζεται άμεσα με την επιβάρυνση μιας συγκεκριμένης περιοχής. Για την παραγωγή του ανεμολογικού ροδογράμματος η διεύθυνση του ορίζοντα χωρίζεται σε 16 τομείς, εύρους 22,5 μοιρών. Η ένταση του ανέμου μετατράπηκε από km/h σε m/sec για την παραγωγή του ανεμολογικού ροδογράμματος. Στο Διάγραμμα 3 παρουσιάζονται τα ανεμολογικά ροδογράμματα για τους μήνες Μάρτιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο.



Διάγραμμα 3: Ανεμολογικά ροδιογράμματα για τους μήνες Μάρτιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο.

Από τα ανεμολογικά στοιχεία που παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 3 παρατηρείται ότι η επικρατέστερη διεύθυνση ανέμου είναι η νοτιοδυτική διεύθυνση (SW) για τον Δεκέμβριο και τον Μάρτιο με ποσοστό 29% και 42%, αντίστοιχα. Αυτό οφείλεται στη διέλευση των υφέσεων (βαρομετρικών χαμηλών) κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου και στη γενικότερη κυκλοφορία της ατμόσφαιρας για την περίοδο αυτή σε συνδυασμό με τη γεωγραφική θέση της Κρήτης και τη μορφολογία του εδάφους. Για τον Σεπτέμβριο η επικρατέστερη διεύθυνση είναι η νοτιοδυτική (SW) με ποσοστό 27%, ακολουθεί η βόρεια-βορειοδυτική διεύθυνση (NNW) με ποσοστό 23%. Για τον Αύγουστο η επικρατέστερη διεύθυνση είναι η νοτιοδυτική (SW) και η βόρεια-βορειοδυτική διεύθυνση (NNW) με ποσοστό 35% και για τις δυο διευθύνσεις. Αυτό οφείλεται στα Μελέμια τα οποία πνέουν γενικά από Βόρειες διευθύνσεις κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου.

Η βροχόπτωση είναι μια σημαντική μετεωρολογική παράμετρος για τη διαμόρφωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων. Η βροχόπτωση ευνοεί τον τακτικό καθαρισμό της ατμόσφαιρας από τα αιωρούμενα

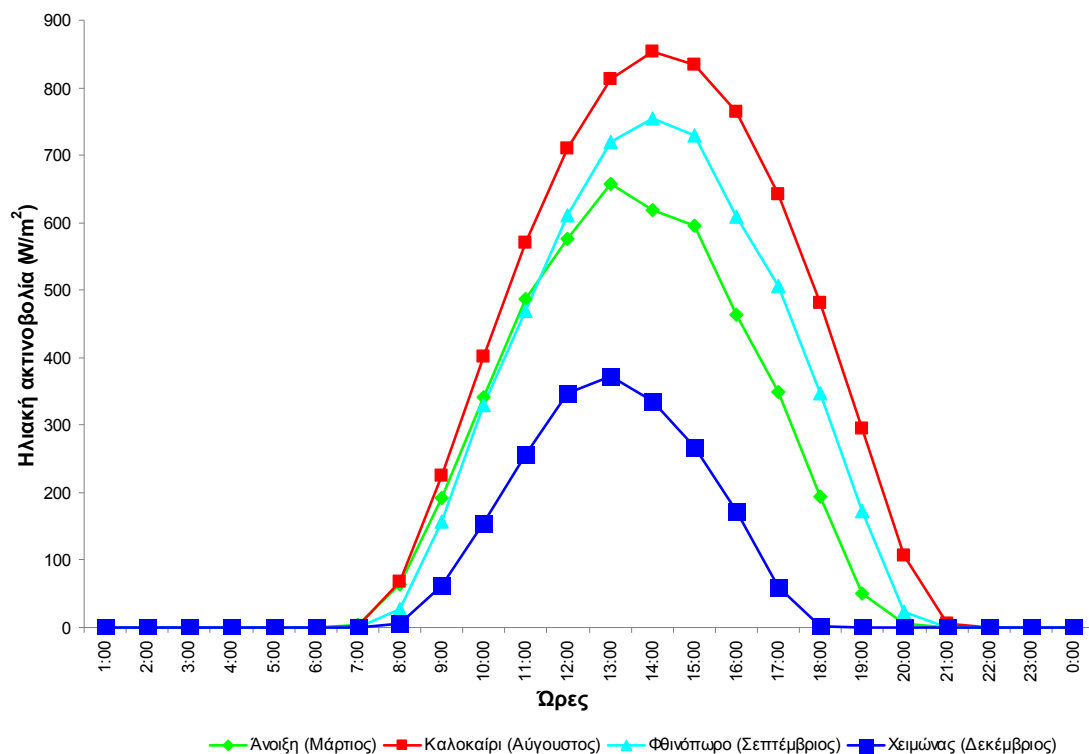
σωματίδια. Στον Πίνακα 15 παρουσιάζονται οι ώρες βροχής για τους μήνες Μάρτιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο.

Πίνακας 15: Ώρες βροχής για τους μήνες Μάρτιο (Άνοιξη), Αύγουστο (Καλοκαίρι), Σεπτέμβριο (φθινόπωρο) και Δεκέμβριο (χειμώνας) του έτους 2010.

	Άνοιξη (Μάρτιος)	Καλοκαίρι (Αύγουστος)	Φθινόπωρο (Σεπτέμβριος)	Χειμώνας (Δεκέμβριος)
0 mm/hr< Ώρες βροχής< 2,5 mm/hr	1	2	3	55
% επί συνολικών ωρών	0,13%	0,27%	0,40%	7,39%
Ώρες βροχής από 2,5 έως 7,6 mm/hr	6	0	0	11
% επί συνολικών ωρών	0,81%	0%	0%	1.48%
Ώρες βροχής> 7,6 mm/hr	7	0	0	2
% επί συνολικών ωρών	0,94%	0%	0%	0,27%

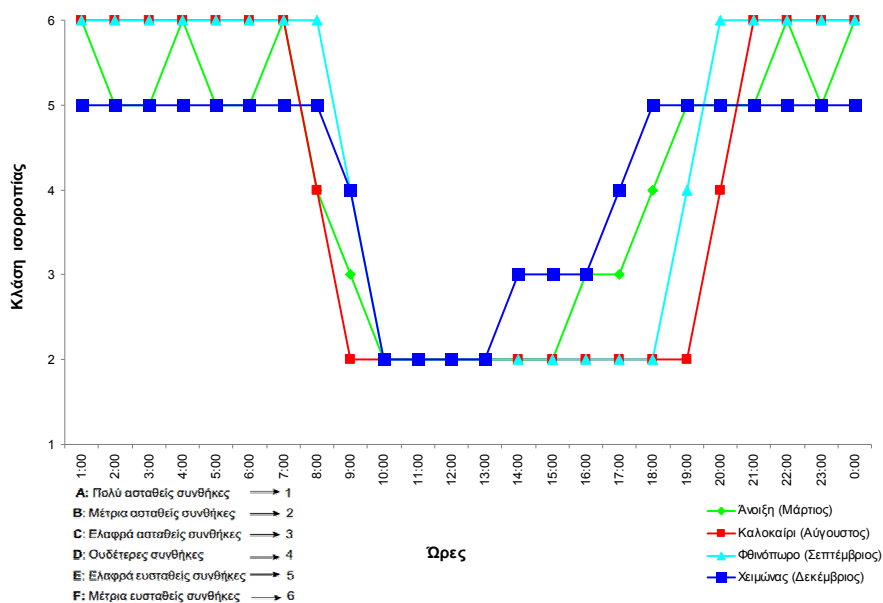
Οι περισσότερες ώρες βροχής σημειώνονται κατά τη διάρκεια του χειμώνα ενώ οι λιγότερες ώρες κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Για το Δεκέμβριο παρατηρούνται 68 ώρες από τις 744 (9,14%) βροχόπτωση ενώ για τον Αύγουστο μόνο 2 ώρες από τις 744 (0,27%). Η ένταση της βροχής ακόμα και το χειμώνα είναι < 2,5 mm/hr (ασθενής βροχής) τις περισσότερες ώρες. Επομένως, παρατηρούνται λίγες και ασθενές βροχοπτώσεις για τους μήνες Μάρτιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο του έτους 2010.

Στο Διάγραμμα 4 παρουσιάζεται η διακύμανση της ηλιακή ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια μιας μέσης τυπικής ημέρας για τους μήνες Μάρτιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο. Στο Διάγραμμα 4 παρατηρείται ότι η ηλιακή ακτινοβολία κυμαίνεται από 0 έως 657 W/m² για τον Μάρτιο, από 0 έως 854 W/m² για τον Αύγουστο, από 0 έως 755 W/m² για τον Σεπτέμβριο και από 0 έως 373 W/m² για τον Δεκέμβριο. Οι μέγιστες τιμές παρατηρούνται κατά τις μεσημβρινές ώρες ενώ οι μηδενικές τιμές παρατηρούνται κατά τις νυχτερινές ώρες. Η μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία είναι ίση με 192, 282, 227 και 85 W/m² για τους μήνες Μάρτιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο. Επομένως, η μέγιστη μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία παρατηρείται κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, ακολουθεί η άνοιξη, το φθινόπωρο και τέλος ο χειμώνας.



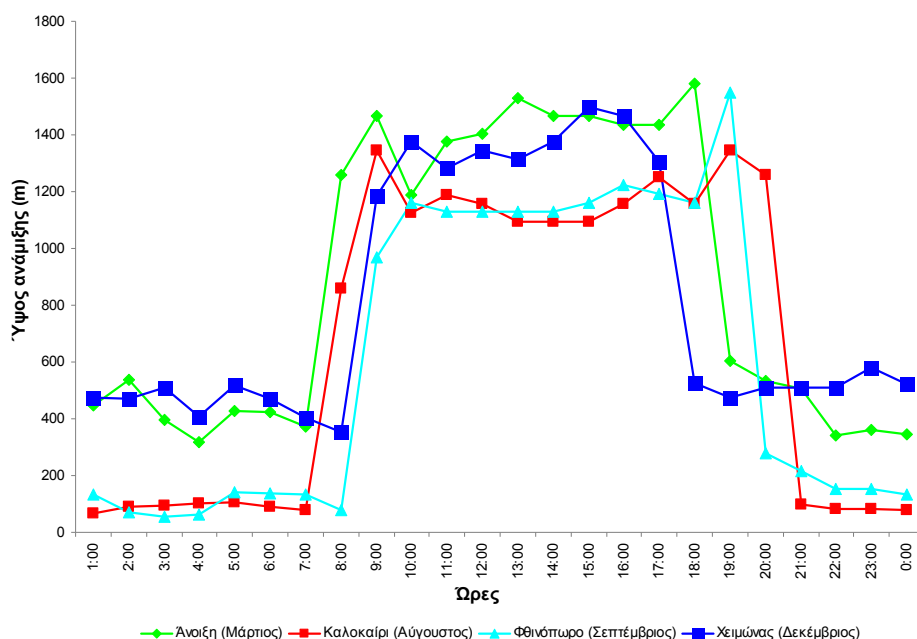
Διάγραμμα 4: Μέση ημερήσια διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2) για τους μήνες Μάρτιο (Άνοιξη), Αύγουστο (Καλοκαίρι), Σεπτέμβριο (φθινόπωρο) και Δεκέμβριο (χειμώνας).

Με βάση τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 7.2 εκτιμήθηκε η κλάση ισορροπίας κατά τη διάρκεια μιας μέσης τυπικής ημέρας για τους μήνες Μάρτιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο (Διάγραμμα 5). Εξετάζοντας το Διάγραμμα 5 προκύπτει ότι για τους μήνες Αύγουστο και Σεπτέμβριο επικρατούν κυρίως μέτρια ασταθείς συνθήκες (κλάση ισορροπίας B) για τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες. Όσον αφορά στις νυχτερινές ώρες για τους μήνες Αύγουστο και Σεπτέμβριο, επικρατούν κυρίως μέτρια ευσταθείς συνθήκες (κλάση ισορροπίας F). Για τους μήνες Μάρτιο και Δεκέμβριο επικρατούν ασταθείς συνθήκες (κλάση ισορροπίας B & C) για τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες. Για τις νυχτερινές ώρες επικρατούν ευσταθείς συνθήκες (κλάση ισορροπίας E & F) για τον Μάρτιο ενώ για τον Δεκέμβριο επικρατούν ελαφρά ευσταθείς συνθήκες (κλάση ισορροπίας E). Σε συνθήκες ευστάθειας η διασπορά των ρύπων γίνεται πολύ αργά ενώ σε συνθήκες μεγάλης αστάθειας παρατηρείται έντονη διασπορά των ρύπων.



Διάγραμμα 5: Μέση ημερήσια διακύμανση της κλάσης ισορροπίας για τους μήνες Μάρτιο (Άνοιξη), Αύγουστο (Καλοκαίρι), Σεπτέμβριο (φθινόπωρο) και Δεκέμβριο (χειμώνας).

Η διασπορά των ρύπων γίνεται μέχρι ένα συγκεκριμένο ύψος από την επιφάνεια της Γης το οποίο ονομάζεται ύψος ανάμιξης. Επομένως, το ύψος ανάμιξης είναι επίσης μία κρίσιμη παράμετρος για τη διασπορά των ρύπων στην ατμόσφαιρα. Με βάση τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 7.3 υπολογίστηκε το ύψος ανάμιξης κατά τη διάρκεια μιας μέσης τυπικής ημέρας για τους μήνες Μάρτιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο (Διάγραμμα 6).



Διάγραμμα 6: Μέση ημερήσια διακύμανση του ύψους ανάμιξης (m) για τους μήνες Μάρτιο (Άνοιξη), Αύγουστο (Καλοκαίρι), Σεπτέμβριο (φθινόπωρο) και Δεκέμβριο (χειμώνας).

Το ύψος ανάμιξης κατά τη διάρκεια μιας μέσης τυπικής ημέρας κυμαίνεται από 319 έως 1581 m για τον Μάρτιο, από 65 έως 1343 m για τον Αύγουστο, από 56 έως 1550 m για τον Σεπτέμβριο και από 352 έως 1500 m για τον Δεκέμβριο. Το μέσο μηνιαίο ύψος ανάμιξης είναι ίσο με 884, 670, 611 και 808 m για τους μήνες Μάρτιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο. Οι υψηλότερες τιμές παρατηρούνται τους μήνες Μάρτιο και Δεκέμβριος, ενώ οι ελάχιστες τιμές παρατηρούνται τους μήνες Αύγουστο και Σεπτέμβριο. Οι υψηλές τιμές στο ύψος ανάμιξης προκαλούν μεγαλύτερη αραίωση των ρύπων. Όσο μεγαλύτερη αραίωση ρύπων επιτυγχάνεται τόσο μικρότερες είναι οι συγκεντρώσεις των ρύπων κοντά στο έδαφος. Οι χαμηλές τιμές στο ύψος ανάμιξης προκαλούν μικρότερη αραίωση των ρύπων. Οι ρύποι τότε τείνουν να συγκεντρώνονται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, όποτε οι συγκεντρώσεις των ρύπων θα είναι μεγαλύτερες κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

8.1. Περιγραφή οργάνων μέτρησης συγκέντρωσης μάζας αιωρούμενων σωματιδίων

8.1.1. Όργανο μέτρησης συγκέντρωσης μάζας αιωρούμενων σωματιδίων FH 62 I-R

Για τη συνεχόμενη καταγραφή των συγκεντρώσεων μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων στο σταθμό του Πολυτεχνείου Κρήτης (σταθμός υποβάθρου) χρησιμοποιήθηκε το όργανο Dust Monitor FH 62 I-R (Εικόνα 23). Το Dust Monitor FH 62 I-R έχει τη δυνατότητα μέτρησης της συγκέντρωσης μάζας για $PM_{2.5}$, PM_{10} και TSP ανάλογα με την κεφαλή που επιλέγουμε. Το εύρος συγκεντρώσεων που μπορεί να καταγράψει η συσκευή κυμαίνεται από 0 έως $5000 \mu g/m^3$ με διακριτική ικανότητα $1 \mu g/m^3$. Η συλλογή των σωματιδίων γίνεται πάνω σε φίλτρο ινών υάλου (GFF).



Εικόνα 23: Όργανο μέτρησης συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων (Thermo, 2003).

Η αρχή λειτουργία του οργάνου βασίζεται ραδιομετρική αρχή εξασθένισης της ακτινοβολίας β με τη μέθοδο της αντιστάθμισης. Λόγω αυτής της διαδικασίας επιτυγχάνεται πολύ υψηλή σταθερότητα και μεγάλη ακρίβεια στις μετρήσεις γιατί εξαλείφονται οι αλλαγές της θερμοκρασίας και της πίεσης καθώς για κάθε μετρούμενη τιμή ορίζεται ταυτοχρόνως μια τιμή αναφοράς σε διαφορετικό τμήμα μέτρησης του οργάνου. Τα δεδομένα καταγράφονται προσωρινά στη μνήμη ενός καταγραφέα δεδομένων (data logger) και από εκεί μέσω ειδικού προγράμματος αποθηκεύονται σε αναγνώσιμη μορφή πίνακα σε τερματικό ηλεκτρονικό υπολογιστή που είναι συνδεδεμένος με τον καταγραφέα δεδομένων (Thermo, 2003).

8.1.2. Φορητά όργανα μέτρησης συγκέντρωσης μάζας αιωρούμενων σωματιδίων (Dustrack)

Για την καταγραφή των συγκεντρώσεων μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων χρησιμοποιήθηκαν τα όργανα DustTrak 8520 και DustTrak DRX (Εικόνα 24) της εταιρείας TSI.



Εικόνα 24: Φορητά όργανα μέτρησης συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων της TSI (TSI, 2010; TSI, 2012).

Το μεγάλο πλεονέκτημα των οργάνων είναι ότι είναι φορητά και μικρά σε μέγεθος. Έτσι παρέχει τη δυνατότητα μέτρησης (με χρήση μπαταριών) σε οποιονδήποτε χώρο και σημείο. Η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων προσδιορίζεται μέσω της σκέδασης του φωτός από τα σωματίδια. Τα όργανα χρησιμοποιούν τη διασπορά φωτός σε γωνία 90° για να υπολογίσουν την κατά μάζα συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων σε αέριο ρεύμα και διαθέτουν data-logger για την αυτόματη αποθήκευση των μετρούμενων τιμών σε προγραμματιζόμενα διαστήματα καθώς και τη δυνατότητα μετάδοσης των μετρούμενων τιμών σε Η/Υ (TSI, 2010; TSI, 2012).

8.2. Περιγραφή οργάνων μέτρησης κατανομής μεγέθους σωματιδίων και περιεκτικότητας βαρέων μετάλλων στα αιωρούμενα σωματίδια

8.2.1. Διαχωριστής πρόσκρουσης σωματιδίων οκτώ σταδίων (Andersen impactor)

Για τον προσδιορισμό της κατανομής μεγέθους της μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων χρησιμοποιήθηκε ο διαχωριστής πρόσκρουσης σωματιδίων ή προσκρουστήρας Andersen (8 σταδίων + 1 backup) (Εικόνα 25).



Εικόνα 25: Διαχωριστής πρόσκρουσης σωματιδίων οκτώ σταδίων (Andersen impactor).

Η αρχή λειτουργίας του διαχωριστή πρόσκρουσης σωματιδίων (Andersen impactor) βασίζεται στην αρχή της πρόσκρουσης. Η αρχή της πρόσκρουσης στηρίζεται στην εξαναγκαστική πρόσκρουση του αερίου ρεύματος σε πλάκα που αποτελεί τον υποδοχέα του φίλτρου συλλογής με αποτέλεσμα την ακαριαία αδρανοποίηση και τη συλλογή των σωματιδίων στο φίλτρο. Το μέγεθος πρόσκρουσης των σωματιδίων μειώνεται σε κάθε στάδιο μικραίνοντας το μέγεθος της οπής με αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας της ροής που στη συνέχεια οδηγεί σε μείωση της διαμέτρου των σωματιδίων που προσκρούονται στην επίπεδη επιφάνεια (Λαζαρίδης, 2008).

Ο διαχωριστής πρόσκρουσης σωματιδίων Andersen αποτελείται από οκτώ στάδια (0 έως 7) και ένα backup. Το κάθε στάδιο συγκρατεί αιωρούμενα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο που κυμαίνεται σε συγκεκριμένο εύρος τιμών (Εικόνα 25). Τα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από αυτή που συγκρατείται στο τελευταίο στάδιο συλλέγονται στο backup φίλτρο (είναι τοποθετημένο στην εσωτερική πλευρά της βάσης του δειγματολήπτη). Τα φίλτρα στη συνέχεια μπορούν να οδηγηθούν για χημική ανάλυση.

8.2.2. Φασματοφωτόμετρο μάζας με επαγωγική σύζευξη πλάσματος (ICP-MS)

Ο προσδιορισμός των βαρέων μετάλλων πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών (από τη Saru Maria-Liliana) της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης με τη χρήση φασματοφωτόμετρο μάζας με επαγωγική σύζευξη πλάσματος (ICP-MS 7500cx coupled with Autosampler Series 3000) της εταιρείας Agilent Technologies. Η τεχνική φασματομετρίας μάζας με επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα (ICP-MS) αποτελεί μια σύγχρονη και αποτελεσματική μέθοδο πολυστοιχειακής ανάλυσης με πολύ χαμηλά όρια ανίχνευσης (ng/L). Τα κύρια τμήματα του οργάνου είναι το σύστημα εισαγωγής του δείγματος, το σύστημα ατμοποίησης του ICP, το σύστημα εισαγωγής των ιόντων, ο αναλυτής μάζας, ο ανιχνευτής ιόντων και το σύστημα καταγραφής των αποτελεσμάτων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή (Agilent Technologies, 2008). Η ανάλυση με το ICP-MS πλεονεκτεί των άλλων τεχνικών (ατομική απορρόφηση) κυρίως ως προς την ταχύτητα μέτρησης και τα χαμηλότερα όρια ανίχνευσης (detection limits).

8.3. Μεθοδολογία πειραματικών μετρήσεων

8.3.1. Μεθοδολογία μέτρησης της συγκέντρωσης μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων

Για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων εφαρμόστηκε η παρακάτω μεθοδολογία: καθαρισμός της κεφαλής των 10 μm και βαθμονόμηση (μηδενισμός) του οργάνου (DustTrak) πριν από κάθε δειγματοληψία. Για το μηδενισμό του οργάνου τοποθετείται το φίλτρο μηδενισμού και ρυθμίζεται το TIME CONSTANT στα 10 δευτερόλεπτα. Στη συνέχεια πρέπει να κρατηθεί πατημένο το κουμπί TIME CONSTANT έως ότου αναβοσβήσει η ένδειξη “10”. Περιμένοντας 10-60 δευτερόλεπτα ώστε η ένδειξη της οθόνης να δείχνει μηδέν (αποδεκτό εύρος μεταξύ $-0,001$ και $+0,001 \text{ mg/m}^3$). Στην περίπτωση που η ένδειξη της οθόνης δεν είναι μέσα στο αποδεκτό εύρος πρέπει να κρατηθεί πατημένο το κουμπί CALIBRATE περιμένοντας την αντίστροφη μέτρηση που εμφανίζεται στην οθόνη του οργάνου να φτάσει στο μηδέν. Εμφανίζεται το μήνυμα “CALIBRATE ZERO” στην οθόνη του οργάνου και πατώντας το κουμπί SAMPLE αρχίζει μια αντίστροφη μέτρηση 60 δευτερολέπτων. Όταν η αντιστροφή μέτρηση ολοκληρωθεί θα εμφανιστεί στην οθόνη η τρέχουσα σταθερά βαθμονόμησης. Στη συνέχεια πρέπει να πατηθεί το CALIBRATE κουμπί ξανά. Έτσι η διαδικασία μηδενισμού του οργάνου έχει ολοκληρωθεί (TSI, 2010).

Κατόπιν το όργανο τοποθετείται στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής του EMAK στο πλησιέστερο δυνατό σημείο προς τους εργαζόμενους, αλλά πρωτίστως σε ασφαλές και σταθερό σημείο για το ίδιο το όργανο. Τα αποτελέσματα των οργάνων που λειτουργούν με βάση την αρχή της σκέδασης ακτίνας Laser (DustTrak, TSI) διορθώνονται με βάση το όργανο Dust Monitor FH 62 I-R που χρησιμοποιεί την ραδιομετρική αρχή εξασθένισης της ακτινοβολίας β με τη μέθοδο της αντιστάθμισης. Το όργανο Dust Monitor FH 62 I-R έχει υψηλότερη σταθερότητα και μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις σε σχέση με τα όργανα που λειτουργούν με βάση την αρχή της σκέδασης ακτίνας Laser. Η εξίσωση διόρθωσης του DustTrack ως προς το β είναι (Chalvatzaki κ.ά., 2010): $\beta [\text{Attenuation Monitor Concentration}] (\mu\text{g/m}^3) = 0,80 \times [\text{DustTrak Monitor Concentration}] (\mu\text{g/m}^3) + 10,4$.

8.3.2. Μεθοδολογία μέτρησης της κατανομής μεγέθους της μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων

Για τον προσδιορισμό της κατανομής μεγέθους της μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων εφαρμόστηκε η παρακάτω μεθοδολογία: τα φίλτρα τοποθετούνται με τη βοήθεια λαβίδας σε πλαστικά τριβλία μιας χρήσης και αφήνονται στο εργαστήριο για εξισορρόπηση θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας. Έπειτα από 24 ώρες τα φίλτρα ζυγίζονται. Μετά τη ζύγιση των φίλτρων τοποθετούνται στο δειγματολήπτη Andersen. Στη συνέχεια ο Andersen τοποθετείται στο σημείο δειγματοληψίας (στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου ή στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής). Στο πλησιέστερο δυνατό σημείο προς τους εργαζόμενους, αλλά πρωτίστως σε ασφαλές και σταθερό σημείο για το ίδιο το όργανο (Εικόνα 26).



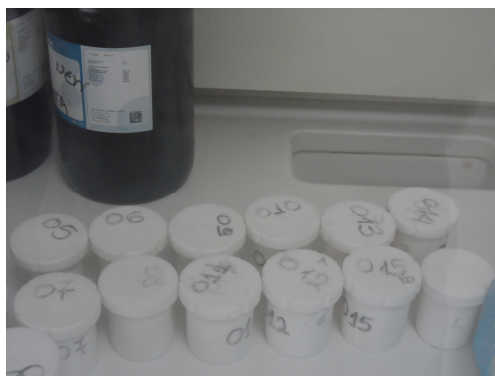
Εικόνα 26: Τοποθέτηση δειγματολήπτη Andersen στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής.

Έπειτα από 24 ώρες τα φίλτρα επανατοποθετούνταν στα τριβλία τους και αφήνονται για 24 ώρες για εξισορρόπηση. Μετά την πάροδο του χρονικού αυτού διαστήματος ζυγίζονται. Πρέπει να αναφερθεί ότι τόσο πριν όσο και μετά τη δειγματοληψία μαζί με τη ζύγιση των φίλτρων πραγματοποιείται ζύγιση και ενός επιπλέον φίλτρου (blank filter) η διαφορά των μαζών του οποίου χρησιμοποιούνται στον τελικό υπολογισμό της συγκέντρωσης των επιμέρους κλασμάτων των αιωρούμενων σωματιδίων. Στη συνέχεια το κάθε φίλτρο που συλλέγονταν, επανατοποθετούνταν σε πλαστικό τριβλίο (petri dish) και εν συνεχεία σε σακούλα από πολυαιθυλένιο που ασφαλιζονταν αεροστεγώς και αποθηκεύονταν σε καταψύκτη (σε θερμοκρασία -20°C). Η αποθήκευση στον καταψύκτη γίνονταν για την αποφυγή χημικών ή φυσικών μετατροπών ή αλλοιώσεων. Στη συνέχεια τα δείγματα οδηγούνται για χημική

ανάλυση. Η μεθοδολογία που ακολουθείται για τη χημική ανάλυση των φίλτρων παρουσιάζεται στην επόμενη Ενότητα.

8.3.3. Μεθοδολογία μέτρησης της χημικής σύστασης (μέταλλα) των αιωρούμενων σωματιδίων

Για τον προσδιορισμών των μετάλλων στα φίλτρα που τοποθετήθηκαν στον Andersen (διαχωριστής πρόσκρουσης σωματιδίων) εφαρμόστηκε η παρακάτω μεθοδολογία: το μισό του φίλτρου διαμέτρου 47 mm τεμαχίστηκε σε 4 κομμάτια εντός λευκής οβίδας κατασκευασμένης από το οργανικό πολυμερές (πλαστικό) Teflon (Εικόνα 27).



Εικόνα 27: Λευκές οβίδες κατασκευασμένες από οργανικό πολυμερές (πλαστικό) Teflon.

Εντός κάθε οβίδας προστίθενται 5 ml πυκνού νιτρικού οξέος και αφού ασφαλιστούν τοποθετούνται επάνω σε θερμαντικές πλάκες στους 80 °C για 18 ώρες. Εν συνεχεία τοποθετούνται εντός απαγωγού για 1 ώρα ώστε να αποκτήσουν θερμοκρασία δωματίου και αμέσως μετά ανοίγονται. Το υγρό εκχύλισμα διηθείται (διηθητικό χαρτί Filter Paper, Whatman, Ashless, 40, 90mm, Cat No. 1440 090) και το δοχείο από Teflon, όπως και το χωνί με το φίλτρο ξεπλένονται διαδοχικά από υπερκάρθαρο νερό, ώστε ο τελικός όγκος του δείγματος να φτάσει ακριβώς τα 10 ml.

Αυτό πραγματοποιήθηκε όχι μόνο για τα φίλτρα που τοποθετούνται στον Andersen αλλά και για το τυφλό φίλτρο (blank filter) για να βεβαιωθεί το επίπεδο επιμόλυνσης και τα επίπεδα επιβάρυνσης της μέτρησης λόγω του ίδιου του φίλτρου. Το τυφλό φίλτρο είναι φίλτρο αχρησιμοποίητο στο οποίο γίνεται η ίδια ανάλυση με εκείνα που προέρχονται από τη δειγματοληψία.

Στη συνέχεια τα δείγματα τοποθετούνται σε ψυγείο και οδηγούνται για χημική ανάλυση στο Εργαστήριο Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης με τη χρήση φασματοφωτόμετρο μάζας με επαγωγική σύζευξη πλάσματος (ICP-MS 7500cx coupled with Autosampler Series 3000).

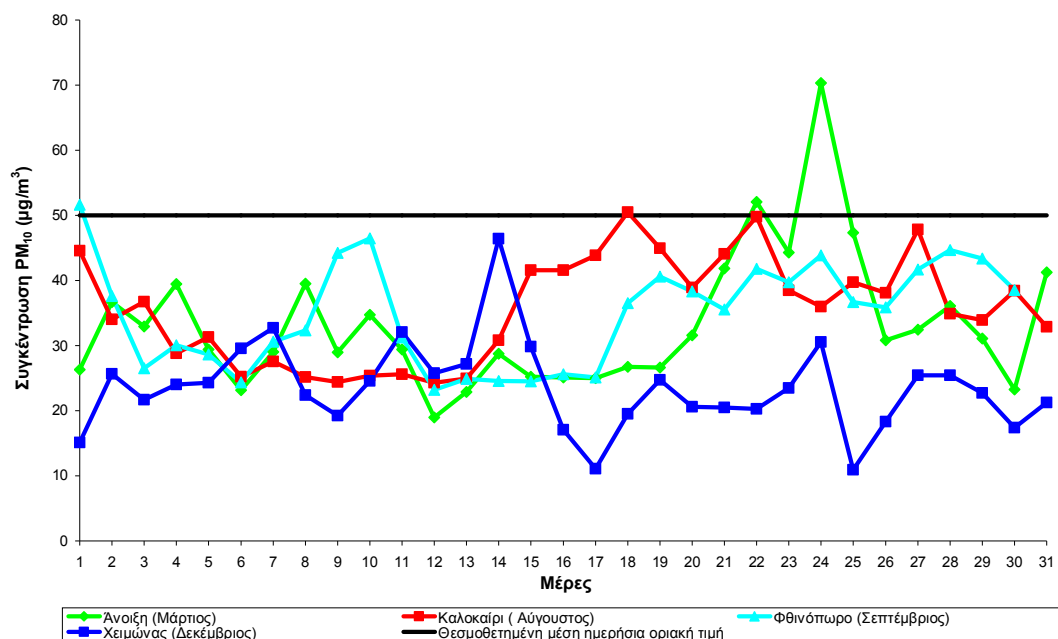
8.4. Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων

8.4.1. Αποτελέσματα συγκεντρώσεων μάζας αιωρούμενων σωματιδίων στο σταθμό υποβάθρου

Στο σταθμό της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης πραγματοποιούνται συνεχείς μετρήσεις συγκεντρώσεων μάζας αιωρούμενων σωματιδίων. Οι συγκεντρώσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν ως συγκεντρώσεις υποβάθρου στους εξωτερικούς χώρους της μονάδας διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων.

Επομένως μαζί με τις συγκεντρώσεις που υπολογίστηκαν με το μοντέλο διασποράς (οι συγκεντρώσεις που δημιουργούνται από την κίνηση των απορριμματοφόρων και την αιολική διάβρωση) θα έχουν υπολογιστεί οι τελικές συγκεντρώσεις. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις PM₁₀ από το σταθμό του Πολυτεχνείου Κρήτης για τους μήνες Μάρτιο (Άνοιξη), Αύγουστο (Καλοκαίρι), Σεπτέμβριο (Φθινόπωρο) και Δεκέμβριο (Χειμώνας).

Στο Διάγραμμα 7 παρουσιάζονται οι ημερήσιες συγκεντρώσεις PM₁₀ για τους μήνες Μάρτιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριος και Δεκέμβριο. Η ημερήσια συγκέντρωση PM₁₀ κυμαίνεται από 19 έως 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ για τον Μάρτιο, από 24 έως 51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ για τον Αύγουστο, από 23 έως 52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ για τον Σεπτέμβριο, από 11 έως 46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ για τον Δεκέμβριο. Όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 7, οι ημέρες που παρουσιάζουν πολύ υψηλές συγκεντρώσεις ($>50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) PM₁₀ είναι μεμονωμένες. Παρατηρούνται 2 υπερβάσεις της θεσμοθετημένης μέσης ημερήσιας οριακής τιμής των 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ για τον Μάρτιο, 1 υπέρβαση για τους μήνες Αύγουστο και Σεπτέμβριο και καμία υπέρβαση για τον Δεκέμβριο.



Διάγραμμα 7: Ημερήσιες συγκεντρώσεις PM₁₀ (μg/m³) από τον σταθμό του Πολυτεχνείου Κρήτης για τους μήνες Μάρτιο (Άνοιξη), Αύγουστο (Καλοκαίρι), Σεπτέμβριο (Φθινόπωρο) και Δεκέμβριο (Χειμώνας).

Επίσης, οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις PM₁₀ παρατηρούνται κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Αυτό οφείλεται στον τακτικό καθαρισμό της ατμόσφαιρας από τα αιωρούμενα σωματίδια μέσω της υγρής εναπόθεσης κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων.

8.4.2. Αποτελέσματα συγκεντρώσεων μάζας αιωρούμενων σωματιδίων στον ΕΜΑΚ Χανίων

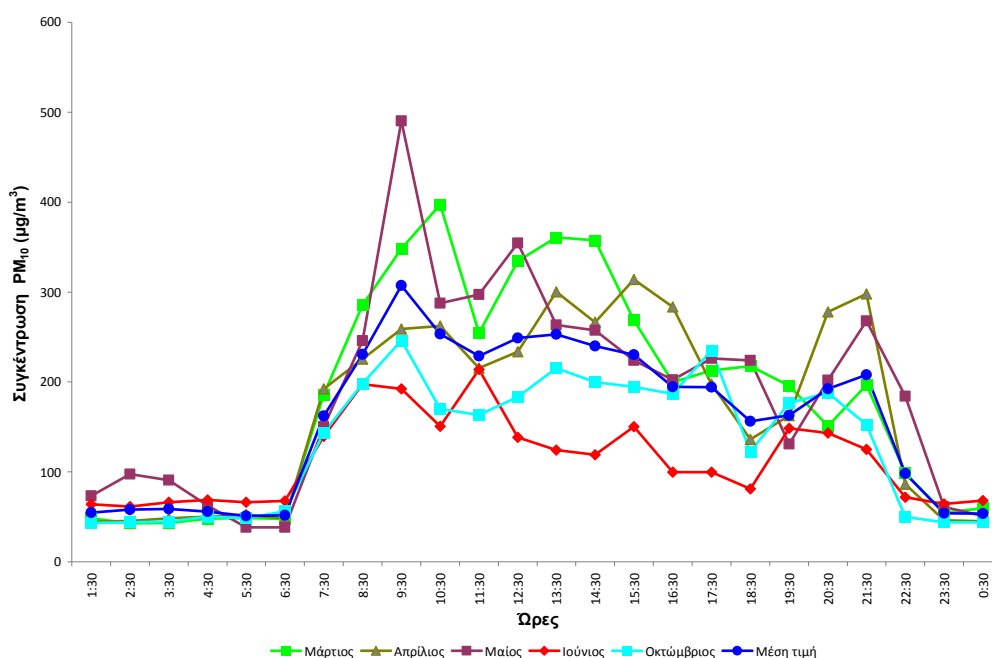
Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο διασποράς ISC3 της Αμερικανικής Υπηρεσίας Προστασίας του Περιβάλλοντος για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων μάζας των PM₁₀ για τους εξωτερικούς χώρους. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στην Ενότητα 11.2. Για τους εσωτερικούς χώρους επιλέχθηκε ο εσωτερικός χώρος χειροδιαλογής του ΕΜΑΚ. Οι πειραματικές μετρήσεις συγκεντρώσεων μάζας PM₁₀ πραγματοποιήθηκαν στον εσωτερικό χώρο της χειροδιαλογής διότι εργάζονται τα περισσότερα άτομα.

Στον εσωτερικό χώρο της χειροδιαλογής υπάρχουν δύο βάρδιες: η πρώτη βάρδια ξεκινάει στις 6:30 και τελειώνει στις 14:30 με ένα διάλλειμα μισής ώρας (10:00-10:30) ενώ η δεύτερη βάρδια ξεκινάει στις 14:30 και

τελειώνει στις 21:30 με ένα διάλλειμα μισής ώρας (17:30-18:00). Ο καθαρισμός του χώρου χειροδιαλογής πραγματοποιείται μισή ώρα πριν το τέλος της δεύτερης βάρδιας (21:00-21:30). Επιπλέον, το εργοστάσιο χειροδιαλογής δεν λειτουργεί τις Κυριακές.

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής παρουσιάστηκαν κάποιες δυσλειτουργίες στο πεδίο. Οι κύριες αιτίες αυτής της δυσλειτουργίας είναι οι διακοπές ρεύματος και η πτώση τάση ρεύματος με αποτέλεσμα το όργανο να σταματήσει την καταγραφή. Επίσης, το όργανο μέτρησης παρουσίασε προβλήματα στη λειτουργία του λόγω χοντρών συσσωματώματων στην είσοδο του οργάνου με αποτέλεσμα να μη λαμβάνονταν μετρήσεις. Επιπλέον δεν καθίσταται εφικτό να ανακτηθούν αρκετές μετρήσεις λόγω βλάβης του οργάνου.

Επομένως, με βάση τα παραπάνω, οι μετρήσεις που καταγράφηκαν από το όργανο και παρουσιάζονται σε αυτή την Ενότητα αφορούν κυρίως τους μήνες Μάρτιο, Απρίλιο, Μάιο, Ιούνιο και Οκτώβριο. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν την περίοδο 2010-2012. Στο Διάγραμμα 8 παρουσιάζεται η μέση ημερήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων μάζας των PM_{10} .



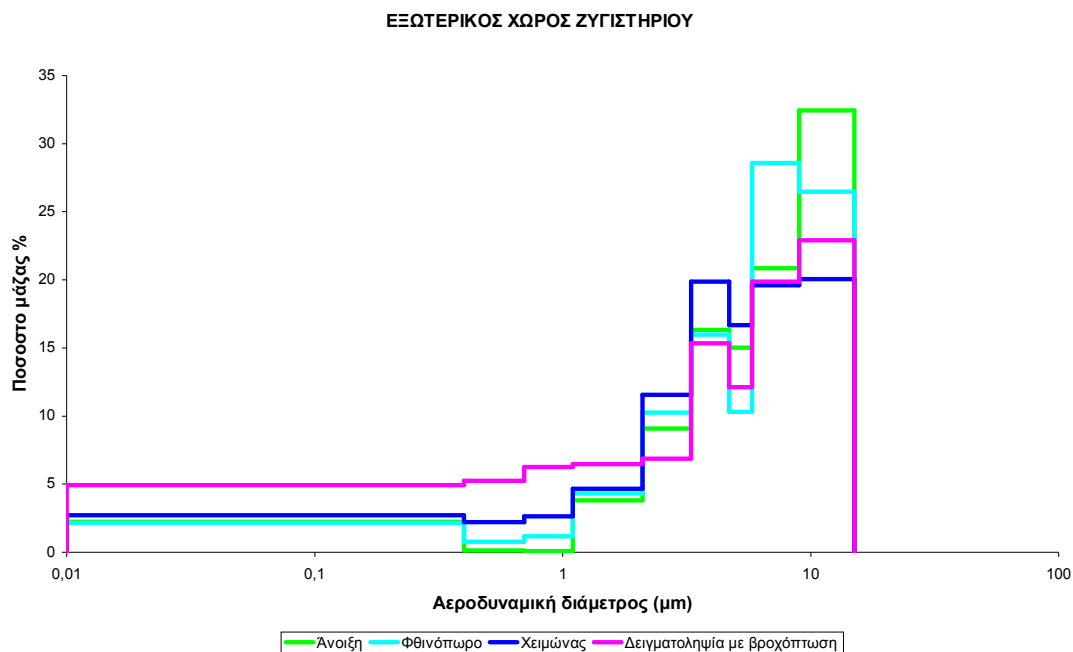
Διάγραμμα 8: Μέση ημερήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων μάζας των PM_{10} ($\mu g/m^3$) στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής του ΕΜΑΚ Χανίων.

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 8 η συγκέντρωση PM_{10} αυξάνεται μετά την έναρξη της πρώτης βάρδιας εργασίας (μετά τις 06:30) και μειώνεται μετά το τέλος της δεύτερης βάρδιας (μετά τις 21:30). Η μέση συγκέντρωση των PM_{10} είναι ίση με $212 \mu g/m^3$ τις εργάσιμες ώρες ενώ τις μη εργάσιμες ώρες η μέση συγκέντρωση των PM_{10} είναι ίση με $57 \mu g/m^3$. Επίσης παρατηρείται ότι οι συγκεντρώσεις PM_{10} μειώνονται κατά τη διάρκεια των διαλλειμάτων για την κάθε βάρδια (10:00-10:30 για την πρώτη βάρδια; 17:30-18:00 για τη δεύτερη βάρδια).

Όσον αφορά στις δύο βάρδιες, παρατηρείται υψηλότερη συγκέντρωση την πρώτη βάρδια. Οι μέσες συγκεντρώσεις PM_{10} είναι ίσες με $234 \mu g/m^3$ και $188 \mu g/m^3$ για την πρώτη και δεύτερη βάρδια, αντίστοιχα. Η διαφορά στις συγκεντρώσεις για τις δύο βάρδιες οφείλεται στην απουσία λειτουργίας της ταινίας που υποδέχεται τα σύμμεικτα απορρίμματα κατά την απογευματινή βάρδια. Στον εσωτερικό χώρο της χειροδιαλογής υπάρχουν δύο ταινίες. Στην πρώτη ταινία μεταφέρονται τα προδιαλεγμένα απορρίμματα από τον μπλε κάδο ενώ στη δεύτερη ταινία γίνεται μεταφορά των σύμμεικτων απορριμμάτων (παρουσία οργανικού υλικού μαζί με το ανακυκλώσιμο). Η δεύτερη ταινία (για τα σύμμεικτα απορρίμματα) βρίσκεται σε λειτουργία μόνο τις πρωινές ώρες από τις 6:30 έως τις 11:00. Επομένως, στην πρώτη βάρδια λειτουργούν και οι δύο ταινίες ενώ στη δεύτερη βάρδια λειτουργεί μόνο η ταινία με τα προδιαλεγμένα απορρίμματα από τον μπλε κάδο. Η λειτουργία και των δύο ταινιών μαζί οδηγεί στην ύπαρξη αυξημένων συγκεντρώσεων PM_{10} για την πρώτη βάρδια συγκριτικά με τη δεύτερη.

8.4.3. Αποτελέσματα κατανομή μεγέθους μάζας αιωρούμενων σωματιδίων στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων

Με τον προσκρουστήρα Andersen, ο οποίος διαθέτει 9 στάδια συλλογής σωματιδίων, έγινε δυνατή η εκτίμηση της κατανομής μάζας αιωρούμενων σωματιδίων στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου και στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής. Στον Διάγραμμα 9 παρουσιάζεται η κατανομή μάζας (ποσοστό μάζας) αιωρούμενων σωματιδίων στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου.



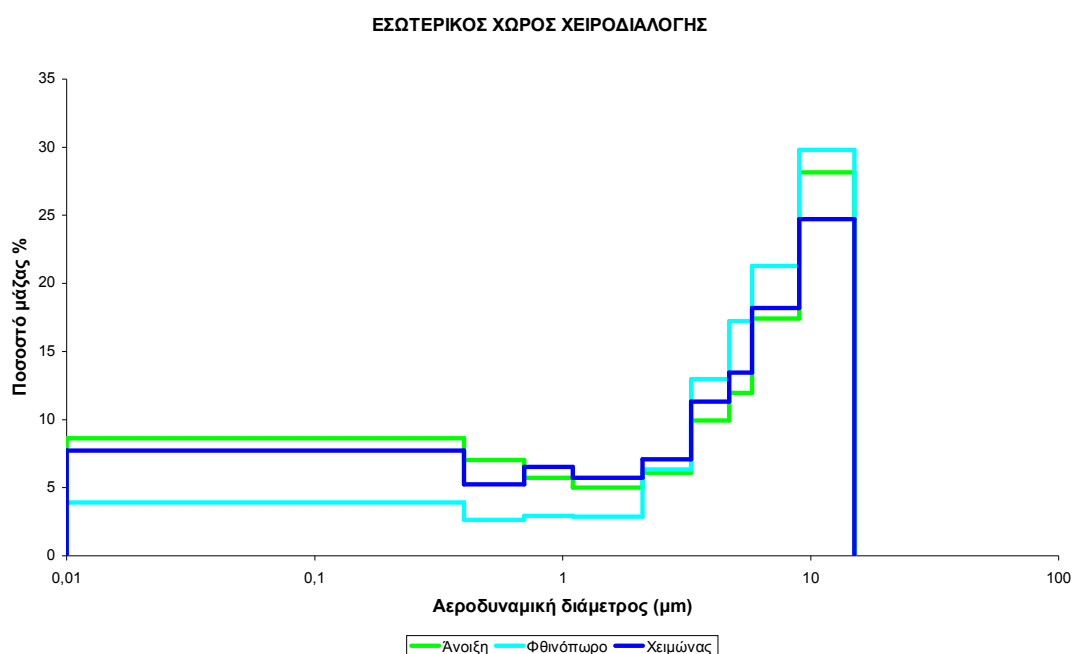
Διάγραμμα 9: Κατανομή μάζας (ποσοστό μάζας) αιωρούμενων σωματιδίων στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου.

Στον εξωτερικό χώρο ζυγιστηρίου (Διάγραμμα 9) το ποσοστό μάζας των χονδρών σωματιδίων ($PM_{10-2,1}$) είναι ίσο με 94, 92, 88 % για την άνοιξη, το φθινόπωρο και τον χειμώνα, αντίστοιχα. Το υψηλό ποσοστό μάζας των χονδρών σωματιδίων σχετίζεται με την επαναιώρηση σκόνης από την κίνηση των απορριμματοφόρων. Αυτό το υψηλό ποσοστό μειώνεται και πέφτει στο 77% κατά τη διάρκεια των βροχοπτώσεων.

Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της πρώτης δειγματοληπτικής περιόδου (άνοιξη) βρέθηκε $PM_{10-2,1}$ ίση με $92 \mu g/m^3$ και $PM_{2,1}$ (ως άθροισμα των 4 τελευταίων σταδίων του προσκρουστήρα Andersen) ίση με $6 \mu g/m^3$. Αναλόγως, κατά τη διάρκεια της δεύτερης δειγματοληπτικής περιόδου αυτής του φθινοπώρου, η συγκέντρωση των χονδρών σωματιδίων ($PM_{10-2,1}$) είναι ίση με $69 \mu g/m^3$ και η συγκέντρωση των λεπτών σωματιδίων $PM_{2,1}$ είναι ίση με $6 \mu g/m^3$. Κατά τη διάρκεια της τρίτης δειγματοληπτικής περιόδου (χειμώνας) η συγκέντρωση των χονδρών σωματιδίων ($PM_{10-2,1}$) είναι ίση με $86 \mu g/m^3$ και η συγκέντρωση των λεπτών σωματιδίων ($PM_{2,1}$) είναι ίση με $12 \mu g/m^3$. Κατά τη διάρκεια της τέταρτης δειγματοληπτικής περιόδου (δειγματοληψία με βροχόπτωση) η συγκέντρωση των χονδρών σωματιδίων ($PM_{10-2,1}$) είναι ίση με

32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ και η συγκέντρωση των λεπτών σωματιδίων ($\text{PM}_{2,1}$) είναι ίση με 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις παρατηρούνται κατά τη διάρκεια της τέταρτης δειγματοληπτικής περιόδου (δειγματοληψία με βροχόπτωση). Οι υγρές κατακρημνίσεις της τέταρτης δειγματοληπτικής περιόδου ευνοούν τον τακτικό καθαρισμό της ατμόσφαιρας από τα αιωρούμενα σωματίδια. Οι σταγόνες της βροχής συμπαρασύρουν τα σωματίδια με αποτέλεσμα αυτά να επικάθονται στην επιφάνεια του εδάφους. Αυτό πραγματοποιείται με την ενσωμάτωση των σωματιδίων στα υδροσταγονίδια και την απόπλυση τους με τη βροχή. Στο Διάγραμμα 10 παρουσιάζεται η κατανομή μάζας (ποσοστό μάζας) αιωρούμενων σωματιδίων στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής.



Διάγραμμα 10: Κατανομή μάζας (ποσοστό μάζας) αιωρούμενων σωματιδίων στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής.

Στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής (Διάγραμμα 10) το ποσοστό μάζας των χονδρών σωματιδίων ($\text{PM}_{10-2,1}$) είναι ίσο με 74, 75, 88 % για την άνοιξη, τον χειμώνα και το φθινόπωρο, αντίστοιχα. Επομένως και στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής παρατηρείται υψηλό ποσοστό μάζας των χονδρών σωματιδίων. Αυτό οφείλεται στη χειρωνακτική διαλογή των απορριμμάτων και στην κίνηση των εργαζομένων στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής.

Κατά τη διάρκεια της πρώτη δειγματοληπτικής περιόδου (άνοιξη) βρέθηκε $PM_{10-2,1}$ ίση με $104 \mu g/m^3$ και $PM_{2,1}$ ίση με $38 \mu g/m^3$. Αναλόγως, κατά τη διάρκεια της δεύτερης δειγματοληπτικής περιόδου αυτής του φθινοπώρου, η συγκέντρωση των χονδρών σωματιδίων ($PM_{10-2,1}$) είναι ίση με $224 \mu g/m^3$ και η συγκέντρωση των λεπτών σωματιδίων $PM_{2,1}$ είναι ίση με $32 \mu g/m^3$ ενώ κατά τη διάρκεια της τρίτης δειγματοληπτικής περιόδου (χειμώνας) η συγκέντρωση των χονδρών σωματιδίων ($PM_{10-2,1}$) είναι ίση με $99 \mu g/m^3$ και η συγκέντρωση των λεπτών σωματιδίων ($PM_{2,1}$) είναι ίση με $33 \mu g/m^3$.

8.4.4. Αποτελέσματα της περιεκτικότητας των αιωρούμενων σωματιδίων σε μέταλλα στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων

Για την εκτίμηση της περιεκτικότητας των αιωρούμενων σωματιδίων σε μέταλλα στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου και στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής αναλύθηκαν τα φίλτρα του δειγματολήπτη Andersen. Κατ' αρχήν, για την περίοδο 2013-2015 κατά την οποία συλλέχθηκε αιωρούμενη σωματιδιακή ύλη PM_{10} με τον Andersen (σε 9 στάδια), προσδιορίστηκαν 15 μέταλλα (As, Cd, Cr, Mn, Pb, Li, Co, Hg, Ti, V, Fe, Ni, Cu, Zn και Ba).

Ορισμένα από αυτά τα μέταλλα είναι σε ελάχιστες ποσότητες απαραίτητα συστατικά για την επιβίωση των ζώντων οργανισμών, όπως π.χ. ο ψευδάργυρος (Zn), ο χαλκός (Cu). Ωστόσο όταν αυτά τα μέταλλα βρεθούν σε υψηλές συγκεντρώσεις γίνονται τοξικά και επικίνδυνα για τη δημοσία υγεία. Ιδιαίτερα για τον άνθρωπο πολύ τοξικά σε υψηλές συγκεντρώσεις θεωρούνται τα μέταλλα Cu, Zn, Mn, Co, Hg, Pb, Cd, Cr και Ni (Alloway, 1995). Ειδικότερα όταν αυτά εντοπίζονται στα αιωρούμενα σωματίδια και εισπνέονται. Επίσης, μέταλλα όπως π.χ. το κάδμιο (Cd), ο μόλυβδος (Pb), το αρσενικό (As) ακόμα και σε μικρές συγκεντρώσεις ασκούν βλαβερή επίδραση στους ζώντες οργανισμούς.

Στον Πίνακα 16 παρουσιάζεται η συγκέντρωση των μετάλλων στον εξωτερικό του ζυγιστηρίου. Εξετάζοντας τον Πίνακα 16 παρατηρούμε ότι από τα 15 μέταλλα που προσδιορίστηκαν στην παρούσα εργασία την υψηλότερη συγκέντρωση την εμφάνισε ο σίδηρος (Fe) κατά τη διάρκεια της άνοιξη και του φθινοπώρου. Αυτό οφείλεται στο ότι ο Fe αποτελεί βασικό στοιχείο του φλοιού

της Γης (Chester κ.ά., 1984). Επομένως, τα παραπάνω δείχνουν την ύπαρξη μιας υψηλής συγκέντρωσης υποβάθρου Fe στην περιοχή που σχετίζεται με την επαναιώρηση της σκόνης.

Πίνακας 16: Συγκεντρώσεις μετάλλων (ng/m³) στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου που προσδιορίστηκαν για τα 9 στάδια συλλογής σωματιδιακής ύλης με τον προσκρουστήρα Andersen.

Ανοιξη											
Διάμετροι (μm)	Li, Co, As, Cd, Hg	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Ba	Pb
9,0-10	<DL	2,89	0,51	4,60	3,11	235,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,8-9,0	<DL	5,19	0,79	46,04	4,50	644,89	0,00	0,00	0,00	0,00	5,96
4,7-5,8	<DL	2,73	0,82	375,09	235,40	940,61	3,89	0,00	45,93	0,00	2,60
3,3-4,7	<DL	2,89	0,57	80,05	28,40	570,06	0,00	0,00	3,11	0,00	0,00
2,1-3,3	<DL	1,43	0,31	18,77	2,19	245,84	0,00	0,00	0,00	0,00	2,23
1,1-2,1	<DL	1,47	0,14	5,31	0,00	57,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,7-1,1	<DL	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,4-0,7	<DL	0,00	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,56
<0,4	<DL	1,02	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ΣΥΝΟΛΟ	<DL	17,62	3,55	529,87	273,60	2693,55	3,89	0,00	49,04	0,00	14,35
Φθινόπωρο											
Διάμετροι (μm)	Li, As, Cd, Hg, Pb	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ba
9,0-10	<DL	0,58	0,42	0,00	0,00	84,45	<DL	0,58	1,33	0,00	0,00
5,8-9,0	<DL	1,69	0,88	0,00	4,13	147,79	<DL	2,91	4,52	0,00	41,93
4,7-5,8	<DL	0,88	0,32	0,00	0,75	<DL	<DL	1,82	0,40	0,00	0,00
3,3-4,7	<DL	1,08	1,05	65,26	8,21	154,82	<DL	32,54	2,89	37,37	249,64
2,1-3,3	<DL	1,14	0,68	14,28	2,55	56,30	<DL	11,24	9,50	30,30	0,00
1,1-2,1	<DL	1,84	0,86	33,56	2,18	102,04	0,09	23,43	1,63	34,62	0,00
0,7-1,1	<DL	0,24	2,05	73,14	8,54	140,75	0,15	41,45	3,29	42,61	81,90
0,4-0,7	<DL	0,00	1,43	32,71	5,05	<DL	<DL	18,16	2,02	0,00	0,00
<0,4	<DL	0,61	0,57	6,25	1,14	<DL	<DL	5,37	2,24	11,01	0,00
ΣΥΝΟΛΟ	<DL	8,06	8,27	225,20	32,54	686,15	0,24	137,49	27,82	155,91	373,48
Χειμώνας											
Διάμετροι (μm)	Li, Fe, Co, As, Cd, Hg, Pb	Ti	V	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Ba		
9,0-10	<DL	0,00	0,33	0,00	4,34	0,04	0,17	46,65	0,00		
5,8-9,0	<DL	0,00	0,57	0,00	7,90	0,58	0,81	226,92	52,88		
4,7-5,8	<DL	0,20	0,57	0,00	6,12	0,00	0,00	39,42	0,42		
3,3-4,7	<DL	0,90	0,88	0,00	8,33	0,08	0,44	65,91	34,03		
2,1-3,3	<DL	0,77	0,60	0,00	8,04	0,90	0,00	144,47	0,40		
1,1-2,1	<DL	0,06	0,31	0,00	5,01	0,20	0,41	243,01	0,54		
0,7-1,1	<DL	0,00	0,21	0,00	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00		
0,4-0,7	<DL	0,00	0,41	0,00	1,50	0,00	0,00	42,45	0,00		
<0,4	<DL	0,00	0,27	0,00	2,71	0,17	0,00	72,70	0,00		
ΣΥΝΟΛΟ	<DL	1,93	4,15	0,00	44,26	1,95	1,84	881,54	88,27		

Δειγματοληψία με βροχόπτωση									
Διάμετροι (μm)	Li, Fe, Co, As, Cd, Hg, Pb	Ti	V	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Ba
9,0-10	<DL	0,17	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,8-9,0	<DL	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,7-5,8	<DL	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	77,50
3,3-4,7	<DL	0,00	0,06	0,00	2,13	0,00	0,00	0,00	0,00
2,1-3,3	<DL	0,00	0,03	0,00	4,73	0,00	0,00	50,61	0,00
1,1-2,1	<DL	0,00	0,17	9,10	0,00	2,94	0,00	0,00	0,00
0,7-1,1	<DL	0,00	0,43	21,89	2,09	14,10	0,00	0,00	0,00
0,4-0,7	<DL	0,05	0,52	0,49	0,00	4,25	0,22	0,00	0,00
<0,4	<DL	0,00	0,30	17,18	0,00	8,19	0,00	0,00	0,00
ΣΥΝΟΛΟ	<DL	0,22	1,74	48,66	8,94	29,48	0,22	50,61	77,50

<DL: κάτω του ορίου ανίχνευσης

Η επαναιωρούμενη σκόνη έχει πολύπλοκη χημική σύσταση καθώς συγκεντρώνει σωματίδια από φυσικές πηγές και ανθρώπινες δραστηριότητες. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνει συστατικά του εδάφους (π.χ. τιτάνιο (Ti), βανάδιο (V)) εμπλουτισμένα με στοιχεία ανθρώπινης προέλευσης που συσσωρεύονται στην επιφάνεια των δρόμων (Sternbeck κ.ά., 2002; Lough κ.ά., 2005). Ειδικότερα στους ΧΥΤΑ η επαναιωρούμενη σκόνη από τη χωματοκάλυψη του ΧΥΤΑ, τους χωματοδρόμους αλλά και της σκόνης που συσσωρεύεται στην επιφάνεια των ασφαλωμένων δρόμων είναι επιβαρυνμένη με μέταλλα. Η επιβάρυνση αυτή οφείλεται στη φύση των υλικών (π.χ. ιλύος, μπαταρίες, χρωστικές των συσκευασιών, λευκοσιδηρούχα απορρίμματα) που εισέρχονται, διαχειρίζονται και εναποτίθενται σε έναν ΧΥΤΑ.

Επίσης, η επιβάρυνση των PM_{10} σε μέταλλα ενισχύεται από τις μηχανικές διεργασίες (π.χ. φθορά των ελαστικών, φθορά των φρένων, φθορά της επιφάνειας του ίδιου του δρόμου που διέρχονται τα απορριματοφόρα) που λαμβάνουν χώρα κατά τη κίνηση των απορριματοφόρων. Με βάση τη μελέτη των Lough κ.ά., 2005 τα μέταλλα που συχνά σχετίζονται με τη φθορά των ελαστικών, των φρένων ακόμη και του συμπλέκτη είναι ο Cu, Zn, Pb, Fe, Mn και το Ba.

Κατά τη διάρκεια του Χειμώνα και της δειγματοληψίας με βροχόπτωση ο Fe δεν εντοπίστηκε στα δείγματα (κάτω του ορίου ανίχνευσης). Επίσης και για τα υπόλοιπα μέταλλα παρατηρούνται χαμηλές συγκεντρώσεις κατά τη

διάρκεια του Χειμώνα και της δειγματοληψίας με βροχόπτωση σε σύγκριση με τις άλλες εποχές. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν την επίδραση που έχουν τα φαινόμενα βροχόπτωσης στη συγκέντρωση των μετάλλων. Η συγκέντρωση των μετάλλων μειώνεται δραστικά όταν επικρατούν φαινόμενα υγρών κατακρημνίσεων. Αυτό οφείλεται στο ότι κατά τη διάρκεια του Χειμώνα και της δειγματοληψίας με βροχόπτωση παρατηρείται (α) περιορισμό στην επαναιώρηση σκόνης και (β) τακτικό καθαρισμό της ατμόσφαιρας από τα αιωρούμενα σωματίδια. Αυτό πραγματοποιείται με την ενσωμάτωση των σωματιδίων στα υδροσταγονίδια και την αποπλυση τους με τη βροχή. Επίσης, θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι μηδενικές τιμές κατά τη διάρκεια του Χειμώνα στο Cr πιθανότητα να οφείλονται σε πειραματικό σφάλμα.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας με τη μελέτη των Koshy κ.ά. (2009). Στη μελέτη των Koshy κ.ά. (2009) πραγματοποιήθηκαν χημικές αναλύσεις, κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου, για την περιεκτικότητα των αιωρούμενων σωματιδίων σε μέταλλα σε ένα ΧΥΤΑ που βρίσκεται στην Αγγλία. Στο ΧΥΤΑ της Αγγλίας παρατηρήθηκαν παρόμοιες συγκεντρώσεις με του ΧΥΤ Χανίων για τα εξής μέταλλα: Ni (138 ng/m^3 για Αγγλία, 137 ng/m^3 για Χανιά), V (11 ng/m^3 για Αγγλία, 8 ng/m^3 για Χανιά), Zn (216 ng/m^3 για Αγγλία, 156 ng/m^3 για Χανιά), Cu (13 ng/m^3 για Αγγλία, 28 ng/m^3 για Χανιά). Επιπλέον στο ΧΥΤΑ της Αγγλίας εντοπίστηκε As και Cd σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις ($<10 \text{ ng/m}^3$) ενώ στο ΧΥΤ Χανίων δεν εντοπίστηκε As και Cd.

Όπως έχει αναφερθεί στην Ενότητα 4.4, η Αμερικανική υπηρεσία προστασίας του περιβάλλοντος έχει δημιουργήσει ένα ολοκληρωμένο σύστημα πληροφοριών κινδύνου (IRIS). Για την εισπνοή βαρέων μετάλλων (As, Cr (VI), Cd, Ni) έχει καθορίσει τρία επίπεδα κινδύνου για τη πιθανότητα σχηματισμό καρκίνου (1:10.000, 1:100.000, 1:1.000.000). Στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου δεν ανιχνεύθηκαν στα δείγματα As, Cd. Όσον αφορά στο Cr, εντοπίστηκε στα δείγματα το ολικό χρώμιο. Η Αμερικανική υπηρεσία προστασίας του περιβάλλοντος έχει καθορίσει τρία επίπεδα κινδύνου για τη πιθανότητα σχηματισμό καρκίνου μόνο για το Cr (VI). Η πιθανότητα σχηματισμού καρκίνου από την εισπνοή Ni είναι περίπου 1:100.000 για το φθινόπωρο και περίπου 1:1.000.000 για την άνοιξη και τον χειμώνα.

Επίσης, θα πρέπει να αναφερθεί ότι κατά τη διάρκεια των δειγματοληψιών που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία αναλύθηκαν τυφλά δείγματα (blanks) προκειμένου να εκτιμηθούν και εν συνέχεια να αφαιρεθούν τα επίπεδα των διάφορων χημικών ρυπαντών στο καθαρό φίλτρο. Επομένως, στους Πίνακες 16 και 17 έχει πραγματοποιηθεί η αφαίρεση των τυφλών δειγμάτων. Στον Πίνακα 17 παρουσιάζεται η συγκέντρωση των μετάλλων στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής που προσδιορίστηκαν για τα εννιά στάδια συλλογής σωματιδιακής ύλης με τη χρήση του προσκρουστήρα Andersen.

Πίνακας 17: Συγκεντρώσεις μετάλλων (ng/m³) στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής που προσδιορίστηκαν για τα 9 στάδια συλλογής σωματιδιακής ύλης.

Ανοιξη												
Διάμετροι (μm)	Li, As, Cd, Hg	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ba	Pb
9,0-10	<DL	0,00	0,57	29,19	11,11	<DL	0,32	17,12	8,62	93,51	0,00	3,47
5,8-9,0	<DL	0,89	0,52	15,97	5,39	122,68	<DL	9,64	4,75	0,00	0,00	1,97
4,7-5,8	<DL	0,12	0,33	12,92	9,41	17,53	<DL	18,33	2,77	169,99	0,00	<DL
3,3-4,7	<DL	0,36	0,62	55,86	6,01	66,60	<DL	30,93	1,95	0,00	0,00	<DL
2,1-3,3	<DL	0,00	0,28	23,40	3,42	<DL	<DL	14,97	0,43	29,23	0,00	<DL
1,1-2,1	<DL	0,05	0,11	0,00	0,30	<DL	<DL	2,59	0,00	121,97	0,00	<DL
0,7-1,1	<DL	0,00	0,25	0,00	0,00	<DL	<DL	3,21	1,38	0,00	0,00	<DL
0,4-0,7	<DL	0,00	0,29	0,00	0,00	<DL	<DL	3,24	0,74	0,00	0,00	<DL
<0,4	<DL	0,00	0,09	0,00	0,00	<DL	<DL	1,92	0,00	0,00	0,00	<DL
ΣΥΝΟΛΟ	<DL	1,43	3,07	137,34	35,64	206,80	0,32	101,95	20,64	414,71	0,00	5,44
Χειμώνας												
Διάμετροι (μm)	Li, Co, As, Cd, Hg, Pb	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Ba		
9,0-10	<DL	0,92	0,17	0,00	2,83	272,84	0,00	7,29	0,00	17,09		
5,8-9,0	<DL	0,15	0,30	8,45	8,18	284,06	5,48	5,94	0,00	5,10		
4,7-5,8	<DL	0,00	0,03	0,00	3,51	<DL	0,00	2,19	0,00	2,07		
3,3-4,7	<DL	0,00	0,00	0,00	1,98	<DL	0,00	5,58	0,00	1,27		
2,1-3,3	<DL	0,00	0,00	0,00	0,00	<DL	0,00	1,67	0,00	0,00		
1,1-2,1	<DL	0,00	0,00	0,00	0,00	<DL	0,00	1,36	0,00	0,00		
0,7-1,1	<DL	0,00	0,00	0,00	0,00	<DL	0,00	0,25	0,00	0,00		
0,4-0,7	<DL	0,00	0,00	0,00	0,00	<DL	0,00	0,10	0,00	0,00		
<0,4	<DL	0,00	0,00	0,00	0,00	<DL	0,00	0,32	0,00	34,85		
ΣΥΝΟΛΟ	<DL	1,07	0,51	8,45	16,51	556,90	5,48	24,70	0,00	60,39		

Φθινόπωρο											
Διάμετροι (μm)	Li, Co, As, Cd, Hg	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Ba	Pb
9,0-10	<DL	9,7	1,7	13,3	22,5	1142,5	1,9	12,0	37,9	27,0	8,5
5,8-9,0	<DL	6,2	1,1	4,9	14,1	673,7	1,3	13,3	4,6	22,9	9,0
4,7-5,8	<DL	5,8	1,0	1,9	10,9	412,1	1,4	8,7	3,6	22,5	4,4
3,3-4,7	<DL	3,8	0,8	0,0	8,1	171,0	1,8	8,2	6,8	15,6	4,0
2,1-3,3	<DL	1,3	0,3	4,7	3,4	36,4	9,4	0,6	7,6	5,9	2,4
1,1-2,1	<DL	1,1	0,2	8,6	0,7	41,8	1,3	0,6	1,6	2,2	2,9
0,7-1,1	<DL	0,2	0,3	23,1	0,1	92,4	0,6	1,7	2,2	9,9	0,0
0,4-0,7	<DL	0,2	0,4	14,5	0,4	22,4	0,3	0,0	71,3	36,3	0,0
<0,4	<DL	0,3	0,2	20,6	0,2	0,0	0,7	0,0	23,5	18,8	1,6
ΣΥΝΟΛΟ	<DL	28,7	5,9	91,7	60,4	2592,2	18,6	45,2	159,0	161,2	32,8

<DL: κάτω του ορίου ανίχνευσης

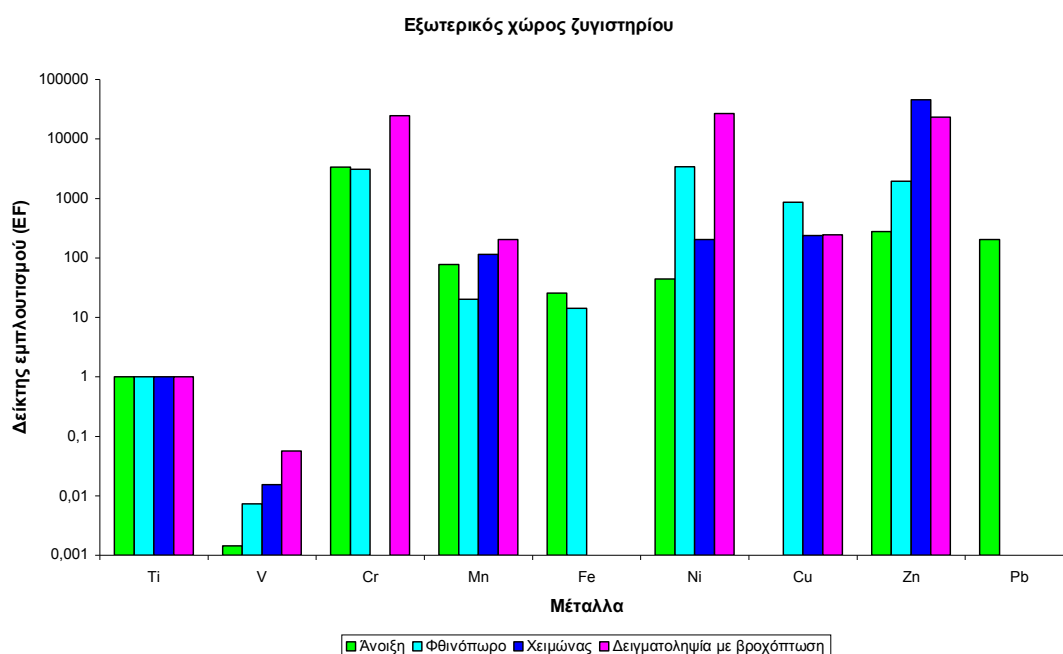
Οι υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής οφείλονται στις χρωστικές των συσκευασιών, στα μελάνια του έντυπου υλικού, στα χρώματα που χρησιμοποιούν στο χαρτί και στα λευκοσιδηρούχα απορρίμματα. Επίσης, η επιβάρυνση των PM_{10} σε μέταλλα στους εσωτερικούς χώρους του εργοστασίου ενισχύεται λόγω των απορριμματοφόρων/τροχοφόρων/φορτωτών που κινούνται εντός των στεγασμένων εσωτερικών χώρων του εργοστασίου. Επιπλέον στον Πίνακα 17 παρατηρείται ότι τα μέταλλα συγκεντρώνονται σε μεγαλύτερο βαθμό στα χονδρά σωματίδια ($\text{PM}_{2,1-10}$). Αυτό είναι φυσιολογικό αφού επικρατούν χονδρά σωματίδια στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής. Όπως παρουσιάσαμε στην Ενότητα 8.4.3 το ποσοστό των χονδρών σωματιδίων κυμαίνεται από 74 έως 88% στο εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής.

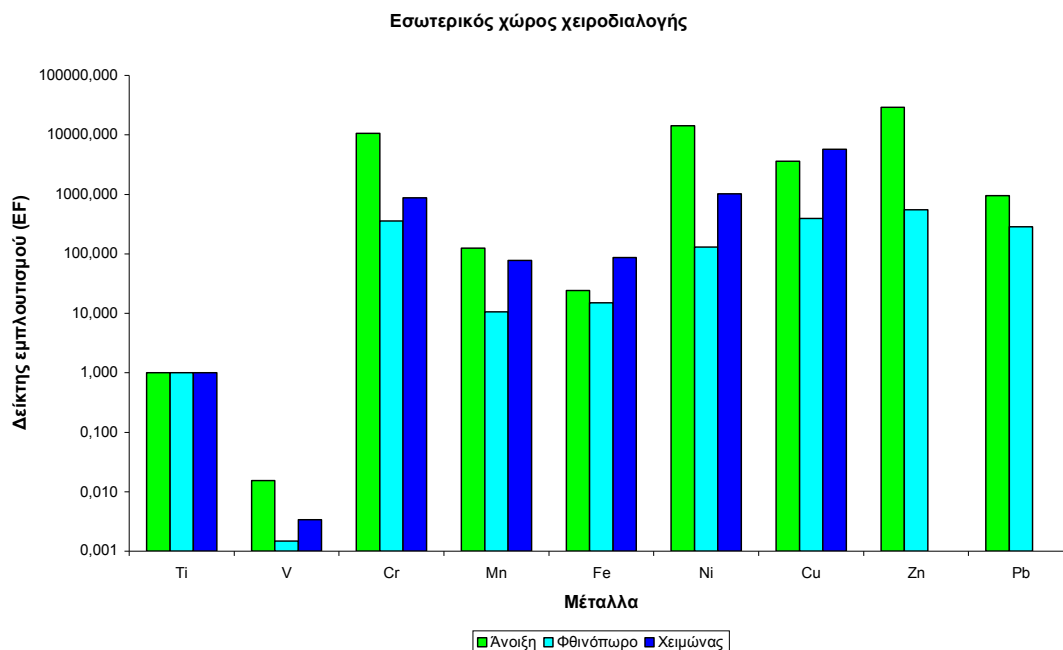
Η Αμερικανική υπηρεσία προστασίας του περιβάλλοντος, για την εισπνοή βαρέων μετάλλων (As, Cr (VI), Cd, Ni), έχει καθορίσει τρία επίπεδα κινδύνου για τη πιθανότητα σχηματισμού καρκίνου (1:10.000, 1 :100.000, 1 :1.000.000). Στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής δεν ανιχνεύθηκαν στα δείγματα As, και Cd. Όσον αφορά στο Cr, εντοπίστηκε στα δείγματα το ολικό χρώμιο ενώ λόγω της εισπνοής Ni η πιθανότητα σχηματισμού καρκίνου είναι περίπου 1:1.000.000 για τον χειμώνα και περίπου 1:100.000 για την άνοιξη και το φθινόπωρο.

Στη συνέχεια, υπολογίστηκε ο δείκτης εμπλουτισμού (EF) για να εντοπιστούν οι πηγές μετάλλων ανάμεσα στις ανθρωπογενείς και φυσικές δραστηριότητες. Ο δείκτης εμπλουτισμού για κάθε μέταλλο i υπολογίζεται με την εξίσωση (Chen κ.ά., 2008)

$$EF_i = \frac{\left(\frac{C_{i,PM}}{C_{Ti,PM}} \right)}{\left(\frac{C_{i,crust}}{C_{Ti,crust}} \right)} \quad (98)$$

όπου $C_{i,PM}$ είναι η συγκέντρωση του μετάλλου i στα αιωρούμενα σωματίδια (ng/m^3), $C_{Ti,PM}$ είναι η συγκέντρωση του στοιχείου αναφοράς (Ti) στα αιωρούμενα σωματίδια (ng/m^3), $C_{i,crust}$ είναι η συγκέντρωση του μετάλλου i στο φλοιό της Γης (mg/kg), και $C_{Ti,crust}$ είναι η συγκέντρωση του στοιχείου αναφοράς (Ti) στο φλοιό της Γης ($5000 mg/kg$ για τα Ελληνικά εδάφη; Alloway, 1995). Σύμφωνα με τη μελέτη των Chen κ.ά. (2008) προτείνεται ως στοιχείο αναφοράς το τιτάνιο (Ti) το οποίο παρουσιάζει σχετικά σταθερή συγκέντρωση στον φλοιό της Γης και επηρεάζεται σε περιορισμένο βαθμό από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Στο Διάγραμμα 11 παρουσιάζονται οι δείκτες εμπλουτισμού.





Διάγραμμα 11: Δείκτες εμπλουτισμού (EF) σε δείγματα από τον εξωτερικό χώρο ζυγιστηρίου και τον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής.

Στο Διάγραμμα 11 παρατηρείται ότι οι τιμές EF των Cr, Ni, Cu, Zn, Pb εμφανίζονται πάνω από 100 το οποίο δηλώνει σημαντική ανθρωπογενή επίδραση στην προέλευση των συγκεκριμένων μετάλλων. Αντίθετα στοιχεία όπως το V εμφανίζουν παράγοντα εμπλουτισμού μικρότερο από 5 το οποίο δηλώνει την αμελητέα συμβολή των ανθρωπογενών εκπομπών. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς το V εντοπίζεται σε εκτεταμένο βαθμό σε ορυκτά του φλοιού της Γης. Επίσης υπάρχουν μέταλλα όπως ο Fe και το Mn με EF μεταξύ 5 και 100 το οποίο δηλώνει τόσο ανθρωπογενή όσο και φυσική επίδραση στην προέλευση των συγκεκριμένων μετάλλων.

Την υψηλότερη τιμή EF την παρουσιάζει ο Zn φθάνοντας μέχρι την τιμή 45.769 στο εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου και την τιμή 29.000 στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής. Το οξείδιο του ψευδαργύρου χρησιμοποιείται σε μια ευρεία ποικιλία εφαρμογών συμπεριλαμβανομένων: πλαστικά, γυαλί, κεραμικά, καουτσούκ κ.ά. Όσον αφορά στις υψηλές τιμές του δείκτη EF για τον Pb στους εσωτερικούς χώρους, πιθανότητα οφείλεται στην επίδραση των τροχοφόρων (φορτωτές) που κινούνται εντός των στεγασμένων, εσωτερικών χώρων του κτιρίου μηχανικής διαλογής και χειροδιαλογής.

Στη συνέχεια, θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με την μελέτη του Κοπανάκη (2015) που υπολόγισε τους δείκτες EF για την πόλη των Χανίων (περιοχή Δικαστήρια). Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι ο δείκτης EF_{Zn} φτάνει μέχρι την τιμή 20.243 (μέγιστη τιμή) στην πόλη των Χανίων ενώ στο εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου όπως αναφέραμε και πιο πάνω φθάνει μέχρι την τιμή 45.769 (μέγιστη τιμή). Όσον αφορά στη μέση τιμή του δείκτη εμπλουτισμού για το Ni, Cr και Zn στον εξωτερικό χώρο ζυγιστηρίου είναι ίσος με 7.654, 10.388 και 17.781, αντίστοιχα. Οι αντίστοιχες τιμές για την πόλη των Χανίων είναι 109 για το Ni, 56 για το Cr και 18.943 για το Zn. Επίσης υψηλότεροι δείκτες EF παρατηρούνται στο εξωτερικό χώρο ζυγιστηρίου σε σχέση με την πόλη των Χανίων και για τα υπόλοιπα μέταλλα. Μόνο για τον Cu ο δείκτης EF είναι υψηλότερος στη Πόλη των Χανίων σε σχέση με τον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου. Επομένως, με βάση όλα τα παραπάνω, η μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων είναι ιδιαίτερα επιβαρυνμένη περιοχή σε αιωρούμενα σωματίδια που περιέχουν μέταλλα.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΡΥΘΜΩΝ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

9.1. Μεθοδολογία εκτίμησης ρυθμών εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων σε εξωτερικούς χώρους

9.1.1. Εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων που προκαλούνται από την κίνηση των απορριμματοφόρων

Κατά την κίνηση των απορριμματοφόρων σε χωματόδρομους προκαλείται επαναιώρηση σκόνης και μεταφορά αυτής στην ατμόσφαιρα. Για τον υπολογισμό των ρυθμών εκπομπής εξαιτίας της κίνησης απορριμματοφόρων σε χωματόδρομους χρησιμοποιήθηκαν οι συντελεστές εκπομπής AP-42 της Αμερικανικής Υπηρεσίας Προστασίας του Περιβάλλοντος (US-EPA, 2006). Οι ρυθμοί εκπομπής PM₁₀ (E) εξαιτίας της κίνησης απορριμματοφόρων σε χωματόδρομους υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$E = 1,5 \times (s/12)^{0,9} \times (W/3)^{0,45} \quad (99)$$

όπου s είναι η περιεχόμενη ιλύς (%) και W είναι το μέσο βάρος του απορριμματοφόρου (tn). Οι μονάδες των ρυθμών εκπομπής (E) είναι λίβρα (lb) ανά μίλι που διανύθηκαν (VMT). Για τη μετατροπή σε γραμμάρια (g) ανά χιλιόμετρο που διανύθηκαν (VKT) χρησιμοποιείται lb/VMT = 281,9 g/VKT

Η περιεχόμενη ιλύς (s) για χωματόδρομους σε ΧΥΤΑ κυμαίνονται από 2,2% (ελάχιστη τιμή) έως 21% (μέγιστη τιμή) με μέση τιμή ίση με 6,4% με βάση στοιχεία που δημοσιεύονται στην US-EPA AP-42 (US-EPA, 2006). Ως εκ τούτου, η περιεχόμενη ιλύς (s) υιοθετήθηκε να είναι ίση με 6,4% (μέση τιμή) κατά την τρέχουσα έρευνα, δεδομένου ότι δεν υπάρχει διαθέσιμη πληροφορία για το ΧΥΤ Χανίων.

Κατά την κίνηση των απορριμματοφόρων σε ασφαλτοστρωμένους δρόμους προκαλείται επαναιώρηση στην ατμόσφαιρα σωματιδίων που

προηγούμενα είχαν αποτεθεί στην επιφάνεια των ασφαλτοστρωμένων δρόμων. Οι επιβλαβείς ουσίες που εκπέμπονται από τις εξατμίσεις και την τριβή των ελαστικών των φορτηγών εναποτίθενται και συσσωρεύονται στην επιφάνεια των δρόμων μαζί με πρωτογενή και δευτερογενή σωματίδια από άλλες ανθρωπογενείς και φυσικές πηγές (Amato κ.ά., 2009).

Για τον υπολογισμό των ρυθμών εκπομπής εξαιτίας της κίνησης των απορριμματοφόρων σε ασφαλτοστρωμένους δρόμους χρησιμοποιήθηκαν οι συντελεστές εκπομπής AP-42 της Αμερικανικής Υπηρεσίας Προστασίας του Περιβάλλοντος (US-EPA, 2006). Οι ρυθμοί εκπομπής PM_{10} (E) εξαιτίας της κίνησης απορριμματοφόρων σε ασφαλτοστρωμένους δρόμους υπολογίζονται από την εξίσωση :

$$E = 0,62 \times (sL)^{0,91} \times (W)^{1,02} \quad (100)$$

όπου sL είναι το φορτίο ιλύς στην επιφάνεια του δρόμου (g/m^2), W είναι το μέσο βάρος του απορριμματοφόρου (tn). Οι μονάδες των ρυθμών εκπομπής (E) είναι λίβρα (lb) ανά μίλι που διανύθηκαν (VMT). Για τη μετατροπή σε γραμμάρια (g) ανά χιλιόμετρο που διανύθηκαν (VKT) χρησιμοποιείται $lb/VMT = 281,9 \text{ g/VKT}$.

Το sL για ασφαλτοστρωμένους δρόμους σε μονάδες διαχείρισης απορριμμάτων κυμαίνονται από $1,1 \text{ g/m}^2$ (ελάχιστη τιμή) έως $32,0 \text{ g/m}^2$ (μέγιστη τιμή) με μέση τιμή ίση με $7,4 \text{ g/m}^2$ με βάση στοιχεία που δημοσιεύονται στην US-EPA AP-42 (US-EPA, 2006). Ως εκ τούτου, το sL υιοθετήθηκε να είναι ίσο με $7,4 \text{ g/m}^2$ (μέση τιμή) κατά την τρέχουσα έρευνα, δεδομένου ότι δεν υπάρχει διαθέσιμη πληροφορία για τη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων.

9.1.2. Εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων που προκαλούνται από τον άνεμο

Η ταχύτητα του ανέμου προκαλεί επαναιώρηση σκόνης. Οπότε μεγάλες ταχύτητες ανέμου οδηγούν στην επαναιώρηση μεγαλύτερων ποσοτήτων σκόνης. Οι εκπομπές σκόνης εξαιτίας του ανέμου υπολογίστηκαν με βάση τη μεθοδολογία που παρουσιάζεται στη μελέτη των Choi και Fernando (2008). Στη μελέτη των Choi και Fernando (2008) υπολογίζεται η κατακόρυφη ροή εκπομπών σκόνης (F_a) με την εξίσωση των Westphal κ.ά. (1987)

τροποποιημένη σύμφωνα με τα αποτελέσματα των Park και In (2003) και των Liu και Westphal (2001). Για εδάφη που είναι κυρίως αμμώδη η κατακόρυφη ροή εκπομπών σκόνης (F_a) υπολογίζεται με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$F_a = 0,13 \times (1 - R) \times 10^{-13} \times u_*^3 \quad u_* \geq u_{*t} \quad (101)$$

$$F_a = 0 \quad u_* < u_{*t} \quad (102)$$

όπου u_* η ταχύτητα τριβής (cm/s), u_{*t} η τιμή κατωφλίου της ταχύτητας τριβής (cm/s), και R ο συντελεστής διόρθωσης/ελάττωσης που εξαρτάται από την εδαφοκάλυψη.

Η τιμή κατωφλίου της ταχύτητας τριβής του ανέμου υπολογίζεται με τις εξισώσεις:

$$u_{*t} = 0,30 \times e^{7,22 \times z_0} \quad w < w' \quad (103)$$

$$u_{*t} = \left(0,30 \times e^{7,22 \times z_0}\right) \times \left[1 + 1,21 \times (w - w')^{0,68}\right]^{0,5} \quad w > w' \quad (104)$$

όπου w είναι η υγρασία, w' είναι το κατώφλι της υγρασίας του εδάφους και το z_0 είναι το μήκος επιφανειακής τραχύτητας (cm).

Το κατώφλι της υγρασίας του εδάφους (w') εξαρτάται από την περιεκτικότητα του επιφανειακού στρώματος του εδάφους σε άργιλο και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$w' = 0,0014 \times (\% \text{ \acute{a}ργιλος})^2 + 0,17 \times (\% \text{ \acute{a}ργιλος}) \quad (105)$$

Στη συνέχεια τα αποτελέσματα πολλαπλασιάζονται με το κλάσμα περιεκτικότητας του επιφανειακού στρώματος του εδάφους σε λάσπη (small silt) και άργιλο ώστε οι εκπομπές να περιοριστούν σε σωματίδια PM_{10} .

9.1.3. Εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων που προκαλούνται από τον άνεμο σε σωρούς υλικών

Η ταχύτητα του ανέμου προκαλεί επαναιώρηση σκόνης σε σωρούς υλικών. Η Αμερικανική υπηρεσία προστασίας του περιβάλλοντος παρέχει συντελεστές εκπομπών για ένα πολύ μεγάλο αριθμό πηγών ατμοσφαιρικής ρύπανσης, μεταξύ των οποίων και για σωρούς υλικών. Επομένως, οι εκπομπές σκόνης

από την επίδραση του ανέμου σε σωρούς υλικών υπολογίστηκαν με βάση τους συντελεστές εκπομπής AP-42 της Αμερικανικής Υπηρεσίας Προστασίας του Περιβάλλοντος (US-EPA, 2006). Οι ρυθμοί εκπομπής PM₁₀ εξαιτίας της επίδρασης του ανέμου σε σωρούς υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$PM_{10} \text{ Emission Factor} = 0,5 \times P \quad (106)$$

όπου P είναι η πιθανή διάβρωση (g/m²). Η πιθανή διάβρωση P σε σωρούς υλικών υπολογίζεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$P = 58 \times (u^* - u_{*t}) + 25 \times (u^* - u_{*t}) \quad \text{για } u^* > u_{*t} \quad (107)$$

$$P = 0 \quad \text{για } u^* \leq u_{*t} \quad (108)$$

όπου u* είναι η ταχύτητα τριβής (m/s) και u_{*t} είναι η τιμή κατωφλίου της ταχύτητας τριβής (m/s).

9.2. Μεθοδολογία εκτίμησης ρυθμών εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους

Για τον υπολογισμό των ρυθμών εκπομπής σε εσωτερικούς χώρους χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο ισοζυγίου μάζας που αναπτύχθηκε από τον Δρ. Θ. Γλυτσό. Στο μοντέλο ισοζυγίου μάζας ο ρυθμός μεταβολής της συγκέντρωσης του ρύπου σε έναν συγκεκριμένο όγκο εσωτερικού χώρου ισούται με το ρυθμό που εισέρχεται από το εξωτερικό περιβάλλον, συν το ρυθμό εκπομπής από εσωτερικές πηγές, αφαιρώντας το ρυθμό εξαγωγής του ρύπου στο εξωτερικό περιβάλλον και το ρυθμό απομάκρυνσης του λόγω των μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό περιβάλλον.

Με βάση τα παραπάνω ο ρυθμός μεταβολής της συγκέντρωσης του ρύπου σε ένα συγκεκριμένο όγκο εσωτερικού χώρου υπολογίζεται με βάση την εξίσωση (Γλυτσός, 2010):

$$\frac{dC_m}{dt} = \lambda PC_{m,out} - (\lambda + \lambda_{loss})C_m + \frac{E_m}{V} \quad (109)$$

όπου C_m είναι η συγκέντρωση μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων στον εσωτερικό αέρα (μg/m³), C_{m,out} είναι η συγκέντρωση μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων στον εξωτερικό αέρα (μg/m³), V είναι ο όγκος του εσωτερικού περιβάλλοντος (m³), P είναι ο συντελεστής διείσδυσης από το εξωτερικό περιβάλλον, λ είναι ο ρυθμός αερισμού (1/min), λ_{loss} είναι ο ρυθμός

απομάκρυνσης (1/min) των αιωρούμενων σωματιδίων λόγω εναπόθεσης και E_m είναι ο ρυθμός εκπομπής των εσωτερικών πηγών (μg/min).

Στην περίπτωση που η επίδραση του εξωτερικού περιβάλλοντος θεωρηθεί αμελητέα η εξίσωση (109) παίρνει την απλουστευμένη μορφή:

$$\frac{dC_m}{dt} = -(\lambda + \lambda_{\text{loss}})C_m + \frac{E}{V} = -\lambda_{\text{tot}}C_m + \frac{E}{V} \quad (110)$$

όπου λ_{tot} είναι ο συνολικός ρυθμός απομάκρυνσης.

Για τον υπολογισμό του ρυθμού εκπομπής (E) υπολογίζεται πρώτα το λ_{tot} της εξίσωσης. Το λ_{tot} υπολογίζεται από την εκθετική μείωση της συγκέντρωσης μετά το τέλος των εκπομπών ($E/V=0$) με βάση την εξίσωση:

$$\frac{dC_m}{dt} = -\lambda_{\text{tot}}C_m \quad (111)$$

Γνωρίζοντας το λ_{tot} (υπολογίστηκε από την εξίσωση (111)) και $\frac{dC_m}{dt}$ (από πειραματικές μετρήσεις) υπολογίζεται το E/V με βάση την εξίσωση (110)). Στη συνέχεια υπολογίζονται οι τιμές της συγκέντρωσης για διάφορους ρυθμούς εκπομπής μέχρι να ελαχιστοποιηθεί η διαφορά ανάμεσα στις τιμές του μοντέλου και στις πειραματικές τιμές. Στο τέλος επιλύθηκε αριθμητικά η εξίσωση 110 (μέθοδος Runge-Kutta) με τους ρυθμούς εκπομπής που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο βήμα. Μια λεπτομερής περιγραφή του μοντέλου ισοζυγίου μάζας δίνεται στη διδακτορική διατριβή του Δρ. Θ. Γλυτσού (Γλυτσός, 2010).

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΡΥΘΜΩΝ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

10.1. Εφαρμογή μεθοδολογίας εκτίμησης ρυθμών εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων που προκαλούνται από την κίνηση των απορριμματοφόρων

Εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων προκαλούνται από την κίνηση των απορριμματοφόρων/φορτηγών σε δρόμους. Στην παρούσα εργασία οχτώ κύριες διαδρομές μελετήθηκαν (Εικόνα 28) με βάση τις πληροφορίες/στοιχεία που δόθηκαν από τον κ. Μ. Κονταξάκη (Διευθυντή ΧΥΤ και υπεύθυνο γραφείου προγραμματισμού).



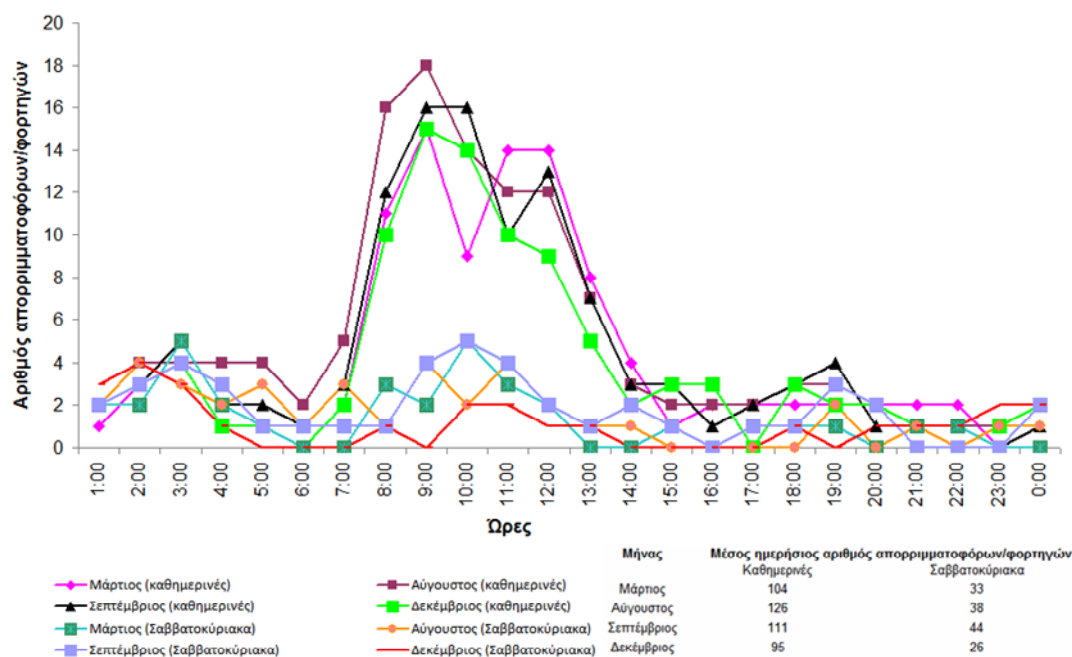




Εικόνα 28: Οι οχτώ κύριες διαδρομές στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων.

Στην Εικόνα 28 παρατηρούνται ότι τα απορριμματοφόρα/φορηγά των διαδρομών 1,2,5 κυκλοφορούν μόνο σε ασφαλτωμένους δρόμους ενώ τα απορριμματοφόρα/φορηγά των διαδρομών 3,4,6,7 και 8 κυκλοφορούν σε χωματόδρομους και σε ασφαλτωμένους δρόμους.

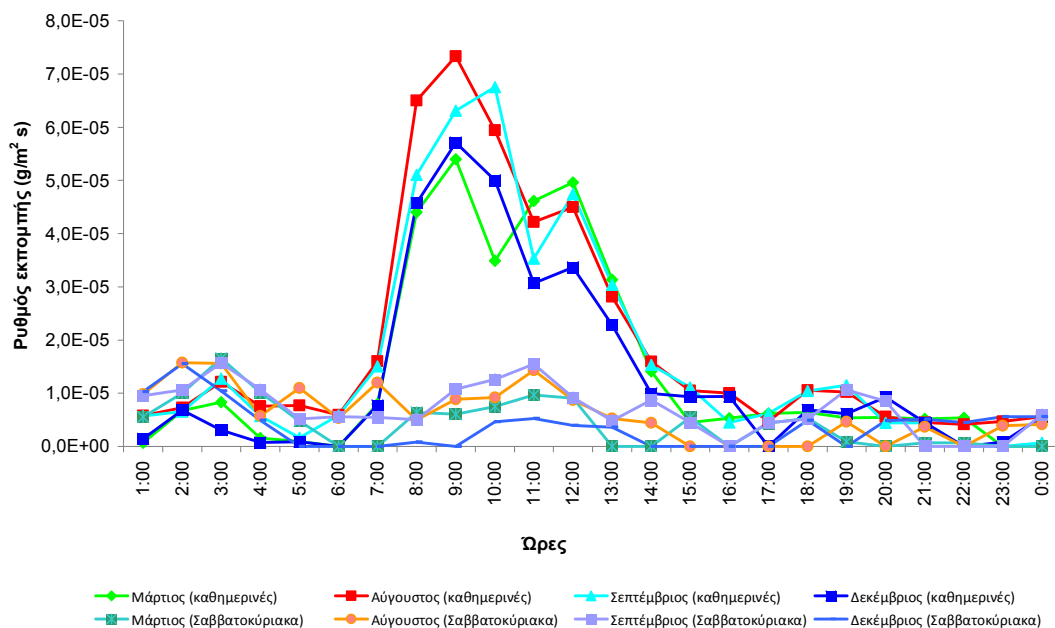
Στο Διάγραμμα 12 παρουσιάζεται η μέση ημερήσια διακύμανση των απορριμματοφόρων/φορηγών που κινούνται στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων για τους μήνες Μάρτιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο του έτους 2010. Παρατηρείται ότι ο αριθμός των απορριμματοφόρων/φορηγών που κινούνται στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων είναι περίπου τριπλάσιος τις καθημερινές σε σχέση με τα σαββατοκύριακα.



Διάγραμμα 12: Μέση ημερήσια διακύμανση των απορριμματοφόρων/φορτηγών που εισέρχονται στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων για τους μήνες Μάρτιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο.

Επίσης, οι υψηλότερες τιμές παρατηρούνται τους μήνες Αύγουστο και Σεπτέμβριο λόγω της τουριστικής περιόδου. Κατά τη διάρκεια της τουριστικής περιόδου παρατηρείται αύξηση της ποσότητας των απορριμμάτων που παράγονται. Με αποτέλεσμα την αύξηση του αριθμού των απορριμματοφόρων που κινούνται στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων.

Η ημερήσια μεταβολή του ρυθμού εκπομπής των PM_{10} είναι επίσης σημαντική στη διαμόρφωση των επιπέδων των PM_{10} . Με βάση τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 9.1.1 υπολογίστηκε ο ρυθμός εκπομπής των PM_{10} από την κίνηση των απορριμματοφόρων/φορτηγών σε χωματόδρομους και σε ασφαλτωμένους δρόμους.



Διάγραμμα 13: Μέση ημερήσια διακύμανση του ρυθμού εκπομπής των PM₁₀ που προκαλούνται από την κίνηση των φορτηγών για τους μήνες Μάρτιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο.

Στο Διάγραμμα 13 παρατηρείται ότι ο μέγιστος ρυθμός εκπομπής παρουσιάζεται τις πρωινές ώρες ενώ ο ελάχιστος ρυθμός εκπομπής παρουσιάζεται τις νυχτερινές ώρες. Αυτό οφείλεται στο ότι ο αριθμός των απορριμματοφόρων/φορτηγών που εισέρχονται στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων είναι υψηλότερος τις πρωινές ώρες σε σχέση με τις νυχτερινές ώρες. Οι ρυθμοί εκπομπής χρησιμοποιούνται ως παράμετροι εισόδου στο μοντέλο διασποράς ISC3.

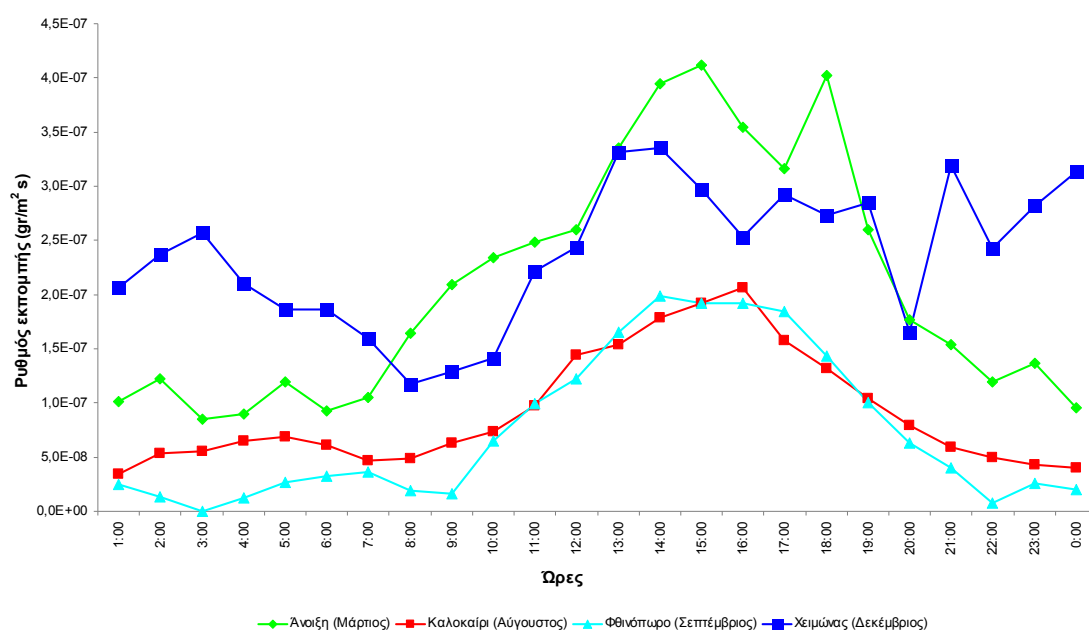
10.2. Εφαρμογή μεθοδολογίας εκτίμησης ρυθμών εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων που προκαλούνται από τον άνεμο

Η μεθοδολογία που αναλύθηκε στην Ενότητα 9.1.2 εφαρμόστηκε στη χωματοκάλυψη (landfill cover) του ΧΥΤ. Στο ΧΥΤ Χανίων η χωματοκάλυψη αποτελείται από 62,5% άμμος, 34% χαλίκι και 3,5% άργιλος ενώ η υγρασία του κυμαίνεται από 7% έως 13% (προσωπική επικοινωνία με διευθυντή ΕΜΑΚ κ. Κ. Πατεράκη). Στην Εικόνα 29 παρουσιάζεται η χωματοκάλυψη του ΧΥΤ Χανίων.



Εικόνα 29: Χωματοκάλυψη (landfill cover) ΧΥΤ Χανίων (Πηγή: Google Earth).

Με βάση τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 9.1.2 υπολογίστηκε ο ρυθμός εκπομπής των PM_{10} που προκαλούνται από τον άνεμο. Στο Διάγραμμα 14 παρουσιάζεται η μέση ημερήσια διακύμανση του ρυθμού εκπομπής των PM_{10} που προκαλούνται από τον άνεμο για τους μήνες Μάρτιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο.



Διάγραμμα 14: Μέση ημερήσια διακύμανση του ρυθμού εκπομπής των PM_{10} που προκαλούνται από τον άνεμο για τους μήνες Μάρτιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο.

Οι υψηλότερες τιμές παρατηρούνται τους μήνες Μάρτιο και Δεκέμβριο ενώ οι ελάχιστες τιμές παρατηρούνται τους μήνες Αύγουστο και Σεπτέμβριο. Αυτό οφείλεται στο ότι η ταχύτητα του ανέμου είναι υψηλότερη του μήνες Μάρτιο και Δεκέμβριο και ως εκ τούτου και ο ρυθμός εκπομπής των PM_{10} που προκαλούνται από τον άνεμο είναι υψηλότερος τους μήνες αυτούς. Οι ρυθμοί εκπομπής χρησιμοποιούνται ως παράμετροι εισόδου στο μοντέλο ISC3 της Αμερικανικής πηρεσσίας προστασίας του περιβάλλοντος για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων.

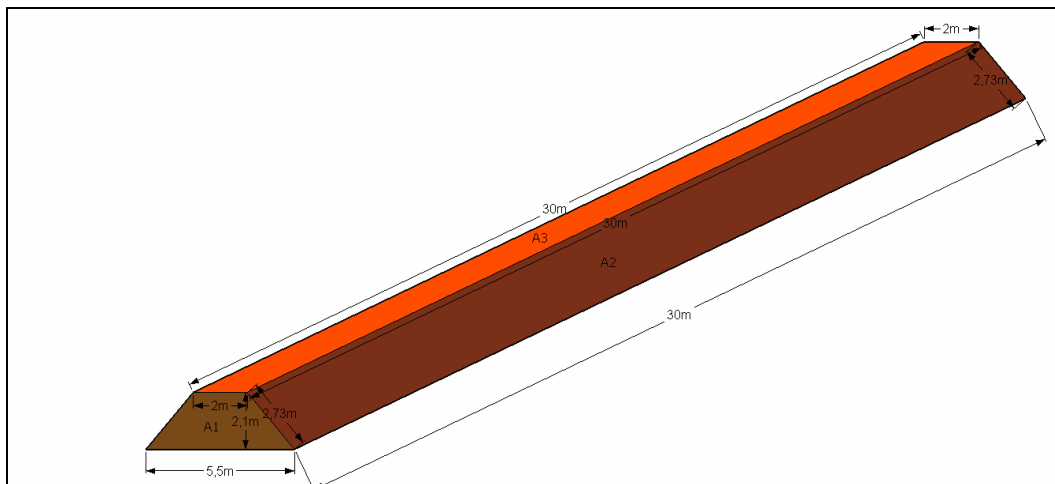
10.3. Εφαρμογή μεθοδολογίας εκτίμησης ρυθμών εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων που προκαλούνται από τον άνεμο σε σωρούς υλικών

Η μεθοδολογία που αναλύθηκε στην Ενότητα 9.1.3 εφαρμόστηκε στην πλατεία ωρίμανσης του κομπόστ (Εικόνα 30). Οι σωροί έχουν ακανόνιστο σχήμα με διαφορετικές διαστάσεις ο κάθε σωρός. Η υγρασία του κομπόστ πριν την τοποθέτηση του στην πλατεία ωρίμανσης κυμαίνεται από 45% μέχρι 55% ενώ μετά (πριν την αποθήκευση του) η υγρασία του είναι ίση 30% (http://www.epem.gr/waste-c-control/database/html/case_study-13.htm).



Εικόνα 30: Πλατεία ωρίμανσης κομπόστ (Πηγή: Google Earth).

Για την εφαρμογή της μεθοδολογίας θεωρήθηκε ότι ο σωρός έχει την παρακάτω μορφή και χρησιμοποιήθηκαν μέσες τιμές για τις διαστάσεις του σωρού (Εικόνα 31).



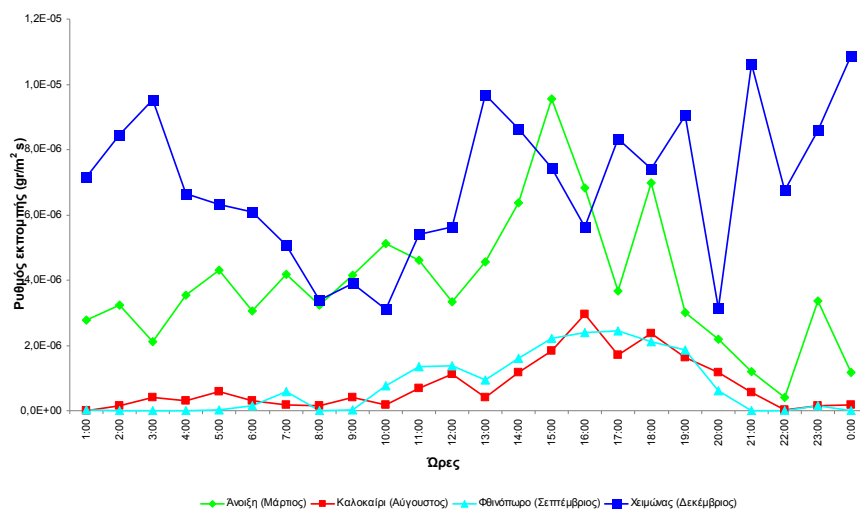
Εικόνα 31: Διαστάσεις (μέσες τιμές) σωρού στην πλατεία ωρίμανση.

Η επιφάνεια του σωρού που εκτίθεται στον άνεμο υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$A = 2 \times A_1 + 2 \times A_2 + A_3 \quad (112)$$

όπου $A_1 = (2 + 5,5) \times 2,1/2 = 7,88 \text{ m}^2$, $A_2 = 30 \times 2,73 = 81,90 \text{ m}^2$, $A_3 = 30 \times 2 = 60 \text{ m}^2$

Επομένως, η επιφάνεια του σωρού που εκτίθεται στον άνεμο είναι ίση με $A = 239,55 \text{ m}^2$. Η πλατεία ωρίμανση αποτελείται από 12 σωρούς (μέση τιμή) συνολικής επιφάνειας $A = 2874,60 \text{ m}^2$. Με βάση τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 9.1.3 υπολογίστηκε ο ρυθμός εκπομπής των PM_{10} που προκαλούνται από τον άνεμο. Στο Διάγραμμα 15 παρουσιάζεται η μέση ημερήσια διακύμανση του ρυθμού εκπομπής των PM_{10} που προκαλούνται από τον άνεμο για τους μήνες Μάρτιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο.



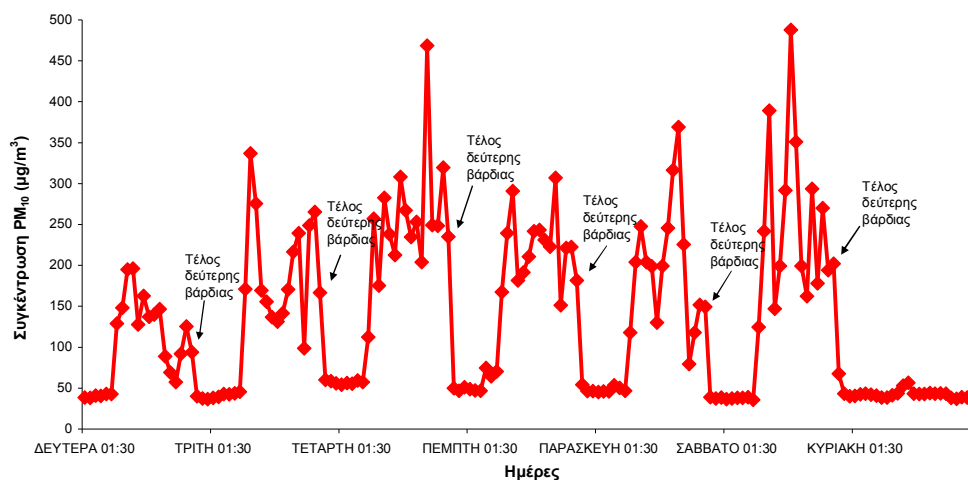
Διάγραμμα 15: Μέση ημερήσια διακύμανση του ρυθμού εκπομπής των PM_{10} που προκαλούνται από τον άνεμο για τους μήνες Μάρτιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο.

Οι υψηλότερες τιμές παρατηρούνται τους μήνες Μάρτιο και Δεκέμβριο ενώ οι ελάχιστες τιμές παρατηρούνται τους μήνες Αύγουστο και Σεπτέμβριο. Αυτό οφείλεται στο ότι η ταχύτητα του ανέμου είναι υψηλότερη του μήνες Μάρτιο και Δεκέμβριο με αποτέλεσμα και ο ρυθμός εκπομπής των PM_{10} που προκαλούνται από τον άνεμο να είναι υψηλότερος τους μήνες αυτούς. Οι ρυθμοί εκπομπής χρησιμοποιούνται ως παράμετροι εισόδου σε μοντέλο διασποράς για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων.

10.4. Εφαρμογή μοντέλου ισοζυγίου μάζας

Το μοντέλο ισοζυγίου μάζας εφαρμόστηκε στο εργοστάσιο μηχανικής ανακύκλωσης και κομποστοποίησης (EMAK) του νομού Χανίων και πιο συγκεκριμένα στην αίθουσα της χειροδιαλογής. Η εφαρμογή του μοντέλου πραγματοποιήθηκε στον εσωτερικό χώρο της χειροδιαλογής διότι εργάζονται τα περισσότερα άτομα. Ο εσωτερικός χώρος της χειροδιαλογής πρόκειται για μία μακρόστενη αίθουσα με διαστάσεις 33 m x 12 m. Στον εσωτερικό χώρο της χειροδιαλογής υπάρχουν δύο ταινίες. Στην πρώτη ταινία μεταφέρονται τα προδιαλεγμένα απορρίμματα από τον μπλε κάδο ενώ στη δεύτερη ταινία γίνεται μεταφορά των σύμμεικτων απορριμμάτων (παρουσία οργανικού υλικού μαζί με το ανακυκλώσιμο).

Στον εσωτερικό χώρο της χειροδιαλογής υπάρχουν δύο βάρδιες που αποτελούνται από 14 άτομα η κάθε μία. Η πρώτη βάρδια ξεκινάει στις 6:30 και τελειώνει στις 14:30 με ένα διάλλειμα μισής ώρας. Η δεύτερη βάρδια ξεκινάει στις 14:30 και τελειώνει στις 21:30 με ένα διάλλειμα μισής ώρας. Ο καθαρισμός του χώρου χειροδιαλογής πραγματοποιείται μισή ώρα πριν το τέλος της δεύτερης βάρδιας (21:00-21:30). Επιπλέον, το εργοστάσιο χειροδιαλογής λειτουργεί από Δευτέρα έως Σάββατο. Για τον υπολογισμό του ρυθμού εκπομπής (E) χρησιμοποιήθηκαν οι πειραματικές μετρήσεις συγκεντρώσεων μάζας για τα PM_{10} που πραγματοποιήθηκαν στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής (Διάγραμμα 16).



Διάγραμμα 16: Εβδομαδιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων μάζας των PM_{10} ($\mu g/m^3$) στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής του ΕΜΑΚ Χανίων.

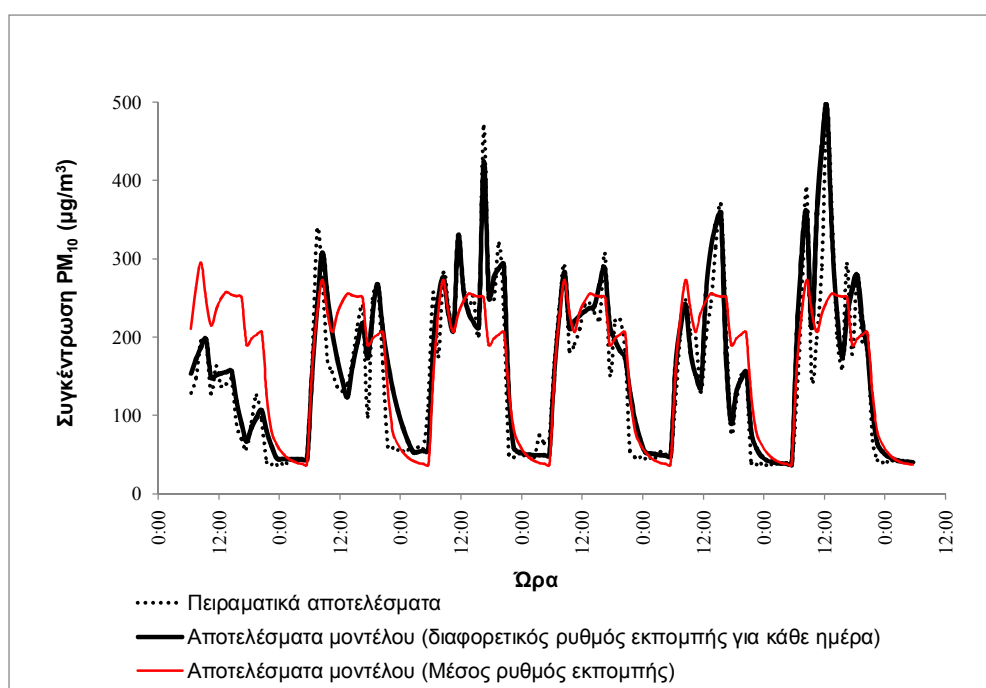
Με βάση τις μετρήσεις του Διαγράμματος 16 υπολογίστηκε ο συνολικός ρυθμός απομάκρυνσης λ_{tot} χρησιμοποιώντας την εξίσωση (111). Σύμφωνα με το Διάγραμμα 16 η συγκέντρωση PM_{10} μειώνεται μετά το τέλος της δεύτερης βάρδιας (μετά τις 21:30). Η εξίσωση (111) ισχύει από την στιγμή που τελειώνει η δεύτερη βάρδια (21:30) όπου το εργοστάσιο σταματάει τη λειτουργία του ($E/V=0$). Επομένως, για τον υπολογισμό του λ_{tot} χρησιμοποιήθηκαν οι πειραματικές μετρήσεις συγκεντρώσεων μάζας που κατεγράφησαν μετά τις 21:30. Με βάση τα παραπάνω το λ_{tot} υπολογίστηκε και είναι ίσο με $7,9 \times 10^{-3} \pm 4,0 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$. Στη συνέχεια με βάση την εξίσωση (110) υπολογίζεται η τιμή του ρυθμού εκπομπής με τη χρήση των πειραματικών δεδομένων. Με την τιμή που υπολογίστηκε επιλύεται στη συνέχεια με αριθμητικές μεθόδους (μέθοδος Runge-Kutta) η διαφορική εξίσωση (110) και υπολογίζονται οι τιμές της συγκέντρωσης.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε ότι οι ρυθμοί εκπομπής μεταβάλλονταν κατά τη διάρκεια της ημέρας, σε συνάρτηση με το φόρτο των εργασιών που επιτελούνταν τις δεδομένες χρονικές στιγμές. Η κάθε βάρδια χωρίστηκε σε 3 χρονικά διαστήματα σχετικά με τις τιμές που υπολογίστηκαν για τους ρυθμούς εκπομπής των εσωτερικών πηγών. Στον Πίνακα 18 παρουσιάζονται οι ρυθμοί εκπομπής (μέσες τιμές) κατά τη διάρκεια μιας εργάσιμης ημέρας που ξεκινάει στις 6:30 και τελειώνει στις 21:30.

Πίνακας 18: Ρυθμοί εκπομπής PM₁₀ (μέσες τιμές) κατά τη διάρκεια μιας εργάσιμης μέρας.

	Πρώτη βάρδια			Δεύτερη βάρδια		
Χρονική περίοδος	06:30-09:30	09:30-11:30	11:30-14:30	14:30-17:30	17:30-18:30	18:30-21:30
Ρυθμοί εκπομπής (μg/m ³ min)	2,75±1,06	1,30±1,50	2,14±1,91	1,97±1,99	0,71±1,14	1,67±1,25

Παρατηρείται στον Πίνακα 18 ότι οι ρυθμοί εκπομπής PM₁₀ είναι υψηλότεροι στην πρώτη βάρδια. Οι ρυθμοί εκπομπής PM₁₀ κυμαίνονται μεταξύ 1,30 και 2,75 μg/m³ min στην πρώτη βάρδια ενώ στη δεύτερη βάρδια κυμαίνονται μεταξύ 0,71 και 1,97 μg/m³ min. Οι υψηλές τιμές στην πρώτη βάρδια οφείλεται στη λειτουργία της σύμμεικτης γραμμής απορριμμάτων (παρουσία οργανικού υλικού μαζί με το ανακυκλώσιμο). Η γραμμή αυτή λειτουργεί μόνο στην πρώτη βάρδια. Επίσης, παρατηρείται ότι οι ρυθμοί εκπομπής PM₁₀ μειώνονται κατά τη διάρκεια του διαλλείματος σε κάθε βάρδια. Το μοντέλο εφαρμόστηκε στη συνέχεια για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης PM₁₀ με βάση τους ρυθμούς εκπομπής (E/V) και απομάκρυνσης (λ_{tot}) που υπολογίστηκαν στα προηγούμενα βήματα. Στο Διάγραμμα 17 παρουσιάζεται η σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων της συγκέντρωσης μάζας για τα PM₁₀ με τα αποτελέσματα του μοντέλου.



Διάγραμμα 17: Σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τις πειραματικές μετρήσεις

Το μοντέλο εφαρμόστηκε για δυο διαφορετικές περιπτώσεις: (1) χρησιμοποιώντας διαφορετικούς ρυθμούς εκπομπής για κάθε ημέρα και (2) χρησιμοποιώντας τους ίδιους ρυθμούς εκπομπής (μέσες τιμές) για όλες τις ημέρες. Η συμφωνία των αποτελεσμάτων του μοντέλου, χρησιμοποιώντας διαφορετικές τιμές εκπομπών για κάθε ημέρα ήταν ικανοποιητική ($r^2 = 0,9$). Επιπλέον, η συμφωνία των αποτελεσμάτων του μοντέλου, χρησιμοποιώντας μέσες τιμές εκπομπών για όλες τις έξι ημέρες ήταν αρκετά καλή λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβλητότητα των χαρακτηριστικών της πηγής ($r^2 = 0,6$). Συγκεκριμένα, οι ρυθμοί εκπομπής επηρεάζονται από τις ποσότητες απορριμμάτων που εισέρχονται στην εγκατάσταση. Στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής οι ποσότητες απορριμμάτων που εισέρχονται δεν είναι σταθερές για κάθε εργάσιμη μέρα.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

11.1. Προετοιμασία δεδομένα εισόδου για το μοντέλο διασποράς

Για την εφαρμογή του μοντέλου διασποράς ISC3-ST απαιτούνται δύο αρχεία εισόδου: (1) το κύριο αρχείο και (2) το μετεωρολογικό αρχείο. Συγκεκριμένα το κύριο αρχείο περιέχει δεδομένα για:

- Τα χαρακτηριστικά της περιοχής. Η περιοχή που βρίσκεται η μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων θεωρείται αγροτική περιοχή.
- Συντεταγμένες των πηγών. Οι συντεταγμένες των πηγών εκπομπής (δρόμοι, χωματοκάλυψη και πλατεία ωρίμανση του κομπόστ) προήλθαν από το Google Earth.
- Τύπος πηγής. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιηθήκανε επιφανειακές πηγές. Οι γραμμικές πηγές θεωρούνται σαν μια αλληλουχία επιμηκών επιφανειακών πηγών (US-EPA, 1995).
- Ρυθμός εκπομπής ρύπων. Ο ρυθμός εκπομπής των PM_{10} υπολογίστηκε με βάση τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 9. Τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 10.
- Ύψος απελευθέρωσης εκπομπών. Για την πλατεία ωρίμανσης του κομπόστ το ύψος απελευθέρωσης είναι ίσος με το ύψος του σωρού. Οι σωροί έχουν μέσο ύψος 2,1 m. Για τη χωματοκάλυψη το ύψος απελευθέρωσης είναι ίσο με 0,5 m. Για τους δρόμους το ύψος απελευθέρωσης υπολογίστηκε από την εξίσωση (US EPA, 2012):

$$H_s = \frac{1,7 \times \text{ύψος φορτηγού}}{2} \quad (113)$$

όπου το μέσος ύψος των απορριμματοφόρων είναι ίσο με 2,7 m.

- Μήκος και πλάτος επιφανειακής πηγής. Το μήκος και πλάτος των επιφανειακών πηγών προήλθε από το Google Earth.
- Τη γωνία που σχηματίζουν οι επιφανειακές πηγές με τη βόρεια διεύθυνση. Οι γωνίες προήλθαν από το Google Earth.
- Συντεταγμένες αποδεκτών. Κατασκευάστηκε ένα καρτεσιανό δίκτυο αποδεκτών από -1000 έως 1000 m με βήμα 50 m.
- Ύψος αποδέκτης. Το ύψος του αποδέκτη θεωρείται ίσο με 1,5 m στο οποίο αντιστοιχεί στο μέσο τυπικό ύψος αναπνοής.
- Ύψος ανεμόμετρου. Το ανεμόμετρο βρίσκεται σε ύψος 10 m.

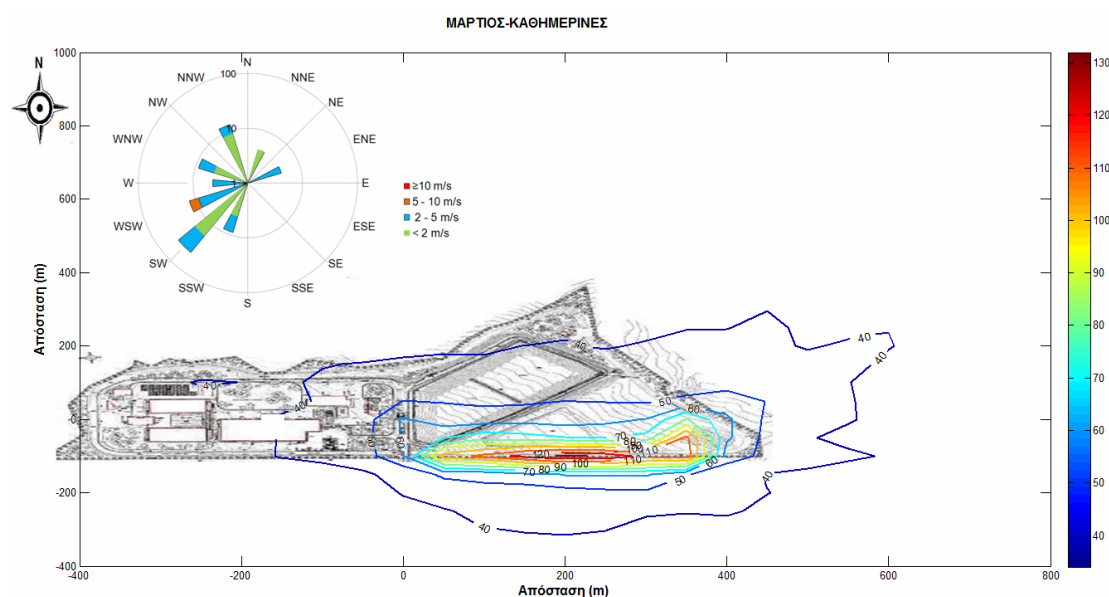
Το μετεωρολογικό αρχείο του μοντέλου διασποράς ISC3-ST περιέχει δεδομένα για:

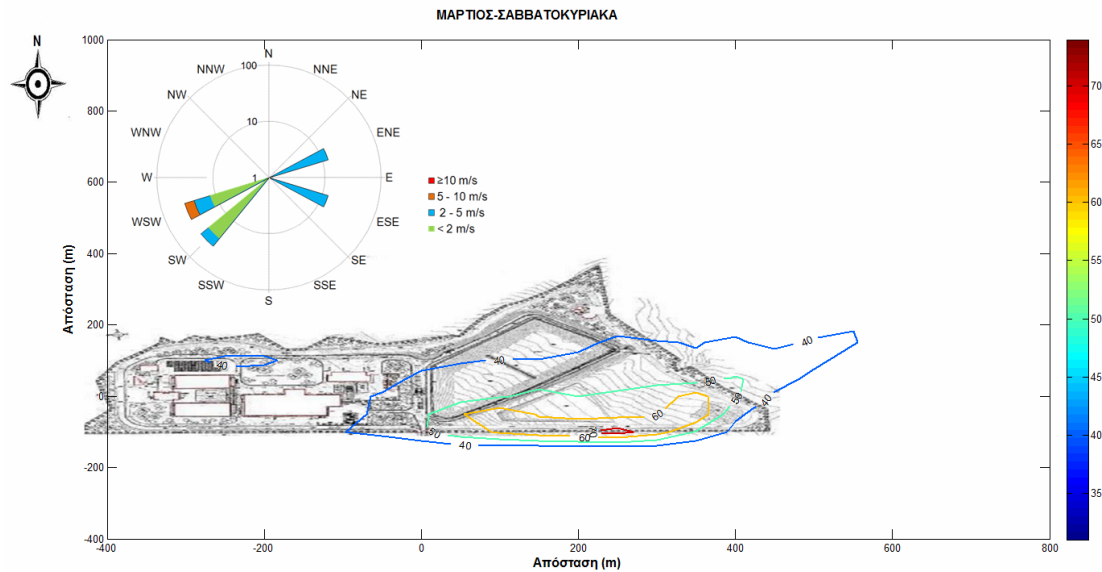
- Την ταχύτητα του ανέμου. Οι τιμές αυτές μετατράπηκαν από km/h σε m/s.
- Τη θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος μετατράπηκε από °C σε Kelvin.
- Τη διεύθυνση του ανέμου. Οι ποιοτικές ενδείξεις της διεύθυνσης ανέμου μετατράπηκαν σε μονάδες μοιρών.
- Την κλάση ισορροπίας. Η κλάση ισορροπίας υπολογίστηκε με βάση τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 7.2.
- Το ύψος ανάμιξης. Με βάση τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο στην Ενότητα 7.3 υπολογίστηκε το ύψος ανάμιξης.

Επίσης, στο μετεωρολογικό αρχείο εισόδου, χρειάζονται επιπλέον μετεωρολογικές μεταβλητές για τον υπολογισμό της ξηρής εναπόθεσης, όπως η ταχύτητα τριβής, το μήκος monin-Obukhov, το μήκος τραχύτητας της επιφάνειας, ο κωδικός βροχόπτωσης (π.χ. 1 για ασθενής βροχή, 2 για μέτρια βροχή και 3 για δυνατή βροχή) και ο ρυθμός βροχόπτωσης. Τα αποτελέσματα για τα παραπάνω μετεωρολογικά δεδομένα παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 7.4.

11.2. Αποτελέσματα μοντέλου διασποράς

Το μοντέλο διασποράς ISC3-ST της Αμερικανικής υπηρεσίας προστασίας του περιβάλλοντος εφαρμόστηκε για το έτος 2010 λόγω των διαθέσιμων στοιχείων για τις διαδρομές των φορτηγών που δόθηκαν από τον κ. Μ. Κονταξάκη. Επιλέχθηκε ένας μήνας για κάθε εποχή με βάση τις διαδρομές των απορριμματοφόρων. Συγκεκριμένα επιλέχθηκε ο μήνας με τις περισσότερες διαδρομές φορτηγών για κάθε εποχή. Επομένως, το μοντέλο εφαρμόστηκε για τους μήνες Μάρτιο (Άνοιξη), Αύγουστο (Καλοκαίρι), Σεπτέμβριο (Φθινόπωρο) και Δεκέμβριο (Χειμώνας). Οι συγκεντρώσεις στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων υπολογίζεται ως το άθροισμα των συγκεντρώσεων που προέρχονται από το μοντέλο διασποράς και των συγκεντρώσεων υποβάθρου που μετρήθηκαν στο σταθμό της Σχολής Μηχανικών περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Στο Διάγραμμα 18 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις PM_{10} στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων τις καθημερινές και τα Σαββατοκύριακα για τον μήνα Μάρτιο.





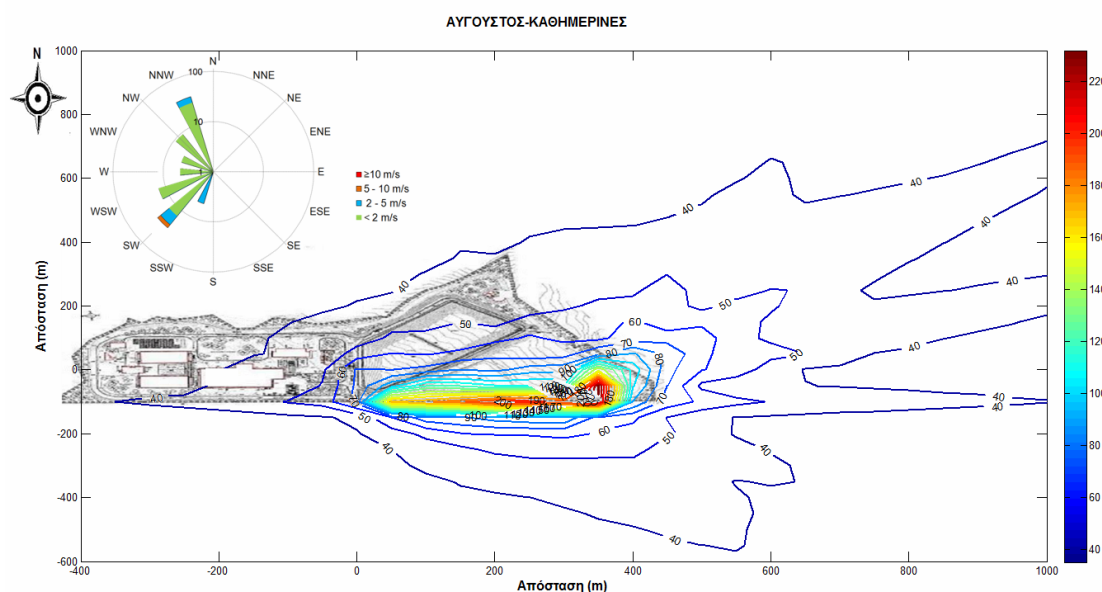
Διάγραμμα 18: Συγκεντρώσεις PM_{10} ($\mu g/m^3$) στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων τις καθημερινές και τα Σαββατοκύριακα για τον μήνα Μάρτιο.

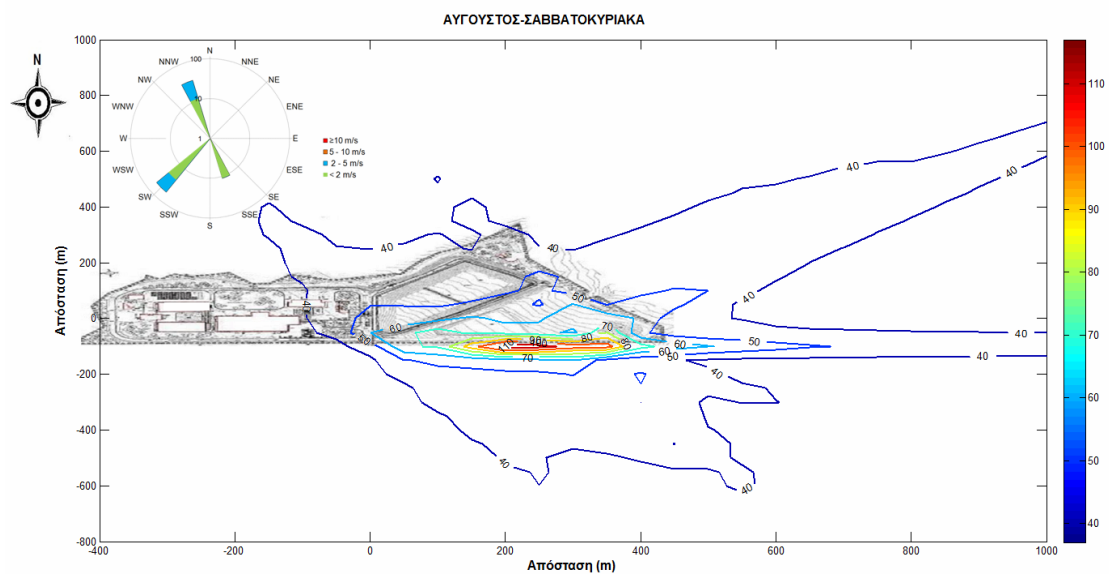
Στο Διάγραμμα 18 παρατηρείται για τον μήνα Μάρτιο ότι η υψηλότερη συγκέντρωση PM_{10} ($132 \mu g/m^3$ τις καθημερινές και $74 \mu g/m^3$ τα σαββατοκύριακα) εμφανίζεται στο χωματόδρομο που κινούνται τα φορτηγά για να εισέλθουν στο ενεργό κύτταρο του ΧΥΤ. Συγκεντρώσεις πάνω από $50 \mu g/m^3$ εμφανίζονται κοντά στο χωματόδρομο, στο κύτταρο του ΧΥΤ, στην πύλη και στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου για τις καθημερινές ενώ για τα σαββατοκύριακα συγκεντρώσεις πάνω από $50 \mu g/m^3$ εμφανίζονται κοντά στο χωματόδρομο και στο κύτταρο του ΧΥΤ.

Επομένως, περισσότερα σημεία με συγκεντρώσεις πάνω από $50 \mu g/m^3$ παρατηρούνται τις καθημερινές σε σχέση με τα σαββατοκύριακα. Για παράδειγμα, στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου η συγκέντρωση PM_{10} είναι ίση με $61 \mu g/m^3$ (πάνω από $50 \mu g/m^3$) τις καθημερινές ενώ τα σαββατοκύριακα η συγκέντρωση PM_{10} είναι ίση $47 \mu g/m^3$ (κάτω από $50 \mu g/m^3$). Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου τις καθημερινές σε σχέση με τα σαββατοκύριακα οφείλεται στην υψηλότερη ροή φορτηγών τις καθημερινές σε σχέση με τα σαββατοκύριακα. Για τον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου παρατηρούνται 17 υπερβάσεις (15 τις καθημερινές και 2 τα Σαββατοκύριακα) της θεσμοθετημένης μέσης ημερήσιας οριακής τιμής των $50 \mu g/m^3$ για τον μήνα Μάρτιο.

Για τον μήνα Αύγουστο (Διάγραμμα 19) παρατηρείται ότι η υψηλότερη συγκέντρωση PM_{10} ($232 \mu g/m^3$) εμφανίζεται στο κύτταρο του ΧΥΤΑ/ΧΥΤΥ τις καθημερινές ενώ τα σαββατοκύριακα η υψηλότερη συγκέντρωση PM_{10} ($117 \mu g/m^3$) παρατηρείται στο χωματόδρομο που κινούνται τα φορτηγά για να εισέλθουν στο κύτταρο του ΧΥΤ. Υψηλότερες συγκεντρώσεις παρατηρούνται τις καθημερινές σε σχέση με τα σαββατοκύριακα λόγω της υψηλότερης ροής φορτηγών τις καθημερινές σε σχέση με τα σαββατοκύριακα.

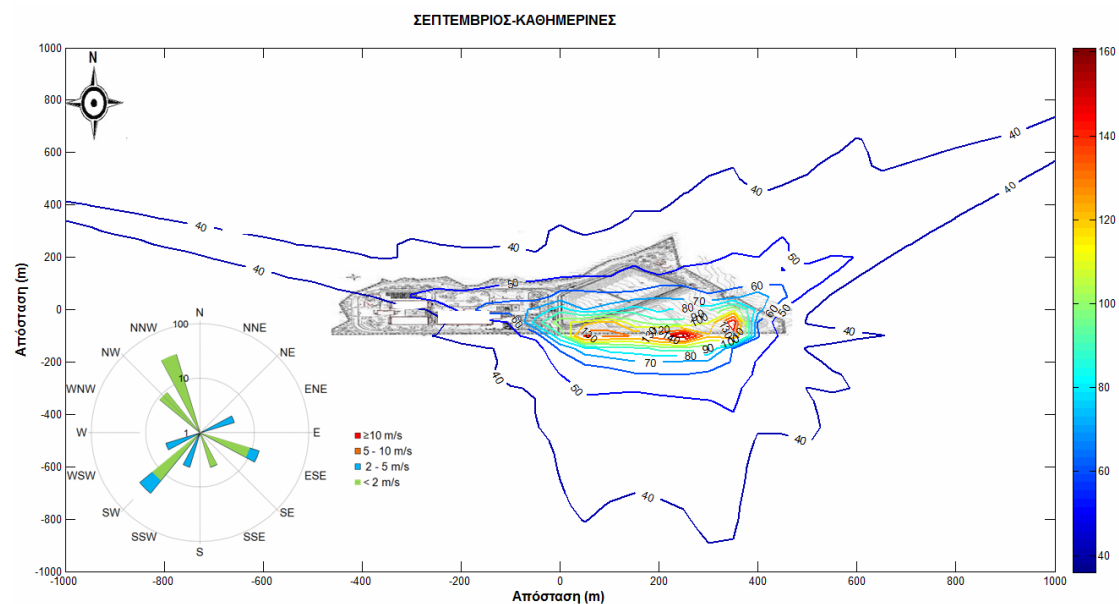
Για τον Αύγουστο κινούνται 126 φορτηγά ανά ημέρα στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων τις καθημερινές ενώ τα σαββατοκύριακα 38 φορτηγά ανά ημέρα. Από τα 126 φορτηγά που κυκλοφορούν ανά ημέρα στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων τις καθημερινές τα 90 κινούνται στο χωματόδρομο ενώ από τα 38 φορτηγά που κυκλοφορούν ανά ημέρα στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων τα σαββατοκύριακα τα 30 κινούνται στο χωματόδρομο. Συγκεντρώσεις πάνω από $50 \mu g/m^3$ εμφανίζονται κοντά στο χωματόδρομο, στο κύτταρο του ΧΥΤ, στην πύλη και στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου για τις καθημερινές ενώ για τα σαββατοκύριακα συγκεντρώσεις πάνω από $50 \mu g/m^3$ εμφανίζονται κοντά στο χωματόδρομο και στο κύτταρο του ΧΥΤ. Επομένως, τις καθημερινές παρατηρούνται περισσότερα σημεία με συγκεντρώσεις πάνω από $50 \mu g/m^3$ σε σχέση με τα σαββατοκύριακα. Επίσης, παρατηρούνται 27 υπερβάσεις (21 τις καθημερινές και 6 τα Σαββατοκύριακα) της θεσμοθετημένης μέσης ημερήσιας οριακής τιμής των $50 \mu g/m^3$ στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου για τον Αύγουστο.

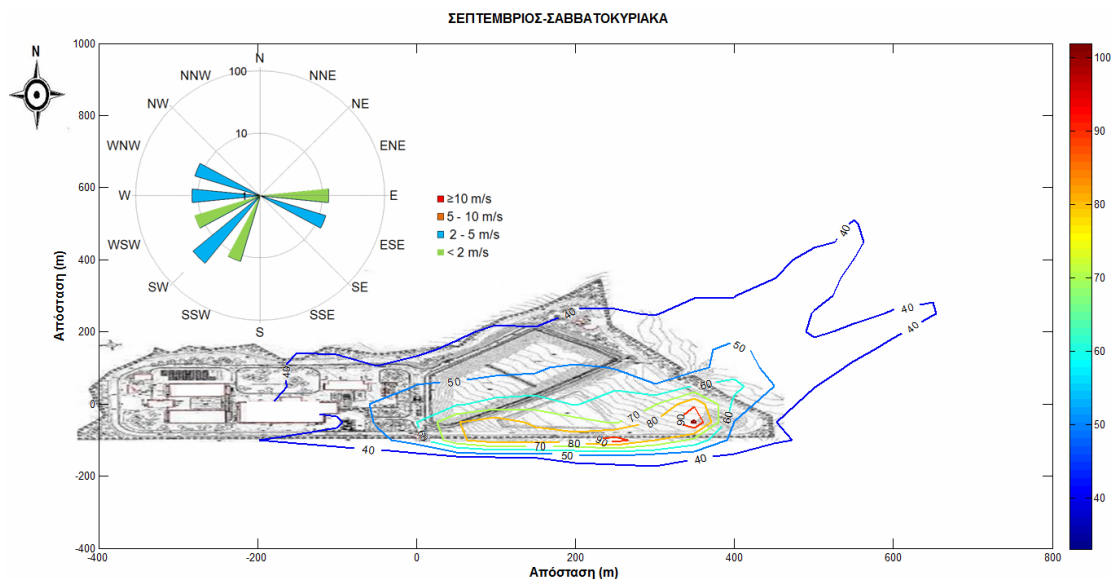




Διάγραμμα 19: Συγκεντρώσεις PM_{10} ($\mu g/m^3$) στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων τις καθημερινές και τα Σαββατοκύριακα για τον μήνα Αύγουστο.

Στο Διάγραμμα 20 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις PM_{10} στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων τις καθημερινές και τα Σαββατοκύριακα για τον μήνα Σεπτέμβριο.



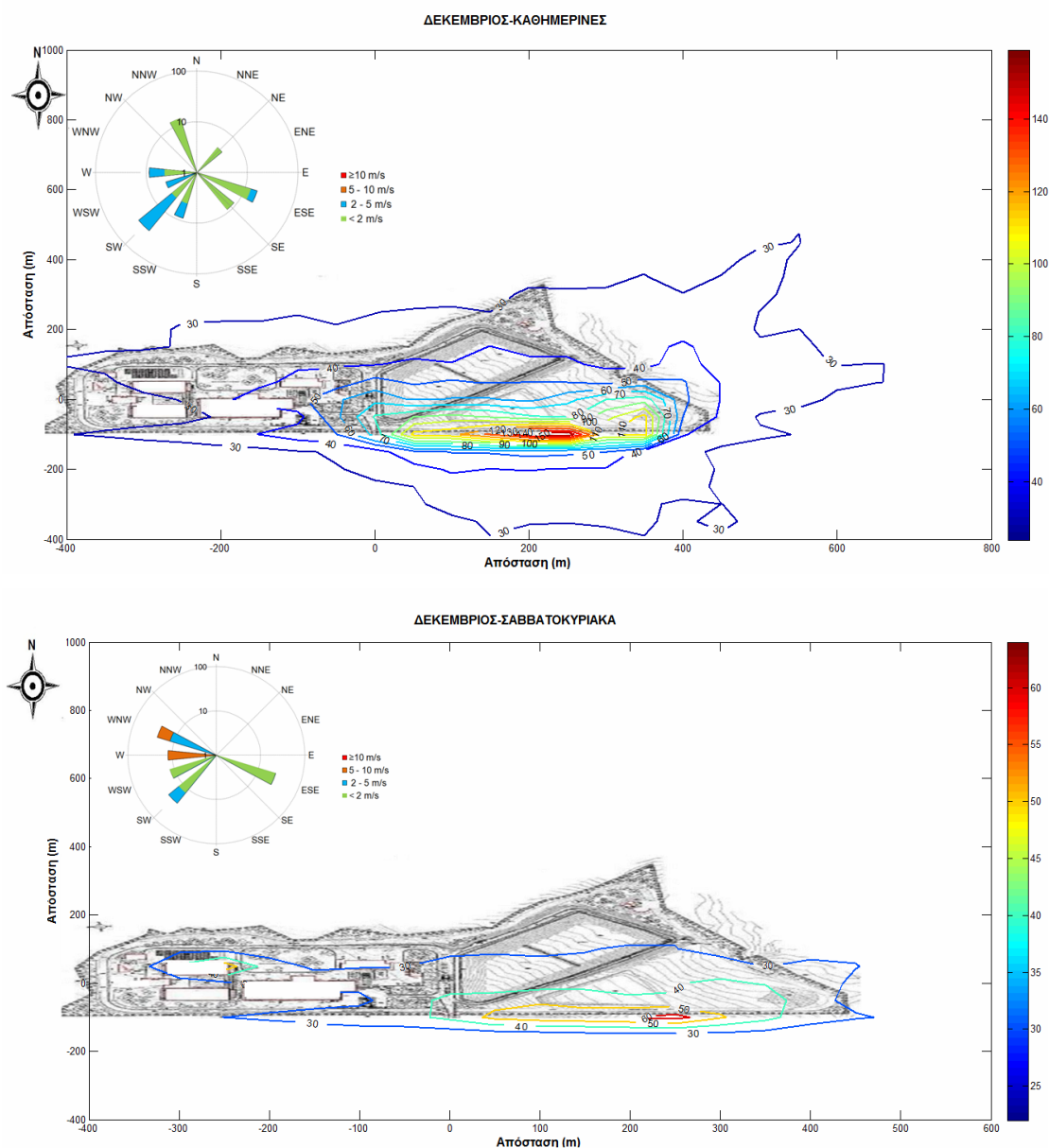


Διάγραμμα 20: Συγκεντρώσεις PM_{10} ($\mu g/m^3$) στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων τις καθημερινές και τα Σαββατοκύριακα για τον μήνα Σεπτέμβριο.

Από το Διάγραμμα 20 προκύπτει ότι η υψηλότερη συγκέντρωση PM_{10} για τον μήνα Σεπτέμβριο εμφανίζεται κοντά στο χωματόδρομο που κινούνται τα φορτηγά. Υψηλότερες συγκεντρώσεις PM_{10} παρατηρούνται τις καθημερινές ($161 \mu g/m^3$) σε σχέση με τα σαββατοκύριακα ($102 \mu g/m^3$) λόγω της υψηλότερης ροής φορτηγών τις καθημερινές σε σχέση με τα σαββατοκύριακα. Για τον Σεπτέμβριο κινούνται 111 φορτηγά ανά ημέρα στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων τις καθημερινές ενώ τα σαββατοκύριακα κινούνται 44 φορτηγά ανά ημέρα. Από τα 111 φορτηγά που κινούνται ανά ημέρα στη μονάδα διαχείριση απορριμμάτων τις καθημερινές τα 82 κινούνται στο χωματόδρομο ενώ από τα 44 φορτηγά που κυκλοφορούν ανά ημέρα στη μονάδα διαχείριση απορριμμάτων τα σαββατοκύριακα τα 33 κινούνται στο χωματόδρομο. Συγκεντρώσεις πάνω από $50 \mu g/m^3$ εμφανίζονται κοντά στην πλατεία ωρίμανσης του κομπόστ, στο χωματόδρομο, στο κύτταρο του ΧΥΤ στην πύλη, στον εξωτερικό χώρο του διοικητηρίου και στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου για τις καθημερινές ενώ για τα σαββατοκύριακα συγκεντρώσεις πάνω από $50 \mu g/m^3$ εμφανίζονται κοντά στο χωματόδρομο, στο κύτταρο του ΧΥΤ και στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου.

Επομένως, περισσότερα σημεία με συγκεντρώσεις πάνω από $50 \mu g/m^3$ παρατηρούνται τις καθημερινές σε σχέση με τα σαββατοκύριακα. Για τον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου παρατηρούνται 26 υπερβάσεις (20 τις

καθημερινές και 6 τα Σαββατοκύριακα) της θεσμοθετημένης μέσης ημερήσιας οριακής τιμής των $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ για τον Σεπτέμβριο. Οι συγκεντρώσεις PM_{10} στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων τις καθημερινές και τα Σαββατοκύριακα για τον μήνα Δεκέμβριο παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 21.



Διάγραμμα 21: Συγκεντρώσεις PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων τις καθημερινές και τα Σαββατοκύριακα για τον μήνα Δεκέμβριο.

Στο Διάγραμμα 21 παρατηρείται για τον μήνα Δεκέμβριο ότι η υψηλότερη συγκέντρωση PM_{10} ($159 \mu\text{g}/\text{m}^3$ τις καθημερινές και $64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ τα Σαββατοκύριακα) εμφανίζεται στο χωματόδρομο που κινούνται τα φορτηγά

για να εισέλθουν στο ενεργό κύτταρο του ΧΥΤ. Συγκεντρώσεις πάνω από 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ εμφανίζονται κοντά στο χωματόδρομο, στο κύτταρο του ΧΥΤ, στην πύλη και στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου για τις καθημερινές ενώ για τα σαββατοκύριακα συγκεντρώσεις πάνω από 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ εμφανίζονται κοντά στο χωματόδρομο (περισσότερα σημεία με συγκεντρώσεις πάνω από 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ τις καθημερινές σε σχέση με τα σαββατοκύριακα).

Για παράδειγμα, στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου η συγκέντρωση PM_{10} είναι ίση με 67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (πάνω από 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) τις καθημερινές ενώ τα σαββατοκύριακα η συγκέντρωση PM_{10} είναι ίση με 36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (κάτω από 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου τις καθημερινές σε σχέση με τα σαββατοκύριακα οφείλονται στην υψηλότερη ροή φορτηγών τις καθημερινές σε σχέση με τα σαββατοκύριακα. Για τον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου παρατηρούνται 17 υπερβάσεις τις καθημερινές και 0 υπερβάσεις τα Σαββατοκύριακα της θεσμοθετημένης μέσης ημερήσιας οριακής τιμής (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) για τον μήνα Δεκέμβριο.

Επομένως, θα πρέπει να ληφθούν μέτρα για τη μείωση των αιωρούμενων σωματιδίων. Τα μέτρα αυτά είναι: (1) κατασκευή ράμπας εκπλυσης τροχών απορριμματοφόρων, (2) συχνή διαβροχή και τακτική συντήρηση των δρόμων, (4) επίστρωση όπου είναι δυνατόν των επιφανειών χώματος και (5) περιμετρική φύτευση (τα φυλλώματα των δέντρων έχουν την ικανότητα κατακράτησης της σκόνης). Στο Παράρτημα Α πραγματοποιείται σύγκριση του μοντέλου διασποράς με παλαιότερες πειραματικές μετρήσεις στη μονάδα διαχείρισης απορριμάτων του Ν. Χανίων.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑΣ (ExDoM2) ΣΤΗ ΜΟΝΑΔΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ ΤΟΥ Ν. ΧΑΝΙΩΝ

12.1. Εφαρμογή μοντέλου ExDoM2 για εργαζόμενο στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου

Για την εφαρμογή του μοντέλου ExDoM2 επιλέχθηκε ο εξωτερικός χώρος ζυγιστηρίου λόγω των υψηλών συγκεντρώσεων και της ύπαρξης ηλεκτρικού δικτύου για τη σύνδεση του δειγματολήπτη Andersen. Το μοντέλο ExDoM2 εφαρμόστηκε για ένα μήνα για κάθε εποχή. Επιλέχθηκε ο μήνας με τις περισσότερες διαδρομές φορτηγών για κάθε εποχή. Το μοντέλο ExDoM2 εφαρμόστηκε για εργαζόμενο εκτιθέμενο στις ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις PM_{10} στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου κατά τις εργάσιμες μέρες (Δευτέρα - Παρασκευή) και ώρες (06:30-13:00). Τις υπόλοιπες ώρες και μέρες το εκτιθέμενο άτομο εκτίθεται σε PM_{10} συγκεντρώσεις σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους στην περιοχή υποβάθρου.

Οι εξωτερικές PM_{10} συγκεντρώσεις υποβάθρου λήφθηκαν από τον σταθμό υποβάθρου. Επιπροσθέτως, οι συγκεντρώσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν για να υπολογίσουν οι εσωτερικές PM_{10} συγκεντρώσεις χρησιμοποιώντας τον λόγο εσωτερική/εξωτερική PM_{10} συγκέντρωση ($\approx 0,7$). Ο λόγος εσωτερική/ εξωτερική PM_{10} συγκέντρωση λήφθηκε από πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από τη Δρ. Β. Αλεξανδροπούλου σε ένα διαμέρισμα (απουσία εσωτερικών πηγών) που βρίσκεται σε κατοικημένη περιοχή στην περιοχή υποβάθρου (Αλεξανδροπούλου, 2010). Το αποτέλεσμα αυτό είναι σε συμφωνία με τη μελέτη των Morawska και Salthammer (2003). Οι Morawska και Salthammer (2003) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι για τα φυσικά αεριζόμενα κτίρια (απουσία εσωτερικών πηγών) ο λόγος εσωτερική/ εξωτερική PM_{10} συγκέντρωση κυμαίνεται από 0,5 έως 0,98 με μέση τιμή 0,7.

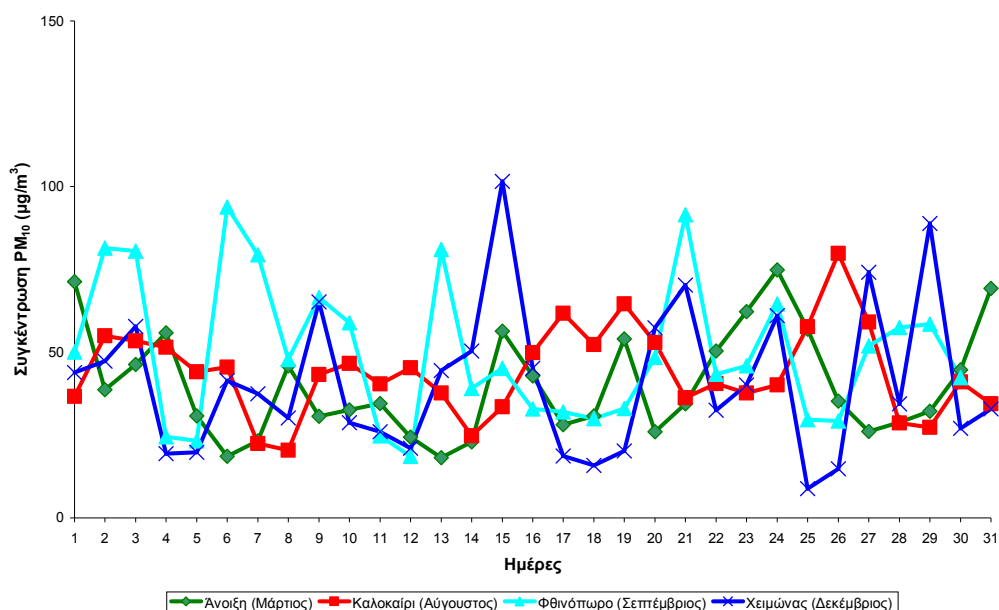
Το σενάριο έκθεσης/δραστηριότητας του εργαζομένου στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου παρουσιάζεται στον Πίνακα 19.

Πίνακας 19 :Σενάριο δραστηριότητας εκτιθέμενου ατόμου.

Δραστηριότητα	Ώρες παραμονής στο περιβάλλον έκθεσης
Ύπνος (εσωτερικός χώρος-Σπίτι)	23:00-07:00
Ήπια Εργασία (**εξωτερικός χώρος ζυγιστηρίου)	07:00*-13:00
Ανάπαυση (εσωτερικός χώρος-Σπίτι)	13:00-16:00
Ήπια εργασία (εσωτερικός χώρος-Σπίτι)	16:00-18:00
Ήπια εργασία (εξωτερικός χώρος-περιοχή υποβάθρου)	18:00-21:00
Ανάπαυση (εσωτερικός χώρος-Σπίτι)	21:00-23:00

*Στρογγυλοποιήθηκε από 06:30 σε 07:00, ** τα σαββατοκύριακα ο εργαζόμενος δεν εργάζεται στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου βρίσκεται σε εξωτερικό χώρο στην περιοχή υποβάθρου.

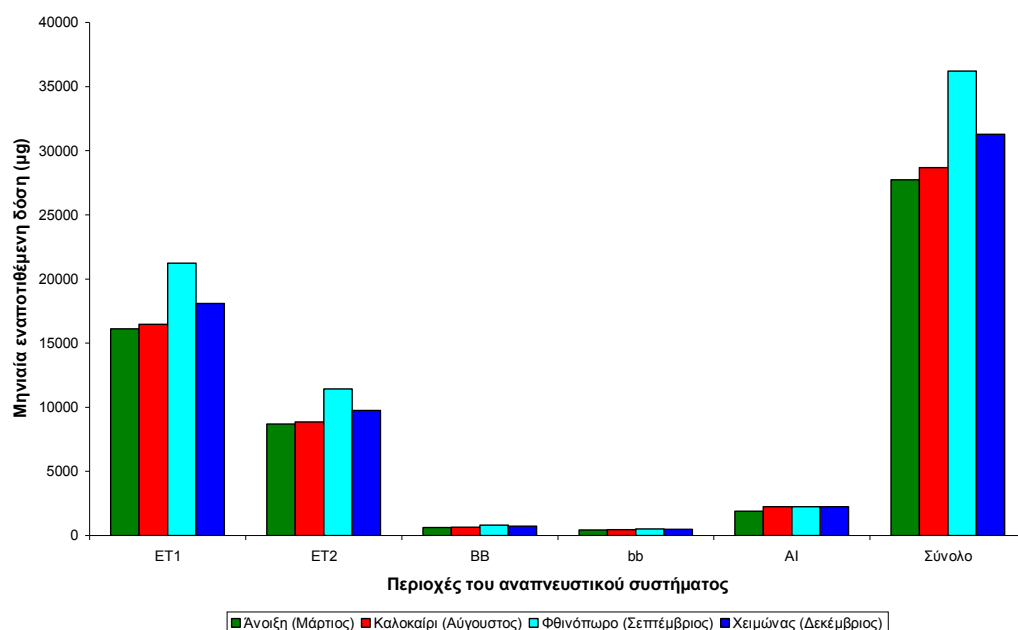
Στο Διάγραμμα 22 παρουσιάζονται οι ημερήσιες συγκεντρώσεις έκθεσης PM₁₀ των εργαζομένων με βάση το σενάριο έκθεσης/δραστηριότητας του Πίνακα 19.



Διάγραμμα 22: Ημερήσιες συγκεντρώσεις έκθεσης PM₁₀ (μg/m³) των εργαζομένων με βάση το σενάριο έκθεσης/δραστηριότητας του Πίνακα 19.

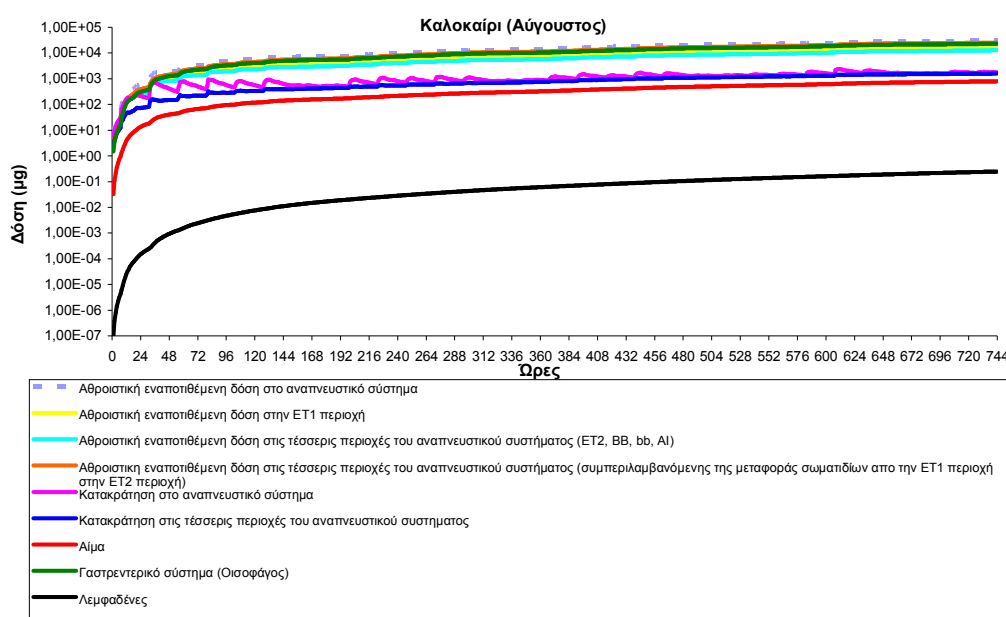
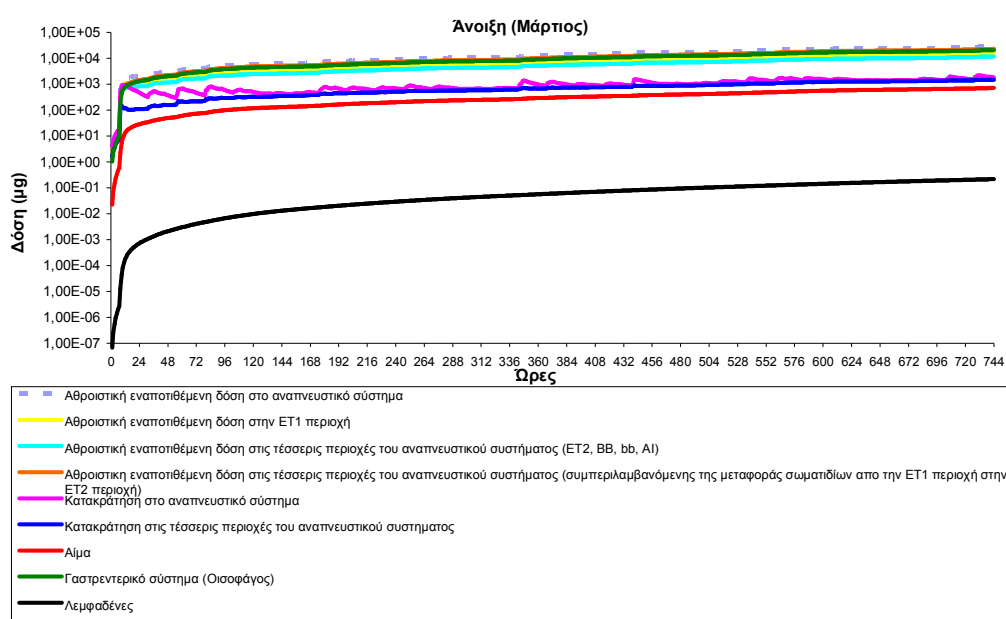
Στο Διάγραμμα 22 παρατηρούνται 9 υπερβάσεις της θεσμοθετημένης μέσης ημερήσιας οριακής τιμής των $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ για το Μάρτιο, 10 υπερβάσεις για τον Αύγουστο, 13 υπερβάσεις για τον Σεπτέμβριο και 9 υπερβάσεις για τον Δεκέμβριο. Επίσης δεδομένα κατανομή μεγέθους σωματιδίων απαιτούνται από το μοντέλο ExDoM2. Η κατανομή μεγέθους σωματιδίων παίζει σημαντικό ρόλο για τον καθορισμό της περιοχής εναπόθεσης στο αναπνευστικό σύστημα. Για αυτόν τον λόγο πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις με τον προσκρουστήρα Andersen στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τον προσκρουστήρα Andersen στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου παρουσιάζονται στην Ενότητα 8.4.3. Για την περιοχή υποβάθρου η κατανομή μεγέθους λήφθηκε από πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από τον Δρ. Η. Κοπανάκη (Παράρτημα Ε).

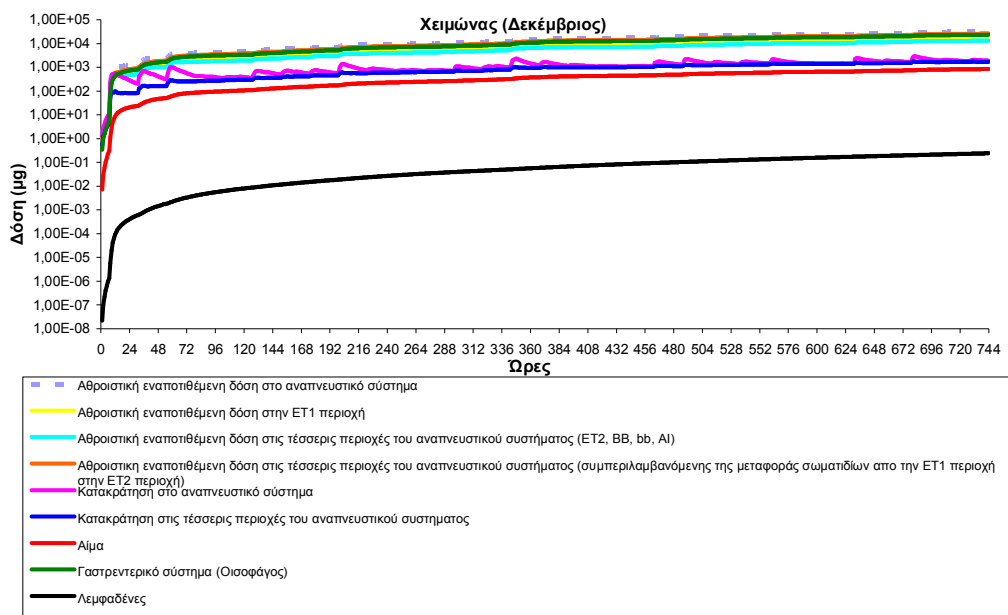
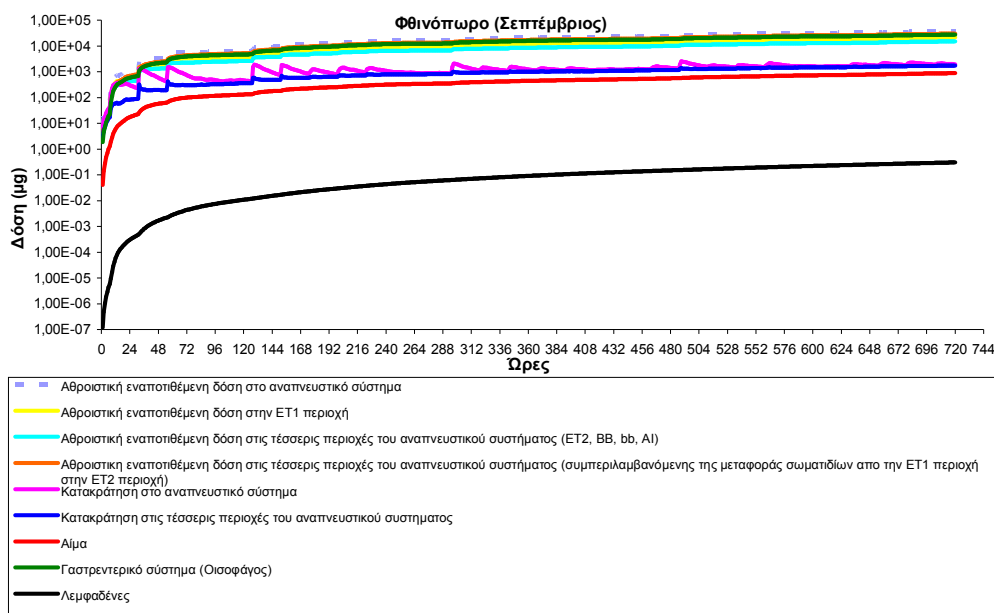
Με βάση όλα τα παραπάνω υπολογίσαμε την αθροιστική μηνιαία εναποτιθέμενη δόση στο αναπνευστικό σύστημα. Τα αποτελέσματα για την αθροιστική μηνιαία εναποτιθέμενη δόση PM_{10} για έναν ενήλικα άνδρα που εργάζεται στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου και ακολουθεί το σενάριο έκθεσης/δραστηριότητας του Πίνακα 19 απεικονίζονται στο Διάγραμμα 23.



Διάγραμμα 23: Αθροιστική μηνιαία εναποτιθέμενη δόση στις πέντε περιοχές του αναπνευστικού συστήματος ενός ενήλικα άνδρα που εργάζεται στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου.

Στο Διάγραμμα 23 παρατηρείται υψηλότερη δόση στις περιοχές ET₁ και ET₂. Αυτό οφείλεται στην έκθεση του ενήλικα άνδρα που εργάζεται στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου σε χονδρά σωματίδια. Τα χονδρά σωματίδια εναποτίθενται κυρίως στις άνω περιοχές της αναπνευστικής οδού ενώ τα λεπτά σωματίδια διεισδύουν βαθύτερα στους πνεύμονες και μπορούν να φτάσουν στην κυψελιδική περιοχή των εκτιθέμενων ατόμων (Milford κ.ά. 2013). Στο Διάγραμμα 24 παρουσιάζεται η αθροιστική εναποτιθέμενη δόση των PM₁₀ στο αναπνευστικό σύστημα, η κατακράτηση/συσσώρευση τους και η μεταφορά τους στον οισοφάγο, στους λεμφαδένες και στο αίμα.





Διάγραμμα 24: Η αθροιστική εναποτιθέμενη δόση στο αναπνευστικό σύστημα, η κατακράτηση στο αναπνευστικό σύστημα, η μάζα των σωματιδίων που μεταφέρεται στον οισοφάγο, στους λεμφαδένες και απορροφάται στο αίμα (μέτριος ρυθμός απορρόφησης).

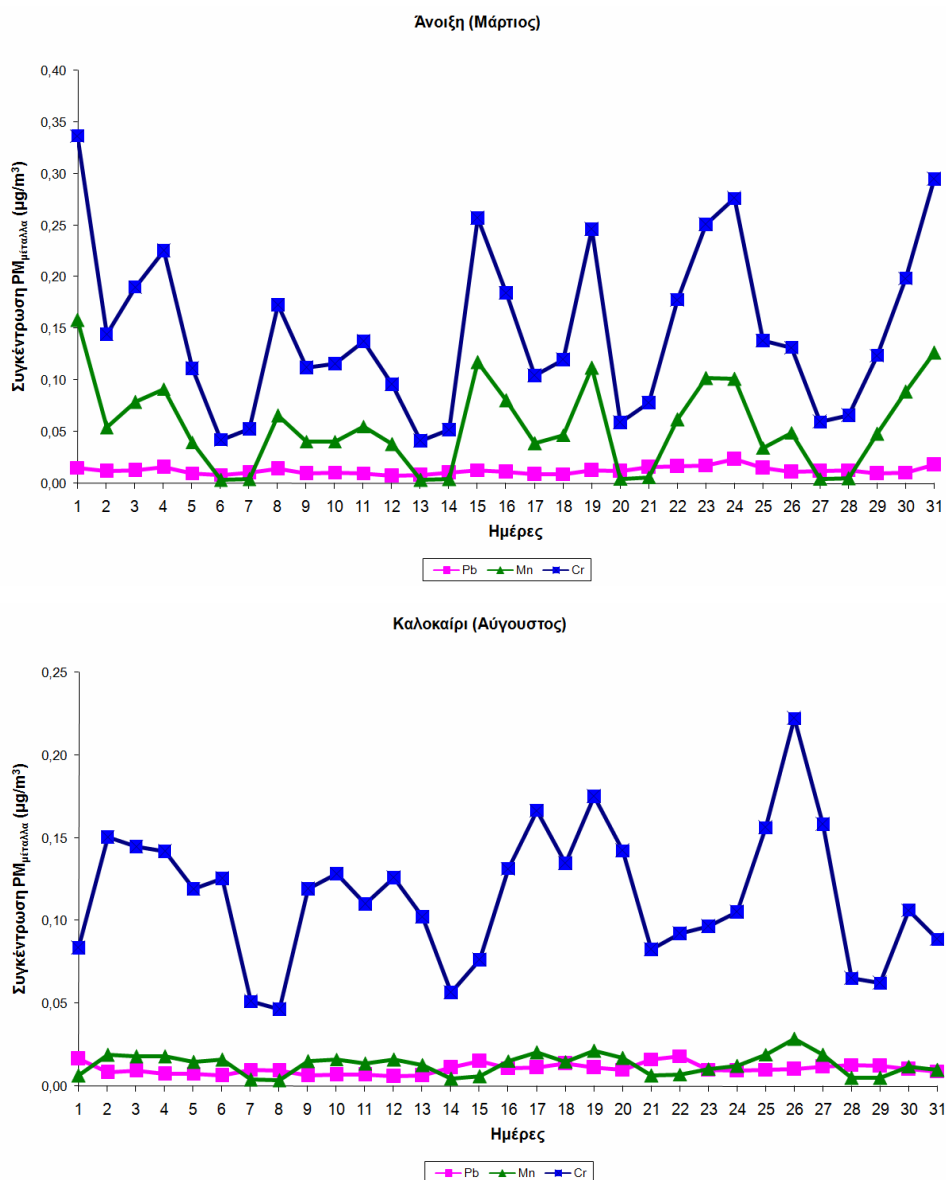
Παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη επιβάρυνση στο αναπνευστικό σύστημα ενός ενήλικα άνδρα που εργάζεται στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου εμφανίζεται τον μήνα Σεπτέμβριο. Αυτό συμβαίνει λόγω της υψηλής συγκέντρωσης PM_{10} στον εξωτερικό χώρο ζυγιστηρίου για τον μήνα Σεπτέμβριο και ως εκ τούτου της υψηλής εργασιακής δόσης. Επομένως, θα αναλυθούν τα αποτελέσματα του Σεπτεμβρίου. Στο Διάγραμμα 24

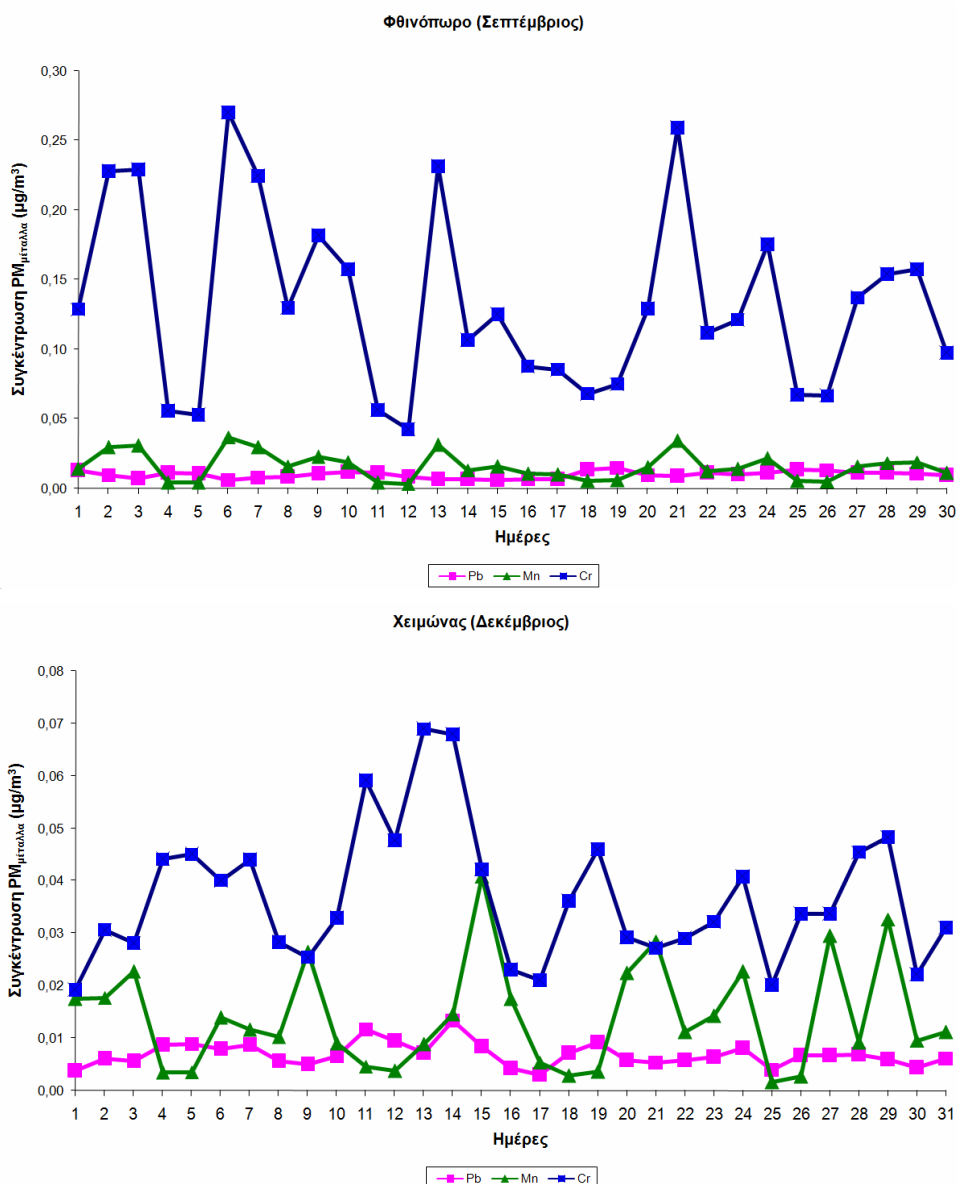
παρατηρείται ότι από τα $3,62 \times 10^4$ μg των PM_{10} που έχουν εναποτεθεί στο τέλος του μήνα στο αναπνευστικό σύστημα του εργαζομένου, τα $2,12 \times 10^4$ μg (59%) έχουν εναποτεθεί στην ET_1 περιοχή (στην ET_1 περιοχή δεν πραγματοποιείται απορρόφηση σωματιδίων στο αίμα) και τα υπόλοιπα $1,50 \times 10^4$ μg (41%) έχουν εναποτεθεί στις τέσσερις περιοχές (ET_2 , BB, bb, AI) του αναπνευστικού συστήματος (στις τέσσερις περιοχές πραγματοποιείται απορρόφηση σωματιδίων στο αίμα).

Από τα $2,12 \times 10^4$ μg που έχουν εναποτεθεί στην ET_1 περιοχή, τα $6,03 \times 10^3$ μg (28%) καθαρίζονται από την ET_1 περιοχή με φτέρνισμα, φύσημα της μύτης και $1,50 \times 10^4$ μg (71%) μεταφέρονται στην ET_2 περιοχή. Τα υπόλοιπα $2,19 \times 10^2$ μg (1%) παραμένουν στην ET_1 περιοχή. Επομένως, η δόση στις τέσσερις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος αυξήθηκε από $1,50 \times 10^4$ σε $3,00 \times 10^4$ μg λόγω της μεταφοράς σωματιδίων ($1,50 \times 10^4$ μg) από την ET_1 περιοχή στην ET_2 περιοχή. Παρατηρείται στο Διάγραμμα 24 ότι από τα $3,00 \times 10^4$ μg που έχουν εναποτεθεί στις τέσσερις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος (συμπεριλαμβανόμενης της μεταφοράς σωματιδίων από την ET_1 περιοχή στην ET_2 περιοχή), τα $2,74 \times 10^4$ μg (91%) μεταφέρονται στον οισοφάγο (γαστρεντερικό σύστημα) και $8,81 \times 10^2$ μg (3%) απορροφούνται στο αίμα (μέτριος ρυθμός απορρόφησης στο αίμα). Το υπόλοιπο 6% παραμένει στις τέσσερις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν χημικές αναλύσεις για την περιεκτικότητα των PM_{10} σε μέταλλα στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου. Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων παρουσιάζονται στην Ενότητα 8.4.4. Τα ποσοστά μάζας κυμαίνονται από 0 έως 0,54 % για το Cr, από 0,02 έως 0,28 % για το Mn, από <ορίου ανίχνευσης έως 0,01% για τον Pb ανάλογα με την εποχή. Τα χαμηλότερα ποσοστά παρατηρούνται κατά τη διάρκεια του χειμώνα και της δειγματοληψίας με βροχόπτωσης. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι το As και το Cd δεν εντοπίστηκαν σε κανένα από τα δείγματα (κάτω από το όριο ανίχνευσης). Τις ώρες που ο εργαζόμενος δεν βρίσκεται στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου αλλά βρίσκεται στην περιοχή υποβάθρου χρησιμοποιήθηκαν τα ποσοστά μάζας του Pb, Cr και Mn από τις πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από τον Δρ. Η. Κοπανάκη.

Με βάση τις συγκεντρώσεις PM_{10} , τα ποσοστά μάζας για το κάθε μέταλλο, και το σενάριο έκθεσης/δραστηριότητας του Πίνακα 19 υπολογίστηκαν οι συγκεντρώσεις έκθεσης των εργαζομένων σε αιωρούμενα σωματίδια που περιέχουν μόλυβδο, μαγγάνιο και χρώμιο (PM_{Pb} , PM_{Mn} , και PM_{Cr}). Στο Διάγραμμα 25 παρουσιάζονται οι ημερήσιες συγκεντρώσεις έκθεσης των εργαζομένων σε PM_{Pb} , PM_{Mn} , και PM_{Cr} .



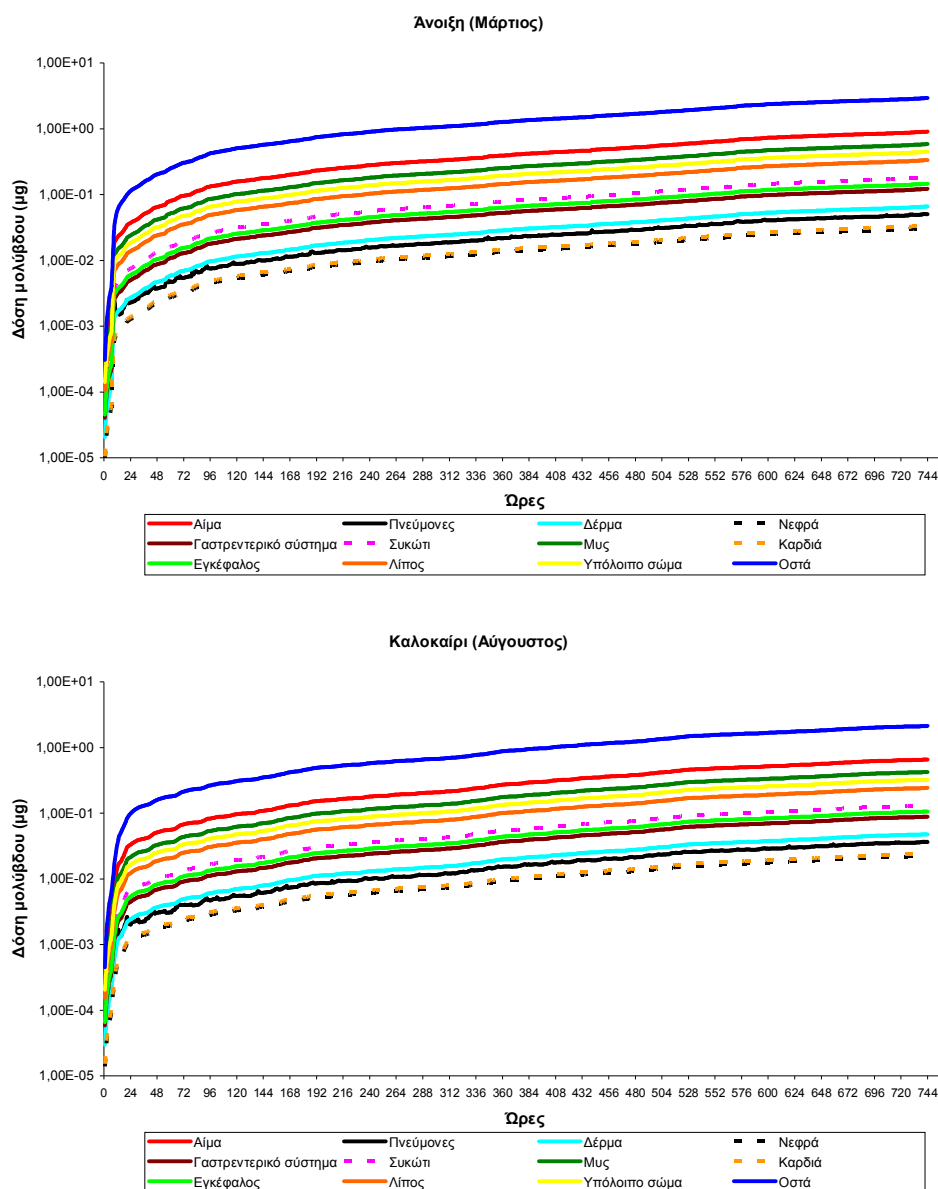


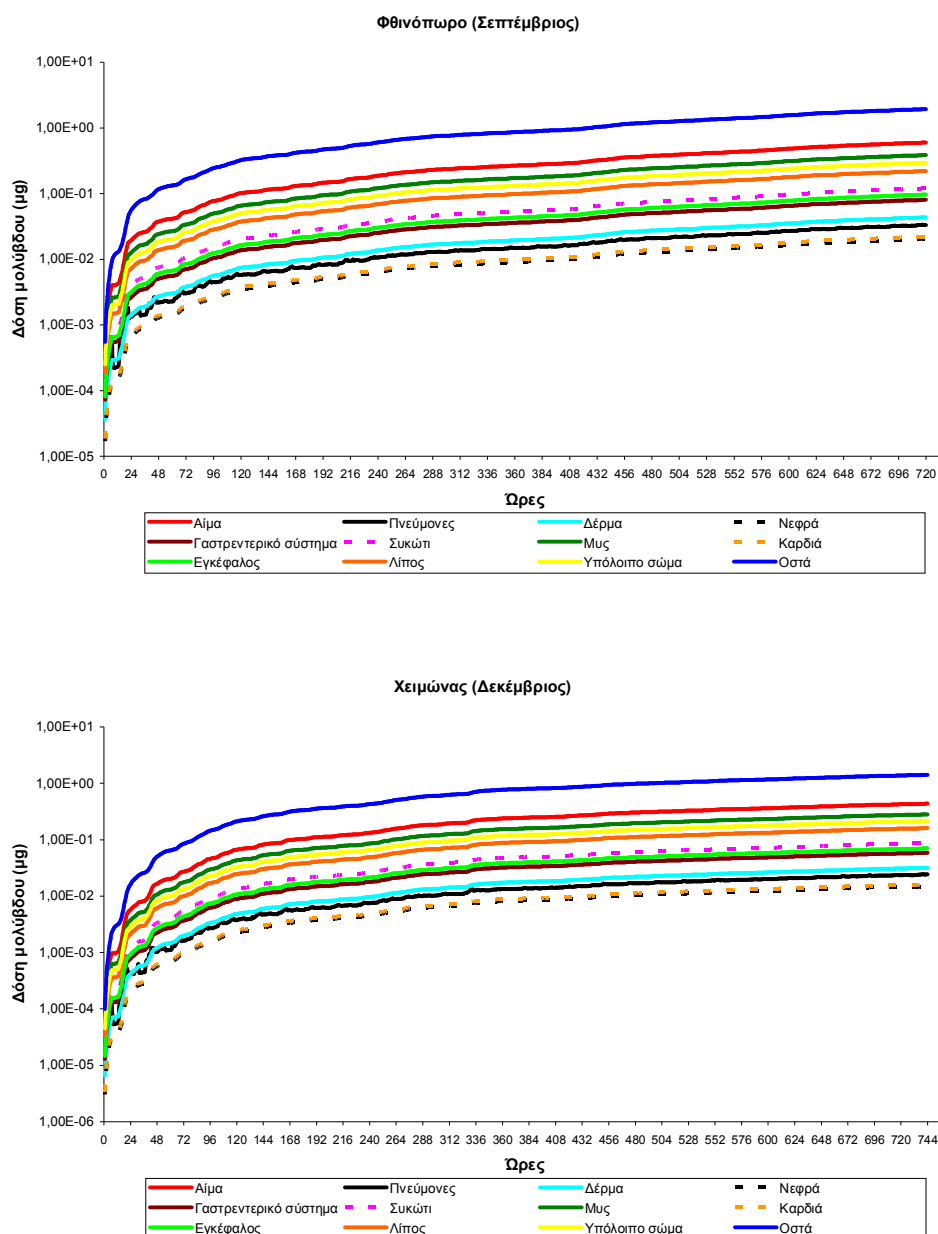
Διάγραμμα 25: Ημερήσιες συγκεντρώσεις έκθεσης των εργαζομένων σε PM_{Pb} , PM_{Mn} , και PM_{Cr} ($\mu g/m^3$) με βάση το σενάριο έκθεσης/δραστηριότητας του Πίνακα 19.

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας έχει εισηγηθεί κατευθυντήριες τιμές για την παρουσία βαρέων μετάλλων στα αιωρούμενα σωματίδια. Οι συγκεντρώσεις έκθεσης των εργαζομένων σε PM_{Pb} , PM_{Mn} , και PM_{Cr} είναι κάτω από τις κατευθυντήριες τιμές που προτείνει ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO, 2000) για την προστασία της ανθρώπινης υγείας. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας προτείνει κατευθυντήρια τιμή για το Mn και τον Pb ίση με $0,15 \mu g/m^3$ και $0,5 \mu g/m^3$, αντίστοιχα. Για το Cr δεν έχει προταθεί κάποια κατευθυντήρια τιμή από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας. Για την εφαρμογή του μοντέλου ExDoM2 εκτός από δεδομένα συγκέντρωσης

χρειάζονται και δεδομένα κατανομή μεγέθους για τα PM_{Pb} , PM_{Cr} , και PM_{Mn} . Πειραματικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου παρουσιάζονται στην Ενότητα 8.4.3.

Για την περιοχή υποβάθρου (για τις ώρες που ο εργαζόμενος δεν βρίσκεται στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου) η κατανομή μεγέθους λήφθηκε από πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από τον Δρ. Η. Κοπανάκη (Παράρτημα Ε). Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του μοντέλου ExDoM2 για έκθεση εργαζομένου σε PM_{Pb} , PM_{Cr} , και PM_{Mn} απεικονίζονται στα παρακάτω διαγράμματα. Στο Διάγραμμα 26 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τον Pb.

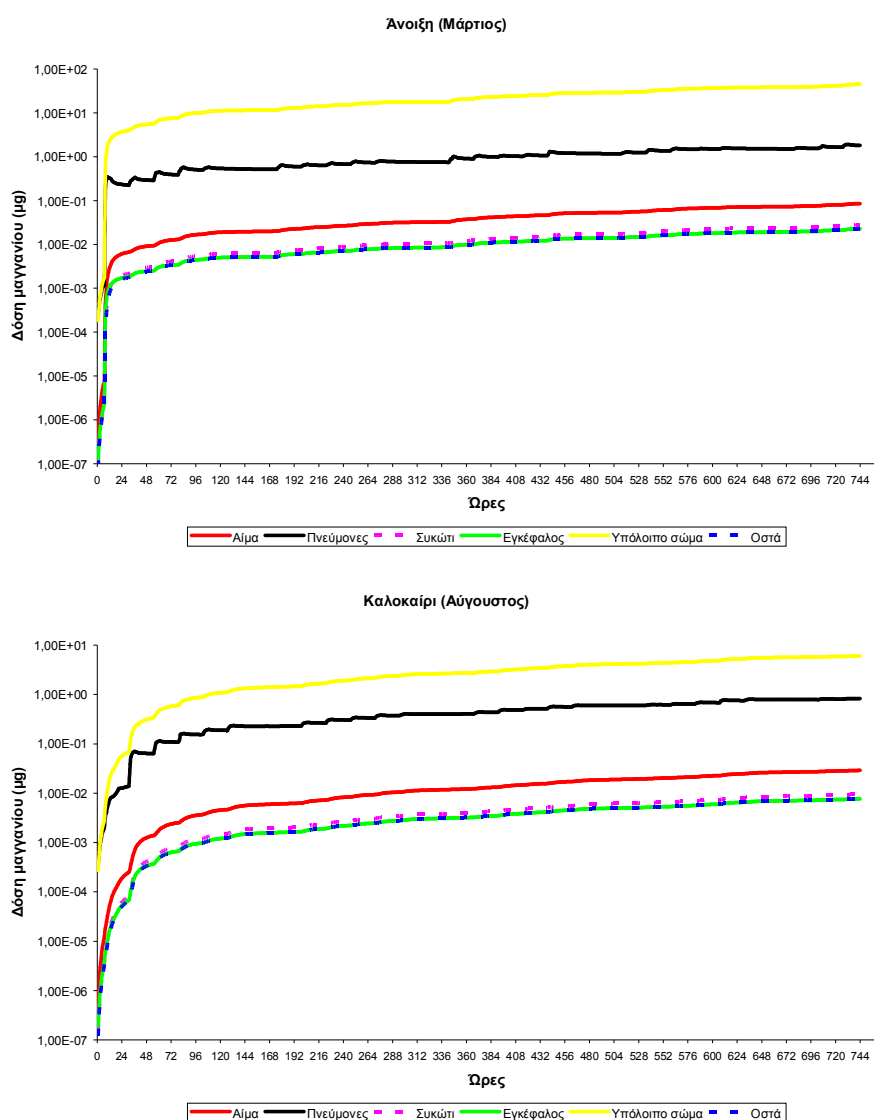


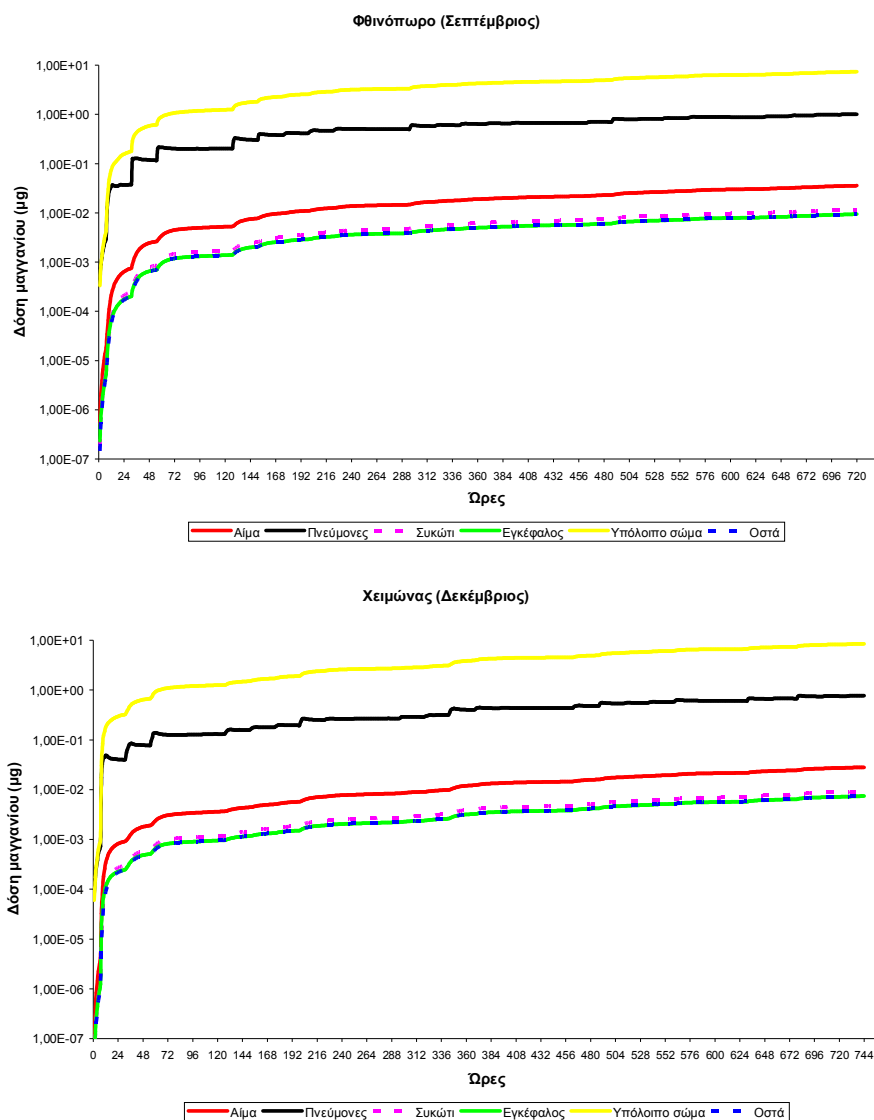


Διάγραμμα 26: Δόση μολύβδου (μg) στο ανθρώπινο σώμα ενός ενήλικα άνδρα που εργάζεται στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου.

Με βάση το Διάγραμμα 26 τα όργανα κατατάσσονται ως προς τη δόση Pb κατά την ακόλουθη σειρά: Οστά > Αίμα > Μύες > Υπόλοιπο σώμα > Λίπος > Συκώτι > Εγκέφαλος > Γαστρεντερικό σύστημα > Δέρμα > Πνεύμονες > Καρδιά > Νεφροί. Επομένως, η μεγαλύτερη συσσώρευση για τον Pb εμφανίζεται στα οστά (2,9 μg για τον Μάρτιο, 2,1 μg για τον Αύγουστο, 1,9 μg για τον Σεπτέμβριο και 1,4 μg για τον Δεκέμβριο) και στο αίμα (0,9 μg για τον Μάρτιο, 0,7 μg για τον Αύγουστο, 0,6 μg για τον Σεπτέμβριο και 0,4 μg για τον Δεκέμβριο). Αυτό οφείλεται στο ότι ο μέγιστος συντελεστής κατανομής

ιστού/αίματος (tissue/blood partition coefficient) για τον Pb παρατηρείται στα οστά (1000). Ο συντελεστής κατανομής ιστού/αίματος σχετίζεται με την κατακράτηση του μετάλλου στον ιστό. Επομένως, παρόλο που ο ρυθμός ροής του αίματος στα οστά είναι χαμηλός, η δόση του Pb στα οστά είναι υψηλή λόγω του υψηλού συντελεστή κατανομής ιστού/αίματος. Επιπλέον, η υψηλή τιμή Pb στο αίμα οφείλεται στο γρήγορο ρυθμό απορρόφησης (fast absorption) του στο αίμα. Η IPCS (1995) αναφέρει ότι τα οστά περιέχουν τη μεγαλύτερη ποσότητα Pb στο σώμα ενώ η παρουσία Pb στο αίμα αντανακλά την πρόσφατη έκθεση του ανθρώπου σε Pb. Παρομοίως, ο WHO (2013) αναφέρει ότι ο Pb αποθηκεύεται στα δόντια και στα οστά και συσσωρεύεται με την πάροδο του χρόνου. Επίσης, ο WHO (2013) αναφέρει ότι η έκθεση του ανθρώπου σε Pb αξιολογείται με μέτρηση του Pb στο αίμα. Τα αποτελέσματα για το Μη παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 27.



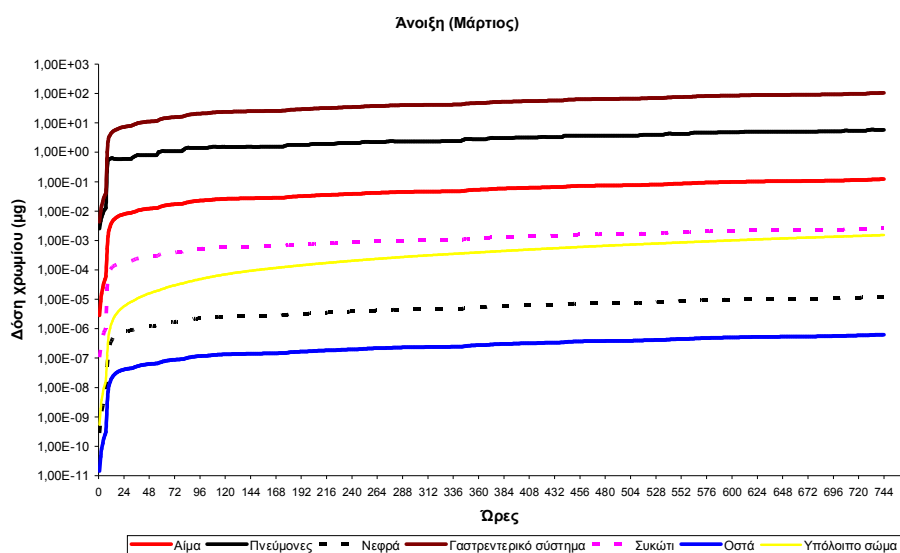


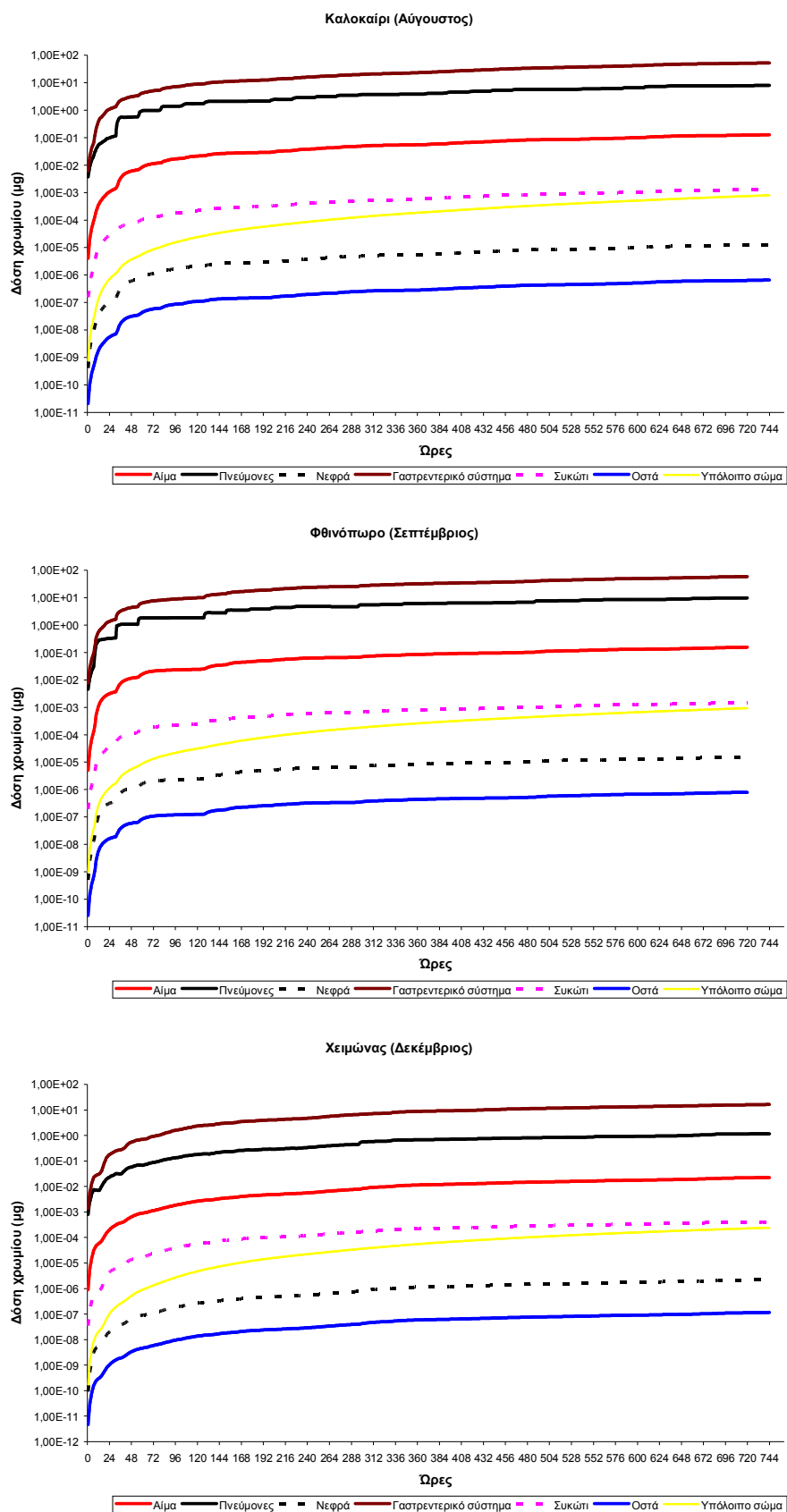
Διάγραμμα 27: Δόση μαγγανίου (μg) στο ανθρώπινο σώμα ενός ενήλικα άνδρα που εργάζεται στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου.

Τα όργανα κατατάσσονται ως προς τη δόση Mn κατά την ακόλουθη σειρά (Διάγραμμα 27): Υπόλοιπο σώμα > Πνεύμονες > Αίμα > Συκώτι > Εγκέφαλος \approx Οστά. Για το Mn η μεγαλύτερη συσσώρευση εμφανίζεται στο υπόλοιπο σώμα και στους πνεύμονες. Η υψηλή τιμή στους πνεύμονες έρχεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα του WHO (1999b). Ο WHO (1999b) αναφέρει ότι τα κύρια συστήματα οργάνων που προσβάλλονται, λόγω της έκθεσης μέσω της εισπνοής σε PM_{Mn} είναι οι πνεύμονες και το νευρικό σύστημα. Η προσβολή του μαγγανίου στο νευρικό σύστημα οφείλεται στη μεταφορά PM_{Mn} από την ET_1 περιοχή στον εγκέφαλο. Αντίθετα από το Mn το οποίο λαμβάνεται από τα τρόφιμα, το Mn το οποίο εισπνέεται μεταφέρεται

στον εγκέφαλο. Το Mn μπορεί να οδηγήσει σε πολλαπλά νευρολογικά προβλήματα και είναι ένας γνωστός κίνδυνος υγείας για τους ανθρώπους που εισπνέουν PM_{Mn} .

Όσον αφορά στην υψηλή τιμή Mn στο υπόλοιπο σώμα, οφείλεται στο ότι περιλαμβάνει το γαστρεντερικό σύστημα. Το γαστρεντερικό σύστημα στο PBPK μοντέλο για το Mn ομαδοποιήθηκε μαζί με το υπόλοιπο σώμα λόγω της έλλειψης στοιχείων (π.χ. συντελεστής κατανομή γαστρεντερικού συστήματος/αίματος για το Mn). Η υψηλή τιμή στο γαστρεντερικό σύστημα και επομένως στο υπόλοιπο σώμα, οφείλεται στην ύπαρξη κυρίως χονδρών σωματιδίων (100% για τον Μάρτιο, 48% για τον Αύγουστο, 48% για τον Σεπτέμβριο και 78% για τον Δεκέμβριο) για τα PM_{Mn} στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου. Τα χονδρά σωματίδια εναποτίθενται κυρίως στην εκτός θώρακα περιοχή και στη συνέχεια μεταφέρονται μέσω της βλέννας στον οισοφάγο (γαστρεντερικό σύστημα). Συγκεκριμένα, η δόση Mn στο υπόλοιπο σώμα οφείλεται 95-98% λόγω της κατάποσης τους μέσω της βλέννας στον οισοφάγο και 2-5% λόγω της μεταφοράς Mn από το αίμα στο υπόλοιπο σώμα. Επομένως, η υψηλή δόση Mn στο υπόλοιπο σώμα οφείλεται κυρίως λόγω της κατάποσης τους μέσω της βλέννας στον οισοφάγο. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το Cr





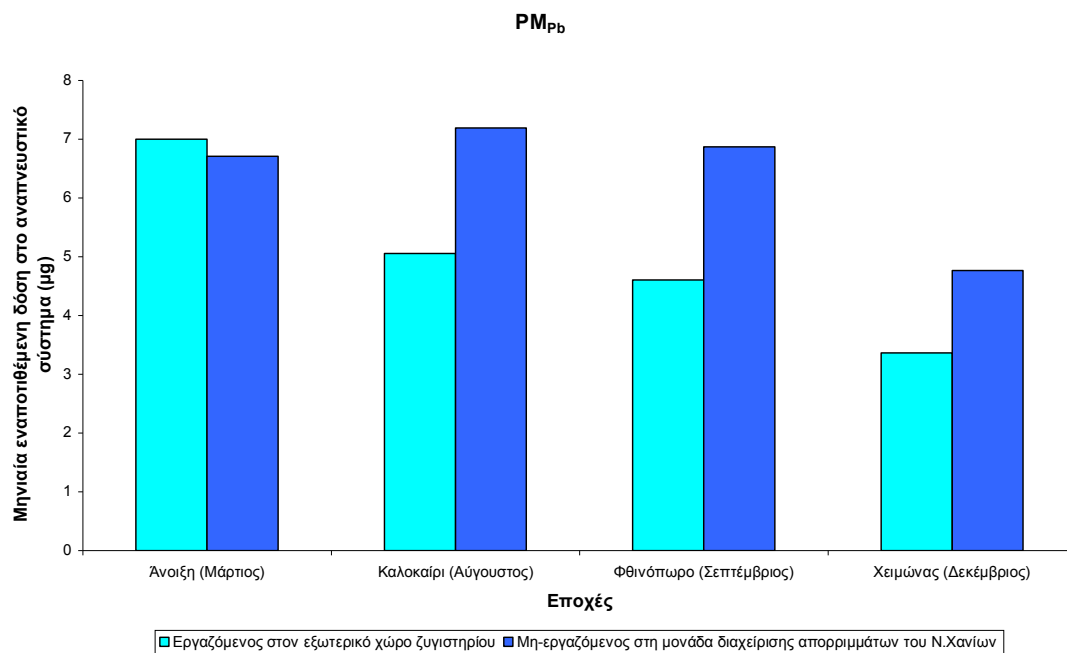
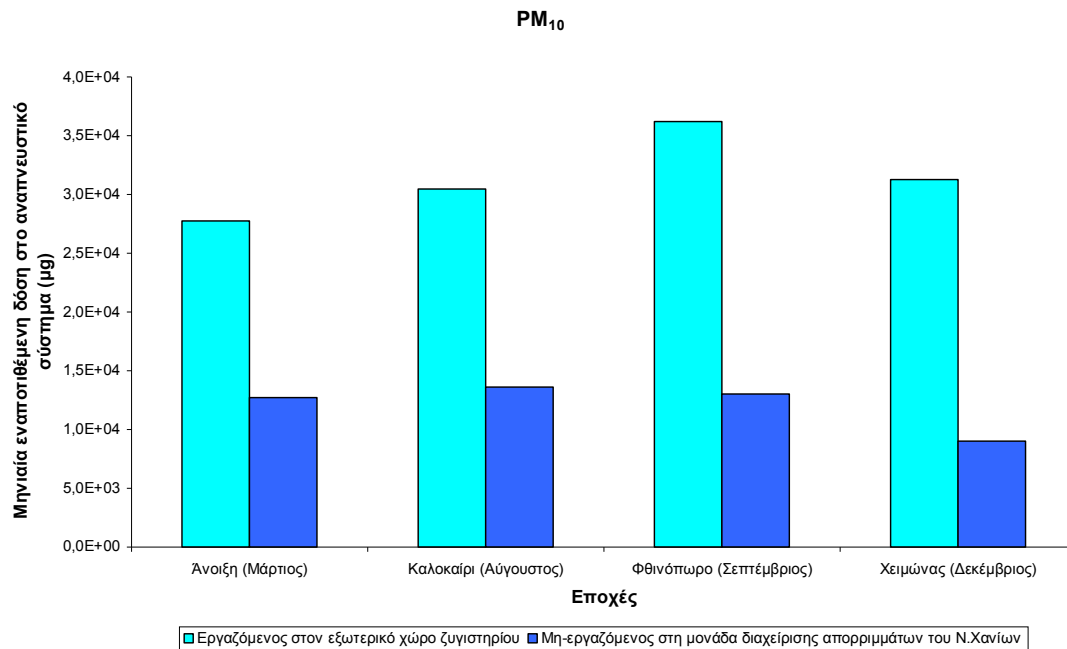
Διάγραμμα 28: Δόση χρωμίου (μg) στο ανθρώπινο σώμα ενός ενήλικα άνδρα που εργάζεται στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου.

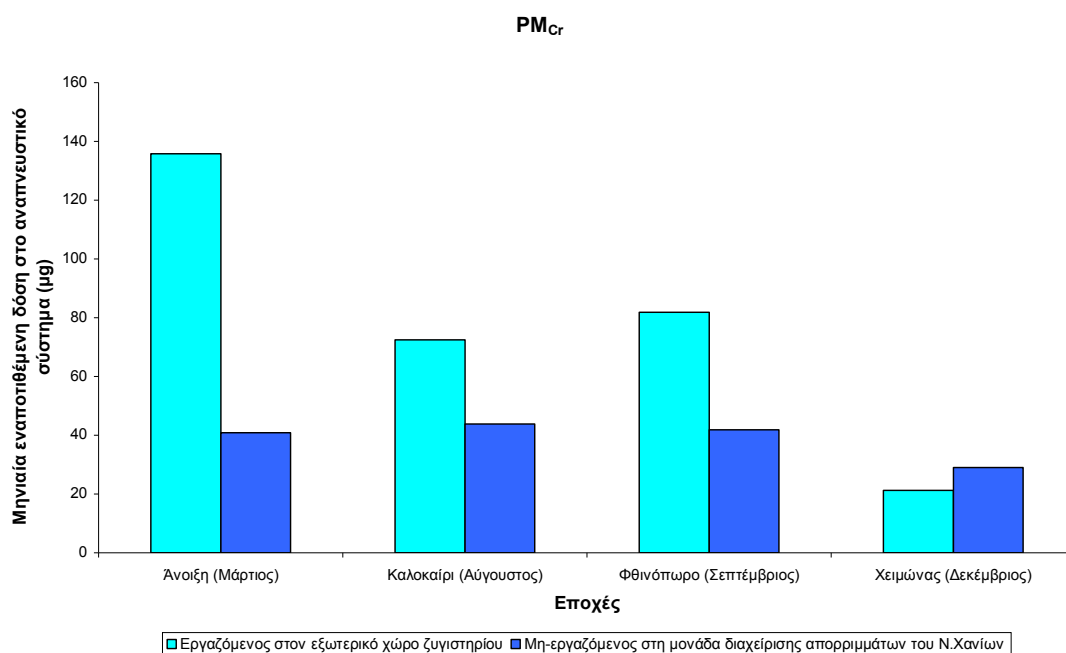
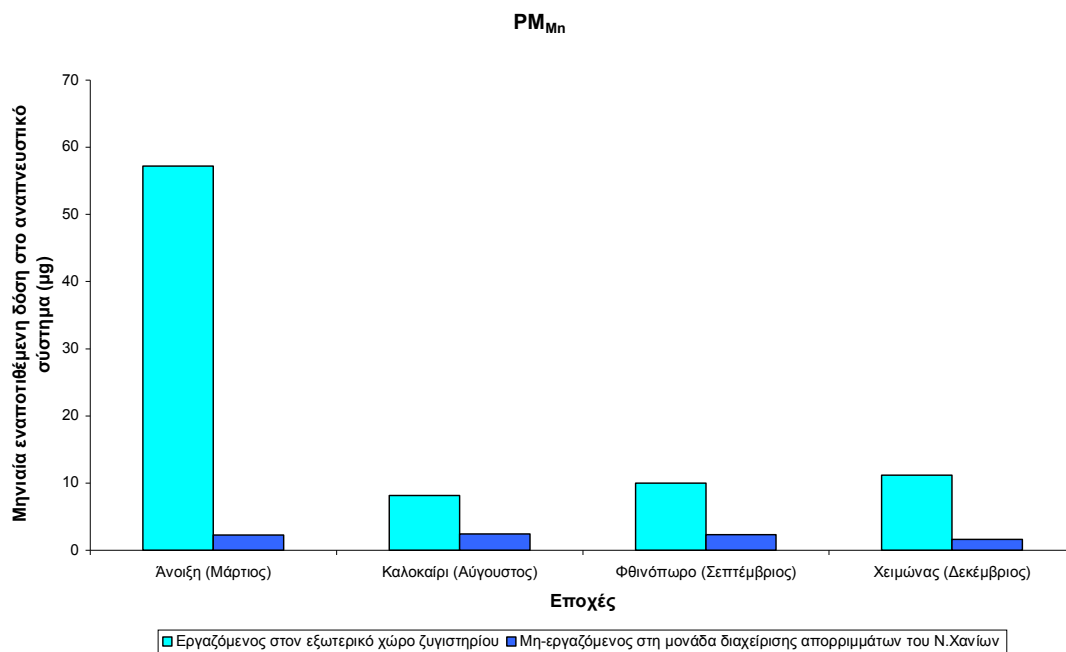
Με βάση το Διάγραμμα 28 τα όργανα κατατάσσονται ως προς τη δόση Cr κατά την ακόλουθη σειρά: Γαστρεντερικό σύστημα > Πνεύμονες > Αίμα > Συκώτι > Υπόλοιπο σώμα > Νεφροί > Οστά. Για το Cr η μεγαλύτερη συσσώρευση εμφανίζεται στο γαστρεντερικό σύστημα και στους πνεύμονες. Αυτό το αποτέλεσμα συμφωνεί με τις μελέτες Cornelis κ.ά. (2003) και O'Flaherty κ.ά. (2001). Οι Cornelis κ.ά. (2003) διαπίστωσαν ότι το Cr παραμένει στους πνεύμονες και εκκαθαρίζεται αργά στο αίμα. Ως εκ τούτου, το Cr που είναι στους πνεύμονες μετακινείται στο γαστρεντερικό σύστημα μέσω της βλέννας και το υπόλοιπο κατακρατείται στους πνεύμονες (Cornelis κ.ά., 2003). Παρομοίως, οι O'Flaherty κ.ά. (2001) διαπίστωσαν ότι το Cr παραμένει στους πνεύμονες και μεταφέρεται στο γαστρεντερικό σύστημα ως αποτέλεσμα της κίνησης της βλέννας και την επακόλουθη κατάποση στο γαστρεντερικό σύστημα. Για αυτόν τον λόγο το Cr είναι υπεύθυνο για τον ερεθισμό του γαστρικού και εντερικού βλεννογόνου.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε σύγκριση της αθροιστικής μηνιαίας εναποτιθέμενης δόσης στο αναπνευστικό σύστημα μεταξύ των εργαζομένων στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου και των μη-εργαζομένων στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων. Σχετικά με το μη-εργαζόμενο στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων αφορά έναν ενήλικα άνδρα που ακολουθεί το ίδιο σενάριο δραστηριότητας με τον εργαζόμενο στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου και εκτίθεται σε PM₁₀ συγκεντρώσεις στην περιοχή υποβάθρου (βρίσκεται περίπου 11 km μακριά από τον ΧΥΤ Χανίων) κατά τη διάρκεια των ωρών εργασίας.

Στο Διάγραμμα 29 παρουσιάζεται η αθροιστική μηνιαία εναποτιθέμενη δόση στο αναπνευστικό σύστημα. Εξετάζοντας το Διάγραμμα 29 παρατηρούνται μεγαλύτερα επίπεδα εναποτιθέμενης δόσης σε PM₁₀ για τους εργαζόμενους στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου. Συγκεκριμένα, η μηνιαία εναποτιθέμενη δόση για τους εργαζόμενους στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου είναι διπλάσια (για τον Μάρτιο και τον Αύγουστο) και τριπλάσια (για τον Σεπτέμβριο και τον Δεκέμβριο) από την εναποτιθέμενη δόση για τους μη-εργαζόμενους στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων. Αυτό οφείλεται στην υψηλή εργασιακή δόση των εργαζομένων στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου. Για παράδειγμα, τους μήνες Μάρτιο και Σεπτέμβριο η εργασιακή δόση (η δόση που λαμβάνει ο εργαζόμενος κατά τη διάρκεια της

εργασίας του στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων) αποτελεί το 68 και 76 %, αντίστοιχα, της μηνιαίας εναποτιθέμενης δόσης.



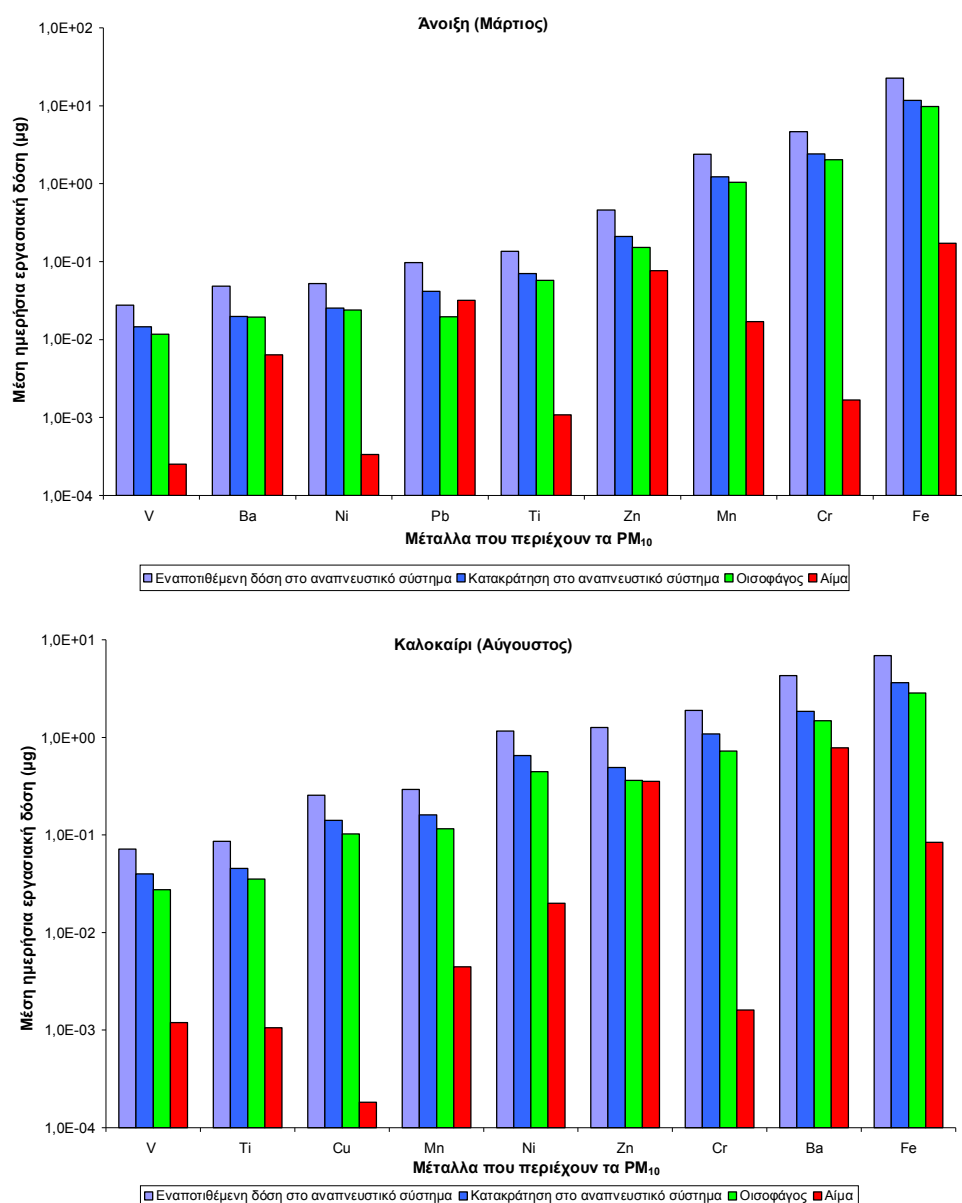


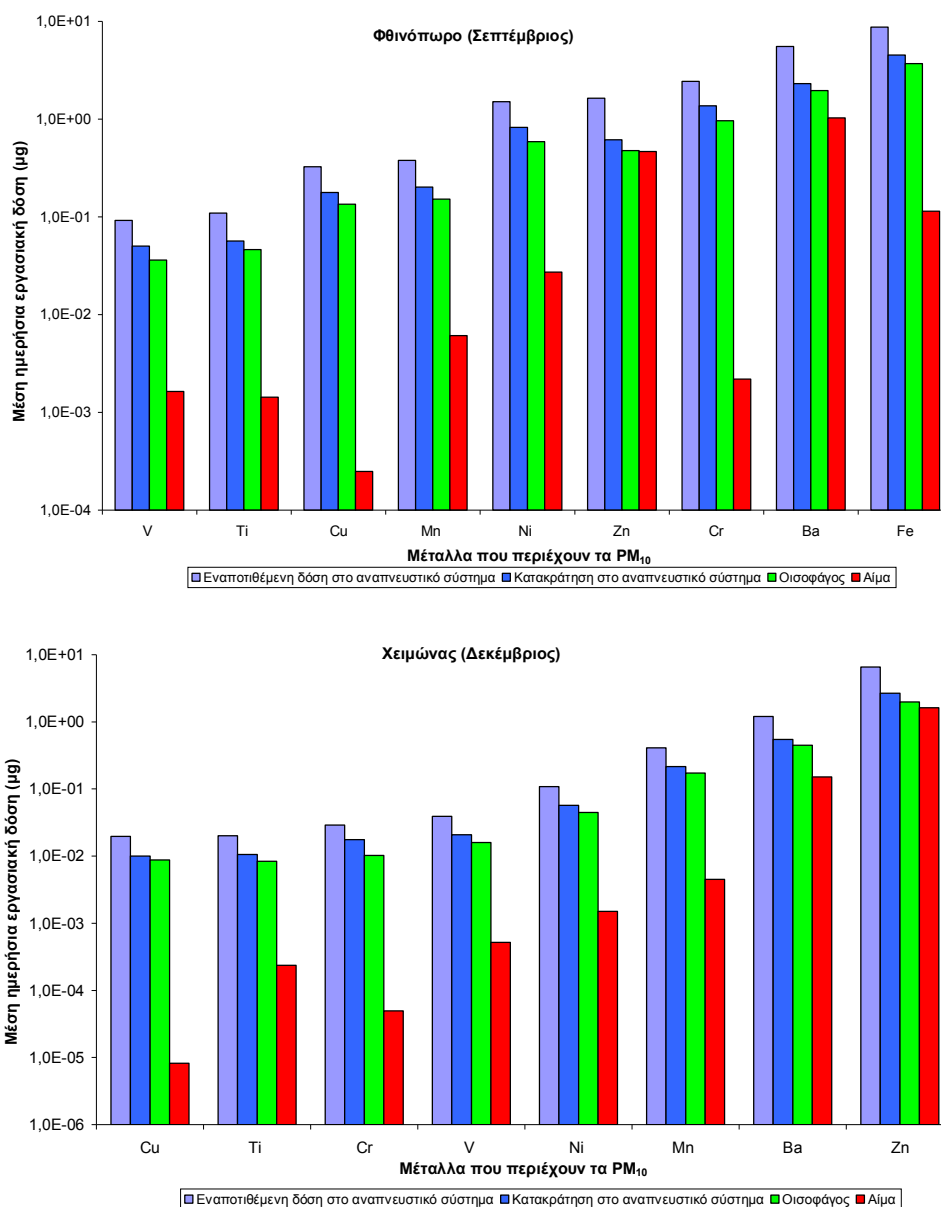
Διάγραμμα 29: Αθροιστική μηνιαία εναποτιθέμενη δόση στο αναπνευστικό σύστημα για τους μήνες Μάρτιο (Άνοιξη), Αύγουστο (Καλοκαίρι), Σεπτέμβριο (φθινόπωρο) και Δεκέμβριο (χειμώνας).

Επίσης, παρατηρείται υψηλότερη εναποτιθέμενη δόση σε αιωρούμενα σωματίδια που περιέχουν χρώμιο και μαγγάνιο (PM_{Cr} και PM_{Mn}) για τους εργαζομένους στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου. Για τα PM_{Pb} υψηλότερη εναποτιθέμενη δόση παρατηρείται για τους μη-εργαζόμενους στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων. Η υψηλή εναποτιθέμενη δόση σε

PM_{Pb} για τους μη-εργαζόμενους στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων οφείλεται στο ότι πλησίον του σταθμού υποβάθρου βρίσκεται ο χώρος στάθμευσης αυτοκινήτων της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Για τα μέταλλα που εντοπιστήκαν στα PM₁₀ του εξωτερικού χώρου ζυγιστηριού υπολογίστηκε η μέση ημερήσια εργασιακή εναποτιθέμενη δόση στο αναπνευστικό σύστημα, η κατακράτηση τους στο αναπνευστικό σύστημα και η μεταφορά τους στον οισοφάγο και στο αίμα (Διάγραμμα 30).





Διάγραμμα 30: Η μέση ημερήσια εναποτιθέμενη δόση των $PM_{\text{μετάλλων}}$ στο αναπνευστικό σύστημα, η κατακράτησή τους στο αναπνευστικό σύστημα και η μεταφορά τους στον οισοφάγο και στο αίμα.

Στο Διάγραμμα 30 παρατηρείται υψηλότερη εναποτιθέμενη δόση στο αναπνευστικό σύστημα για τα PM_{Fe} (για όλες τις εποχές εκτός από τον Χειμώνα). Αυτό συμβαίνει λόγω των υψηλών συγκεντρώσεων PM_{Fe} στον εξωτερικό χώρο ζυγιστηρίου και ως εκ τούτου την υψηλή εργασιακή δόση. Οι υψηλές συγκεντρώσεις PM_{Fe} οφείλονται στο ότι ο Fe αποτελεί βασικό στοιχείο του φλοιού της Γης και σχετίζεται με την επαναιώρηση της σκόνης λόγω της αιολικής διάβρωσης. Κατά τη διάρκεια του Χειμώνα δεν εμφανίζονται PM_{Fe} λόγω των υγρών κατακρημνίσεων. Η συγκέντρωση των μετάλλων μειώνεται

δραστικά όταν επικρατούν φαινόμενα υγρών κατακρημνίσεων. Αυτό οφείλεται στο ότι κατά τη διάρκεια του Χειμώνα παρατηρείται (α) περιορισμό στην επαναιώρηση σκόνης και (β) τακτικό καθαρισμό της ατμόσφαιρας από τα αιωρούμενα σωματίδια. Αυτό πραγματοποιείται με την ενσωμάτωση των σωματιδίων στα υδροσταγονίδια και την απόπλυση τους με τη βροχή.

Επιπλέον στο Διάγραμμα 30 παρατηρούνται υψηλότερες τιμές στο αίμα για τα αιωρούμενα σωματίδια που περιέχουν Zn, Ba για όλες τις εποχές εκτός από την Άνοιξη (Μάρτιο). Αυτό οφείλεται στο γρήγορο ρυθμό απορρόφησης των PM_{Zn} και PM_{Ba} στο αίμα με βάση την ICRP. Με βάση τη παλιά μελέτη της ICRP (1994) ο ρυθμός απορρόφησης των PM_{Zn} στο αίμα θεωρείται αργός. Όμως, με βάση την πρόσφατη μελέτη της ICRP (in advanced drafting) ο ρυθμός απορρόφησης των PM_{Zn} (για οξείδια του ψευδαργύρου) θεωρείται γρήγορος ενώ αργός θεωρείται μόνο για τα PM_{Zn} που προέρχονται από πυρηνικό σταθμό. Για το Μάρτιο τις υψηλότερες τιμές στο αίμα την εμφανίζει ο Fe και ο Zn. Για τα PM_{Fe} παρόλο που ο ρυθμός απορρόφησης στο αίμα είναι μέτριος καταλαμβάνει την 1^η θέση το Μάρτιο λόγω της υψηλής εναποτιθέμενης δόση στο αναπνευστικό σύστημα.

Επομένως, δεδομένου ότι τα αιωρούμενα σωματίδια ενσωματώνουν βαρέα μέταλλα που είναι επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία είναι σημαντικό να μειωθεί η έκθεση των εργαζομένων σε PM_{10} . Η μείωση των εκπομπών PM_{10} μπορεί να επιτευχθεί με συχνή διαβροχή των δρόμων, με αφαίρεση της σκόνης πάνω από τους δρόμους με τη χρήση ειδικών μηχανημάτων με περιστροφική βούρτσα, με έκπλυση των τροχών των απορριμματοφόρων και με επίστρωση όπου είναι δυνατόν των επιφανειών χώματος.

12.2. Εφαρμογή μοντέλου ExDoM2 για εργαζόμενο στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής

Η εφαρμογή του μοντέλου ExDoM2 πραγματοποιήθηκε στον εσωτερικό χώρο της χειροδιαλογής διότι υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση προσωπικού σε αυτόν το χώρο (28 άτομα) με αυξημένη χρονική διάρκεια παραμονής (8 ώρες και 7 ώρες για την κάθε βάρδια αντίστοιχα). Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο Κεφάλαιο στον εσωτερικό χώρο της χειροδιαλογής υπάρχουν δύο βάρδιες που αποτελούνται από 14 άτομα η κάθε μία. Η πρώτη βάρδια

ξεκινάει στις 6:30 και τελειώνει στις 14:30 ενώ η δεύτερη βάρδια ξεκινάει στις 14:30 και τελειώνει στις 21:30.

Το μοντέλο ExDoM2 εφαρμόστηκε για τον προσδιορισμό της δόσης για τρεις κατηγορίες ατόμων: (α) για έναν εργαζόμενο στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής (πρώτη βάρδια), (β) για έναν εργαζόμενο στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής (δεύτερη βάρδια) και (γ) για έναν μη-εργαζόμενο στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων. Ο σκοπός της χρήσης διαφορετικών σεναρίων έκθεσης είναι να προσδιορισθεί εάν η δόση σωματιδίων των εργαζομένων στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής είναι αυξημένη σε σύγκριση με εκείνη του γενικού πληθυσμού της περιοχής. Στον Πίνακα 20 παρουσιάζεται το σενάριο δραστηριότητας των τριών εκτιθέμενων ατόμων.

Πίνακας 20: Σενάριο δραστηριότητας των τριών εκτιθέμενων ατόμων.

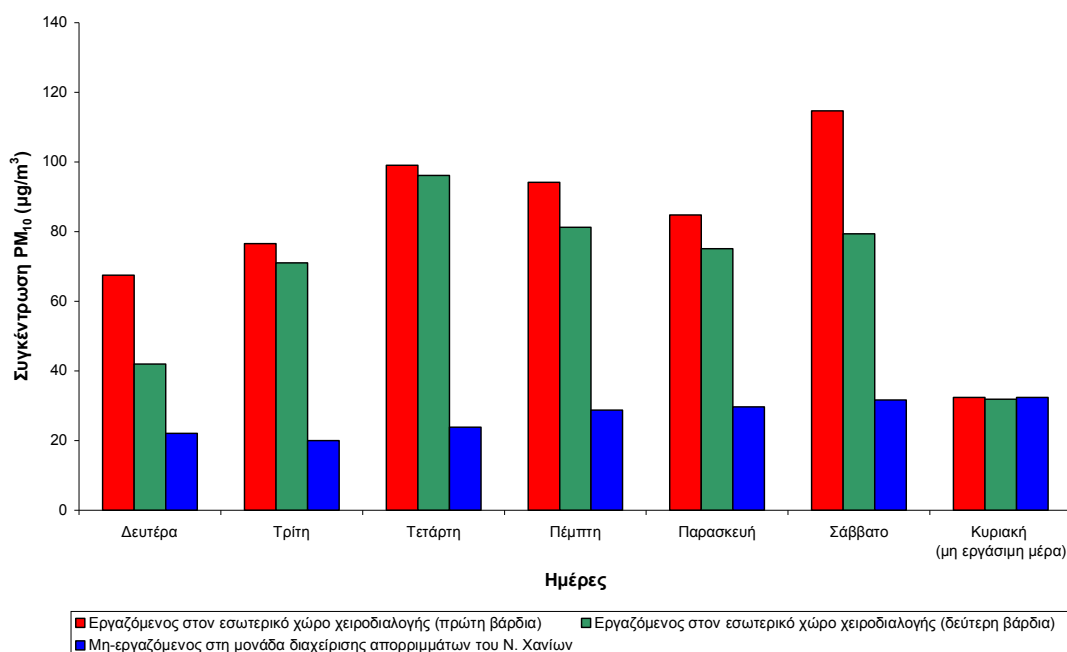
Δραστηριότητα	Εργαζόμενος στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής (πρώτη βάρδια)	Εργαζόμενος στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής (δεύτερη βάρδια)	Μη-εργαζόμενος στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων
Ύπνος (Σπίτι)	22:30-06:30	00:30-08:30	22:30-06:30
Ήπια Εργασία (Εργασιακό περιβάλλον)	06:30-14:30 (*εσωτερικός χώρος χειροδιαλογής)	14:30-21:30 (*εσωτερικός χώρος χειροδιαλογής)	06:30-14:30 (περιοχή υποβάθρου)
Ανάπαυση (Σπίτι)	14:30-17:30	21:30-00:30	14:30-17:30
Ήπια εργασία (Περιοχή υπόβαθρου)	17:30-19:30	08:30-11:30	17:30-19:30
Ανάπαυση (Σπίτι)	19:30-22:30	11:30-14:30	19:30-22:30

* τις Κυριακές ο εργαζόμενος δεν εργάζεται στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής βρίσκεται σε εξωτερικό χώρο στην περιοχή υποβάθρου.

Στα δυο πρώτα σενάρια το μοντέλο εφαρμόστηκε για έναν ενήλικα άνδρα που εκτίθεται σε PM_{10} συγκεντρώσεις στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής κατά τη διάρκεια των ωρών εργασίας. Στο τρίτο σενάριο (μη-εργαζόμενος στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων) το μοντέλο εφαρμόστηκε για έναν ενήλικα άνδρα που εκτίθεται σε PM_{10} συγκεντρώσεις στην περιοχή υποβάθρου, που βρίσκεται περίπου 11 km μακριά από τον ΧΥΤ Χανίων, κατά τη διάρκεια των ωρών εργασίας. Τις

υπόλοιπες ώρες (και για τα 3 σενάρια) το εκτιθέμενο άτομο εκτίθεται σε PM_{10} συγκεντρώσεις σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους στην περιοχή υποβάθρου.

Οι εξωτερικές PM_{10} συγκεντρώσεις υποβάθρου λήφθηκαν από τον σταθμό υποβάθρου ενώ οι εσωτερικές PM_{10} συγκεντρώσεις υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας τον λόγο εσωτερική/εξωτερική PM_{10} συγκέντρωση ($\approx 0,7$). Ο λόγος εσωτερική/εξωτερική PM_{10} συγκέντρωση κυμαίνεται από 0,5 έως 0,98 με μέση τιμή 0,7 για τα φυσικά αεριζόμενα κτίρια (απουσία εσωτερικών πηγών) με βάση τη μελέτη των Morawska και Salthammer (2003). Στο Διάγραμμα 31 παρουσιάζονται οι ημερήσιες συγκεντρώσεις έκθεσης PM_{10} των εργαζομένων με βάση το σενάριο έκθεσης/δραστηριότητας του Πίνακα 20.



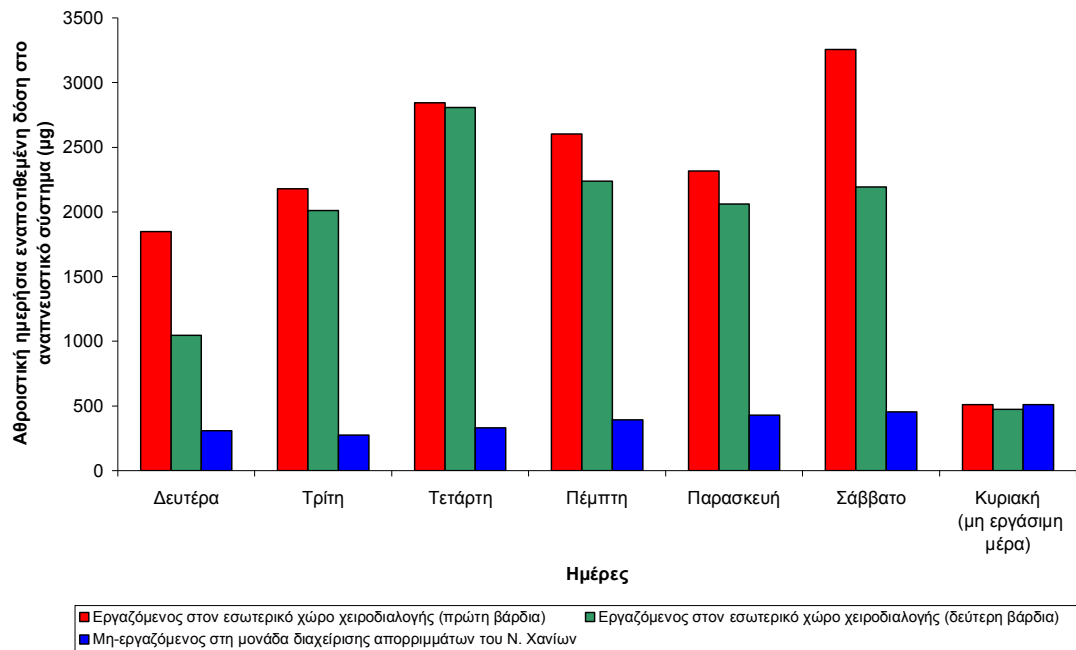
Διάγραμμα 31: Ημερήσιες συγκεντρώσεις έκθεσης PM_{10} ($\mu g/m^3$) των εργαζομένων με βάση το σενάριο έκθεσης/δραστηριότητας του Πίνακα 20.

Στο Διάγραμμα 31 παρατηρούνται ότι οι ημερήσιες συγκεντρώσεις έκθεσης PM_{10} κατά τις εργάσιμες ημέρες (Δευτέρα έως Σάββατο) κυμαίνονται: (α) από 68 έως 115 $\mu g/m^3$ (μέση τιμή 89 $\mu g/m^3$) για εργαζόμενο στην πρώτη βάρδια, (β) από 42 έως 96 $\mu g/m^3$ (μέση τιμή 74 $\mu g/m^3$) για εργαζόμενο στη δεύτερη βάρδια και (γ) από 20 έως 32 $\mu g/m^3$ (μέση τιμή 26 $\mu g/m^3$) για μη-εργαζόμενο στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων.

Επομένως, οι εργαζόμενοι στο εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής εκτίθενται σε υψηλότερες συγκεντρώσεις κατά τις εργάσιμες μέρες. Οφείλεται στις υψηλές συγκεντρώσεις έκθεσης στο εργασιακό περιβάλλον.

Οι συγκεντρώσεις έκθεσης PM_{10} στο εργασιακό περιβάλλον κυμαίνονται από: (α) από 155 έως 279 $\mu g/m^3$ (μέση τιμή 214 $\mu g/m^3$) για εργαζόμενο στην πρώτη βάρδια, (β) από 96 έως 283 $\mu g/m^3$ (μέση τιμή 202 $\mu g/m^3$) για εργαζόμενο στη δεύτερη βάρδια, (γ) από 18 έως 30 $\mu g/m^3$ (μέση τιμή 24 $\mu g/m^3$) για μη-εργαζόμενο στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων. Οι υψηλές συγκεντρώσεις PM_{10} στο εργασιακό περιβάλλον για τον εργαζόμενο στην πρώτη βάρδια οφείλεται στη λειτουργία της σύμμεκτης γραμμής απορριμμάτων (παρουσία οργανικού υλικού μαζί με το ανακυκλώσιμο). Η γραμμή αυτή λειτουργεί μονό στην πρώτη βάρδια. Για την εφαρμογή του μοντέλου εκτός από δεδομένα συγκέντρωσης χρειάζονται και δεδομένα κατανομή μεγέθους σωματιδίων. Στην περιοχή υποβάθρου το 31% των σωματιδίων είναι λεπτά σωματίδια ($PM_{2,1}$) και το υπόλοιπο 69% είναι χονδρά σωματίδια ($PM_{10-2,1}$). Για τον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής το 12% των σωματιδίων είναι λεπτά σωματίδια ($PM_{2,1}$) και το υπόλοιπο 88% είναι χονδρά σωματίδια ($PM_{10-2,1}$).

Με βάση όλα τα παραπάνω υπολογίσαμε την αθροιστική ημερήσια εναποτιθέμενη δόση στο αναπνευστικό σύστημα για τις τρεις κατηγορίες ατόμων (Διάγραμμα 32). Στο Διάγραμμα 32 παρατηρείται ότι η αθροιστική ημερήσια δόση κατά τις εργάσιμες ημέρες (Δευτέρα έως Σάββατο) κυμαίνεται: (α) από 1847 έως 3255 μg για εργαζόμενο στην πρώτη βάρδια, (β) από 1045 έως 2806 μg για εργαζόμενο στη δεύτερη βάρδια και (γ) από 276 έως 510 μg για μη-εργαζόμενο στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι ο μη-εργαζόμενος εκτίθεται σε PM_{10} συγκεντρώσεις στην περιοχή υποβάθρου κατά τη διάρκεια των ωρών εργασίας.

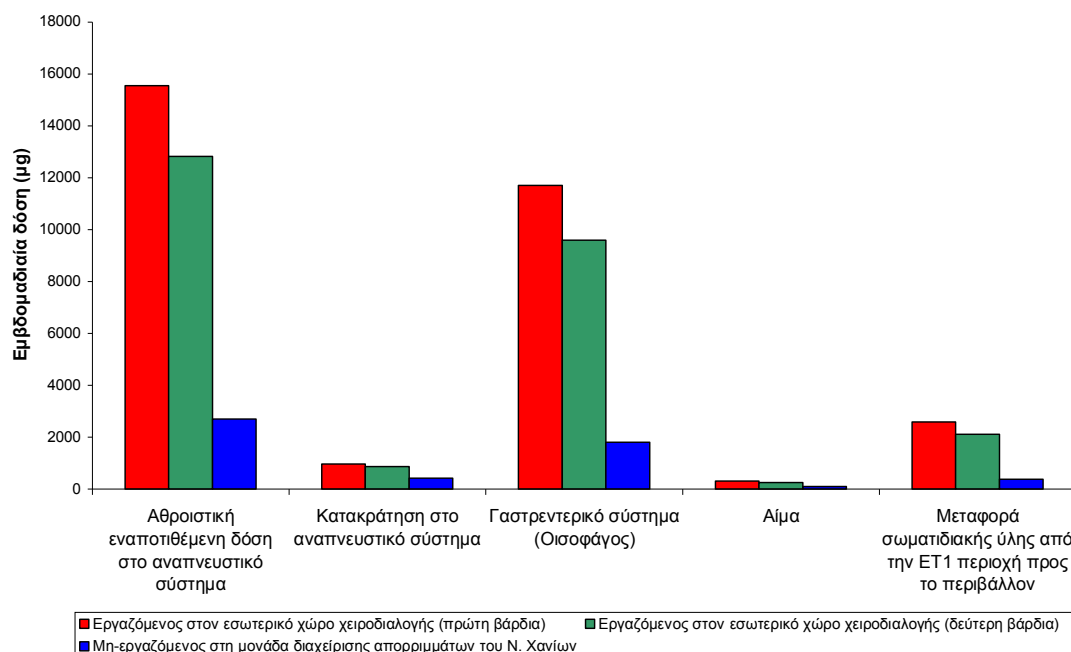


Διάγραμμα 32: Αθροιστική ημερήσια εναποτιθέμενη δόση στο αναπνευστικό σύστημα.

Οι Aleksandropoulou και Lazaridis (2013) υπολόγισαν ότι σε μια παράκτια απομακρυσμένη περιοχή της ανατολικής Μεσογείου (Φινοκαλιά, Ελλάδα), η αθροιστική ημερήσια εναποτιθέμενη δόση κυμαίνεται από 345 έως 761 μg , ενώ σε μια κατοικημένη περιοχή υποβάθρου στη βόρεια Ευρώπη (Όσλο, Νορβηγία), η αθροιστική ημερήσια εναποτιθέμενη δόση κυμαίνεται από 133 έως 212 μg . Η αθροιστική ημερήσια δόση για τους εργαζόμενους στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής είναι υψηλότερη από την αθροιστική ημερήσια δόση των ατόμων που εκτίθενται σε συγκεντρώσεις υποβάθρου (περιοχή υποβάθρου στο Ακρωτήριο, περιοχή υποβάθρου στο Όσλο της Νορβηγίας, απομακρυσμένη περιοχή στη Φινοκαλιά). Αυτό οφείλεται στην υψηλή PM_{10} συγκέντρωση στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής και ως εκ τούτου στην υψηλή εργασιακή δόση. Το ποσοστό συνεισφοράς της εργασιακής δόσης στην αθροιστική ημερήσια εναποτιθέμενη δόση κατά τις εργάσιμες ημέρες (Δευτέρα έως Σάββατο) κυμαίνεται από 91 έως 94 % για τους εργαζόμενους στην πρώτη βάρδια ενώ για τους εργαζόμενους στη δεύτερη βάρδια κυμαίνεται από 87 έως 96 %

Στο Διάγραμμα 33 παρουσιάζεται η αθροιστική εβδομαδιαία εναποτιθέμενη δόση των PM_{10} στο αναπνευστικό σύστημα, η

κατακράτηση/συσσώρευση τους και η μεταφορά τους στον οισοφάγο, στο αίμα και στο περιβάλλον.

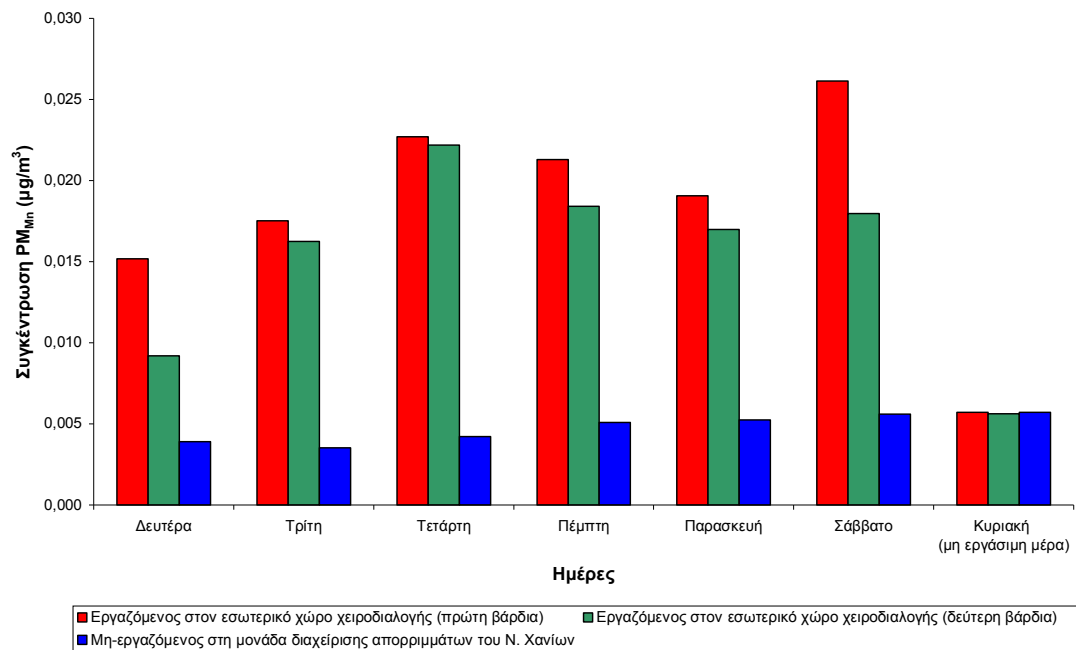
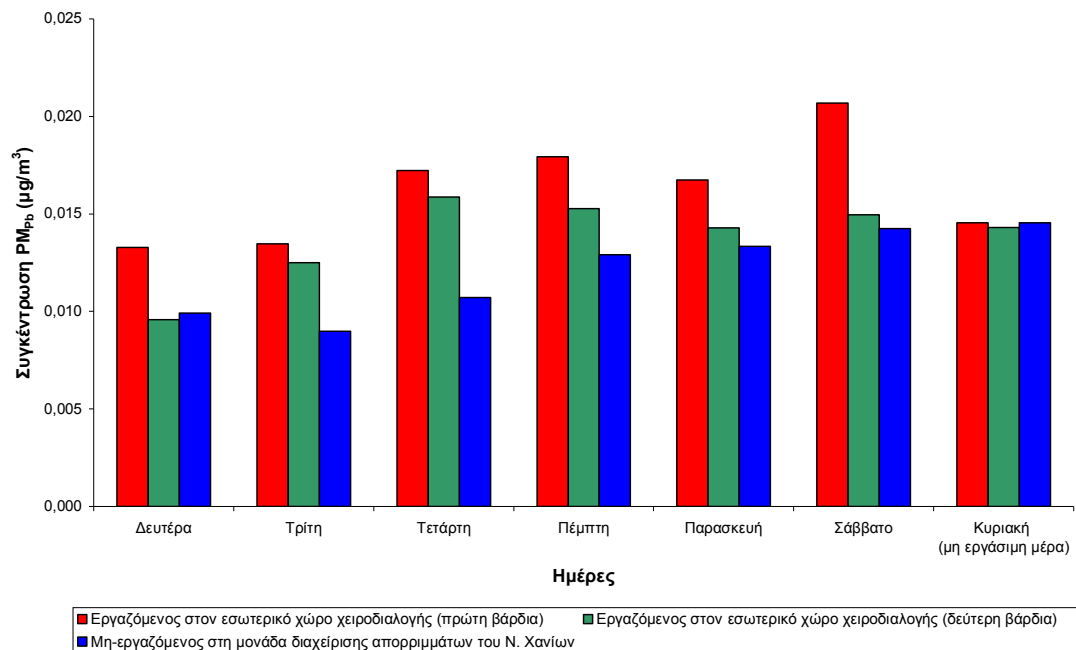


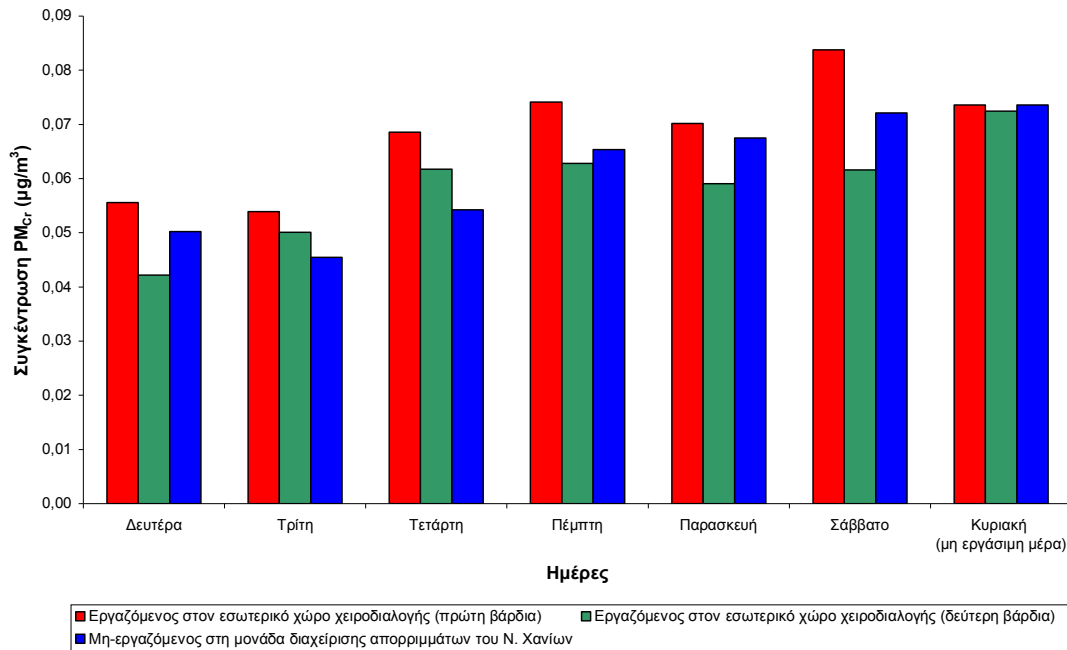
Διάγραμμα 33: Η αθροιστική εβδομαδιαία εναποτιθέμενη δόση των PM_{10} στο αναπνευστικό σύστημα, η κατακράτηση τους στο αναπνευστικό σύστημα και η μεταφορά τους στον οισοφάγο, στο αίμα και στο περιβάλλον.

Εξετάζοντας το Διάγραμμα 33 γίνεται αντιληπτό ότι και για τις τρεις κατηγορίες ατόμων τα σωματίδια που εναποτίθενται στο αναπνευστικό σύστημα μεταφέρονται κυρίως στο γαστρεντερικό σύστημα. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη κυρίως χονδρών σωματιδίων στο εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής (88%) και στην περιοχή υποβάθρου (69%). Τα χονδρά σωματίδια εναποτίθενται κυρίως στην εκτός θώρακα περιοχή και στη συνέχεια μεταφέρονται μέσω της βλέννας στο γαστρεντερικό σύστημα. Αυτό το αποτέλεσμα έρχεται σε συμφωνία με τη μελέτη των Salma κ.ά. (2002). Οι Salma κ.ά. (2002) διαπίστωσαν ότι το μεγαλύτερο μέρος της σωματιδιακής μάζας που εναποτίθενται στην εκτός θώρακα περιοχή μεταφέρονται στο γαστρεντερικό σύστημα.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν χημικές αναλύσεις για την περιεκτικότητα των PM_{10} σε μέταλλα στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής. Στο Διάγραμμα 34 παρουσιάζονται οι ημερήσιες συγκεντρώσεις έκθεσης των

εργαζομένων σε PM_{Pb} , PM_{Mn} , και PM_{Cr} με βάση το σενάριο έκθεσης/δραστηριότητας του Πίνακα 20.



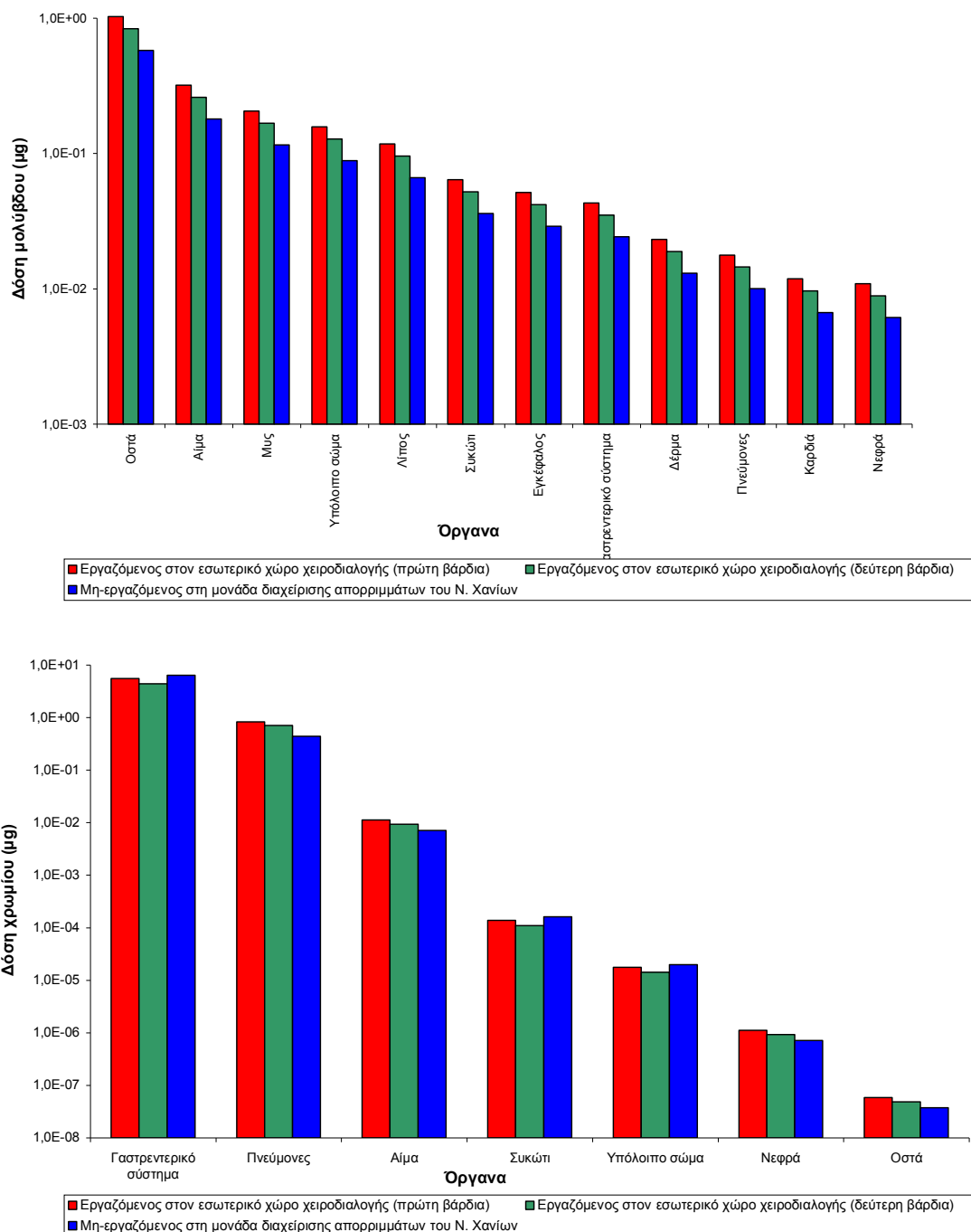


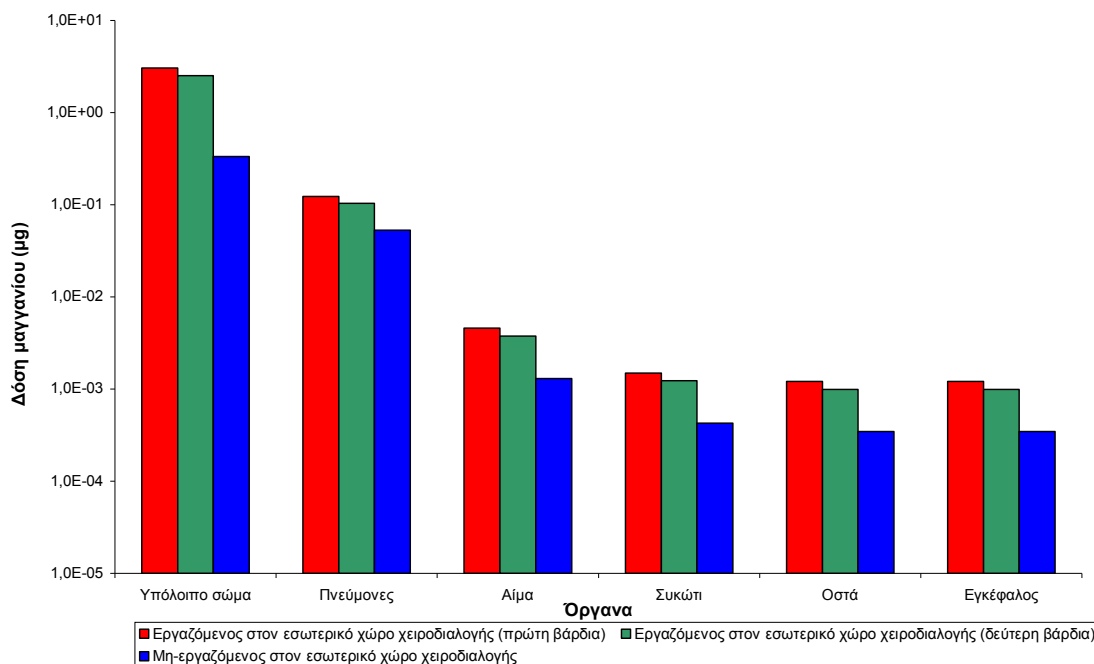
Διάγραμμα 34: Ημερήσιες συγκεντρώσεις έκθεσης των εργαζομένων σε PM_{Pb} , PM_{Mn} , και PM_{Cr} ($\mu g/m^3$) με βάση το σενάριο έκθεσης/δραστηριότητας του Πίνακα 20.

Οι συγκεντρώσεις έκθεσης των εργαζομένων (εργαζόμενος στην πρώτη βάρδια, εργαζόμενος στη δεύτερη βάρδια, μη - εργαζόμενος στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων) σε PM_{Pb} , PM_{Mn} , και PM_{Cr} είναι κάτω από τις κατευθυντήριες τιμές που προτείνει ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO, 2000) για την προστασία της ανθρώπινης υγείας. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας προτείνει κατευθυντήρια τιμή για το Mn και τον Pb ίση με $0,15 \mu g/m^3$ και $0,5 \mu g/m^3$, αντίστοιχα. Για το συνολικό Cr δεν έχει προταθεί καμία κατευθυντήρια τιμή από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας. Ωστόσο υπάρχει η οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης 2006/15/EK η οποία ορίζει ενδεικτική οριακή τιμή για Cr^{2+} και Cr^{3+} ίση με $2000 \mu g/m^3$ για 8 ώρες επαγγελματικής έκθεσης.

Επίσης, δεδομένα κατανομή μεγέθους για τα PM_{Pb} , PM_{Cr} , και PM_{Mn} απαιτούνται για την εφαρμογή του μοντέλου ExDoM2. Πειραματικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής. Τα αποτελέσματα για τον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής παρουσιάζονται στην Ενότητα 8.4.3. Για την περιοχή υποβάθρου η κατανομή μεγέθους λήφθηκε από πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από τον Δρ. Η. Κοπανάκη (Κοπανάκης, 2015).

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του μοντέλου ExDoM2 για έκθεση των εργαζομένων σε PM_{Pb} , PM_{Cr} , και PM_{Mn} απεικονίζονται στο Διάγραμμα 35. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται η εβδομαδιαία εσωτερική δόση των μετάλλων (Pb, Cr, Mn) στο ανθρώπινο σώμα για τις τρεις κατηγορίες ατόμων (εργαζόμενος στην πρώτη βάρδια, εργαζόμενος στη δεύτερη βάρδια, μη-εργαζόμενος στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων).





Διάγραμμα 35: Εβδομαδιαία εσωτερική δόση μετάλλων (Pb, Cr και Mn) στο ανθρώπινο σώμα.

Στο Διάγραμμα 35 παρατηρείται υψηλότερη εσωτερική δόση για τον Pb και το Mn στους εργαζόμενους στην πρώτη βάρδια. Αυτό οφείλεται στις υψηλές συγκεντρώσεις PM_{10} που καταγράφονται στην πρώτη βάρδια λόγω της λειτουργία της σύμμεικτης γραμμής απορριμμάτων ταυτόχρονα με την ανακυκλώσιμη γραμμή. Η σύμμεικτη γραμμή απορριμμάτων λειτουργεί για ένα μεγάλο διάστημα κατά τις πρωινές ώρες και αποτελεί τον κυριότερο παράγοντα στη διαφοροποίηση που παρατηρείται μεταξύ των δύο βαρδιών εργασίας.

Για το Cr η υψηλότερη εσωτερική δόση παρατηρείται για το μη-εργαζόμενο στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων. Το εκτιθέμενο άτομο έχει το ίδιο καθημερινό πρόγραμμα δραστηριοτήτων με τον εργαζόμενο στην πρώτη βάρδια, ωστόσο κατά τη διάρκεια των ωρών εργασίας εκτίθεται σε υψηλές PM_{Cr} συγκεντρώσεις στην περιοχή υποβάθρου που βρίσκεται περίπου 11 km μακριά από τη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων. Οι υψηλές συγκεντρώσεις του PM_{Cr} στο σταθμό υποβάθρου οφείλεται στο ότι το Cr^{3+} αποτελεί την πιο σταθερή μορφή του Cr και συναντάται στη φύση ως ορυκτό. Επίσης, η κίνηση των οχημάτων στην Πολυτεχνειούπολη επηρεάζουν τα επίπεδα συγκέντρωσης του PM_{Cr} στο

σταθμό υποβάθρου. Συγκεκριμένα, πλησίον του σταθμού βρίσκεται ο χώρος στάθμευσης αυτοκινήτων της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.

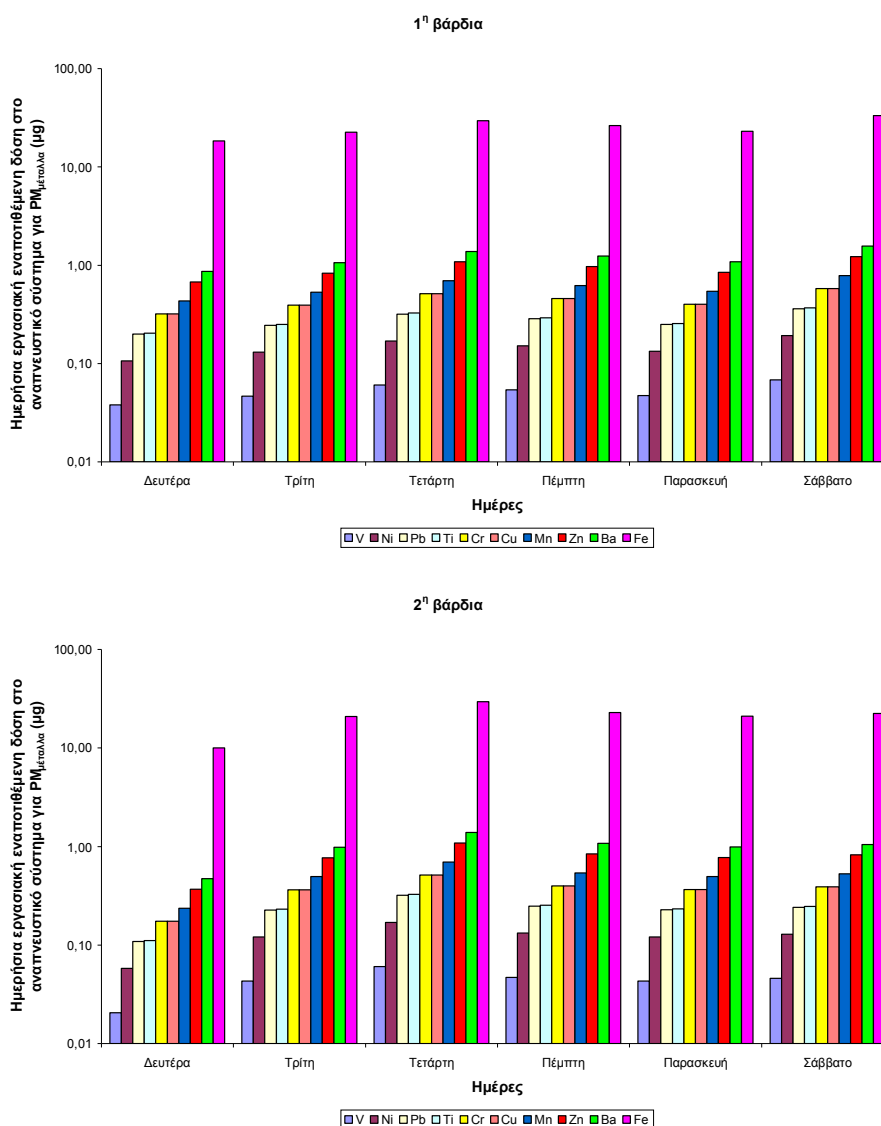
Εξετάζοντας το Διάγραμμα 35 προκύπτει ότι η μεγαλύτερη συσσώρευση για τον Pb εμφανίζεται στα οστά και στο αίμα, για το Mn εμφανίζεται στο υπόλοιπο σώμα και στους πνεύμονες και για το Cr στο γαστρεντερικό σύστημα και στους πνεύμονες. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με τη μελέτη της IPCS (1995), του WHO (1999b) και των Cornelis κ.ά. (2003). Η IPCS (1995) αναφέρει ότι η μεγαλύτερη συσσώρευση για τον Pb εμφανίζεται στα οστά ενώ η παρουσία Pb στο αίμα αντανάκλα την πρόσφατη έκθεση του ανθρώπου σε Pb. Ο WHO (1999b) αναφέρει ότι λόγω της έκθεσης σε PM_{Mn} τα κύρια συστήματα οργάνων που προσβάλλονται είναι οι πνεύμονες και το νευρικό σύστημα. Οι Cornelis κ.ά. (2003) διαπίστωσαν ότι το Cr που είναι στους πνεύμονες μετακινείται στο γαστρεντερικό σύστημα μέσω της βλέννας και το υπόλοιπο κατακρατείται στους πνεύμονες.

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας καθιέρωσε προσωρινή ανεκτή εβδομαδιαία πρόσληψη (PTWI) από τον αέρα, το νερό και τα τρόφιμα σε 25 $\mu\text{g}/\text{kg}$ σωματικού βάρους για τον Pb (FAO/WHO, 1999). Το σωματικό βάρος ενός ενήλικα άνδρα με βάση την ICRP είναι ίσο με 73 kg και επομένως, η προσωρινή ανεκτή εβδομαδιαία πρόσληψη (PTWI) από τον αέρα, το νερό και τα τρόφιμα είναι ίση με 1825 μg για τον Pb. Επίσης, ο WHO (1999) καθιέρωσε ασφαλής και επαρκής ημερήσια πρόσληψη (safe and adequate daily intake) για το Mn ίση με 1-5 mg ενώ η US-EPA (1998) καθιέρωσε ασφαλής και επαρκής ημερήσια πρόσληψη (safe and adequate daily intake) για το Cr ίση με 52-510 μg . Επομένως, με βάση τα παραπάνω, η ασφαλής και επαρκής εβδομαδιαία πρόσληψη για το Mn και το Cr είναι ίση με 7-35 mg και 364-3570 μg , αντίστοιχα.

Η εβδομαδιαία πρόσληψη από τον αέρα (σε σωματιδιακή μορφή) υπολογίστηκε με την εξίσωση της ICRP (1994): πρόσληψη από τον αέρα (intake from the environment ή nominal intake) = συγκέντρωση σωματιδίων \times ρυθμός αναπνοής \times διάρκεια έκθεσης. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η εναποτιθέμενη δόση στο αναπνευστικό σύστημα που υπολογίζεται από το μοντέλο ExDoM2 είναι χαμηλότερη από την υπολογιζόμενη πρόσληψη από τον αέρα (σε σωματιδιακή μορφή). Αυτό οφείλεται στο ότι η εναποτιθέμενη δόση στο αναπνευστικό σύστημα λαμβάνει υπόψη τις απώλειες από την

εκπνοή και την αποτελεσματικότητα πρόσληψης (intake efficiency ή inhalability) του αναπνευστικού συστήματος. Στην παρούσα εργασία και για τις τρεις κατηγορίες ατόμων (εργαζόμενος στην πρώτη βάρδια, εργαζόμενος στη δεύτερη βάρδια, μη-εργαζόμενος στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων) η εβδομαδιαία πρόσληψη από τον αέρα (σε σωματιδιακή μορφή) για το Pb, το Mn και το Cr είναι πολύ μικρότερη από τις προτεινόμενες τιμές του WHO και της US-EPA. Αυτό οφείλεται στο ότι οι σημαντικότερες πηγές έκθεσης για την πρόσληψη μετάλλων είναι το νερό και τα τρόφιμα.

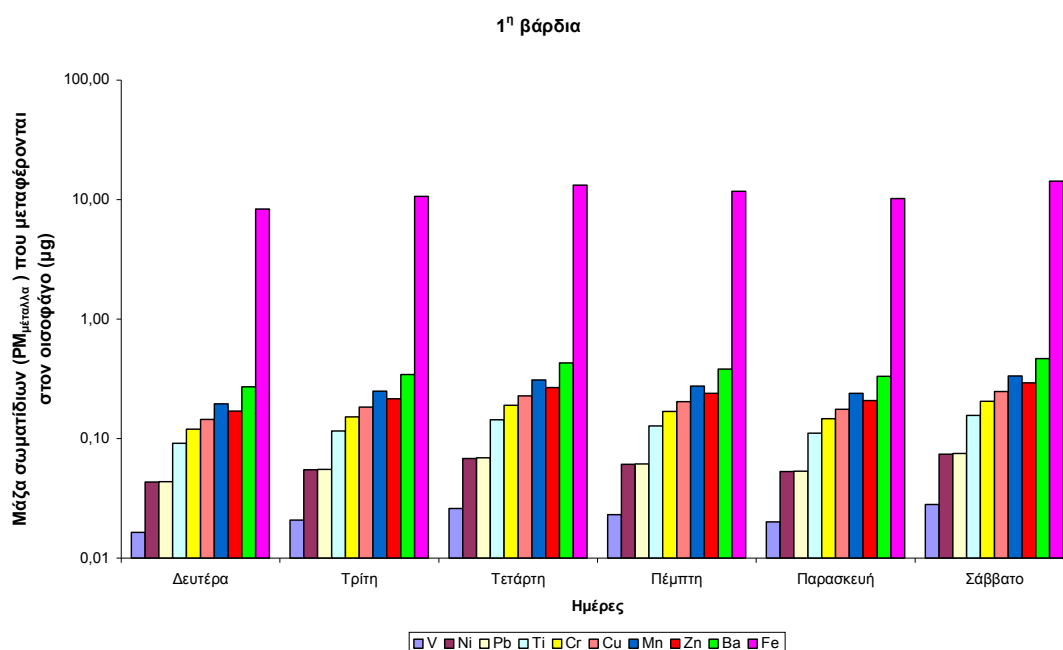
Στη συνέχεια, υπολογίστηκε η ημερήσια εργασιακή εναποτιθέμενη δόση στο αναπνευστικό σύστημα για τα 10 μέταλλα που εντοπιστήκαν στα αιωρούμενα σωματίδια του εσωτερικού χώρου χειροδιαλογής (Διάγραμμα 36).

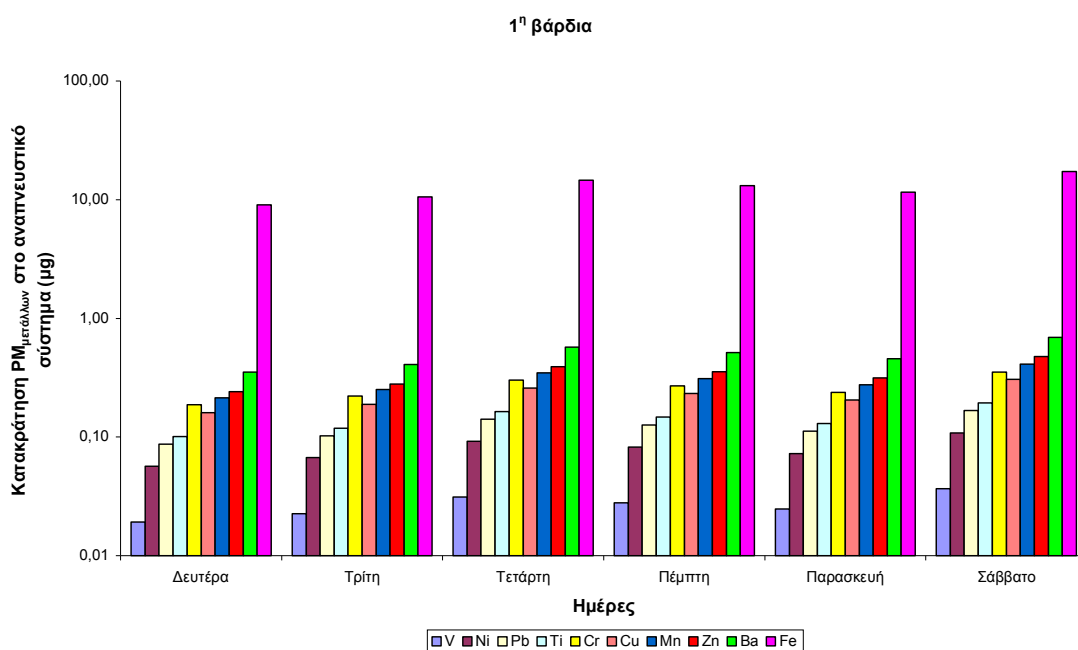
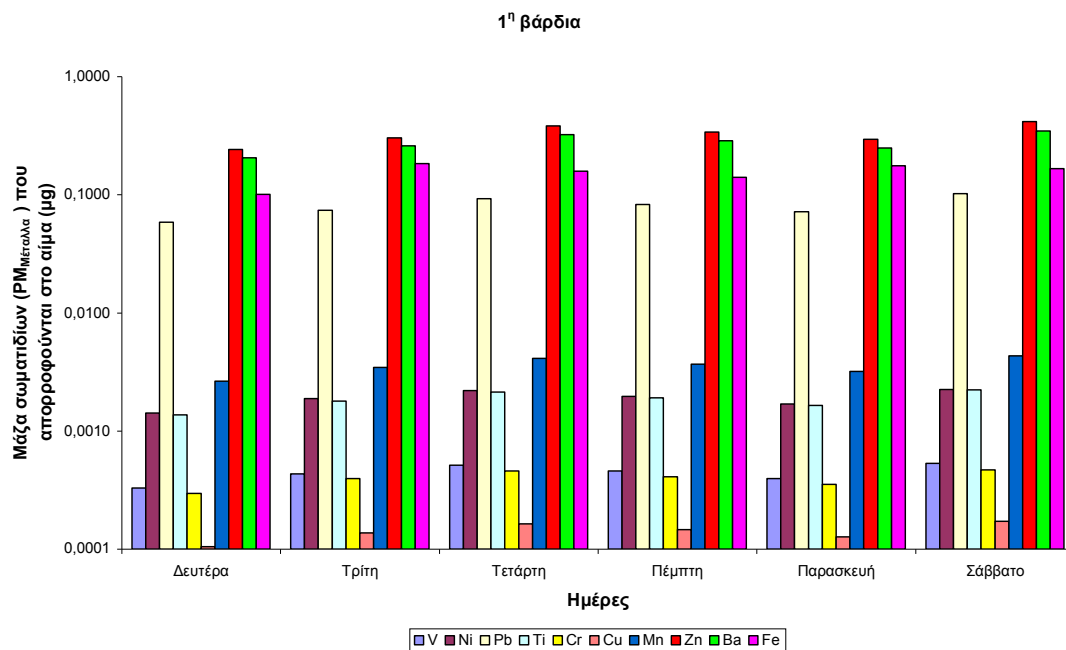


Εξετάζοντας το Διάγραμμα 36 γίνεται αντιληπτό ότι από τα 10 μέταλλα που εντοπίστηκαν στα αιωρούμενα σωματίδια στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής την υψηλότερη εργασιακή εναποτιθέμενη δόση στο αναπνευστικό σύστημα παρατηρήθηκε στα PM_{Fe} . Αυτό οφείλεται στη φύση των υλικών (π.χ. λευκοσιδηρούχα απορρίμματα) που εισέρχονται στο κτίριο μηχανικής διαλογής και χειροδιαλογής.

Επιπλέον, τα αιωρούμενα σωματίδια που εναποτίθενται στο αναπνευστικό σύστημα στη συνεχεία μεταφέρονται στον οισοφάγο μέσω της κατάποσης της βλέννας, μεταφέρονται στους λεμφαδένες, μεταφέρονται από το ένα μέρος του αναπνευστικού συστήματος σε ένα άλλο, απορροφούνται στο αίμα και απομακρύνονται στο περιβάλλον.

Στο Διάγραμμα 37 παρουσιάζεται η μάζα των $PM_{μετάλλων}$ που μεταφέρονται στον οισοφάγο, απορροφούνται στο αίμα και κατακρατείται στο αναπνευστικό σύστημα στο τέλος της 1^η βάρδιας. Τα αποτελέσματα της 2^{ης} βάρδιας παρουσιάζονται στο Παράρτημα Z.





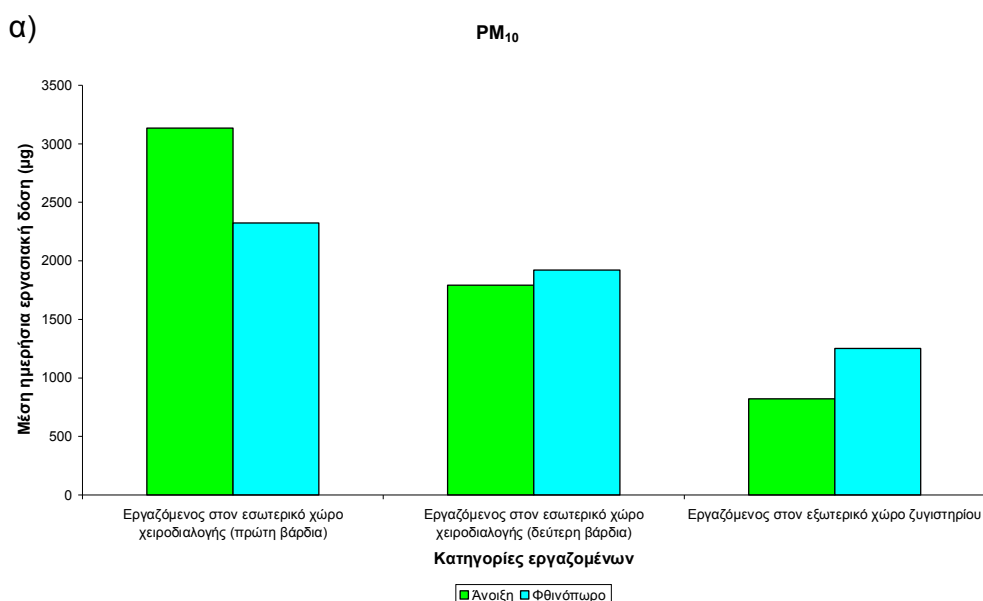
Διάγραμμα 37: Η μάζα των $PM_{\text{μεταλλών}}$ που μεταφέρεται στον οισοφάγο, απορροφάται στο αίμα και κατακρατείται στο αναπνευστικό σύστημα στο τέλος της 1^η βάρδιας.

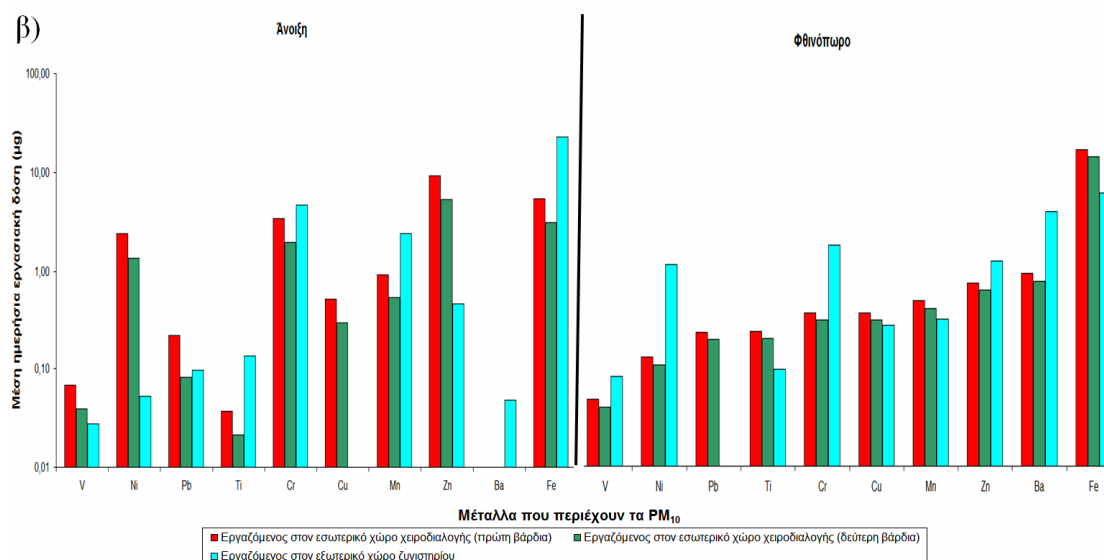
Στο Διάγραμμα 37 παρατηρούνται υψηλότερες τιμές στο αίμα για τα αιωρούμενα σωματίδια που περιέχουν Zn, Ba, Fe, Pb. Αυτό οφείλεται στο γρήγορο ρυθμό απορρόφησης των PM_{Zn} , PM_{Ba} και PM_{Pb} στο αίμα με βάση την ICRP. Με βάση τη μελέτη της ICRP (1994) ο ρυθμός απορρόφησης των PM_{Zn} στο αίμα θεωρείται αργός. Όμως, με βάση την πρόσφατη μελέτη της ICRP (in advanced drafting) ο ρυθμός απορρόφησης των PM_{Zn} (για οξείδια

του ψευδαργύρου) θεωρείται γρήγορος ενώ αργός θεωρείται μόνο για τα PM_{Zn} που προέρχονται από πυρηνικό σταθμό. Για τα PM_{Fe} ο ρυθμός απορρόφησης στο αίμα είναι μέτριος. Όμως καταλαμβάνει την 3^η θέση λόγω της υψηλής εναποτιθέμενης δόσης στο αναπνευστικό. Για τον οισοφάγο και το αναπνευστικό σύστημα παρατηρούνται υψηλότερες τιμές για τα PM_{Fe} . Αυτό οφείλεται λόγω της υψηλής εναποτιθέμενης δόσης στο αναπνευστικό σύστημα των PM_{Fe} σε σχέση με τα άλλα μέταλλα.

Εάν η εναποτιθέμενη δόση στο αναπνευστικό σύστημα ήταν ίδια για όλα τα μέταλλα (υποθετικό σενάριο), την υψηλότερη κατακράτηση στο αναπνευστικό σύστημα θα παρατηρούνταν για τα PM_{Cr} λόγω του αργού ρυθμού απορρόφησης στο αίμα και τον εντοπισμό του Cr κυρίως στα λεπτά σωματίδια.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των εργαζομένων στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για την άνοιξη και το φθινόπωρο λόγω της έκθεσης των εργαζομένων σε υψηλές συγκεντρώσεις PM_{10} και $PM_{Μέταλλα}$ (αιωρούμενα σωματίδια που περιέχουν μέταλλα). Στο Διάγραμμα 38 παρουσιάζεται η μέση ημερήσια εργασιακή δόση για τρεις κατηγορίες εργαζομένων (εργαζόμενος στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής (πρώτη βάρδια), εργαζόμενος στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής (δεύτερη βάρδια) και εργαζόμενος στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου) στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων.





Διάγραμμα 38: Μέση ημερήσια εργασιακή εναποτιθέμενη δόση (μg) στο αναπνευστικό σύστημα για τα (α) PM₁₀ και για τα (β) αιωρούμενα σωματίδια που περιέχουν μέταλλα (PM_{Μέταλλα}).

Στο Διάγραμμα 38α παρατηρούνται μεγαλύτερα επίπεδα εναποτιθέμενης δόσης σε PM₁₀ για τους εργαζόμενους στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής (1^η βάρδια) λόγω της λειτουργίας της ταινίας που υποδέχεται τα σύμμεικτα απορρίμματα κατά την πρωινή βάρδια. Συγκεκριμένα, η μέση ημερήσια εργασιακή εναποτιθέμενη δόση για τους εργαζόμενους στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής (1^η βάρδια) είναι σχεδόν διπλάσια κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου και σχεδόν τετραπλάσια κατά τη διάρκεια της άνοιξης από την εναποτιθέμενη δόση για τους εργαζόμενους στο εξωτερικό χώρο ζυγιστηρίου.

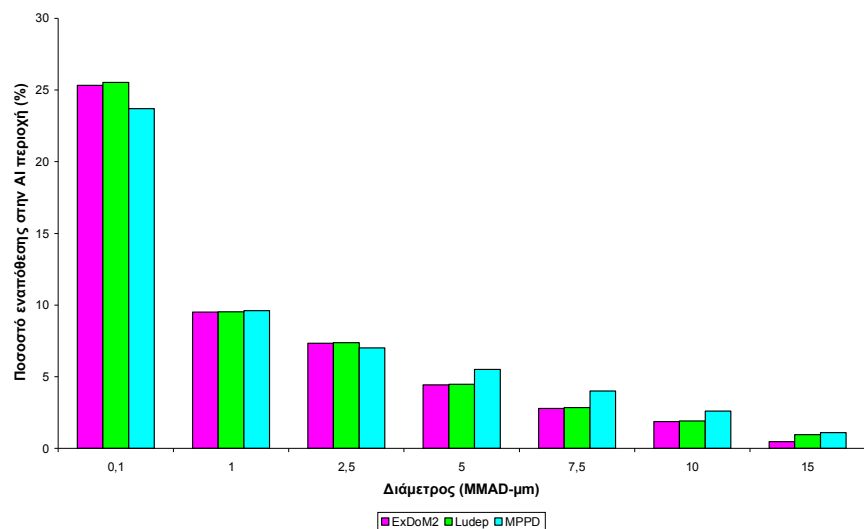
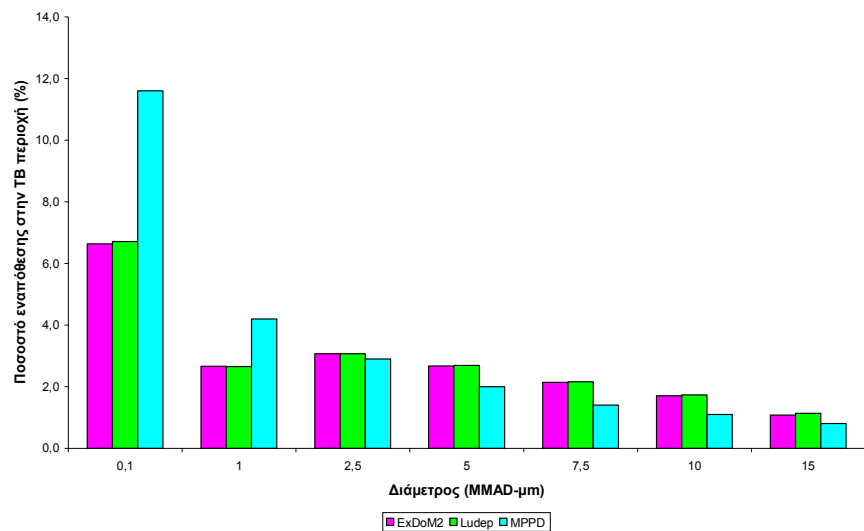
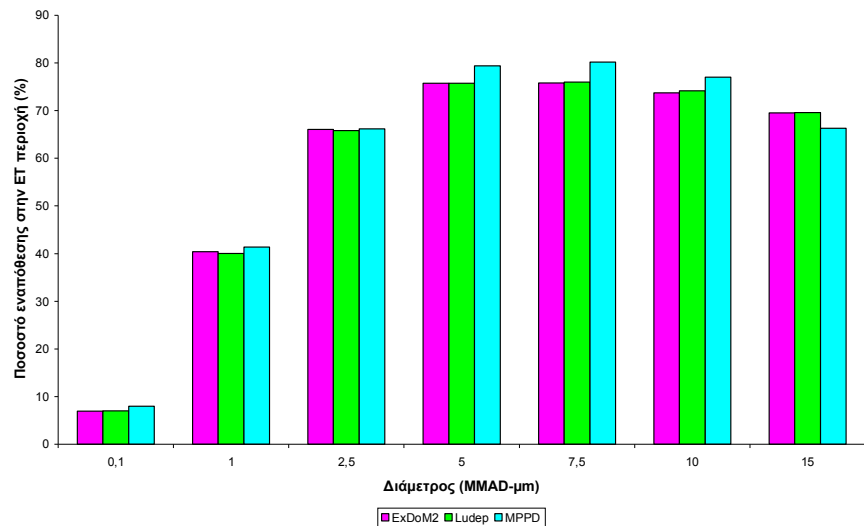
Στο Διάγραμμα 38β παρατηρείται υψηλότερη εναποτιθέμενη δόση σε PM_{Μέταλλα} για τους εργαζόμενους στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής (1^η βάρδια) κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου ενώ κατά τη διάρκεια της άνοιξης η υψηλότερη εναποτιθέμενη δόση σε PM_{Μέταλλα} παρατηρείται για τους εργαζόμενους στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου. Συγκεκριμένα η μέση ημερήσια εργασιακή εναποτιθέμενη δόση σε PM_{Μέταλλα} είναι ίση με: (α) 30 μg (φθινόπωρο) και 22 μg (άνοιξη) για εργαζόμενο στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής (πρώτη βάρδια), (β) 25 μg (φθινόπωρο) και 13 μg (άνοιξη) για εργαζόμενο στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής (δεύτερη βάρδια) και (γ) 21 μg (φθινόπωρο) και 31 μg (άνοιξη) για εργαζόμενο στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου.

Η υψηλή εργασιακή εναποτιθέμενη δόση σε $PM_{\text{Μέταλλα}}$ στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων οφείλεται στην υψηλή εναποτιθέμενη δόση σε PM_{Fe} . Η υψηλή η εναποτιθέμενη δόση σε PM_{Fe} οφείλεται στη φύση των υλικών (π.χ. λευκοσιδηρούχα απορρίμματα) που εισέρχονται στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων και στο ότι ο Fe αποτελεί βασικό στοιχείο του φλοιού της Γης.

Τέλος, θα πρέπει να επισημανθεί ότι ο ΕΜΑΚ. Χανίων πρόκειται να εκσυγχρονιστεί στο μέλλον. Με τον εκσυγχρονισμό δεν θα γίνεται η διαλογή των απορριμμάτων με το χέρι αλλά με οπτικούς διαχωριστές (σκάνερ), γεγονός που θα συμβάλει στη βελτίωση των εργασιακών συνθηκών και στη λειτουργική αναβάθμιση του αυξάνοντας παράλληλα τη δυναμικότητα του. Η χειροδιαλογή θα χρησιμοποιηθεί μόνο για τον ποιοτικό έλεγχο των ήδη διαχωρισμένων υλικών με πολύ λιγότερες θέσεις από τις ήδη υπάρχουσες. Επομένως, θα ήταν ενδιαφέρον να πραγματοποιηθούν στο μέλλον (όταν ο Ε.Μ.Α.Κ. Χανίων αναβαθμιστεί) πειραματικές μετρήσεις συγκεντρώσεων μάζας αιωρούμενων σωματιδίων, μετρήσεις κατανομής μεγέθους της μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων και χημικές αναλύσεις για την περιεκτικότητα των αιωρούμενων σωματιδίων σε μέταλλα.

12.3. Σύγκριση μοντέλου ExDoM2 με υφιστάμενα μοντέλα δοσιμετρίας

Το μοντέλο ExDoM2 που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας συγκρίθηκε με το μοντέλο Luder (Lung Dose Evaluation Program) και το μοντέλο MPPD v 2.1 (Multiple Path Particle Model version 2.1). Το μοντέλο Luder v2.0 αναπτύχθηκε από την ICRP (1994) ενώ το μοντέλο MPPD αναπτύχθηκε από το Ινστιτούτο Τεχνικής Χημικών Βιομηχανίας της Τοξικολογίας (CIIT) και από το Ινστιτούτο για τη Δημόσια Υγεία και το Περιβάλλον (RIVM). Στο Διάγραμμα 39 παρουσιάζεται το ποσοστό εναπόθεσης στο αναπνευστικό σύστημα (ET, TB, AI) για έναν ενήλικα άνδρα που εκτελεί ήπια εργασία (εισπνοή μόνο από τη μύτη) σε περιβάλλον με ταχύτητα ανέμου 1 m/s και εκτίθεται σε πολυδιάσπορα σωματίδια ($\sigma_g=2,5$) με πυκνότητα $1,5 \text{ g/cm}^3$ και συντελεστής σχήματος 1 (σφαιρικά σωματίδια).

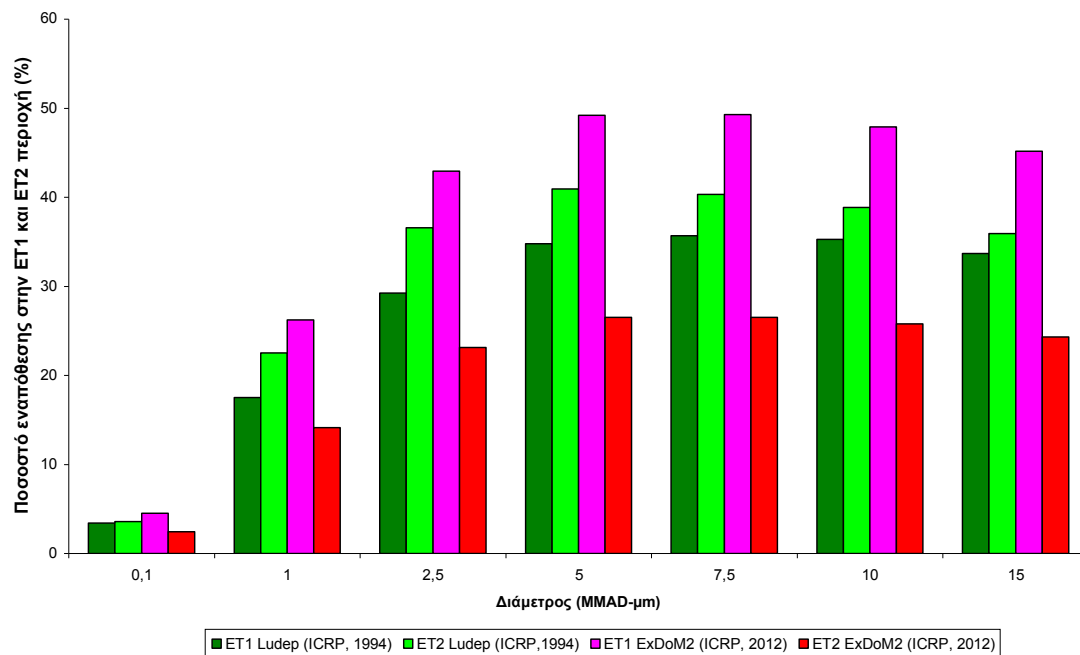


Διάγραμμα 39: Ποσοστό εναπόθεσης στον αναπνευστικό σύστημα (ET, TB, AI) για έναν ενήλικα άνδρα που εκτελεί ήπια εργασία σε περιβάλλον με ταχύτητα ανέμου 1 m/s και εκτίθεται σε πολυδιάσπορα σωματίδια ($\sigma_g=2,5$) με πυκνότητα $1,5 \text{ g/cm}^3$ και συντελεστής σχήματος 1 (σφαιρικά σωματίδια).

Το μοντέλο MPPD υπολογίζει το ποσοστό εναπόθεσης για τις τρεις περιοχές (ET, TB, AI) του αναπνευστικού συστήματος ενώ τα μοντέλα ExDoM2 και Luder για τις πέντε περιοχές του αναπνευστικού συστήματος (ET₁, ET₂, BB, bb, AI). Στο Διάγραμμα 39 για τα μοντέλα ExDoM2 και Luder αθροίστηκαν τα ποσοστά εναπόθεσης στην ET₁ και ET₂ περιοχή για να υπολογιστεί το ποσοστό εναπόθεσης στην ET περιοχή. Επίσης, αθροίστηκαν τα ποσοστά εναπόθεσης στις BB και bb περιοχές για να υπολογιστεί το ποσοστό εναπόθεσης στην TB περιοχή.

Οι διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ του μοντέλου ExDoM2 και στο MPPD οφείλονται στο διαφορετικό τρόπο υπολογισμού των ποσοστών εναπόθεσης και στη διαφορετική μορφολογία του αναπνευστικού συστήματος. Η μορφολογία του αναπνευστικού συστήματος για το μοντέλο ExDoM2 και για το Luder δίνεται από την ICRP 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 Ampaya (1975) για την κυψελιδική περιοχή σταθμισμένες σύμφωνα με τους Yu και Diu (1982). Για το μοντέλο MPPD η δομή του αναπνευστικού συστήματος περιγράφεται με το μοντέλο των Yeh και Schum (1980). Το μοντέλο Luder είναι η μοντελοποίηση του HRTM (αρχική έκδοση) της ICRP (1994). Το μοντέλο ExDoM2 είναι η μοντελοποίηση του HRTM (αναθεωρημένη έκδοση) της ICRP (2015). Στο μοντέλο εναπόθεσης η μόνη αλλαγή που πραγματοποιήθηκε από την ICRP (2015) είναι η κατανομή της εναποτιθέμενης δόσης στην εκτός θώρακα περιοχή (ET) μεταξύ της ET₁ και ET₂ περιοχής.

Στο Διάγραμμα 40 παρουσιάζονται τα ποσοστά εναπόθεσης στην ET₁ και ET₂ περιοχή για έναν ενήλικα άνδρα που εκτελεί ήπια εργασία (εισπνοή μόνο από τη μύτη) σε περιβάλλον με ταχύτητα ανέμου 1 m/s και εκτίθεται σε πολυδιάσπορα σωματίδια ($\sigma_g=2,5$) με πυκνότητα 1,5 g/cm³ και συντελεστής σχήματος 1 (σφαιρικά σωματίδια).



Διάγραμμα 40: Ποσοστό εναπόθεσης στην ET_1 και ET_2 περιοχή για έναν ενήλικα άνδρα που εκτελεί ήπια εργασία σε περιβάλλον με ταχύτητα ανέμου 1 m/s και εκτίθεται σε πολυδιάσπορα σωματίδια ($\sigma_g=2,5$) με πυκνότητα 1,5 g/cm³ και συντελεστής σχήματος 1 (σφαιρικά σωματίδια).

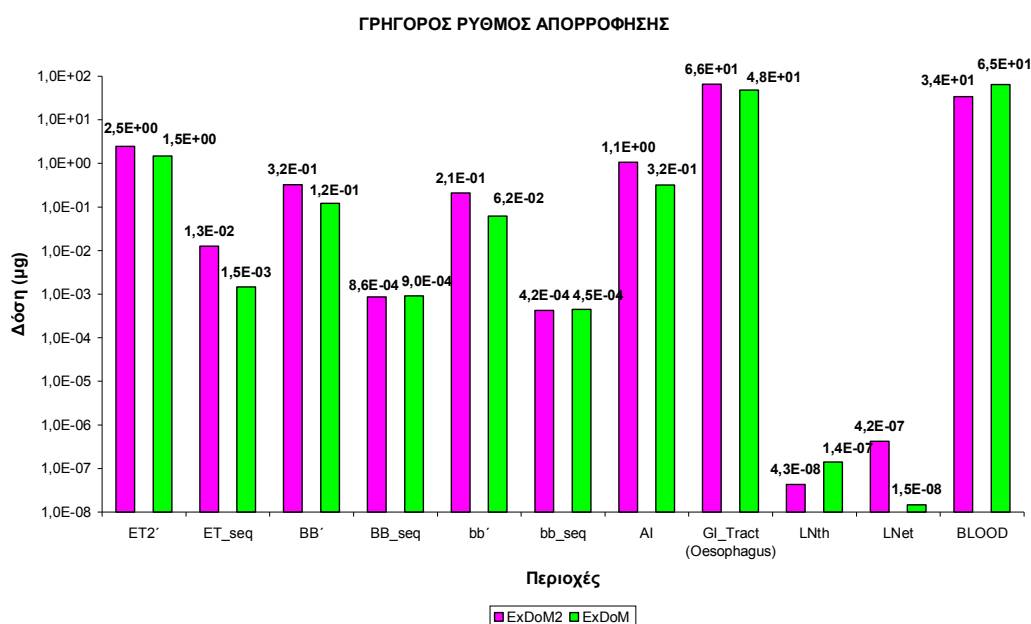
Στην αρχική έκδοση (ICRP, 1994) τα σωματίδια που εναποτίθενται στην ET περιοχή κατανέμονται εξίσου μεταξύ της ET_1 και της ET_2 περιοχής ή κάπως υψηλότερα για την ET_2 από ότι για την ET_1 περιοχή. Στην αναθεωρημένη έκδοση (ICRP, 2015) δημιουργήθηκε μία πιο ακριβές αναπαράσταση της εναπόθεσης στην ET περιοχή. Σύμφωνα με νέες πειραματικές μελέτες (Smith κ.ά, 2011) έδειξαν ότι τα σωματίδια που εναποτίθενται στην ET περιοχή κατανέμονται 65% στην ET_1 περιοχή και 35% στην ET_2 περιοχή.

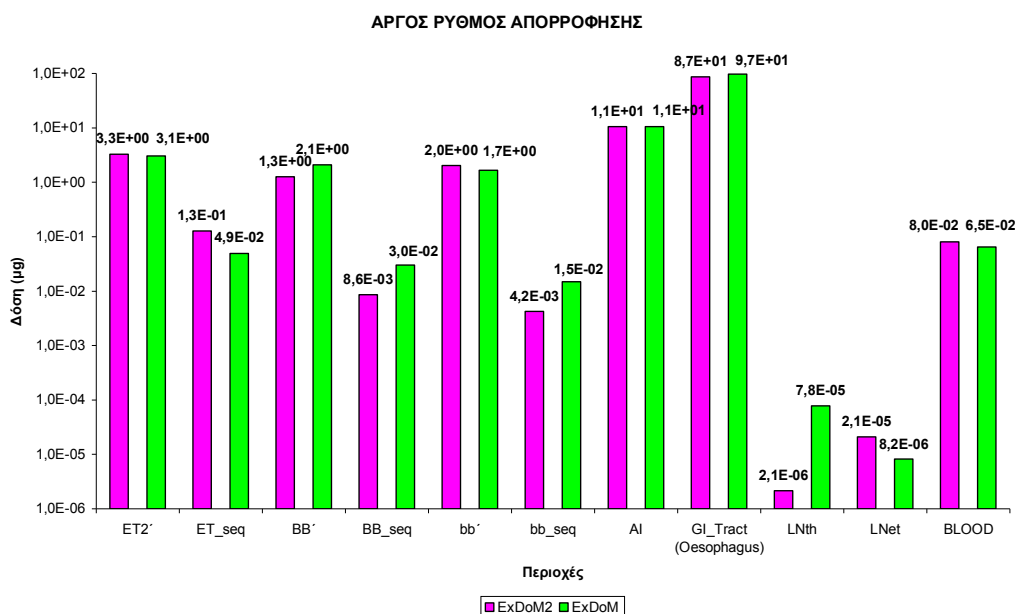
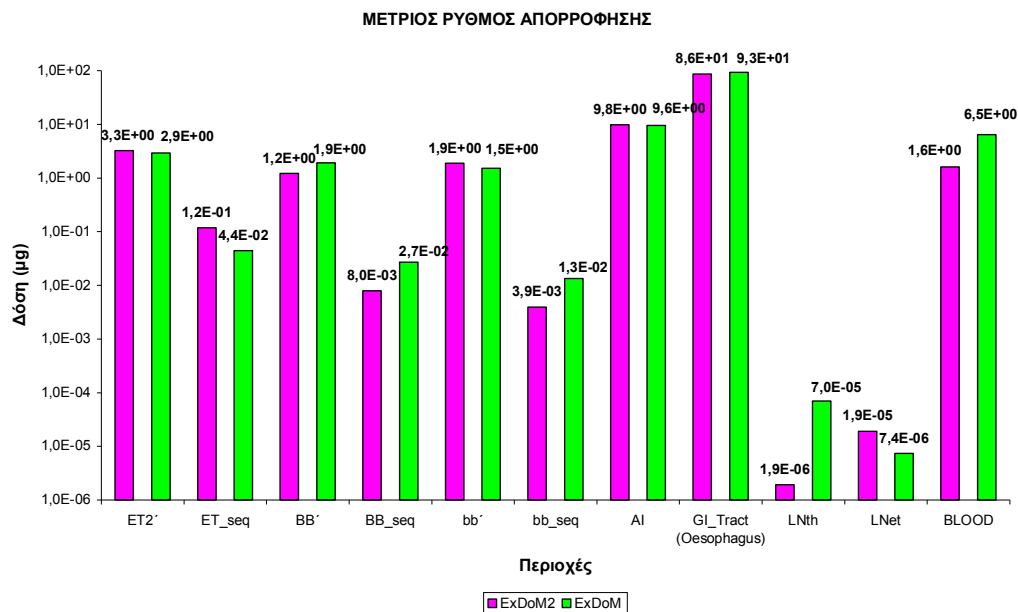
Όπως έχει αναφερθεί στην Ενότητα 5.2 η ICRP (2015) τις περισσότερες και σημαντικότερες αλλαγές τις πραγματοποίησε στο μοντέλο καθαρισμού σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα. Πρόσφατες μελέτες παρέχουν καινούργια δεδομένα σχετικά με τον καθαρισμό των σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα. Επομένως, στη συνέχεια θα υπολογιστεί με το μοντέλο ExDoM και το μοντέλο ExDoM2 η κατακράτηση/συσσώρευση (retention) των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα, η απορρόφηση τους στο αίμα και η μεταφορά τους από το αναπνευστικό σύστημα προς τον οισοφάγο (γαστρεντερικό σύστημα) και τους λεμφαδένες. Τα αποτελέσματα

του μοντέλου ExDoM2 δεν μπορούν να συγκριθούν με το Luder επειδή δεν παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να υπολογίσει τον καθαρισμό για μη ραδιενεργά σωματίδια.

Όσον αφορά στο μοντέλο MPPD, υπολογίζει την κατακράτηση στην τραχειοβρογχική περιοχή και στην κυψελιδική περιοχή. Επίσης υπολογίζει τη μάζα των σωματιδίων που μεταφέρεται στους λεμφαδένες. Όμως το μοντέλο MPPD δεν υπολογίζει την κατακράτηση των σωματιδίων στην εκτός θώρακα περιοχή, τη μάζα σωματιδίων που μεταφέρεται στον οισοφάγο και απορροφάται στο αίμα. Επομένως, με βάση τα παραπάνω, δεν μπορεί να γίνει σύγκριση με το μοντέλο MPPD.

Στο Διάγραμμα 41 παρουσιάζεται η κατακράτηση/συσσώρευση (retention) των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα, η απορρόφηση τους στο αίμα και η μεταφορά τους από το αναπνευστικό σύστημα στον οισοφάγο (γαστρεντερικό σύστημα) και στους λεμφαδένες για έναν ενήλικα άνδρα που εκτίθεται σε πολυδιάσπορα σωματίδια ($MMAD=5 \mu m$, $\sigma_g=2,5$ και συγκέντρωση $20 \mu g/m^3$) με πυκνότητα $1,5 g/cm^3$ και συντελεστής σχήματος 1 (σφαιρικά σωματίδια). Ο ενήλικας άνδρας εκτελεί ήπια εργασία (8 ώρες) σε περιβάλλον με ταχύτητα ανέμου $1 m/s$.





Διάγραμμα 41*: Σύγκριση μοντέλου ExDoM2 με το μοντέλο ExDoM.

Η σύγκριση του μοντέλου ExDoM2 που βασίζεται στην ICRP (2015) με το μοντέλο ExDoM που βασίζεται στην ICRP (1994) πραγματοποιήθηκε και για τους τρεις ρυθμούς απορρόφησης (γρήγορος, μέτριος, αργός) στο αίμα. Οι σημαντικότερες διαφορές του ExDoM2 με το ExDoM που παρατηρήθηκαν στο Διάγραμμα 41 είναι:

* Στο Διάγραμμα 41 δεν παρουσιάζεται η κατακράτηση στην ET1 περιοχή. Το μοντέλο ExDoM (Αλεξανδροπούλου, 2010) δεν υπολογίζει την κατακράτηση στην ET1 περιοχή και επομένως δεν μπορεί να συγκριθεί με το μοντέλο ExDoM2 (Chalvatzaki και Lazaridis κ.ά., 2015).

- Υψηλότερη δόση στην ET_{seq} περιοχή στο ExDoM2 σε σχέση με το ExDoM. Αυτό οφείλεται στο ότι η ICRP (2015) αύξησε το ποσοστό των σωματιδίων που δεσμεύονται στα τοιχώματα των αεραγωγών της εκτός θώρακας περιοχής (ET_{seq}) από 0,05% σε 0,2%.
- Χαμηλότερη δόση στις BB_{seq} και bb_{seq} περιοχές στο ExDoM2 σε σχέση με το ExDoM. Αυτό οφείλεται στο ότι η ICRP (2015) μείωσε το ποσοστό των σωματιδίων που δεσμεύονται στα τοιχώματα των αεραγωγών της θωρακικής περιοχής (BB_{seq} και bb_{seq}) από 0,7% σε 0,2%.
- Υψηλότερη δόση στους λεμφαδένες της εκτός θώρακα περιοχής (LN_{ET}). Αυτό οφείλεται στην υψηλότερη δόση στην ET_{seq} περιοχή στο ExDoM2 σε σχέση με το ExDoM. Επομένως, περισσότερα σωματίδια μεταφέρονται από την ET_{seq} περιοχή στους λεμφαδένες LN_{ET} .
- Χαμηλότερη δόση στους λεμφαδένες της θωρακικής περιοχής (LN_{th}). Αυτό οφείλεται στο ότι οι ρυθμοί μεταφοράς από τις BB_{seq} και bb_{seq} περιοχές στους λεμφαδένες της θωρακικής περιοχής (LN_{th}) μειώθηκαν από $0,01\text{ d}^{-1}$ σε $0,001\text{ d}^{-1}$.
- Υψηλότερη δόση στην ET'_2 περιοχή στο ExDoM2 σε σχέση με το ExDoM αυτό οφείλεται στη μεταφορά σωματιδίων από την ET_1 περιοχή στην ET'_2 περιοχή.
- Λιγότερα σωματίδια απορροφούνται στο αίμα (αφορά το γρήγορο ρυθμό απορρόφησης) με βάση το ExDoM2 σε σχέση με το ExDoM. Αυτό οφείλεται στο ότι ο ρυθμός διάλυσης μειώθηκε από 100 d^{-1} σε 30 d^{-1} στο μοντέλο ExDoM2.
- Λιγότερα σωματίδια απορροφούνται στο αίμα (αφορά το μέτριο ρυθμό απορρόφησης) με βάση το ExDoM2 σε σχέση με το ExDoM. Παρόλο που το κλάσμα του υλικού που διαλύεται γρήγορα αυξήθηκε από 0,1 σε 0,2 λιγότερα σωματίδια απορροφούνται στο αίμα επειδή μειώθηκε ο ρυθμός διάλυσης των συστατικών που διαλύονται γρήγορα από 100 d^{-1} σε 3 d^{-1} .
- Περισσότερα σωματίδια απορροφούνται στο αίμα (αφορά τον αργό ρυθμό απορρόφησης) με βάση το ExDoM2 σε σχέση με το ExDoM. Παρόλο που μειώθηκε ο ρυθμός διάλυσης των συστατικών που

διαλύονται γρήγορα από 100 d^{-1} σε 3 d^{-1} περισσότερα σωματίδια απορροφούνται στο αίμα επειδή το κλάσμα του υλικού που διαλύεται γρήγορα δεκαπλασιάστηκε.

Όσον αφορά στο PBPK μοντέλο του ExDoM2, δεν υπάρχει μοντέλο δοσιμετρίας (διαθέσιμο στο κοινό και να αφορά $\text{PM}_{\text{μέταλλα}}$) που να ενσωματώνει PBPK μοντέλο. Το Luder ενσωματώνει κινητικό μοντέλο μόνο για ραδιενεργά σωματίδια ενώ το ExDoM και το MPPD δεν έχουν ενσωματωμένο PBPK μοντέλο.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

13.1. Συμπεράσματα

Ένας από τους σημαντικότερους ρύπους που καταγράφονται σε μονάδες διαχείρισης απορριμμάτων είναι τα αιωρούμενα σωματίδια. Μάλιστα επιστημονικές μελέτες καταδεικνύουν ότι η έκθεση των ανθρώπων σε αιωρούμενα σωματίδια (λεπτά σωματίδια) είναι πιο επικίνδυνη από ότι η έκθεση σε άλλους ατμοσφαιρικούς ρύπους. Για αυτόν τον λόγο στην παρούσα εργασία εξετάζονται τα επίπεδα των αιωρούμενων σωματιδίων στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων.

Η εφαρμογή του μοντέλου διασποράς έδειξε ότι η κίνηση των απορριμματοφόρων αποτελεί τη σημαντικότερη πηγή αιωρούμενων σωματιδίων στους εξωτερικούς χώρους της μονάδας διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων. Για παράδειγμα, στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου η συνεισφορά της κίνησης των απορριμματοφόρων στα επίπεδα των PM_{10} στην ατμόσφαιρα είναι ίση με 54% (μέση τιμή) τις καθημερινές και 36% (μέση τιμή) τα σαββατοκύριακα. Στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων παρατηρήθηκαν αυξημένες συγκεντρώσεις PM_{10} και διαπιστώθηκαν υπερβάσεις της θεσμοθετημένης μέσης ημερήσιας οριακής τιμής των $50 \mu g/m^3$. Συγκεκριμένα στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου παρατηρήθηκαν 17, 27, 26, και 17 υπερβάσεις για τους μήνες Μάρτιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο, αντίστοιχα.

Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις PM_{10} παρατηρούνται τους μήνες Αύγουστο ($71 \mu g/m^3$ τις καθημερινές και $56 \mu g/m^3$ τα σαββατοκύριακα) και Σεπτέμβριο ($86 \mu g/m^3$ τις καθημερινές και $56 \mu g/m^3$ τα σαββατοκύριακα) λόγω της αύξησης της ποσότητας των απορριμμάτων που παράγονται κατά τη διάρκεια της τουριστικής περιόδου και επομένως της αύξησης του αριθμού

των απορριμματοφόρων που κινούνται στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων. Όσον αφορά στην εβδομαδιαία διακύμανση των αιωρούμενων σωματιδίων, προέκυψε το συμπέρασμα ότι οι συγκεντρώσεις που παρατηρούνται τα σαββατοκύριακα είναι αισθητά μειωμένες. Αυτή η μείωση οφείλεται κατά κύριο λόγο στο γεγονός ότι ελαχιστοποιούνται αισθητά οι διαδρομές των απορριμματοφόρων. Επίσης, σημαντική αύξηση των επιπέδων συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων παρατηρούνται τις πρωινές ώρες λόγω της αυξημένη ροής απορριμματοφόρων.

Οι αυξημένες συγκεντρώσεις που καταγράφονται στις μονάδες διαχείρισης απορριμμάτων προκαλούν ανησυχία ως προς την έκθεση των εργαζομένων σε αιωρούμενα σωματίδια και τις επακόλουθες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Επομένως, τα αποτελέσματα από το μοντέλο διασποράς (για τους εξωτερικούς χώρους) και από τις πειραματικές μετρήσεις (για τους εσωτερικούς χώρους) ανέδειξαν την ανάγκη υπολογισμού της εσωτερικής δόσης αιωρούμενων σωματιδίων των εργαζομένων στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων. Μια από τις πλέον εφαρμοσμένες μεθόδους για τον υπολογισμό της εσωτερικής δόσης των αιωρούμενων σωματιδίων είναι τα μοντέλα δοσιμετρίας.

Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας ένα μοντέλο δοσιμετρίας (ExDoM2). Το μοντέλο ExDoM2 υπολογίζει την εναποτιθέμενη δόση σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα, την κατακράτηση/συσσώρευση τους σε αυτό, τη μεταφορά τους στο οισοφάγο και στους λεμφαδένες και τέλος τη διάσπαση των σωματιδίων σε συστατικά, τη πρόσληψη τους στο αίμα και της μεταφοράς των μετάλλων (As, Mn, Pb, Cd και Cr) που περιέχουν τα αιωρούμενα σωματίδια από το αίμα στο ανθρώπινο σώμα. Επίσης, το μοντέλο ExDoM2 μπορεί να εφαρμοστεί σε πραγματικές συνθήκες έκθεσης επιτρέποντας στο χρήστη να εισάγει διαφορετικές μετρήσεις κατανομής μεγέθους σωματιδίων (ανά ώρα) για τον καθορισμό ρεαλιστικού σεναρίου έκθεσης του ανθρώπου σε διαφορετικά μικροπεριβάλλοντα κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Επομένως, το μοντέλο ExDoM2 που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας αντιμετωπίζει ολοκληρωμένα το πρόβλημα της εσωτερικής δόσης αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο σώμα. Οι

περισσότερες από τις μέχρι σήμερα ερευνητικές προσπάθειες στον τομέα της δοσιμετρίας περιορίζονται στον υπολογισμό της εναποτιθέμενης δόσης των αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα ή της απομάκρυνσης των αιωρούμενων σωματιδίων μετά την απόθεση.

Το μοντέλο ExDoM2 εφαρμόστηκε σε τέσσερις κατηγορίες ατόμων: (α) εργαζόμενοι στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου, (β) εργαζόμενοι στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής (1^η βάρδια), (γ) εργαζόμενοι στο εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής (2^η βάρδια) και (δ) μη-εργαζόμενοι στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων. Οι εργαζόμενοι κοντά στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου εκτίθενται σε υψηλές συγκεντρώσεις PM₁₀ λόγω της κίνησης των απορριμματοφόρων. Από τους εσωτερικούς χώρους επιλέχθηκε ο εσωτερικός χώρος διαλογής διότι εργάζονται τα περισσότερα άτομα και λόγω των υψηλών PM₁₀ συγκεντρώσεων που καταγράφονται κατά τη διάρκεια των ωρών εργασίας. Οι μέσες συγκεντρώσεις PM₁₀ είναι ίσες με 234 μg/m³ και 188 μg/m³ για την πρώτη και δεύτερη βάρδια, αντίστοιχα. Η διαφορά στις συγκεντρώσεις για τις δύο βάρδιες οφείλεται στην απουσία λειτουργίας της ταινίας που υποδέχεται τα σύμμεικτα απορρίμματα κατά την απογευματινή βάρδια. Σχετικά με το μη-εργαζόμενο στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων αφορά έναν ενήλικα άνδρα που εκτίθεται σε PM₁₀ συγκεντρώσεις στην περιοχή υποβάθρου (11 km μακριά από το ΧΥΤ Χανίων) κατά τη διάρκεια των ωρών εργασίας. Τις υπόλοιπες ώρες και μέρες το εκτιθέμενο άτομο (αφορά και τις τέσσερις κατηγορίες ατόμων) εκτίθεται σε PM₁₀ συγκεντρώσεις σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους στην περιοχή υποβάθρου.

Απαραίτητα δεδομένα εισόδου για την εφαρμογή του μοντέλου ExDoM2 στους εργαζομένους της μονάδας διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων είναι τα δεδομένα συγκεντρώσεων μάζας αιωρούμενων σωματιδίων, κατανομής μεγέθους της μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων και περιεκτικότητας των αιωρούμενων σωματιδίων σε μέταλλα. Η περιεκτικότητα των αιωρούμενων σωματιδίων σε μέταλλα συμβάλει στην τοξικότητα των αιωρούμενων σωματιδίων ενώ η κατανομή μεγέθους σωματιδίων παίζει σημαντικό ρόλο για τον καθορισμό της περιοχής εναπόθεσης των αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα.

Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων καταδεικνύουν υψηλές συγκεντρώσεις $PM_{\text{Μέταλλα}}$ τόσο στους εσωτερικούς χώρους όσο και στους εξωτερικούς χώρους της μονάδας διαχείρισης απορριμμάτων. Με βάση τον δείκτη εμπλουτισμού EF που υπολογίστηκε στην παρούσα εργασία εξήχθηκε το συμπέρασμα σημαντική ανθρωπογενή επίδραση στην προέλευση των μετάλλων. Συγκεκριμένα, οι τιμές EF των Cr, Ni, Cu, Zn, Pb εμφανίζονται πάνω από 100 το οποίο δηλώνει σημαντική ανθρωπογενή επίδραση στην προέλευση των συγκεκριμένων μετάλλων ενώ οι τιμές EF των Fe και Mn είναι μεταξύ 5 και 100 το οποίο δηλώνει τόσο ανθρωπογενή όσο και φυσική επίδραση στην προέλευση των συγκεκριμένων μετάλλων. Επομένως, είναι αναγκαία η εφαρμογή του μοντέλου ExDoM2 όχι μόνο για τα PM_{10} αλλά και για τα $PM_{\text{Μέταλλα}}$. Ειδικότερα για τα μέταλλα (As, Pb, Cd, Cr και Mn) που έχουν ενσωματωθεί στο PBPΚ μοντέλο του ExDoM2 για τη μεταφορά τους από το αίμα στο ανθρώπινο σώμα (π.χ. εγκέφαλος, συκώτι κτλ). Θα πρέπει να αναφερθεί ότι δεν ανιχνεύθηκε στα δείγματα As και Cd κα επομένως το PBPΚ μοντέλο του ExDoM2 μπορεί να εφαρμοστεί μόνο για τα PM_{Pb} , PM_{Mn} και PM_{Cr} .

Με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου ExDoM2 η δόση σωματιδίων των εργαζομένων στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων είναι αυξημένη σε σύγκριση με εκείνη του γενικού πληθυσμού της περιοχής. Συγκεκριμένα, η μηνιαία εναποτιθέμενη δόση για τους εργαζόμενους στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου είναι διπλάσια (για τον Μάρτιο και τον Αύγουστο) και τριπλάσια (για τον Σεπτέμβριο και τον Δεκέμβριο) από την εναποτιθέμενη δόση για τους μη-εργαζόμενους στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων λόγω της υψηλής εργασιακής δόσης (π.χ. 68% της μηνιαίας εναποτιθέμενης δόσης για τον Μάρτιο και 76% για τον Σεπτέμβριο) των εργαζομένων στον εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου.

Επίσης, πραγματοποιήθηκε σύγκριση και μεταξύ των εργαζομένων στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν μεγαλύτερα επίπεδα δόσης PM_{10} για τους εργαζόμενους στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής (1^η βάρδια) λόγω της λειτουργίας της ταινίας που υποδέχεται τα σύμμεκτα απορρίμματα κατά την πρωινή βάρδια. Για παράδειγμα, η ημερήσια εναποτιθέμενη δόση των PM_{10} κατά τις εργάσιμες ημέρες του φθινοπώρου κυμαίνονται: (α) από 719 μg έως 2830 μg για εργαζόμενο στο εξωτερικό χώρο του ζυγιστηρίου, (β) από 1847 έως 3255 μg

για εργαζόμενο στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής (1^η βάρδια), (γ) από 1045 έως 2806 μg για εργαζόμενο στον εσωτερικό χώρο χειροδιαλογής (2^η βάρδια) και (δ) από 276 έως 510 μg για μη-εργαζόμενο στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα του μοντέλου ExDoM2 για τα $\text{PM}_{\text{Μέταλλα}}$ παρατηρήθηκε υψηλότερη εναποτιθέμενη δόση στο αναπνευστικό σύστημα για τα PM_{Fe} (για όλες τις εποχές εκτός από τον Χειμώνα). Η υψηλή η εναποτιθέμενη δόση σε PM_{Fe} οφείλεται στη φύση των υλικών (π.χ. λευκοσιδηρούχα απορρίμματα) που εισέρχονται στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων και στο ότι ο Fe αποτελεί βασικό στοιχείο του φλοιού της Γης. Κατά τη διάρκεια του Χειμώνα δεν εμφανίζονται PM_{Fe} λόγω των υγρών κατακρημνίσεων. Η συγκέντρωση των μετάλλων μειώνεται δραστικά όταν επικρατούν φαινόμενα υγρών κατακρημνίσεων λόγω του περιορισμού στην επαναιώρηση σκόνης και τον τακτικό καθαρισμό της ατμόσφαιρας από τα αιωρούμενα σωματίδια μέσω της ενσωμάτωσης των σωματιδίων στα υδροσταγονίδια και την απόπλυση τους με τη βροχή. Όσον αφορά στα μέταλλα που έχουν ενσωματωθεί στο PBPK μοντέλο του ExDoM2, παρατηρήθηκε ότι η μεγαλύτερη συσσώρευση για τον Pb εμφανίζεται στα οστά και στο αίμα, για το Mn εμφανίζεται στο υπόλοιπο σώμα και στους πνεύμονες και για το Cr στο γαστρεντερικό σύστημα και στους πνεύμονες. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε συμφωνία με τη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία.

Τέλος, θα πρέπει να επισημανθεί η ανάγκη σχεδιασμού μέτρων για τη μείωση των αιωρούμενων σωματιδίων που παράγονται στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Νομού Χανίων και μέτρων προστασίας της υγείας των εργαζομένων από την εισπνοή αιωρούμενων σωματιδίων. Τα προτεινόμενα μέτρα για τη μείωση των αιωρούμενων σωματιδίων είναι: (1) έκπλυση των τροχών των απορριμματοφόρων, (2) επίστρωση όπου είναι δυνατόν των επιφανειών χώματος, (3) συχνή διαβροχή όπου είναι δυνατόν των επιφανειών που εκπέμπουν αιωρούμενα σωματίδια, (4) περιμετρική φύτευση λόγω της ικανότητας των φυλλωμάτων των δέντρων να κατακρατούν τη σκόνη, (5) συχνή διαβροχή και τακτική συντήρηση των δρόμων που κινούνται τα απορριμματοφόρα, (6) αφαίρεση της σκόνης πάνω από τους δρόμους με τη χρήση ειδικών μηχανημάτων με περιστροφική βούρτσα και (7)

τακτικό καθαρισμό και αντικατάσταση των φίλτρων του συστήματος εξαερισμού. Για την προστασία της υγείας των εργαζόμενων από την εισπνοή αιωρούμενων σωματιδίων τα προτεινόμενα μέτρα είναι: (1) ορθή χρήση της προστατευτικής μάσκας από τους εργαζόμενους και (2) ετήσιες εξετάσεις αίματος μολύβδου στους εργαζόμενους.

13.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Το μοντέλο δοσιμετρίας (ExDoM2) που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία ενσωματώνει ένα PBPK μοντέλο για τη μεταφορά 5 μετάλλων (As, Mn, Pb, Cd και Cr) που περιέχουν τα αιωρούμενα σωματίδια από το αίμα στο ανθρώπινο σώμα. Η προσθήκη περισσότερων μετάλλων στο PBPK μοντέλο του ExDoM2 προτείνεται για μελλοντική έρευνα. Τα απαραίτητα δεδομένα προκειμένου να προσθέσουν επιπλέον μέταλλα στο PBPK μοντέλο του ExDoM2 είναι: (1) συντελεστής κατανομής ιστού/αίματος, (2), τα όργανα που μετατρέπουν το μέταλλο σε λιγότερες ή περισσότερες τοξικές μορφές (π.χ. το As μετατρέπεται σε λιγότερα τοξικά προϊόντα (MMA, DMA) στο συκώτι και στους νεφρούς), (3) ρυθμός απέκκρισης και μεταβολισμού (elimination and metabolic rate constants). Αυτά τα δεδομένα προκύπτουν από πειράματα σε ζώα και προσαρμόζονται στους ανθρώπους. Επιπλέον προτάσεις για μελλοντική έρευνα είναι:

- Τροποποίηση του μοντέλου ExDoM2 για την πρόσληψη μετάλλων μέσω της διατροφής (κατανάλωσης τροφής και νερού).
- Προσθήκη της έκθεσης σε αιωρούμενα σωματίδια μέσω της δερματικής επαφής.
- Πραγματοποίηση πειραματικών μετρήσεων (συγκεντρώσεων μάζας αιωρούμενων σωματιδίων, κατανομής μεγέθους της μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων και χημικές αναλύσεις για την περιεκτικότητα των αιωρούμενων σωματιδίων σε μέταλλα) στον αναβαθμισμένο ΕΜΑΚ Χανίων. Ο ΕΜΑΚ Χανίων θα εκσυγχρονιστεί με οπτικούς διαχωριστές για τη διαλογή των απορριμμάτων.
- Εξέταση της συνεργιστικής επίδρασης μειγμάτων μετάλλων. Τα PBPK μοντέλα που υπάρχουν στην επιστημονική βιβλιογραφία επικεντρώνονται σε ένα μέταλλο και δεν λαμβάνουν υπόψη την

ταυτόχρονη έκθεση σε μείγματα μετάλλων. Αυτό οφείλεται στο ότι δεν υπάρχουν διαθέσιμα ποσοτικά δεδομένα/στοιχεία στην επιστημονική βιβλιογραφία για τη συνεργιστική επίδραση μεταξύ των μετάλλων.

13.3. Συμβολή της έρευνας και στοιχεία καινοτομίας

Το μοντέλο ExDoM2 που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας φιλοδοξεί να αποτελέσει την απαρχή μιας σειράς εργασιών, σχετικών με την κατανόηση των μηχανισμών των αιωρούμενων σωματιδίων που εισέρχονται στον οργανισμό, εναποτίθενται, συσσωρεύονται και μεταφέρονται στη συνέχεια στο υπόλοιπο σώμα, με τελικό στόχο τη διεξοδικότερη και βαθύτερη γνώση σε θέματα που άπτονται σε μοντέλα δοσιμετρίας που προσομοιώνουν τους παραπάνω μηχανισμούς. Το μοντέλο ExDoM2 υπολογίζει την:

- εναποτιθέμενη δόση (deposited dose) των αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα,
- κατακράτηση/συσσώρευση (retention) των αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα,
- μεταφορά των αιωρούμενων σωματιδίων στον οισοφάγο (γαστρεντερικό σύστημα) και στους λεμφαδένες,
- απορρόφηση τους στο αίμα,
- μεταφορά των μετάλλων (As, Pb, Cd, Cr και Mn) που περιέχουν τα αιωρούμενα σωματίδια από το αίμα στο σώμα (π.χ. συκώτι, νεφρά κτλ) με τη χρήση PBPK μοντέλων.

Τα υφιστάμενα μοντέλα δοσιμετρίας στην επιστημονική βιβλιογραφία αντιμετωπίζουν αποσπασματικά το πρόβλημα της εσωτερικής δόσης αιωρούμενων σωματιδίων. Συνήθως, περιορίζονται στον υπολογισμό της εναποτιθέμενης δόσης των αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα ή της απομάκρυνσης των αιωρούμενων σωματιδίων από το αναπνευστικό μετά την απόθεση τους. Επίσης τα υφιστάμενα μοντέλα δεν λαμβάνουν υπόψη τις πραγματικές συνθήκες έκθεσης του εκτιθέμενου ατόμου. Το μοντέλο ExDoM2 επιτρέπει στο χρήστη να εισάγει διαφορετικές μετρήσεις κατανομής μεγέθους σωματιδίων ανά ώρα για τον καθορισμό

ρεαλιστικού σεναρίου έκθεσης του ανθρώπου σε διαφορετικά μικροπεριβάλλοντα κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Όσον αφορά στα μοντέλα που βασίζεται το ExDoM2 θα πρέπει να αναφερθεί ότι το μοντέλο της ICRP (2015) εφαρμόζεται μόνο για ραδιενεργά σωματίδια ενώ το ExDoM της Δρ. Β. Αλεξανδροπούλου δεν ενσωματώνει PBPΚ μοντέλο για τη μεταφορά των βαρέων μετάλλων (As, Pb, Cd, Cr και Mn) που περιέχουν τα αιωρούμενα σωματίδια από το αίμα στο ανθρώπινο σώμα και δεν λαμβάνει υπόψη τους νέους μηχανισμούς καθαρισμού σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα με βάση τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε από την ICRP (2015). Επίσης, δεν επιτρέπει στο χρήστη να εισάγει διαφορετικές μετρήσεις κατανομής μεγέθους σωματιδίων ανά ώρα.

Σχετικά με τα PBPΚ μοντέλα που βασίζεται το PBPΚ μοντέλο του ExDoM2 χρησιμοποιούν απλοποιημένες εξισώσεις για την εναπόθεση των σωματιδίων στον αναπνευστικό σύστημα και δεν λαμβάνουν υπόψη τους μηχανισμούς εναπόθεσης και καθαρισμού σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα που λαμβάνει το ExDoM2. Επίσης, στο μοντέλο ExDoM2 πραγματοποιείται διαφοροποίηση του ρυθμού ροής του αίματος ανάλογα με τη σωματική δραστηριότητα, το φύλο και την ηλικία του εκτιθέμενου ατόμου.

Επίσης, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις στην μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν:

- πειραματικές μετρήσεις συγκεντρώσεων μάζας αιωρούμενων σωματιδίων,
- πειραματικές μετρήσεις κατανομή μεγέθους της μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων και
- χημικές αναλύσεις για την περιεκτικότητα των αιωρούμενων σωματιδίων σε μέταλλα.

Είναι η πρώτη φορά που στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων πραγματοποιούνται πειραματικές μετρήσεις στις συγκεκριμένες παραμέτρους (κατανομή μεγέθους της μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων και χημικές αναλύσεις για την περιεκτικότητα των αιωρούμενων σωματιδίων σε μέταλλα). Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν ελάχιστα επιστημονικά άρθρα που επικεντρώνονται στις συγκεκριμένες παραμέτρους (κατανομή

μεγέθους και χημικές αναλύσεις). Οι πειραματικές μετρήσεις και τα αποτελέσματα του μοντέλου διασποράς (το μοντέλο διασποράς εφαρμόστηκε για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων PM_{10} λόγω της αιολικής διάβρωσης των σωρών του κομπόστ, της κίνησης των απορριμματοφόρων και της αιολικής διάβρωσης της χωματοκάλυψης του ΧΥΤ) χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου για την εφαρμογή του μοντέλου ExDoM2 σε εργαζόμενους στη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων του Ν. Χανίων. Τέλος, στην Ενότητα 13.4 παρουσιάζονται οι δημοσιεύσεις που πρόέκυψαν κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

13.4. Δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια

Δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά που σχετίζονται με το θέμα της διδακτορικής διατριβής

Chalvatzaki E., Kopanakis I. and Lazaridis M. (to be submitted). Size distribution and metal composition of airborne particles in a waste management facility.

Chalvatzaki E. and Lazaridis M. (2015). Development and application of a dosimetry model (ExDoM2) for calculating internal dose of specific particle-bound metals in the human body. *Inhalation Toxicology* 27 (6), 308-320.

Chalvatzaki E. and Lazaridis M. (2015). Particulate matter characterization in an indoor workplace environment of a landfill. *Global Nest Journal* 17, 370-378.

Chalvatzaki E., Glytsos T. and Lazaridis M. (2015). A methodology for the determination of fugitive dust emissions from landfill sites. *International Journal of Environmental Health Research* 25 (5), 551-569.

Chalvatzaki E., Aleksandropoulou V. and Lazaridis M. (2014). A case study of landfill workers exposure and dose to particulate matter-bound metals. *Water, Air and Soil Pollution* 225, 1782-1800.

Chalvatzaki E., Aleksandropoulou V., Glytsos T. and Lazaridis M. (2012). The effect of dust emissions from open storage piles to particle ambient concentration and human exposure. *Waste Management* 32, 2456-2468.

Δημοσιεύσεις έμμεσα σχετιζόμενες με το θέμα της διδακτορικής διατριβής

α) Επιστημονικά περιοδικά

Mammi-Galani E., Chalvatzaki E. and Lazaridis M. (in press). Exposure and Dose of Inhaled Ambient Particulate Matter Bound Metals in Five European Cities. Aerosol and Air Quality Research. doi: 10.4209/aaqr.2015.09.0536.

β) Συνέδρια

Kopanakis I., Chalvatzaki E., Kalogerakis N. and Lazaridis M. (2011). Particulate matter concentration and chemical composition during excavation works for a restoration of an uncontrolled landfill. 12th International conference on environmental science and technology (CEST2011), 8-10 September 2011, Rhodes Island, Greece.

Παλαιότερες Δημοσιεύσεις

α) Επιστημονικά περιοδικά

Chalvatzaki E., Kopanakis I., Kontaksakis M., Glytsos T., Kalogerakis N. and Lazaridis M. (2010). Measurements of particulate matter concentrations at a landfill site (Crete, Greece). Waste Management 30, 2058-2064.

Chalvatzaki E. and Lazaridis M. (2010). Assessment of air pollutant emissions from the Akrotiri landfill site (Chania, Greece). Waste Management and Research, 28, 778-788.

Chalvatzaki E. and Lazaridis M. (2010). Estimation of greenhouse gas emissions from landfills: Application to the Akrotiri landfill site (Chania, Greece). Global NEST Journal, Vol 12, No 1, pp 108-116.

β) Συνέδρια

Chalvatzaki E. and Lazaridis M. (2010) Estimation of Greenhouse gas emissions from municipal solid waste landfills in Greece. 2th International conference "Hazardous and Industrial Waste Management", 5 - 8 October 2010, Chania, Crete, Greece.

Chalvatzaki E. and Lazaridis M. (2009). Assessment of emissions of air pollutants from the Akrotiri landfill site (Chania, Greece). 11th International conference on environmental science and technology (CEST2009), 3-5 September 2009, Chania, Crete, Greece.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξένη Βιβλιογραφία

- Agilent Technologies (2008). Agilent 7500 series ICP-MS. Hardware manual.
<http://www.concordia.ca/content/dam/artsci/research/cbams/docs/7500celC-P-MShardwaremanualen.pdf>
- Aleksandropoulou V. and Lazaridis M. (2013). Development and application of a model (ExDoM) for calculating the respiratory tract dose and retention of particles under variable exposure conditions. *Air Qual Atmos Health* 6,13-26.
- Alloway B. J.(1995). *Heavy Metals in Soils*. Blackie Academic & Professional, London.
- Alvarez F.F., Rodriguez M.T., Espinosa A.J.F. and Daban A.G. (2004). Physical speciation of arsenic, mercury, lead, cadmium and nickel in inhalable atmospheric particles. *Analytica Chimica Acta* 524, 33-40.
- Amato F., Pandolfi M., Viana M., Querol X., Alastuey A. and Moreno T. (2009). Spatial and chemical patterns of PM₁₀ in road dust deposited in urban environment. *Atmospheric Environment* 43, 1650-1659.
- Anderson J.O., Thundiyil J.G. and Stolbach A. (2012). Clearing the Air: A Review of the Effects of Particulate Matter Air Pollution on Human Health. *J. Med. Toxicol.* 8,166–175.
- ATSDR (2013) Priority List of Hazardous Substances
<http://www.atsdr.cdc.gov/spl/>
- Briggs D. J., Hoogh K, Morris C. and Gulliver J. (2008). Effects of travel mode on exposures to particulate air pollution. *Environment International* 34, 12-22.
- Brown J.S. (2005.) Particle inhalability at low wind speeds. *Inhalation Toxicology* 17, 831-837.

- Brunekreef B. and Forsberg B. (2005). Epidemiological evidence of effects of coarse airborne particles on health. *European Respiratory Journal* 26, 309–318.
- Chai X., Takayuki S., Cao X., Guo Q. and Zhao Y. (2007). Characteristics and mobility of heavy metals in an MSW landfill: Implications in risk assessment and reclamation. *J. Hazard. Mater.* 144(1–2), 485–491.
- Chaloulakou A., Kassomenos P., Spyrellis N., Demokritou P. and Koutrakis P. (2003). Measurements of PM₁₀ and PM_{2.5} particle concentrations in Athens, Greece. *Atmospheric Environment* 37(5), 649-660.
- Chalvatzaki E., Kopanakis I., Kontaksakis M., Glytsos T., Kalogerakis N. and Lazaridis M. (2010). Measurements of particulate matter concentrations at a landfill site (Crete, Greece) *Waste Management* 30, 2058-2064.
- Chalvatzaki E., Aleksandropoulou V., Glytsos T. and Lazaridis M. (2012). The effect of dust emissions from open storage piles to particle ambient concentration and human exposure. *Waste Management* 32, 2456-2468.
- Chalvatzaki E., Aleksandropoulou V. and Lazaridis M. (2014). A case study of landfill workers exposure and dose to particulate matter-bound metals. *Water Air Soil Pollution* 225, 1782-1800.
- Chalvatzaki E., Glytsos T. and Lazaridis M. (2015). A methodology for the determination of fugitive dust emissions from landfill sites. *International Journal of Environmental Health Research* 25 (5), 551-569.
- Chalvatzaki E. and Lazaridis M. (2015). Development and application of a dosimetry model (ExDoM2) for calculating internal dose of specific particle-bound metals in the human body. *Inhalation toxicology* 27 (6), 308-320.
- Chen J., Tan M., Li Y., Zheng G., Zhang Y., Shan Z., Zhang G. and Li Y (2008). Characteristics of trace elements and lead isotope ratios in PM_{2.5} from four sites in Shanghai. *Journal of Hazardous Materials* 156, 36-43.
- Chester R., Kudoja W.M., Thomas A. and Towner J. (1984). Pollution reconnaissance in stream sediment using non-residual trace metals. *Environ. Pollut.* 10, 213-238.
- Chou W.C., Chio C.O. and Liao C. M. (2009). Assessing airborne PM-bound arsenic exposure risk in semiconductor manufacturing facilities. *J Hazard Mater* 167, 976–86.

- Choi Y. 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. *Atmos Environ.* 42, 6039–6046.
- Dockery D.W., Pope A.C. III, Xu X., Spengler J.D., Ware J.H., Fay M.E., et al. (1993). An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *N Engl J Med* 329(24):1753–1759.
- Dyer A.J.(1974). A review of flux-profile relationships. *Boundary-Layer Meteorol.* 7, 363–372.
- FAO/WHO. (1999). Codex Alimentarius Commission. Draft maximum levels for lead. CX/FAC 00/24. Joint FAO/WHO Food Standards Programme Codex Committee on Food Additives and Contaminants. <http://www.inchem.org/documents/jecfa/jecmono/v44jec12.htm>
- Fatogoma O., Jacko R.B. (2002). A model to estimate mixing height and its effect on ozone modeling. *Atmos. Environ.* 36, 3699–3708.
- Faulkner W.B., Shaw B.W. and Grosch T. (2008). Sensitivity of two dispersion models (AERMOD and ISCST3) to input parameters for a rural ground-level area source. *J Air Waste Manage Assoc.* 58, 1288–1296.
- Finlayson-Pitts B. and Pitts J.N. (2000). Chemistry of the upper and lower Atmosphere Theory. Experiments and Applications. Academic Press.
- Friedlander S.K. (2000). Smoke, Dust and Haze. Fundamentals of Aerosol Dynamics Second Edition. New York, Oxford: Oxford University Press.
- Garratt J.R. (1994). The Atmospheric Boundary Layer. Cambridge University Press, Cambridge.
- Golder D. (1972). Relations among stability parameters in the surface layer. *Boundary Layer Meteorology* 3, 47–58.
- Han S., Youn J.S., Jung Y.. (2011). Characterization of PM₁₀ and PM_{2.5} source profiles for resuspended road dust collected using mobile sampling methodology. *Atmospheric Environment* 45, 3343–3351.
- Hanna S.R., Egan B.A., Purdum J., Wagler J. (2001). Evaluation of the ADMS, AERMOD, and ISC3 dispersion models with the OPTEX, Duke Forest, Kincaid, Indianapolis and Lovett field datasets. *Int J Environ Pollut.* 16, 301–314.
- Hansen J.E. and Ampaya E.P. (1975). Human air space shapes, sizes, areas, and volumes. *Journal of Applied Physiology* 38(6), 990-995.

- Harrison R.M. and Yin J. (2000). Particulate matter in the Atmosphere: Which Particles Properties are Responsible for its Effects on Health. *Science of the Total Environment* 249, 85-101.
- Hinds W.C. (1999). *Aerosol Technology: Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles*. Second edition. John Wiley & Sons Inc.
- Hussain M., Madl P. and Khan A. (2011) Lung deposition predictions of airborne particles and the emergence of contemporary diseases Part-I. *The Health* 2 (2), 51-59.
- ICRP (1994) Human respiratory tract model for radiological protection. ICRP Publication 66. Pergamon, Oxford.
- ICRP (2003). Human basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values. ICRP Publication 89. Pergamon, Oxford.
- ICRP (2015). Occupational intakes of radionuclides: Part 1. ICRP Publication 130. *Ann. ICRP* 44 (2).
- ICRP (in advanced drafting). Occupational intakes of radionuclides: Part 2. *Ann. ICRP*.
- ICRP (in advanced drafting). Occupational intakes of radionuclides: Part 3. *Ann. ICRP*.
- Karanasiou A.A., Sitaras I.E., Siskos P.A. and Eleftheriadis K. (2007). Size distribution and sources of trace metals and n-alkanes in the Athens urban aerosol during summer. *Atmospheric environment* 41, 2368-2381.
- Kiehl J.T and Rodhe H. (1995). Modeling geographical and seasonal forcing due to aerosols. In *Aerosol Forcing of Climate*, edited by Charlson R.J and Heintzenberg J., Wiley, New York.
- Kjellstrom T. and Nordberg G.F. (1978). A kinetic model of cadmium metabolism in the human being. *Environ Res* 16, 248–69.
- Koshy L., Jones T. and Berube K. (2009). Characterization and bioreactivity of respirable airborne particles from a municipal landfill. *Biomarkers*, 14(S1), 49–53.
- Kumar A., Bellam N.K., Sud A. (1999). Performance of an industrial source complex model: predicting long-term concentrations in an urban area. *Environ Prog.* 18, 93–100.

- Laden. F., Neas L., Dockery D. and Schwartz J. (2000). Association of Fine Particulate matter from Different Sources with Daily Mortality in Six U. S. Cities. *Env. Health Perspectives* 108, 941-947.
- Liao C.M., Lin T.L. and Chen S.C.. (2008). A Weibull-PBPK model for assessing risk of arsenic related children skin lesions. *Sci Total Environ* 392,203–17.
- Liu M. and Westphal D.L. (2001). A study of the sensitivity of simulated mineral dust production to model resolution. *J Geophys Res.* 106,18099–18112.
- Lough G.C., Schauer J.J., Park J.S, Shafer M.M., DeMinter J.T. and Weinstein J.P. (2005). Emissions of Metals Associated with Motor Vehicle Roadways. *Environ Sci Technol.* 39 (3), 826-836.
- Ménache 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.
- Michaels R and Kleinman M. (2000) Incidence and apparent health significance of brief airborne particles excursions, *Aerosol Sci Tech* 32, 93–105.
- Milford C., Castell N., Marrero C., Rodriguez S., Sanchez de la Campa A.M., Fernandez-Camacho R., de la Rosa J. and Stein A.F. (2013). Measurements and simulation of speciated PM_{2.5} in south-west Europe. *Atmospheric Environment* 77, 36-50.
- Mitsakou C, Helmis C, Housiadas C. (2005) Eulerian modeling of lung deposition with sectional representation of aerosol dynamics. *J Aerosol Sci* 36,75–94.
- Mohan M. and Siddiqui T.A. (1998). Analysis of various schemes for the estimation of atmospheric stability classification. *Atmos Environ.* 32, 3775–3781.
- Morawska L. and Salthammer T. (2003). *Indoor environment*. Darmstadt: Wiley-VCH, 450 pp.
- Mutlu G.M.D, Green A., Bellmeyer C.M., Baker Z., Burgess N., Rajamannan J.W., Christman N., et al., (2007). Ambient particulate matter accelerates coagulation via an IL-6-dependent pathway. *The journal of Clinical Investigation* 117, 2952-2961.

- O'Flaherty E.J., Kerger B.D., Hays S.M. and Paustenbach D.J. (2001). A physiologically based model for the ingestion of chromium (III) and Chromium (VI) by humans. *Toxicol Sci* 60,196–213.
- Pacyna (1995). Sources, particle size distribution and transport of aerosols. Airborne particulate matter. *The Handbook of Environmental Chemistry*. Springer.
- Panofsky H.A. and Dutton J.A.(1984). *Atmospheric Turbulence: Models and Methods for Engineering Applications*. Wiley, New York.
- 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. *J Geophys Res*. 108, 9.1–9.21.
- 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.
- Pope C., Burnet, R., Thun, M., et al., (2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA* 287, 1132–1141.
- Pope C.A. and Dockery D.W. (2006) Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *Air Waste Manage Assoc* 56, 709-742.
- Pöschl Ulrich (2005). Review: Atmospheric Aerosols: Composition, Transformation, Climate and Health Effects, *Angewandte Chemie International Edition* 44(46), 7520 – 7540.
- Prechthai T., Parkpian P. and Visvanathan, C. (2008). Assessment of heavy metal contamination and its mobilization from municipal solid waste open dumping site. *J. Hazard. Mater.* 156(1–3), 86–94.
- Pritchard R.J., Ghio A.J., Lehmann J.R., Winsett D.W., Tepper J.S., Park P., Gilmour M.I., Dreher K.L. and Costa D.L. (1996) Oxidant generation and lung injury after particulate air pollution exposure increase with the concentrations of associated metals, *Inhal Toxicol.* 8, 457-477.
- RIVM. (2002). Multiple Path Particle Dosimetry Model (MPPD v 1.0): a model for human and rat airway particle dosimetry. Bilthoven, The Netherlands. RIVA Report 650010030.

- Ruzer L.S. and Hurley N.H. (2012). *Aerosols Handbook: Measurement, Dosimetry, and Health Effects*. Second Edition. CRC Press. Taylor and Francis Group.
- Salma I, Balashazy I, Winkler-Heil R, et al. (2002). Effect of particle mass size distribution on the deposition of aerosols in the human respiratory tract. *J Aerosol Sci* 33:119–32.
- Samara C. and Voutsas D. (2005). Size distribution of airborne particulate matter and associated heavy metals in the roadside environment. *Chemosphere* 59, 1197-1206.
- Schroeter J.D., Nong A., Yoon M., et al. (2011). Analysis of manganese tracer kinetics and target tissue dosimetry in monkeys and humans with multi-route physiologically based pharmacokinetic models. *Toxicol Sci* 120,481–98.
- Schwartz J., Dockery D.W. and Neas L.M. (1996). Is daily mortality associated specifically with fine particles? *J Air Waste Manag Assoc.* 46(10), 927–939.
- Schwarze P. E., Ovreik J., Lag M., Refsnes M., Nafstad P., Hetland R.B. and Dybing E. (2006). Particulate matter properties and health effects: consistency of epidemiological and toxicological studies. *Human & Experimental Toxicology* 25, 559-579.
- Seinfeld J.H and Pandis S.N. (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics- From Air Pollution to Climate Change*, 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc, New Jersey.
- Sharma M., Maheshwari M. and Morisawa S. (2005). Dietary and inhalation intake of lead and estimation of blood lead levels in adults and children in Kanpur, India. *Risk Anal* 25,1573–88.
- Silverman K.C., Tell J.G., Sargent E.V., Qiu Z. (2007). Comparison of the industrial source complex and AERMOD dispersion models: case study for human health risk assessment. *J Air Waste Manage Assoc.* 57, 1439–1446.
- Smith J.R.H., Bailey M.R., Etherington G., et al. (2011). An experimental study of 5584 clearance of inhaled particles from the human nose. *Exp. Lung Res.* 37(2), 5585 109–129.

- Sternbeck J., Sjodin A. and Andreasson K. (2002). Metal emissions from road traffic and the influence of resuspension-results from two tunnel studies. Atmos Environ 36, 4735-4744.
- Theodor Friedrichs & Co. Combined humidity/ temperature sensor 3030 in shelter operating manual. <http://www.th-friedrichs.de/en/home/>
- Theodor Friedrichs & Co. Wind speed sensor 4034 operating manual. <http://www.th-friedrichs.de/en/home/>
- Theodor Friedrichs & Co. Wind direction sensor 4122 operating manual. <http://www.th-friedrichs.de/en/home/>
- Thermo ESM Andersen Instruments GmbH (2003). Operating Manual, Particulate Monitoring Instrument, FH 62 I-R. http://www.instrumentcompaniet.no/files/THERMO_Datablad/FH62IR-english.pdf
- TSI (2010). Model 8520 DustTRAK Aerosol Monitor. Operation and Service Manual. http://www.tsi.com/uploadedFiles/Site_Root/Products/Literature/Manuals/1980198S-8520.pdf
- TSI (2012). DustTRAK DRX Aerosol Monitor. Operation and Service http://www.tsi.com/uploadedFiles/Site_Root/Products/Literature/Manuals/8533-8534-DustTrak_DRX-6001898-web.pdf
- Tu J., Inthavong K. and Ahmadi G. (2013). Computational Fluid and Particle Dynamics in the Human Respiratory System. Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering. Springer Science+Business Media Dordrecht. DOI 10.1007/978-94-007-4488-2.
- US-EPA (1986). Guidelines for Carcinogen Risk Assessment. EPA/630/R-00/004. <http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recordisplay.cfm?deid=54933>
- US-EPA (1995). User's Guide for the Industrial SourceComplex (ISC3) Dispersion Models, Volume II – Description of model algorithms, Office of Air Quality Planning and Standards Monitoring, and Analysis Emissions, USEPA -454/B-95-003b.
- US EPA. (1998). Toxicological review of trivalent chromium. CAS No. 16065-83-1. In support of summary information on the integrated risk information system (IRIS). <http://www.epa.gov/iris/toxreviews/0028tr.pdf>
- US-EPA (2005). Guidelines for Carcinogen Risk Assessment. EPA/630/P-03/001F. <http://www2.epa.gov/osa/guidelines-carcinogen-risk-assessment>

- US-EPA (2006). Miscellaneous Sources, Industrial Wind Erosion, AP 42, fifth ed., vol. I (Chapter 13.2.5). <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch13/>
- US-EPA (2012). Haul road workgroup final report submission to EPA-OAQPS; Available from: http://www.epa.gov/scram001/reports/Haul_Road_Workgroup-Final_Report_Package-20120302.pdf
- Van der Wal J.T. and Janssen L.H.J.M. (2000). Analysis of spatial and temporal variations of PM₁₀ concentrations in the Netherlands using Kalman filtering. *Atmospheric environment* 34, 3675-3687.
- Vedal S. (1997). Ambient particles and health: lines that divide. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 47, 551–581.
- Vega E., Mugica V., Reyes E., Sanchez G., Chow J. C. and Watson J. G. (2001). Chemical composition of fugitive dust emitters in Mexico City. *Atmospheric Environment* 35, 4033–4039.
- Weibel E. (1963) *Morphometry of the human lung*, Academic Press.
- Westbrook J.A. and Sullivan P.S. (2007). Fugitive dust modeling with AERMOD for PM₁₀ emissions from a municipal waste landfill air and waste management association – Guideline on air quality models: applications and FLAG developments 2006, An A&WMA specialty conference 164, 207-223. <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1321/ML13213A396.pdf>
- Westphal D.L., Toon O.B. and Carlson T.N. (1987). A two-dimensional numerical investigation of the dynamics and microphysics of Saharan dust storms. *J Geophys Res.* 92, 3027–3049.
- WHO. (1999b). Manganese and its compounds. Concise International Chemical Assessment Document 12. <http://whqlibdoc.who.int/publications/1999/924153012X.pdf>
- WHO (2000). *Air Quality Guidelines*, second ed, WHO Regional Office of Europe, Copenhagen, Denmark.
- WHO (2006). *Air Quality Guidelines for Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide*, Global update 2005, Summary of Risk Assessment, World Health Organization, WHO/SDE/PHE/OEH/06.02
- Yang Y., Xu X. and Georgopoulos P. G. (2010). A Bayesian population PBPK model for multiroute chloroform exposure. *J Exposure Sci Environ Epidemiol*, 20(4), 326–341.

- Yeh H.C. and Schum G.M. (1980). Models of human lung airways and their application to inhaled particle deposition. *Bulletin of Mathematical Biology* 42, 461–480.
- Yu C.P. and Diu C.K. (1982). A comparative study of aerosol deposition in different lung models. *American Industrial Hygiene Association Journal* 43, 54-65.
- Zannetti P. (1990). *Air Pollution Modelling*. Van Nostrand Reinhold, New York.

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Αλεξανδροπούλου Β. (2010). Ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος υποστήριξης αποφάσεων για την εκτίμηση της έκθεσης του ανθρώπου σε ατμοσφαιρικά αιωρούμενα σωματίδια και των επιπτώσεων τους στην ανθρώπινη υγεία. Διδακτορική Διατριβή. Πολυτεχνείο Κρήτης. Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος. Χανιά.
- Βαλαβανίδης Α. (2003). Ελεύθερες Ρίζες και Μηχανισμοί Καρκινογένεσης. Εκδόσεις ΒΗΤΑ. Αθήνα.
- Γεντεκάκης Ι.Β. (2003). Ατμοσφαιρική Ρύπανση. Επιπτώσεις, Έλεγχος και Εναλλακτικές Τεχνολογίες, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα.
- Γλυτσός Θ. (2010). Χαρακτηρισμός της ποιότητας του αέρα σε εσωτερικούς χώρους με χρήση μικροπεριβαλλοντικών μελετών. Διδακτορική Διατριβή. Πολυτεχνείο Κρήτης. Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος. Χανιά.
- Κοπανάκης Η. (2015). Δυναμική των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων και μελέτη του δυναμικού πυρηνοποίησης τους στην ανατολική Μεσόγειο. Διδακτορική Διατριβή. Πολυτεχνείο Κρήτης. Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος. Χανιά.
- Λαζαρίδης Μ. (2008) Ατμοσφαιρική Ρύπανση με Στοιχεία Μετεωρολογίας, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
- Παναγιωτακόπουλος Δ. (2002). Βιώσιμη Διαχείριση Αστικών Στερεών Αποβλήτων. Εκδόσεις Ζυγός. Θεσσαλονίκη.
- Παπαγιαννάκη Μ. (2015) Δημιουργία μία φιλικής προς τον χρήστη γραφικής πλατφόρμας για το μοντέλο ExDoM2 (Exposure Dose Model2) και η εφαρμογή του στο μετρό της Αθήνας. Μεταπτυχιακή εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης. Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος. Χανιά.
- Προσωπική επικοινωνία με το Διευθυντή ΧΥΤ και υπεύθυνου γραφείου προγραμματισμού της ΔΕΔΙΣΑ Χανίων κ. Μιχαήλ Κονταξάκη.

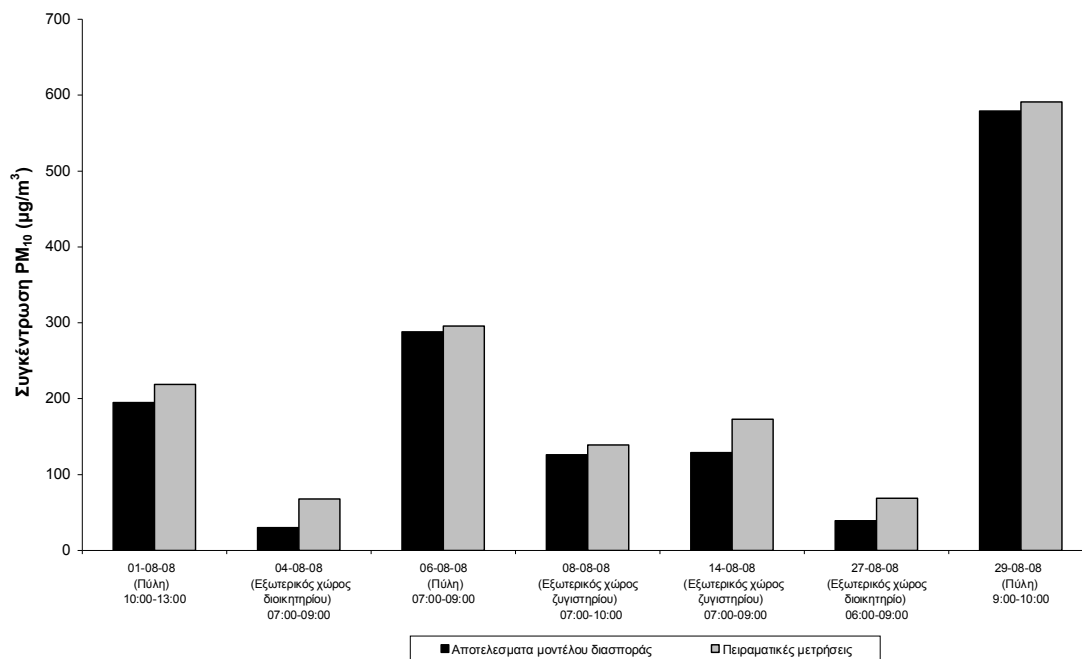
Προσωπική επικοινωνία με το Διευθυντή ΕΜΑΚ της ΔΕΔΙΣΑ Χανίων κ. Κωνσταντίνο Πατεράκη.

Μελάς Δ. (2007). Ατμοσφαιρική διάχυση και διασπορά. ΑΠΘ. Τμήμα Φυσικής. Εργαστήριο Φυσικής Ατμόσφαιρας. Θεσσαλονίκη.

Μουσιόπουλος Ν. (1999). Μαθηματικά μοντέλα ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Εκδόσεις ΖΗΤΗ. Β έκδοση. Θεσσαλονίκη.

Νομαρχιακή αυτοδιοίκηση Χανίων (2006). Μονάδα Μηχανικής Διαλογής & Κομποστοποίησης & Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων Νομού Χανίων. Ενημερωτικό φυλλάδιο. Χανιά.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ
ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ



Διάγραμμα Α1*: Σύγκριση μοντέλου διασποράς με πειραματικές μετρήσεις (Chalvatzaki κ.ά., 2015).

* Οι πειραματικές μετρήσεις για το έτος 2008 πραγματοποιήθηκαν από τον κ. Κονταξάκη Μιχαήλ.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

**Προτεινόμενες τιμές παραμέτρων
της ICRP για το μοντέλο
εναπόθεσης**

Πίνακας Β1: Προτεινόμενες τιμές παραμέτρων του μοντέλου εναπόθεσης για το κλάσμα του αέρα που εισπνέεται και εκπνέεται από τη μύτη, 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

^a: όπου $V'_D(BB) = V_D(BB) \left(1 + \frac{V_T}{FRC}\right)$ και $V'_D(bb) = V_D(bb) \left(1 + \frac{V_T}{FRC}\right)$, ^b: $n_{ae} = 0,5[1 - 1/(aR^p + 1)]$ και $n_{th} = 0,5[1 - \exp(-aR^p)]$

^c: $n_{ae} = 1 - 1/(aR^p + 1)$ και $n_{th} = 1 - \exp(-aR^p)$, ^d: ψ_{th} είναι ένας εμπειρικός συντελεστής για την προσομοίωση της εναπόθεσης μικρών σωματιδίων

στους βρόγχους λόγω τυρβώδους ροής και υπολογίζεται με τη σχέση $\psi_{th} = 1 + 100 \exp\left[-\left[\log(100 + 10/d_{th}^{0,9})\right]^2\right]$

Πίνακας Β2: Προτεινόμενες τιμές παραμέτρων του μοντέλου εναπόθεσης για το κλάσμα του αέρα που εισπνέεται και εκπνέεται από το στόμα, ως συναρτήσεις των μεταβλητών που σχετίζονται με την αναπνοή και την ανατομία (ICRP, 1994).

Φ Α Σ Η	Φίλτρο <i>j</i>	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	$22,02 SF_t^{1,24} \psi_{th}^d$	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	Al	$0,146 \cdot SF_A^{0,98}$	$d_{ae}^2 t_A$	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	$22,02 SF_t^{1,24} \psi_{th}^d$	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 $V'_D(BB) = V_D(BB) \left(1 + \frac{V_T}{FRC}\right)$ και $V'_D(bb) = V_D(bb) \left(1 + \frac{V_T}{FRC}\right)$, ^b: $n_{ae} = 0,5[1 - 1/(aR^p + 1)]$ και $n_{th} = 0,5[1 - \exp(-aR^p)]$

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

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ
ΡΥΘΜΟΙ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΑΙΜΑΤΟΣ
ΚΑΙ ΟΓΚΟΙ ΟΡΓΑΝΩΝ

Πίνακας Γ1: Ρυθμός ροής του αίματος (L/h) στα όργανα ανάλογα με τη σωματική δραστηριότητα για ενήλικες άνδρες και γυναίκες (ICRP, 2003; Lenz, 2010).

Ενήλικος Άνδρας			
Σωματική δραστηριότητα	Ύπνος/Ανάπαυση	Ήπια εργασία	Βαριά εργασία
Όργανα/ιστοί	Ρυθμός ροής του αίματος (L/h)	Ρυθμός ροής του αίματος (L/h)	Ρυθμός ροής του αίματος (L/h)
Δέρμα	20	79	118
Νεφροί	74	55	31
Συκώτι	25	18	8
Γαστρεντερικό σύστημα	74	53	25
Μύες	66	253	711
Καρδιά	16	25	47
Εγκέφαλος	47	43	40
Λίπος	20	79	118
Πνεύμονες (βρογχικός ιστός)	10	16	29
Οστά	6	5	7
Υπόλοιπα Όργανα	33	5	44
Ενήλικη Γυναίκα			
Σωματική δραστηριότητα	Ύπνος/Ανάπαυση	Ήπια εργασία	Βαριά εργασία
Όργανα/ιστοί	Ρυθμός ροής του αίματος (L/h)	Ρυθμός ροής του αίματος (L/h)	Ρυθμός ροής του αίματος (L/h)
Δέρμα	18	72	107
Νεφροί	60	44	25
Συκώτι	23	17	7
Γαστρεντερικό σύστημα	74	53	25
Μύες	42	162	455
Καρδιά	18	29	53
Εγκέφαλος	42	40	36
Λίπος	30	122	182
Πνεύμονες (βρογχικός ιστός)	9	14	27
Οστά	5	5	6
Υπόλοιπα Όργανα	32	16	145

Πίνακας Γ2: Οι όγκοι των οργάνων για ενήλικες άνδρες και γυναίκες (ICRP, 2003).

	Ενήλικος άνδρας	Ενήλικη γυναίκα
Όργανα/ιστοί	Όγκοι οργάνων (L)	Όγκοι οργάνων (L)
Δέρμα	3,1	2,2
Νεφροί	0,3	0,3
Συκώτι	1,7	1,3
Γαστρεντερικό σύστημα	1,2	1,1
Μύες	27,9	16,8
Καρδιά	0,3	0,2
Εγκέφαλος	1,4	1,3
Λίπος	15,9	19,7
Πνεύμονες	0,5	0,4
Οστά	2,8	2,0
Υπόλοιπα Όργανα	8,1	8,1
Αίμα	5,3	3,9

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ
ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ΡΒΡΚ
ΜΟΝΤΕΛΟ

Πίνακας Δ1: Εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο ExDoM2 για το As^{5+} (υιοθετήθηκαν/προσαρμόστηκαν από τις εξισώσεις των Chou κ.ά. (2009) και των Liao κ.ά. (2008)).

Όργανο/ιστοί	Εξίσωση
Συκώτι	$\frac{dA_{Liver}^{5+}}{dt} = Q_{Liver} \times \left(C_{arterial}^{5+} - \frac{C_{Liver}^{5+}}{P_{Liver}^{5+}} \right) + Q_{GI} \times \left(\frac{C_{GI}^{5+}}{P_{GI}^{5+}} - \frac{C_{Liver}^{5+}}{P_{Liver}^{5+}} \right) - (k_1 \times C_{Liver}^{5+} - k_2 \times C_{Liver}^{3+}) \times V_{Liver} - W_{Billiary} \times C_{Liver}^{5+}$
Νεφροί	$\frac{dA_{kid}^{5+}}{dt} = Q_{kid} \times \left(C_{arterial}^{5+} - \frac{C_{kid}^{5+}}{P_{kid}^{5+}} \right) - (k_1 \times C_{kid}^{5+} - k_2 \times C_{kid}^{3+}) \times V_{kid} - W_{kid} \times \frac{C_{kid}^{5+}}{P_{kid}^{5+}}$
Δέρμα	$\frac{dA_{Skin}^{5+}}{dt} = Q_{Skin} \times \left(C_{arterial}^{5+} - \frac{C_{Skin}^{5+}}{P_{Skin}^{5+}} \right) - (k_1 \times C_{Skin}^{5+} - k_2 \times C_{Skin}^{3+}) \times V_{Skin} - W_{Skin} \times C_{Skin}^{5+}$
Γαστρεντερικό σύστημα	$\frac{dA_{GI}^{5+}}{dt} = Q_{GI} \times \left(C_{arterial}^{5+} - \frac{C_{GI}^{5+}}{P_{GI}^{5+}} \right) - Q_{GI} \times \left(\frac{C_{GI}^{5+}}{P_{GI}^{5+}} - \frac{C_{Liver}^{5+}}{P_{Liver}^{5+}} \right) + (k_1 \times C_{GI}^{5+} - k_2 \times C_{GI}^{3+}) \times V_{GI} - W_{GI} \times C_{GI}^{5+} + H_{HRTM_GI}^{5+}$
Μύες	$\frac{dA_{Muscle}^{5+}}{dt} = Q_{Muscle} \times \left(C_{arterial}^{5+} - \frac{C_{Muscle}^{5+}}{P_{Muscle}^{5+}} \right) - (k_1 \times C_{Muscle}^{5+} - k_2 \times C_{Muscle}^{3+}) \times V_{Muscle}$
Πνεύμονες	$\frac{dA_{PBPK_Lung}^{5+}}{dt} = Q_{Lung} \times \left(C_{arterial}^{5+} - \frac{C_{Lung}^{5+}}{P_{Lung}^{5+}} \right) + (k_1 \times C_{Lung}^{5+} - k_2 \times C_{Lung}^{3+}) \times V_{Lung}$ $A_{Lung} = A_{PBPK_Lung} + A_{HRTM_Lung}$
Λίπος	$\frac{dA_{Fat}^{5+}}{dt} = Q_{Fat} \times \left(C_{arterial}^{5+} - \frac{C_{Fat}^{5+}}{P_{Fat}^{5+}} \right) - (k_1 \times C_{Fat}^{5+} - k_2 \times C_{Fat}^{3+}) \times V_{Fat}$
Καρδιά	$\frac{dA_{Heart}^{5+}}{dt} = Q_{Heart} \times \left(C_{arterial}^{5+} - \frac{C_{Heart}^{5+}}{P_{Heart}^{5+}} \right) - (k_1 \times C_{Heart}^{5+} - k_2 \times C_{Heart}^{3+}) \times V_{Heart}$
Εγκέφαλος	$\frac{dA_{Brain}^{5+}}{dt} = Q_{Brain} \times \left(C_{arterial}^{5+} - \frac{C_{Brain}^{5+}}{P_{Brain}^{5+}} \right) - (k_1 \times C_{Brain}^{5+} - k_2 \times C_{Brain}^{3+}) \times V_{Brain}$
Υπόλοιπο σώμα	$\frac{dA_{PBPK_Other\ tissues}^{5+}}{dt} = Q_{Other\ tissues} \times \left(C_{arterial}^{5+} - \frac{C_{other\ tissues}^{5+}}{P_{other\ tissues}^{5+}} \right) + (k_1 \times C_{Other\ tissues}^{5+} - k_2 \times C_{Other\ tissues}^{3+}) \times V_{Other\ tissues}$ $A_{Other\ tissues} = A_{PBPK_Other\ tissues} + A_{HRTM_Lymph\ nodes}$

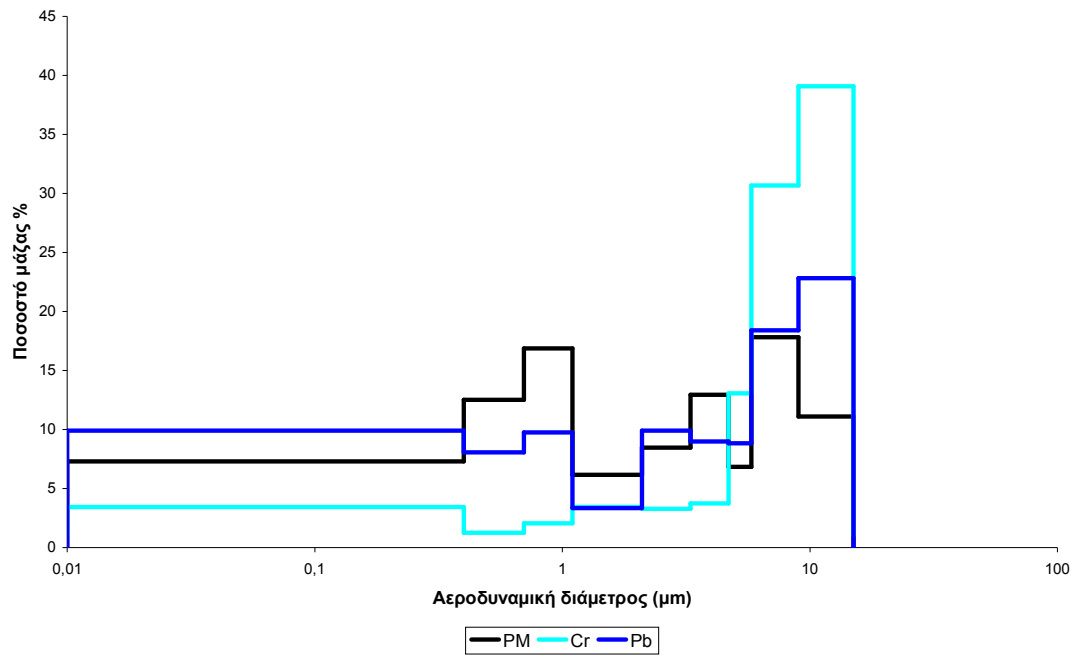
Πίνακας Δ2: Οι Βασικότερες εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο ExDoM2 για το Cr^{6+} (υιοθετήθηκαν/προσαρμόστηκαν από τις εξισώσεις του O'Flaherty κ.ά. (2001)).

Όργανα/ιστοί	Εξίσωση
Συκώτι	$\frac{dA_{Liver}^{6+}}{dt} = KIN6 \times C_{Plasma}^{6+} - KOUT6 \times C_{Liver}^{6+} + KGI6 \times A_{GI_tract}^{6+} - KREDK_{Liver} \times A_{Liver}^{6+}$
Νεφροί	$\frac{dA_{kidney}^{6+}}{dt} = KIN6 \times C_{Plasma}^{6+} - KOUT6 \times C_{kidney}^{6+} - KREDK_{kidney} \times A_{kidney}^{6+}$
Ερυθρά αιμοσφαίρια	$\frac{dA_{Red_cell}^{6+}}{dt} = KIN6 \times C_{Plasma}^{6+} - KOUT6 \times C_{Red_cell}^{6+} - KRED_{Red_cell} \times A_{Red_cell}^{6+}$
Φλοιώδες οστό	$\frac{dA_{Cortical_bone}^{6+}}{dt} = CR6 \times CBFR \times C_{Plasma}^{6+} - CBRR \times C_{Cortical_bone}^{6+}$
Δοκιδωτό οστό	$\frac{dA_{Trabecular_bone}^{6+}}{dt} = CR6 \times 0,65 \times BFR \times C_{Plasma}^{6+} - CBRR \times C_{Trabecular_bone}^{6+}$
Υπόλοιπο σώμα	$\frac{dA_{PBPk_Other_tissues}^{6+}}{dt} = KIN6 \times C_{Plasma}^{6+} - KOUT6 \times C_{kidney}^{6+}$ $A_{Other\ tissues} = A_{PBPk_Other\ tissues} + A_{HRTM_Lymph\ nodes}$

Πίνακας Δ3: Οι σημαντικότερες παράμετροι εισόδου που χρησιμοποιούνται στο PBPk μοντέλο για το Cr^{6+} (O'Flaherty κ.ά., 2001).

Παράμετροι Εισόδου για το Cr^{6+}	
KIN6 (L/hr)	1,25
KOUT6 (L/hr)	1,25
KGI6 (1/hr)	0,10
KREDK _{Liver} (1/h)	20,83
KREDK _{Kidney} (1/h)	20,83
KRED _{Red_cell} (1/h)	0,292
CR6	15

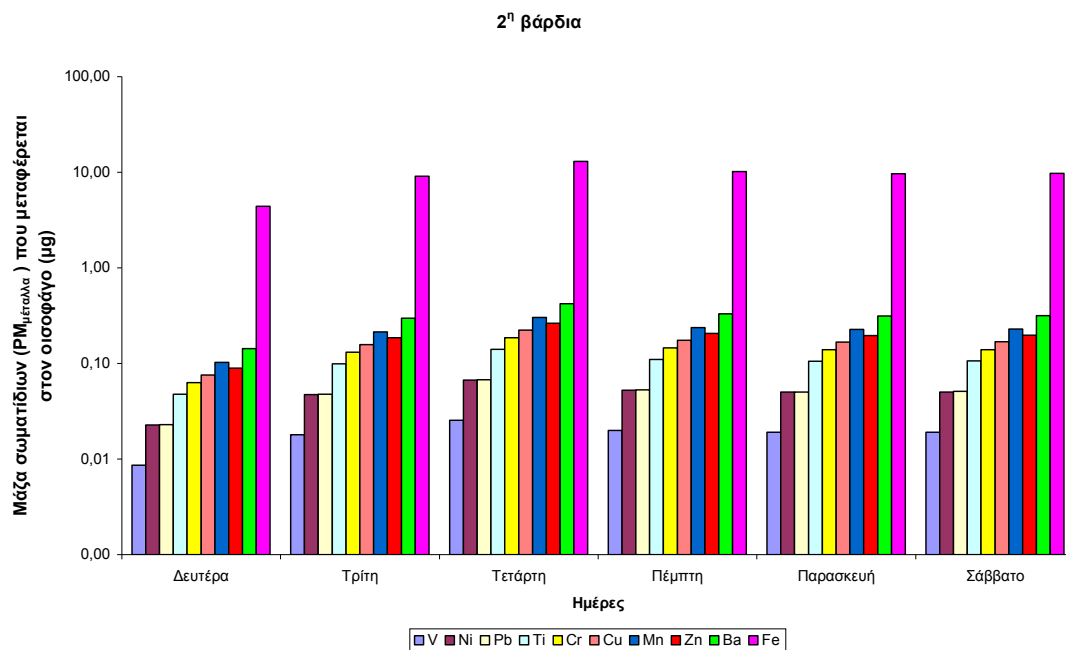
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε
ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΕΓΕΘΟΥΣ
ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ
ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ



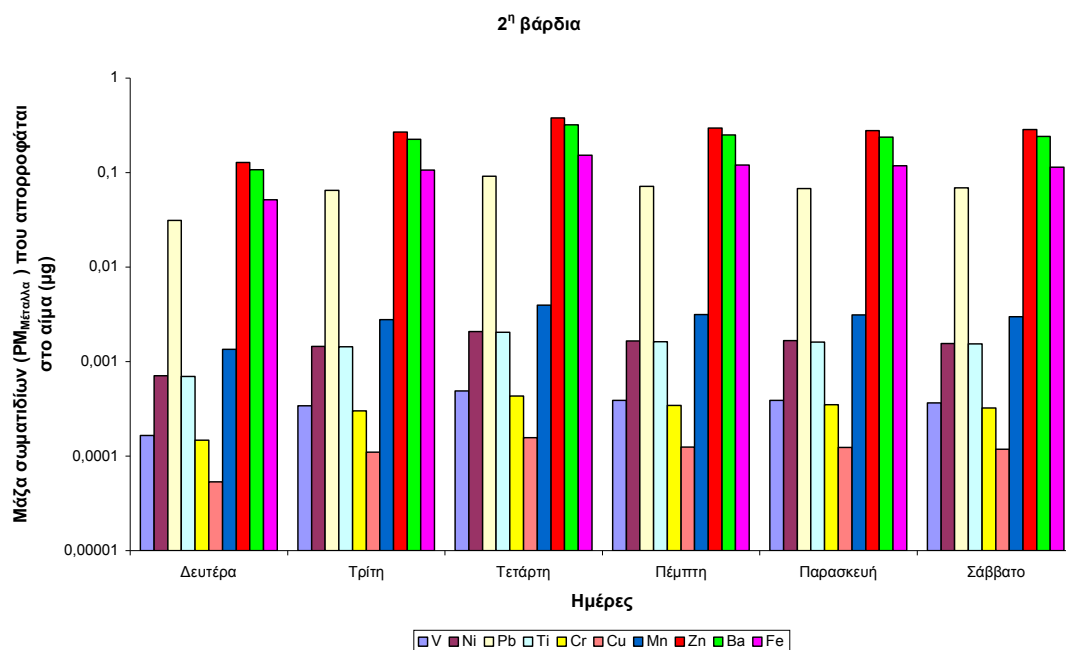
Διάγραμμα Ε1^{*}: Κατανομή μάζας (ποσοστό μάζας) αιωρούμενων σωματιδίων (PM, PM_{Pb} και PM_{Cr}) στην περιοχή υποβάθρου (Κοπανάκης, 2015).

^{*} Για τα PM_{Mn} χρησιμοποιήθηκε η κατανομή των PM.

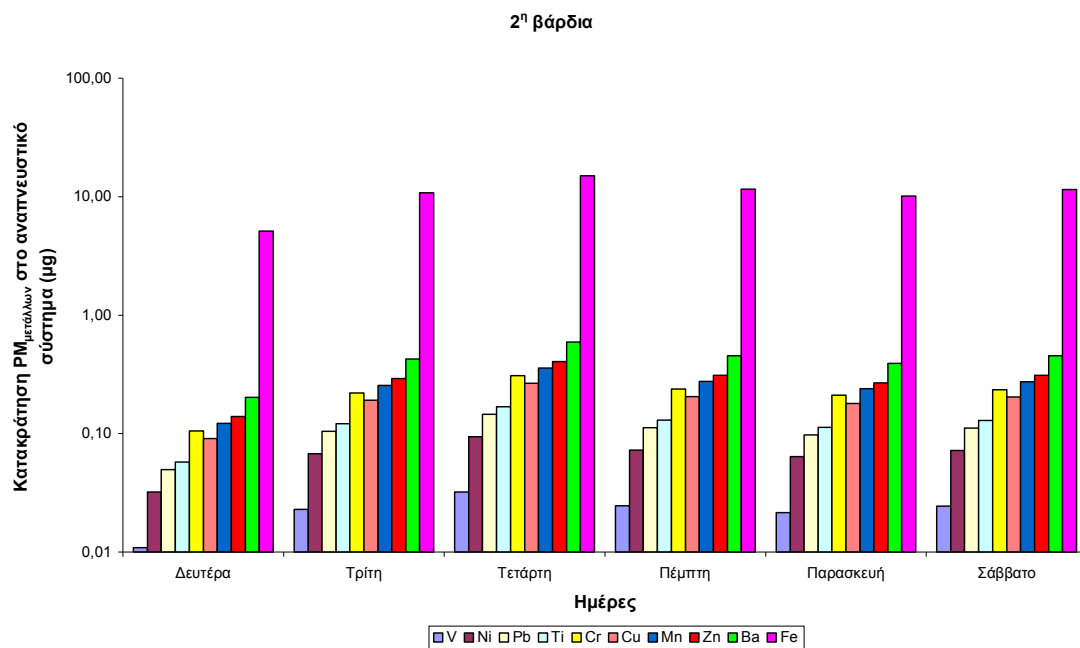
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ζ
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ
ExDoM2 ΓΙΑ ΤΟΥΣ
ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟΥΣ ΣΤΟΝ
ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΧΩΡΟ
ΧΕΙΡΟΔΙΑΛΟΓΗΣ
(2^η ΒΑΡΔΙΑ)



Διάγραμμα Z1: Η μάζα των PM_{μετάλλων} που μεταφέρεται στον οισοφάγο στο τέλος της 2^η βάρδιας.



Διάγραμμα Z2: Η μάζα των PM_{μετάλλων} που απορροφάται στο αίμα στο τέλος της 2^η βάρδιας.



Διάγραμμα Z3: Η μάζα των $PM_{μετάλλων}$ που κατακρατείται στο αναπνευστικό σύστημα στο τέλος της 2^η βάρδιας.