



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Προσδιορισμός εκπομπών αιωρούμενων
σωματιδίων και ανθρώπινης δόσης στη μονάδα
χειροδιαλογής του ΧΥΤΑ Χανίων»**

ΣΠΥΡΙΔΩΝΙΔΗΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Δρ ΛΑΖΑΡΙΔΗΣ ΜΙΧΑΛΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)
Δρ ΚΑΛΟΓΕΡΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ
Δρ ΓΛΥΤΣΟΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ

ΧΑΝΙΑ
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2013

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη του αναπληρωτή καθηγητή Μιχάλη Λαζαρίδη. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την άψογη συνεργασία του και για την πολύτιμη βοήθεια του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της.

Επίσης, θα ήθελα ιδιαίτερα να ευχαριστήσω τους Δρ Γλυτσό Θεόδωρο και την υποψήφια διδάκτορα Χαλβαζάκη Ελευθερία για τις πολύτιμες συμβουλές τους και την υπομονή που έδειξαν όλο το διάστημα αυτό.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Κοπανάκη Ηλία για τη συμβολή του στην ολοκλήρωση της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου και τους φίλους – συμφοιτητές μου που με στήριξαν όλο αυτό το διάστημα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάγκη μελέτης του αέρα των κλειστών χώρων προέκυψε από το γεγονός ότι ένα μεγάλο ποσοστό του πληθυσμού ζει και εργάζεται μέσα σε αυτούς. Η έκθεση του ανθρώπου στους ατμοσφαιρικούς ρύπους παρουσιάζεται αυξημένη στους εσωτερικούς χώρους όπως έχουν δείξει πρόσφατες επιστημονικές μελέτες. Πλειάδα επιδημιολογικών μελετών έχει συνδέσει την ύπαρξη υψηλών συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικών ρύπων με την αύξηση της νοσηρότητας. Για τους παραπάνω λόγους η μελέτη της επιβάρυνσης της υγείας του ανθρώπου από αέριους ρύπους, όπως είναι τα αιωρούμενα σωματίδια, αποδεικνύεται πολύ σημαντική. Τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν τη δυνατότητα να εισέλθουν στον ανθρώπινο οργανισμό μέσω της αναπνευστικής οδού ή μέσω της κατάποσης από το στόμα. Έπειτα, εναποτίθενται στο αναπνευστικό, είτε μεταφέρονται σε άλλα όργανα του ανθρώπινου σώματος. Οι επιδράσεις τους στην υγεία ποικίλουν αφού μπορούν να προκαλέσουν από απλό βήχα έως χρόνιες ασθένειες όπως είναι το άσθμα. Η επίδραση τους στον άνθρωπο εξαρτάται από παράγοντες όπως είναι το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων, η διάρκεια έκθεσης του αντικειμένου και η κατάσταση υγείας του ανθρώπινου οργανισμού.

Η πληθώρα των μελετών που έχει εκπονηθεί για τους εσωτερικούς χώρους αστικών κτηρίων μας ωθεί στην έρευνα των βιομηχανικών χώρων και της έκθεσης των εργαζομένων σε αυτούς. Η παρούσα εργασία εστιάζεται στη μελέτη των αιωρούμενων σωματιδίων στο εργοστάσιο μηχανικής ανακύκλωσης και κομποστοποίησης (Ε.Μ.Α.Κ.) του νομού Χανίων και πιο συγκεκριμένα στις αίθουσες της χειροδιαλογής και της ραφιναρίας. Οι στόχοι αυτής της εργασίας είναι:

- Η μελέτη της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων στο Ε.Μ.Α.Κ. Χανίων.
- Ο υπολογισμός των ρυθμών εκπομπής των αιωρούμενων σωματιδίων με τη χρήση ενός μοντέλου ισοζυγίου μάζας.
- Ο υπολογισμός της δόσης των αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα και έπειτα της απομάκρυνσης τους στα υπόλοιπα όργανα του σώματος.

Σύμφωνα με την ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων εντοπίστηκαν μεγάλες διακυμάνσεις της συγκέντρωσης για τον εσωτερικό χώρο της χειροδιαλογής, ενώ στην ραφιναρία δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές μεταβολές. Διαπιστώθηκε ότι οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων για τη πρωινή βάρδια του εργοστασίου, η οποία είναι η πρώτη από τις δύο συνολικά, ήταν υψηλότερες. Για τον υπολογισμό των ρυθμών εκπομπής έγινε μελέτη της συμπεριφοράς των αιωρούμενων σωματιδίων στους εσωτερικούς

χώρους με ένα μικροπεριβαλλοντικό μοντέλο ισοζυγίου μάζας. Τα αποτελέσματα αφορούν τόσο τις στιγμιαίες τιμές των ρυθμών εκπομπής που προέρχονται από τις στιγμιαίες μεταβολές της συγκέντρωσης, όσο και την εξαγωγή κάποιων αντιπροσωπευτικών τιμών της μέσης κατάσταση της συγκέντρωσης στην αίθουσα της χειροδιαλογής. Τέλος, έγινε αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και βρέθηκε ότι οι αντιπροσωπευτικές τιμές των ρυθμών εκπομπής μπορούν να αξιοποιηθούν για τη βελτίωση των συνθηκών του χώρου της χειροδιαλογής.

Στη συνέχεια, έγινε μελέτη της ανατομίας του αναπνευστικού συστήματος και της συμπεριφοράς των σωματιδίων μέσα σε αυτό. Παρουσιάστηκε το μοντέλο υπολογισμού δόσης ExDom το οποίο έχει τη δυνατότητα πέρα της δόσης να υπολογίσει και τη μεταφορά των σωματιδίων στα υπόλοιπα όργανα του ανθρώπινου σώματος. Με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου βρέθηκε ότι οι εργάτες της πρώτης βάρδιας επιβαρύνονται περισσότερο σε σύγκριση με αυτούς της δεύτερης. Η πιο επιβαρυνόμενη περιοχή του αναπνευστικού ήταν η εκτός θώρακα περιοχή, ενώ το κύριο όργανο στο οποίο απομακρύνονται τα σωματίδια ήταν ο γαστρεντερικός σωλήνας. Αποτελέσματα μελετών όπως τα παραπάνω μπορούν να αξιοποιηθούν για τη πρόληψη δυσμενών επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία.

Περιεχόμενα

1. ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ.....	5
1.1 Γενικά	5
1.2 Φυσικά χαρακτηριστικά αιωρούμενων σωματιδίων.....	5
1.3 Χημική σύσταση	7
1.4 Χαρακτηριστικά των πηγών	8
1.5 Πηγές εσωτερικών χώρων	9
2. ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ	11
2.1 Εισαγωγικά	11
2.2 Κύριοι μηχανισμοί συμπεριφοράς αιωρούμενων σωματιδίων	12
3. ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟ ΑΝΑΠΝΕΥΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ... ..	27
3.1 Εισαγωγικά	27
3.2 Ανατομία αναπνευστικού συστήματος	27
3.3 Μελέτη της δυναμικής των σωματιδίων στον ανθρώπινο οργανισμό.	28
3.4 Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.....	31
3.5 Το μοντέλο καθορισμού δόσης και εναπόθεσης ExDom	33
4. ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ	36
5. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	41
5.1 Μεθοδολογία πειραματικών μετρήσεων.....	41
5.2 Μεθοδολογία υπολογισμού ρυθμών εκπομπής	46
6. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	51
6.1 Ανάλυση των δεδομένων	51
6.1.1 Ραφιναρία	51
6.1.2 Χειροδιαλογή.....	52
6.2 Υπολογισμός των ρυθμών εκπομπής.....	56
6.3 Υπολογισμός της δόσης – Εφαρμογή του μοντέλου ExDom	66
6.4 Εκτίμηση βαρέων μετάλλων	75
7. ΣΥΝΟΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	77
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	81
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	87
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	92

1. ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

1.1 Γενικά

Τα αιωρούμενα σωματίδια (ΑΣ) ή αλλιώς αεροζόλ είναι μικρά, διακριτά αντικείμενα, στερεής ή υγρής μορφής τα οποία παραμένουν αιωρούμενα στο μέσο μεταφοράς και εκπέμπονται μέσα στην ατμόσφαιρα. Πέρα όμως από τον απλό προσδιορισμό του τι είναι αιωρούμενα σωματίδια, θα πρέπει να τα μελετήσουμε εις βάθος για να είμαστε σε θέση να κατανοήσουμε τη συμπεριφορά τους. Για να το καταφέρουμε πρέπει να γνωρίσουμε τα στοιχεία που τα αφορούν, όπως τις πηγές από όπου προέρχονται, τα χαρακτηριστικά τους (φυσικά και χημικά), τη συμπεριφορά τους μέσα στο μέσο μεταφοράς αλλά και τις επιπτώσεις που προκαλούν στον ανθρώπινο οργανισμό. Για το παραπάνω λόγο θα υιοθετήσουμε το πιο πρακτικό ορισμό των Baron & Willeke (2005), κατά τους οποίους, το χρονικό διάστημα στο οποίο τα αιωρούμενα σωματίδια παραμένουν στο μέσο μεταφοράς είναι τουλάχιστον τέτοιο ώστε να επιτρέπει την παρατήρηση ή την μέτρηση τους (Baron & Willeke 2005).

Τα αιωρούμενα σωματίδια υπάρχουν σε μία ποικιλία από μεγέθη και σχήματα με βάση τα οποία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν. Επίσης, διαθέτουν μεγάλο εύρος φυσικών και χημικών ιδιοτήτων. Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά τους περιλαμβάνουν το μέγεθος, τη κατανομή μεγέθους, το σχήμα, τη πυκνότητα και τη τοξικότητα, ενώ για το αέριο μέσο τα κύρια χαρακτηριστικά είναι η πίεση, η θερμοκρασία, το ιξώδες και η υγρασία. Τα σωματίδια προκαλούνται-εκπέμπονται από μία πληθώρα διεργασιών. Αυτές αφορούν διεργασίες διαχείρισης υλικών όπως είναι η θραύση και η τριβή ορυκτών μεταλλευμάτων όπου οδηγούν στην δημιουργία λεπτόκοκκης σκόνης, είτε διεργασίες καύσης όπου εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα σωματίδια από άκαυστη τέφρα ή διεργασίες σχηματισμού από αντιδράσεις μετατροπής αερίων στην ατμόσφαιρα ανάμεσα σε συγκεκριμένους αέριους ρύπους καθώς και άλλες διεργασίες (Cooper & Alley 2004).

1.2 Φυσικά χαρακτηριστικά αιωρούμενων σωματιδίων

Τα πιο σημαντικά φυσικά χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων είναι το μέγεθος και η κατανομή μεγέθους, το σχήμα και η αεροδυναμική διάμετρος. Τα παραπάνω αποτελούν σημαντικές παραμέτρους στην μελέτη τους, διότι οι ιδιότητες αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά τους στο αέριο μέσο. Επίσης, μπορούμε να αναγνωρίσουμε τις πηγές από τις οποίες προέρχονται και να εκτιμήσουμε τις επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον.

Το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων κυμαίνεται από 2nm και φτάνει περίπου έως τα 200μm. Ο κύριος διαχωρισμός τους γίνεται μεταξύ λεπτών (fine) και χονδρών (coarse). Λεπτά σωματίδια χαρακτηρίζονται αυτά με μέγεθος αεροδυναμικής διαμέτρου μικρότερη ή ίση από 2,5 μm και συμβολίζονται ως PM_{2,5} ή ΑΣ_{2.5} ενώ αυτά με αεροδυναμική διάμετρο μεγαλύτερη από 2,5 μm ονομάζονται χονδρά και συμβολίζονται ως PM₁₀ ή ΑΣ₁₀. Τα μικρά διακρίνονται σε σωματίδια διαμέτρου πυρήνα ή λεπτά σωματίδια (<0,2μm) και σε χονδρά (0,2-2,5μm) (Λαζαρίδης 2010). Στα λεπτά σωματίδια ανήκουν αυτά που προέρχονται κυρίως από μηχανές εσωτερικής καύσης, όπως αυτές των αυτοκινήτων, ενώ κυρίως χονδρά σωματίδια είναι αυτά που προέρχονται από θραύσεις μεταλλευμάτων κ.ά.

Όπως ήδη αναφέρθηκε ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων είναι το σχήμα τους. Τα σωματίδια εμφανίζουν μεγάλη ποικιλία σε σχήματα, μερικά εκφράζονται από την ευκλείδεια γεωμετρία, τα περισσότερα όμως είναι ακανόνιστα και χαρακτηρίζονται από τη πολυπλοκότητα τους. Το σχήμα τους μπορεί να χαρακτηριστεί από πολλές παραμέτρους, αλλά για πρακτικούς λόγους δεν χρησιμοποιούμε παραπάνω από δύο. Για τα σφαιρικά σχήματα χρησιμοποιούμε τη διάμετρο, για μερικά όχι τόσο πολύπλοκα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε δύο διαστάσεις. Επειδή όμως τα περισσότερα βρίσκονται σε τελείως ακανόνιστη μορφή επιλέγουμε την πιο χαρακτηριστική «διάμετρο» με βάση τις διαστάσεις του.

Η αντιπροσωπευτική αυτή διάμετρος των σωματιδίων ονομάζεται αεροδυναμική διάμετρος. *Η αεροδυναμική διάμετρος ενός συγκεκριμένου σωματιδίου είναι η διάμετρος μιας σφαίρας με μοναδιαία πυκνότητα (πυκνότητα του νερού) η οποία θα καθιζάνει σε ακίνητο αέρα με τον ίδιο ρυθμό με το υπό εξέταση σωματίδιο* (Friedlander 1977). Παρουσιάζει πολλές εφαρμογές, οι οποίες αφορούν είτε την εναπόθεση των σωματιδίων σε επιφάνειες, είτε την εναπόθεση τους στο αναπνευστικό σύστημα. Επίσης, η συμπεριφορά των σωματιδίων σε συσκευές όπως κυκλώνες και φίλτρα εξαρτώνται από αυτήν. Γενικά, η αεροδυναμική διάμετρος των σωματιδίων συσχετίζεται με τη συμπεριφορά και με τις ιδιότητες τους, όμως δεν αρκεί για να δώσει πλήρες χαρακτηρισμό για αυτά.

Λόγω της μεγάλης ποικιλίας των σχημάτων και του μεγάλου βαθμού πολυπλοκότητας χρησιμοποιούνται και άλλοι τύποι ισοδύναμων διαμέτρων, παρόλα αυτά προτιμάται η αεροδυναμική διάμετρος. Πιο συγκεκριμένα, τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να μειώσουν την ορατότητα σκεδάζοντας ή απορροφώντας το φως. Η ποσότητα του φωτός που σκεδάζεται ή απορροφάται από διαφορετικά σωματίδια εξαρτάται από το σχήμα τους. Έτσι, μπορούμε να ορίσουμε την ισοδύναμη οπτική διάμετρο ενός θεωρητικού σωματιδίου το οποίο σκεδάζει την ίδια ποσότητα φωτός με το υπό εξέταση

σωματίδιο. Στα απλούστερα σχήματα το ποσό του φωτός που σκεδάζεται είναι εύκολο να υπολογιστεί. Αντίθετα, στα πιο πολύπλοκα σχήματα είναι δύσκολο να γίνει ο προσδιορισμός της ισοδύναμης οπτικής διαμέτρου. Παρόλα αυτά, η παραπάνω τεχνική έχει πολλά πλεονεκτήματα, αφού επιτρέπει τη γρήγορη και συνεχή ανίχνευση των σωματιδίων σε χαμηλό κόστος.

Αναφορικά άλλες ισοδύναμοι διάμετροι είναι η μέση διάμετρος Sauter, όπου εκφράζεται ως η διάμετρος ενός σταγονιδίου του οποίου ο λόγος της επιφάνειας ως προς τον όγκο είναι ίσος με αυτόν που προκύπτει από όλη την κατανομή των σταγονιδίων στο μέσο. Ακόμα, μία η οποία χρησιμοποιείται για τα σωματίδια με μέγεθος μικρότερο των 0,5 μm είναι η ισοδύναμη διάμετρος διάχυσης. Ουσιαστικά εκφράζεται ως η διάμετρος ενός σφαιρικού σωματιδίου, το οποίο εμφανίζει τον ίδιο ρυθμό διάχυσης με το υπό εξέταση σωματίδιο (Baron & Willeke 2005).

1.3 Χημική σύσταση

Η χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων ποικίλει σημαντικά και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπου συσχετίζονται με τις πηγές και τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατόπιν του σχηματισμού τους. Οι διεργασίες αυτές αφορούν την αλληλεπίδραση των σωματιδίων μεταξύ τους ή και με άλλα αέρια συστατικά της ατμόσφαιρας που έχουν ως αποτέλεσμα την αλλοίωση της χημικής τους σύστασης.

Γενικότερα, τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούνται από μία ανόργανη φάση (ανόργανα άλατα, στερεό ανόργανο υλικό κ.ά.), μία οργανική φάση (οργανικός άνθρακας, στοιχειακός άνθρακας) και νερό.

Πιο συγκεκριμένα, η ανόργανη φάση προέρχεται κυρίως από ενώσεις θείου, αζώτου, υδρογόνου, αμμωνίου και από ιόντα αυτών. Σε μικρότερο ποσοστό συμμετέχουν και άλλα στοιχεία κυρίως μέταλλα που προέρχονται από βιομηχανικές διεργασίες ή την κίνηση οχημάτων. Η οργανική φάση αποτελείται κυρίως από τον οργανικό άνθρακα και τον στοιχειακό άνθρακα. Αυτή η φάση περιέχει ένα μεγάλο εύρος ενώσεων που περιλαμβάνουν πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες, εντομοκτόνα, φθαλίτες, επιβραδυντικά φωτιάς και καρβοξυλικά οξέα.

Τέλος, το ενδιαφέρον για τη στοιχειακή σύσταση ανακύπτει από τις δυνητικές επιπτώσεις στην υγεία των βαρέων στοιχείων όπως ο μόλυβδος, το αρσενικό, ο υδράργυρος και το κάδμιο και από την πιθανότητα της χρήσης των στοιχείων ως ιχνηλάτες της πηγής των σωματιδίων. Υδατοδιαλυτά ιόντα

όπως του καλίου, του νατρίου, τα φωσφορικά, τα θειώδη, τα αμμωνιακά και τα νιτρικά συνδέονται με το νερό στο εσωτερικό περιβάλλον και μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και για την κατανομή των πηγών (Morawska & Salthammer 2003)

1.4 Χαρακτηριστικά των πηγών

Σκοπός της παραπάνω μελέτης των φυσικών και χημικών χαρακτηριστικών των αιωρούμενων σωματιδίων είναι ο προσδιορισμός των πηγών τους. Το να είμαστε σε θέση να εντοπίσουμε τις πηγές των αιωρούμενων σωματιδίων είναι πολύ σημαντικό λόγω των δυσμενών επιπτώσεων τους στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον. Οι φυσικές και οι χημικές ιδιότητες των σωματιδίων αποτελούν χαρακτηριστικά των πηγών και διαφέρουν ανάλογα με τη πηγή προέλευσης τους.

Σχεδόν όλες οι πηγές παράγουν αιωρούμενα σωματίδια με κάποια διακύμανση στο μέγεθος. Η διακύμανση αυτή στο μέγεθος παρουσιάζει κάποια τυπική απόκλιση με κύριο χαρακτηριστικό του μεγέθους των σωματιδίων τη διάμεσο τους. Μελετώντας μία συγκεκριμένη πηγή και κατασκευάζοντας το διάγραμμα της διακύμανσης του μεγέθους με τη συγκέντρωση των σωματιδίων, σε λογαριθμική κλίμακα, θα παρατηρήσουμε ότι παρουσιάζει κανονική κατανομή έχοντας μία κορυφή και μερικές μικρότερες σε συγκεκριμένα μεγέθη σωματιδίων. Διαφορετικές πηγές χαρακτηρίζονται και από διαφορετικές κορυφές, πράγμα που επιτρέπει σε κάποιο βαθμό να γίνει αναγνώριση των πηγών από τις οποίες προέρχονται τα αιωρούμενα σωματίδια. Στον αέρα όμως συνήθως συναντάται ένα μίγμα αιωρούμενων σωματιδίων τα οποία προέρχονται από πολλές διαφορετικές πηγές. Εφόσον έχουμε να επεξεργαστούμε μία πολύ μεγάλη διακύμανση των τιμών μεγέθους των σωματιδίων, είναι δύσκολο να γίνει ακριβής αναγνώριση των πηγών από τις οποίες προέρχονται. Παρόλα αυτά, είμαστε σε θέση να προβούμε σε μία εκτίμηση των πηγών (Morawska & Salthammer 2003).

Η διαθεσιμότητα πληροφοριών που αναφέρθηκαν παραπάνω μπορεί να αποδειχθεί καθοριστική για την εύρεση συμμετοχής των πηγών στην αέρια ρύπανση. Πιο συγκεκριμένα, τα κύρια χαρακτηριστικά των σωματιδίων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αναγνώριση των πηγών είναι:

- Η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων.
- Το προφίλ των οργανικών ενώσεων και των στοιχείων.
- Η αναλογία των χημικών ενώσεων, των στοιχείων και των ισοτόπων.

Για να γίνει αναγνώριση των πηγών, θα πρέπει τα χαρακτηριστικά των εκπομπών να πληρούν κάποιες προδιαγραφές.

- Να είναι μοναδικά ή σχεδόν μοναδικά για τις εκπομπές της υπό μελέτης πηγής.
- Οι ρυθμοί εκπομπής να είναι παρεμφερείς με αυτούς της πηγής.
- Να ανιχνεύονται εύκολα στον αέρα ακόμα και σε χαμηλές συγκεντρώσεις.
- Να παρουσιάζουν επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.

(Morawska & Salthammer 2003)

Παρόλα αυτά, εμφανίζεται μεγάλη πολυπλοκότητα όσο αφορά την κατανομή των σωματιδίων από τις διάφορες πηγές. Αυτό συμβαίνει διότι στην ατμόσφαιρα απαντάται ένα μείγμα ρύπων από πολλές και διαφορετικές πηγές, το οποίο υποβάλλεται σε συνεχείς αλλαγές κατά το πέρασμα του χρόνου από διάφορους μηχανισμούς. Η ύπαρξη τέτοιων μηχανισμών, όπως η βαρυτική εναπόθεση των σωματιδίων, υποβάλει το έργο του εντοπισμού των πηγών σε περισσότερες δυσκολίες. Τέλος είναι σπάνιο συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων να είναι μοναδικά για μία και μόνο πηγή.

1.5 Πηγές εσωτερικών χώρων

Όσον αφορά το διαχωρισμό των πηγών γίνεται μεταξύ εξωτερικών πηγών στο περιβάλλον και εσωτερικών χώρων. Κύριοι αντιπρόσωποι της 1^{ης} κατηγορίας είναι τα οχήματα με κινητήρα τα οποία εκπέμπουν σωματίδια διαμέτρου μεγαλύτερη των 2,5 μm. Όσο αφορά τις πηγές στους εσωτερικούς χώρους οικιών οι πιο αντιπροσωπευτικές είναι το μαγείρεμα, το κάπνισμα, και το καθάρισμα. Μεγάλη συνεισφορά στις συγκεντρώσεις των εσωτερικών χώρων έχει και η διείσδυση των αιωρούμενων σωματιδίων από το εξωτερικό περιβάλλον. Όμως, το τελευταίο μπορεί να μην είναι αληθές, διότι πολλές φορές η συγκέντρωση των σωματιδίων στους εσωτερικούς χώρους είναι υψηλότερη από αυτή στους εξωτερικούς, λόγω της ύπαρξης εσωτερικών πηγών.

Αναλυτικότερα, για τους εσωτερικούς χώρους πολύ μικρά σωματίδια (PM_{2,5}) περιλαμβάνονται στον καπνό, ο οποίος αποτελεί έναν ορατό δείκτη μη ολοκληρωμένης καύσης. Ο καπνός που προέρχεται από τα τσιγάρα και τα πούρα περιέχει ένα αριθμό ρύπων που περιλαμβάνουν μονοξείδιο του άνθρακα, αμμωνία, υδροκυάνιο, φορμαλδεύδη, πίσσα, νικοτίνη ορισμένα

βαρέα μέταλλα, φαινόλες και φθορανθένιο χωρίς κανένα από αυτά να υπερβαίνει τα $PM_{2,5}$. Πηγές καύσης όπως κεριά, θερμάστρες ξύλου και τζάκια εκπέμπουν πληθώρα ρύπων οι οποίοι είναι επικίνδυνοι. Η καύση ξύλου μπορεί να απελευθερώσει αρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAHS) που είναι καρκινογόνοι και ίχνη μετάλλων. Άλλα αιωρούμενα σωματίδια που βρίσκονται στον εσωτερικό χώρο περιλαμβάνουν σκόνες και γύρη που έχουν διεισδύσει από τον εξωτερικό αέρα, ίνες ασβεστίου, σκόνες ζώων, εντομοκτόνα και μόλυβδο από τα χρώματα. Τέλος, στον πίνακα 1 γίνεται εκτενής αναφορά των ρύπων και των πηγών τους στους εσωτερικούς χώρους (Cooper & Alley 2004).

Ρύπος	Πηγές
VOCs	Χρώματα, αρωματικά χρωμάτων, αρώματα, σπρέι μαλλιών, λουστραρισμένα έπιπλα, διαλυτές καθαρισμού, χρώματα χαλιών, κόλες, ξηρός καθαρισμός ρούχων, συσκευές αναζωογόνησης αέρα, κεριά, σαπούνια, έλαια μπάνιου, μούχλες, καπνός από τσιγάρα
Φορμαλδεΐδη	Νοβοπάν, κόντρα πλακέ, καπλαμάς, κόλλες, χαλιά, μονωτικά, καύση, καπνός από τσιγάρα
CO,CO ₂ ,NO _x	Θερμάστρες και φούρνοι αερίου, κεριά, τζάκια, θερμάστρες ξύλου, θερμάστρες χώρου με κηροζίνη, ανθρώπινη αναπνοή, καπνός τσιγάρου
Σωματίδια	Τζάκια, θερμάστρες ξύλου, κεριά, καπνός τσιγάρου
Ραδόνιο	Απελευθερώνεται κάτω από το έδαφος και από τη χρήση νερού
Βιολογικοί ρύποι	Κατοικίδια ζώα, οικιακά φυτά, έντομα, μούχλες, ανθρώπινη δραστηριότητα, μαξιλάρια, κλινοστρωμνή, υγρά υλικά, συστήματα HVAC, συστήματα ύγρανσης

Πίνακας 1: Παραδείγματα αέριων ρύπων εσωτερικών χώρων και οι πηγές τους (Cooper & Alley 2004).

2. ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ

2.1 Εισαγωγικά

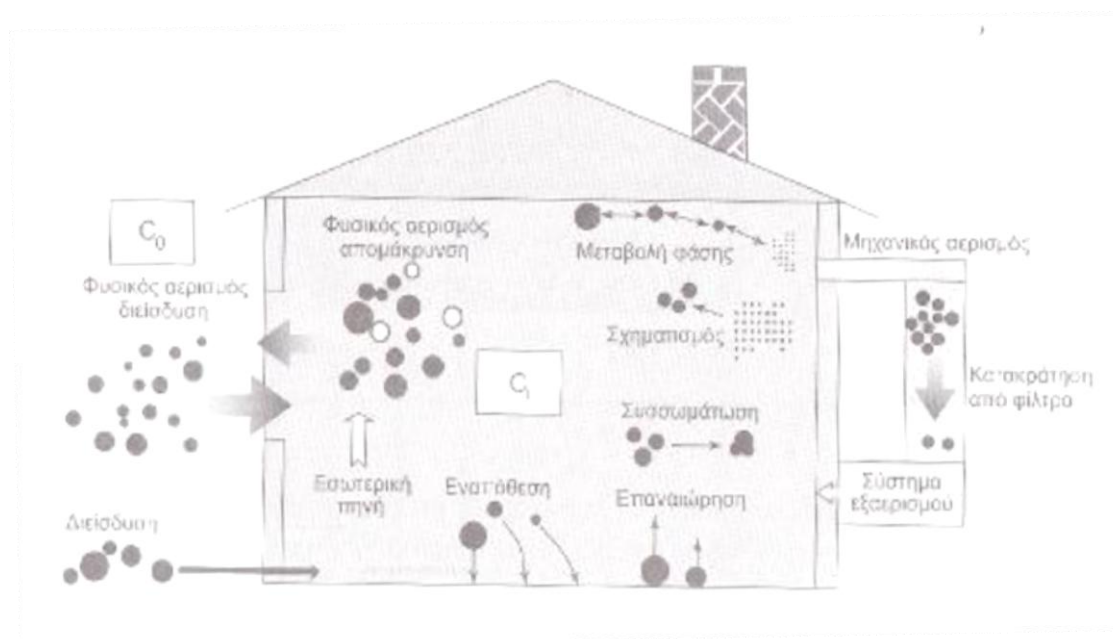
Η ανάγκη μελέτης του αέρα των κλειστών χώρων προέκυψε από το γεγονός ότι ένα μεγάλο ποσοστό του πληθυσμού ζει και εργάζεται μέσα σε αυτούς. Τέτοιοι χώροι συμπεριλαμβάνουν κυρίως οικίες, κτήρια γραφείων, βιομηχανίες κ.ά. Πολλά άτομα περνάνε τον περισσότερο χρόνο της ημέρας τους μέσα στους κλειστούς χώρους, ως αποτέλεσμα αυτό να έχει άμεση επίδραση στην υγεία τους βραχυχρόνια και μακροχρόνια. Επίσης, η ανάγκη αυτή έγινε ακόμα μεγαλύτερη όταν παρατηρήθηκε ότι άτομα που εργάζονταν σε χώρους με κακή ποιότητα αέρα παρουσίαζαν πλήθος από ασθένειες. Έτσι εισήχθη ο όρος *ποιότητα αέρα εσωτερικών χώρων (Indoor air Quality – IAQ)* για να περιγράψει την ποιότητα του αέρα με βάση την συγκέντρωση των ρύπων και την έκθεση του ανθρώπου σε αυτά.

Ο αέρας εσωτερικών χώρων αντιμετωπίζεται διαφορετικά από τον αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος για δύο σημαντικούς λόγους. Ο πρώτος είναι νομικός και αναφέρει ότι ο αέρας του εσωτερικού χώρου θεωρείται ιδιωτική περιουσία (στις περιπτώσεις οικιών) και επομένως δεν διέπεται από τους ίδιους κανονισμούς όπως ο αέρας του εξωτερικού περιβάλλοντος. Ο δεύτερος είναι τεχνικός και αφορά την μελέτη του αέρα. Πιο συγκεκριμένα, οι ρύποι, οι πηγές και η συμπεριφορά τους είναι τελείως διαφορετικά στους εσωτερικούς χώρους από ότι στο εξωτερικό περιβάλλον, παρότι ο αέρας ανταλλάσσεται μεταξύ τους. Όμως, θα ήταν μεγάλο λάθος να εξετάσουμε το εσωτερικό περιβάλλον χωρίς να λάβουμε υπόψη το εξωτερικό, αφού αποτελούν μαζί ένα ενιαίο σύστημα και διότι θα οδηγηθούμε σε τελείως λάθος αποτελέσματα και συμπεράσματα.

Τα προβλήματα που σχετίζονται με τα εργασιακά περιβάλλοντα των βιομηχανιών μπορεί να είναι τελείως διαφορετικά από εκείνα σε οικίες ή κτήρια γραφείων. Αυτό συμβαίνει διότι οι συγκεντρώσεις των ρύπων στους οποίους εκτίθενται οι άνθρωποι διαφέρουν αρκετά. Επίσης, τα είδη και οι πηγές των ρύπων, οι ρυθμοί εκπομπής, ο σχεδιασμός και η κατασκευή των κτιρίων, ο σχεδιασμός και η συντήρηση του συστήματος εξαερισμού αποτελούν παράγοντες που διαφοροποιούν κατά μεγάλο βαθμό τη μελέτη μεταξύ των βιομηχανιών και των ιδιωτικών κτηρίων (David Cooper & Alley 2004).

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η μελέτη της συμπεριφοράς των σωματιδίων που εκλύονται από πηγές εσωτερικών χώρων και αυτών που

εισέρχονται σε αυτούς. Η συμπεριφορά τους στο χώρο εξαρτάται από μηχανισμούς όπως είναι η βαρυτική καθίζηση και η εναπόθεση σε επιφάνειες, η επαναϊώρηση, η συσσωμάτωση, η διάχυση, η προσρόφηση και η συμπύκνωση. Παρακάτω θα αναλύσουμε τους μηχανισμούς αυτούς καθώς και την ανταλλαγή σωματιδίων μεταξύ εσωτερικών χώρων και εξωτερικού περιβάλλοντος.



Εικόνα 1: Μηχανισμοί που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των αερίων σε εσωτερικούς χώρους (Thatcher 2002).

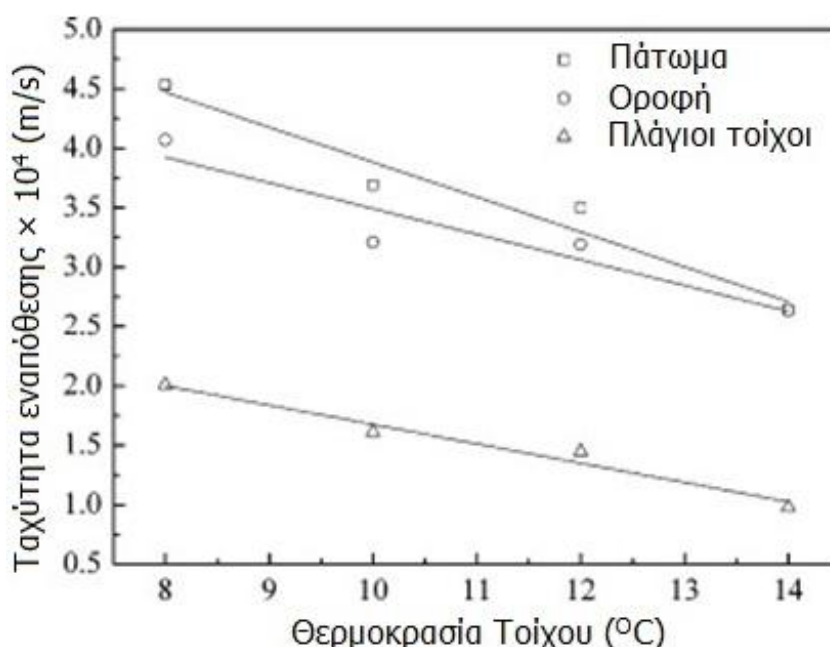
2.2 Κύριοι μηχανισμοί συμπεριφοράς αιωρούμενων σωματιδίων

Βαρυτική εναπόθεση σε επιφάνειες

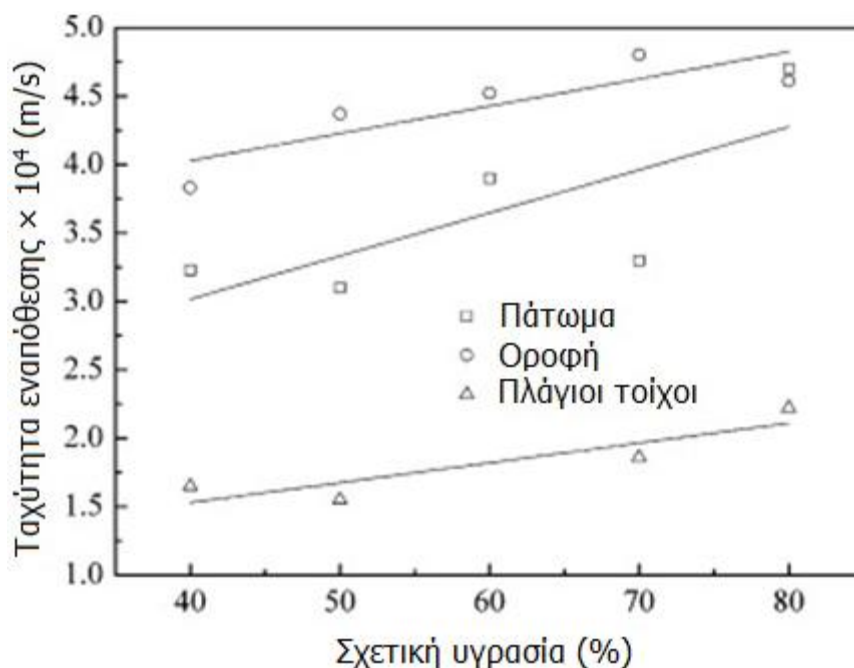
Η εναπόθεση των αιωρούμενων σωματιδίων στις επιφάνειες εσωτερικού χώρου εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων, από την διάχυση τους στις επιφάνειες (κυρίως για τα μικρά σωματίδια) και από τη δύναμη της βαρύτητας. Επίσης τα ρεύματα του αέρα μπορούν να αυξήσουν την μεταφορά σωματιδίων μεταξύ των επιφανειών και επομένως να επηρεάσουν την καθίζηση. Σημαντικό ρόλο λαμβάνει και το είδος της επιφάνειας που θα εναποτεθούν, καθώς στις κολλώδεις και τις τραχείς εναποτίθενται περισσότερα σωματίδια από ότι στις λείες. Άλλος ένας παράγοντας εναπόθεσης είναι το μέγεθος της επιφάνειας προς εναπόθεση, όπου όσο μεγαλύτερη είναι, τόσο αυξάνεται ο ρυθμός εναπόθεσης. Ο ρυθμός εναπόθεσης εξαρτάται ακόμα από

τις συνθήκες υγρασίας και τη θερμοκρασία που επικρατούν και από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα και των επιφανειών στο χώρο (Thatcher 2002). Λόγω των πολλών μεταβλητών που συμμετέχουν στην διεργασία της εναπόθεσης είναι δύσκολο να τις διαχωρίσουμε και να μελετήσουμε τη κάθε μία ξεχωριστά για να δούμε σε πιο ποσοστό συμβάλει.

Ως *ρυθμός εναπόθεσης* ορίζεται ο αριθμός των αιωρούμενων σωματιδίων που εναποτίθεται στην επιφάνεια ανά μονάδα επιφάνειας ανά μονάδα χρόνου ($\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) ή ο ρυθμός των αιωρούμενων σωματιδίων που εναποτίθεται στην συνολική επιφάνεια ανά μονάδα χρόνου (s^{-1}). Αναλυτικότερα, ο ρυθμός εναπόθεσης των σωματιδίων αυξάνει καθώς αυξάνει και το μέγεθος των σωματιδίων. Ακόμα σύμφωνα με μελέτες έχει αποδειχτεί ότι όσο αυξάνει η θερμοκρασία τόσο μειώνεται η ταχύτητα εναπόθεσης των σωματιδίων στις επιφάνειες είτε αυτές αφορούν το πάτωμα, τους τοίχους ή την οροφή (εικόνα 2). Όσο αφορά το παραπάνω η ταχύτητα εναπόθεσης είναι μεγαλύτερη για το πάτωμα και την οροφή από ότι στους τοίχους. Ακόμα, στις περιπτώσεις όπου υπήρχε σταθερή θερμοκρασία παρατηρήθηκε ότι η ταχύτητα εναπόθεσης αυξάνει με την αύξηση της περιεκτικότητας της υγρασίας (εικόνα 3, Yunlong Han 2011).

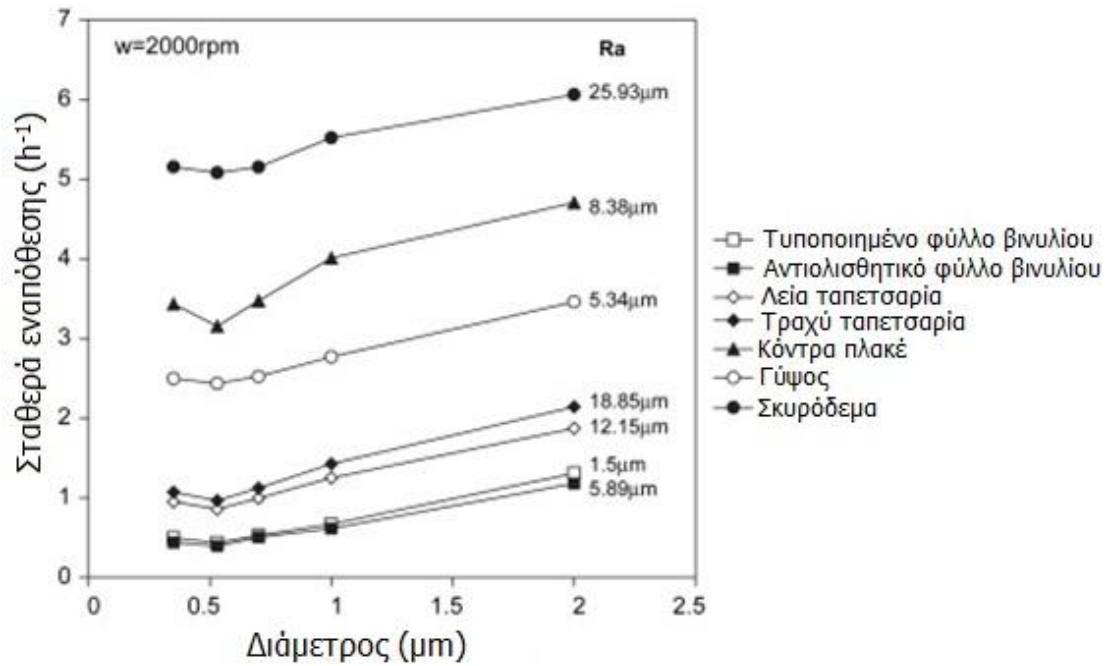


Εικόνα 2: Διάγραμμα συσχέτισης της ταχύτητας εναπόθεσης σε σχέση με τη θερμοκρασία στις διάφορες επιφάνειες (Yunlong Han 2011).

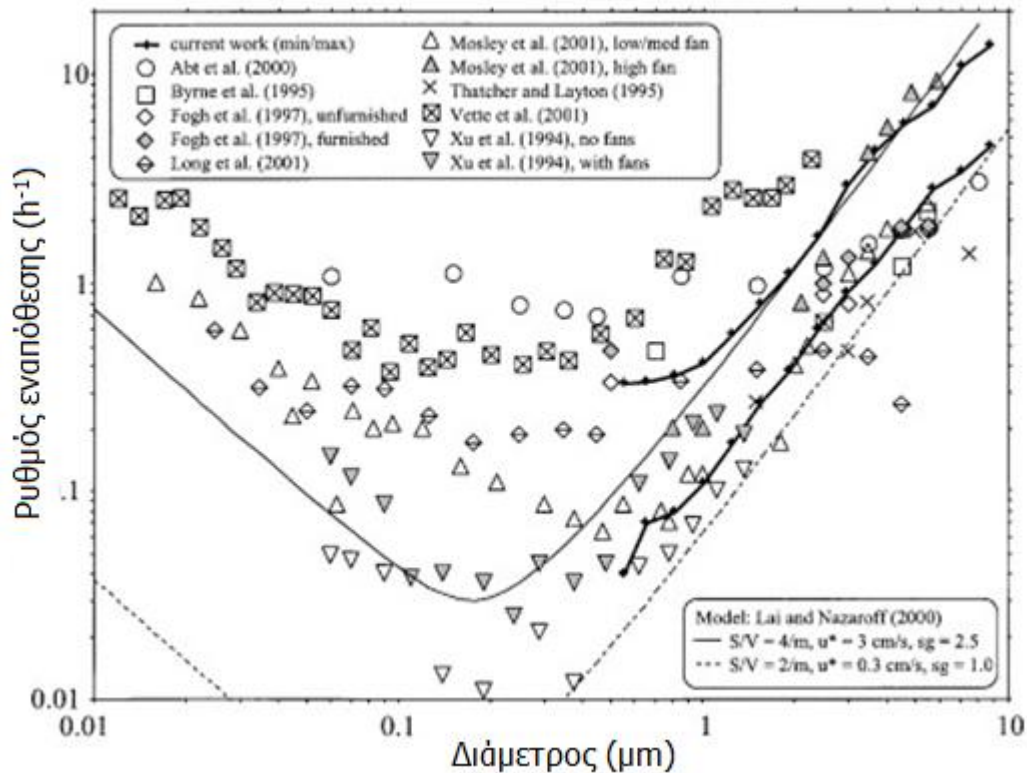


Εικόνα 3: Διάγραμμα συσχέτισης της ταχύτητας εναπόθεσης σε σχέση με την επι τοις εκατό υγρασία στις διάφορες επιφάνειες (Yunlong Han 2011).

Για το προσδιορισμό της σχέσης του είδους της επιφάνειας και του ρυθμού εναπόθεσης έχουν πραγματοποιηθεί λιγότερα πειράματα. Παρόλα αυτά, αποδεικνύεται ότι ρυθμός εναπόθεσης ήταν πολλαπλάσιος για τις περιπτώσεις που στο χώρο τα πατώματα καλύπτονται από μοκέτες και χαλιά σε σχέση με γυμνές επιφάνειες ξύλου (Abadie 2001). Επιπλέον, έχουν γίνει και άλλες έρευνες στις οποίες έχουν μελετηθεί περισσότερα υλικά με τα οποία θα μπορούσε να ήταν φτιαγμένες ή σκεπασμένες όλες οι επιφάνειες του εσωτερικού χώρου (εικόνα 4). Τέτοια είναι το τσιμέντο, ο γύψος, το κόντρα πλακέ, φύλλα βινυλίων κ.α. Το υλικό που παρουσίαζε τον μεγαλύτερο ρυθμό εναπόθεσης ήταν το τσιμέντο (Hamdani & Abadie 2008). Τέλος, στις παραπάνω μελέτες έχει γίνει απλά μέτρηση των συγκεντρώσεων των σωματιδίων και έτσι δεν παρέχουν άμεσα αποδεικτικά στοιχεία που αφορούν την εναπόθεση στις κάθετες επιφάνειες (Lai & Nazaroff 2005). Επίσης, τα πειράματα αυτά αφορούν ένα μόνο δωμάτιο λόγω του ότι δεν μπορεί να γίνει ακριβής προσομοίωση του πεδίου. Τα αποτελέσματα τους οπότε αποτελούν μία πολύ καλή εκτίμηση της πραγματικότητας με πολλές χρήσιμες πληροφορίες αλλά διαφέρουν από αυτήν.



Εικόνα 4: Διάγραμμα του ρυθμού εναπόθεσης για τα διάφορα υλικά των επιφανειών (Hamdani & Abadie 2008).



Εικόνα 5: Συγκεντρωτικό διάγραμμα διαφόρων μελετών του συντελεστή εναπόθεσης των αιωρούμενων σωματιδίων με τις παραμέτρους επιρροής (Thatcher 2002).

Παρατηρώντας την εικόνα 5 βλέπουμε ότι υπάρχει μεγάλη διακύμανση του ρυθμού εναπόθεσης για τις διάφορες μετρήσεις που έγιναν. Επίσης, γίνεται αντιληπτό ότι το μέγεθος των σωματιδίων παίζει σπουδαίο ρόλο, καθώς για την ίδια υπό εξέταση παράμετρο αλλάζει το αποτέλεσμα του ρυθμού εναπόθεσης όσο κινούμαστε στο εύρος μεγέθους των σωματιδίων. Ακόμα, υπάρχει μεγάλη διαφορά της εναπόθεσης καθώς αυξάνει η ταχύτητα του αέρα. Στις μεσαίες και υψηλές ταχύτητες συναντούμε υψηλότερο βαθμό εναπόθεσης σε σχέση με τις μικρές ταχύτητες αέρα, για όλο το εύρος του μεγέθους των σωματιδίων. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι στις περιπτώσεις όπου είχαμε έπιπλα στους χώρους (μεγαλύτερες επιφάνειες εναπόθεσης) είχαμε και μεγαλύτερο ρυθμό εναπόθεσης σε σχέση με τους κενούς χώρους (Thatcher 2002).

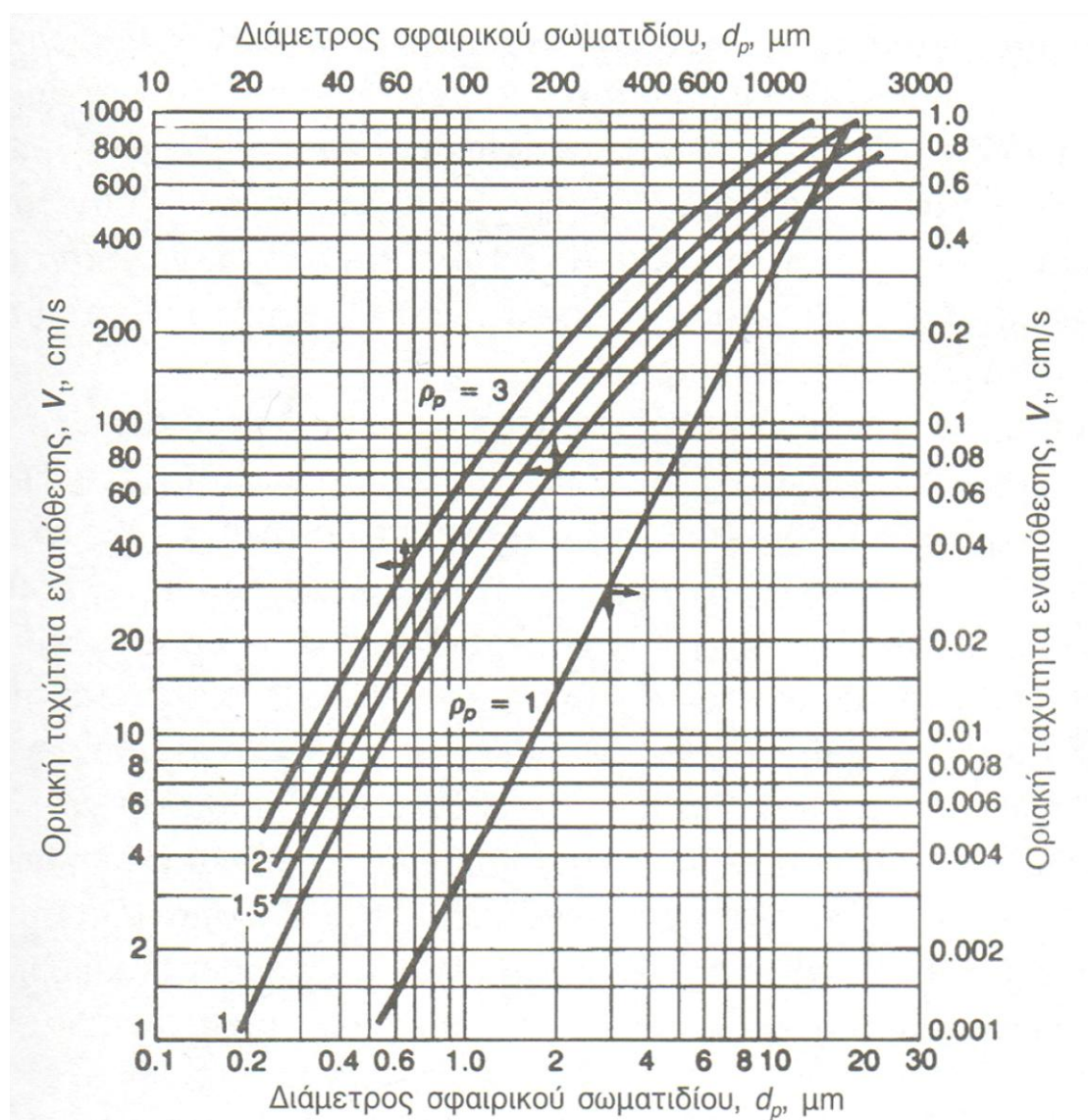
Πολύ σημαντικός παράγοντας της εναπόθεσης των σωματιδίων είναι η ταχύτητα τους. Για την εύρεση της θα πρέπει να γίνει μελέτη των δυνάμεων που δρουν πάνω στα σωματίδια. Όταν ένα σωματίδιο αφήνεται μέσα σε ακίνητο αέρα με αρχική ταχύτητα ίση με το μηδέν, υπάρχουν δύο δυνάμεις που ασκούνται επάνω του. Η πρώτη είναι αυτή της βαρύτητας και η δεύτερη αυτή της οπισθέλκουσας δύναμης. Η οπισθέλκουσα δύναμη δρα στο σωματίδιο ώστε να αντιτίθεται στη σχετική ταχύτητα του σωματιδίου (στην συγκεκριμένη περίπτωση αυτή που αναπτύσσει λόγω της βαρύτητας). Ουσιαστικά το αέριο που περιβάλλει το σωματίδιο δημιουργεί μία δύναμη αντίθετη της βαρύτητας η οποία μετά από λίγο χρόνο επιτάχυνσης, εξισορροπεί αυτή της βαρύτητας και το σωματίδιο φτάνει στην μέγιστη ταχύτητα. Αυτή η ταχύτητα ονομάζεται οριακή ταχύτητα εναπόθεσης των σωματιδίων και δίνεται από το παρακάτω τύπο (Baron & Willeke 2005).

Όπου :

- = οριακή ταχύτητα εναπόθεσης m/s
- = συντελεστής διόρθωσης του Cunningham¹
- = πυκνότητα του σωματιδίου kg/m³
- = διάμετρος του σωματιδίου m
- = ιξώδες του ρευστού kg/ms
- = επιτάχυνση της βαρύτητας m/s²

¹ Μερικές φορές τα σωματίδια είναι ικανά να «γλιστράν» ανάμεσα στα μόρια του αερίου και αυτή η ολίσθηση μειώνει την οπισθέλκουσα δύναμη πάνω στα σωματίδια. Με τον συντελεστή του Cunningham συμπεριλαμβάνουμε αυτή την ιδιότητα των σωματιδίων.

Στην εικόνα 6 δίνεται το διάγραμμα της οριακής ταχύτητας εναπόθεσης των σφαιρικών σωματιδίων σε σχέση με τη διάμετρο τους, για διάμετρο από 0,1 έως 3000 μm . Σύμφωνα με αυτό καθώς αυξάνει η διάμετρος τους, η οριακή ταχύτητα εναπόθεσης αυξάνει σχεδόν γραμμικά. Επίσης, για σταθερή διάμετρο παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας εναπόθεσης των σωματιδίων με την αύξηση της πυκνότητας τους.



Εικόνα 6: Διάγραμμα της οριακής ταχύτητας καθίζησης των σφαιρικών σωματιδίων σε σχέση με τη διάμετρο σφαιρικού σωματιδίου (Wark & Warner 1981; πηγή Cooper & Alley 2004)

Στην αρχή της παραγράφου αναφέραμε ότι μία από τις βασικές διεργασίες της εναπόθεσης των σωματιδίων είναι η διάχυση. Ως διάχυση ορίζεται η κίνηση του αερίου και των σωματιδίων λόγω της διαφοράς συγκέντρωσης. Σύμφωνα με το δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο μία ουσία διαχέεται αυθόρμητα από μία περιοχή υψηλής συγκέντρωσης σε μία άλλη χαμηλότερης συγκέντρωσης και λαμβάνοντας υπόψη το νόμο του Fick η διαχυτότητα είναι

μία σταθερά αναλογίας μεταξύ του ρυθμού ροής της ουσίας και της βαθμίδας συγκέντρωσης, οπότε έχουμε:

— —

Όπου: = ρυθμός μεταφοράς μάζας, mol/s
= η κάθετη επιφάνεια προς την κατεύθυνση διάχυσης, m²
= διαχυτότητα, m²/s
= βαθμίδα συγκέντρωσης, mol/m⁴

(Cooper & Alley 2004)

Όσο αφορά τη διάχυση των αιωρούμενων σωματιδίων αυτή εξαρτάται από το μέγεθος τους. Τα μικρά σωματίδια διαχέονται πολύ πιο γρήγορα σε σχέση με τα μεγαλύτερα. Αυτό συμβαίνει διότι λόγω της αδράνειας που αναπτύσσουν τα δεύτερα, επειδή έχουνε πολύ μεγαλύτερη μάζα σε σχέση με τα πρώτα. Η διαχυτότητα των σωματιδίων μέσα στο αέριο μέσο δίνεται από τον εξής τύπο.

Όπου: = σταθερά Boltzmann, 1,28*10⁻²³ Nm/K
= θερμοκρασία αερίου, K
= μηχανική κινητικότητα η οποία συνδυάζει το μέγεθος των σωματιδίων με κάποιες ιδιότητες του αερίου, m/Ns

(Baron & Willeke 2005)

Επαναιώρηση των σωματιδίων

Τα σωματίδια που έχουν εναποτεθεί στις επιφάνειες που είδαμε προηγουμένως μπορούν να επαναιωρηθούν πίσω στην ατμόσφαιρα. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει να τους ασκηθεί μία δύναμη ώστε να τα αποκολλήσει από την επιφάνεια. Αυτή η δύναμη προκύπτει συνήθως από την τυρβώδη ροή του ανέμου. Όσο αφορά τη σχέση μεταξύ του μεγέθους των σωματιδίων και της επαναιώρησης τους, μπορούμε να ειπωθεί ότι όσο αυξάνει το μέγεθος τους τόσο πιο εύκολα αποκολλώνται από τις επιφάνειες και επανέρχονται στο αέριο μέσο. Επίσης, η επαναιώρηση εξαρτάται από το είδος της επιφάνειας (λεία ή τραχιά) και από τις δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα στο συγκεκριμένο περιβάλλον.

Όσο αφορά τις επιφάνειες, σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, στις περιπτώσεις που ήταν καλυμμένες με χαλί η επαναιώρηση ήταν υψηλότερη

συγκριτικά με δάπεδα από ξύλο. Ακόμα, η κύρια δραστηριότητα που είναι υπεύθυνη για την επαναιώρηση των σωματιδίων εμφανίζεται το περπάτημα (Shaughnessy & Vu 2012). Συγχρόνως αναφέρεται ότι ο ρυθμός επαναιώρησης των σωματιδίων δείχνει να αυξάνει σε ένα συγκεκριμένο εύρος ταχυτήτων αέρα για ένα συγκεκριμένο εύρος μεγέθους των σωματιδίων (0,4-10 μ m), με την αύξηση αυτή να παρουσιάζεται για ένα μικρό χρονικό διάστημα στην αρχή της επαναιώρησης και έπειτα να μειώνεται αισθητά (Wang 2012).

Ο ρυθμός επαναιώρησης των σωματιδίων είναι πολύ δύσκολο να υπολογιστεί σε κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος διότι υπάρχουν πολλές πηγές που εκπέμπουν ταυτόχρονα σωματίδια και λαμβάνει χώρα μεταφορά αυτών μέσω των αέριων ρευμάτων. Παρόλα αυτά, έχει γίνει μοντελοποίηση του φαινομένου στα εργαστήρια υπό σταθερές συνθήκες. Επίσης, υπάρχουν πολλά εμπειρικά μοντέλα που βασίζονται σε υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα με αποτέλεσμα να έχουμε σοβαρές διαφοροποιήσεις ανάλογα με τα πειραματικά δεδομένα (Morawska & Salthammer 2003; Λαζαρίδης 2010).

Διείσδυση των σωματιδίων στο εσωτερικό περιβάλλον

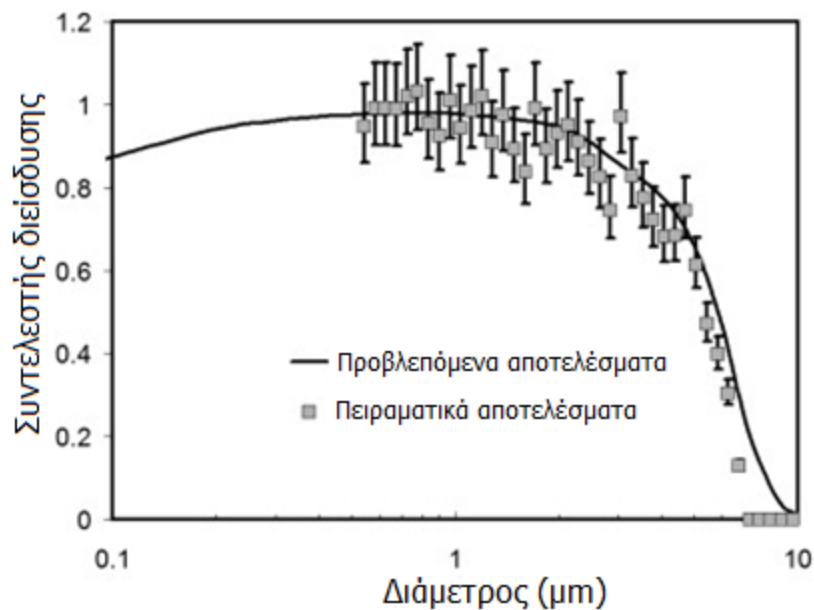
Η εξωτερική ατμόσφαιρα αποτελεί μία σημαντική πηγή αιωρούμενων σωματιδίων στο εσωτερικό περιβάλλον. Τα αιωρούμενα σωματίδια διεισδύουν σε αυτό μέσω των ανοιγμάτων των κτηρίων, είτε αυτά είναι παράθυρα και πόρτες, είτε είναι ρωγμές, τρύπες, μικρά κενά, γενικότερα διαρροές στο κέλυφος του κτηρίου. Στις περιπτώσεις όπου τα παράθυρα και οι πόρτες των κτηρίων είναι ανοιχτά αποτελούν το κύριο μέσο διείσδυσης των σωματιδίων με το συντελεστή διείσδυσης να είναι ίσος για όλα τα μεγέθη των σωματιδίων. Ο συντελεστής διείσδυσης εκφράζει την ικανότητα των σωματιδίων να εισέρχονται στο εσωτερικό περιβάλλον. Όμως, το παραπάνω γεγονός παύει να ισχύει όταν τα σωματίδια εισέρχονται μέσα στο κτήριο ακολουθώντας μία πιο πολύπλοκη διαδρομή.

Ο τύπος των ρωγμών στο κέλυφος του κτηρίου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ικανότητα διείσδυσης των σωματιδίων. Στις περιπτώσεις όπου οι ρωγμές εμφανίζουν μεγάλη τραχύτητα υπάρχει μεγαλύτερη εναπόθεση σε αυτές με αποτέλεσμα να μειώνεται η διείσδυση τους. Μάλιστα η εναπόθεση αυτή βρέθηκε να είναι μεγαλύτερη για τα μικρού μεγέθους σωματίδια (Lai 2012). Ο βαθμός διείσδυσης των σωματιδίων εξαρτάται από το μέγεθος τους. Τα λεπτά σωματίδια έχουν μεγαλύτερη ικανότητα διείσδυσης στους εσωτερικούς χώρους από ότι τα χοντρά. Ακόμα, τα σωματίδια με διάμετρο 0,1-1 μ m παρουσιάζουν ακόμα μεγαλύτερη ευκολία στην διείσδυση από ότι αυτά με διάμετρο 1-2,5 μ m. (Abadie 2001; Tian 2009).

Ο λόγος των εσωτερικών προς εξωτερικών συγκεντρώσεων για τα $PM_{2.5}$ και τα PM_{10} αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τη μελέτη της διείσδυσης των σωματιδίων. Στην πραγματικότητα συναντούμε ένα μεγάλο εύρος του λόγου εσωτερικών προς εξωτερικών συγκεντρώσεων. Στις περισσότερες περιπτώσεις όπου ο παραπάνω λόγος παίρνει υψηλές τιμές είναι λόγω της ύπαρξης ισχυρών πηγών μέσα στους εσωτερικούς χώρους, με την πιο κοινή πηγή στην πληθώρα μελετών που έχουν εκπονηθεί να είναι ο καπνός τους τσιγάρου. Μία ακόμα πηγή που αποτελεί αιτία είναι η χρήση του τζακιού. Αντίθετα, χαμηλοί λόγοι υποδεικνύουν πέρα από την έλλειψη πηγών, τη χρήση φίλτρων καθαρισμού αέρα και την καλή ποιότητα του κελύφους του κτηρίου.

Παρά τις ενδεικτικές τιμές του λόγου I/O (Indoor/Outdoor) συγκεντρώσεων, πολλές μελέτες που έχουν γίνει στο πεδίο μας δίνουν και διαφορετικά αποτελέσματα για τα διαφορετικά μεγέθη των σωματιδίων. Πιο συγκεκριμένα, σε αρκετές από αυτές ο λόγος I/O για τα $PM_{2.5}$ είναι μικρότερος από αυτόν των PM_{10} , αρκετές ακόμα εξάγουν ακριβώς το αντίθετο συμπέρασμα, ενώ πάλι άλλες τους εμφανίζουν με την ίδια τιμή. Αυτό το γεγονός παρουσιάζεται λόγω των πολλών παραγόντων που συνεισφέρουν σημαντικά στη δυναμική των σωματιδίων στο πεδίο. Αναλυτικότερα, ο ρυθμός εναπόθεσης των PM_{10} είναι υψηλότερος σε σχέση με αυτόν των $PM_{2.5}$, όμως η διείσδυση των $PM_{2.5}$ είναι υψηλότερη σε σχέση με αυτή των PM_{10} . Επίσης, τα ποσοστά των PM_{10} και $PM_{2.5}$ που εκπέμπει κάθε πηγή είναι διαφορετικά, όπως και η απομάκρυνση τους μέσω του αερισμού διαφέρει πάλι ανάλογα με το μέγεθος και της θέσης της πηγής στο χώρο. Με βάση όλα τα παραπάνω γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η μελέτη των σωματιδίων στο πεδίο γίνεται συνυπολογίζοντας όλους αυτούς τους παράγοντες διότι είναι δύσκολη η ξεχωριστή τους μελέτη (Chen & Zhao 2011).

Στο εικόνα 7 παρουσιάζεται η συσχέτιση του συντελεστή διείσδυσης, όπου αναφέρθηκε στην αρχή της παραγράφου, με το μέγεθος των σωματιδίων. Πιο αναλυτικά, στο διάγραμμα φαίνεται η διαφορά της θεωρητικής αναμενόμενης συμπεριφοράς για την διείσδυση των σωματιδίων, με αυτήν που προέκυψε από τα πειραματικά δεδομένα που μετρήθηκαν σε γραφεία. Παρατηρείται ότι οι υψηλότερες τιμές βρίσκονται στην περιοχή των $PM_{2.5}$ και με την τιμή του συντελεστή διείσδυσης να πέφτει δραματικά ανεβαίνοντας στη διάμετρο των σωματιδίων. Ουσιαστικά, η διείσδυση για τα σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη από $7,5\mu m$ είναι μηδενική.



Εικόνα 7: Διάγραμμα συσχέτισης του συντελεστή διείσδυσης με το μέγεθος των σωματιδίων (Chen 2012).

Εξαερισμός

Στην αρχή του κεφαλαίου μιλήσαμε για την ποιότητα αέρα εσωτερικών χώρων και στη συνέχεια αναλύσαμε τους μηχανισμούς των σωματιδίων με σκοπό να την προβλέψουμε και να την ελέγξουμε. Ένας από τους σπουδαιότερους παράγοντες που την επηρεάζουν είναι ο εξαερισμός. Ως εξαερισμός ορίζεται η διεργασία κατά την οποία ο εξωτερικός αέρας εισέρχεται και αντικαθιστά τον εσωτερικό αέρα, ο οποίος αποβάλλεται στην εξωτερική ατμόσφαιρα. Η ανταλλαγή αέρα στα κτήρια γίνεται με δύο τρόπους: εξαναγκασμένο αερισμό και φυσικό αερισμό. Στην περίπτωση του εξαναγκασμένου αερισμού χρησιμοποιείται κάποιος μηχανικός εξοπλισμός που επιβάλλει δυναμικά την ανταλλαγή αέρα. Αντίθετα, στην περίπτωση του φυσικού αερισμού έχουμε φυσική ανταλλαγή αέρα μέσα από ανοιχτά παράθυρα ή ρωγμές όπου οφείλεται στα ρεύματα αέρα, στη διαφορά πίεσης και θερμοκρασίας.

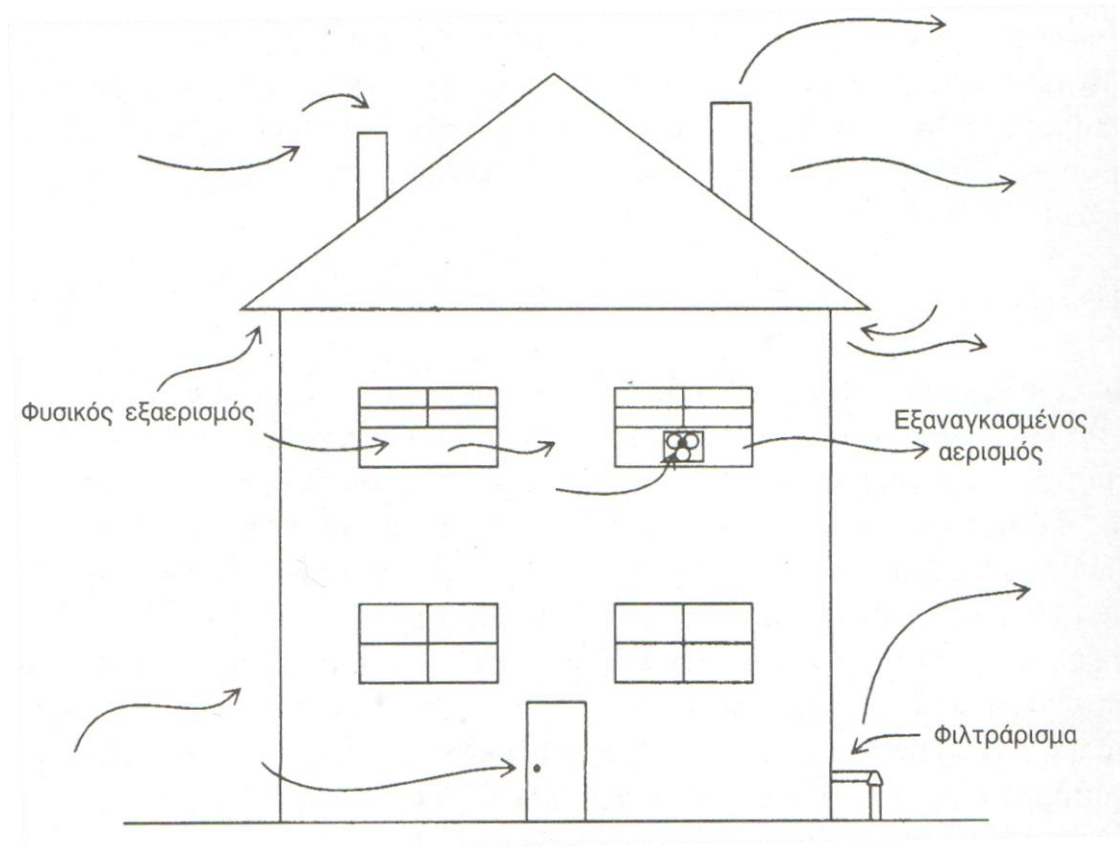
Ο φυσικός αερισμός χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες. Η πρώτη ονομάζεται διαμπερής αερισμός και αναφέρεται στις περιπτώσεις που επιτυγχάνεται ο αερισμός μέσω των ανοιγμάτων του κτηρίου όπως είναι τα παράθυρα και οι πόρτες. Η αποτελεσματικότητα της εξαρτάται από την αρχιτεκτονική των ανοιγμάτων του κτηρίου τόσο στο κέλυφος όσο και εσωτερικά. Η δεύτερη κατηγορία ονομάζεται κατακόρυφος αερισμός και επιτυγχάνεται μέσω των καμινάδων και γενικά μέσω των κατακόρυφων ανοιγμάτων του κτηρίου. Ουσιαστικά η λειτουργία του βασίζεται στη μεταφορά κίνηση των αέριων μαζών λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας (Λαζαρίδης 2008, Chen & Zho 2011).

Η συμβολή του εξαερισμού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό στην περίπτωση ύπαρξης ή μη πηγών μέσα στον εσωτερικό χώρο. Σε περίπτωση που έχουμε υψηλές συγκεντρώσεις λόγω πολλών πηγών στον εσωτερικό χώρο η συνεισφορά των εισερχόμενων σωματιδίων μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, ενώ αυτά που απομακρύνονται χαρακτηρίζονται σίγουρα ως υπολογίσιμη ποσότητα. Στην περίπτωση όμως που δεν έχουμε πηγές στον εσωτερικό χώρο η συνεισφορά των σωματιδίων λόγω του εξαερισμού αποτελεί παράγοντα που θα πρέπει να λάβουμε υπόψη στις μετρήσεις μας (Guo & Morawska 2008).

Σύμφωνα με έρευνες που έχουν γίνει για την αποτελεσματικότητα του εξαερισμού μεγάλο ρόλο παίζει η θέση της πηγής στον εσωτερικό χώρο. Στις περιπτώσεις που η πηγή βρισκόταν σε πολύ χαμηλό ύψος, κοντά στο πάτωμα, η αποτελεσματικότητα του εξαερισμού ήταν πολύ μικρή. Αντίθετα, όταν η πηγή βρισκόταν πιο ψηλά, κοντά στο ύψος αναπνοής η αποτελεσματικότητα του εξαερισμού ήταν μεγάλη και γινόταν αντιληπτό με τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα. Αυτό είναι λογικό αφού τα κατώτερα μέρη ενός δωματίου με εξαερισμό έχουμε μία πιο στρωματοποιημένη ροή του αέρα, ενώ πιο ψηλά έχουμε μία πιο δυναμική μίξη (Zhong 2010).

Ακόμα, μελετώντας τις πιθανότητες να έχουμε ακριβώς τα ίδια σωματίδια και ακριβώς την ίδια ταχύτητα εξαερισμού ο ρυθμός καθίζησης ήταν διαφορετικός για διαφορετικά ήδη του εξαερισμού. Δηλαδή αν υπήρχε καθαρός εκτοπισμός του αέρα ο ρυθμός καθίζησης ήταν πιο μικρός ενώ ο αριθμός των σωματιδίων που διέφευγε ήταν μεγαλύτερος. Όταν όμως είχαμε και μίξη του αέρα μέσα στον εσωτερικό χώρο διέφευγαν λιγότερα σωματίδια ενώ ο ρυθμός καθίζησης ήταν υψηλότερος. Επίσης, η αποτελεσματικότητα του εξαερισμού εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων. Για μεγαλύτερο μέγεθος σωματιδίων είχαμε μικρότερη απομάκρυνση από τους εσωτερικούς χώρους και μεγαλύτερο ρυθμό εναπόθεσης (Zhao & Zhang 2004).

Κατά τη πάροδο του χρόνου γίνονται συνεχείς αλλαγές όσο αφορά τις διατάξεις που αφορούν τους ελάχιστους ρυθμούς εξαερισμού των κτηρίων. Οι απαιτήσεις διαφέρουν ως προς τη χρήση των εσωτερικών χώρων αλλά και ως προς τον αριθμό των ατόμων που βρίσκονται μέσα στο χώρο. Οι αλλαγές αυτές συνήθως συστήνουν αύξηση του ρυθμού εξαερισμού για την αραίωση των ρύπων που παράγονται στους εσωτερικούς χώρους. Στην πραγματικότητα όμως θα μπορούσε να οδηγήσει στην αύξηση των συγκεντρώσεων στους εσωτερικούς χώρους από ρύπους που παράγονται στο εξωτερικό περιβάλλον. Στη ουσία αν ο εξωτερικός είναι λιγότερο καθαρός από τον εσωτερικό θα έχουμε μείωση της υπάρχουσας ποιότητας αέρα, ενώ σε αντίθετη περίπτωση θα έχουμε βελτίωση της ποιότητας του (Cooper & Alley 2004).



Εικόνα 8: Φυσικός και εξαναγκασμένος αερισμός (Cooper & Alley 2004).

Συσσωμάτωση

Ως συσσωμάτωση ορίζεται η διαδικασία αύξησης του μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων, ως αποτέλεσμα των συγκρούσεων τους και το σχηματισμό μεγαλύτερων σωματιδίων. Εάν η συσσωμάτωση είναι αποτέλεσμα της κίνησης Brown² των σωματιδίων ονομάζεται θερμική συσσωμάτωση. Εάν είναι αποτέλεσμα εξωτερικών δυνάμεων ονομάζεται κινηματική συσσωμάτωση. Το επακόλουθο των συγκρούσεων αυτών είναι η μείωση του αριθμού των σωματιδίων και κατά συνέπεια της συγκέντρωσης τους αλλά και η αύξηση του μεγέθους τους. Σημαντικό είναι να αναφέρουμε πως η μάζα των σωματιδίων δεν αλλάζει αλλά παραμένει σταθερή.

Για τη μελέτη της θερμικής συσσωμάτωσης κάνουμε τις απλοποιήσεις ότι τα σωματίδια είναι σφαιρικά, συσσωματώνονται σε κάθε σύγκρουση και ότι η μεταβολή του μεγέθους τους είναι μικρή. Επίσης, η συγκεκριμένη περίπτωση

² Ως κίνηση Brown ονομάζεται η διάχυση των σωματιδίων η οποία εμφανίζεται λόγω της υψηλής ταχύτητας στα μικρά σωματίδια και πολλές φορές είναι χρήσιμο να υπολογίσουμε πόσο μακριά μπορούν να ταξιδέψουν σε ένα συγκεκριμένο δοσμένο χρονικό διάστημα.

αφορά συσσωματώσεις όπου συμμετέχουν σωματίδια ίδιου μεγέθους και όχι σε ένα εύρος μεγεθών. Η μείωση της συγκέντρωσης των σωματιδίων σε σχέση με το χρόνο δίνεται από τη σχέση:

—

Όπου: = αριθμός των σωματιδίων
= συντελεστής συσσωμάτωσης m^3/s

Η παραπάνω εξίσωση μετασχηματίζεται και μπορούμε να υπολογίσουμε τον αριθμό των σωματιδίων (N) σε χρόνο t από τότε που άρχισε η συσσωμάτωση.

—————

Όπου: = ο αρχικός αριθμός των σωματιδίων

Ο συντελεστής συσσωμάτωσης K δίνεται από τον τύπο:

Όπου: = η διάμετρος του σωματιδίου
= ο συντελεστής διάχυσης σε m^2/s

Διάμετρος των σωματιδίων (μm)	Συντελεστής Συσσωμάτωσης (m^3/s)
0,05	$9,9 \times 10^{-16}$
0,1	$7,2 \times 10^{-16}$
0,5	$5,8 \times 10^{-16}$
1	$3,4 \times 10^{-16}$
5	$3,0 \times 10^{-16}$

Πίνακας 2: Συντελεστές συσσωμάτωσης για συγκεκριμένες διαμέτρους στους 20°C (Hinds 1999; Πηγή Baron & Willeke 2005).

Από τις εξισώσεις (2.4), (2.5), (2.6) και τον πίνακα 2 βλέπουμε ότι ο συντελεστής της συσσωμάτωσης παραμένει σταθερός για μία συγκεκριμένη τιμή της διαμέτρου. Οπότε μπορεί να ειπωθεί ότι ο ρυθμός της συσσωμάτωσης εξαρτάται κυρίως από τη υπάρχον συγκέντρωση των σωματιδίων στο χώρο (). Άρα σε υψηλές συγκεντρώσεις υπάρχει μεγαλύτερος ρυθμός συσσωμάτωσης ενώ όσο μειώνεται η συγκέντρωση ακολουθεί και αυτός πτωτική πορεία. Όμως, στη πραγματικότητα υπάρχει ένα

μεγάλο εύρος μεγεθών όπου γίνεται η συσσωμάτωση και η προσομοίωση του είναι πιο πολύπλοκη, καθώς διαφορετικά μεγέθη σωματιδίων συγκρούονται και δημιουργούν συσσωματώματα.

Η κινηματική συσσωμάτωση είναι περισσότερο αποτέλεσμα εξωτερικών δυνάμεων που ασκούνται στα σωματίδια παρά των δυνάμεων Brown. Οι εξωτερικές αυτές δυνάμεις μπορεί να οφείλονται στην βαρύτητα ή στην τυρβώδη ροή. Στην ουσία σε όλες τις περιπτώσεις σχεδόν δημιουργείται ένα εύρος ταχυτήτων στα σωματίδια και έτσι αυτά προσκρούονται μεταξύ τους και δημιουργούν συσσωματώματα. Τέλος όσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση των σωματιδίων, τόσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός συσσωμάτωσης (Baron & Willeke 2005; Λαζαρίδης 2010).

Συμπύκνωση

Ως συμπύκνωση ορίζεται η αύξηση του μεγέθους (όγκου) των σωματιδίων λόγω της συμπύκνωσης ατμών στην επιφάνεια του. Πιο συγκεκριμένα, όταν ένα σωματίδιο βρίσκεται σε υπερκορεσμένο περιβάλλον, τότε μεγαλώνει από τη συμπύκνωση ατμού στην επιφάνεια του. Ο ρυθμός αύξησης του μεγέθους του εξαρτάται από το βαθμό κορεσμού και το μέγεθος των σωματιδίων. Ουσιαστικά ο βαθμός κορεσμού είναι ο ρυθμός με τον οποίο τα μόρια ατμού έρχονται σε επαφή με την επιφάνεια του σωματιδίου, τα οποία περιγράφονται με τη κινητική θεωρία των αερίων. Ο χρόνος ο οποίος απαιτείται για την αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων με τη συμπύκνωση είναι ο εξής.

Όπου: ρ = πυκνότητα σωματιδίου, kg/m^3
 R = σταθερά των αερίων, $8,31 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$
 Δr = διαφορά της διαμέτρου πριν και μετά τη συμπύκνωση, m
 D = συντελεστής διάχυσης, $2,4 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
 m = μοριακό βάρος
 p = πίεση του ατμού στην επιφάνεια του σωματιδίου, Pa
 T = θερμοκρασία του σωματιδίου, K
 ∞ = Με το σύμβολο αυτό αναφέρονται η πίεση(Pa) και η θερμοκρασία (K) γύρω από το σωματίδιο

(Baron & Willeke 2005)

Προσρόφηση

Κατά τη προσρόφηση ο αέρας που είναι ρυπασμένος με ατμό έρχεται σε επαφή με σωματίδια τα οποία θα συγκρατήσουν μερικά από τα μόρια του ατμού και έπειτα θα φτάσουν σε ισορροπία. Γενικά, η προσρόφηση είναι ένας τύπος ισορροπίας που είναι πολύ σημαντικός στην αέρια ρύπανση. Η προσροφούμενη ποσότητα στα σωματίδια εξαρτάται από το τύπο του ατμού, τη μερική πίεση του ατμού, το μέγεθος των σωματιδίων (διαθέσιμη επιφάνεια για προσρόφηση) και τη θερμοκρασία. Η φυσική προσρόφηση είναι εξώθερμη απελευθερώνοντας ένα ποσό θερμότητας όμοιο με εκείνο της θερμότητας της συμπύκνωσης. Η προσρόφηση είναι αντιστρεπτή διεργασία για αυτό χρησιμοποιείται ως μέθοδος για το διαχωρισμό των VOCs (πτητικές οργανικές ενώσεις) από τον αέρα (Cooper & Alley 2004).

3. ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟ ΑΝΑΠΝΕΥΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

3.1 Εισαγωγικά

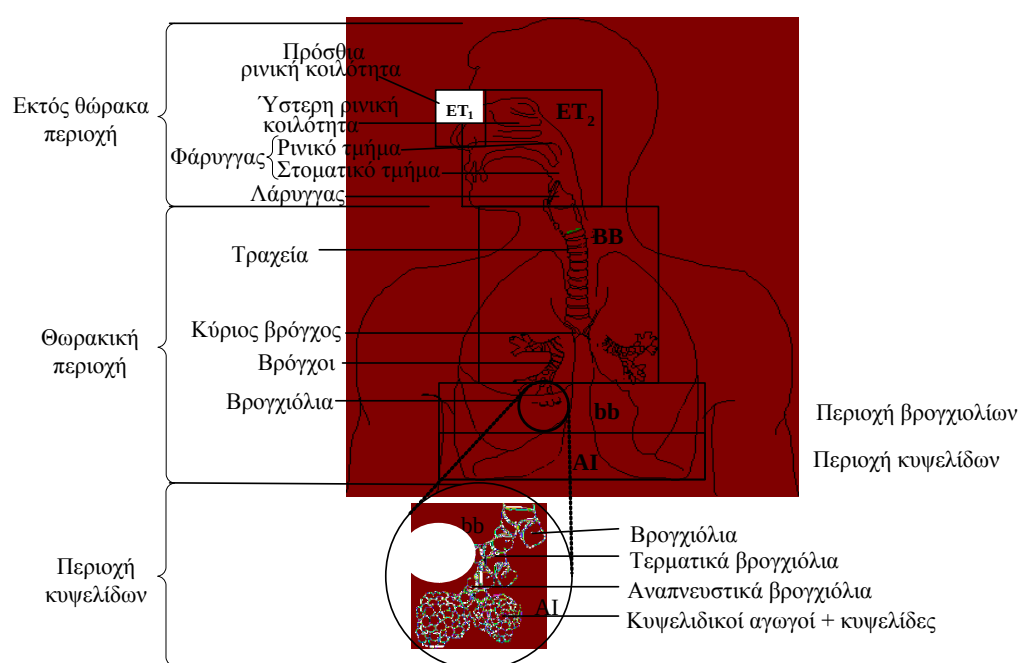
Πληθώρα επιδημιολογικών μελετών έχουν συνδέσει την ύπαρξη υψηλών συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων με αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία (Chio & Devlin 2001, Berger 2006, Stone 2000). Ουσιαστικά αποτελούν σοβαρό κίνδυνο για αυτήν και έχουν συνδεθεί με την αύξηση της νοσηρότητας αλλά και της θνησιμότητας. Σύμφωνα με τον παγκόσμιο οργανισμό υγείας εκτιμάται ότι η εισπνοή των αιωρούμενων σωματιδίων είναι υπεύθυνη για 500.000 θανάτους το χρόνο σε όλο τον κόσμο και για την εμφάνιση πολλών ασθενειών. Για να μπορέσουμε να μελετήσουμε τις ασθένειες που προκαλούνται από τα αιωρούμενα σωματίδια πρώτα θα πρέπει να είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε τους τρόπους εισχώρησης στον ανθρωπινό οργανισμό. Για να γίνει αυτό θα δούμε την ανατομία του αναπνευστικού συστήματος αλλά και τους μηχανισμούς εναπόθεσης των σωματιδίων στα διάφορα μέρη του με βάση τα χαρακτηριστικά τους.

3.2 Ανατομία αναπνευστικού συστήματος

Το πρώτο μέρος της αναπνευστικής οδού με το οποίο επικοινωνεί με το εξωτερικό περιβάλλον είναι ο προθάλαμος ο οποίος αποτελείται από τη μύτη και το ρινοφάρυγγα. Ο προθάλαμος αποτελείται από ένα ψευδοπολύστιβο κυλινδρικό κροσσωτό επιθήλιο και τους αδένες. Εκεί ο αέρας καθαρίζεται διότι το κροσσωτό επιθήλιο και η βλέννα που παράγεται λειτουργούν σαν φίλτρο, ακόμα θερμαίνεται λόγω των πολλών τριχοειδών αγγείων που υπάρχουν και τέλος υγραίνεται από τη βλέννα για την προστασία του ύστερου αναπνευστικού συστήματος. Έπειτα, περνάει από την τραχεία η οποία επίσης καλύπτεται από κροσσωτό επιθήλιο, τους βρόγχους και τέλος στις κυψελίδες. Οι τελευταίες αποτελούνται από ένα λεπτό τοίχωμα που σχηματίζει την αναπνευστική μεμβράνη και γύρω από αυτές υπάρχει ένα δίκτυο αγγείων που κυκλοφορεί το αίμα προερχόμενο από τα διάφορα μέρη του σώματος. Οι κυψελίδες αποτελούν τη λειτουργική μονάδα των πνευμόνων και την κύρια μάζα τους (Yilmaz & Naclerio 2011).

Το αναπνευστικό σύστημα διαχωρίζεται στις παρακάτω περιοχές.

- Ανώτερο αναπνευστικό ή εκτός θώρακα περιοχή (ET): η οποία περιλαμβάνει τη πρόσθια ρινική κοιλότητα (ET₁), την ύστερη ρινική κοιλότητα, το λάρυγγα, το φάρυγγα και το στόμα (ET₂).
- Τραχειοβρογχική περιοχή (TB): η οποία περιλαμβάνει την τραχεία και τους πρωτεύοντες βρόγχους (BB), τους δευτερεύοντες βρόγχους και τους τερματικούς βρόγχους (bb).
- Κυψελιδική περιοχή (AI): η οποία περιλαμβάνει από τους αναπνευστικούς βρόγχους, τις πνευμονικές κυψελίδες και το συνδετικό ιστό (Λαζαρίδης 2010).



Εικόνα 9: Ανατομία αναπνευστικού συστήματος (Αλεξανδροπούλου & Λαζαρίδης 2010).

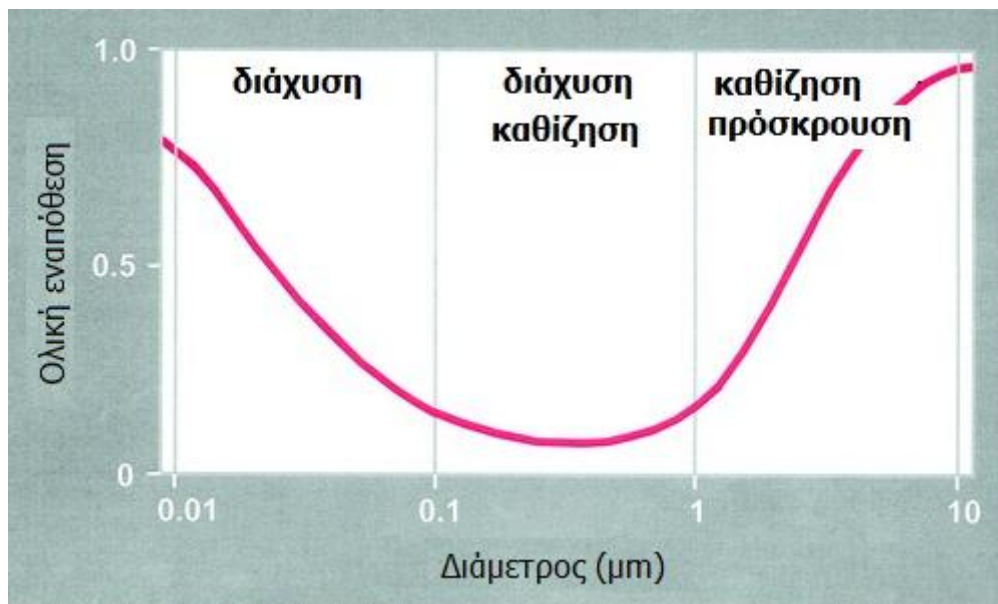
3.3 Μελέτη της δυναμικής των σωματιδίων στον ανθρώπινο οργανισμό.

Ως εναπόθεση των σωματιδίων ορίζεται η πιθανότητα ενός σωματιδίου που εισπνέεται να έρθει σε επαφή με την επιφάνεια του αναπνευστικού συστήματος και να εναποτεθεί εκεί. Σύμφωνα με τη συμπεριφορά των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα μπορούμε να προβλέψουμε την εναπόθεση τους σε κάθε περιοχή του. Η εισχώρηση, η εναπόθεση των

σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα και έπειτα ο καθαρισμός τους από αυτά εξαρτάται από το μέγεθος, τη πυκνότητα, το σχήμα, την επιφάνεια των σωματιδίων και τις ιδιαιτερότητες της αναπνοής του κάθε ατόμου. Τα σωματίδια που εισέρχονται μέσα στο αναπνευστικό υπόκεινται σε μηχανισμούς, όπως είναι αυτοί της βαρύτητας, της αδράνειας και της ώθησης από την πρόσκρουση τους με άλλα σωματίδια, οι οποίοι επηρεάζουν την κίνηση τους και επομένως και την εναπόθεση τους (Heyder 2004).

Όμως, όλα τα σωματίδια δεν έχουν την ικανότητα να διεισδύουν στο αναπνευστικό σύστημα. Τα σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη των 10 μ m δεν διεισδύουν βαθιά μέσα στο αναπνευστικό σύστημα. Αυτά αναχαιτίζονται από τα ρινικά τριχίδια ή κατακάθονται στις βλεννογόνους μεμβράνες στο προθάλαμο ή στην τραχεία. Μόλις συλληφθούν από αυτές τις μεμβράνες μεταφέρονται στο λάρυγγα δια μέσου των βλεφαριδοφόρων και των κυττάρων βλέννας. Έπειτα θα καταποθούν ή θα αποπτυθούν. Ομοίως τα πολύ μικρά σωματίδια (μικρότερα από 0,1 μ m) που εναποτίθενται στο τραχειοβρογχικό δένδρο απομακρύνονται με τον ίδιο τρόπο. Τα σωματίδια με εύρος 0,1 μ m έως 10 μ m διεισδύουν βαθιά μέσα στους πνεύμονες και εναποτίθενται στους βρόγχους και στην κυψελιδική περιοχή. Τα τελευταία είναι υπεύθυνα για τις αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία (Cooper & Alley 2004).

Οι μηχανισμοί με τους οποίους εναποτίθενται τα σωματίδια στις επιφάνειες του αναπνευστικού είναι η βαρηρική καθίζηση, η διάχυση και η πρόσκρουση. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την εναπόθεση στο αναπνευστικό σχετίζονται με το μέγεθος των σωματιδίων, το κύκλο της αναπνοής, τη πυκνότητα των σωματιδίων και την ταχύτητα του αέρα. Αναλυτικότερα τα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 0,1 μ m εναποτίθενται λόγω της διάχυσης, αυτά με μέγεθος διαμέτρου από 0,1 μ m έως 1 μ m διαμέσου της συνδυασμένης δράσης της βαρύτητας και της διάχυσης ενώ αυτά με μέγεθος διαμέτρου μεγαλύτερη από 1 μ m εναποτίθενται λόγω της βαρύτητας και της πρόσκρουσης. Επίσης, καθώς αυξάνει ο κύκλος της αναπνοής αυξάνει και η εναπόθεση λόγω της διάχυσης και της βαρύτητας. Με την αύξηση της πυκνότητας των σωματιδίων και της ταχύτητας του αέρα έχουμε αύξηση της εναπόθεσης λόγω της πρόσκρουσης.



Εικόνα 10: Η συνεισφορά των μηχανισμών εναπόθεσης των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα σε σχέση με τη διάμετρο τους (Heyder 2004).

Ακόμα, αν θεωρήσουμε ότι όλα τα σωματίδια που εισέρχονται σε μία μόνο αναπνοή είναι πανομοιότυπα, η πιθανότητα να κατακρατηθούν στο αναπνευστικό σύστημα είναι διαφορετική για το κάθε ένα. Αυτό συμβαίνει διότι ο όγκος του αέρα που βρίσκονται και εισέρχεται μέσω της εισπνοής διαχωρίζεται στα τμήματα του αναπνευστικού και διεισδύει σε διαφορετικά βάθη. Η εναπόθεση στην εκτός θώρακα περιοχή και στην άνω τραχειοβρογχική περιοχή, όπου ο αέρας έχει μεγάλες ταχύτητες, είναι αποτέλεσμα κυρίως της πρόσκρουσης. Στην κάτω τραχειοβρογχική περιοχή και στις κυψελίδες, όπου ο χρόνος παραμονής του αέρα είναι μεγαλύτερος, η βαρητική καθίζηση αναλαμβάνει το κύριο ρόλο της εναπόθεσης (Heyder 2004; Heyder & Gebhart 1985).

Η απομάκρυνση των σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι οι φυσικές ιδιότητες των σωματιδίων που εισέρχονται στον οργανισμό, ο χρόνος έκθεσης του ατόμου, η περιοχή εναπόθεσης τους και η φυσιολογία του αναπνευστικού. Η απομάκρυνση περιλαμβάνει φυσικούς μηχανισμούς μεταφοράς των σωματιδίων στο αίμα, το γαστρεντερικό σύστημα, του λεμφαδένες και έπειτα ολόκληρο τον οργανισμό. Εάν τα σωματίδια είναι διαλυτά στα υγρά του σώματος τότε αυτά θα εισχωρήσουν στο αίμα, εάν πάλι όχι θα εισχωρήσουν στο γαστρεντερικό σωλήνα. Για την εύρεση της απομάκρυνσης των σωματιδίων έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι αλλά διαφέρουν προς την αξιοπιστία τους. Ουσιαστικά βασίζονται στη μέτρηση των εναπομεινάντων σωματιδίων στο αναπνευστικό με φυσικούς ή χημικούς τρόπους (Ferin 1993; Heyder & Gebhart 1985).

Όσο αφορά την απομάκρυνση των σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα οι μελέτες που έχουν διαξευχθεί είναι σχετικά λιγότερες σε σχέση με αυτές την εναπόθεσης τους στο αναπνευστικό. Η μελέτη απομάκρυνσης των λεπτών σωματιδίων ($PM_{2.5}$) τα τελευταία χρόνια κυρίως περιορίζεται σε περιπτώσεις ατόμων με χρόνια πνευμονοπάθεια ή σε καπνιστές. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι συγκρίσεις που υπάρχουν με υγιή και μη καπνίζοντες, καθώς οι πρώτοι παρουσιάζουν στο πλείστον των περιπτώσεων μεγαλύτερη κατακράτηση των σωματιδίων στους πνεύμονες από ότι οι δεύτεροι (Moller & Felten 2008; Brown, Zeman & Bennett 2002).

3.4 Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία

Ο αριθμός των επιδημιολογικών μελετών που έχουν εκπονηθεί για την ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων των σωματιδίων στην ανθρώπινη υγεία είναι μεγάλος. Παρόλα αυτά, είναι δύσκολο να γίνει εξακρίβωση των τελικών επιπτώσεων αφού στις περισσότερες μελέτες υπάρχει παρουσία και άλλων ρύπων μαζί με τα αιωρούμενα σωματίδια. Πολλές συσχετίσεις έχουν γίνει μεταξύ του κλάσματος των σωματιδίων (χονδρά προς λεπτά) και το είδος των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία με το αποτέλεσμα να είναι ότι όσο μειώνεται τόσο πιο σοβαρές να είναι οι επιπτώσεις (Schwartz 1996; Diociaiuti 2001). Γενικότερα, τα λεπτά σωματίδια εναποτίθενται πιο βαθιά και με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στο κατώτερο αναπνευστικό σε σχέση με τα μεγαλύτερα σωματίδια για αυτό και έχουν συνδεθεί περισσότερο με τις επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Σύμφωνα με έρευνες που έχουν γίνει ενήλικες και παιδιά με ιστορικό άσθματος υπέδειξαν περισσότερη ευαισθησία σε σωματίδια με μέγεθος $PM_{2.5}$ (Peters 1997).

Αναλυτικότερα, μελέτες έχουν συνδέσει την πρόσληψη των σωματιδίων με την καταστροφή των επιθηλιακών κυττάρων σε λιγότερο από μία ώρα έκθεσης και την εμφάνιση πνευμονικού οιδήματος (Ferlin 1994; Churg 1996). Επίσης μείωση της λειτουργίας του αναπνευστικού, αύξηση της ευαισθησίας των αεραγωγών, φλεγμονές στους πνεύμονες, άσθμα, βρογχίτιδα, εμφύσημα βήχας, αυξημένη ρινική καταρροή συσχετίστηκαν από πολλές μελέτες με αυξημένες συγκεντρώσεις $PM_{2.5}$ (Edwards 1994; Gio & Devli 2001; Samet 2009). Όσο αφορά ειδικά βαριές ασθένειες του αναπνευστικού, όπως τη βρογχίτιδα και το άσθμα, πέρα από τα πολύ υψηλά επίπεδα των σωματιδίων μετρήθηκαν υψηλές συγκεντρώσεις και άλλων ρύπων όπως SO_2 , πράγμα που υποδεικνύει ότι δεν οφείλονται αποκλειστικά στα αιωρούμενα σωματίδια (Stone 2000).

Παράλληλα, παρατηρήθηκε αυξημένη θνησιμότητα στα άτομα τα οποία έπασχαν από καρδιακές νόσους και εκτίθονταν σε υψηλές συγκεντρώσεις λεπτών σωματιδίων, λόγω της αυξημένης συγκέντρωσης τους στο αίμα που είχε σαν αποτέλεσμα τη πήξη του (Ceaton & Macnee 1995). Ακόμα, η πρόσληψη τους έχει συνδεθεί με επιδείνωση της μυοκαρδιακής βλάβης (Cozzi 2003) και με εμφάνιση ταχυκαρδίας από άτομα που είχαν στεφανιαία νόσο (Berger 2006). Μελέτες έχουν δείξει ότι μπορούν να μεταφερθούν στον εγκέφαλο, όπως επίσης έχουν προκύψει περιπτώσεις με αγγειακά εγκεφαλικά νοσήματα οι οποίες συνδέονται με έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις $PM_{2.5}$ (Oberdorster 2004; Chan 2006).

Όσο αφορά την ύπαρξη νοσημάτων και κυρίως του άσθματος στα παιδιά (η πιο συνηθισμένη χρόνια ασθένεια σε αυτήν την ηλικία), έχει εκπονηθεί ένα πλήθος μελετών που εμφανίζει συνδυαστικά στοιχεία. Στις ανεπτυγμένες χώρες παρατηρείται αύξηση των κρουσμάτων άσθματος και βρογχίτιδας στις ηλικίες μέχρι 14 ετών. Παρά το καθοριστικό ρόλο των γενετικών προδιαγραφών για την εμφάνιση του άσθματος, τέτοια αύξηση δεν μπορεί να δικαιολογηθεί. Οι αιτίες βρίσκονται στην αύξηση της έκθεσης των αιωρούμενων σωματιδίων που μπορεί να προέρχονται από το κάπνισμα των γονέων, τη χρήση εντομοκτόνων, την οικιακή σκόνη και τις αυξημένες εκπομπές στα αστικά κέντρα. (Brauer 2002; Edwards 1994; Gehring 2010).

Η εμφάνιση των παραπάνω συμπτωμάτων στον ανθρώπινο οργανισμό εξαρτάται από ένα σύνολο παραγόντων. Ένας από τους κυριότερους είναι η διάρκεια στην έκθεση. Τα άτομα που ζουν μέσα σε μεγάλες πόλεις στις οποίες υπάρχει πολύ κίνηση παρουσιάζουν μεγαλύτερη έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια σε σχέση με εκείνα που ζούνε σε αγροτικές περιοχές (πίνακας 2). Επίσης, η σύσταση των σωματιδίων (χονδρά – λεπτά) είναι διαφορετική σε κάθε περιοχή. Ακόμα, τα άτομα που καπνίζουν συστηματικά και αυτά που βρίσκονται στο ίδιο περιβάλλον με τα πρώτα παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στα εισερχόμενα σωματίδια, όπως και τα άτομα που εργάζονται σε βιομηχανίες με υψηλές συγκεντρώσεις σωματιδίων. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την εμφάνιση ασθενειών είναι η ανατομία του αναπνευστικού σε κάθε άνθρωπο, η γενετική προδιάθεση, η φυσική του κατάσταση και η ύπαρξη ιστορικού νοσημάτων (Stone 2000).

Τέλος, γίνεται αντιληπτό από τις παραπάνω επιδημιολογικές μελέτες ότι η επίδραση των PM_{10} , σε υγιή και φυσιολογικά άτομα δεν είναι καταστρεπτική. Παρόλα αυτά υπάρχουν ευπαθείς ομάδες που διατρέχουν μεγαλύτερο κίνδυνο όπως και τα παιδιά των οποίων το αναπνευστικό σύστημα βρίσκεται σε περίοδο πλάσης και η έκθεση τους σε υψηλές συγκεντρώσεις μπορούν να αποβούν καταστρεπτικές.

	PM₁₀ (μg/m³)	PM_{2.5} (μg/m³)
Απομακρυσμένες περιοχές	8 (3-35)	5 (2-22)
Αγροτικές περιοχές	15 (8-32)	10 (5-29)
Περιοχές κοντά με αστική περιοχή	25 (22-50)	20 (12-32)
Περιοχές με αστικό υπόβαθρο	30 (19-72)	22 (11-62)
Αστικά κέντρα	40 (28-76)	26 (17-50)

Πίνακας 3: Τυπικές τιμές συγκέντρωσης ΑΣ στην Ευρώπη (Pataud, Dingenen & Baltenspeger 2003).

3.5 Το μοντέλο καθορισμού δόσης και εναπόθεσης ExDom

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλά μαθηματικά μοντέλα για τον υπολογισμό της έκθεσης του ανθρώπου από την ρύπανση του αέρα. Στόχος τους είναι η πρόβλεψη της εναπόθεσης των σωματιδίων στα διάφορα μέρη του αναπνευστικού. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες, τα στατιστικά/ημιεμπειρικά και στα μηχανιστικά, ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού του ποσοστού εναπόθεσης σωματιδίων σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος.

Στα στατιστικά/ημιεμπειρικά μοντέλα το ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα θεωρείται πως αποτελείται από διακριτές περιοχές, κάθε μια από τις οποίες δρα σαν φίλτρο στα σωματίδια που τη διαρρέουν με το ρεύμα του εισπνεόμενου και εκπνεόμενου αέρα. Η διαδικασία της εναπόθεσης αντιμετωπίζεται στατικά και η απόδοση κάθε φίλτρου υπολογίζεται από εξισώσεις που προέρχονται από καμπύλες προσέγγισης πειραματικών δεδομένων. Εφόσον ο υπολογισμός αυτός βασίζεται κυρίως σε ημιεμπειρικές εξισώσεις, έχει μια περιορισμένη δυνατότητα εφαρμογής σε περιπτώσεις οι οποίες περιλαμβάνονται στις βάσεις δεδομένων από τις οποίες προήλθαν αυτές οι εξισώσεις. Παρόλα αυτά, οι εκτιμήσεις που γίνονται για τις περιπτώσεις όπου τα σωματίδια διατηρούν τη σύνθεση και το μέγεθος τους κατά τη διάρκεια του υπολογισμού, χαρακτηρίζονται από μεγάλη ακρίβεια. Το πιο ευρέως διαδεδομένο και χρησιμοποιούμενο ημιεμπειρικό μοντέλο είναι το Μοντέλο του Ανθρώπινου Αναπνευστικού Συστήματος (Human Respiratory Tract model - HRTM) της διεθνούς υπηρεσίας ακτινοπροστασίας (International Committee on Radiological Protection - ICRP).

Τα μηχανιστικά μοντέλα προσομοιώνουν κάθε μηχανισμό εναπόθεσης σωματιδίων χωριστά και επιλύουν εξισώσεις μεταφοράς σωματιδίων για τον

προσδιορισμό της εναποτιθέμενης δόσης. Αν και η δυναμική των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα καθορίζονται από πολλούς μηχανισμούς όπως η βαρητική καθίζηση, καθίζηση λόγω διάχυσης, ανάσχεση και ενσφήνωση, πρόσκρουση, συσσωμάτωση, συμπύκνωση κ.α. τα μοντέλα αυτά δεν λαμβάνουν υπόψη όλους τους παραπάνω μηχανισμούς στον υπολογισμό της εναπόθεσης των σωματιδίων. Το σημαντικότερο μειονέκτημα τους για την πρακτική εφαρμογή τους είναι πως δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνθήκες μεταβαλλόμενης συγκέντρωσης έκθεσης ή παραμέτρων φυσιολογίας.

Για τον υπολογισμό της εναπόθεσης στο αναπνευστικό σύστημα με το μοντέλο ExDom χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός θεωρητικών και ημιεμπειρικών εξισώσεων, ενώ ο καθαρισμός των σωματιδίων γίνεται με τη προσέγγιση των Gradon (1996). Το πρόγραμμα έχει αναπτυχθεί στη γλώσσα προγραμματισμού Fortran 90 και λειτουργεί σε περιβάλλον Windows σε command prompt (απαιτήσεις: το ελάχιστο 5MB αποθηκευτικού χώρου για τα αρχεία εξόδου). Συστήνεται η χρήση του σε υπολογιστή με γρήγορη CPU και μνήμη Ram για ταχύτερη εξαγωγή των αποτελεσμάτων της εσωτερικής δόσης (Αλεξανδροπούλου & Λαζαρίδης 2010).

Πιο συγκεκριμένα, το ExDom είναι ένα μοντέλο υπολογισμού της δόσης και της κατανομής των αιωρούμενων σωματιδίων μετά την έκθεση, στο ανθρώπινο σύστημα. Ουσιαστικά το μοντέλο υπολογίζει κάτω από συνθήκες συνεχούς έκθεσης το κλάσμα των σωματιδίων, τη δόση τους στα διάφορα μέρη του αναπνευστικού συστήματος, την ποσότητα που παραμένουν μετά την έκθεση του αντικειμένου και τέλος την απομάκρυνση τους στο γαστρεντερικό σωλήνα, τους λεμφαδένες και την απορρόφηση στο αίμα.

Για τον υπολογισμό των παραπάνω χρειάζεται να εισάγουμε στο μοντέλο κάποια δεδομένα. Αυτά αφορούν τις συνθήκες έκθεσης και τα χαρακτηριστικά του ατόμου. Πιο συγκεκριμένα, εισάγουμε τις συγκεντρώσεις έκθεσης, το χρόνο και το είδος της δραστηριότητας που υποβάλλεται σε κάθε χρονική στιγμή (ήπια, κουραστική), την ταχύτητα του ανέμου, το γένος, την ηλικία και τον τρόπο εισπνοής. Ακόμα, εισάγουμε πληροφορίες για φυσικά χαρακτηριστικά των σωματιδίων, όπως το κλάσμα των PM_{10} και $PM_{2.5}$, το σχήμα τους, τη πυκνότητα τους και τη κατανομή της μάζας τους ως προς τη διάμετρο τους. Τα παραπάνω δεδομένα είτε τα έχουμε τοποθετήσει ήδη σε ξεχωριστά αρχεία τύπου notebook με μορφή πινάκων, είτε τα εισάγουμε κατά τη ροή της εκτέλεσης του μοντέλου. Ουσιαστικά το μοντέλο λειτουργεί διαδραστικά. Έτσι, κατά τη λειτουργία του προγράμματος καλούμαστε να επιλέξουμε από προκαθορισμένες τιμές παραμέτρων τις επιθυμητές. Τα αποτελέσματα του μοντέλου αποθηκεύονται σε αρχεία τύπου notebook με τη μορφή πινάκων και περιέχουν τη δόση των σωματιδίων ξεχωριστά σε κάθε

σημείο του αναπνευστικού και την περαιτέρω απομάκρυνση τους στο υπόλοιπο ανθρώπινο σώμα. Παρακάτω παραθέτουμε το πίνακα εισαγωγής και εξαγωγής πληροφοριών.

Δεδομένα εισόδου	Αποτελέσματα
Συγκέντρωση έκθεσης Χαρακτηριστικά ΑΣ • Φυσικά (χαρακτηριστικά της κατανομής μεγέθους, σχήμα, πυκνότητα) • Χημικά (σύσταση) χαρακτηριστικά Προφίλ δραστηριοτήτων: διαχείριση του χρόνου και χρήσιμες πληροφορίες (ο χρόνος που ξοδεύτηκε σε διαφορετικά περιβάλλοντα για διαφορετικές). Χαρακτηριστικά εκτιθέμενου αντικειμένου • Παράμετροι φυσιολογίας του αναπνευστικού. • Επίπεδο άσκησης για διαφορετικές δραστηριότητες και περιβάλλοντα (κατηγοριοποιημένο ως ήπια εργασία, βαριά εργασία, ξεκούραση, ύπνος ή καθορισμένο αλλιώς από το χρήστη). • Άλλα: τρόπος εισπνοής, γένος, ηλικία	Έκθεση Δόση • Τοπικό και ολικό κλάσμα εναπόθεσης των εισπνεόμενων σωματιδίων. • Προφίλ εφαρμοσμένης τοπικής δόσης κατά τη διάρκεια της έκθεσης. Κατακράτηση (κατά τη διάρκεια της έκθεσης και μετά το τέλος αυτής) • Κατακράτηση της σωματιδιακής μάζας στην εκτός θώρακα, τραχειοβρογχική και κυψελιδική περιοχή και μεταφορά τους στο γαστρεντερικό σωλήνα και το αίμα • Συσχέτιση της κατακράτησης, στις παραπάνω περιοχές.

Πίνακας 4: Δεδομένα εισόδου και αποτέλεσμα του ExDom (Αλεξανδροπούλου & Λαζαρίδης 2010).

4. ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ

Σύμφωνα με την US EPA υπάρχουν δύο κατηγορίες όπου χωρίζονται τα πρότυπα ποιότητας αέρα. Τα πρωταρχικά πρότυπα για την προστασία της δημόσιας υγείας και τα δευτερογενή πρότυπα για την προστασία του κοινού από δυσμενείς επιπτώσεις του περιβάλλοντος. Τα πρωταρχικά πρότυπα απαιτείται να είναι αρκετά αυστηρά με επαρκές περιθώριο ασφάλειας για την προστασία της υγείας των ανθρώπων που ανήκουν στις ευπαθείς ομάδες και παρουσιάζουν μεγαλύτερο κίνδυνο στην έκθεση των σωματιδίων. Οι ευπαθείς ομάδες περιλαμβάνουν άτομα με καρδιακή ή πνευμονική νόσο, παιδιά και ηλικιωμένους. Τα δευτερογενή πρότυπα πρέπει να συντελούν στην ευημερία των πολιτών και να αποτρέπουν ανεπιθύμητες καταστάσεις.

Το 1971 η US EPA προχώρησε στην καθιέρωση των εθνικών προτύπων ποιότητας (NAAQS) των Η.Π.Α. Η μέθοδος προσδιορισμού των σωματιδίων γινόταν με έναν υψηλού όγκου δειγματολήπτη που μπορούσε να συλλέξει αιωρούμενα σωματίδια από 25 μm έως 45 μm . Τα πρωταρχικά πρότυπα που τέθηκαν τότε ήταν ο μέσος όρος τους 24ωρου να μην υπερβαίνει τα 260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (TSP) για πάνω από μία φορά ανά έτος. Αργότερα το 1979 έγινε η πρώτη αναθεώρηση (και ολοκληρώθηκε το 1987) στην οποία συμπεριλήφθηκαν τα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 10 μm (PM₁₀) και τέθηκαν ως όρια ο μέσος όρος του έτους για τα PM₁₀ να μην υπερβαίνει τα 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ για πάνω από μία φορά για τρία συνεχόμενα έτη, ενώ ο ημερήσιος μέσος όρος των PM₁₀ να μην υπερβεί τα 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ για πάνω από τρεις φορές σε τρία συνεχόμενα έτη.

Το 1994 έγινε η δεύτερη επανεξέταση του πίνακα NAAQS με σημαντικές επιθεωρήσεις οι οποίες επικυρώθηκαν το 1997. Μία από τις αλλαγές ήταν η εισαγωγή του δείκτη PM_{2.5} για τα λεπτά σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 2,5 μm . Ακόμα, θεσπίστηκαν όρια με βάση τα οποία ο ετήσιος αριθμητικός μέσος των 24-ώρων μετρήσεων από έναν ή περισσότερους σταθμούς σε οικιστικές περιοχές δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ενώ το 98^ο εκατομμυριοστό του συνόλου των 24-ώρων μετρήσεων από κάθε δειγματολήπτη μιας συγκεκριμένης περιοχής δεν πρέπει να υπερβεί τα 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ περισσότερο από τρεις φορές σε τρία συνεχόμενα έτη. Παράλληλα οι μέσοι όροι που είχαν θεσπιστεί για τα PM₁₀ διατηρήθηκαν.

Τα τελικά όρια που ισχύουν μέχρι και σήμερα θεσπίστηκαν το 2006 με την 24-ωρη επιτρεπτή τιμή πλέον να φτάνει τα 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ για τα PM_{2.5} σε σχέση με τα 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ που ίσχυαν και με την ετήσια επιτρεπτή τιμή να παραμένει στα 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Οι τιμές για τα PM₁₀ είναι ίδιες με αυτές που θεσπίστηκαν στο 1987

με την 24-ωρη επιτρεπτή τιμή να φτάνει τα 150μg/m³ ενώ η ετήσια να είναι 50μg/m³.

Σωματιδιακό κλάσμα	Διάρκεια	Οριακή τιμή 1987	Επεξήγηση
PM ₁₀	Χρόνος	50μg/m ³	Να μην υπερβεί για πάνω από μία φορά σε ένα έτος για τρία συνεχόμενα έτη.
	24ωρη	150μg/m ³	Να μην υπερβεί για πάνω από τρεις φορές μέσα σε τρία συνεχόμενα έτη.
PM _{2.5}	Χρόνος	-	
	24ωρη	-	
Σωματιδιακό κλάσμα	Διάρκεια	Οριακή τιμή 1997	Επεξήγηση
PM ₁₀	Χρόνος	50μg/m ³	Να μην υπερβεί για πάνω από μία φορά σε ένα έτος για τρία συνεχόμενα έτη.
	24ωρη	150μg/m ³	Να μην υπερβεί για πάνω από τρεις φορές μέσα σε τρία συνεχόμενα έτη.
PM _{2.5}	Χρόνος	15μg/m ³	Ο ετήσιος αριθμητικός μέσος των 24-ώρων μετρήσεων από έναν ή περισσότερους σταθμούς σε οικιστικές περιοχές δεν πρέπει να υπερβαίνει την οριακή τιμή.
	24ωρη	65μg/m ³	Το 98 ^ο εκατομμυριοστό του συνόλου των 24-ώρων μετρήσεων από κάθε δειγματολήπτη μιας συγκεκριμένης περιοχής δεν πρέπει να υπερβεί την οριακή τιμή περισσότερο από τρεις φορές σε τρία συνεχόμενα έτη.
Σωματιδιακό κλάσμα	Διάρκεια	Οριακή τιμή 2006	Επεξήγηση
PM ₁₀	Χρόνος	50μg/m ³	Να μην υπερβεί για πάνω από μία φορά σε ένα έτος για τρία συνεχόμενα έτη.
	24ωρη	150μg/m ³	Να μην υπερβεί για πάνω από τρεις φορές μέσα σε τρία συνεχόμενα έτη.
PM _{2.5}	Χρόνος	15μg/m ³	Ο ετήσιος αριθμητικός μέσος των 24-ώρων μετρήσεων από έναν ή περισσότερους σταθμούς σε οικιστικές περιοχές δεν πρέπει να υπερβαίνει την οριακή τιμή.
	24ωρη	35μg/m ³	Το 98 ^ο εκατομμυριοστό του συνόλου των 24-ώρων μετρήσεων από κάθε δειγματολήπτη μιας συγκεκριμένης περιοχής δεν πρέπει να υπερβεί την οριακή τιμή περισσότερο από τρεις φορές σε τρία συνεχόμενα έτη.

Πίνακας 5: Συγκεντρωτικός πίνακας των θεσπισμένων ορίων κατά US EPA για τα αιωρούμενα σωματίδια (Πηγή US EPA 2013).

Για την προστασία της δημόσια υγείας η ευρωπαϊκή ένωση όρισε κάποια πρότυπα ποιότητας τα οποία υποχρεούνται να υιοθετήσουν όλα τα κράτη μέλη της. Τα πρότυπα αυτά περιλαμβάνουν οδηγίες με το πώς θα πρέπει να παρακολουθηθεί, αξιολογηθεί και διαχειρισθεί η ποιότητα του αέρα. Η ευρωπαϊκή ένωση εξέδωσε την πρώτη οδηγία πλαίσιο το 1999 για την προστασία του αέρα που περιλάμβανε όρια τιμών για τα PM_{10} . Επίσης, εξέδωσε καθαρή οδηγία για την επιβολή μετρήσεων των $PM_{2.5}$ σε όλα τα κράτη μέλη για τη θέσπιση ορίων (1999/30/EC). Η θυγατρική οδηγία περιλάμβανε δύο στάδια για τη συμμόρφωση των κρατών μελών μέσα στα επόμενα έτη.

	Περίοδος αναφοράς για τον υπολογισμό του μέσου όρου	Οριακή τιμή	Περιθώριο ανοχής	Προθεσμία συμμόρφωσης προς την οριακή τιμή
Στάδιο 1				
24ωρη οριακή τιμή	24 ώρες	$50\mu g/m^3$ AS_{10} δεν πρέπει να σημειώνεται υπέρβαση περισσότερες από 35 φορές ανά έτος	50% κατά την έραρξη της παρούσας οδηγίας, μειούμενο από 1/1/2001 μέχρι να φτάσει 0% 1/1/2005	1/1/2005
Ετήσια οριακή τιμή	Ετήσιο	$40\mu g/m^3$ AS_{10}	20% κατά την έραρξη της παρούσας οδηγίας, μειούμενο από 1/1/2001 μέχρι να φτάσει 0% 1/1/2005	1/1/2005
Στάδιο 2				
24ωρη οριακή τιμή	24 ώρες	$50\mu g/m^3$ AS_{10} δεν πρέπει να σημειώνεται υπέρβαση περισσότερες από 7 φορές ανά έτος	Θα υπολογιστεί βάση δεδομένων που θα είναι ισοδυναμικά με την οριακή τιμή του σταδίου 1	1/1/2010
Ετήσια οριακή τιμή	Ετήσιο	$20\mu g/m^3$ AS_{10}	50% κατά την 1/1/2005 μειούμενο μέχρι να φτάσει 0% 1/1/2010	1/1/2010

Πίνακας 6: Θυγατρική οδηγία της ΕΕ προς τα κράτη μέλη (ΥΠΕΚΑ 2002).

Σύμφωνα με τη πιο πρόσφατη οδηγία του 2008 οι τιμές που έχουν θεσπιστεί για τα PM_{10} είναι $50\mu g/m^3$ για μέγιστη 24-ωρη τιμή ενώ η μέγιστη επιτρεπόμενη ετήσια τιμή είναι τα $40\mu g/m^3$. Επίσης, θεσπίστηκαν οι τιμές των $25\mu g/m^3$ για τα $PM_{2.5}$ σε ετήσια βάση ως στόχο των κρατών μελών για τις 1/1/2015 και τα $20\mu g/m^3$ σε ετήσια βάση ως στόχο των κρατών μελών για το 2020 (Air quality in Europe – 2012 report). Τέλος, σύμφωνα με τον παγκόσμιο οργανισμό υγείας (WHO – World Health Organization) οι κατευθυντήριες γραμμές που ορίζει είναι πολύ πιο αυστηρές. Οι τιμές αυτές προκύπτουν από επιδημιολογικές μελέτες που έχουν γίνει παγκοσμίως και σκοπός είναι η θέσπιση ορίων κάτω από τα οποία θα επιτυγχάνεται η εκμηδένιση των κινδύνων της ανθρώπινης υγείας (WHO 2006).

Σωματιδιακό κλάσμα	Διάρκεια	Οριακή τιμή
Ευρωπαϊκή Ένωση		
PM_{10}	Ετήσια	$40\mu g/m^3$
	24-ωρη	$50\mu g/m^3$
$PM_{2.5}$	Ετήσια	$25\mu g/m^3$
	24-ωρη	-
Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας		
PM_{10}	Ετήσια	$20\mu g/m^3$
	24-ωρη	$50\mu g/m^3$
$PM_{2.5}$	Ετήσια	$10\mu g/m^3$
	24-ωρη	$25\mu g/m^3$

Πίνακας 7: Όρια τιμών για ΑΣ σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση και τον παγκόσμιο οργανισμό υγείας.

Όσο αφορά τα όρια των αιωρούμενων σωματιδίων στις βιομηχανίες δεν έχουν θεσπιστεί ξεκάθαρα. Αυτό συμβαίνει διότι ανάλογα με τις εργασίες που επιτελούνται υπάρχει μεγάλη διαφορά στις συγκεντρώσεις των σωματιδίων που συναντώνται. Σύμφωνα με τη διεύθυνση εργασιακής ασφάλειας και υγείας της Αμερικής (Occupational Safety and Health Administration – OSHA), οι εργοδότες είναι υπεύθυνοι για την υγεία των εργαζομένων. Σκοπός του OSHA είναι η εξασφάλιση της ασφάλειας και της υγείας μέσω του καθορισμού πρότυπων ορίων, της εκπαίδευσης και ευαισθητοποίησης. Επίσης ο εργοδότης είναι υποχρεωμένος να αναλαμβάνει όλα τα απαραίτητα μέτρα για την υλοποίηση των παραπάνω. Το όριο που έχει θεσπίσει ο OSHA στις βιομηχανίες για τα PM_{10} είναι τα $150\mu g/m^3$ για μέγιστη 24-ωρη τιμή το οποίο έχει οριοθετηθεί ουσιαστικά από την US EPA (United States department of labor). Το παραπάνω όριο ισχύει αποκλειστικά για τις Η.Π.Α., όμως ούτε για τη

Ελλάδα δεν έχει θεσπιστεί ένα πλαίσιο νόμων στο οποίο θα υποβάλλονται οι βιομηχανίες.

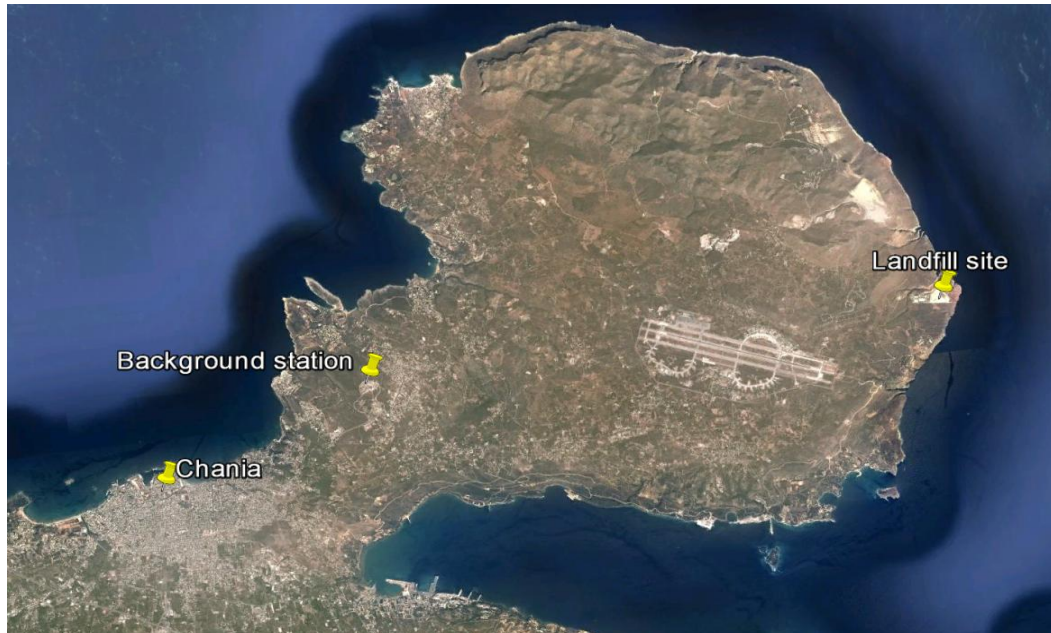
5. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

5.1 Μεθοδολογία πειραματικών μετρήσεων

Πεδίο δειγματοληψίας

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργοστάσιο μηχανική ανακύκλωσης και κομποστοποίησης (Ε.Μ.Α.Κ.) που βρίσκεται στην περιοχή Κορακιά Ακρωτηρίου του νομού Χανίων, δίπλα (νοτίως) της χαράδρας του Κουρουπητού με συνολική έκταση 235,5 στρέμματα. Η θέση της σε σχέση με το πολυτεχνείο και τη πόλη των Χανίων δίνεται στο παρακάτω χάρτη. Η μονάδα αποτελείται από τα εξής τμήματα.

- Είσοδος/αποδοχή απορριμμάτων - Ζυγιστήριο
- Υποδοχή απορριμμάτων
- Μηχανική διαλογή και χειροδιαλογή
- Κομποστοποίηση
- Ραφιναρία, ωρίμανση και αποθήκευση κομπόστ
- Χώρος υγειονομικής ταφής υπολειμμάτων (Χ.Υ.Τ.Υ.)
- Μονάδα τριτοβάθμιας επεξεργασίας στραγγισμάτων



Εικόνα 11: Χάρτης στο οποίο παρουσιάζονται οι θέσεις του Ε.Μ.Α.Κ. (Landfill site), του Πολυτεχνείου (Background station) και της πόλης των Χανίων (Chania).

Το εργοστάσιο διαχειρίζεται από τη ΔΕΔΙΣΑ (Διαδημοτική Επιχείρηση Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων) και εξυπηρετεί 19 δήμους από τους 22 του

συνόλου το νομού με συνολικό πληθυσμό 138.260 κατοίκους, καθώς και τον εποχιακό τουριστικό πληθυσμό. Στο Ε.Μ.Α.Κ. Χανίων καθημερινά εισέρχονται για επεξεργασία 267 (μ.ο. 2008) τόνοι αστικών στερεών αποβλήτων. Κάθε μέρα διαχωρίζονται σε επιμέρους υλικά ανακύκλωσης 44 τόνοι υλικών όπως χαρτί, χαρτόνι, πλαστικά, αλουμίνιο, μέταλλα και γυαλί (ΔΕΔΙΣΑ 2010).

Οι χώροι που επιδέχθηκαν για τις μετρήσεις μας ήταν οι εσωτερικοί χώροι της χειροδιαλογής και της ραφίναρίας. Ουσιαστικά οι εσωτερικοί αυτοί χώροι βρίσκονται εντός ενός μεγάλου κτηρίου με ανοίγματα προς αυτό. Όσο αφορά τον πρώτο πρόκειται για μία μακρόστενη αίθουσα με διαστάσεις 33m x 12m. Στην αίθουσα αυτή υπάρχουν δύο ταινίες που λειτουργούν κατά τη διάρκεια των δύο βάρδιών. Στην πρώτη ταινία μεταφέρονται ανακυκλώσιμα υλικά προς διαχωρισμό τα οποία ανέρχονται στους 44 τόνους ημερησίως και λειτουργεί από τις 6:30 το πρωί ως τις 21:00 το βράδυ. Υπάρχουν δύο βάρδιες που αποτελούνται από 14 άτομα η κάθε μία (σύνολο 28) και δουλεύουν στον διαχωρισμό των υλικών. Η πρώτη βάρδια ξεκινάει στις 6:30 το πρωί και τελειώνει στις 14:30 το μεσημέρι με ένα διάλλειμα μισής ώρας περίπου 9:30 με 10:00. Η δεύτερη βάρδια ξεκινάει στις 14:30 το μεσημέρι και τελειώνει στις 21:30 το βράδυ με ένα διάλλειμα μισής ώρας στις 17:30. Στο διάστημα 21:00 με 21:30 γίνεται καθαρισμός του χώρου της χειροδιαλογής. Στην δεύτερη ταινία που αναφέρθηκε γίνεται μεταφορά του σύμμικτο υλικού των αποβλήτων (περίπου 100 τόνοι ημερησίως) από τις 6:30 έως τις 11:00. Σε αυτή την ταινία απασχολείται ένας εργάτης και μετά τις 11:00 μεταβαίνει στη πρώτη ταινία της χειροδιαλογής.

Όσο αφορά τη ραφίναρία πρόκειται για το στάδιο στο οποίο οδηγείται το παραγόμενο κομπόστ. Το ραφινάρισμα αποσκοπεί στο διαχωρισμό του κομπόστ από ξένες προσμίξεις ,κυρίως γυαλί ,σκληρά πλαστικά, χαλίκια, και οργανικά που ελαττώνουν την εμπορική του αξία. Ο διαχωρισμός των υλικών γίνεται βάσει του μεγέθους και ακολουθεί περαιτέρω εξευγενισμός για την επίτευξη υψηλής ποιότητας. Στον εσωτερικό χώρο της ραφίναρίας εργάζονται δύο άτομα σε κάθε βάρδια (σύνολο 4) και τα ωράρια που ακολουθούν είναι ίδια με αυτά με της χειροδιαλογής. Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι επειδή δεν επιτρέπεται η πρόσβαση μέσα στη ραφίναρία οι μετρήσεις έχουν γίνει έξω ακριβώς από το χώρο.

Η μελέτη των χώρων αυτών στη εργασία μας έγινε διότι αποτελούν τα στάδια στα οποία εργάζονται ως σύνολο τα περισσότερα άτομα, 32 σύνολο (28 χειροδιαλογή και 4 ραφίναρία). Στις δύο αίθουσες ακόμα υπάρχουν πολλά ανοίγματα τα οποία συντελούν στο φυσικό αερισμό τους και στη χειροδιαλογή υπάρχει σύστημα εξαερισμού. Οι μετρήσεις που έγιναν στη ραφίναρία αφορούν το διάστημα του Ιανουαρίου 2011, ενώ στη χειροδιαλογή τον Ιούλιο του 2010, το Μάρτιο και τον Απρίλιο του 2012. Τέλος έγιναν μετρήσεις σε

οικία, η οποία βρίσκεται εντός της πόλης των Χανίων, ώστε να διαθέτουμε δεδομένα καθ' όλη της διάρκειας της ημέρας για την χρήση τους στο μοντέλο ExDom και τον προσδιορισμό της ανθρώπινης έκθεσης.

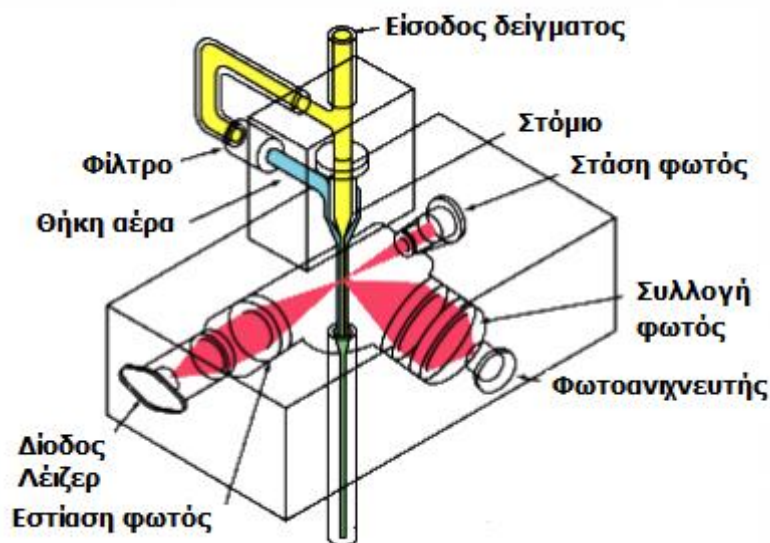


Εικόνα 12: Φωτογραφία από τη αίθουσα της χειροδιαλογής.

Όργανα πειραματικών μετρήσεων - DustTrack

Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για τη πραγματοποίηση των μετρήσεων είναι το DustTrack Aerosol Monitor Model 8520, το οποίο χρησιμοποιεί την σκέδαση του φωτός για να προσδιορίσει τη συγκέντρωση των σωματιδίων σε πραγματικό χρόνο. Το δείγμα του αέρα εισέρχεται μέσα στον αισθητήρα θαλάμου με συνεχή ροή, όπου ένα τμήμα του φωτίζεται με μία μικρή δέσμη λέιζερ. Τα σωματίδια που βρίσκονται σε αυτό το τμήμα του αέρα σκεδάζουν το κύμα του φωτός που προσπίπτει πάνω τους σε όλες τις κατευθύνσεις. Τότε με τη βοήθεια ενός φακού που είναι τοποθετημένος σε συγκεκριμένη γωνία συλλέγει το φως που σκεδάζεται και έπειτα το κύκλωμα το μετατρέπει σε τάση. Η τάση αυτή είναι ανάλογη προς τη ποσότητα του φωτός που σκεδάστηκε η οποία με τη σειρά της είναι ανάλογη με τη συγκέντρωση της μάζας του ΑΣ στο ρεύμα αέρα. Η παραπάνω τάση αναγνωρίζεται από τον επεξεργαστή και πολλαπλασιάζεται με μια εσωτερική σταθερά βαθμονόμησης για να δώσει τη συγκέντρωση της μάζας.

Αναλυτικότερα, η σκέδαση του φωτός έχει γραμμική σχέση με τη συγκέντρωση της μάζας των σωματιδίων. Δηλαδή ένα σωματίδιο σκεδάζει μία σταθερή ποσότητα του φωτός και η σκέδαση αυτή εξαρτάται από το μέγεθος του. Το γεγονός αυτό όμως παύει να ισχύει για σωματίδια με μέγεθος διαμέτρου 0,25μm και η σκέδαση του φωτός μειώνεται με ταχύτερο ρυθμό με την αύξηση της διαμέτρου. Το μήκος κύματος λέιζερ που χρησιμοποιεί το DustTrack βρίσκεται στα 780 νανόμετρα το οποίο του δίνει τη δυνατότητα να ανιχνεύει μέχρι και σωματίδια διαμέτρου 0,1μm.



Εικόνα 13: Σχηματικό διάγραμμα του φωτομέτρου DustTrack (TSI 2012).

Το DustTrack διαθέτει εύρος μέτρησης της συγκέντρωσης 0,001-100mg/m³ και το εύρος μεγέθους των σωματιδίων που μετράει είναι 0,1-10μm.

Λειτουργία του οργάνου

ON/OFF Key

Με την ενεργοποίηση του οργάνου ξεκινάει ο αυτοέλεγχος του οργάνου. Σε περίπτωση που εντοπιστεί κάποιο πρόβλημα η οθόνη εμφανίζει το μήνυμα SERVICE μαζί με έναν αριθμό που υποδεικνύει ποιο ακριβώς είναι το πρόβλημα. Αφού ολοκληρωθεί ο έλεγχος, ο επεξεργαστής υπολογίζει της διάρκεια ζωής της μπαταρίας που απομένει στην περίπτωση που δεν είναι συνδεδεμένο με ρεύμα. Έπειτα αφού ολοκληρωθούν τα παραπάνω, το όργανο βρίσκεται στη λειτουργία Survey.

Time Constant Key

Μετά τον προκαθορισμένο έλεγχο ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ρυθμίσει τη χρονική σταθερά του οργάνου. Αρχικά, εμφανίζεται η χρονική σταθερά και

έπειτα μπορεί να τη μεταβάλει. Οι διαθέσιμες τιμές της χρονικής σταθεράς είναι 1, 5, 10, 15 και 30 δευτερόλεπτα. Η τιμή που εμφανίζεται στην οθόνη του οργάνου ανανεώνεται κάθε ένα δευτερόλεπτο και ουσιαστικά εκφράζει τη μέση τιμή για τη χρονική σταθερά που έχουμε θέσει.

Sampling Mode Key

Στη συνέχεια, ο χρήστης καλείται να επιλέξει έναν από τους τέσσερις τρόπους δειγματοληψίας (Survey, LOG 1, LOG 2, LOG 3). Όταν η επιλεγμένη λειτουργία είναι μία από τις 3 τελευταίες, εμφανίζονται ταυτόχρονα, όση ώρα γίνεται η μέτρηση, η επιλογή της λειτουργίας και το ποσοστό της ελεύθερης μνήμης για τη συγκεκριμένη λειτουργία.

Logging Interval Key

Προχωρώντας στην διαδικασία απαιτείται η ρύθμιση της συχνότητας καταγραφής των μετρήσεων για τη λειτουργία που έχει επιλεγθεί προηγουμένως. Οι διαθέσιμες τιμές καταγραφής των μετρήσεων είναι 1 δευτερόλεπτο, 1 λεπτό, 5 λεπτά, 15 λεπτά και 30 λεπτά.

Sample Key

Τέλος, το όργανο είναι σε θέση να αρχίσει την καταγραφή των δεδομένων. Μετά το πέρας των μετρήσεων εμφανίζονται στην οθόνη στατιστικά στοιχεία όπως είναι ο μέσος όρος, η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή που μετρήθηκαν.

Τεχνικές Προδιαγραφές

Τύπος αισθητήρα	Σκέδαση φωτός στις 90°, δίοδος λαιζερ
Εύρος μετρήσεων	0,001-100mg/m ₃
Ανάλυση	±0,1%
Σταθερότητα μηδενισμού	±0,001mg/m ³ για 24 ώρες χρησιμοποιώντας χρονική σταθερά 10sec
Εύρος σωματιδίων	0,1-10μm
Εύρος παροχής αέρα	1,4-2,4L/min
Συντελεστής θερμοκρασίας	+0,001mg/m ³ /°C
Εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας	0°C έως 50°C
Εύρος χρονικής σταθεράς	1 έως 30 δευτερόλεπτα
Μέγιστος αριθμός δεδομένων	31.000 (21 μέρες μετρήσεων με καταγραφή ανά λεπτό)
Συχνότητα καταγραφής μετρήσεων	1sec έως 30min
Καθαρισμός κεφαλής	Κάθε 350 ώρες στα 1mg/m ³
Καθαρισμός φίλτρων	Κάθε 700 ώρες στα 1mg/m ³

Πίνακας 8: Τεχνικές προδιαγραφές του DustTrack 8520 (TSI 2005).

5.2 Μεθοδολογία υπολογισμού ρυθμών εκπομπής

Για την μελέτη των σωματιδίων του αέρα εσωτερικών χώρων έχουν αναπτυχθεί στη βιβλιογραφία πολλά και διαφορετικά μοντέλα με διαφορετικούς βαθμούς πολυπλοκότητας. Συνήθως αυτά βασίζονται στη μελέτη του ισοζυγίου μάζας δίνοντας περισσότερη έμφαση στα μεγαλύτερα σωματίδια, λόγω του ότι η μάζα τους υπερτερεί κατά πολύ των μικρότερων σωματιδίων.

Στις απλούστερες των περιπτώσεων η ροή του αέρα είναι πολύ απλή και ο εσωτερικός χώρος λειτουργεί σαν ένα δωμάτιο πλήρης ανάμιξης. Σε αυτές τις περιπτώσεις η εξίσωση ισοζυγίου μάζας ονομάζεται μοντέλο κουτιού (box model) και είναι η εξής.

—

Όπου: V = ο όγκος του χώρου, m^3
 Q = ο ρυθμός μεταβολής της συγκέντρωσης του ρύπου στο χώρο
 C_{out} = η συγκέντρωση του ρύπου στον εξωτερικό αέρα, $\mu g/m^3$
 Q_{in} = ο ρυθμός αερισμού, m^3/h
 E = ο ρυθμός εκπομπής των εσωτερικών πηγών, $\mu g/hr$
 C_{in} = η συγκέντρωση του ρύπου στον εσωτερικό αέρα, $\mu g/m^3$
 k = σταθερά απομάκρυνσης, h^{-1}

Πιο αναλυτικά, σύμφωνα με το παραπάνω ισοζύγιο 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 εσωτερικό περιβάλλον και το ρυθμό απομάκρυνσης του λόγω των μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό περιβάλλον.

Το παραπάνω ισοζύγιο μάζας υπάρχει η δυνατότητα να γίνει πιο ρεαλιστικό λαμβάνοντας υπόψη πολλούς από τους μηχανισμούς που αναλύσαμε πιο επάνω. Η εξίσωση στην προκειμένη περίπτωση θα ήταν της μορφής:

—

Όπου: Q_{nat} = ο φυσικός αερισμός μέσω παραθύρων, m^3/h
 Q_{sch} = ο φυσικός αερισμός μέσω των σχισμών πολλαπλασιασμένος με το συντελεστή διείσδυσης P , m^3/h

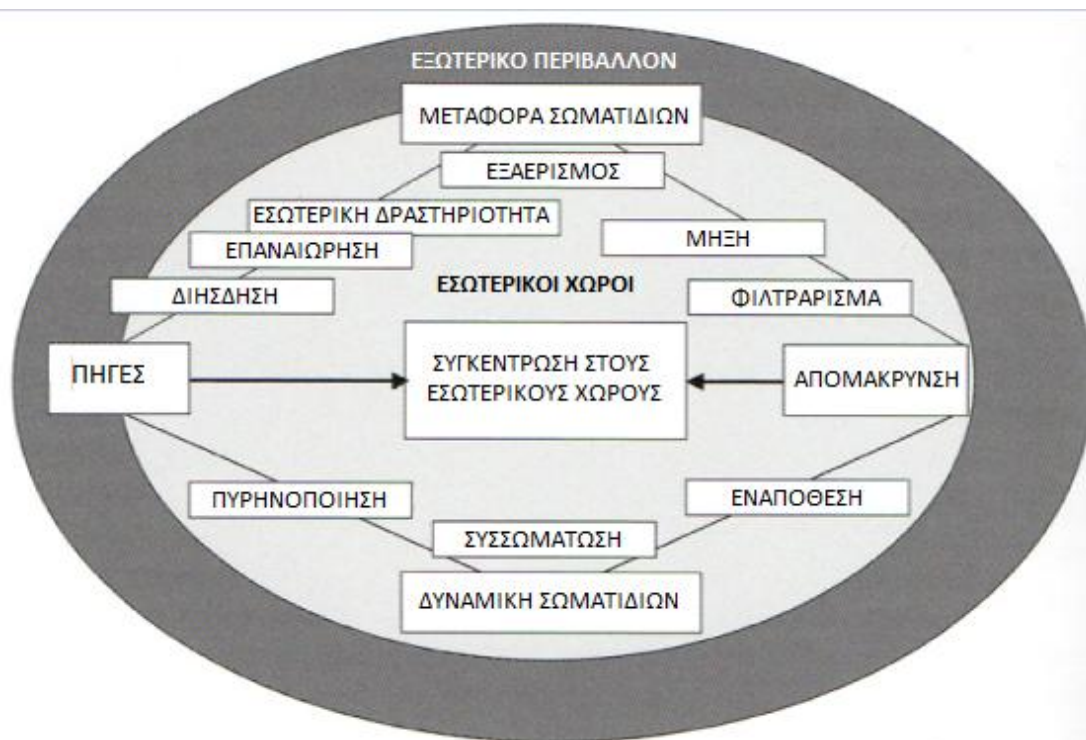
= ο εξαναγκασμένος αερισμός με χρήση φίλτρου όπου κατακρατούν ένα μέρος των σωματιδίων, m^3/h

= η συγκέντρωση του ρύπου στον εξωτερικό αέρα, $\mu\text{g}/\text{m}^3$

= ο ρυθμός εκπομπής των εσωτερικών πηγών στον οποίο περιλαμβάνονται και τα σωματίδια που επαναιωρούνται, $\mu\text{g}/\text{h}$

= η σταθερά απομάκρυνσης η οποία αναφέρεται στη βαρητική καθίζηση και την εναπόθεση των σωματιδίων στις επιφάνειες, h^{-1}

Παρόλα αυτά, το παραπάνω μοντέλο παραμένει απλοποιημένο αν αναλογιστούμε πως σε ένα μεγάλο κτήριο υπάρχουν πολλά χωριστά δωμάτια με διάφορους τρόπους επικοινωνίας, διαφορετικές συγκεντρώσεις και ρυθμούς εκπομπής. Επίσης, δεν λαμβάνονται υπόψη μηχανισμοί όπως η συσσωμάτωση, η συμπύκνωση και η προσρόφηση. Στην εικόνα 14 παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό σχήμα των μηχανισμών που υπόκεινται τα αιωρούμενα σωματίδια (Morawska & Salthammer 2003; Λαζαρίδης 2008; Cooper & Alley 2004).



Εικόνα 14: Σχηματικό διάγραμμα των κύριων μηχανισμών που επηρεάζουν τα αιωρούμενα σωματίδια στους εσωτερικούς χώρους (Morawska & Salthammer 2003).

Στην πραγματικότητα όμως όσο αφορά τις μετρήσεις πεδίου, είναι δύσκολο να ληφθούν υπόψη όλοι οι παραπάνω μηχανισμοί και να τους υπολογιστούν μάλιστα ξεχωριστά για να φανεί η συνεισφορά τους. Για αυτό το λόγο συνήθως προχωράμε σε απλοποιήσεις και σε υποθέσεις οι οποίες δεν θα

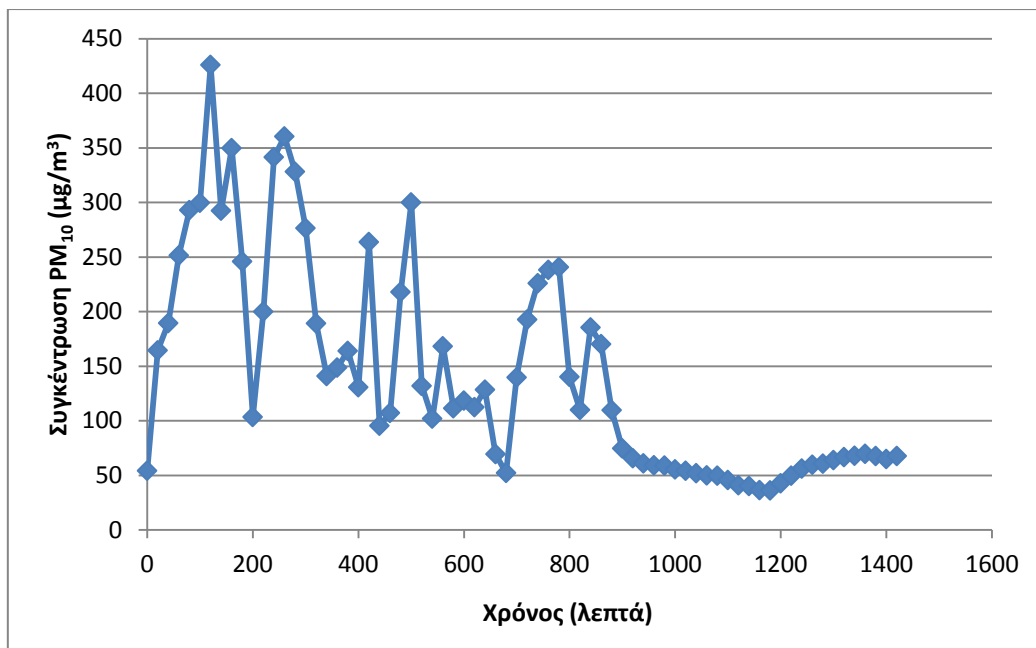
επηρεάσουν τα αποτελέσματα σε μεγάλο βαθμό και θα οδηγήσουν σε ασφαλή και σίγουρα συμπεράσματα.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση όπου οι συγκεντρώσεις εντός του ΧΥΤΑ κυμαίνονταν σε πολύ υψηλά επίπεδα θεωρήθηκε η εισερχόμενη συγκέντρωση των σωματιδίων ίση με μηδέν. Επίσης, ήταν αδύνατο να υπολογιστούν ξεχωριστά τα σωματίδια τα οποία εξέρχονται από το χώρο του ΧΥΤΑ και αυτά που εναποτίθενται στις επιφάνειες λόγω βαρύτητας, για αυτό θεωρήθηκε ένας συντελεστή απομάκρυνσης λ ο οποίος θα περιλαμβάνει και τις δύο διεργασίες. Έτσι διαιρώντας και με τον όγκο του δωματίου καταλήξαμε στην παρακάτω εξίσωση.

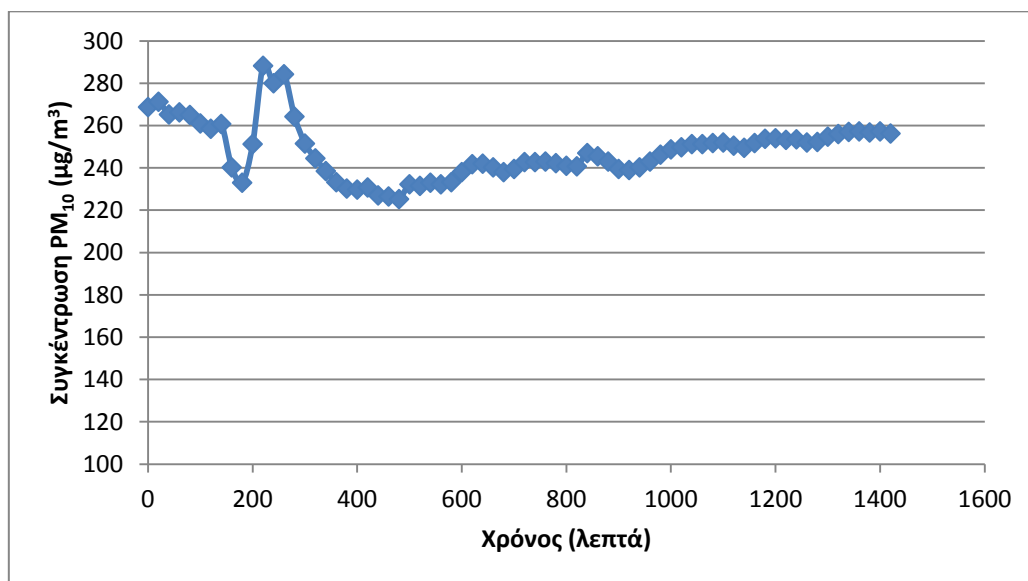
— —

Όπου: λ = ο ρυθμός μεταβολής της συγκέντρωσης του ρύπου στο χώρο
= ο ρυθμός εκπομπής των εσωτερικών πηγών
= ο ρυθμός απομάκρυνσης των σωματιδίων
= ο όγκος του δωματίου

Στην περίπτωση αυτή τα υπάρχοντα δεδομένα αφορούν τις μετρήσεις της συγκέντρωσης του ρύπου στους εσωτερικούς χώρους. Αρχικά, πρέπει να αναφερθεί ότι χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα δεδομένα τη χειροδιαλογής και όχι αυτά της ραφίναρίας. Αυτό συμβαίνει διότι τα πρώτα παρουσιάζουν τις απαραίτητες διακυμάνσεις στις τιμές τους ενώ στα δεύτερα δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες μεταβολές, όπως φαίνεται από τις εικόνες 15 και 16. Τα δεδομένα των μετρήσεων για τη χειροδιαλογή ήταν για 16 ημέρες, όμως δεν υπήρχαν τιμές για ολόκληρο το 24-ώρο για όλες τις ημέρες. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στις συχνές πτώσεις τάσης του ρεύματος αλλά και σε βλάβες του οργάνου. Τα δεδομένα περιλαμβάνουν μετρήσεις για 16 ημέρες στην χειροδιαλογή, με τις πρώτες 10 μέρες να έχουν χρονικό βήμα τα 5 λεπτά ενώ τις υπόλοιπες 6 τα 15 λεπτά. Παραληρώντας τις τιμές, γινόταν αντιληπτό ότι υπήρχαν πολλές διακυμάνσεις στη συγκέντρωση, για αυτό χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος ανά 20 λεπτά για πρώτες 10 μέρες και για τις υπόλοιπες 6 μέρες χρησιμοποιήθηκαν τις τιμές του οργάνου που ήταν ανά 15 λεπτά.



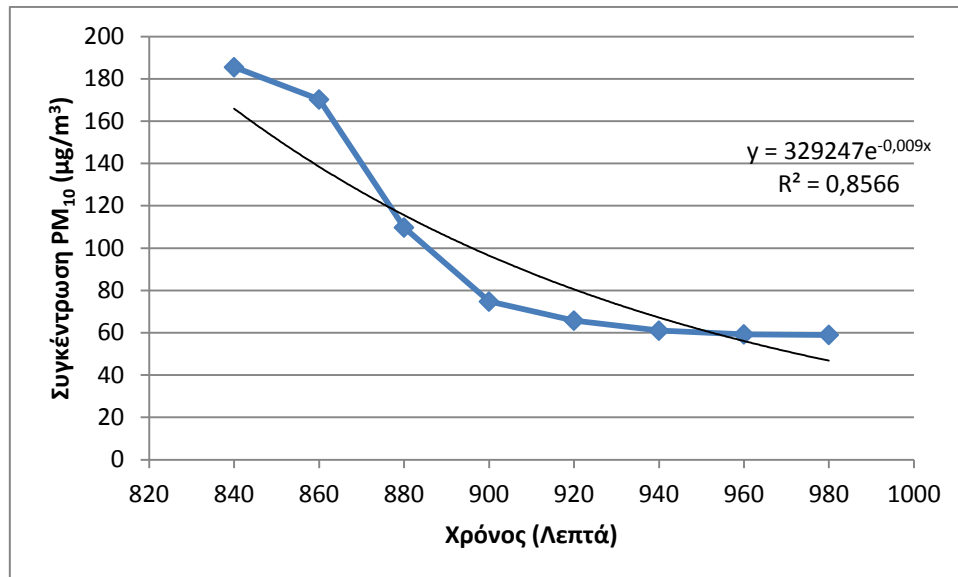
Εικόνα 15: Διάγραμμα διακύμανσης συγκέντρωσης στη χειροδιαλογή για τις 30/6 με το μέσο όρο των τιμών ανά 20 λεπτά.



Εικόνα 16: Διάγραμμα διακύμανσης συγκέντρωσης στη ραφινερία για τις 18/1 με το μέσο όρο των τιμών ανά 20 λεπτά.

Για τον υπολογισμό του ρυθμού εκπομπής (E) θα υπολογίστηκε πρώτα το λ της εξίσωσης. Το λ (loss rate) εκφράζει τον ρυθμό απομάκρυνσης των αιωρούμενων σωματιδίων στο χώρο. Για τον υπολογισμό του χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από την στιγμή που άρχιζε η τελική απομάκρυνση των σωματιδίων κάθε ημέρας όταν τελείωνε η δεύτερη βάρδια στις 21:30 περίπου. Όπως παρατηρήθηκε η συγκέντρωση των σωματιδίων μειωνόταν εκθετικά με το χρόνο σύμφωνα με την εξίσωση , όπου

C_0 η συγκέντρωση στο τέλος της εκπομπής. Το λ ουσιαστικά εκφράζεται από τον εκθέτη που προκύπτει από την λογαριθμική προσομοίωση της καμπύλης της απομάκρυνσης των σωματιδίων. Στην εικόνα 17 παρουσιάζεται η εκθετική μείωση της συγκέντρωσης με βάση τα πειραματικά δεδομένα και με τη καμπύλη μείωσης που προέκυψε από τους υπολογισμούς. Έτσι υπολογίστηκαν 14 διαφορετικά λ και για τις υπόλοιπες μέρες όπου δεν υπήρχαν δεδομένα χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος των τιμών αυτών.



Εικόνα 17: Διάγραμμα τελικής μείωσης της συγκέντρωσης για τον υπολογισμό του λ στις 30/6.

Στη συνέχεια, έγινε προσδιορισμός των στιγμιαίων τιμών των ρυθμών εκπομπής με βάση τις μεταβολές της συγκέντρωσης, χρησιμοποιώντας την απλοποιημένη εξίσωση (5.3). Έγινε εφαρμογή του μοντέλου με το οποίο υπολογίζονται, κάνοντας χρήση της εξίσωσης αυτής, οι τιμές της συγκέντρωσης για διάφορους ρυθμούς εκπομπής μέχρι να ελαχιστοποιηθεί η διαφορά ανάμεσα στις τιμές του μοντέλου και στις πειραματικές τιμές. Η ελαχιστοποίηση των διαφορών έγινε με τη μέθοδο Nedler. Τέλος, με τις τιμές που υπολογίστηκαν και τη χρήση του μοντέλου επιλύεται η εξίσωση (5.3) και υπολογίζονται οι νέες τιμές της συγκέντρωσης (Γλυτσός 2010).

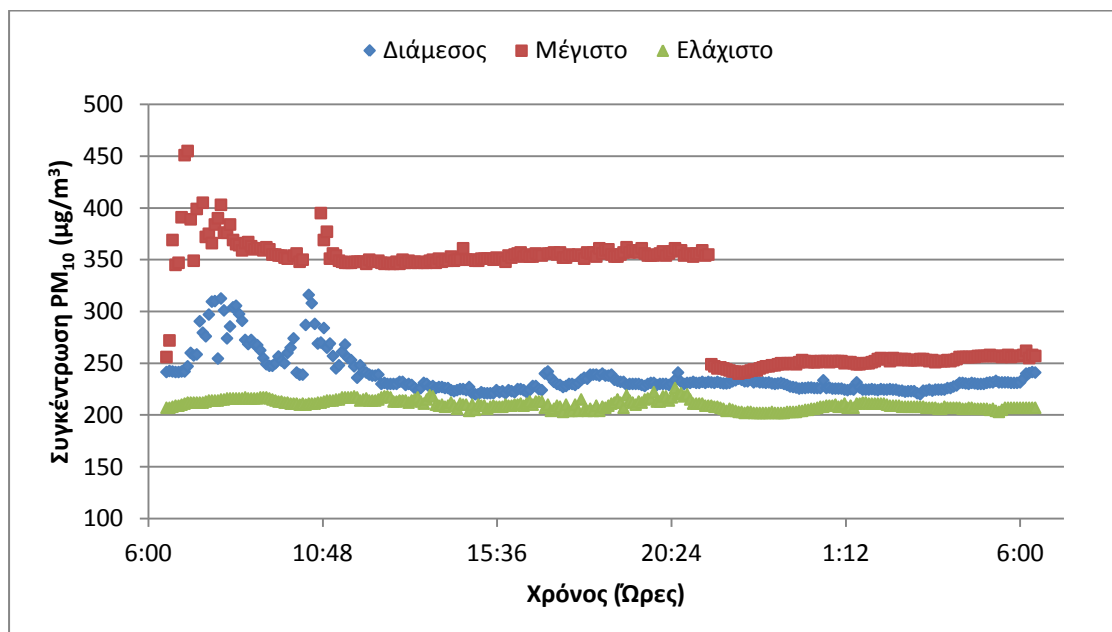
6. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.1 Ανάλυση των δεδομένων

6.1.1 Ραφιναρία

Στόχος της επεξεργασίας που θα ακολουθηθεί είναι η ανάλυση της διακύμανσης των συγκεντρώσεων μέσα στις αίθουσες της χειροδιαλογής και της ραφιναρίας κατά τις δύο βάρδιες εργασίας και κατά τη διάρκεια παύσης των εργασιών. Έπειτα έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ της πρώτης και της δεύτερης βάρδιας, καθώς και μεταξύ της χειροδιαλογής της ραφιναρίας. Για την επίτευξη των παραπάνω έγινε χρήση των διαμέσων, των μεγίστων και των ελαχίστων των τιμών από τις ενδείξεις του οργάνου.

Όσον αφορά τη ραφιναρία έγιναν μετρήσεις για 7 ημέρες οι οποίες έχουν χρονικό βήμα τα 5 λεπτά. Το σύνολο των μετρήσεων είναι 1863, εκ των οποίων 634 ανήκουν στην 1η βάρδια, 587 στη 2η βάρδια και 642 στη διάρκεια παύσης των εργασιών. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις αυτές έγιναν ακριβώς έξω από το χώρο της ραφιναρίας (πάλι σε εσωτερικό χώρο), διότι δεν επιτρεπόταν η είσοδος. Οπότε θεωρήθηκε ότι το εργατικό προσωπικό δέχεται τις συγκεκριμένες εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων. Από τις 7 ημέρες των μετρήσεων υπήρχαν μερικές απώλειες σε μία μόνο ημέρα, οι οποίες όμως είναι πολύ λίγες και δεν επηρέασαν την ανάλυση και τα συμπεράσματα που προέκυψαν.



Εικόνα 18: Συγκεντρωτικό διάγραμμα για ολόκληρη την ημέρα στη ραφιναρία.

Στην εικόνα 18 παρουσιάζεται το συγκεντρωτικό διάγραμμα για ολόκληρη την ημέρα στην ραφιναρία όπου με μπλε συμβολίζονται οι τιμές διαμέσων, με κόκκινο των μεγίστων και με πράσινο των ελαχίστων, ανά 5 λεπτά. Παρατηρώντας το γίνεται αντιληπτό ότι από την έναρξη της 1^{ης} βάρδιας μέχρι και τις 10:30 περίπου υπάρχουν υψηλότερες συγκεντρώσεις με μικρές διακυμάνσεις των τιμών. Στη συνέχεια όμως, όπως φαίνεται από τη καμπύλη της διαμέσου, έχουμε μείωση της συγκέντρωσης η οποία παραμένει σταθερή μέχρι και το τέλος της δεύτερης βάρδιας. Κατά τη διάρκεια παύσης των εργασιών παρατηρείται περαιτέρω μείωση της συγκέντρωσης, ιδίως των μεγίστων τιμών, οι οποίες πλέον βρίσκονται πολύ κοντά με αυτές τις διαμέσου. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι κατά τη διάρκεια των δύο βαρδιών υπήρξαν μερικές τιμές των μετρήσεων που ξεπερνούσαν τα 1600μg/m³ οι οποίες δεν συμπεριλήφθηκαν στο διάγραμμα. Ουσιαστικά οι μετρήσεις αυτές είναι πολύ υψηλές και δεν αντικατοπτρίζουν την πραγματικότητα. Επίσης, πολύ πιθανόν να πρόκειται για σφάλματα του οργάνου. Τέλος, δίνεται ο πίνακας 9 με τα χαρακτηριστικά των τιμών για τις δύο βάρδιες και για το διάστημα παύσης των εργασιών.

	1η Βάρδια	2η Βάρδια	Διάρκεια παύσης εργασιών
Διάμεσος (μg/m³)	254	229	228
Μέγιστο (μg/m³)	624	629	262
Ελάχιστο (μg/m³)	206	203	202

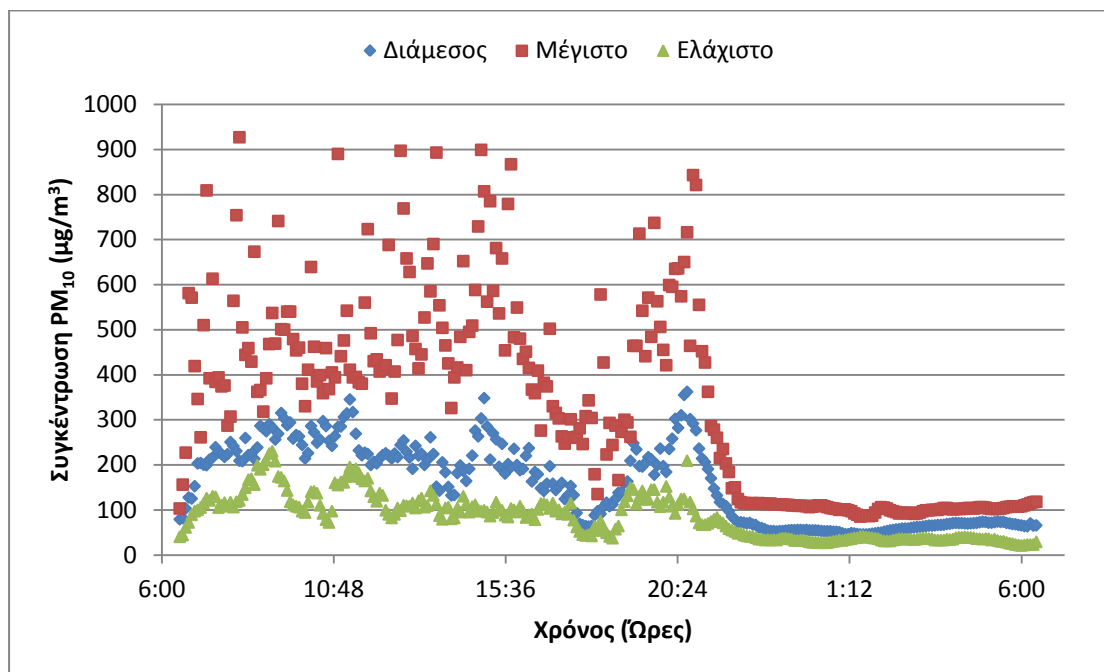
Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά των τιμών για τις δύο βάρδιες και κατά τη διάρκεια παύσης εργασιών.

Από το πίνακα 9 συμπεραίνεται ότι η 1^η βάρδια επιβαρύνεται περισσότερο από τη 2^η, πράγμα που γίνεται αντιληπτό κυρίως από τη διάμεσο των τιμών, αφού τα μέγιστα και τα ελάχιστα κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα. Επίσης από τις τιμές των ελαχίστων παρατηρείται ότι δεν υπάρχει πτώση της συγκέντρωσης κάτω από τα 200μg/m³ πράγμα που υποδεικνύει ότι υπάρχουν συνεχείς εκπομπές στο χώρο της ραφιναρίας.

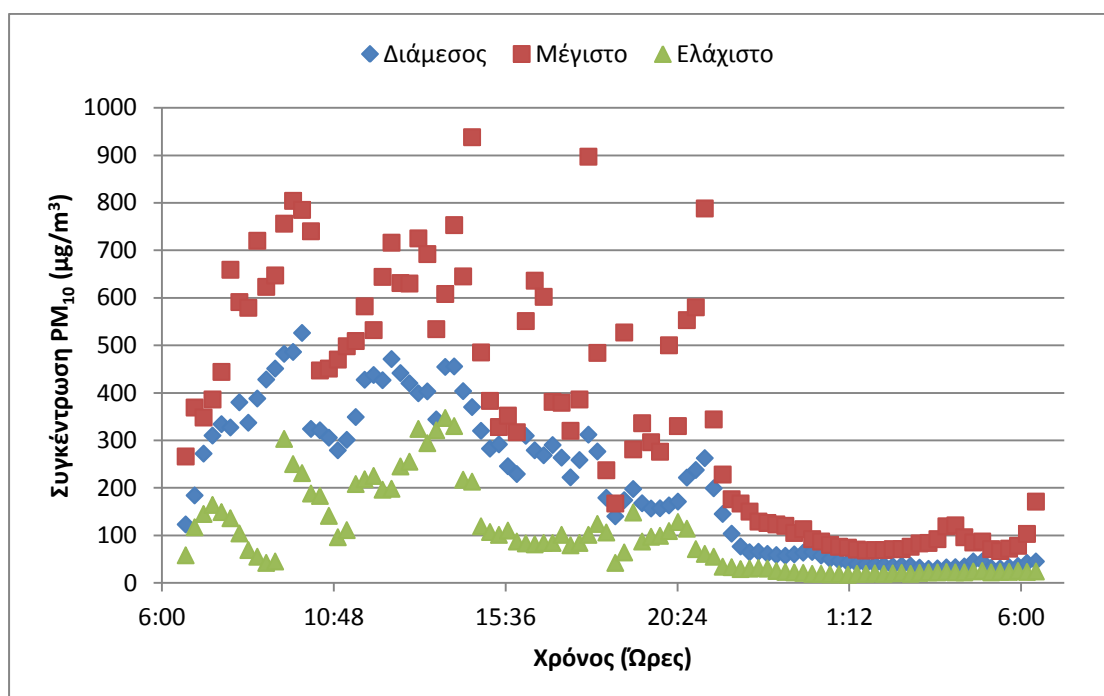
6.1.2 Χειροδιαλογή

Προχωρώντας στην χειροδιαλογή, αρχικά πρέπει να αναφερθεί ότι πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για 16 ημέρες. Από αυτές τις πρώτες 10 μέρες οι μετρήσεις του οργάνου είχαν χρονικό βήμα τα 5 λεπτά ενώ για τις υπόλοιπες 6 τα 15 λεπτά. Εφόσον βρίσκονται σε διαφορετικό χρονικό βήμα χρειάστηκε να αναλυθούν ξεχωριστά, χωρίς όμως αυτό να διαδραματίσει ρόλο

στο τρόπο διεξαγωγής των αποτελεσμάτων. Όσον αφορά το χρονικό βήμα των 5 λεπτών έγιναν 875 μετρήσεις για την 1^η βάρδια, 763 για τη 2^η βάρδια και 856 μετρήσεις κατά τη διάρκεια παύσης των εργασιών. Για το χρονικό βήμα των 15 λεπτών διαθέτουμε 177, 168 και 240 μετρήσεις αντίστοιχα.



Εικόνα 19: Συγκεντρωτικό διάγραμμα για ολόκληρη την ημέρα στη χειροδιαλογή με χρονικό βήμα τα 5 λεπτά.



Εικόνα 20: Συγκεντρωτικό διάγραμμα για ολόκληρη την ημέρα στη χειροδιαλογή με χρονικό βήμα τα 15 λεπτά.

Οι δύο εικόνες 19 και 20 αφορούν την επεξεργασία των συγκεντρώσεων της χειροδιαλογής για ολόκληρη την ημέρα. Με μπλε παρουσιάζονται οι τιμές των διαμέσων, με κόκκινων των μεγίστων και με πράσινο των ελαχίστων. Σύμφωνα με αυτά παρατηρείται ότι από την έναρξη της πρώτης βάρδιας μέχρι τις 15:30 περίπου υπάρχουν υψηλές τιμές της συγκέντρωσης με πολύ έντονη διακύμανση. Έπειτα, υπάρχει μία πτώση των τιμών ενώ προς το τέλος της δεύτερης βάρδιας εμφανίζεται πάλι μια μεγάλη αύξηση της συγκέντρωσης. Ακόμα, οφείλεται να αναφερθεί ότι παρά τη διαφορά του χρονικού βήματος δεν υπάρχει κάποια αλλαγή στην συμπεριφορά της συγκέντρωσης.

	1η Βάρδια	2η Βάρδια	Διάρκεια παύσης εργασιών
Διάμεσος ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	227	191	62
Μέγιστο ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	927	899	260
Ελάχιστο ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	40	37	21

Πίνακας 10: Χαρακτηριστικά των τιμών για τις 2 βάρδιες και κατά τη διάρκεια παύσης των εργασιών για τα δεδομένα με χρονικό βήμα τα 5 λεπτά.

	1η Βάρδια	2η Βάρδια	Διάρκεια παύσης εργασιών
Διάμεσος ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	374	237	49
Μέγιστο ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	804	938	228
Ελάχιστο ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	42	42	17

Πίνακας 11: Χαρακτηριστικά των τιμών για τις 2 βάρδιες και κατά τη διάρκεια παύσης των εργασιών για τα δεδομένα με χρονικό βήμα τα 15 λεπτά.

Από τους δύο πίνακες 10 και 11 συμπεραίνεται ότι οι εργάτες της 1^{ης} βάρδιας επιβαρύνονται περισσότερο από αυτούς της δεύτερης. Επιπλέον, υπάρχει μεγάλη πτώση της συγκέντρωσης κατά τη διάρκεια παύσης των εργασιών πράγμα που υποδεικνύει ότι δεν υπάρχουν εκπομπές εκείνο το χρονικό διάστημα. Παρά τη διαφορά του χρονικού βήματος οι τιμές των μεγίστων και των ελαχίστων τιμών βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους, κάτι τέτοιο όμως δεν ισχύει για τις διαμέσους. Αυτό δείχνει ότι στην 2^η περίπτωση, όπου παρατηρήθηκαν πιο υψηλές τιμές, υπήρχαν υψηλότερες εκπομπές. Το παραπάνω πολύ πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι οι δεύτερες μετρήσεις έγιναν στο διάστημα του Μαρτίου ενώ οι πρώτες προς τον Απρίλιο και κατά το διάστημα του καλοκαιριού. Τέλος, στο παράρτημα Α δίνονται τα αναλυτικά διαγράμματα της συγκέντρωσης με τις διαμέσους, τα ελάχιστα και τα μέγιστα για τις 2 βάρδιες της χειροδιαλογής και της ραφιναρίας και κατά τη διάρκεια

παύσης των εργασιών. Σε αυτά φαίνεται πιο αναλυτικά η συμπεριφορά της συγκέντρωσης για τη κάθε βάρδια.

Συνοψίζοντας, γίνεται αντιληπτό ότι οι τιμές της συγκέντρωσης της χειροδιαλογής χαρακτηρίζονται από πολύ έντονες διακυμάνσεις ενώ στη ραφιναρία δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες μεταβολές της συγκέντρωσης. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο και σχετίζεται με το είδος των εργασιών που επιτελούνται σε αυτούς τους δύο χώρους και τον αριθμό των εργατών που απασχολούνται. Πιο συγκεκριμένα, στη χειροδιαλογή γίνεται ο διαχωρισμός του ανακυκλώσιμου υλικού και απασχολούνται 14 εργάτες, ενώ στη ραφιναρία γίνεται ο διαχωρισμός του κομποστ από ξένες προσμίξεις ενώ απασχολούνται μόλις δύο άτομα. Επιπλέον, οι μετρήσεις έγιναν ακριβώς έξω από τον εσωτερικό χώρο της ραφιναρίας, γεγονός που διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο στη καταγραφή των τιμών. Μία ακόμα αξιοσημείωτη διαφορά είναι ότι στη ραφιναρία υπάρχουν συνεχείς εκπομπές, αφού οι τιμές τις δεν πέφτουν ποτέ κάτω από τα $200\mu\text{g}/\text{m}^3$ κατά τη διάρκεια παύσης των εργασιών, ενώ στη χειροδιαλογή συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο. Τέλος, στους δύο αυτούς χώρους βρέθηκε ότι οι εργαζόμενοι της πρώτης βάρδιας επιβαρύνονται περισσότερο από αυτούς της δεύτερης.

6.2 Υπολογισμός των ρυθμών εκπομπής

Η διαδικασία που θα παρουσιαστεί αρχικά αφορά τον υπολογισμό των στιγμιαίων ρυθμών εκπομπής. Όπως αναφέρθηκε στην μεθοδολογία του υπολογισμού των ρυθμών εκπομπής έγινε υπολογισμός του συντελεστή απομάκρυνσης λ. Παρακάτω δίνεται ο πίνακας 12 με όλους τους ρυθμούς απομάκρυνσης, για κάθε ημέρα ξεχωριστά, όπου ήταν δυνατόν να υπολογιστούν αλλά και ένας ακόμα (πίνακας 13) που περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά τους όπως τη διάμεσο και το μέσο όρο.

Ημερομηνία	Συντελεστής απομάκρυνσης min^{-1} (λ)
30-Ιουν	0,009
1-Ιουλ	0,01
2-Ιουλ	0,016
6-Ιουλ	0,011
2-Απρ	0,014
3-Απρ	0,013
4-Απρ	0,013
5-Απρ	0,014
20-Μαρ	0,014
21-Μαρ	0,014
22-Μαρ	0,011
27-Μαρ	0,013
28-Μαρ	0,014
29-Μαρ	0,018

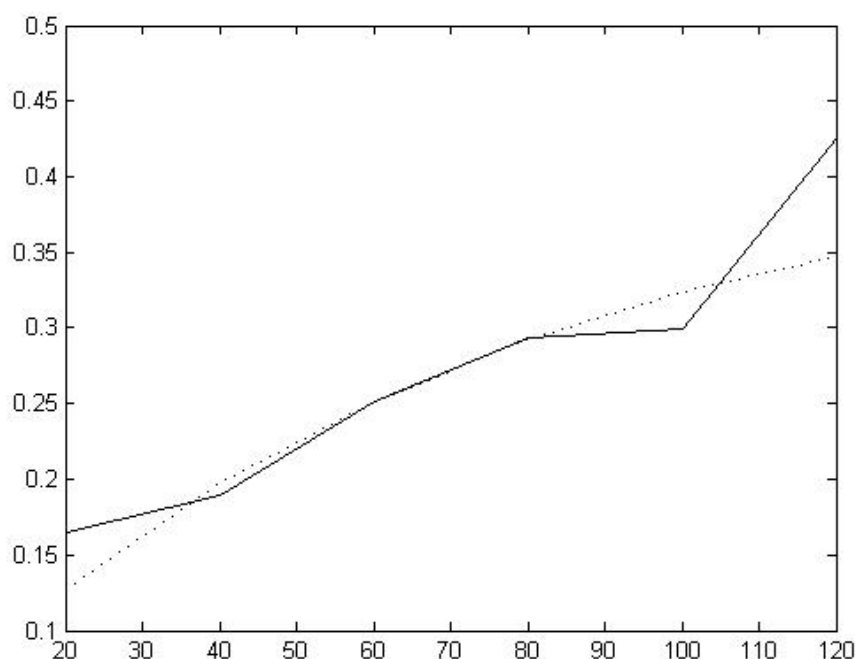
Πίνακας 12: Πίνακας των ρυθμών απομάκρυνσης για όλες τις ημέρες.

	Διάμεσος	Μέσος όρος	Μέγιστο	Ελάχιστο
Συντελεστής απομάκρυνσης min^{-1} (λ)	0,0135	0,0131	0,018	0,009

Πίνακας 13: Χαρακτηριστικά τιμών απομάκρυνσης.

Έπειτα, έγινε προσδιορισμός των στιγμιαίων ρυθμών εκπομπής με βάση τις μεταβολές της συγκέντρωσης όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι η τιμή του στιγμιαίου ρυθμού εκπομπής (E) που ελαχιστοποιεί τη διαφορά ανάμεσα στις πειραματικές τιμές της συγκέντρωσης και των αποτελεσμάτων του μοντέλου. Επιπλέον εξάγει και το παρακάτω διάγραμμα με το οποίο παρουσιάζεται αυτή η διαφορά. Η καμπύλη

με τη συνεχή γραμμή είναι τα πειραματικά δεδομένα, ενώ αυτή με τις διακεκομμένες είναι τα αποτελέσματα του μοντέλου.



Εικόνα 21: Διάγραμμα συγκέντρωσης-χρόνου προσομοίωσης της υφιστάμενης αύξησης της συγκέντρωσης με την συγκέντρωση που υπολογίστηκε από την εύρεση των ρυθμών εκπομπής.

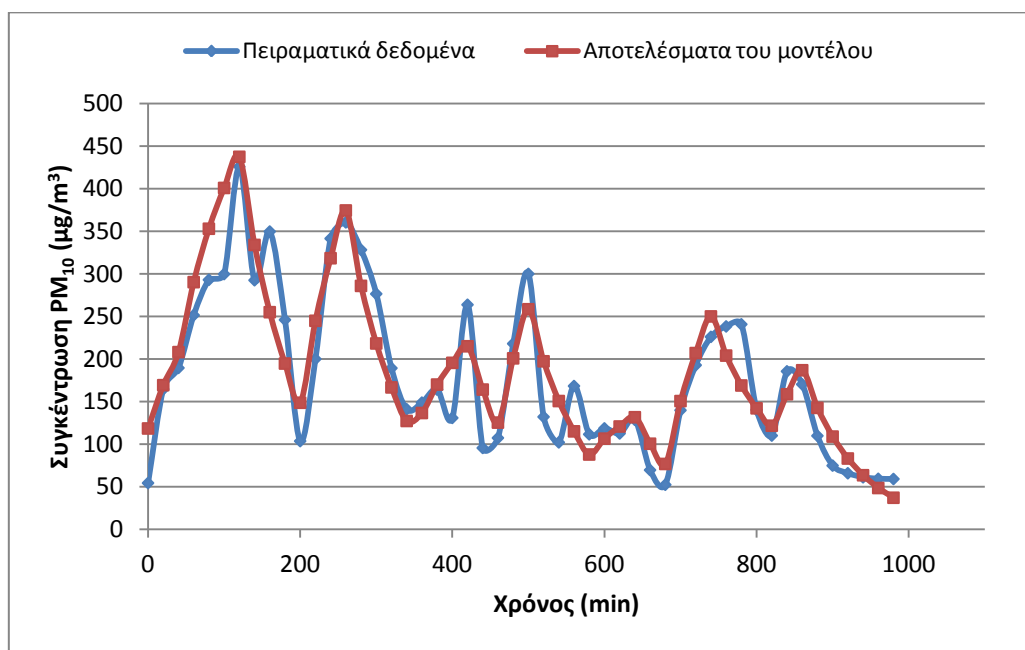
Τα χαρακτηριστικά των στιγμιαίων ρυθμών εκπομπής που προέκυψαν δίνονται στον πίνακα 14. Η τρίτη στήλη αφορά όλο τον όγκο του δωματίου της χειροδιαλογής που έχει υπολογιστεί στα 1980m³.

Μονάδες	mg/(min×m ³)	μg/(h×m ³)	μg/s
Διάμεσος	0,005731	342	188
Μέσος όρος	0,007152	426	234
Μέγιστο	0,020974	1254	690
Ελάχιστο	0,001932	114	62
Τυπική απόκλιση	0,004166	246	135

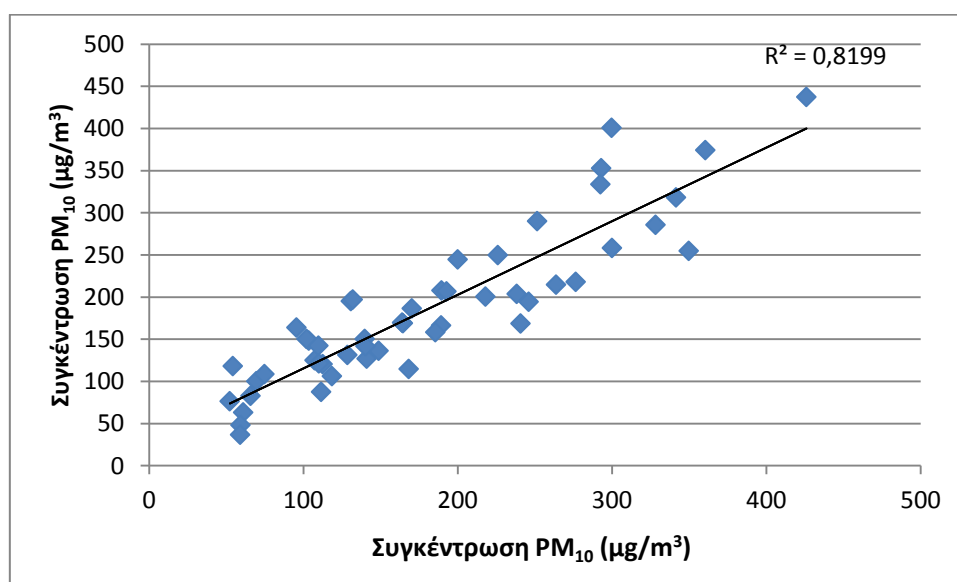
Πίνακας 14:Χαρακτηριστικά των ρυθμών εκπομπής.

Στη συνέχεια, με τις τιμές αυτές και τη βοήθεια του μοντέλου επιλύεται η εξίσωση (5.3) και υπολογίζονται οι τιμές της συγκέντρωσης. Όπως ήταν αναμενόμενο, εφόσον οι τιμές των ρυθμών εκπομπής που υπολογίστηκαν προέρχονταν από τις στιγμιαίες μεταβολές της συγκέντρωσης, ο επαναπροσδιορισμός των δεδομένων υπήρξε ικανοποιητικός. Στο 1^ο

διάγραμμα παρουσιάζονται, για μία τυπική ημέρα, τα πειραματικά δεδομένα με τη μπλε καμπύλη, ενώ τα αποτελέσματα του μοντέλου με τη κόκκινη καμπύλη. Σύμφωνα με τον συντελεστή συσχέτισης που έχει υπολογιστεί στα 0,8199 και με τα χαρακτηριστικά των τιμών στον πίνακα 15, που αφορούν τη διάμεσο, το μέσο όρο, τα μέγιστα και τα ελάχιστα, οι πειραματικές τιμές βρίσκονται πολύ κοντά στα αποτελέσματα του μοντέλου.



Εικόνα 22: Διάγραμμα πειραματικών τιμών και τιμών μοντέλου για τις 30/6.



Εικόνα 23: Διασπορά δεδομένων συγκέντρωσης με τις νέες τιμές για τις 30/6.

30/6	Μέσος όρος	Διάμεσος	Μέγιστο	Ελάχιστο
Πειραματικά δεδομένα ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	180	164	426	52
Αποτελέσματα του μοντέλου ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	185	167	437	37

Πίνακας 15: Πίνακας χαρακτηριστικών για τις 30/6.

Τέλος, παρουσιάζεται ο πίνακας 16 με τα χαρακτηριστικά των συντελεστών συσχέτισης μεταξύ των πειραματικών τιμών και των αποτελεσμάτων του μοντέλου για όλες τις ημέρες που έγινε ο υπολογισμός των ρυθμών εκπομπής. Όπως φαίνεται σύμφωνα με το μέσο όρο που υπολογίστηκε στα 0,85 τα αποτελέσματα του μοντέλου βρίσκονται πολύ κοντά με τις πειραματικές τιμές. Συμπερασματικά, μπορεί να ειπωθεί ότι το μοντέλο μπορεί να προσεγγίσει με ακρίβεια τους στιγμιαίους ρυθμούς εκπομπής. Τελικά, ο υπολογισμός των στιγμιαίων ρυθμών εκπομπής πραγματοποιήθηκε ώστε να δοθεί μια εικόνα του χώρου της χειροδιαλογής. Όμως, τα αποτελέσματα αυτά δεν αποτελούν αντιπροσωπευτικές τιμές της μέσης κατάστασης της συγκέντρωσης που επικρατεί στην αίθουσα της χειροδιαλογής.

	Διάμεσος	Μέσος όρος	Μέγιστο	Ελάχιστο
Συντελεστής συσχέτισης (R^2)	0,8463	0,8506	0,9558	0,7145

Πίνακας 16: Χαρακτηριστικά συντελεστών συσχέτισης (R^2).

Σκοπός της παρακάτω μελέτης είναι η εξαγωγή κάποιων αντιπροσωπευτικών τιμών των ρυθμών εκπομπής, κατά χρονικά διαστήματα στη διάρκεια της ημέρας, οι οποίοι θα έχουν την δυνατότητα να προσομοιώνουν με αρκετή επιτυχία τη μέση κατάσταση της συγκέντρωσης στην αίθουσα της χειροδιαλογής, για τη πληθώρα των ημερών. Για τον υπολογισμό των αντιπροσωπευτικών αυτών τιμών θα εργαστούμε με την ίδια μεθοδολογία, αλλά θα γίνει χρήση διαφορετικών διαστημάτων. Θα γίνει χρήση των ημερών για τις οποίες υπάρχουν πλήρη δεδομένα για όλο το εικοσιτετράωρο στα χρονικά διαστήματα που περιλαμβάνουν από δύο και περισσότερες συνεχόμενες ημέρες πειραματικών μετρήσεων. Σύμφωνα με τα παραπάνω κριτήρια προκύπτουν τα εξής χρονικά διαστήματα: 21-3,22-3,27-3,28-3,29-3 (2012) , 3-4,4-4,5-4 (2012) και 30-6,1-7,2-7 (2010). Όσο αφορά το πρώτο χρονικό διάστημα οι δύο πρώτες ημέρες απέχουν λίγο από τις επόμενες τρεις, επειδή όμως βρίσκονται πολύ κοντά χρονικά θα εξεταστούν ως ένα ενιαίο χρονικό διάστημα. Για την επίτευξη των παραπάνω έγινε χρήση του μέσου όρου των συγκεντρώσεων ανά μία ώρα. Αυτό έγινε για να

εξομαλυνθούν σε κάποιο βαθμό οι πολλές και απότομες μεταβολές των συγκεντρώσεων. Ο λόγος που δεν έγινε χρήση μεγαλύτερων χρονικών διαστημάτων, είναι διότι θα μειώνονταν σε μεγάλο βαθμό οι μεταβολές της συγκέντρωσης, οι οποίες όπως αναλύσαμε και προηγουμένως χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των ρυθμών εκπομπής.

Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία έγινε υπολογισμός των νέων ρυθμών απομάκρυνσης (λ) από τον εκθέτη που προκύπτει από την λογαριθμική προσομοίωση της καμπύλης της απομάκρυνσης των σωματιδίων. Υπολογίστηκαν με αυτό τον τρόπο 10 διαφορετικοί ρυθμοί απομάκρυνσης, ένας για κάθε ημέρα, οι οποίοι παρουσιάζονται στο πίνακα 17 με τα χαρακτηριστικά τους (πίνακας 18).

Ημερομηνία	Συντελεστής απομάκρυνσης min^{-1} (λ)
30-Ιουν	0,008
1-Ιουλ	0,006
2-Ιουλ	0,008
3-Απρ	0,011
4-Απρ	0,011
5-Απρ	0,014
21-Μαρ	0,008
22-Μαρ	0,007
27-Μαρ	0,006
28-Μαρ	0,01
29-Μαρ	0,009

Πίνακας 17: Πίνακα των ρυθμών απομάκρυνσης.

	Διάμεσος	Μέσος όρος	Μέγιστο	Ελάχιστο
Συντελεστής απομάκρυνσης min^{-1} (λ)	0,008	0,009	0,014	0,006

Πίνακας 18: Χαρακτηριστικά ρυθμών απομάκρυνσης.

Στην συνέχεια υπολογίζονται οι τιμές των ρυθμών εκπομπής, για κάθε διάστημα ξεχωριστά, με τη χρήση των πειραματικών δεδομένων όπως αναλύσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Με τις τιμές αυτές και με τη βοήθεια του μοντέλου επιλύεται η εξίσωση (5.3) και υπολογίζονται οι νέες τιμές της συγκέντρωσης. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να υπάρξει ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ των πειραματικών τιμών και των αποτελεσμάτων του μοντέλου.

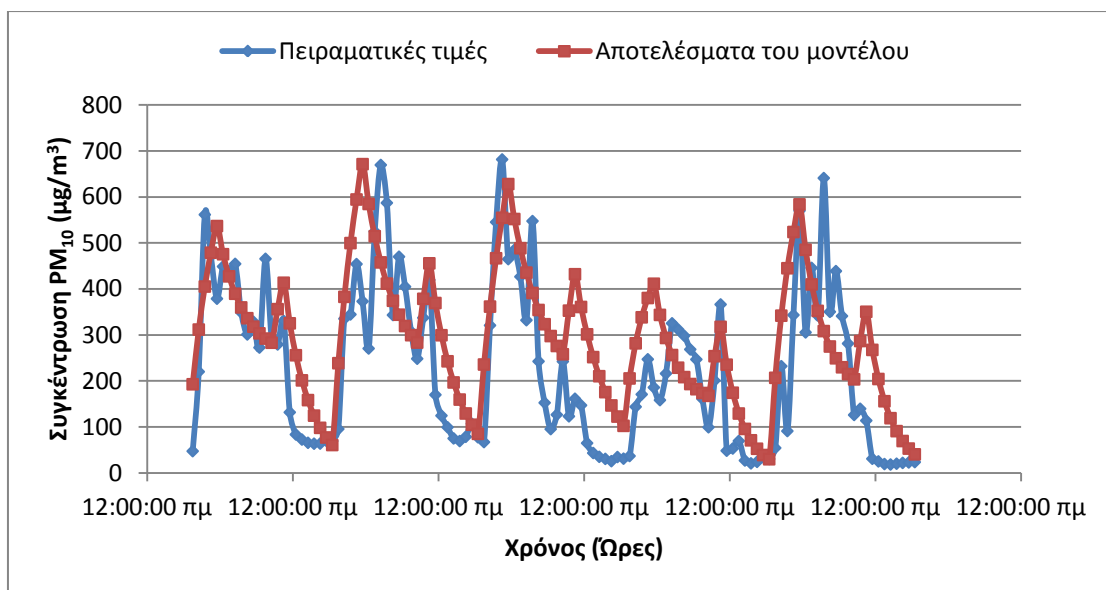
1^ο Διάστημα: 21,22,27,28,29 Μαρτίου (2012)

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι ρυθμοί εκπομπής μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της ημέρας με αρκετά μεγάλες διαφορές. Επίσης, για τα ίδια χρονικά διαστήματα, κατά τη διάρκεια της ημέρας, για όλες τις ημέρες του διαστήματος βρέθηκε ότι οι ρυθμοί εκπομπής συσχετίζονται κατά μεγάλο βαθμό μεταξύ τους. Αυτό υποδεικνύει ότι υπάρχει περιοδικότητα της συγκέντρωσης μεταξύ των ημερών. Πιο συγκεκριμένα, ολόκληρο το 24-ωρο (από τις 6:30 όπου ξεκινάει η πρώτη βάρδια μέχρι την ίδια ώρα το επόμενο πρωί), χωρίστηκε σε 4 διαφορετικά διαστήματα που φαίνονται στον πίνακα 19.

Χρονικό διάστημα	06:30-11:30	11:30-19:30	19:30-21:30	21:30-6:30
Ρυθμός εκπομπής ($\mu\text{g}/\text{h}\times\text{m}^3$)	360 $\pm$ 60	90 $\pm$ 30	360 $\pm$ 60	0

Πίνακας 19: Ρυθμοί εκπομπής κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Από το πίνακα 19 παρατηρείται ότι υπάρχει μεγάλη αύξηση των ρυθμών εκπομπής κατά την έναρξη των εργασιών, για τις πρώτες τέσσερις ώρες και κατά τη λήξη τους, τις δύο τελευταίες ώρες. Όσο αφορά το 1^ο διάστημα είναι αναμενόμενο διότι από τις 6:30 μέχρι τις 11:00 λειτουργεί, ταυτόχρονα με την κύρια, η δεύτερη ταινία όπου γίνεται η μεταφορά του σύμμικτου υλικού. Στο διάστημα 19:30 με 21:30 η αύξηση αυτή πιθανόν να οφείλεται στο καθαρισμό που λαμβάνει χώρα πριν τη παύση των εργασιών. Στο διάστημα 11:30 με 19:30 παρατηρούνται πιο μικρές εκπομπές, καθώς λειτουργεί μόνο η ταινία που γίνεται ο διαχωρισμός του ανακυκλώσιμου υλικού. Κατά τη διάρκεια παύσης των εργασιών οι ρυθμοί εκπομπής υπολογίστηκαν ίσοι με το μηδέν, πράγμα που υποδεικνύει ότι δεν υπάρχουν πηγές σε εκείνο το διάστημα.



Εικόνα 24: Διάγραμμα πειραματικών τιμών και αποτελεσμάτων του μοντέλου.

Στατιστικοί παράμετροι	Bias	RMSE	Correlation	Index of Agreement
Τιμές	-0,28349	0,26898	0,718933	0,850331

Πίνακας 20: Πίνακας στατιστικών παραμέτρων των αποτελεσμάτων.

Το διάγραμμα της εικόνας 24 παρουσιάζει τα πειραματικά δεδομένα με μπλε χρώμα, ενώ με κόκκινο τα αποτελέσματα του μοντέλου. Στον πίνακα 20 δίνονται οι στατιστικοί παράμετροι που υπολογίστηκαν. Σύμφωνα με αυτά, η μεροληψία (BIAS) έχει τιμή 0,28, η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) υπολογίστηκε στα 0,27, η συσχέτιση μεταξύ τους (Correlation) στο 0,72 και τέλος ο συντελεστής συμφωνίας (IA – Index of Agreement) στο 0,85. Άρα σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, υπάρχει η δυνατότητα, κάνοντας χρήση των συγκεκριμένων ρυθμών εκπομπής για τα συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα που έχουν τεθεί, να υπολογιστούν με αρκετά μεγάλη ακρίβεια οι συγκεντρώσεις στην αίθουσα της χειροδιαλογής. Επίσης, πρέπει να επισημανθεί ότι οι έντονες μεταβολές της συγκέντρωσης δεν ήταν δυνατόν να προσομοιωθούν. Οι γρήγορες και μεγάλες αυτές διακυμάνσεις δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον όσο αφορά τη μελέτη αυτή. Αυτό όμως που έχει ενδιαφέρον είναι τα χαρακτηριστικά των τιμών, που αφορούν το μέσο όρο, τη διάμεσο, τα μέγιστα και τα ελάχιστα, τα οποία παρουσιάζονται στον πίνακα 21 και βρίσκονται αρκετά κοντά μεταξύ τους.

	Διάμεσος	Μέσος όρος	Μέγιστο	Ελάχιστο
Πειραματικά δεδομένα ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	228	193	682	18
Αποτελέσματα του μοντέλου ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	293	293	671	30

Πίνακας 21: Πίνακας με τα χαρακτηριστικά των τιμών.

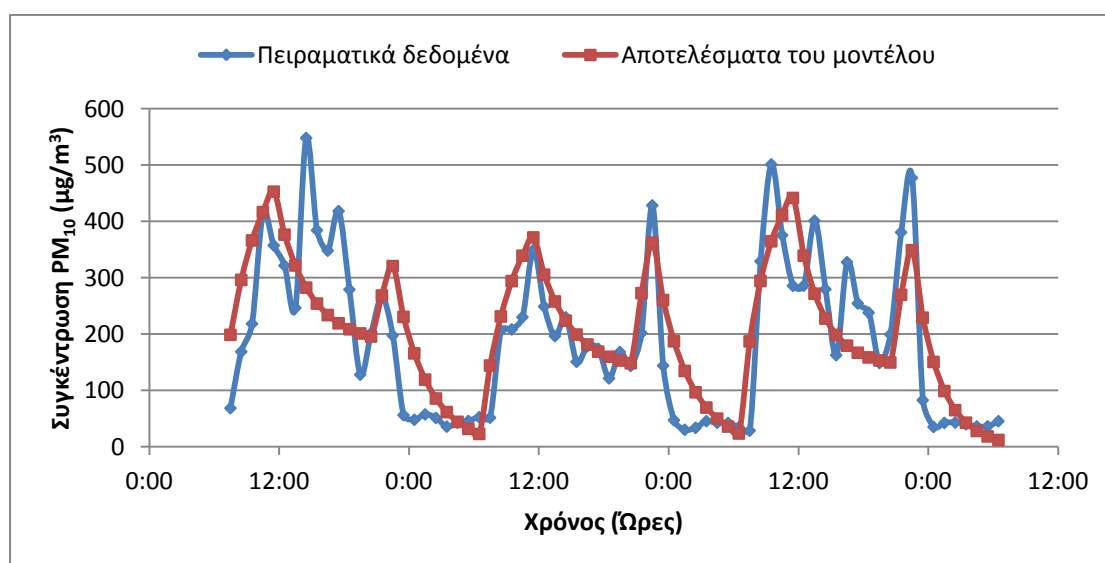
2^ο Διάστημα 3,4,5 Απριλίου (2012)

Ομοίως με το παραπάνω διάστημα παρατηρείται μεταβολή των ρυθμών εκπομπής σωματιδίων κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ακόμα, οι τιμές για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια της ημέρας υπολογίστηκαν πολύ κοντά για όλες τις ημέρες του διαστήματος. Αναλυτικότερα οι ρυθμοί εκπομπής παρουσιάζονται στον πίνακα 22.

Χρονικό διάστημα	06:30-11:30	11:30-19:30	19:30-21:30	21:30-6:30
Ρυθμός εκπομπής ($\mu\text{g}/\text{h} \times \text{m}^3$)	360 ± 60	102 ± 15	360 ± 60	0

Πίνακας 22: Ρυθμοί εκπομπής κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Από τον πίνακα αυτόν γίνεται αντιληπτό ότι οι τιμές των ρυθμών εκπομπής που υπολογίστηκαν είναι ίδιες σχεδόν με εκείνες του προηγούμενου διαστήματος. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα είναι απολύτως λογικό διότι βρίσκονται σε πολύ κοντινές χρονικές περιόδους (Μάρτιος και Απρίλιος 2012).



Εικόνα 25: Διάγραμμα πειραματικών τιμών και αποτελεσμάτων του μοντέλου.

Στατιστικοί παράμετροι	Bias	RMSE	Correlation	Index of Agreement
Τιμές	-0,08452	0,140146	0,741932	0,8618

Πίνακας 23: Πίνακας στατιστικών παραμέτρων των αποτελεσμάτων.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, σύμφωνα με τις στατιστικές παραμέτρους, φαίνεται ότι υπάρχει μεγαλύτερη συσχέτιση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα του μοντέλου. Παρόλα αυτά ούτε στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν έγινε προσομοίωση όλων των μεταβολών της συγκέντρωσης. Τα χαρακτηριστικά των τιμών, μεταξύ των πειραματικών τιμών και των αποτελεσμάτων του μοντέλου, δίνονται στον πίνακα 24 και βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους.

	Διάμεσος	Μέσος όρος	Μέγιστο	Ελάχιστο
Πειραματικά δεδομένα ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	190	176	548	29
Αποτελέσματα του μοντέλου ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	206	199	453	12

Πίνακας 24: Πίνακας με τα χαρακτηριστικά των τιμών.

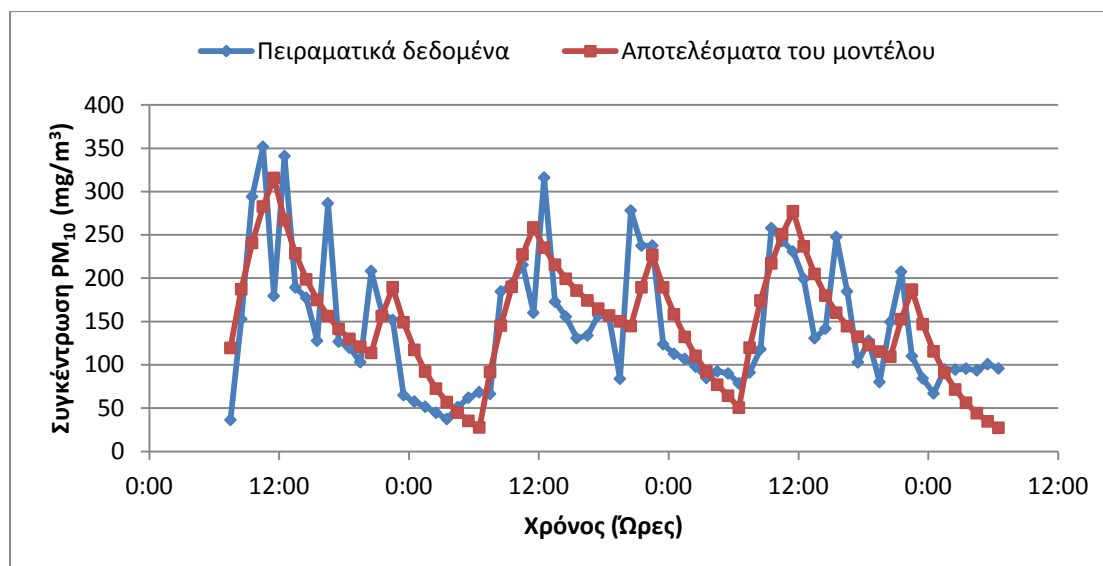
3^ο Διάστημα 30 Ιουνίου, 1,2 Ιουλίου, (2010)

Ομοίως με τα δύο προηγούμενα διαστήματα υπολογίστηκαν οι ρυθμοί εκπομπής για το 3^ο διάστημα του καλοκαιριού.

Χρονικό διάστημα	06:30-11:30	11:30-19:30	19:30-21:30	21:30-6:30
Ρυθμός εκπομπής ($\mu\text{g}/\text{h}\times\text{m}^3$)	180±30	42±18	150±30	0

Πίνακας 25: Ρυθμοί εκπομπής κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Στο συγκεκριμένο διάστημα παρατηρείται σαφής μείωση των τιμών των ρυθμών εκπομπής για όλα τα χρονικά διαστήματα της ημέρας. Παρόλα αυτά, κατά τη διάρκεια έναρξης των εργασιών και κατά τη διάρκεια πριν την παύση των εργασιών οι τιμές είναι πιο αυξημένες σε σχέση με το διάστημα 11:30 έως 19:30, όπως συμβαίνει και στα προηγούμενα διαστήματα του 2012.



Εικόνα 26: Διάγραμμα των πειραματικών τιμών και αποτελεσμάτων του μοντέλου.

Στατιστικοί παράμετροι	Bias	RMSE	Correlation	Index of Agreement
Τιμές	-0,03479	0,082929	0,697987	0,840457

Πίνακας 26: Πίνακας στατιστικών παραμέτρων των αποτελεσμάτων.

Με βάση τις στατιστικές παραμέτρους συμπεραίνεται ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση, παρότι οι τιμές των ρυθμών εκπομπής υπολογίστηκαν μειωμένες, μπορούν να προσημειώσουν με αρκετή ακρίβεια τα δεδομένα. Τα χαρακτηριστικά των τιμών δίνονται στο πίνακα 27 και βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους.

	Διάμεσος	Μέσος όρος	Μέγιστο	Ελάχιστο
Πειραματικά δεδομένα ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	145	128	352	37
Αποτελέσματα του μοντέλου ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	150	150	316	27

Πίνακας 27: Πίνακας με τα χαρακτηριστικά των τιμών.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, γίνεται αντιληπτό ότι υπάρχει αρκετά μεγάλη διαφορά των αποτελεσμάτων για τους ρυθμούς εκπομπής, μεταξύ των πρώτων δύο διαστημάτων και του τρίτου. Η αύξηση αυτή στα πρώτα δύο πολύ πιθανόν να οφείλετε στη χρονική διαφορά των διαστημάτων όπου έγιναν οι μετρήσεις (1^ο και 2^ο διάστημα το 2012, 3^ο διάστημα το 2010) και

πιο συγκεκριμένα στην αύξηση του εισερχόμενου υλικού προς διαχωρισμό αλλά και στη μεταβολή της ποιότητας τους. Για αυτό το λόγο σύμφωνα με τα αποτελέσματα του 2012, καταλήξαμε στις τιμές του πίνακα 28, τα οποία βρίσκονται πιο κοντά στη πραγματικότητα.

Χρονικό διάστημα	06:30-11:30	11:30-19:30	19:30-21:30	21:30-6:30
Ρυθμός εκπομπής ($\mu\text{g}/\text{h}\times\text{m}^3$)	360 $\pm$ 60	90 $\pm$ 30	360 $\pm$ 60	0

Πίνακας 28: Τελικοί ρυθμοί εκπομπής κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Συγκεντρωτικά, οι ρυθμοί εκπομπής φτάνουν έως τα 360 ($\mu\text{g}/\text{h}\times\text{m}^3$) για τις πρώτες πρωινές ώρες και για τα διαστήματα πριν το τέλος των εργασιών. Οι αυξημένες αυτές τιμές, όπως αναλύθηκε και προηγουμένως, οφείλονται στη λειτουργία της δεύτερης ταινίας, όπου μεταφέρει το σύμμικτο κατά τις πρωινές ώρες, ενώ στο τέλος της δεύτερης βάρδιας γίνεται καθαρισμός του χώρου. Το μοντέλο υπολόγισε με τη χρήση των ρυθμών εκπομπής τις τιμές της συγκέντρωσης και η σύγκριση τους με τα πειραματικά δεδομένα υπήρξε ικανοποιητική. Άρα το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της ποιότητας του αέρα, ενώ τα τελικά αυτά αποτελέσματα μπορούν να αξιοποιηθούν για τη λήψη μέτρων προστασίας του εργατικού προσωπικού με τη βελτίωση των συνθηκών του χώρου (π.χ. εξαερισμός).

6.3 Υπολογισμός της δόσης – Εφαρμογή του μοντέλου ExDom

Η εφαρμογή του μοντέλου έγινε ξεχωριστά για τα δεδομένα της ραφιναρίας και για αυτά της χειροδιαλογής. Επίσης, έγινε ξεχωριστά για κάθε βάρδια. Υπολογίστηκε η δόση σε συγκεκριμένες περιοχές του αναπνευστικού συστήματος αλλά και η απομάκρυνση των σωματιδίων στα όργανα του ανθρώπινου σώματος. Πιο συγκεκριμένα, βρέθηκε η δόση στο ανώτερο αναπνευστικό (ET) όπου χωρίζεται στη πρόσθια ρινική κοιλότητα (ET1), την ύστερη ρινική κοιλότητα, το λάρυγγα το φάρυγγα και το στόμα (ET2), την τραχειοβρογχική περιοχή (TB) που αποτελείται από την τραχεία και του πρωτεύοντες βρόγχους (BB), του δευτερεύοντες βρόγχους που ακολουθούν και τους τερματικούς βρόγχους (bb), και τέλος τη κυψελιδική περιοχή (AI). Επίσης υπολογίστηκε η απομάκρυνση τους προς το γαστρεντερικό σύστημα (Gastrointestinal tract – GI tract), το αίμα και η κατακράτηση τους στο αναπνευστικό σύστημα.

Ως δεδομένα εισόδου για τη λειτουργία του μοντέλου απαιτείται η συγκέντρωση σε ωριαία βάση. Στην συγκεκριμένη περίπτωση τέθηκε η

διάμεσος ανά μία ώρα η οποία προέκυψε από τις πειραματικές μετρήσεις που είχαν γίνει στο πεδίο. Έπειτα, για τη συμπλήρωση των εναπομεινάντων ωρών έγινε χρήση των συγκεντρώσεων που μετρήθηκαν στο χώρο της οικίας μου. Όσον αφορά τις πειραματικές μετρήσεις της συγκέντρωσης που έγιναν στο πεδίο υπήρξαν ελλείψεις κάποιων τιμών με αποτέλεσμα να μπορούν να γίνουν οι υπολογισμοί για μία από τις δύο βάρδια σε κάποιες ημέρες. Στην περίπτωση της ραφιναρίας υπήρχαν δεδομένα για 7 ημέρες με επαρκή δεδομένα για την 1^η βάρδια 6 ημερών ενώ για τη 2^η βάρδια όλων των ημερών. Στην περίπτωση της χειροδιαλογής διαθέταμε δεδομένα για 16 ημέρες με επαρκή δεδομένα για την 1^η βάρδια 13 ημερών ενώ για τη 2^η βάρδια 15 ημερών.

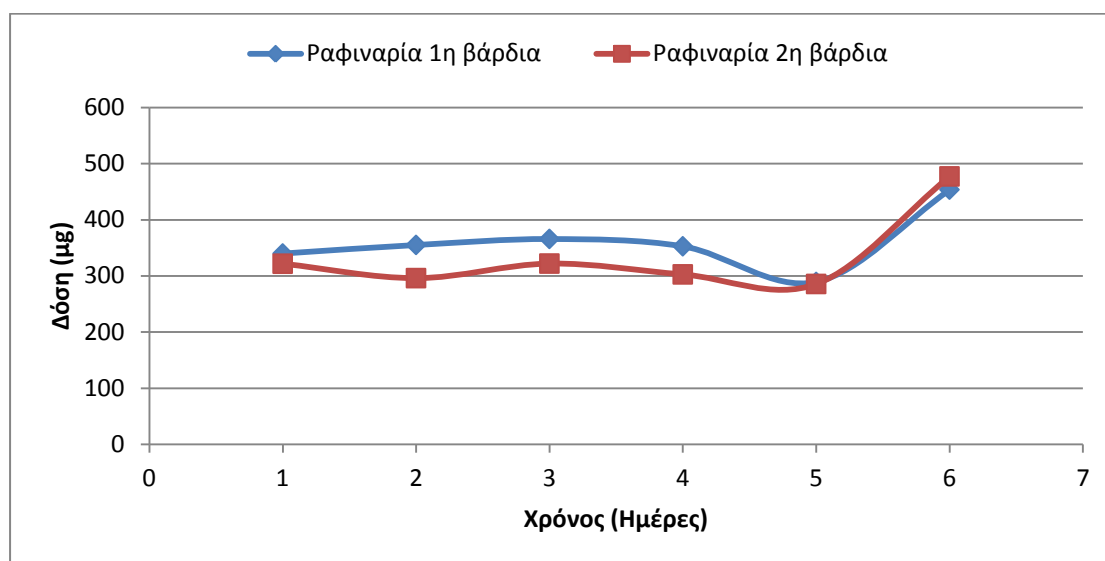
Αποτελέσματα – Συμπεράσματα

Στον πίνακα 29 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ωριαίας δόσης στις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος όσο αφορά τα δεδομένα της ραφιναρίας και της χειροδιαλογής. Σε κάθε βάρδια και στις δύο περιπτώσεις έχει υπολογιστεί το μέγιστο και το ελάχιστο καθώς και ο μέσος όρος των τιμών. Τέλος έγινε υπολογισμός της δόσης του υποβάθρου με βάση τις μετρήσεις που έγιναν στην οικία μου.

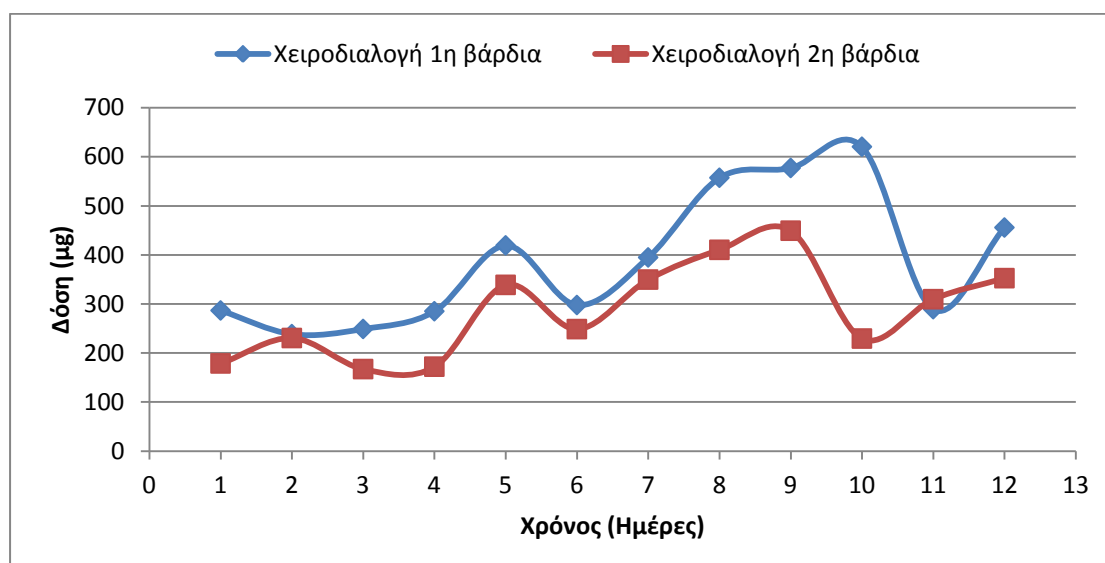
	ET1_DOSE	ET2_DOSE	BB_DOSE	BBI_DOSE	AL_DOSE	TOTAL_DOSE
Ραφιναρία 1 ^η βάρδια						
Μέγιστο	220	249	11	6	24	510
Ελάχιστο	122	138	6	4	13	283
Μέσος όρος	155	175	8	4	17	359
Ραφιναρία 2 ^η βάρδια						
Μέγιστο	207	235	10	6	23	481
Ελάχιστο	119	134	6	3	13	275
Μέσος όρος	142	161	7	4	16	330
Χειροδιαλογή 1 ^η βάρδια						
Μέγιστο	443	501	22	13	48	1027
Ελάχιστο	29	33	1	1	3	67
Μέσος όρος	166	188	8	4	18	384
Χειροδιαλογή 2 ^η βάρδια						
Μέγιστο	333	377	17	10	36	773
Ελάχιστο	28	32	1	1	3	64
Μέσος όρος	124	140	6	4	13	287
Υπόβαθρο						
Μέγιστο	14	16	1	0,76	4	34
Ελάχιστο	1	2	0,1	0,25	1	5
Μέσος όρος	6	7	0,34	0,38	2	15

Πίνακας 29: Πίνακας με τον υπολογισμό της ωριαίας δόσης σε µg για τις περιοχές του αναπνευστικού.

Συγκρίνοντας τους μέσους όρους των δύο βαρδιών της ραφιναρίας με αυτούς της χειροδιαλογής παρατηρείτε ότι και στις δύο περιπτώσεις η πρώτη βάρδια δέχεται μεγαλύτερη δόση από ότι η δεύτερη. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί η πολύ μεγάλη διαφορά που υπάρχει στο δόση που δέχεται ένας εργάτης στο ΧΥΤΑ σε σχέση με κάποιον που βρίσκεται στην οικεία του. Η δόση στην πρώτη περίπτωση είναι 20 με 25 φορές υψηλότερη σε σχέση με τη δεύτερη, πράγμα όμως αναμενόμενο αφού ο μέσος όρος των συγκεντρώσεων που μετρήθηκαν στο ΧΥΤΑ είναι 10 με 15 φορές υψηλότερος από αυτόν που μετρήθηκε στο σπίτι.

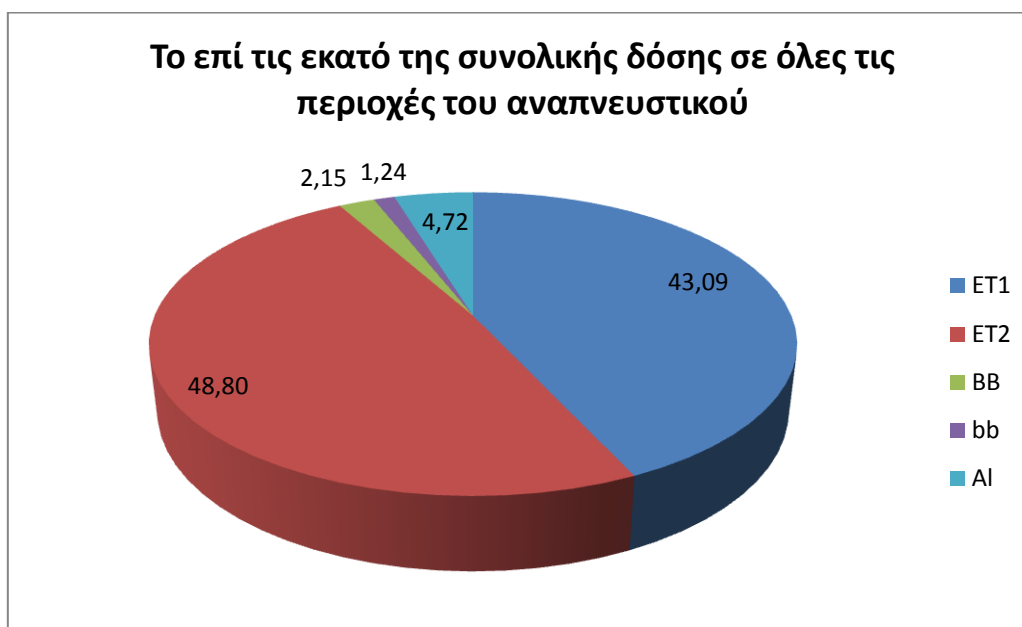


Εικόνα 27: Διάγραμμα της συνολικής δόσης για κάθε ημέρα στις δύο βάρδιες της ραφιναρίας.



Εικόνα 28: Διάγραμμα της συνολικής δόσης για κάθε ημέρα στις δύο βάρδιες της χειροδιαλογής.

Στα δύο διαγράμματα των εικόνων 27 και 28 τοποθετήθηκε η συνολική δόση για τις ημέρες που είχαμε επαρκή δεδομένα και για τις δύο βάρδιες. Παρατηρώντας τα, γίνεται αντιληπτό ότι και στις δύο περιπτώσεις η δόση της πρώτης βάρδιας είναι μεγαλύτερη από τη δεύτερη στο πλείστον των περιπτώσεων. Επίσης, υπάρχει συσχέτιση των δόσεων για τις δύο βάρδιες αφού στις περισσότερες περιπτώσεις οι διακυμάνσεις που εμφανίζονται είναι της ίδιας μορφής. Ακόμα, συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα παρατηρείτε ότι στην περίπτωση της ραφίναρίας οι τιμές των δόσεων κινούνται στα ίδια επίπεδα (300μg-350μg), ενώ αυτές στην χειροδιαλογή παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις (200μg-600μg). Το παραπάνω γεγονός συνδέεται με τις διακυμάνσεις που εμφανίζουν οι τιμές των συγκεντρώσεων, αφού στην περίπτωση της ραφίναρίας κυμαίνονταν στα ίδια περίπου επίπεδα ενώ στην περίπτωση της χειροδιαλογής παρουσίαζαν μεγάλες μεταβολές.



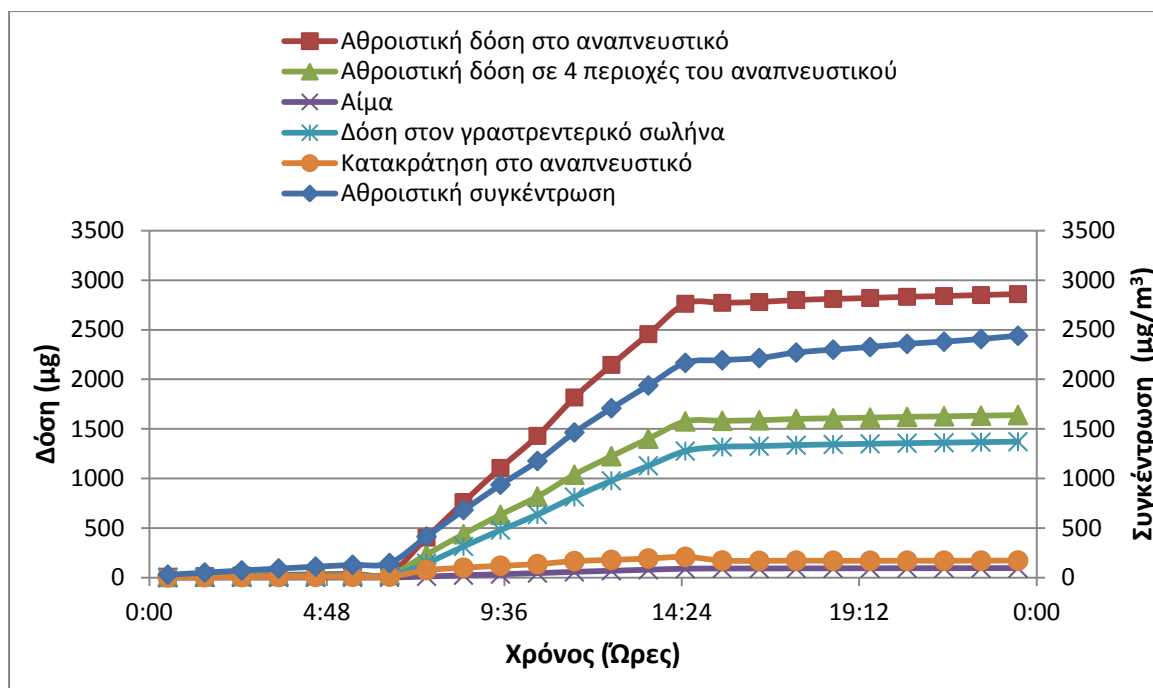
Εικόνα 29: Η επί τοις εκατό δόση σε όλες τις περιοχές του αναπνευστικού.

Στο διάγραμμα τύπου πίτας της εικόνας 29 γίνεται αναπαράσταση των ποσοστών της συνολικής δόσης που δέχονται οι περιοχές του αναπνευστικού συστήματος. Για τον υπολογισμό των ποσοστών χρησιμοποιήθηκαν όλοι οι μέσοι όροι που είχαν προκύψει από τη ραφίναρία και τη χειροδιαλογή και από τις δύο βάρδιες. Το μεγαλύτερο ποσοστό των σωματιδίων κατακρατείται στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα και φτάνει το 91,89% (ET1 + ET2) της δόσης. Έπειτα ένα μικρότερο ποσοστό περνάει στην τραχειοβρογχική περιοχή και ανέρχεται σε 3,39%(BB + bb) και τέλος το υπόλοιπο 4,72% της δόσης κατευθύνεται στην κυψελιδική περιοχή.

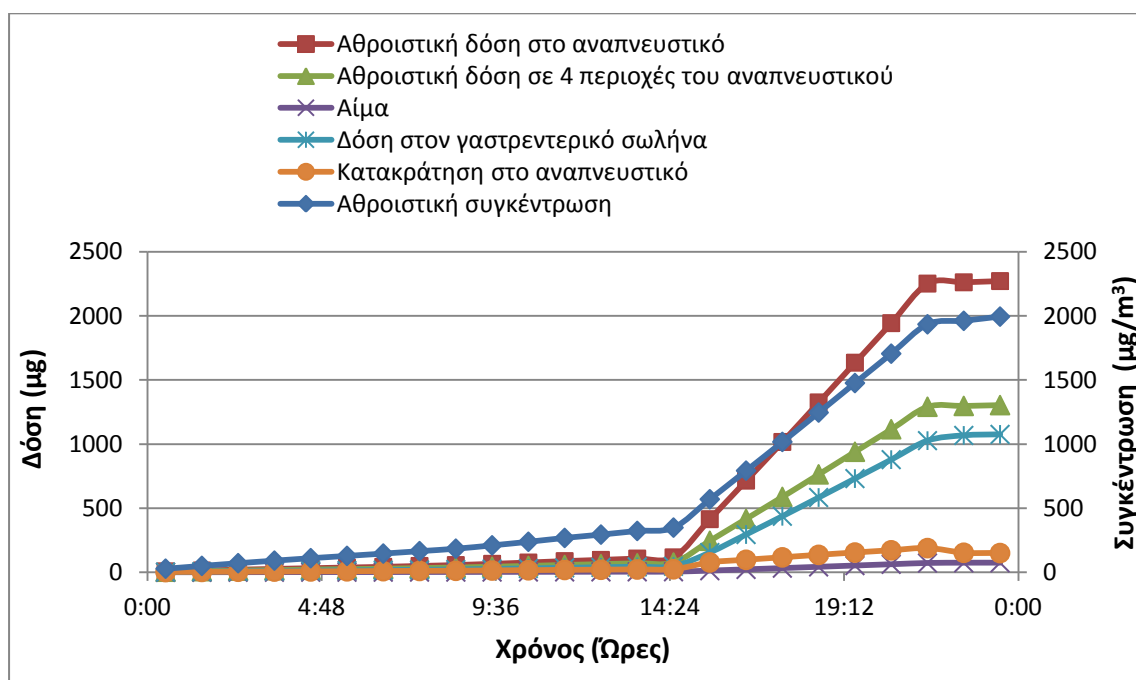
	Γαστρεντερικός σωλήνας	Αίμα	Κατακράτηση στο αναπνευστικό σύστημα
Μέγιστο Ελάχιστο Μέσος όρος	Ραφιναρία 1 ^η βάρδια		
	1810	124	220
	1175	82	150
	1446	100	180
Μέγιστο Ελάχιστο Μέσος όρος	Ραφιναρία 2 ^η βάρδια		
	1653	114	221
	1011	71	143
	1160	81	161
Μέγιστο Ελάχιστο Μέσος όρος	Χειροδιαλογή 1 ^η βάρδια		
	2455	168	290
	979	68	129
	1542	106	191
Μέγιστο Ελάχιστο Μέσος όρος	Χειροδιαλογή 2 ^η βάρδια		
	1558	108	209
	615	44	95
	1016	71	143

Πίνακας 30: Η δόση των σωματιδίων σε µg στο τέλος της ημέρας για το γαστρεντερικό, το αίμα και η κατακράτηση στο αναπνευστικό.

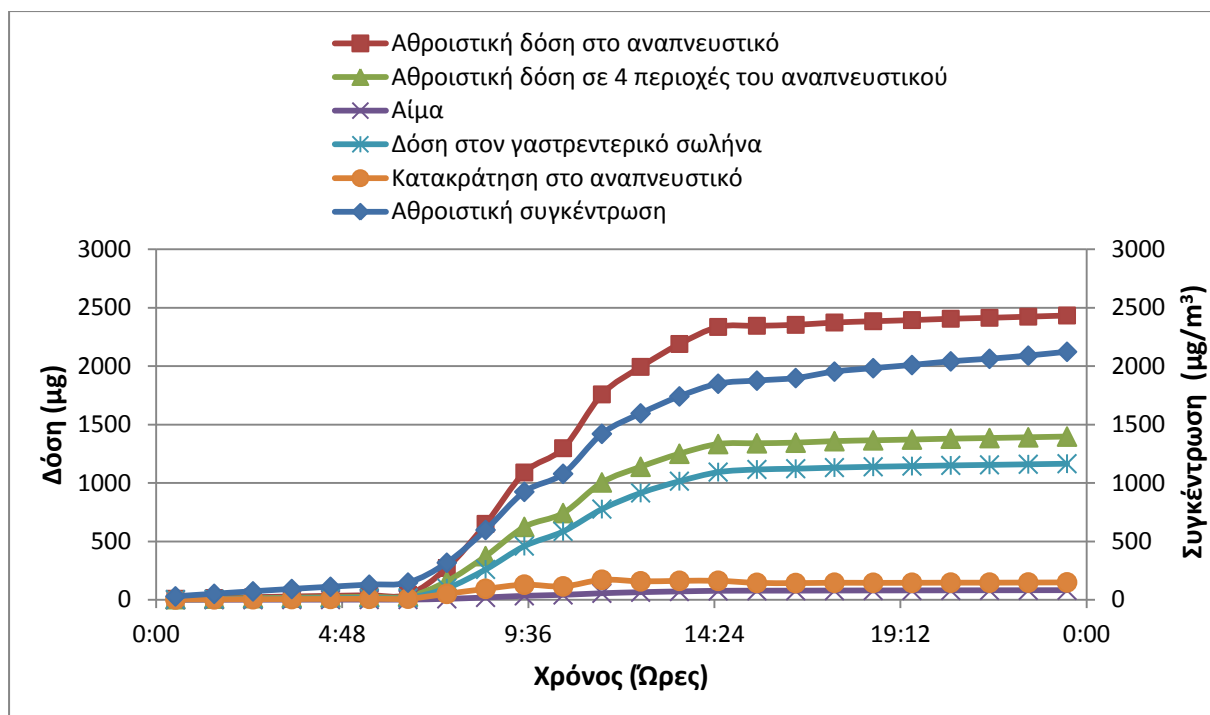
Στο πίνακα 30 δίνεται η μέγιστη, η ελάχιστη και η μέση τιμή της δόσης των σωματιδίων στο τέλος της ημέρας για το γαστρεντερικό, το αίμα και η κατακράτηση τους στο αναπνευστικό. Συγκρίνοντας, τα αποτελέσματα μεταξύ τους παρατηρείτε ότι οι εργάτες της 1^{ης} βάρδιας επιβαρύνονται πολύ περισσότερο σε σχέση με αυτούς της 2^{ης} τόσο στη ραφιναρία όσο και στη χειροδιαλογή. Επιπλέον, το μεγαλύτερο ποσοστό της δόσης απομακρύνεται προς το γαστρεντερικό σύστημα και ένα μικρότερο ποσοστό κατευθύνεται προς το αίμα. Αυτό συμβαίνει διότι προς το αίμα κατευθύνονται τα μικρότερα μεγέθους σωματίδια και στην περίπτωση αυτή αποτελούν μόλις το 10% περίπου της συνολικής μάζας των σωματιδίων.



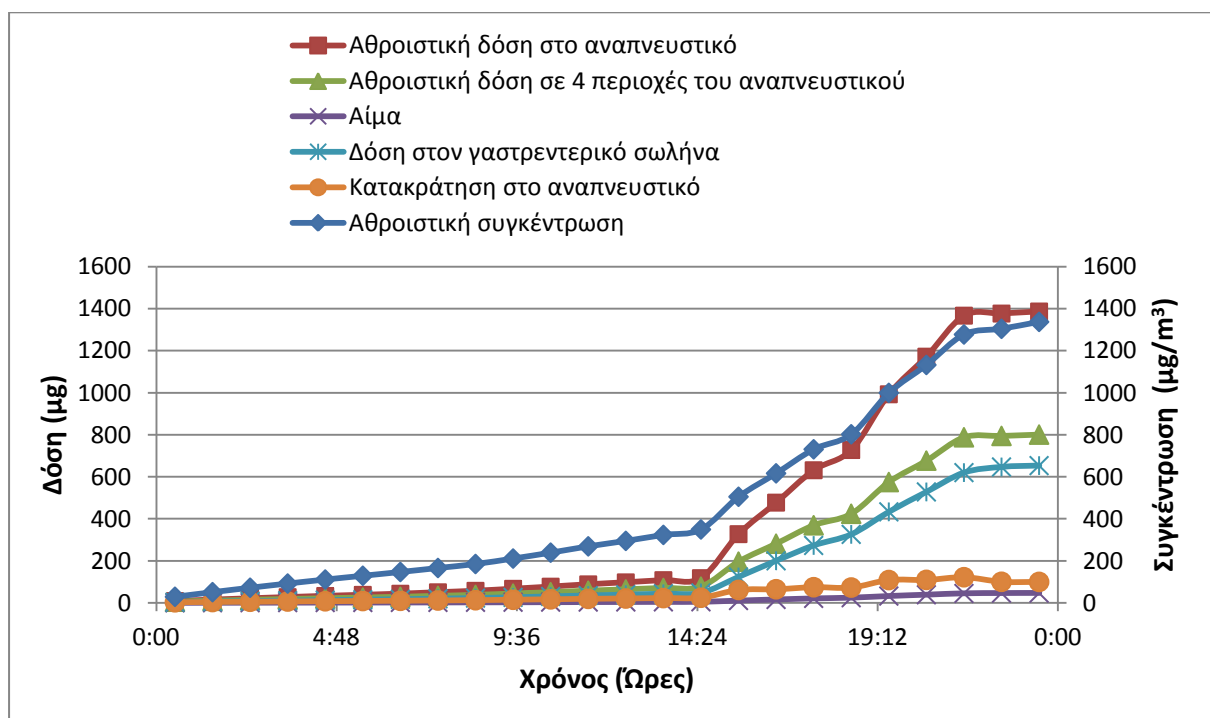
Εικόνα 30: Διάγραμμα συγκέντρωσης, δόσης ως προς το χρόνο για την 1^η βάρδια της ραφιναρίας.



Εικόνα 31: Διάγραμμα συγκέντρωσης, δόσης ως προς το χρόνο για την 2^η βάρδια της ραφιναρίας.



Εικόνα 32: Διάγραμμα συγκέντρωσης, δόσης ως προς το χρόνο για την 1^η βάρδια της χειροδιαλογής.



Εικόνα 33: Διάγραμμα συγκέντρωσης, δόσης ως προς το χρόνο για την 2^η βάρδια της χειροδιαλογής.

Στις εικόνες 30,31,32 και 33 παρουσιάζονται τέσσερα διαγράμματα που αφορούν τη συγκέντρωση και τις δόσεις που υπολογίστηκαν στη διάρκεια μιας μέρας. Υπάρχει ένα διάγραμμα για κάθε βάρδια στη ραφιναρία και στη χειροδιαλογή. Σε όλα τα διαγράμματα με μπλε γραμμή αναπαριστάται η αθροιστική συγκέντρωση καθ' όλη της διάρκεια της ημέρας, με κόκκινη γραμμή η αθροιστική δόση, με πράσινη η αθροιστική δόση πέρα της περιοχής ET1 (πρόσθια ρινική κοιλότητα), με γαλάζια η απομάκρυνση προς το γαστρεντερικό σύστημα, με μωβ η απομάκρυνση προς το αίμα και με πορτοκαλί η κατακράτηση στο αναπνευστικό σύστημα.

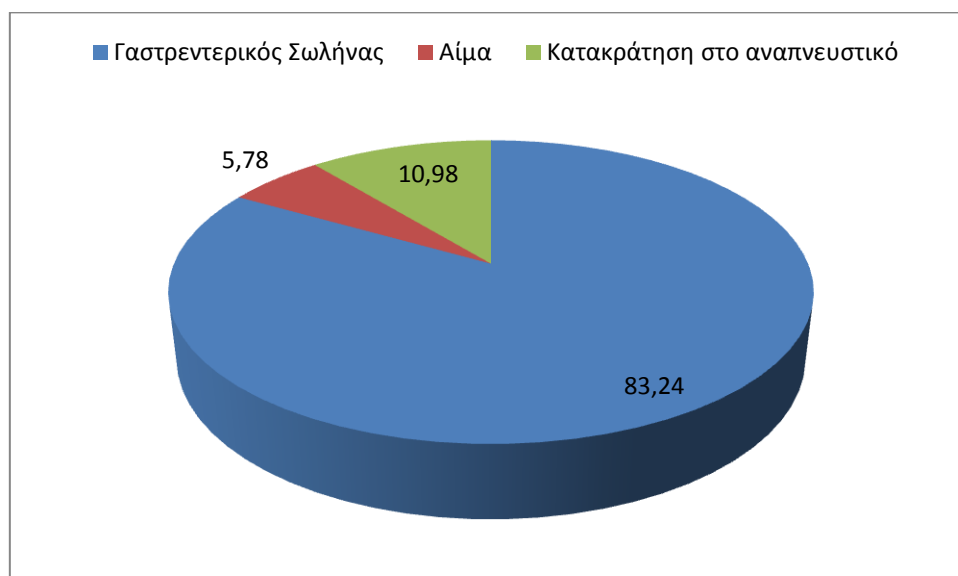
Παρατηρώντας όλα τα διαγράμματα φαίνεται ότι καθώς αυξάνει η αθροιστική συγκέντρωση υπάρχει όμοια αύξηση της αθροιστικής δόσης. Όσο αφορά τη γραμμή της απομάκρυνσης προς το γαστρεντερικό σύστημα βλέπουμε ότι ακολουθεί πανομοιότυπη πορεία με αυτή της δόσης που δέχεται το αναπνευστικό σύστημα. Από της γραμμή της κατακράτησης στο αναπνευστικό γίνεται αντιληπτό ότι υπάρχει μία κορυφή η οποία σημειώνεται στο τέλος της κάθε βάρδιας και τότε σημειώνεται η μέγιστη κατακράτηση. Τέλος, η γραμμή του αίματος ανεβαίνει περίπου γραμμικά με τη κλίση της να εξαρτάται από την έκθεση του εργάτη σε διαφορετικές συγκεντρώσεις.

Επιπλέον υπολογίστηκε η αθροιστική δόση για ολόκληρο το 24-ωρο για τη χειροδιαλογή και τη ραφιναρία και στις δύο βάρδιες. Βρέθηκε ότι η συνολική αθροιστική δόση που δέχεται ένας εργαζόμενος του Ε.Μ.Α.Κ. είναι 6 – 8,5 φορές υψηλότερη από κάποιον που εκτίθεται στις συγκεντρώσεις του υποβάθρου. Στον πίνακα 31 δίνεται αναλυτικά ο λόγος της αθροιστικής δόσης σε κάθε περίπτωση προς του υποβάθρου.

	Αθροιστική δόση (μέσος όρος) (μg)	Υπόβαθρο (μg)	Λόγος αθροιστικής δόσης προς υπόβαθρο
Χειροδιαλογή 1η βάρδια	3215,46	372,27	8,64
Χειροδιαλογή 2η βάρδια	2145,50	372,27	5,76
Ραφιναρία 1η βάρδια	3016,57	372,27	8,10
Ραφιναρία 2η βάρδια	2447,09	372,27	6,57

Πίνακας 31: Αθροιστική δόση, δόση υποβάθρου και λόγος αθροιστικής δόσης προς υποβάθρου για όλες τις περιπτώσεις.

Ο λόγος που υπολογίστηκε η αθροιστική συγκέντρωση όλων των περιοχών του αναπνευστικού εκτός από την ET1 είναι διότι ισούται με το άθροισμα των σωματιδίων που κατευθύνονται στο γαστρεντερικό σύστημα, το αίμα και αυτών που κατακρατούνται στο αναπνευστικό σύστημα. Πιο συγκεκριμένα, έγινε εξαγωγή των ποσοστών για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις συνυπολογίζοντας και τις δύο βάρδιες για τις περιπτώσεις της ραφιναρίας και της χειροδιαλογής και καταλήξαμε στο διάγραμμα τύπου πίτας της εικόνας 34. Σύμφωνα με αυτό το 83,24% κατευθύνεται προς το γαστρεντερικό, το 5,78% προς το αίμα και το 10,98% κατακρατείται στην περιοχή του αναπνευστικού. Συγκρίνοντας με τα ποσοστά που υπολογίστηκαν για την έκθεση του ανθρώπου από την Β. Αλεξανδροπούλου και Μ. Λαζαρίδη στη Φινοκαλιά της Κρήτης (67,4% προς το γαστρεντερικό, 7,7% προς το αίμα και 24,9% κατακράτηση στο αναπνευστικό) φαίνεται ότι υπάρχει συσχετισμός των αποτελεσμάτων. Μικρή διαφορά παρουσιάζεται στο ποσοστό που κατευθύνεται προς το γαστρεντερικό και σε αυτό της κατακράτησης στο αναπνευστικό σύστημα (Βικτωρία Αλεξανδροπούλου & Μιχάλης Λαζαρίδης 2010).



Εικόνα 34: Η επί τις εκατό απομάκρυνση των σωματιδίων σε όλες τις περιοχές.

6.4 Εκτίμηση βαρέων μετάλλων

Ο υπολογισμός των βαρέων μετάλλων βασίστηκε σε βιβλιογραφικά δεδομένα, τα οποία αναφέρονται στις συγκεντρώσεις τους, για τον εξωτερικό χώρο των ΧΥΤΑ. Στην περίπτωση αυτή μελετάτε ο εσωτερικός χώρος της χειροδιαλογής και της ραφιναρίας, όμως δεν υπήρχαν βιβλιογραφικά δεδομένα που να αναφέρονται στους συγκεκριμένους χώρους. Επειδή, ένα μέρος των εσωτερικών σωματιδίων προέρχεται από αυτά που εισέρχονται από τους εξωτερικούς χώρους προβήκαμε σε μία εκτίμηση της έκθεσης των εργαζομένων στους εσωτερικούς χώρους. Για τον υπολογισμό της κατανομής των βαρέων μετάλλων στο ανθρώπινο σύστημα βρέθηκε ο μέσος όρος των συγκεντρώσεων για τις δύο βάρδιες (συνυπολογίζοντας τη ραφιναρία και τη χειροδιαλογή) και έπειτα τοποθετήθηκαν τα δεδομένα στο μοντέλο ExDom.

Τα βαρέα μέταλλα για τα οποία έγινε η ανάλυση ήταν ο μόλυβδος (Pb), το αρσενικό (As) και τέλος το κάδμιο. Στον πίνακα 32 παρουσιάζετε το ποσοστό των μετάλλων στις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων όπως βρέθηκε βιβλιογραφικά (Κοπανάκης 2012; Koshy 2009; Han 2011).

Metal in PM₁₀	Ποσοστό (%)	1η βάρδια (mg/m³)	2η βάρδια (mg/m³)	Όρια (mg/m³)
Αρσενικό (As)	0,015	$4,3 \times 10^{-5}$	$3,4 \times 10^{-5}$	0,01
Μόλυβδος (Pb)	0,29	$8,4 \times 10^{-4}$	$6,6 \times 10^{-4}$	0,05
Κάδμιο (Cd)	0,001	$2,9 \times 10^{-6}$	$2,3 \times 10^{-6}$	0,005

Πίνακας 32: Ποσοστό μετάλλων στα αιωρούμενα σωματίδια.

Επιπλέον, στον πίνακα 32 παρατίθενται οι συγκεντρώσεις των μετάλλων όπως αυτές προέκυψαν με βάση τις μέσες τιμές συγκέντρωσης σε κάθε βάρδια όπως και τα όρια τους. Τα όρια αυτά θεσπίστηκαν από το Occupational Safety & Health Administration (OSHA) of the US Department και όπως γίνεται αντιληπτό οι συγκεντρώσεις βρίσκονται εντός του νομοθετικού πλαισίου και στις τρεις περιπτώσεις.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε ότι οι πιο επιβαρυνμένες περιοχές από το αρσενικό είναι οι πνεύμονες και οι μύες, από το μόλυβδο τα κόκκαλα και το αίμα ενώ από το κάδμιο οι πνεύμονες και το εντερικό σύστημα. Επίσης, όσο αφορά το κάδμιο υπολογίστηκε η πορεία του για 1500 ώρες μετά την έκθεση του εργαζομένου, χωρίς όμως αυτός να εκτεθεί ξανά σε συγκεντρώσεις καδμίου μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα. Αυτό έγινε για να δειχθεί το πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα που παραμένει το κάδμιο στον οργανισμό, αφού είναι ένα μέταλλο που απορροφάται πολύ αργά από τον οργανισμό σε σχέση

με το αρσενικό και το μόλυβδο. Επίσης, αξίζει να επισημανθεί η διασπορά του αρσενικού και του μόλυβδου σε ολόκληρο τον οργανισμό σε σχέση με το κάδμιο που συγκεντρώνεται σε λιγότερα όργανα του ανθρώπινου οργανισμού. Τέλος, στο παράρτημα Β παρουσιάζονται τα αναλυτικά διαγράμματα της δόσης των μετάλλων στα όργανα του ανθρώπινου οργανισμού για τις δύο βάρδιες.

7. ΣΥΝΟΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως θέμα την μελέτη των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων και της ανθρώπινης έκθεσης των εργαζομένων στους χώρους της χειροδιαλογής και της ραφιναρίας του E.M.A.K. Χανίων. Αναλυτικότερα έγινε υπολογισμός των ρυθμών εκπομπής των σωματιδίων στην αίθουσα της χειροδιαλογής και της έκθεσης που δέχονται οι εργαζόμενοι στους δύο αυτούς χώρους από τα αιωρούμενα σωματίδια.

Αρχικά, έγινε ανάλυση των συγκεντρώσεων για τους δύο χώρους που αναφέρθηκαν τόσο κατά τη διάρκεια των δύο βαρδιών, όσο και κατά τη διάρκεια παύσης των εργασιών. Για τη ραφιναρία διαθέταμε μετρήσεις για 7 ημέρες με χρονικό βήμα τα 5 λεπτά, ενώ για τη χειροδιαλογή 10 ημέρες με χρονικό βήμα τα 5 λεπτά και 6 ημέρες με χρονικό βήμα τα 15 λεπτά.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, στη πρώτη βάρδια εντοπίστηκαν υψηλότερες συγκεντρώσεις συγκριτικά με τη δεύτερη για τους δύο αυτούς εσωτερικούς χώρους. Επίσης, στη χειροδιαλογή παρατηρήθηκαν μεγάλες διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων, ενώ στη ραφιναρία δεν εντοπίστηκαν μεταβολές. Ουσιαστικά, το γεγονός αυτό οφείλεται στο είδος των εργασιών που επιτελούνται στους δύο παραπάνω εσωτερικούς χώρους και στον αριθμό των εργατών που απασχολούνται σε κάθε περίπτωση (στη χειροδιαλογή 14 ενώ στη ραφιναρία 2). Επίσης, καταλυτικό ρόλο διαδραματίζει ότι οι μετρήσεις της ραφιναρίας έγιναν έξω ακριβώς από το χώρο. Επιπλέον, στη ραφιναρία κατά τη διάρκεια παύσης των εργασιών δεν παρατηρείται ουσιαστική μείωση της συγκέντρωσης. Αυτό υποδεικνύει την ύπαρξη συνεχών εκπομπών στο χώρο. Το συγκεκριμένο γεγονός οφείλεται στο ότι το παραγόμενο κομπόστ εκπέμπει με συνεχή ρυθμό σωματίδια. Κάτι παρόμοιο δεν σημειώνεται στη χειροδιαλογή, αφού η τιμή της συγκέντρωσης μειώνεται σε χαμηλά επίπεδα μετά το πέρας των εργασιών.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός των ρυθμών εκπομπής με τη χρήση ενός μικροπεριβαλλοντικού μοντέλου ισοζυγίου μάζας. Αρχικά, έγινε υπολογισμός των στιγμιαίων ρυθμών εκπομπής με βάση τις στιγμιαίες τιμές της μεταβολής της συγκέντρωσης για κάθε ημέρα των δεδομένων. Οι ρυθμοί εκπομπής υπολογίστηκαν κατά μέσο όρο ή σε ολόκληρο τον όγκο της αίθουσας της χειροδιαλογής, ο οποίος υπολογίστηκε περίπου 2000m³. Έπειτα, με τις τιμές αυτές των ρυθμών εκπομπής υπολογίζονται οι τιμές της συγκέντρωσης. Όπως ήταν αναμενόμενο, εφόσον οι τιμές των ρυθμών εκπομπής που υπολογίστηκαν προέρχονταν από τις στιγμιαίες μεταβολές της συγκέντρωσης, ο επαναπροσδιορισμός των

δεδομένων υπήρξε ικανοποιητικός. Χαρακτηριστικά ο μέσος όρος των συντελεστών συσχέτισης μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και των αποτελεσμάτων του μοντέλου για όλες τις ημέρες υπολογίστηκε στα 0,85. Συμπερασματικά μπορεί να ειπωθεί ότι το μοντέλο μπορεί να προσεγγίσει με μεγάλη ακρίβεια τους στιγμιαίους ρυθμούς εκπομπής. Ουσιαστικά, ο υπολογισμός των στιγμιαίων τιμών των ρυθμών εκπομπής έγινε ώστε να δοθεί μια γενική εικόνα της συγκέντρωσης για το χώρο της χειροδιαλογής. Όμως, τα αποτελέσματα αυτά δεν αποτελούν αντιπροσωπευτικές τιμές της μέσης κατάστασης της συγκέντρωσης που επικρατεί στην αίθουσα αυτή.

Απώτερος σκοπός της συγκεκριμένης μελέτης είναι ο υπολογισμός κάποιων αντιπροσωπευτικών τιμών των ρυθμών εκπομπής, κατά χρονικά διαστήματα στη διάρκεια της ημέρας, οι οποίοι θα έχουν την δυνατότητα να προσομοιώνουν με επιτυχία τη μέση κατάσταση της συγκέντρωσης στη αίθουσα της χειροδιαλογής, για τη πληθώρα των ημερών. Για τον υπολογισμό των αντιπροσωπευτικών αυτών τιμών εργαστήκαμε με την ίδια μεθοδολογία όπως προηγουμένως όμως, έγινε χρήση διαφορετικών χρονικών διαστημάτων. Έγινε χρήση των ημερών για τις οποίες υπήρχαν πλήρη δεδομένα για όλο το εικοσιτετράωρο στα χρονικά διαστήματα που περιλάμβαναν από δύο και περισσότερες συνεχόμενες ημέρες πειραματικών μετρήσεων. Σύμφωνα με τα παραπάνω κριτήρια προέκυψαν τα εξής χρονικά διαστήματα: 21-3,22-3,27-3,28-3,29-3 (2012) , 3-4,4-4,5-4 (2012) και 30-6,1-7,2-7 (2010). Για την επίτευξη των παραπάνω έγινε χρήση του μέσου όρου των συγκεντρώσεων ανά μία ώρα.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι ρυθμοί εκπομπής μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επίσης, για τα ίδια χρονικά διαστήματα της ημέρας για όλες τις ημέρες του διαστήματος βρέθηκε ότι οι ρυθμοί εκπομπής συσχετίζονται κατά μεγάλο βαθμό μεταξύ τους. Αυτό υποδεικνύει ότι υπάρχει περιοδικότητα της συγκέντρωσης μεταξύ των ημερών. Πιο συγκεκριμένα, ολόκληρο το 24-ωρο (από τις 6:30 όπου ξεκινάει η πρώτη βάρδια μέχρι την ίδια ώρα το επόμενο πρωί), χωρίστηκε σε 4 διαφορετικά διαστήματα. Επιπλέον, παρατηρήθηκε αύξηση των ρυθμών εκπομπής για το 2012 σε σχέση με το 2010. Η διαφορά αυτή πιθανόν οφείλετε στην αύξηση των εισερχόμενων αποβλήτων προς διαχωρισμό και στη μεταβολή της ποιότητας τους. Έτσι, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του 2012, καταλήξαμε στις τιμές του πίνακα 33, τα οποία βρίσκονται πιο κοντά στη πραγματικότητα.

Χρονικό διάστημα	06:30-11:30	11:30-19:30	19:30-21:30	21:30-6:30
Ρυθμός εκπομπής ($\mu\text{g}/\text{h}\times\text{m}^3$)	360 $\pm$ 60	90 $\pm$ 30	360 $\pm$ 60	0

Πίνακας 33: Τελικοί ρυθμοί εκπομπής κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Συγκεντρωτικά, οι ρυθμοί εκπομπής φτάνουν έως τα 360 $\mu\text{g}/\text{s}$ για τις πρώτες πρωινές ώρες και για τα διαστήματα πριν το τέλος των βάρδιών. Οι αυξημένες αυτές τιμές, όπως έγινε ανάλυση και προηγουμένως, οφείλονται στη λειτουργία της δεύτερης ταινίας, όπου μεταφέρει το σύμμικτο κατά τις πρωινές ώρες, ενώ στο τέλος της δεύτερης βάρδιας γίνεται καθαρισμός του χώρου. Το μοντέλο υπολόγισε με τη χρήση των ρυθμών εκπομπής τις νέες τιμές της συγκέντρωσης και η σύγκριση τους με τα πειραματικά δεδομένα υπήρξε ικανοποιητική. Άρα, το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της ποιότητας του αέρα, ενώ τα τελικά αυτά αποτελέσματα μπορούν να αξιοποιηθούν για τη λήψη μέτρων προστασίας του εργατικού προσωπικού με τη βελτίωση των συνθηκών του χώρου (π.χ. εξαερισμός).

Επιπλέον, με τη χρήση του μοντέλου ExDom πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός της δόσης των εργαζομένων για τη ραφιναρία και τη χειροδιαλογή ξεχωριστά σε κάθε βάρδια. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα οι εργαζόμενοι της πρώτης βάρδιας επιβαρύνονται περισσότερο και στις δύο περιπτώσεις. Ακόμα, υπολογίστηκε η δόση σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού. Το μεγαλύτερο ποσοστό των σωματιδίων βρέθηκε ότι κατακρατείται στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα (91,89%) ένα μικρότερο ποσοστό κατακρατείται στην τραχειοβρογχική περιοχή (3,39%) και το υπόλοιπο κατευθύνεται στη κυψελιδική περιοχή (4,72%). Το παραπάνω αποτέλεσμα ήταν πλήρως αναμενόμενο διότι μόνο περίπου το 10% της μάζας των σωματιδίων είναι λεπτά και έχουν την ικανότητα να διεισδύσουν στο ύστερο αναπνευστικό σύστημα.

Συγχρόνως, υπολογίστηκε η απομάκρυνση των σωματιδίων στον γαστρεντερικό σωλήνα, η απορρόφηση στο αίμα και η κατακράτηση των σωματιδίων στο αναπνευστικό. Από τα αποτελέσματα έγινε αντιληπτό ότι οι εργάτες της πρώτης βάρδιας επιβαρύνονται περισσότερο από αυτούς της δεύτερης. Ακόμα, βρέθηκε ότι η συνολική αθροιστική δόση που δέχεται ένας εργαζόμενος του Ε.Μ.Α.Κ. είναι 6 – 8,5 φορές υψηλότερη από κάποιον που εκτίθεται στις συγκεντρώσεις του υποβάθρου. Συμπερασματικά, μπορεί να ειπωθεί πως υπάρχει συμφωνία μεταξύ της συγκέντρωσης των σωματιδίων, της δόσης και της απομάκρυνσης τους στα υπόλοιπα όργανα του σώματος. Αναλυτικότερα, η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων, η δόση τους

στο αναπνευστικό και η απομάκρυνση τους στο ανθρώπινο σώμα είναι μεγέθη ανάλογα.

Τέλος, προβήκαμε σε μία εκτίμηση της συγκέντρωσης και μετέπειτα της δόσης βαρέων μετάλλων στον οργανισμό. Ουσιαστικά, πρόκειται για εκτίμηση διότι ο υπολογισμός των βαρέων μετάλλων βασίστηκε σε βιβλιογραφικά δεδομένα, τα οποία αναφέρονται στις συγκεντρώσεις τους, για τον εξωτερικό χώρο των ΧΥΤΑ. Τα μέταλλα για τα οποία έγιναν οι υπολογισμοί είναι το αρσενικό, ο μόλυβδος και το κάδμιο. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε ότι οι πιο επιβαρυνμένες περιοχές από το αρσενικό είναι οι πνεύμονες και οι μύες, από το μόλυβδο τα κόκκαλα και το αίμα και από το κάδμιο οι πνεύμονες και το εντερικό σύστημα. Επίσης, αξίζει να επισημανθεί η διασπορά του αρσενικού και του μόλυβδου σε ολόκληρο τον οργανισμό σε σχέση με το κάδμιο που συγκεντρώνεται σε λιγότερα όργανα του ανθρώπινου οργανισμού.

Συμπερασματικά, μπορεί να ειπωθεί ότι για τον υπολογισμό των ρυθμών εκπομπής, θα πρέπει να γίνει μελέτη της δυναμικής των αιωρούμενων σωματιδίων στο χώρο της χειροδιαλογής. Παράγοντες όπως ο αερισμός του χώρου, η καθίζηση, η επαναιώρηση και η διείσδυση των σωματιδίων πρέπει να ερευνηθούν στο πεδίο, ώστε να βρεθεί η συνεισφορά του καθενός στις συνολικές εκπομπές των αιωρούμενων σωματιδίων και στην απομάκρυνση τους.

Τέλος, όπως παρατηρήθηκε κατά τις πρώτες πρωινές ώρες των εργασιών στο χώρο της χειροδιαλογής οι ρυθμοί εκπομπής κυμαίνονται σε πολύ υψηλά επίπεδα. Αυτό οφείλεται κυρίως στη λειτουργία της δεύτερης ταινίας που μεταφέρει τα σύμμεικτα απόβλητα. Οπότε, μία προτεινόμενη λύση για τον περιορισμό της αέριας ρύπανσης στο χώρο της χειροδιαλογής είναι ο διαχωρισμός του χώρου δραστηριοποίησης των εργαζόμενων από την ταινία μεταφοράς του σύμμεικτου αποβλήτου η οποία δεν απαιτεί μεγάλο αριθμό προσωπικού (ένα άτομο) για την εύρυθμη λειτουργία της. Ένας δυνατός τρόπος για να πραγματοποιηθεί η συγκεκριμένη λύση είναι η χρήση κάποιου δομικού υλικού, η οποία αποτελεί μία αρκετά ικανοποιητική λύση, λόγω του οικονομικού και αισθητικού χαρακτήρα της.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) A.C.K. Lai, W.W. Nazaroff Supermicron particle deposition from turbulent chamber flow onto smooth and rough vertical surfaces (2005)
- 2) Alvin C.K. Lai, Joanna L.S. Fung, M. Li, K.Y. Leung, Penetration of fine particles through rough cracks. (2012)
- 3) Aslin Sahin-Yilmaz, Robert M. Naclerio, Anatomy and Physiology of the upper airway, (2011)
- 4) Baron P, Willeke K, (2001), Aerosol Measurement, Principles, Techniques and Applications, Second edition, John Wiley & Sons, INC., Publication
- 5) Berger A, Zareba W, Schneider A, Ruckerl R, Ibald-Mulli A, Cyrus J, Wichmann HE, Peters A. Runs of ventricular and supraventricular tachycardia triggered by air pollution in patients with coronary heart disease. *J Occup Environ Med* 2006;48:1149–1158
- 6) Bin Zhao, Ying Zhang, Xianting Li, Xudong Yang, Dongtao Huang, Comparison of indoor aerosol particle concentration and deposition in different ventilated rooms by numerical method. (2004)
- 7) Chan CC, Chuang KJ, Chien LC, Chen WJ, Chang WT. Urban air pollution and emergency admissions for cerebrovascular diseases in Taipei, Taiwan. *Eur Heart J* 2006;27:1238–1244.
- 8) Chun Chen, Bin Zhao, Wanting Zhou, Xinyi Jiang, Zhongchao Tan, A methodology for predicting particle penetration factor through cracks of windows and doors for actual engineering application. (2012)
- 9) Chun Chen, Bin Zhao, Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor. (2011)
- 10) Churg A. The uptake of mineral particles by pulmonary epithelial cell. *Am J Respir Crit Care Med* 1996;154:1124–1140

- 11) Cooper D, Alley F (2004), Έλεγχος αέριας ρύπανσης, εκδόσεις Τζιόλα
- 12) Cozzi E, Hazarika S, Stallings HW III, Cascio WE, Devlin RB, Lust RM, Wingard CJ, Van Scott MR. Ultrafine particulate matter exposure augments ischemia-reperfusion injury in mice. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 2006;291:H894–H903.
- 13) Diociaiuti M, Balduzzi M, De Berardis B, Cattani G, Stacchini G, Ziemacki G, Marconi A, Paoletti L. The two PM(2.5) (fine) and PM(2.5–10) (coarse) fractions: evidence of different biological activity. *Environ Res* 2001;86:254–262.
- 14) Edwards J, Walters S, Griffiths RK. Hospital admissions for asthma in pre-school children: Relationship to major roads in Birmingham. *UK Arch Environ Health* 1994;49:223–227.
- 15) EEA (European Environmental Agency), Air Quality in Europe – 2012 report
- 16) Ferin J. Pulmonary retention and clearance of particles. *Toxicol Letters* 1994;72:121–125.
- 17) Ghio J. Andrew, Robert B. Devlin, Inflammatory lung injury after bronchial installation of air pollution particles, (2001)
- 18) H. Guo, L. Morawska, C. He, D. Gilbert, Impact of ventilation scenario on air exchange rates and on indoor particle number concentrations in an air-conditioned classroom. (2008)
- 19) Han S, Youn JS, Jung YW (2011) Characterization of PM10 and PM25 source profiles for resuspended road dust collected using mobile sampling methodology. *Atmos Environ* 45: 3343-3351
- 20) Heyder Joachim Deposition of inhaled particles in the human respiratory tract and consequences for regional targeting in respiratory drug delivery, (2004)
- 21) Heyder J., Gebhard J., Rudolf G., Schiller C.F., Stahlhofen W., Deposition of particles in the human respiratory tract in the size range 0,005-15μm, (1986)

- 22) James M. Samet, Ana Rappold, Donald Graff, Wayne E. Cascio, Jon H. Berntsen, Yuh-Chin T. Huang, Margaret Herbst, Maryann Bassett, Tracey Montilla, Milan J. Hazucha, Philip A. Bromberg, and Robert B. Devlin "Concentrated Ambient Ultrafine Particle Exposure Induces Cardiac Changes in Young Healthy Volunteers", *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, Vol. 179, No. 11 (2009), pp. 1034-1042.
- 23) James S. Brown, Kibry L. Zeman, William D. Bennett, Ultrafine particle deposition and clearance in the healthy and obstructed lung, (2002)
- 24) Ke Zhong, Xiufeng Yang, Yanming Kang, Effects of ventilation strategies and source locations on indoor particle deposition. (2010)
- 25) Kopanakis I, Eleftheriadis K, Mihalopoulos N, Lydakis-Simantiris N, Katsivela 1 E, Pentari D, Zarmpas P, Lazaridis M (2012) Physico-chemical characteristics of Particulate Matter in the Eastern Mediterranean. *Atmos Res* 106: 93-107
- 26) Koshy L, Jones T, Berube K (2009) Characterization and bioreactivity of respirable airborne particles from a municipal landfill. *Biomarkers* 14(S1): 49-53
- 27) Liwei Tian , Guoqiang Zhang, Yaolin Lin, Jinghua Yu, Jin Zhou, Quan Zhang, Mathematical model of particle penetration through smooth/rough building envelop leakages. (2009)
- 28) Marc Abadie, Karim Limam, Francis Allard, Indoor particle pollution: effect of wall textures on particle deposition. (2001)
- 29) Michael Brauer, Gerard Hoek, Patricia Van Vliet, Kees Meliefste, Paul H. Fischer, Alet Wijga, Laurens P. Koopman, Herman J. Neijens, Jorrit Gerritsen, Marjan Kerkhof, Joachim Heinrich, Tom Bellander, and Bert Brunekreef "Air Pollution from Traffic and the Development of Respiratory Infections and Asthmatic and Allergic Symptoms in Children", *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, Vol. 166, No. 8 (2002), pp. 1092-1098.
- 30) Milner J.T., Dimitropoulou C., Apsimon H.M., Indoor concentrations in buildings from sources outdoors. (2005)

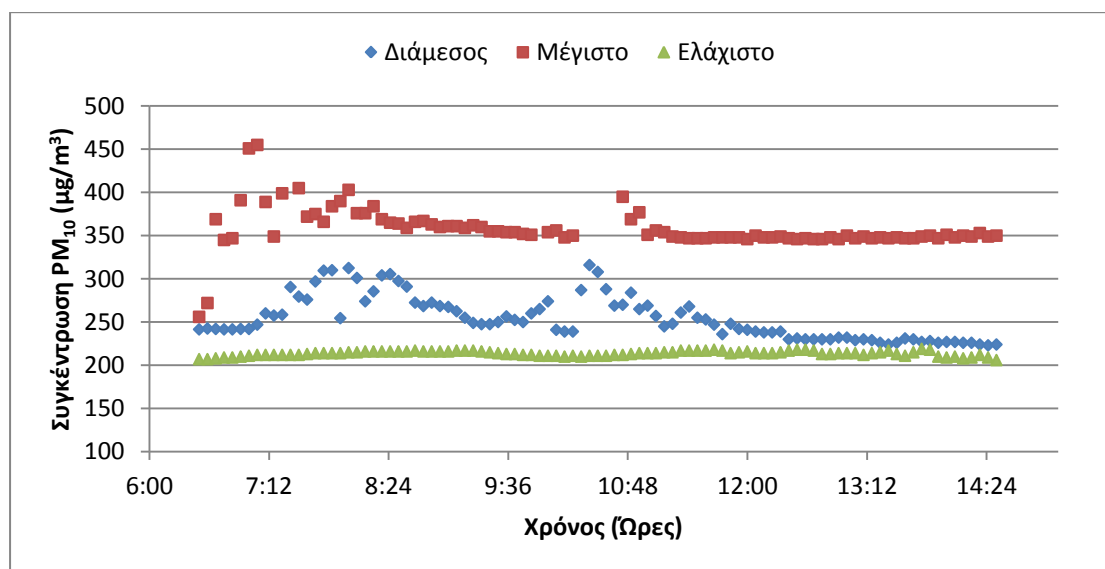
- 31) Moller Winfried, Kathrin Felter, Knut Sommerer, Gerhard Scheuch, Gabriele Meyer, Peter Meyer, Karl Haussinger, Wolfgang G. Kreyling, Deposition, retention and translocation of ultrafine particles from the central airways and lung periphery, (2008)
- 32) Morawska L, Salthammer T (2003), Indoor Environment, Airborne Particles and Settled Dust, Wiley-Vch GmbH & Co. KGaA
- 33) Oberdorster G, Sharp Z, Atudorei V, Elder A, Gelein R, Kreyling W, Cox C. Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. *Inhal Toxicol* 2004;16:437–445.
- 34) Patrick N. Breyse, Gregory B. Diette, Elizabeth C. Matsui, Arlene M. Butz, Nadia N. Hansel, and Meredith C. McCormack "Indoor Air Pollution and Asthma in Children", Proceedings of the American Thoracic Society, Vol. 7, No. 2 (2010), pp. 102-106.
- 35) Peters A., Wichmann H. E., Tuch T., Heinrich J., Heyder J. Respiratory effects are associated with the number of ultrafine particles. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 1997;155:1376–1383.
- 36) Putaud JP, van Dingenen R, Baltensperger U, *et al.* (2003) *A European Aerosol Phenomenology*. Joint Research Centre.
- 37) Richard Shaughnessy, Hai Vu, Particle loadings and resuspension related to floor coverings in chamber and in occupied school environments. (2012)
- 38) Schwartz J, Dockery DW, Neas LM. Is daily mortality associated specifically with fine particles? *J Air Waste Manag Assoc* 1996;46:927–939.
- 39) Schwartz J, Neas LM. Fine particles are more strongly associated than coarse particles with acute respiratory health effects in schoolchildren. *Epidemiology* 2000;11:6–10
- 40) Seaton A, MacNee W, Donaldson K, Godden D. Particulate air pollution and acute health effects. *Lancet* 1995;345:176–178
- 41) S. El Hamdani, K. Limam, M.O. Abadie, A. Bendou, Deposition of fine particles on building internal surfaces. (2008)

- 42) Shuo Wang, Bin Zhao, Bin Zhou, Zhongchao Tan, An experimental study on short-time particle resuspension from inner surfaces of straight ventilation ducts. (2012)
- 43) Tracy L. Thatcher, Alvin C.K. Lai, Rosa Moreno-Jackson, Richard G. Sextro, William W. Nazaroff, Effects of room furnishings and air speed on particle deposition rates indoors. (2002)
- 44) Ulrike Gehring, Alet H. Wijga, Michael Brauer, Paul Fischer, Johan C. de Jongste, Marjan Kerkhof, Marieke Oldenwening, Henriette A. Smit, and Bert Brunekreef "Traffic-related Air Pollution and the Development of Asthma and Allergies during the First 8 Years of Life", American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, Vol. 181, No. 6 (2010), pp. 596-603.
- 45) US EPA (Environmental Protection Agency), National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter; Final Rule (2013)
- 46) US EPA, The national ambient air quality standards for particle pollution, Revised air quality standards for particulate pollution and updates to the air quality index (AQI), (2012)
- 47) VICKI STONE "Environmental Air Pollution", American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, Vol. 162, Supplement: Measurement of Airway Inflammation in Young Children (2000), pp. S44-S47.
- 48) W Birmili, Leibniz Institute for Tropospheric Research, Leipzig, Germany T Hoffmann, Johannes Gutenberg – Universitat Mainz, Mainz, Particulate and Dust Pollution, Inorganic and Organic Compounds, Germany 2006
- 49) World Health Organization (WHO), Air Quality Guidelines for Particulate Matter, Ozone, Nitrogen, Dioxide and Sulfur Dioxide (2006)
- 50) Yunlong Han, Yongmei Hu, Fuping Qian, Effects of air temperature and humidity on particle deposition. (2011)

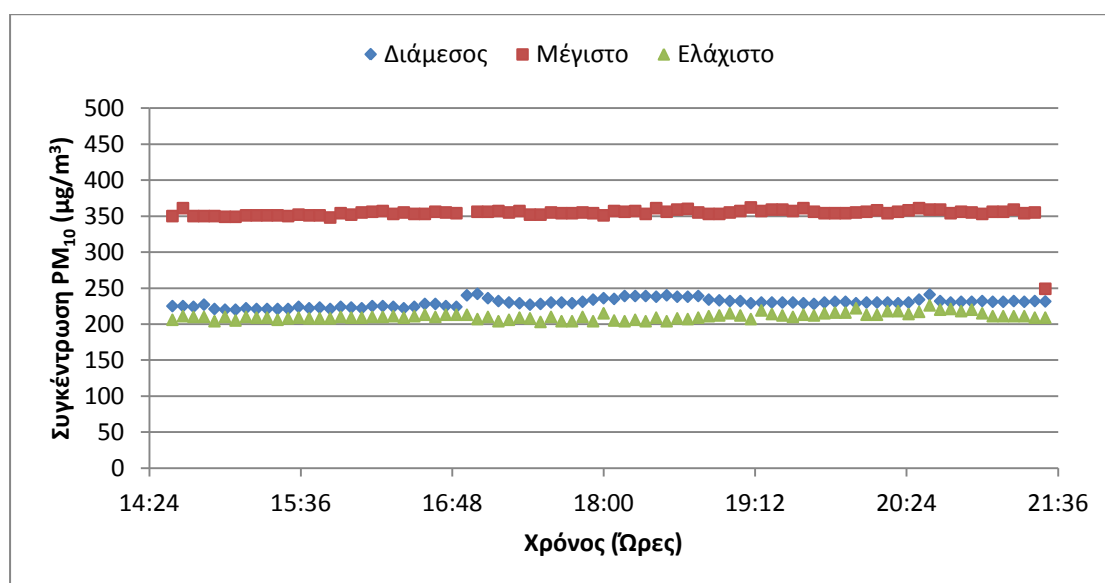
- 51) Γλυτσός Θεόδωρος (2010), Χαρακτηρισμός της ποιότητας του αέρα σε εσωτερικούς χώρους με χρήση μικροπεριβαλλοντικών μοντέλων
- 52) Λαζαρίδης Μιχάλης (2010), Ατμοσφαιρική Ρύπανση με Στοιχεία Μετεωρολογίας, Εκδόσεις Τζιόλα
- 53) Λαζαρίδης Μιχάλης (2008), Ποιότητα Αέρα σε Εσωτερικούς Χώρους, Εκδόσεις Τζιόλα

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

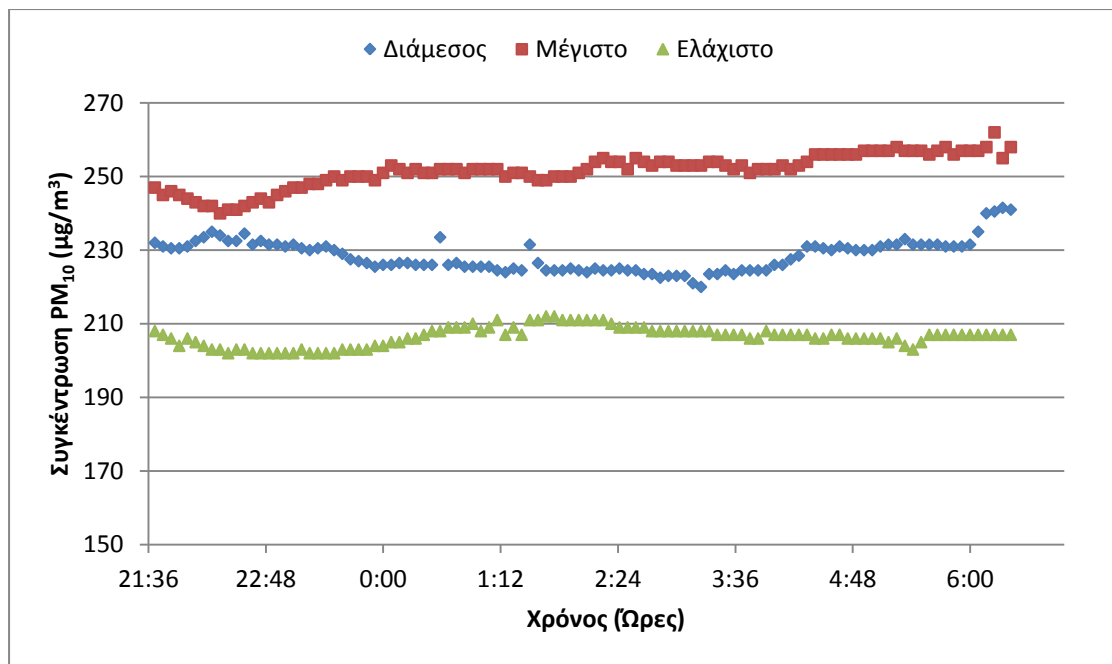
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα της συγκέντρωσης με τις διαμέσους, τα ελάχιστα και τα μέγιστα για τις 2 βάρδιες και κατά τη διάρκεια παύσης των εργασιών και για τη ραφιναρία και τη χειροδιαλογή. Για τη χειροδιαλογή παρουσιάζονται δύο διαγράμματα σε κάθε περίπτωση, όπου τα πρώτα αφορά το χρονικό βήμα των 5 λεπτών, ενώ τα δεύτερα το χρονικό βήμα των 15 λεπτών.



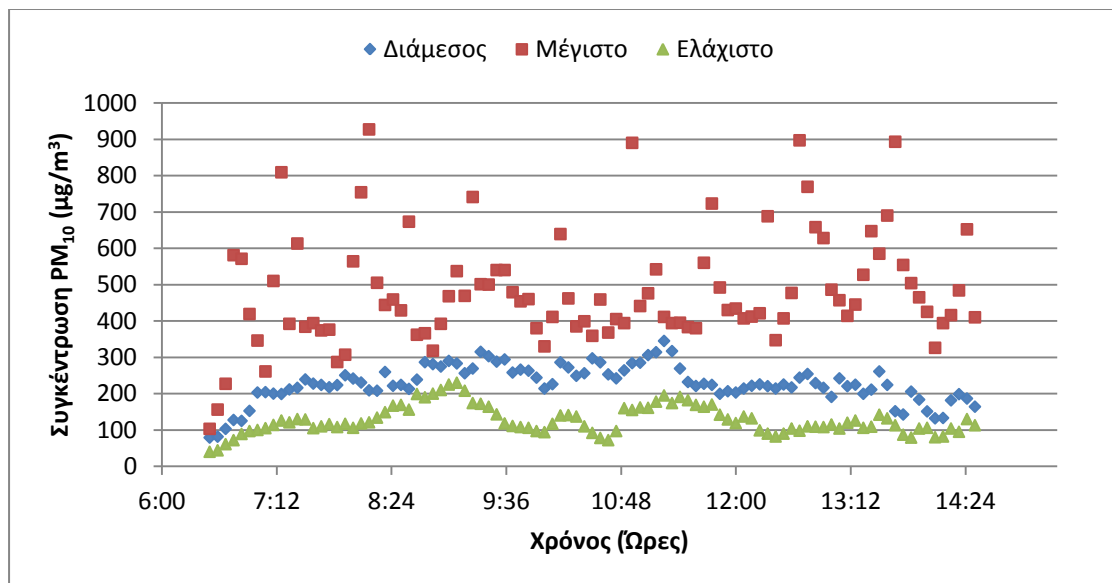
Εικόνα 35: Διάγραμμα της 1^{ης} βάρδιας για τη ραφιναρία.



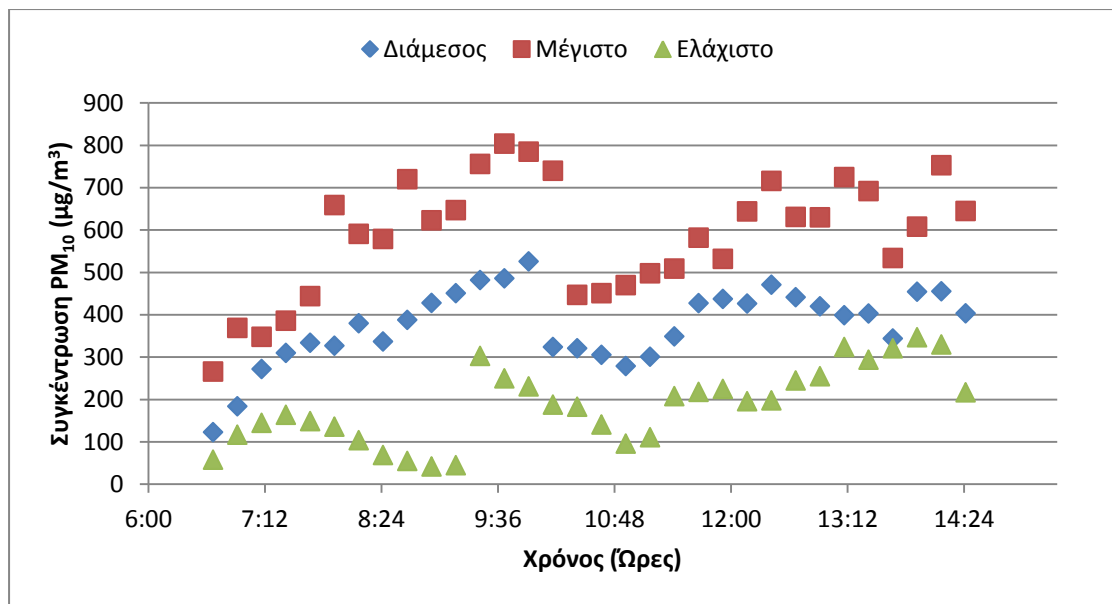
Εικόνα 36: Διάγραμμα της 2^{ης} βάρδιας για τη ραφιναρία.



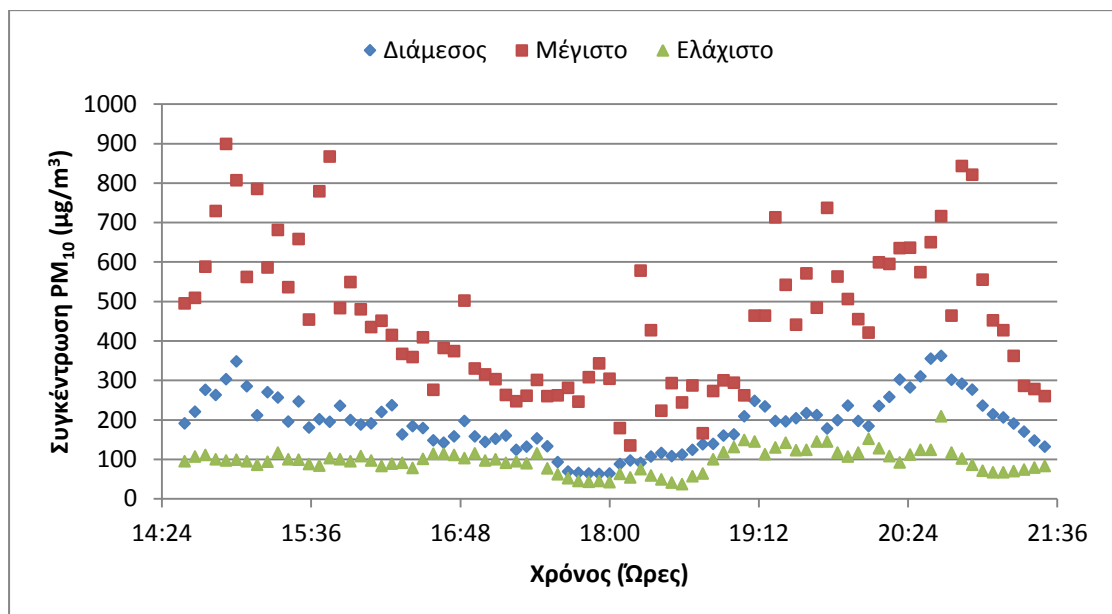
Εικόνα 37: Διάγραμμα κατά τη διάρκεια παύσης των εργασιών για τη ραφιναρία.



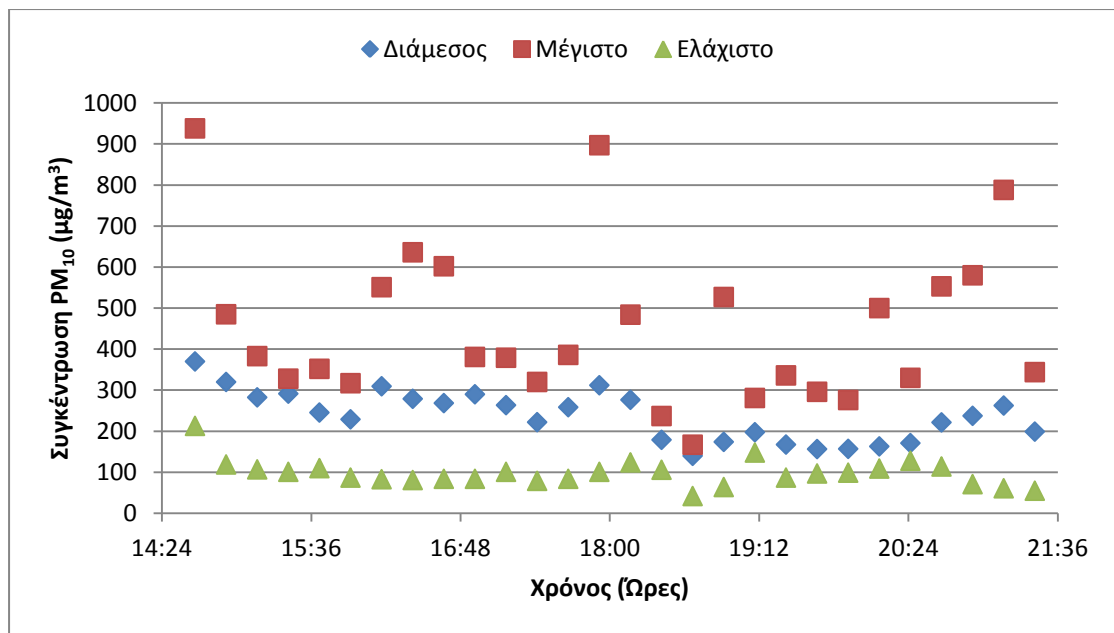
Εικόνα 38: Διάγραμμα για τη 1^η βάρδια στη χειροδιαλογή με χρονικό βήμα τα 5 λεπτά.



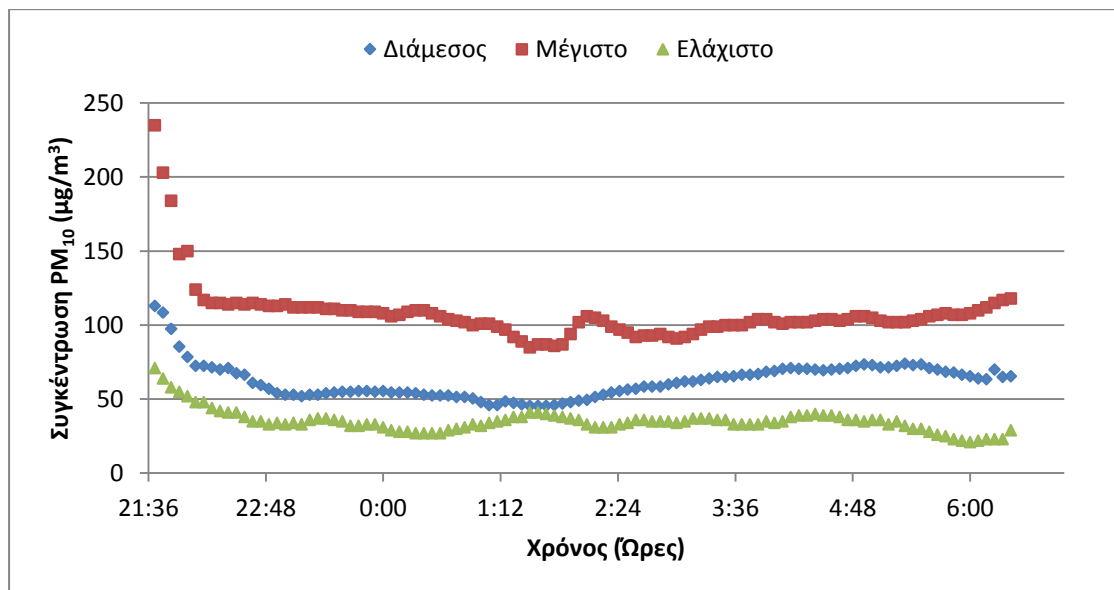
Εικόνα 39: Διάγραμμα για τη 1^η βάρδια στη χειροδιαλογή με χρονικό βήμα τα 15 λεπτά.



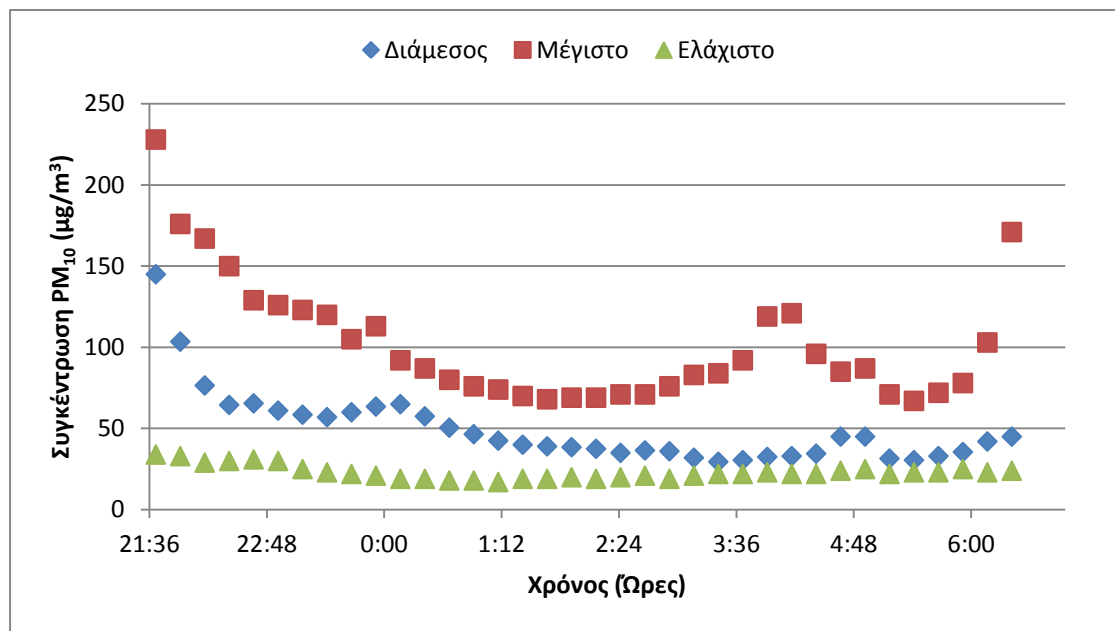
Εικόνα 40: Διάγραμμα για τη 2^η βάρδια στη χειροδιαλογή με χρονικό βήμα τα 5 λεπτά.



Εικόνα 41: Διάγραμμα για τη 2^η βάρδια στη χειροδιαλογή με χρονικό βήμα τα 15 λεπτά.



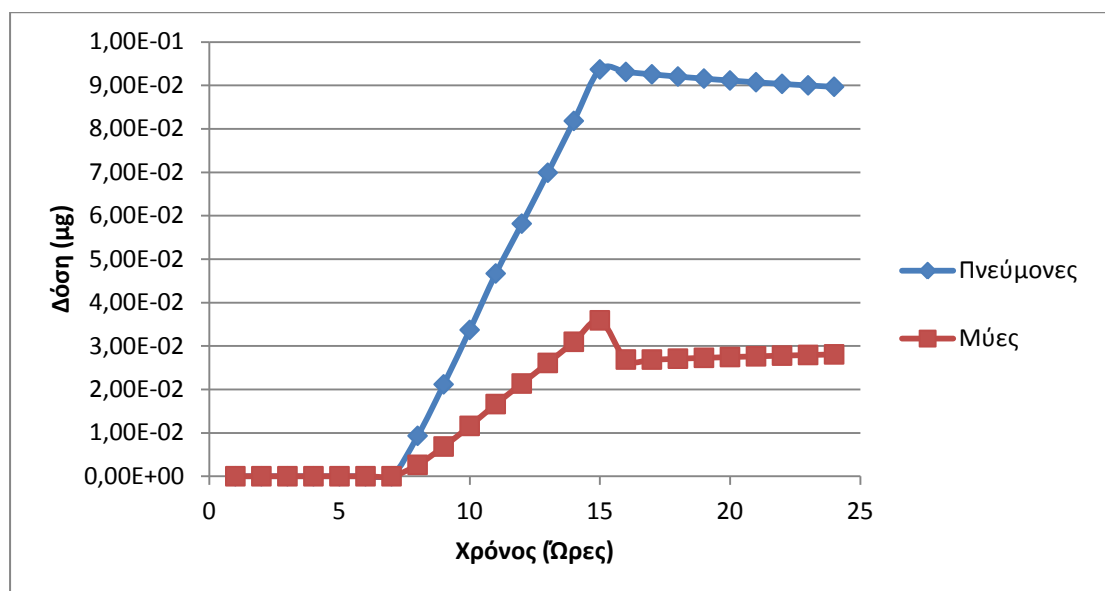
Εικόνα 42: Διάγραμμα κατά τη διάρκεια παύσης των εργασιών για τη χειροδιαλογή με χρονικό βήμα τα 5 λεπτά.



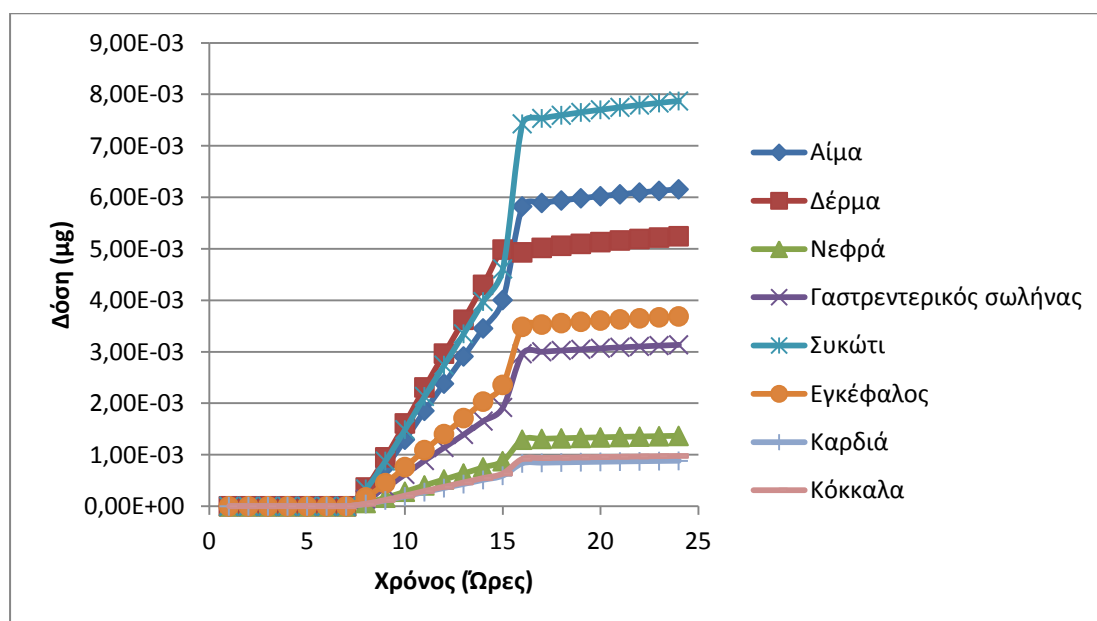
Εικόνα 43: Διάγραμμα κατά τη διάρκεια παύσης των εργασιών για τη χειροδιαλογή με χρονικό βήμα τα 15 λεπτά.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

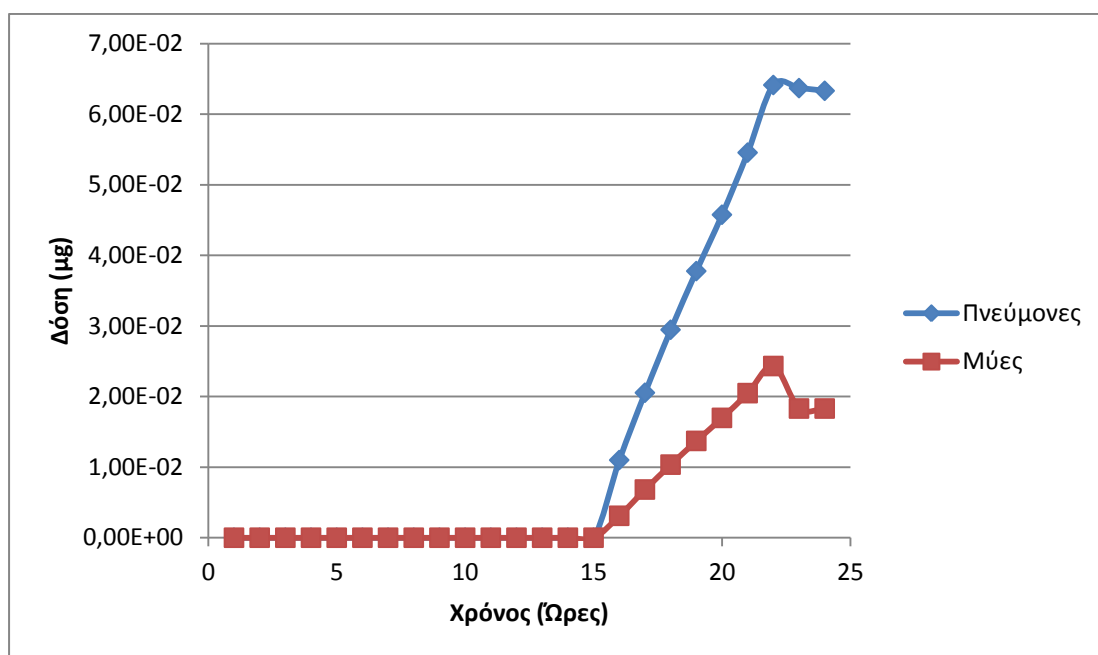
Σε αυτό το παράρτημα παρουσιάζονται τα διαγράμματα της δόσης των βαρέων μετάλλων στα όργανα του ανθρώπινου οργανισμού για τις δύο βάρδιες. Τα διαγράμματα αφορούν το αρσενικό, το μόλυβδο και το κάδμιο.



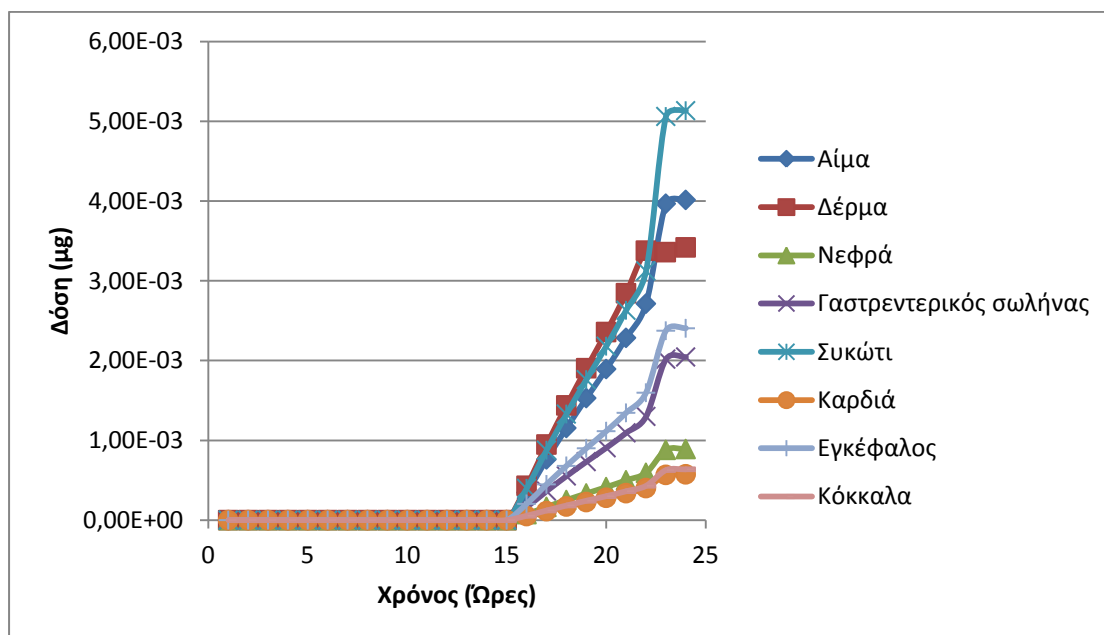
Εικόνα 44: Διάγραμμα 1ης βάρδιας για το αρσενικό.



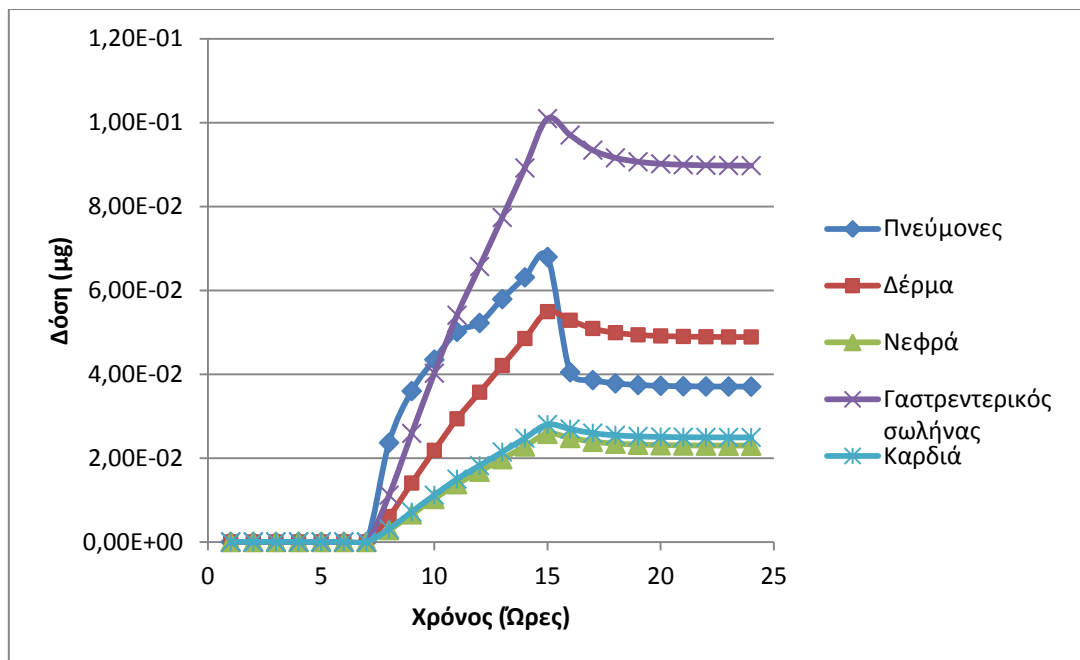
Εικόνα 45: Διάγραμμα 1ης βάρδιας για το αρσενικό.



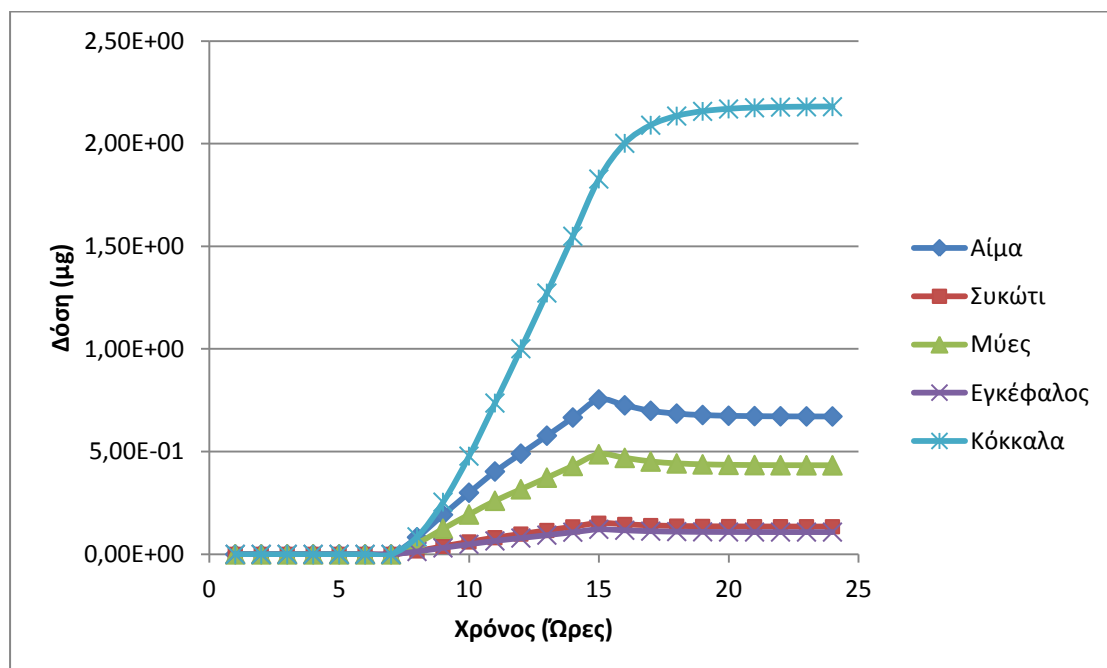
Εικόνα 46: Διάγραμμα 2ης βάρδιας για το αρσενικό.



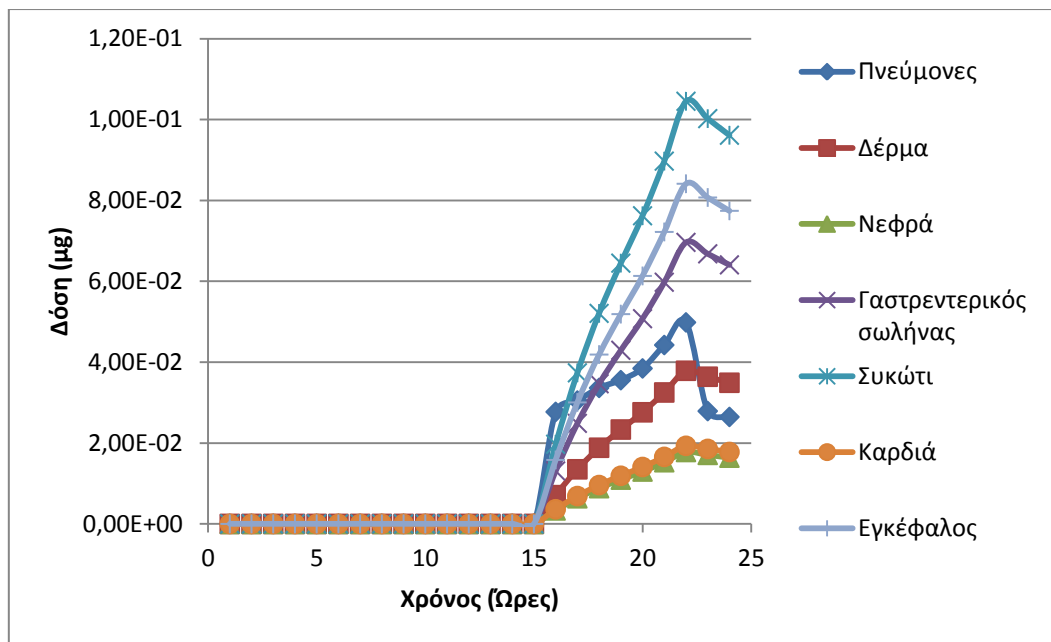
Εικόνα 47: Διάγραμμα 2ης βάρδιας για το αρσενικό.



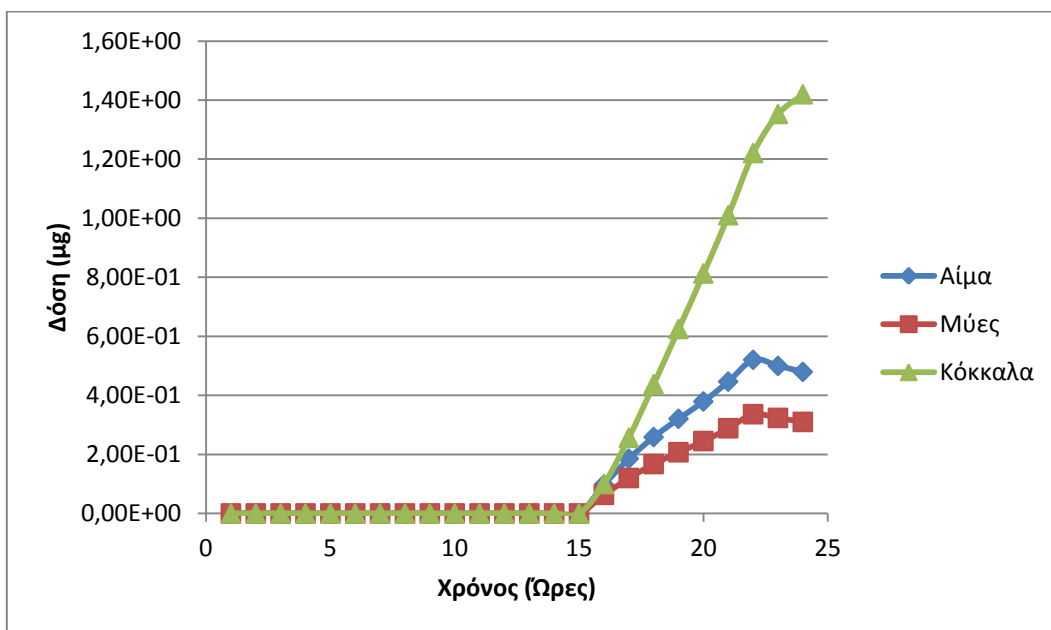
Εικόνα 48: Διάγραμμα 1ης βάρδιας για το μόλυβδο.



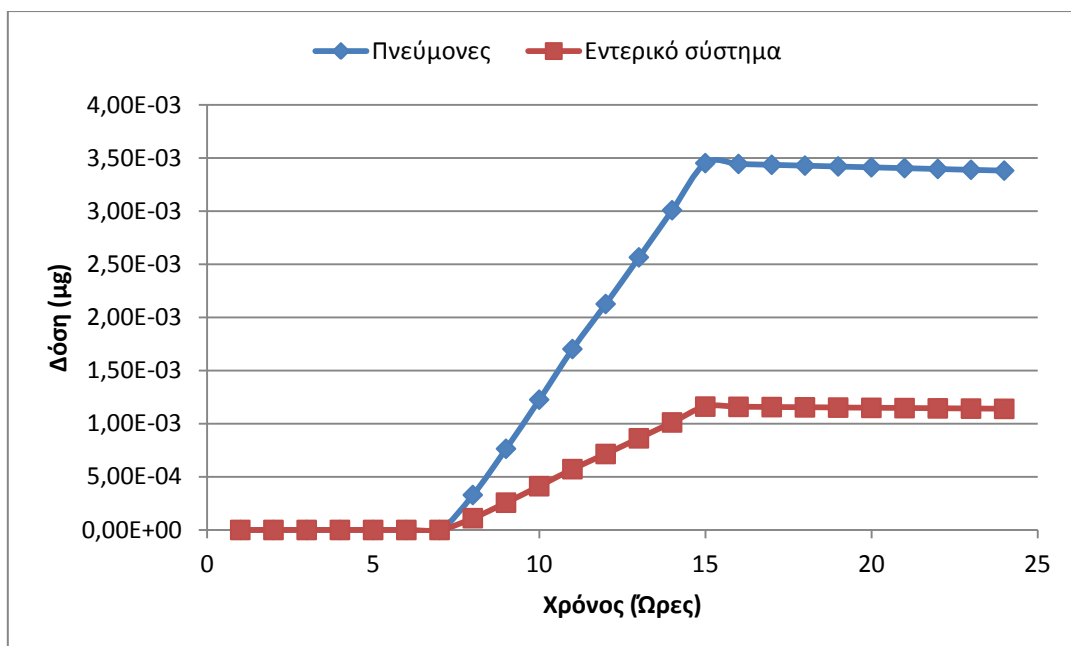
Εικόνα 49: Διάγραμμα 1ης βάρδιας για το μόλυβδο.



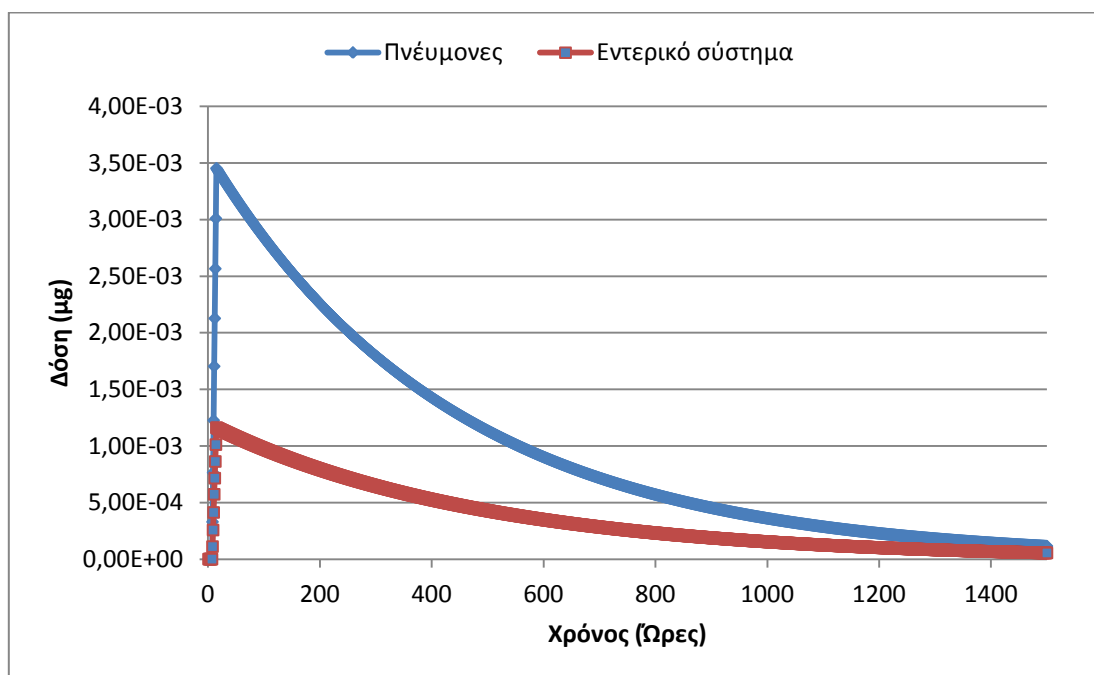
Εικόνα 50: Διάγραμμα 2ης βάρδιας για το μόλυβδο.



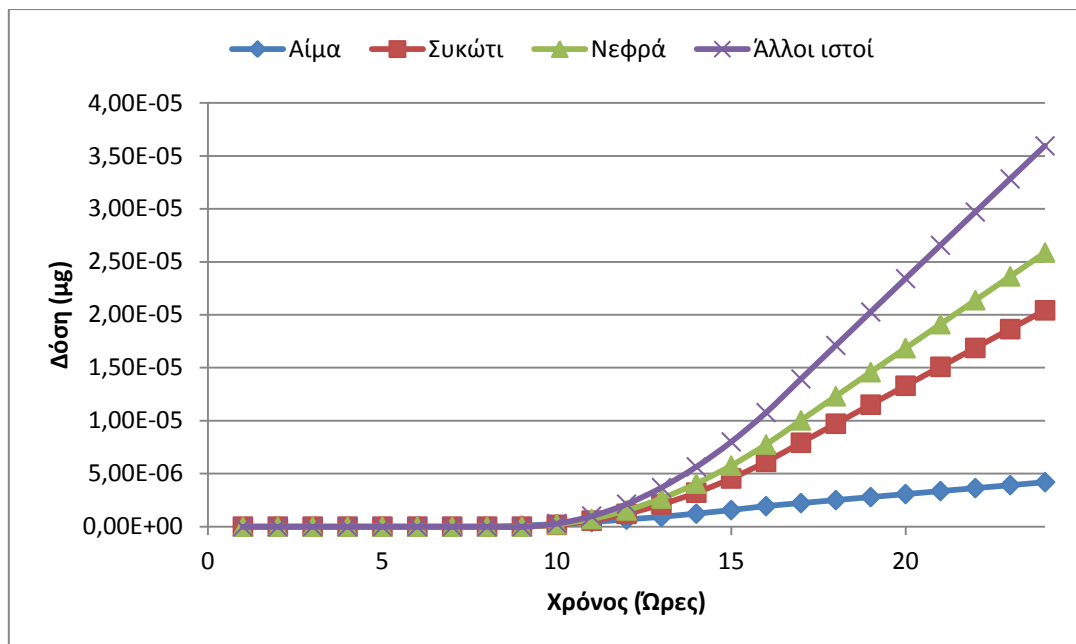
Εικόνα 51: Διάγραμμα 2ης βάρδιας για το μόλυβδο.



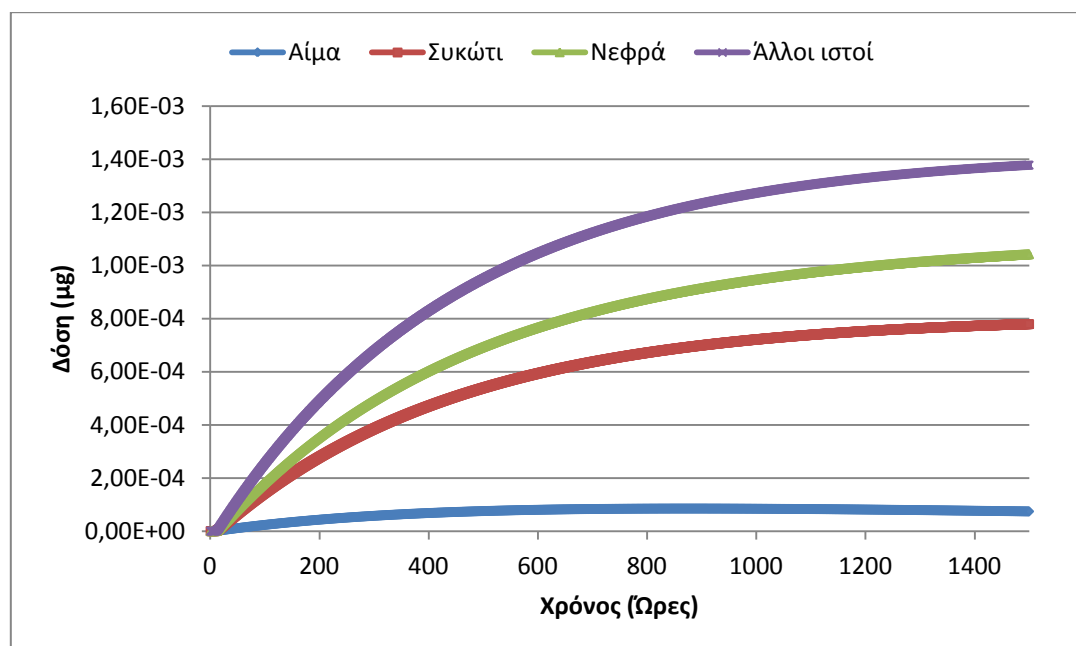
Εικόνα 52: Διάγραμμα της 1ης βάρδιας για το κάδμιο.



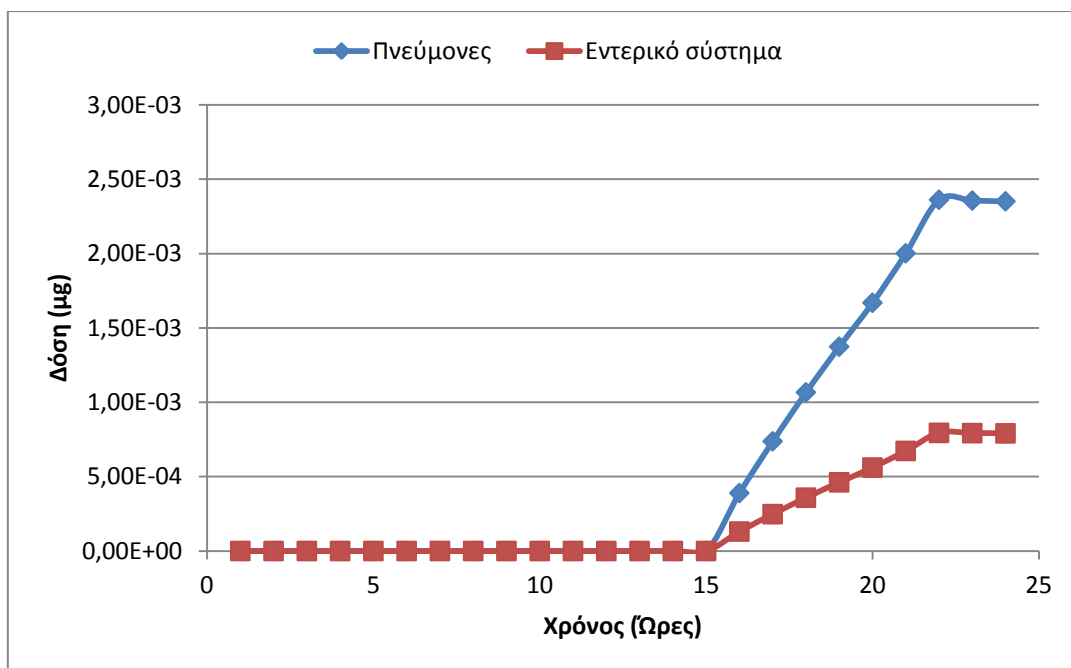
Εικόνα 53: Διάγραμμα της 1ης βάρδιας για το κάδμιο.



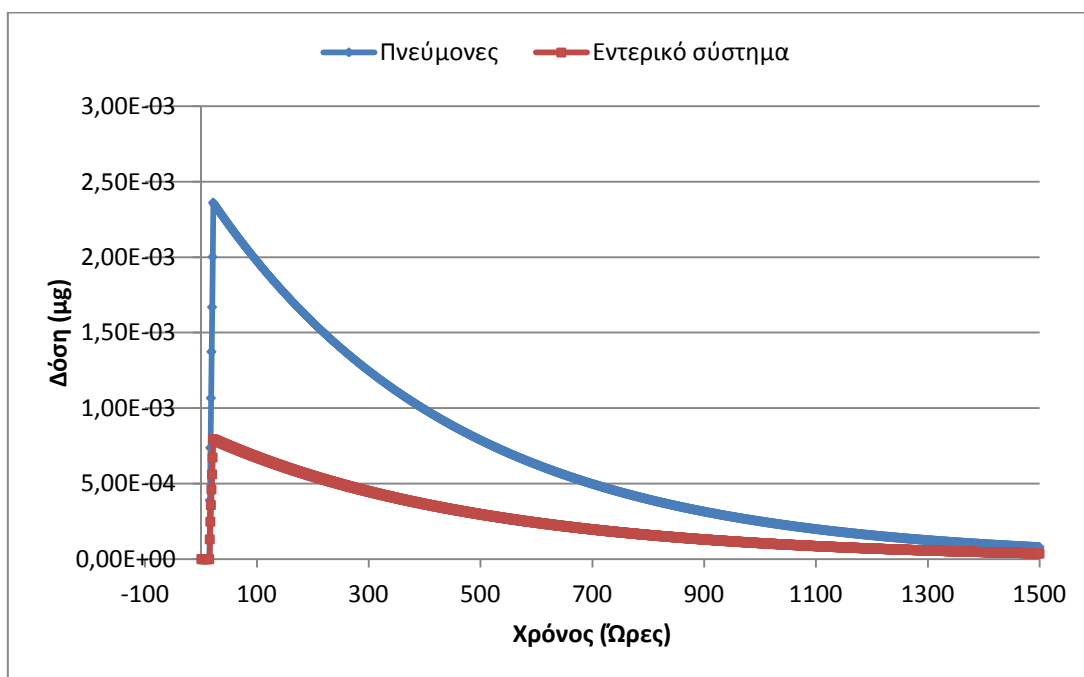
Εικόνα 54: Διάγραμμα 1ης βάρδια για το κάδμιο.



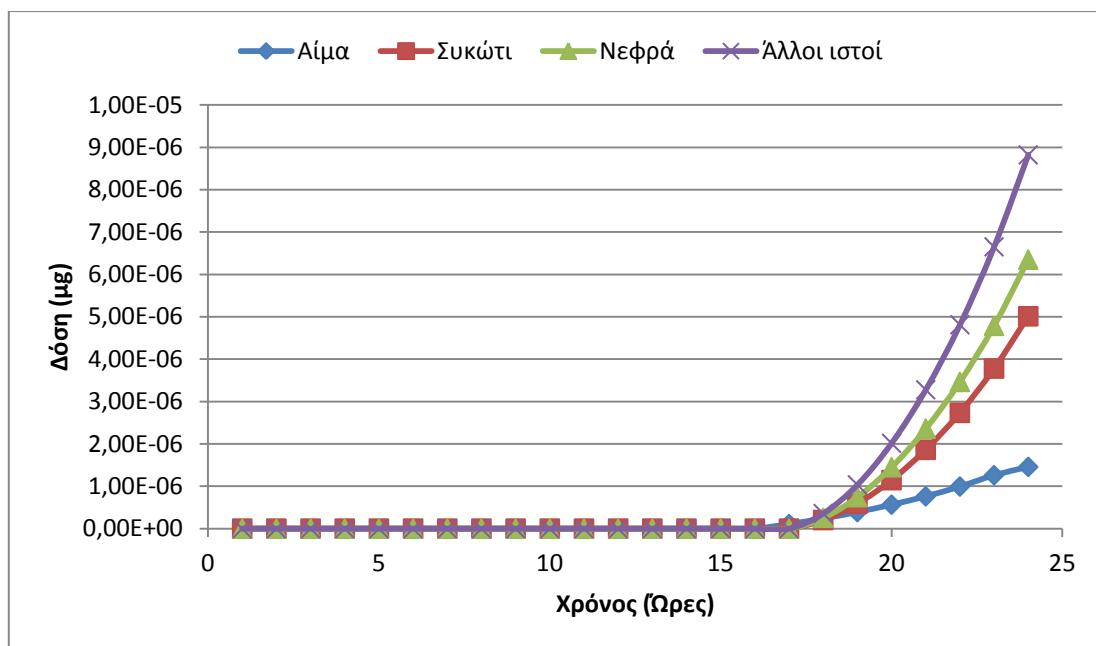
Εικόνα 55: Διάγραμμα 1ης βάρδιας για το κάδμιο.



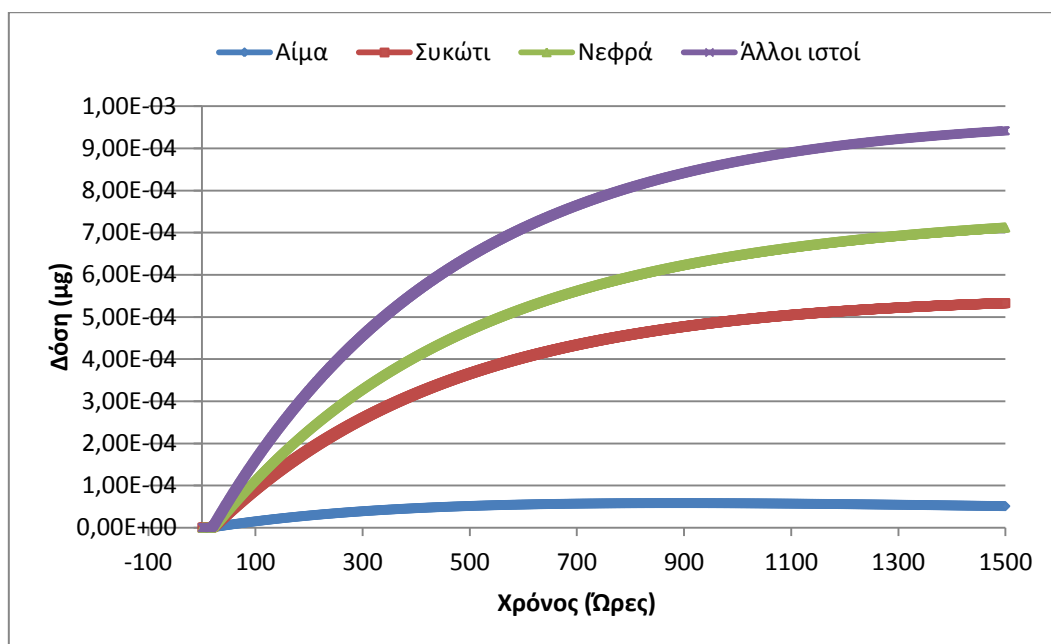
Εικόνα 56: Διάγραμμα 2ης βάρδιας για το κάδμιο.



Εικόνα 57: Διάγραμμα 2ης βάρδιας για το κάδμιο.



Εικόνα 58: Διάγραμμα 2ης βάρδιας για το κάδμιο.



Εικόνα 59: Διάγραμμα 2ης βάρδιας για το κάδμιο.