

---

# ΠΟΣΟΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΔΟΣΗΣ ΣΕ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΣΤΟ ΑΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

---

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΚΡΗΤΗΣ**

ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ ΣΩΤΗΡΙΟΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ  
ΛΑΖΑΡΙΔΗΣ ΜΙΧΑΗΛ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)  
ΞΕΚΟΥΚΟΥΛΩΤΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ  
ΚΑΛΟΓΕΡΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ



## Περίληψη

Η μελέτη της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων στον ατμοσφαιρικό αέρα εσωτερικών και εξωτερικών χώρων και της εφαρμοσμένης δόσης τους στον ανθρώπινο οργανισμό γίνεται διότι τα σωματίδια σε υψηλές συγκεντρώσεις προκαλούν προβλήματα υγείας κυρίως στη καρδιά και τους πνεύμονες όπως χρόνια αποφρακτική πνευμονοπάθεια, καρκίνο του πνεύμονα και στεφανιαία νόσο (Valvanidis Athanasios, Fiotakis Konstantinos, and Vlacogianni Thomais 2008). Βασικό κριτήριο της επικινδυνότητας τους είναι το μέγεθος διότι καθορίζει τη συμπεριφορά και το σημείο εναπόθεσης τους στο αναπνευστικό σύστημα (K.-H. Kim, Kabir, and Kabir 2015). Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στα λεπτά ( $PM_{2.5}$ ) και χονδρά ( $PM_{10}$ ) σωματίδια και εμφανίζουν ποικιλομορφία όσον αφορά τα φυσικά και χημικά τους χαρακτηριστικά. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να υπολογιστεί η έκθεση και δόση σε αιωρούμενα σωματίδια στη πόλη των Χανίων για δύο άτομα διαφορετικής καθημερινότητας και να διερευνηθεί το πως οι δραστηριότητες και το περιβάλλον που βρισκόμαστε επηρεάζουν την εφαρμοσμένη δόση σωματιδίων στον οργανισμό. Το πείραμα έλαβε χώρα σε χώρους όπως το Πολυτεχνείο Κρήτης, η βιβλιοθήκη και το κυλικείο της σχολής, σε ανοιχτά και κλειστά γήπεδα, σε περιοχές στο κέντρο της πόλης κατά τη διάρκεια περιπάτου και σε χώρους αναψυχής (καφετέριες). Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με το όργανο Sidepak, το οποίο υπολογίζει και αποθηκεύει τη συγκέντρωση ολικών σωματιδίων ( $PM_{10}$ ) στην ατμόσφαιρα. Ακολούθησε εξαγωγή και επεξεργασία των μετρήσεων σε H/Y και στη συνέχεια έγινε χρήση του μοντέλου ExDoM (Aleksandropoulou and Lazaridis 2013a) για τον υπολογισμό της δόσης λεπτών και χονδρών σωματιδίων ανά περιοχή του αναπνευστικού συστήματος. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, παρατηρήθηκαν αυξημένες συγκεντρώσεις σωματιδίων στο νυχτερινό κέντρο εργασίας με τιμές που κυμάνθηκαν στα  $76.31 \pm 31.08$   $\mu\text{g}/\text{hour}$ , στους χώρους αναψυχής που επισκέφθηκε ο φοιτητής στα  $70.96 \pm 34.07$   $\mu\text{g}/\text{hour}$  και στο ανοιχτό περιβάλλον στο κέντρο της πόλης των Χανίων με μέση τιμή έκθεσης ανά ώρα τα  $39.14 \pm 26.82$   $\mu\text{g}/\text{hour}$ . Η εφαρμοσμένη δόση για τον εργαζόμενο στον χώρο εργασίας του υπολογίστηκε στα  $80.71 \pm 32.33$   $\mu\text{g}/\text{hour}$  που ήταν και η μέγιστη ποσότητα που έλαβε σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη δραστηριότητα ενώ για τον φοιτητή η μέγιστη ποσότητα παρατηρήθηκε κατά την παραμονή τους σε χώρους αναψυχής (καφετέριες, καταστήματα H/Y) και το αστικό περιβάλλον με μέση τιμή δόσης  $36.65 \pm 30.35$   $\mu\text{g}/\text{hour}$  και  $38.73 \pm 31.11$   $\mu\text{g}/\text{hour}$  αντίστοιχα. Συμπερασματικά, οι κλειστοί χώροι σε σύγκριση με τους εξωτερικούς παρουσιάζουν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων

εξαιτίας των εσωτερικών πηγών ρύπανσης και του ελλιπού αερισμού. Κρίνεται, λοιπόν, απαραίτητη η βελτιστοποίηση των συστημάτων αερισμού, ο σχεδιασμός και κατασκευή των κτιρίων να γίνεται βάση προδιαγραφών που να προωθούν την υγιεινή των χώρων και να συμβάλλουν στην ευημερία των παρευρισκόμενων.

## Πίνακας Περιεχομένων

1	Σωματίδια στην ατμόσφαιρα. ....	3
1.1	Τι είναι τα αιωρούμενα σωματίδια. ....	3
1.2	Φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων. ....	4
1.3	Δημιουργία σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. ....	8
1.4	Αέρια ρύπανση σε εσωτερικούς χώρους. ....	12
1.4.1	Αερισμός ....	13
1.4.2	Σύνδρομο Άρρωστου Κτιρίου ....	13
1.5	Επιπτώσεις των σωματιδίων στην υγεία. ....	15
2	Ανατομία και λειτουργία του αναπνευστικού συστήματος. ....	16
2.1	Ανώτερο αναπνευστικό σύστημα (ET) ....	18
2.2	Τραχειοβρογχική περιοχή (TB). ....	20
2.3	Κυψελιδική περιοχή (Alv). ....	21
2.4	Παράμετροι φυσιολογίας. ....	22
3	Έκθεση ανθρώπων σε αέριους ρύπους. ....	26
3.1	Σωματίδια και άνθρωπος. ....	26
3.2	Εναπόθεση σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα. ....	27
3.2.1	Μηχανισμοί εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα. ....	28
3.2.2	Εφαρμοσμένη δόση στο αναπνευστικό σύστημα. ....	30
3.2.3	Βιολογικοί παράγοντες που επηρεάζουν την εναπόθεση σωματιδίων. ....	34
4	Μεθοδολογία εκπόνησης της παρούσας εργασίας. ....	37

4.1	Όργανο συλλογής δεδομένων και κατανομή μεγέθους μάζας σωματιδίων.....	38
5	Ανάλυση αποτελεσμάτων.....	42
5.1	Ανάλυση αποτελεσμάτων έκθεσης φοιτητή για εσωτερικούς και ανοιχτά περιβάλλοντα. 42	
5.2	Ανάλυση αποτελεσμάτων έκθεσης εργαζομένου νυχτερινό κέντρο διασκέδασης για εσωτερικούς χώρους και εξωτερικά περιβάλλοντα.....	53
6	Εφαρμογή μοντέλου ExDoM για τον υπολογισμό δόσης και απομάκρυνσης σωματιδίων έκθεσης φοιτητή.....	63
6.1	Υπολογισμός εφαρμοσμένης δόσης φοιτητή. ....	68
6.2	Υπολογισμός εφαρμοσμένης δόσης εργαζομένου.....	78
6.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων φοιτητή και εργαζομένου σε εσωτερικούς χώρους και ανοιχτά περιβάλλοντα.....	88
7	Συμπεράσματα - Προτάσεις .....	92

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ

## ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1:	Απεικόνιση λεπτών και χονδρών σωματιδίων συγκριτικά με την ανθρώπινη τρίχα.....	5
Εικόνα 2:	Κατανομή σωματιδίων συναρτήσει της διαμέτρου τους (Aleksandropoulou Viktoria 2003) .....	6
Εικόνα 3:	Μόρια νερού σε αέρια φάση συμπυκνώνονται και προσροφούνται σε πυρήνα συμπύκνωσης σχηματίζοντας υδροσταγονίδιο.....	9
Εικόνα 4:	Η συμπύκνωση αέριων μορίων επάνω σε προϋπάρχον σωματίδιο αυξάνει τον όγκο και μάζα του σωματιδίου. Αντίθετα, η εξάτμιση μορίων στην αέρια φάση μειώνει τον όγκο και τη μάζα του σωματιδίου.....	10
Εικόνα 5:	Σύγκρουση σωματιδίων προς δημιουργία συσσωματωμάτων. ....	11

Εικόνα 6: Κύριες περιοχές του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος. Εκτός θώρακα περιοχή (ET), ρινική κοιλότητα (ET <sub>2</sub> ), στοματική κοιλότητα (ET <sub>2</sub> ), τραχειοβρογχική περιοχή (TB), περιοχή βρογχιολίων (bb), κυψελιδή περιοχή (alv).....	17
Εικόνα 7: Γεωμετρικό μοντέλο αεραγωγών για τις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος (ICRP 1994).....	18
Εικόνα 8: Εσωτερική δομή ρινικής και στοματικής κοιλότητας.....	19
Εικόνα 9: Κυτταρική σύσταση επιθηλίου στη τραχειοβρογχική περιοχή (Aleksandropoulou Viktoria 2003).....	21
Εικόνα 10: Αναπαράσταση αναπνευστικών βρογχιολίων και κυψελιδών στη πνευμονική περιοχή (Aleksandropoulou Viktoria 2003).....	22
Εικόνα 11: Διάγραμμα των ολικών κλασμάτων αέρα που εισέρχονται και εξέρχονται από τους πνεύμονες. TLC = ολική χωρητικότητα πνευμόνων στην εισπνοή (Total Lung Capacity), VC = ζωτική χωρητικότητα (Vital Capacity), RV = υπόλοιπη χωρητικότητα (Residual Volume), FRC = υπόλοιπη λειτουργική χωρητικότητα (Functional Residual Capacity), IC = εισερχόμενη χωρητικότητα (Inspiratory Capacity), IRV = εισπνευστικός όγκος αέρα (Inspiratory Reserve Volume), ERV = εκπνευστικός όγκος αέρα (Expiratory Reserve Volume), V <sub>t</sub> = όγκος αέρα εισπνοής (Tidal Volume) (Schlesinger 1988).....	23
Εικόνα 12: Κύριοι μηχανισμοί εναπόθεσης κατά μήκος της αναπνευστικής οδού (Carvalho, 2010).....	29
Εικόνα 13: Συσχέτιση αεροδυναμικής διαμέτρου με λόγο εναπόθεσης για διαφορετικές ογκομετρικές παροχές. Σύγκριση μεταξύ άνδρα και γυναίκας (Kim, 1998). ....	36
Εικόνα 14: Κρουστικός δειγματολήπτης Andersen εννιά αλληπάλληλων σταδίων.....	39
Εικόνα 15: Όργανο καταγραφής δεδομένων έκθεσης. Μοντέλο Sidepak AM510. ....	40
Εικόνα 16: Πρόσοψη οργάνου Sidepak με απεικόνιση των πλήκτρων λειτουργίας. ....	40

## ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Διάγραμμα 1: Ολική και χωρική εναπόθεση σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα ενήλικου άνδρα με βάση το μοντέλο της ICRP (Hinds, 1999) TB; Τραχειοβρογχική περιοχή, Alv; κυψελιδική περιοχή.....	31
--	----

Διάγραμμα 2: Εναπόθεση στη ρινική (α) και στοματική (β) κοιλότητα για διαφορετικές ογκομετρικές παροχές αέρα. α) $250\text{cm}^3/\text{s}^{-1}$ (ευθεία) και $1000\text{cm}^3/\text{s}^{-1}$ (διακεκομμένη). β) $40\text{cm}^3/\text{s}^{-1}$ (κουκίδες), $250\text{cm}^3/\text{s}^{-1}$ (ευθεία) και $1000\text{cm}^3/\text{s}^{-1}$ (διακεκομμένη) (Schulz, 1998). .....	32
Διάγραμμα 3: Λόγος δόσης έντονης εργασίας προς κατάσταση ηρεμίας με παύσεις τριών λεπτών προς τη διάμετρο των σωματιδίων. Οι μετρήσεις περιλαμβάνουν δείγμα 26 αθλητών για σωματίδια πυκνότητας $1\text{ mg}/\text{m}^3$ (Srasic, 2016). .....	35
Διάγραμμα 4: Συνολική έκθεση σε $\text{PM}_{10}$ κατά τη διάρκεια της πρώτης ημέρας έκθεσης του φοιτητή. ....	44
Διάγραμμα 5: Συνολική έκθεση σε $\text{PM}_{10}$ κατά τη διάρκεια της δεύτερης ημέρας έκθεσης του φοιτητή. ....	46
Διάγραμμα 6: Συνολική έκθεση σε $\text{PM}_{10}$ κατά τη διάρκεια της τρίτης ημέρας έκθεσης του φοιτητή. ....	48
Διάγραμμα 7: Συνολική έκθεση σε $\text{PM}_{10}$ για την τέταρτη ημέρα έκθεσης του φοιτητή. ....	50
Διάγραμμα 8: Συνολική έκθεση σε $\text{PM}_{10}$ για την πέμπτη ημέρα μετρήσεων του φοιτητή. ....	52
Διάγραμμα 9: Συγκέντρωση $\text{PM}_{10}$ σωματιδίων σε 24ωρη διάρκεια για τις πέντε ημέρες έκθεσης του φοιτητή. ....	52
Διάγραμμα 10: Συνολική έκθεση σε $\text{PM}_{10}$ κατά τη διάρκεια της πρώτης ημέρας έκθεσης του εργαζομένου. ....	54
Διάγραμμα 11: Συνολική έκθεση σε $\text{PM}_{10}$ κατά τη διάρκεια της δεύτερης ημέρας έκθεσης του εργαζομένου. ....	57
Διάγραμμα 12: Συνολική έκθεση σε $\text{PM}_{10}$ κατά τη διάρκεια της τρίτης ημέρας έκθεσης του εργαζομένου. ....	58
Διάγραμμα 13: Συνολική έκθεση σε $\text{PM}_{10}$ κατά τη διάρκεια της τέταρτης ημέρας έκθεσης του εργαζομένου. ....	59
Διάγραμμα 14: Συνολική έκθεση σε $\text{PM}_{10}$ κατά τη διάρκεια της πέμπτης ημέρας έκθεσης του εργαζομένου. ....	62
Διάγραμμα 15: Συσσωρευτική έκθεση-δόση ολικών σωματιδίων εντός του αναπνευστικού συστήματος και κατακράτηση σωματιδίων για τη πρώτη ημέρα έκθεσης του φοιτητή. ....	68
Διάγραμμα 16: Συνολική δόση ανά περιοχή του αναπνευστικού συστήματος την πρώτη ημέρα έκθεσης του φοιτητή. ....	69



Διάγραμμα 17: Συσσωρευτική έκθεση-δόση ολικών σωματιδίων εντός του αναπνευστικού συστήματος και κατακράτηση σωματιδίων για τη δεύτερη ημέρα έκθεσης του φοιτητή. ....	70
Διάγραμμα 18: Συνολική δόση ανά περιοχή του αναπνευστικού συστήματος την δεύτερη ημέρα έκθεσης του φοιτητή. ....	71
Διάγραμμα 19: Συσσωρευτική έκθεση-δόση ολικών σωματιδίων εντός του αναπνευστικού συστήματος και κατακράτηση σωματιδίων για τη τρίτη ημέρα έκθεσης του φοιτητή.....	72
Διάγραμμα 20: Συνολική δόση ανά περιοχή του αναπνευστικού συστήματος την τρίτη ημέρα έκθεσης του φοιτητή. ....	73
Διάγραμμα 21: Συσσωρευτική έκθεση-δόση ολικών σωματιδίων εντός του αναπνευστικού συστήματος και κατακράτηση σωματιδίων για τη τέταρτη ημέρα έκθεσης του φοιτητή. ....	74
Διάγραμμα 22: Συνολική δόση ανά περιοχή του αναπνευστικού συστήματος την τέταρτη ημέρα έκθεσης του φοιτητή. ....	74
Διάγραμμα 23: Συσσωρευτική έκθεση-δόση ολικών σωματιδίων εντός του αναπνευστικού συστήματος και κατακράτηση σωματιδίων για τη πέμπτη ημέρα έκθεσης του φοιτητή. ....	75
Διάγραμμα 24: Συνολική δόση ανά περιοχή του αναπνευστικού συστήματος την πέμπτη ημέρα έκθεσης του φοιτητή. ....	76
Διάγραμμα 25: Συσσωρευτική έκθεση και δόση ολικών σωματιδίων εντός του αναπνευστικού συστήματος και κατακράτηση σωματιδίων για τη πρώτη ημέρα έκθεσης του εργαζομένου. ....	79
Διάγραμμα 26: Συνολική δόση ανά περιοχή του αναπνευστικού συστήματος την πρώτη ημέρα έκθεσης του εργαζομένου.....	80
Διάγραμμα 27: Συσσωρευτική έκθεση και δόση ολικών σωματιδίων εντός του αναπνευστικού συστήματος και κατακράτηση σωματιδίων για τη δεύτερη ημέρα έκθεσης του εργαζομένου. ...	81
Διάγραμμα 28: Συνολική δόση ανά περιοχή του αναπνευστικού συστήματος την πρώτη ημέρα έκθεσης του εργαζομένου.....	81
Διάγραμμα 29: Συσσωρευτική έκθεση-δόση ολικών σωματιδίων εντός του αναπνευστικού συστήματος και κατακράτηση σωματιδίων για τη τρίτη ημέρα έκθεσης του εργαζομένου. ....	82
Διάγραμμα 30: Συνολική δόση ανά περιοχή του αναπνευστικού συστήματος την τρίτη ημέρα έκθεσης του εργαζομένου.....	83
Διάγραμμα 31: Συσσωρευτική έκθεση-δόση ολικών σωματιδίων εντός του αναπνευστικού συστήματος και κατακράτηση σωματιδίων για τη τέταρτη ημέρα έκθεσης του εργαζομένου.....	84

Διάγραμμα 32: Συνολική δόση ανά περιοχή του αναπνευστικού συστήματος την τέταρτη ημέρα έκθεσης του εργαζομένου.....	84
Διάγραμμα 33: Συσσωρευτική έκθεση-δόση ολικών σωματιδίων εντός του αναπνευστικού συστήματος και κατακράτηση σωματιδίων για τη πέμπτη ημέρα έκθεσης του εργαζομένου.....	85
Διάγραμμα 34: Συνολική δόση ανά περιοχή του αναπνευστικού συστήματος την πέμπτη ημέρα έκθεσης του εργαζομένου.....	86

## Εισαγωγή

Η μελέτη της σωματιδιακής ρύπανσης της ατμόσφαιρας είναι σημαντική καθώς η έκθεση του ανθρώπου σε αυτά εγκυμονεί κινδύνους για την υγεία του. Τα σωματίδια αυτά είναι στερεή ή υγρή σωματιδιακή ύλη που αιωρείται στον αέρα και προέρχεται από κάποια πηγή ή δημιουργείται στον αέρα μέσω φυσικών φαινομένων. Η παρουσία του ανθρώπου σε περιβάλλοντα υψηλής συγκέντρωσης σωματιδίων για ορισμένο χρονικό διάστημα ονομάζεται έκθεση και συμβαίνει σε κλειστούς χώρους (όπως σπίτια, χώρους εργασίας, λεωφορεία, χώρους αναψυχής) ή στο εξωτερικό περιβάλλον. Η έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων είναι επικίνδυνη για την ανθρώπινη υγεία διότι τα σωματίδια λόγω του μικρού τους μεγέθους κυρίως, διεισδύουν στο εσωτερικό του οργανισμού και εναποτίθενται σε διάφορες περιοχές του αναπνευστικού συστήματος προκαλώντας δυσλειτουργίες και πλήθος παθήσεων. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO 2002), το έτος 2002 οι θάνατοι που οφείλονται στην αέρια ρύπανση έφτασαν τις 800.000 και αποτελούσαν το 1,4% του συνολικού παγκόσμιου ποσοστού θανάτων καθώς και το έτος 2014 το 40% των θανάτων ήταν από καρδιακή προσβολή ενώ το 20% και 18% εξαιτίας καρδιαγγειακών και ισχαιμικών παθήσεων αντίστοιχα, καθώς και ένα 22% λόγω χρόνιας αποφρακτικής πνευμονοπάθειας.

Η ρύπανση των αστικών περιοχών προκαλεί προβληματισμό ειδικά σε μεγαλουπόλεις διότι η συγκέντρωση αέριων ρυπαντών είναι αυξημένη εξαιτίας πολλών πηγών ανθρωπογενούς και φυσικής προέλευσης. Τα αυτοκίνητα, οι βιομηχανίες, τα εργοστάσια, οι οικίες που διαθέτουν ξυλόσομπες και τζάκια, οι δρόμοι, ακόμα και η θάλασσα συνεισφέρουν σε μεγάλο βαθμό στην αύξηση της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων σε πόλεις. Η ρύπανση όμως δεν περιορίζεται μόνο στο ανοιχτό περιβάλλον μιας πόλης, αλλά και σε εσωτερικούς χώρους, όπως είναι κατοικίες και χώροι εργασίας. Τα κλιματιστικά, ο ελλιπής αερισμός των χώρων, το κάπνισμα, οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες όπως μαγείρεμα και σκούπισμα, τα υλικά τοίχου και τα έπιπλα που εκπέμπουν πτητικές οργανικές ενώσεις, οι θερμάστρες χώρου, η μούχλα λόγω υγρασίας αλλά και ρύπανση από το εξωτερικό περιβάλλον αποτελούν μερικούς από τους λόγους αυξημένων συγκεντρώσεων σωματιδιακής ύλης.

Οι αρνητικές επιπτώσεις των σωματιδίων στον άνθρωπο δεν εξαρτώνται μόνο από τη συγκέντρωση αυτών στο περιβάλλον έκθεσης αλλά από την εφαρμοσμένη δόση και τις ιδιότητες των σωματιδίων όπως μέγεθος, διαλυτότητα και υγροσκοπικότητα. Όταν ο άνθρωπος εκτίθεται σε ένα ρυπασμένο περιβάλλον, μια ποσότητα σωματιδίων (συνήθως εκφρασμένος σε συγκέντρωση μάζας ή αριθμού) εισέρχεται μέσω της μύτης ή του στόματος στον οργανισμό και κατευθύνεται στην αναπνευστική οδό όπου και εναποτίθεται. Η κίνηση των σωματιδίων και η περιοχή που θα εναποτεθούν εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων, την ανατομία και τη φυσιολογία του ατόμου. Από την ύλη που αποτίθεται, ένα μέρος απομακρύνεται από τον οργανισμό με αυτόματους μηχανισμούς καθαρισμού που διαθέτει το σώμα με αποτέλεσμα μόνο ένα ποσοστό των σωματιδίων να παραμένει εντός του οργανισμού. Το βαθύτερο σημειναπόθεσης είναι η κυψελιδική περιοχή των πνευμόνων, όπου και συσσωρεύονται σωματίδια μικρότερα των 2.5  $\mu\text{m}$ , καθώς απομακρύνονται δύσκολα και προκαλούν πνευμονοπάθειες και αναπνευστικά προβλήματα.

Η έκθεση του ανθρώπου σε αιωρούμενα σωματίδια χωρίζεται σε δύο βασικές κατηγορίες, την βραχυπρόθεσμη και την μακροχρόνια έκθεση. Η πρώτη εξετάζει την έκθεση ενός ή περισσοτέρων ατόμων σε υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων για ένα μικρό χρονικό διάστημα και τις πιθανές επιπτώσεις στην υγεία ενώ η δεύτερη εξετάζει τα προβλήματα που δημιουργούνται μετά από αρκετά χρόνια έκθεσης σε κάποιο ρύπο είτε στο επαγγελματικό περιβάλλον είτε στο σπίτι (από δομικά υλικά, απορρυπαντικά, εσωτερικές πηγες ρύπανσης). Σύμφωνα με έρευνες που πραγματοποιήθηκαν στην Ευρώπη, βρέθηκε ότι για αύξηση 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$   $\text{PM}_{10}$  (σωματίδια με διάμετρο 10  $\mu\text{m}$ ) έχουμε 1% αύξηση κρουσμάτων άσθματος και αποφρακτικής πνευμονοπάθειας για άτομα άνω των 65 ετών και 0.5% αύξηση καρδιοαγγειακών παθήσεων από βραχυπρόθεσμη έκθεση σε αέριους ρύπους ενώ η μακροπρόθεσμη έκθεση σε  $\text{PM}_{10}$  σχετίζεται με περιπτώσεις καρκίνου, καρδιοπνευμονικών παθήσεων, αρρυθμία, χρόνια βρογχίτιδα, θρόμβωση αρτηριών και μειωμένη λειτουργία των πνευμόνων (Valvanidis Athanasios et al., 2008).

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της ανθρώπινης έκθεσης και δόσης σε αιωρούμενα σωματίδια στην πόλη των Χανίων. Ο υπολογισμός της δόσης και απομάκρυνσης σωματιδίων από τον οργανισμό θα γίνει με χρήση του μοντέλου ExDoM, το οποίο είναι ένα ημι-εμπειρικό μοντέλο που χρησιμοποιεί θεωρητικές εξισώσεις της διεθνούς υπηρεσίας για τη προστασία από τη ραδιενέργεια (ICRP) για τον υπολογισμό της εναπόθεσης και συσώρευσης

σωματιδίων στις διάφορες περιοχές του αναπνευστικού συστήματος ενώ για τον υπολογισμό της απομάκρυνσης των σωματιδίων γίνεται χρήση της μεθόδου του Gradon (1996)(Aleksandropoulou and Lazaridis 2013a). Το μοντέλο δέχεται δεδομένα εισόδου τα οποία θα πρέπει να έχουν καθοριστεί από πριν ανάλογα με τις συνθήκες κάτω από τις οποίες έλαβαν χώρα οι μετρήσεις. Τέτοια δεδομένα περιλαμβάνουν τη συγκέντρωση των σωματιδίων σε ωριαία ή ημερήσια βάση, την πυκνότητα, το σχήμα τους, τη διάρκεια έκθεσης, τη κατανομή μεγέθους - μάζας των σωματιδίων, τον ρυθμό και τη συχνότητα εισπνοής και την ταχύτητα του ανέμου. Τα αποτελέσματα του μοντέλου αφορούν την εκτός θώρακα περιοχή, την τραχειοβρογχική περιοχή και την κυψελιδική περιοχή καθώς υπολογίζεται και η απομάκρυνση των σωματιδίων μέσω της βλέννας, των βλεφαρίδων, των μακροφάγων κυττάρων, των λεμφαδένων και μέσω της απορρόφησης τους από το αίμα. Στην παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκαν 24ώρες μετρήσεις σε αστικό περιβάλλον και εσωτερικούς χώρους για δύο εκτιθέμενα άτομα, έναν φοιτητή του Πολυτεχνείου Κρήτης και έναν εργαζόμενο σε ιδιωτική επιχείρηση. Τα αποτελέσματα της εφαρμοσμένης δόσης και απομάκρυνσης σωματιδίων συγκρίθηκαν μεταξύ τους με σκοπό να διερευνηθεί σε τι βαθμό ο τρόπος ζωής και το περιβάλλον που βρισκόμαστε επηρεάζει την υγεία.

## 1 Σωματίδια στην ατμόσφαιρα.

### 1.1 Τι είναι τα αιωρούμενα σωματίδια.

Με τον όρο αιωρούμενα σωματίδια εννοούμε σωματίδια της ατμόσφαιρας υπό αιώρηση σε στερεή ή υγρή μορφή (υδροσταγονίδια) που περιέχονται σε μια αέρια μάζα, συνήθως εννοώντας τον αέρα (EPA 1996). Σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα μέσω φαινομένων πυρηνοποίησης, συμπύκνωσης ή εξάτμισης αερίων, είτε μέσω εκπομπής από κάποια πηγή (πρωτογενή σωματίδια) ή δημιουργούνται με χημικές αντιδράσεις (δευτερογενή). Οι πηγές προέλευσης τους ποικίλουν, καθώς μπορεί να προέρχονται από φυσικές πηγές όπως είναι η θάλασσα, η βλάστηση και το έδαφος ή από ανθρωπογενείς πηγές, δηλαδή μηχανές καύσης ορυκτών καυσίμων, βιομηχανικές εγκαταστάσεις, καύση ξύλου για θέρμανση κ.α. Εμφανίζουν μεγάλη ποικιλομορφία ως προς το μέγεθος, το σχήμα, τη πυκνότητα και τη χημική τους σύσταση, περιέχοντας ένα σύνολο από οργανικό και στοιχειακό άνθρακα, ανόργανα ιόντα και ιχνοστοιχεία. Τα χαρακτηριστικά αυτά των σωματιδίων καθορίζουν τη συμπεριφορά τους στην

ατμόσφαιρα αλλά και την πρόσληψη και εναπόθεση τους στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα. Για την περιγραφή των σωματιδίων και την εκτίμηση της συμπεριφοράς τους χρησιμοποιούνται οι κατανομές μεγέθους μάζας ή αριθμού των σωματιδίων, οι οποίες δίνουν στοιχεία για σωματίδια αεροδυναμικής διαμέτρου από 1nm έως 10μm. Η αεροδυναμική διάμετρος είναι μια έννοια «ισοδύναμης» διαμέτρου για μη σφαιρικά σωματίδια και θα αναλυθεί στην ενότητα 1.2.

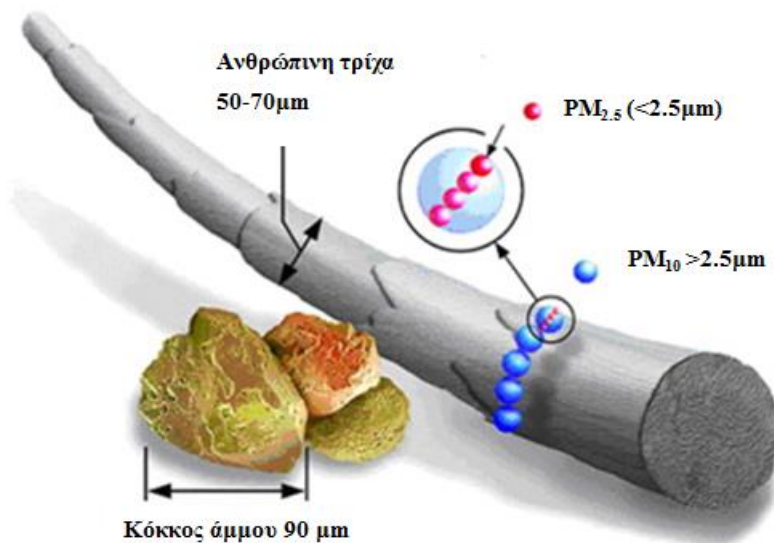
## 1.2 Φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων.

Τα σωματίδια της ατμόσφαιρας εμφανίζουν ποικιλομορφία σχετικά με τα φυσικά και χημικά τους χαρακτηριστικά και η μελέτη τους είναι σημαντική για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς και επίδρασης τους στο περιβάλλον και τον άνθρωπο. Η μεταφορά και η κίνηση τους μέσα σε ένα αέριο μέσο όπως και το σημείο απόθεσης τους εντός του αναπνευστικού συστήματος καθορίζεται κυρίως από το μέγεθος τους ενώ η σύσταση τους συνδέεται άμεσα με τη πηγή προέλευσης και τον τρόπο παραγωγής τους. Διαφορετικού μεγέθους σωματίδια εμφανίζουν διαφορετική χημική σύσταση και συνδέονται με διαφορετικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.

Το μέγεθος των σωματιδίων σχετίζεται με τη διάμετρο τους. Επειδή, όμως, το σχήμα τους δεν είναι πάντα σφαιρικό αλλά ακανόνιστου σχήματος, χρησιμοποιούμε την έννοια της ισοδύναμης αεροδυναμικής διαμέτρου για μη σφαιρικά σωματίδια. Η αεροδυναμική διάμετρος ορίζεται ως η ισοδύναμη διάμετρος ενός μη σφαιρικού σωματιδίου πυκνότητας  $1\text{g/cm}^3$  που έχει την ίδια ταχύτητα καθίζησης με ένα σφαιρικό σωματίδιο. Έτσι, διερευνάται η συμπεριφορά των σωματιδίων εντός και εκτός του αναπνευστικού συστήματος και προσδιορίζεται η περιοχή εναπόθεσης τους.

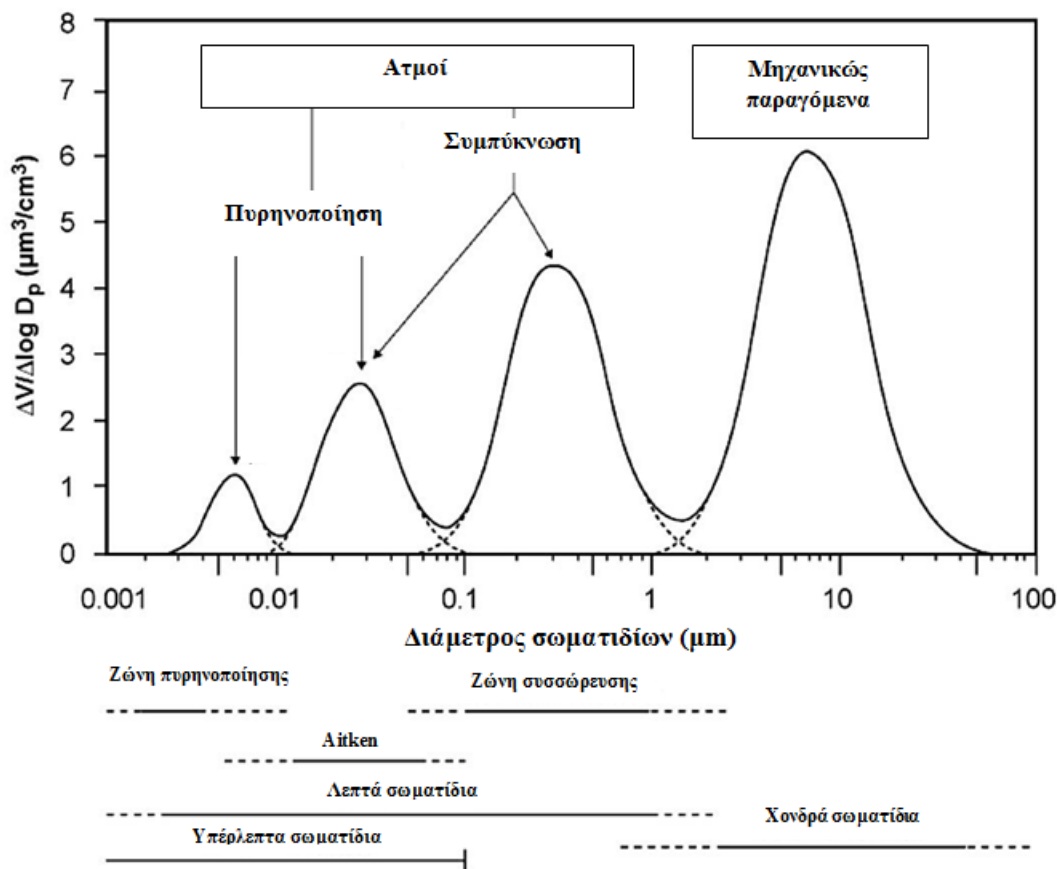
Τα σωματίδια χωρίζονται με βάση την αεροδυναμική τους διάμετρο σε δύο βασικές κατηγορίες, τα *λεπτά* (fine) και τα *χονδρά* (coarse) σωματίδια. Στα λεπτά σωματίδια συγκαταλέγονται όλα τα σωματίδια διαμέτρου κάτω από 2.5μm, με τα μικρότερα να φτάνουν το 1nm διάμετρο, ενώ σωματίδια της τάξης των 2.5μm έως 10μm ανήκουν στα χονδρά. Η συμπεριφορά των δύο αυτών ειδών σωματιδίων εμφανίζει μεγάλες διαφορές καθώς προέρχονται από διαφορετικές πηγές και επηρεάζουν διαφορετικά το αναπνευστικό σύστημα εξαιτίας της διαφορετικής χημικής

σύστασής τους και του διαφορετικού μεγέθους. Τα λεπτά σωματίδια αποτελούν μεγαλύτερο κίνδυνο για την υγεία διότι έχουν τη δυνατότητα να εισβάλλουν στα βαθύτερα σημεία της αναπνευστικής οδού έως τις κυψελίδες και να προκαλέσουν βλάβες και δυσλειτουργίες στο αναπνευστικό σύστημα.



Εικόνα 1: Απεικόνιση λεπτών και χονδρών σωματιδίων συγκριτικά με την ανθρώπινη τρίχα.

Τα λεπτά σωματίδια χωρίζονται σε περαιτέρω κατηγορίες και πάλι με βάση την αεροδυναμική διάμετρο. Αναλυτικότερα, σωματίδια διαμέτρου 1nm έως 10nm ανήκουν στη ζώνη πυρηνοποίησης, από 10nm έως 100nm έχουμε τα σωματίδια Aitken (ή αλλιώς πυρήνες Aitken) ενώ τα σωματίδια μεταξύ 100nm και 1μm ανήκουν στη ζώνη συσσώρευσης (Lazaridis 2008). Τα σωματίδια της ζώνης πυρηνοποίησης και τα Aitken χαρακτηρίζονται και ως νανοσωματίδια (UFP, Ultra Fine Particles).



Εικόνα 2: Κατανομή σωματιδίων συναρτήσει της διαμέτρου τους (Aleksandropoulou Viktoria 2003)

Όπως φαίνεται στην εικόνα 2, τα σωματίδια στη ζώνη πυρηνοποίησης αποτελούν τα μικρότερα σωματίδια τα οποία εκπέμπονται κατευθείαν από πηγές, έχουν μικρή διάρκεια ζωής και ακολουθούν τη κίνηση Brown ή διαχέονται στο χώρο. Τα σωματίδια αυτά προέρχονται από τη πυρηνοποίηση ή τη συμπύκνωση αερίων και μπορούν εύκολα να συσσωματωθούν σε μεγαλύτερα σωματίδια. Στη δεύτερη ζώνη έχουμε τη περιοχή συσσώρευσης όπου κι εδώ τα σωματίδια προέρχονται από συμπύκνωση ουσιών αλλά χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερους χρόνους ζωής καθώς είναι μεγαλύτερα από αυτά στη ζώνη πυρηνοποίησης και δεν ακολουθούν τη κίνηση Brown, αλλά και αρκετά μικρά για να καθιζήσουν γρήγορα. Η απομάκρυνση τους από τον αέρα μπορεί να γίνει με ξηρή εναπόθεση σε φυτά και στο έδαφος λόγω βαρύτητας, με τη προσκόλληση τους σε επιφάνειες ή με υγρή εναπόθεση μέσω βροχής. Τέλος, στη τρίτη ζώνη έχουμε τα χονδρά σωματίδια, τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλές ταχύτητες καθίζησης και από την ικανότητα τους να ταξιδεύουν μεγάλες αποστάσεις σε υψηλές ταχύτητες ανέμου (Sein-



field & Pandis, 1998). Τα σωματίδια αυτής της ζώνης χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των δυσμενών επιπτώσεων που δύνανται να προκαλέσουν στην ανθρώπινη υγεία και, σύμφωνα με μελέτες, έχουν συνδεθεί με ένα πλήθος αναπνευστικών και καρδιακών νοσημάτων (Brunekreef & Forsberg, 2005). Η διαχωριστική γραμμή μεταξύ λεπτών και χονδρών σωματιδίων βρίσκεται στα  $2.5\mu\text{m}$

Η χημική σύσταση των σωματιδίων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πηγή προέλευσης τους και από τις χημικές αντιδράσεις της ατμόσφαιρας. Τα λεπτά σωματίδια προέρχονται κυρίως από συστήματα καύσης, όπως κινητήρες αυτοκινήτων, θερμάστρες χώρου και εργοστάσια και έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε άζωτο, οργανικό και στοιχειακό άνθρακα, ανόργανα ιόντα και ιχνοστοιχεία σε αντίθεση με τα χονδρά που προέρχονται από μηχανικές διεργασίες, όπως φθορά ελαστικών και φρένων των αυτοκινήτων, ασφαλώδη υλικά και επαναιώρηση σκόνης εδάφους από τη διέλευση οχημάτων ή τον άνεμο. Τα χονδρά σωματίδια εμφανίζουν υψηλή περιεκτικότητα σε φλοιώδη συστατικά όπως είναι το ασβέστιο, αλουμίνιο, μαγνήσιο και σίδηρος. Όσον αφορά τις αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στον αέρα, το διοξείδιο του αζώτου ( $\text{NO}_2$ ) και διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ) οξειδώνονται με ρίζες υδροξυλίου ( $\text{OH}^\cdot$ ) και παράγουν νιτρικό ( $\text{HNO}_3$ ) και θειικό οξύ ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) αντίστοιχα, ενώ το  $\text{HNO}_3$  με τη σειρά του αντιδρά με την αμμωνία ( $\text{NH}_3$ ) προς παραγωγή νιτρικού αμμωνίου ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) (WHO 2005). Επομένως, τα σωματίδια που προκύπτουν από τις αντιδράσεις των αερίων έχουν υψηλές συγκεντρώσεις σε άζωτο και θείο, με το φαινόμενο να παρατηρείται εντονότερα για λεπτά σωματίδια.

Τέλος, στα χονδρά σωματίδια περιέχονται συνήθως και βιολογικής προελεύσεως σωματίδια όπως βακτήρια, μύκητες, ιοί και γύρη και χαρακτηρίζονται ως βιοαεροζόλ. Όταν εισέλθουν στον οργανισμό, προκαλούν προβλήματα μέσω μολυσματικών διεργασιών ή τοξικότητας (Jones 1999) και σχετίζονται με ασθένειες του αναπνευστικού συστήματος, αλλεργίες, ερεθισμούς αλλά και με περιπτώσεις καρκίνου (Douwes et al. 2003). Βιοαεροζόλ δημιουργούνται και στους εσωτερικούς χώρους, για παράδειγμα, όταν η υγρασία του αέρα είναι αυξημένη και ευνοείται η ανάπτυξη μούχλας (Fung and Hughson 2003) στους τοίχους. Για αυτό το λόγο κρίνεται απαραίτητος ο ορθός σχεδιασμός και κατασκευή των κτιρίων, με συχνή συντήρηση των χώρων ώστε να αποφευχθούν υψηλά ποσοστά υγρασίας και μόλυνση εξαιτίας μούχλας.

Η γεωγραφική περιοχή στην οποία μελετάται η χημική περιεκτικότητα των σωματιδίων είναι σημαντικό κριτήριο, καθώς οι αστικές περιοχές εμφανίζουν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις αζώτου, θείου, οργανικού και στοιχειακού άνθρακα, εξαιτίας του αυξημένου αριθμού συστημάτων καύσης, σε σχέση με τις μη αστικές περιοχές ενώ οι παραθαλάσσιες περιοχές εμφανίζουν υψηλότερα ποσοστά χλωρίου στον αέρα με τη μορφή χλωριούχου αμμωνίου ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) εξαιτίας διάσπασης του χλωριούχου νατρίου ( $\text{NaCl}$ ) από την αμμωνία που περιέχεται στον αέρα και της αντίδρασης με το ελεύθερο αμμώνιο ( $\text{NH}_4^+$ ) (Harrison and Jones 1995).

### 1.3 Δημιουργία σωματιδίων στην ατμόσφαιρα.

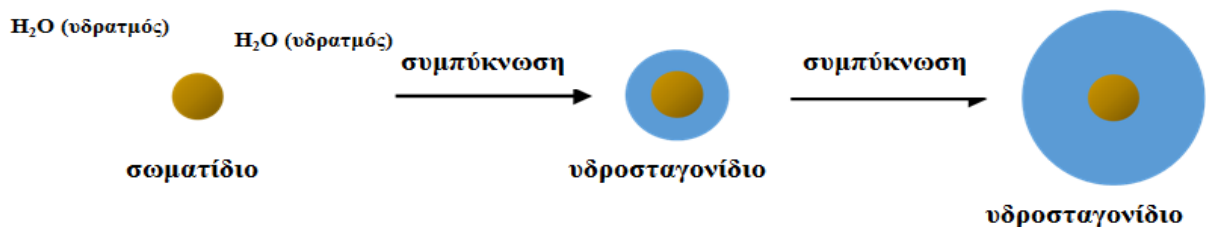
Τα σωματίδια στον ατμοσφαιρικό αέρα χωρίζονται σε πρωτογενή και δευτερογενή ανάλογα τον τρόπο που δημιουργήθηκαν. Στα πρωτογενή συγκαταλέγονται όλα τα σωματίδια που εκπέμπονται από πηγές απευθείας στην ατμόσφαιρα, οι οποίες μπορεί να είναι είτε φυσικές είτε ανθρωπογενείς. Τέτοιες φυσικές πηγές αποτελούν η θάλασσα, οι πυρκαγιές, η εξάτμιση υδάτινων σωμάτων η αιώρηση σκόνης εδάφους με τον άνεμο, ενώ ανθρωπογενείς πηγές είναι οι μηχανές καύσης των οχημάτων, οι εστίες καύσης ξύλου, η τριβή ελαστικών και η φθορά φρένων. Αντίθετα, τα δευτερογενή σωματίδια δημιουργούνται στην ατμόσφαιρα μέσω χημικών αντιδράσεων (οξειδωση, φωτοχημικές μετατροπές) ή σχηματίζονται από τη συμπύκνωση ατμών πρόδρομων αερίων και αερίων καύσης. Φυσικές πηγές δευτερογενών σωματιδίων αποτελούν η θάλασσα, το έδαφος (EPA 1996), οι πυρκαγιές, οι κεραυνοί και η βλάστηση. Ανθρωπογενείς πηγές αποτελούν η καύση ορυκτών καυσίμων, οι εξατμίσεις οχημάτων κίνησης και τα λιπάσματα αγροτικής καλλιέργειας. Η χημική σύσταση των σωματιδίων συνδέεται άμεσα με τις πηγές προέλευσης τους.

Τα σωματίδια εκτός από τις πηγές που τα παράγουν πρωτογενώς ή δευτερογενώς (φυσικής ή ανθρωπογενούς προέλευσης) μπορούν να σχηματιστούν και από μόνα τους στην ατμόσφαιρα μέσω φυσικών διεργασιών όταν οι ατμοσφαιρικές συνθήκες το επιτρέπουν. Μερικές από αυτές τις φυσικές διεργασίες είναι η πυρηνοποίηση, η συμπύκνωση, η εξάτμιση και η συσσωμάτωση.

Αναλυτικότερα,

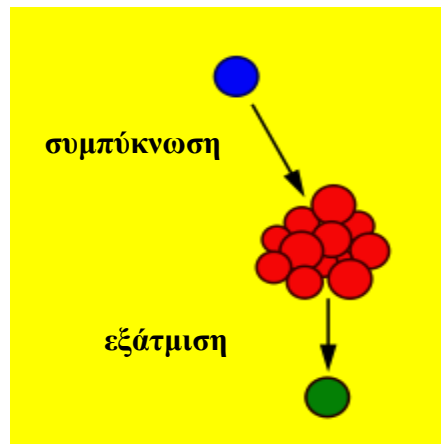
- **Πυρηνοποίηση** (nucleation) είναι η μεταβολή φάσεως από μία φάση σε μια άλλη, μια διαδικασία συνένωσης μορίων μέσω συμπύκνωσης ή χημικών αντιδράσεων. Όταν η ατμόσφαιρα βρεθεί σε υπέρκορη κατάσταση, τότε δύναται να αρχίσει το φαινόμενο της συμπύκνωσης των

υδρατμών. Για να συμβεί αυτό, απαιτείται μια επιφάνεια πάνω στην οποία θα υγροποιηθεί ο ατμός και αυτή η επιφάνεια συναντάται σε σωματίδια που ονομάζονται και πυρήνες συμπύκνωσης, με διάμετρο έως 0.2  $\mu\text{m}$  (Vincent 1995). Τα συμπυκνωμένα μόρια νερού προσροφώνται στην επιφάνεια του σωματιδίου (εάν αυτό είναι μη διαλυτό) , ανοίγοντας το δρόμο για προθήκη περισσότερων σωματιδίων με επακόλουθο την αύξηση του μεγέθους και τη δημιουργία υδροσταγονιδίου. Από την άλλη μεριά, η ομογενής πυρηνοποίηση περιλαμβάνει τη δημιουργία υδροσταγονιδίων με την απευθείας μεταφορά των μορίων από την αέρια στην υγρή φάση χωρίς τη συμβολή του μικρού πυρήνα αλλά συμβαίνει σε μεγαλύτερες συνθήκες κορεσμού ( $S_R > 4$ ). Στην εικόνα 3 δίνεται μια απλοϊκή αναπαράσταση του φαινομένου.



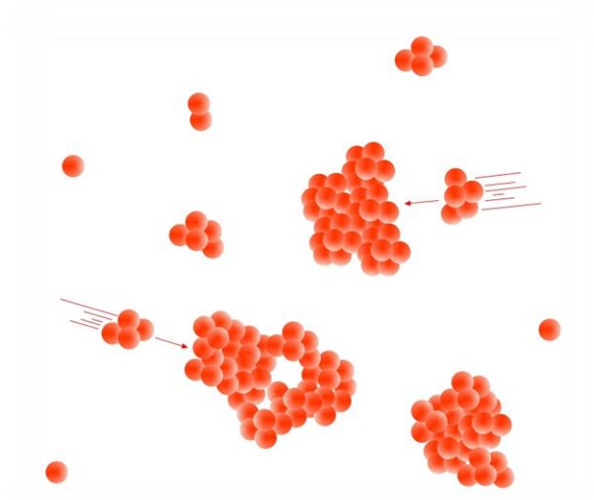
Εικόνα 3: Μόρια νερού σε αέρια φάση συμπυκνώνονται και προσροφώνται σε πυρήνα συμπύκνωσης σχηματίζοντας υδροσταγονίδιο.

- **Συμπύκνωση/εξάτμιση** (condensation/evaporation) συμβαίνει όταν η μερική πίεση ενός συστατικού σε ένα σωματίδιο γίνεται μεγαλύτερη ή μικρότερη από την τάση ισορροπίας κόρου του με αποτέλεσμα τη μεταφορά μάζας μεταξύ της υγρής και αέριας φάσης, αυξομειώνοντας το μέγεθος του σωματιδίου. Στη περίπτωση της συμπύκνωσης έχουμε μείωση των ολικών σωματιδίων στον αέρα και αύξηση του όγκου και μάζας του σωματιδίου ενώ στην εξάτμιση έχουμε απώλεια μάζας και τα σωματίδια γίνονται μικρότερα λόγω μεταφοράς μορίων στην αέρια φάση.



Εικόνα 4: Η συμπύκνωση αέριων μορίων επάνω σε προϋπάρχον σωματίδιο αυξάνει τον όγκο και μάζα του σωματιδίου. Αντίθετα, η εξάτμιση μορίων στην αέρια φάση μειώνει τον όγκο και τη μάζα του σωματιδίου.

• **Συσσωμάτωση** (coagulation) ή συνένωση (aggregation) είναι η σύγκρουση των σωματιδίων ενός δείγματος προς τη δημιουργία ενός νέου σωματιδίου μεγαλύτερου όγκου και μάζας. Ο συνολικός αριθμός των σωματιδίων μειώνεται, ενώ η μάζα παραμένει σταθερή. Το φαινόμενο συμβαίνει διότι τα σωματίδια σε μια μάζα αέρα, όταν είναι πολύ μικρά, διέπονται από τη κίνηση Brown, δηλαδή κινούνται άτακτα στο χώρο με επακόλουθο της σύγκρουση τους. Αντίθετα, μπορεί να συμβεί και το αντίθετο φαινόμενο, η διάσπαση ενός συσσωματώματος (Vincent 1995) σε σωματίδια όταν σε αυτό ασκηθούν διατμητικές ροές (πχ κρουστικοί δειγματολήπτες) ή σε περιπτώσεις έντονης τυρβώδους ροής όπου διασπώνται οι εσωτερικές δυνάμεις. Το φαινόμενο της συσσωμάτωσης απεικονίζεται στην εικόνα 5, παρουσιάζοντας σωματίδια να κατευθύνονται τυχαία στο χώρο και να ενσφηνώνονται σε άλλα παρευρισκόμενα, δημιουργώντας μεγαλύτερα.



Εικόνα 5: Σύγκρουση σωματιδίων προς δημιουργία συσσωματωμάτων.

Στον επόμενο πίνακα συνοψίζονται οι πηγές προέλευσης των κυριότερων χημικών συστατικών πρωτογενών και δευτερογενών σωματιδίων.

Πίνακας 1: Φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές προέλευσης κυρίαρχων χημικών συστατικών σωματιδίων με βάση τον τρόπο παραγωγής τους στην ατμόσφαιρα.

Συστατικά	Πρωτογενή		Δευτερογενή	
	Φυσικά	Ανθρωπογενή	Φυσικά	Ανθρωπογενή
$\text{NO}_3^-$	-	-	Πυρκαγιές, κεραυνοί, οξείδωση $\text{NO}_x$ που παράγεται από το έδαφος	Οξείδωση εκπομπών μηχανών καύσης
$\text{SO}_4^{=}$	Θαλάσσιο αεροζόλ	Καύση ορυκτών καυσίμων	Οξείδωση θεικών αερίων από σώματα νερού (ωκεανοί), $\text{SO}_2$ , $\text{H}_2\text{S}$ από ηφαίστεια και πυρκαγιές	Οξείδωση $\text{SO}_2$ από ορυκτά καύσιμα
OC	Πυρκαγιές	Μηχανές καύσης, μαγείρεμα, καύση ξύλου, ελαστικά, άσφαλτος	Οξείδωση υδρογονανθράκων βλάστησης	Οξείδωση υδρογονανθράκων από μηχανές καύσης, ξύλα
EC	Πυρκαγιές	Μηχανές καύσης, ξύλου, μαγείρεμα	-	-

<b>Μέταλλα</b>	Ηφαίστεια, διάβρωση, οργανικά υπολείμματα	Ορυκτά καύσιμα, τήξη μετάλλων, φρένα αυτοκινήτων	-	-
<b>Βιοαεροζόλ</b>	Ιοί, βακτήρια, γύρη, μύκητες	-	-	-

## 1.4 Αέρια ρύπανση σε εσωτερικούς χώρους.

Η ποιότητα του αέρα σε εσωτερικούς χώρους σχετίζεται με την υγεία και ευημερία των παρευρισκόμενων. Ως καλή ποιότητα του αέρα σε ένα χώρο ορίζουμε το περιβάλλον όπου οι παρευρισκόμενοι μπορούν να διαμείνουν και να εργαστούν σε αυτόν δίχως πρόβλημα ενώ κακή ποιότητα του αέρα έχουμε όταν οι συνθήκες γίνονται δυσμενείς προκαλώντας δυσφορία. Οι παράγοντες που καθορίζουν την ποιότητα του αέρα είναι ο ρυθμός αερισμού, δηλαδή η μεταφορά και ανανέωση του αέρα στο χώρο, τα έπιπλα και τα υλικά κατασκευής του κτιρίου καθώς αποτελούν πηγές εκπομπής σωματιδίων και πτητικών οργανικών ενώσεων, οι συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας, η πιθανή ύπαρξη μούχλας στους τοίχους εξαιτίας υψηλών τιμών υγρασίας, η ανθρώπινη δραστηριότητα και το εξωτερικό περιβάλλον. Κάθε μια από αυτές τις πηγές παίζει το δικό της ρόλο στην αύξηση των συγκεντρώσεων σωματιδίων στον εσωτερικό αέρα και στη διαμόρφωση της χημικής του σύστασης.

Τα έπιπλα, τα υλικά κατασκευής, τα χαλιά και οι μοκέτες, τα φωτοτυπικά μηχανήματα και τυχόν συστήματα καύσης που βρίσκονται σε ένα χώρο, αποτελούν σημαντικές πηγές εκπομπής σωματιδίων. Τα σωματίδια που προέρχονται από πηγές καύσης εμφανίζουν υψηλές συγκεντρώσεις σε CO<sub>2</sub> και NO<sub>x</sub> ενώ από τα έπιπλα του χώρου εκπέμπονται κυρίως VOCs από την επιφάνειά τους. Οι εκπομπές αυτές είναι μεγαλύτερες εάν τα έπιπλα έχουν κατασκευαστεί πρόσφατα. Επίσης, παρατηρείται και δευτερογενής παραγωγή σωματιδίων από τις επιφάνειες των υλικών η οποία μπορεί να οφείλεται στην υψηλή θερμοκρασία των επιφανειών ή την αντίδραση τους με άλλες χημικές ενώσεις που προέρχονται από καθαριστικά χώρου, κεριά κ.α.

Η ανθρώπινη δραστηριότητα συνεισφέρει και αυτή στη παραγωγή σωματιδίων. Δραστηριότητες όπως μαγείρεμα, καθάρισμα του χώρου, ξεσκόνισμα, κάπνισμα, στρώσιμο κρεβατιών, ακόμα

και το περπάτημα (λόγω επαναιώρησης ύλης του εδάφους) οδηγούν στην αύξηση των αιωρούμενων σωματιδίων.

Τέλος, το εξωτερικό περιβάλλον ειδικά σε αστικές περιοχές, μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στην αύξηση της εσωτερικής αέριας ρύπανσης.

#### 1.4.1 Αερισμός

Ο αερισμός των κτιρίων είναι σημαντικός για την διατήρηση ιδανικών συνθηκών θερμοκρασίας και υγρασίας στο εσωτερικό τους. Μπορεί να γίνει είτε με τη βοήθεια μηχανικών μέσων με χρήση κάποιας συσκευής είτε με φυσικό τρόπο με ανταλλαγή αέρα μεταξύ του εσωτερικού αέρα και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Η κίνηση αυτή συμβαίνει λόγω της διαφοράς πίεσης μεταξύ σημείων που μπορεί να οφείλεται σε διαφορά θερμοκρασίας ή σε ρεύματα αέρα ((Lazaridis 2008).

Ο φυσικός αερισμός χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, τον διαμπερή αερισμό και τον κατακόρυφο. Στην πρώτη περίπτωση, ο αερισμός του κτιρίου γίνεται από μικρά ανοίγματα που υπάρχουν στο κέλυφος του ενώ στη δεύτερη περίπτωση, γίνεται από την καμινάδα ή άλλα κατακόρυφα ανοίγματα. Στον κατακόρυφο αερισμό, οι θερμές μάζες αέρα μεταφέρονται στα ανώτερα σημεία της ατμόσφαιρας εξαιτίας της χαμηλότερης πυκνότητας τους με αποτέλεσμα να έχουμε απαγωγή του αέρα από τα ανοίγματα ((Lazaridis 2008).

Τέλος, ο αερισμός βοηθάει στην αποφυγή δημιουργίας μούχλας στα τοιχώματα των χώρων, διότι συνεισφέρει στην εξισορρόπηση των επιπέδων υγρασίας στο εσωτερικό του κτιρίου.

#### 1.4.2 Σύνδρομο Άρρωστου Κτιρίου

Στα τέλη του 1970 υπήρξε μια ραγδαία αύξηση μη συγκεκριμένων παραπόνων από εργαζόμενους και μαθητές σε χώρους εργασίας και σχολεία σε διάφορες χώρες με πρώτες τις Σκανδιναβικές. Μετά από έρευνα βρέθηκε ότι η έκθεση των ανθρώπων σε αυτούς τους χώρους προκαλεί προβλήματα στην υγεία τους, όπως ερεθισμούς στα μάτια και τη μύτη, ζαλάδες, δυσκολία στην αναπνοή, πονοκεφάλους, ξηρότητα, αίσθημα κόπωσης κα (Namieśnik et al. 1992). Όταν παρατηρούνται τέτοια συμπτώματα σε κάποιο κτήριο τότε λέμε πως πάσχει από το "Σύνδρομο του Άρρωστου Κτιρίου" (ΣΑΚ). Πιο αναλυτικά τα συμπτώματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2: Σύγκριση συμπτωμάτων σε χώρους εργασίας με διαφορετικό σύστημα αερισμού (Namieśnik et al. 1992).

Σύμπτωμα	Γραφεία με air condition (%)	Γραφεία με φυσικό αερισμό (%)
Υπνηλία	68	49
Πονοκέφαλος	68	62
Κούραση	66	62
Δυσκολία συγκέντρωσης	54	38
Ερεθισμός ματιών	50	48
Ερεθισμός λαιμού	47	36
Ζαλάδες	22	19
Αδυναμία	22	11

Τα κύρια ευρήματα ερευνών, ύστερα από μελέτη και σύγκριση των αποτελεσμάτων τους, εμφανίζουν κοινά χαρακτηριστικά τα οποία συνοψίζονται παρακάτω (Bardana and Montanaro 1996):

- **Φύλο**

Οι γυναίκες εμφανίζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στα συμπτώματα.

- **Σκόνη**

Ο μη επαρκής καθαρισμός των χώρων επιφέρει επανειώρηση της υπάρχουσας σκόνης η οποία προκαλεί ερεθισμούς στα μάτια, τη μύτη και του δέρματος.

- **Αλλεργίες**

Η ύπαρξη προϋπάρχουσας αλλεργίας (πχ άσθμα) επιδεινώνεται όταν υπάρχει μούχλα ή σκόνη στους χώρους του κτιρίου.

- **Αερισμός**

Παρατηρήθηκε ότι κτίρια με μηχανικό αερισμό είναι πιθανότερο να πάσχουν από το ΣΑΚ σε σχέση με αυτά που έχουν φυσικό αερισμό.

- **Ρυπαντές**

Χημικές ενώσεις όπως CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, σωματίδια, φορμαλδεΰδη φαίνεται να έχουν άμεση σχέση με τα συμπτώματα.



- **Βιοαεροζόλ**

Μύκητες, μούχλα και βακτήρια επωφελούνται από την υψηλή υγρασία στο χώρο και προκαλούν αναπνευστικά προβλήματα.

Η παραγωγή σωματιδίων στους κλειστούς χώρους των γραφείων οφείλεται σε συστήματα θέρμανσης, στα έπιπλα που εκπέμπουν πτητικές οργανικές ενώσεις αυξάνοντας τη συγκέντρωση τους στο χώρο, σε υλικά καθαρισμού, χρώματα, φωτοτυπικά και αντιγραφικά μηχανήματα αλλά και σε φυσικούς παράγοντες όπως θερμοκρασία και υγρασία.

Ο κύριος λόγος που υπάρχουν τα κτίρια με το ΣΑΚ είναι ο κακός σχεδιασμός τους που δεν πληροί τις προϋποθέσεις για ένα υγιές περιβάλλον αέρα και η ελλιπής συντήρηση των χώρων. Οι ιδιοκτήτες συνήθως δεν είναι ενημερωμένοι για τις επιπτώσεις που έχει η ποιότητα του αέρα στην ανθρώπινη υγεία επομένως δεν υπάρχει και το κίνητρο με αποτέλεσμα να κατασκευάζονται κτίρια με χαμηλές προδιαγραφές.

### **1.5 Επιπτώσεις των σωματιδίων στην υγεία.**

Η αέρια ρύπανση βλάπτει σημαντικά τον άνθρωπο και τα οικοσυστήματα, μετρώντας πάνω από 500.000 θανάτους το χρόνο παρόλο που τα τελευταία 20-30 χρόνια υπάρχει μείωση των ρυπαντών από βιομηχανία, γεωργία, κατοικίες και απόβλητα (Shaughnessy, Venigalla, and Trump 2015). Αφορμή για τη μελέτη των αρνητικών επιπτώσεων της αέριας ρύπανσης στην υγεία του ανθρώπου αποτέλεσαν δύο πολύ σημαντικά περιστατικά σε Λονδίνο και Βέλγιο, όπου η εκπομπή υπεραυξημένης συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων ύστερα από μηχανική βλάβη εργοστασίου κόστισε τη ζωή σε χιλιάδες ανθρώπους (Bell and Davis 2001; Nemery, Hoet, and Nemmar 2001).

Η έκθεση σε αυξημένες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων βλάπτει τον ανθρώπινο οργανισμό προκαλώντας πλήθος καρδιακών και αναπνευστικών παθήσεων αλλά και μεταβολές στο ανοσοποιητικό του σύστημα, ζημιές στο μυϊκό ιστό, καρκίνο, ακόμα και πρόωπο θάνατο. Μια αύξηση της τάξεως των  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  στα  $\text{PM}_{10}$  οδηγεί σε αύξηση κατά 0.6% στα επείγοντα περιστατικά νοσοκομείων εξαιτίας μολύνσεων του ανώτερου αναπνευστικού (Shaughnessy, Venigalla, and Trump 2015). Σύμφωνα με έρευνες, η σωματιδιακή ύλη συνδέεται με βρογχίτιδα, άσθμα (Neuberger et al. 2004), καρκίνο του πνεύμονα και εμφύσημα αλλά και με καρδιαγγειακές νόσους όπως ισχαιμική καρδιοπάθεια και στεφανιαία νόσο (Teoldi et al. 2016).

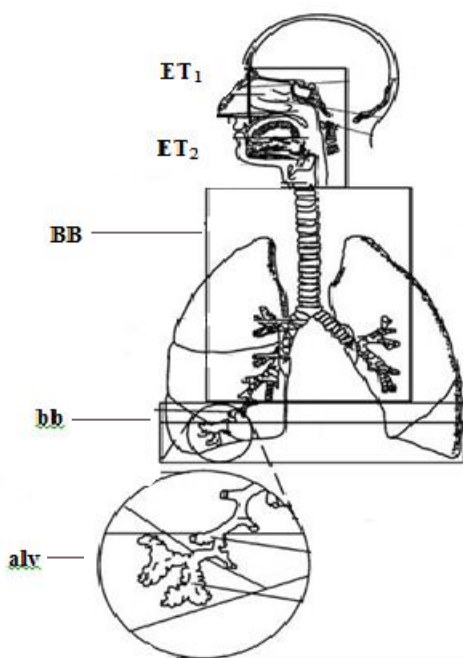
Επίσης, έχει βρεθεί συσχέτιση των PM<sub>2.5</sub> με φλεγμονές, μεταλλάξεις και σακχαρώδη διαβήτη (Feng et al. 2016). Οι ασθένειες προσβάλλουν κυρίως άτομα προχωρημένης ηλικίας (άνω των 65 ετών) (Neuberger et al. 2004) και παιδιά, όπως και άτομα με οικογενειακό ιστορικό, χωρίς αυτό να σημαίνει πως οι έφηβοι δεν διατρέχουν κίνδυνο. Ενδεικτικά, οι εισαγωγές στα νοσοκομεία και στους θαλάμους επειγόντων περιστατικών αυξάνεται κατά 1.9% και 3.4% αντίστοιχα για ασθματικούς, σύμφωνα με μια έρευνα (Shaughnessy, Venigalla, and Trump 2015) που εκπονήθηκε με αντικείμενο μελέτης άτομα από 18 έως 39 ετών.

Τα πιο επικίνδυνα χημικά συστατικά της σωματιδιακής ύλης αποτελούν τα οργανικά κλάσματα (προέρχονται από ατελή καύση), τα PAHs και τα πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCB) (εκπέμπονται από υλικά με χλωρίνη) επειδή βλάπτουν το γενετικό υλικό των κυττάρων (Teoldi et al. 2016) και το συκώτι (Yang et al. 2016) όπως και το αρσενικό(As) το οποίο μπορεί να προκαλέσει καρκινογένεση. Ακόμα, λόγω της ικανότητας των λεπτών σωματιδίων να διεισδύουν στη κυκλοφορία του αίματος και να μεταφέρονται στο ενδοκρανιακό νευρικό σύστημα, δημιουργούνται βλάβες εξαιτίας της παρουσίας βαρέων μετάλλων (Kampa and Castanas 2008) όπως κάδμιο, χρώμιο, υδράργυρο και νικέλιο προκαλώντας συμπτώματα όπως κούραση, θολή όραση, αϋπνία, προβλήματα ομιλίας και προκαλούν ασθένειες όπως άσθμα, εμφύσημα και καρκίνο του πνεύμονα. Τέλος, ο σίδηρος και ο ψευδάργυρος από ορυκτά καύσιμα έχει βρεθεί πως σχετίζεται με ισχαιμική καρδιοπάθεια ενώ όσον αφορά τα βιοαεροζόλ, η αιωρούμενη γύρη δρα συνδυαστικά με άλλους αέριους ρύπους (O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>) δημιουργεί φλεγμονές ή επιδεινώνει προϋπάρχουσες αλλεργίες (Pöschl 2005).

## 2 Ανατομία και λειτουργία του αναπνευστικού συστήματος.

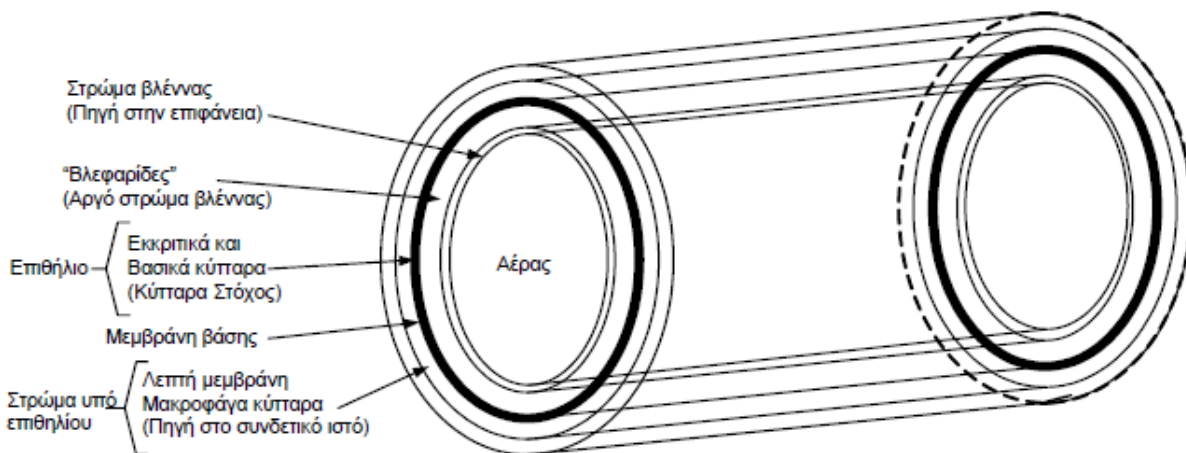
Το ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα έχει ως κύριο στόχο τη τροφοδότηση του οργανισμού με το απαιτούμενο οξυγόνο (μέσω της εισπνοής) και την απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα (εκπνοή) (Vincent 1995). Διακρίνεται σε τρία τμήματα με βάση τη δομή, το μέγεθος και τη λειτουργία τους. Η εκτός θώρακα περιοχή (ET) ή αλλιώς ανώτερο αναπνευστικό σύστημα (Upper Respiratory Tract, URT) εκτείνεται από τα ρουθούνια έως το λάρυγγα και διαιρείται σε δύο υποπεριοχές (ET<sub>1</sub> και ET<sub>2</sub>), η τραχειοβρογχική περιοχή (Tracheobronchial, TB) από τη τραχεία ως τα τελικά βρογχιόλια (bb) και η κυψελιδική ή πνευμονική περιοχή (Alveolar, Alv), η οποία περιλαμβάνει τα αναπνευστικά βρογχιόλια και τους κυψελιδικούς σάκους (EPA 1996). Η

μεταφορά, η εναπόθεση και απομάκρυνση των σωματιδίων από τις περιοχές αυτές εξαρτώνται από τις φυσικοχημικές ιδιότητες των σωματιδίων, με σημαντικότερο κριτήριο το μέγεθος τους, αλλά και από τα ανατομικά και φυσιολογικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε ατόμου. Μια απεικόνιση των περιοχών αυτών φαίνεται στην εικόνα 6.



Εικόνα 6: Κύριες περιοχές του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος. Εκτός θώρακα περιοχή (ET), ρινική κοιλότητα ( $ET_1$ ), στοματική κοιλότητα ( $ET_2$ ), τραχειοβρογχική περιοχή (TB), περιοχή βρογχιολίων (bb), κυψελιδή περιοχή (alv).

Οι αεραγωγοί του αναπνευστικού συστήματος εμφανίζουν ποικιλομορφία όσον αφορά το μέγεθος και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Στη παρούσα εργασία κάνουμε χρήση ενός απλού γεωμετρικού μοντέλου της Διεθνούς Επιτροπής Ραδιολογικής Προστασίας όπου θεωρούμε ότι το αναπνευστικό σύστημα αποτελείται από ένα σύνολο κυλινδρικών αεραγωγών συγκεκριμένων γεωμετρικών χαρακτηριστικών, πάχους τοιχωμάτων και κυτταρικής σύστασης (ICRP 1994), όπως φαίνεται στην εικόνα 7.



Εικόνα 7: Γεωμετρικό μοντέλο αεραγωγών για τις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος (ICRP 1994).

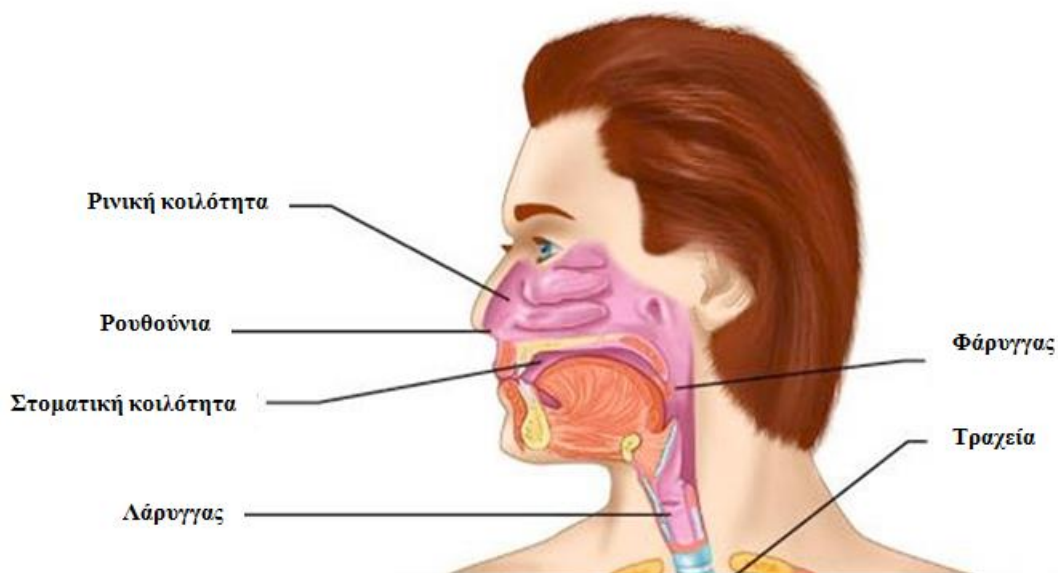
Η ροή του αέρα διαμέσου των αεραγωγών του αναπνευστικού συστήματος είναι γραμμική ή τυρβώδης ανάλογα την περιοχή και τον αριθμό Reynolds, ο οποίος αποτελεί μια έκφραση της ροής ενός ρευστού σε αγωγούς. Η μαθηματική του αποτύπωση δίνεται με τον λόγο  $\rho_a DV/\mu$  όπου  $\rho_a$  η πυκνότητα,  $\mu$  το ιξώδες,  $V$  η ταχύτητα του ρευστού και  $D$  η διάμετρος του αγωγού. Στην εκτός θώρακα και στην τραχειοβρογχική περιοχή έχουμε τυρβώδη ροή εξαιτίας των μεγάλων ταχυτήτων ροής του εισερχόμενου αέρα, των διαμέτρων και κλίσεων των αρχικών αεραγωγών ξεκινώντας από τις φωνητικές χορδές του λάρυγγα έως και τους κύριους βρόγχους, ενώ στα βρογχιόλια (τελικά και αναπνευστικά) η ροή γίνεται γραμμική. Η μελέτη του τρόπου ροής είναι κρίσιμη καθώς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τον μηχανισμό εναπόθεσης των σωματιδίων στις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος.

Επιπλέον, η υγρασία παίζει σημαντικό ρόλο στη μελέτη της εφαρμοσμένης δόσης και εναπόθεσης σωματιδίων, λόγω της υγροσκοπικής ιδιότητας αυτών. Σε καταστάσεις κορεσμού ( $RH > 90\%$ ) παρατηρείται μεγάλη διαφορά στην εναπόθεση (EPA 1996) σε αντίθεση με ποσοστά υγρασίας 20% έως 80%.

## 2.1 Ανώτερο αναπνευστικό σύστημα (ET)

Η κύρια λειτουργία του ανώτερου αναπνευστικού (ET) είναι η ρύθμιση της υγρασίας και θερμοκρασίας και ο πρωτοβάθμιος καθαρισμός του αέρα από σωματίδια. Χωρίζεται στη πρόσθια ρινική κοιλότητα (ET<sub>1</sub>), την ύστερη ρινική κοιλότητα, το φάρυγγα, το λάρυγγα και το

στόμα (ET<sub>2</sub>). Τα εσωτερικά τριχίδια της μύτης, η σπειροειδής δομή των ρουθουνιών, η στένωση της γλωττίδας του λάρυγγα αποτελούν περιοχές ανάπτυξης υψηλών ταχυτήτων, απότομων μεταβολών της κλίσης και δημιουργίας τυρβώδους ροής με αποτέλεσμα η πρόσκρουση και η διασπορά να είναι ο κυρίαρχοι μηχανισμοί εναπόθεσης σωματιδίων ( $d_{ae} > 2.5 \mu m$ ) σε διάφορα σημεία και επιφάνειες της περιοχής (EPA 1996). Μια απεικόνιση των περιοχών αυτών δίνεται στην εικόνα 9.



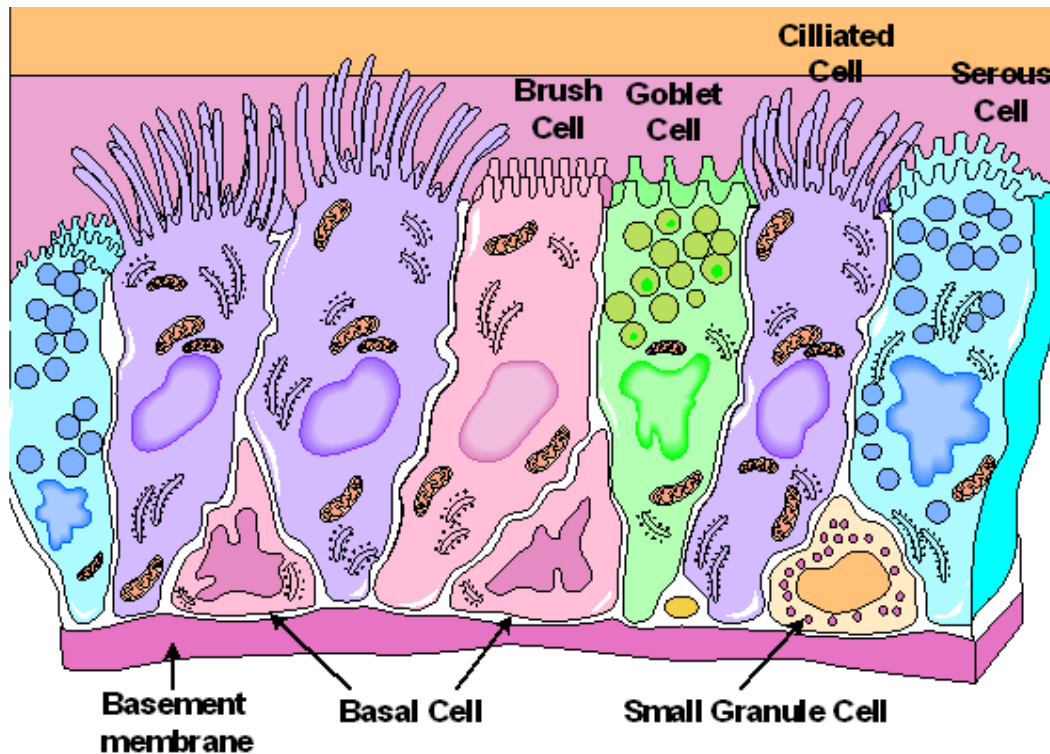
Εικόνα 8: Εσωτερική δομή ρινικής και στοματικής κοιλότητας.

Τα τοιχώματα της ρινικής κοιλότητας καλύπτονται από ένα σύνολο κυττάρων με βλεφαρίδες και αναπνευστική βλέννα, βοηθώντας στη μεταφορά μικρού και μεγάλου μεγέθους σωματιδίων, τα οποία μετέπειτα μεταφέρονται στο λάρυγγα και από κει μέσω κατάποσης στο γαστρεντερικό σύστημα όπου και διαλύονται ενώ οι υδατοδιαλυτές ενώσεις απορροφώνται και μεταφέρονται στο αίμα. Εκτός των βλεφαρίδων και της βλέννας, στη ρινική κοιλότητα υπάρχουν ιγμόρεια, αγγεία, ρινοδακρυϊκοί αδένες και λεμφαδένες (Lazaridis 2008) οι οποίοι συμβάλλουν στην αποτελεσματικότερη απομάκρυνση σωματιδίων.

## 2.2 Τραχειοβρογχική περιοχή (TB).

Η τραχειοβρογχική περιοχή αποτελεί την αρχή του τραχειοβρογχικού δέντρου, ένα σύνολο από διχοτομημένους βρόγχους και βρογχιόλια σε διαφορετικά σημεία των πνευμόνων που περιγράφονται με τη έννοια των γενιών. Η τραχεία (γενιά 0) εκτείνεται από το λάρυγγα έως τη πρώτη διχοτόμηση της στους δύο κύριους βρόγχους (γενιά 1), οι οποίοι με τη σειρά του χωρίζονται στους λοβώδεις βρόγχους (γενιές 2 και 3) και αυτοί στους τμηματικούς βρόγχους (γενιά 4) (Lazaridis 2010). Οι δύο απόγονοι κλάδοι κάθε βρόγχου για λόγους απλούστευσης θεωρούμε ότι είναι μικρότεροι σε μέγεθος από τον πρόγονο τους αλλά έχουν κοινή διάμετρο, δηλαδή έχουμε συμμετρικό διαχωρισμό (μοντέλο Weibel). Ο αριθμός  $N_z=2^z$  εκφράζει το σύνολο από παρακλάδια στις διχοτομήσεις των βρόγχων όπου  $z$  ο αριθμός της γενιάς. Οι βρόγχοι (BB) απαντώνται στις πρώτες οχτώ γενιές ενώ τα βρογχιόλια εκτείνονται από της γενιά 9 έως τη 15, όπου συναντάμε τα αναπνευστικά βρογχιόλια, την περιοχή που συνδέεται με την κυψελιδική περιοχή όπου γίνεται η ανταλλαγή αερίων. Η απομάκρυνση των σωματιδίων από τη περιοχή γίνεται με τη συνδυαστική δράση αναπνευστικής βλέννας με βλεφαρίδες, χόνδρους και αδένες που βρίσκονται στα τοιχώματα των αεραγωγών.

Η αναπνευστική βλέννα που συναντάται σε όλο το μήκος της TB είναι ένα υγρό πάχους  $\sim 5\mu\text{m}$  πάνω στην επιφάνεια του επιθηλίου, το οποίο κινείται με τη βοήθεια των βλεφαρίδων μεταφέροντας εγκλωβισμένα σωματίδια προς το φάρυγγα έτσι ώστε με κατάποση τα σωματίδια να οδηγηθούν στο γαστρεντερικό σύστημα και στη συνέχεια να διαλυθούν. Το στρώμα επιθηλίου αποτελείται από διαφορετικής σύστασης κύτταρα ανά περιοχή. Πιο συγκεκριμένα, στη περιοχή των βρόγχων το επιθήλιο αποτελείται από βασικά κύτταρα κατά 33%, κύτταρα με βλεφαρίδες 49%, καλυκοειδή κύτταρα 9% και σε μικρότερο ποσοστό εκκριτικά και κοκκία κύτταρα καθώς υπάρχει και ένα σύνολο από χόνδρους και αδένες (Lazaridis 2010). Αντίστοιχα, η περιοχή των βρογχιολίων περιέχει κύτταρα με βλεφαρίδες, κυβοειδή και κιονοειδή ενώ δεν περιέχει καθόλου βασικά κύτταρα, χόνδρους και αδένες.



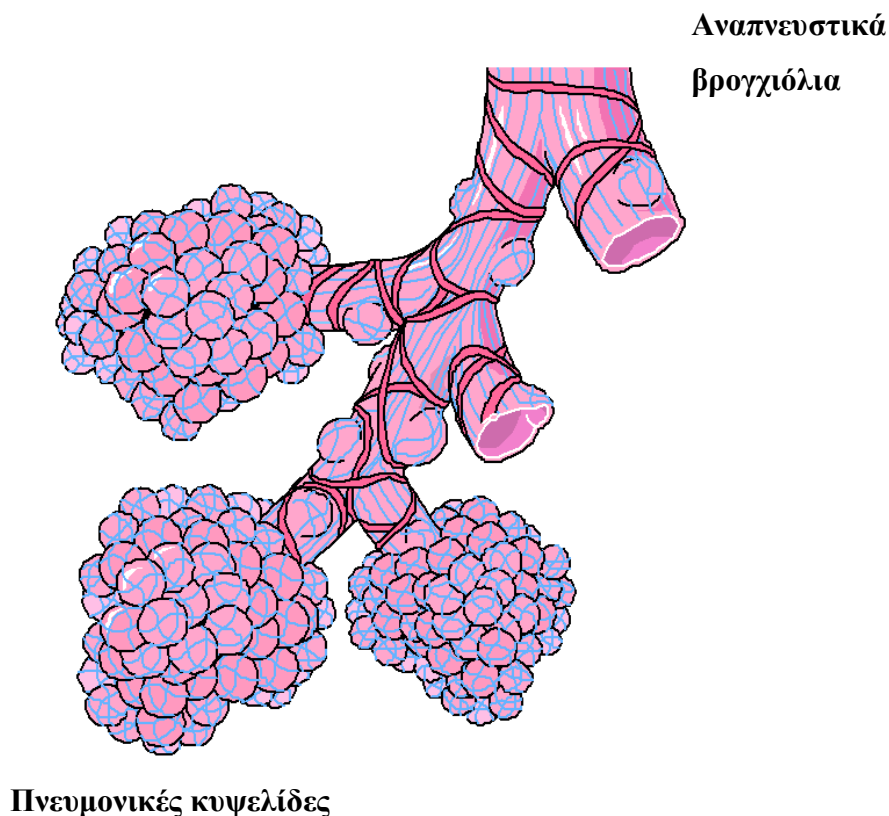
Εικόνα 9: Κυτταρική σύσταση επιθηλίου στη τραχειοβρογχική περιοχή (Aleksandropoulou Viktoria 2003).

## 2.3 Κυψελιδική περιοχή (Alv).

Στο κατώτερο σημείο της αναπνευστικής οδού βρίσκεται η περιοχή των κυψελίδων. Αποτελείται από τα αναπνευστικά βρογχιόλια (γενιές 16-18) τα οποία συνδέονται με τους κυψελιδικούς αεραγωγούς, τις κυψελίδες και τα ιεροφυλάκια. Εδώ συμβαίνει ανταλλαγή αερίων μεταξύ εισπνεύσιμου κλάσματος και του υπολειπόμενου όγκου αέρα, μεταφορά του οξυγόνου στο αίμα και απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα με την εκπνοή. Το οξυγόνο διαχέεται στην κυψελιδική μεμβράνη και μέσω της κυκλοφορίας του αίματος μεταφέρεται στα όργανα του σώματος (ο καρδιακός παλμός και η συγκέντρωση αιμογλοβίνης στο αίμα αποτελούν κρίσιμους παράγοντες λειτουργίας). Οι κυψελίδες υποστηρίζονται από ένα συνδετικό ιστό που ενώνει τα τριχοειδή ενδοθηλιακά κύτταρα με τα κυψελιδικά (Lazaridis 2010). Ο αριθμός των κυψελίδων κυμαίνεται περίπου στα 300 εκατομμύρια αλλά διαφέρει από άτομο σε άτομο και είναι άμεσα εξαρτώμενο από την ηλικία. Η εναπόθεση των σωματιδίων εδώ συμβαίνει κυρίως με διάχυση, καθίζηση και διασπορά και η απομάκρυνση τους γίνεται με τη βοήθεια μακροφάγων κυττάρων, τα οποία κινούνται πάνω στις κυψελιδικές επιφάνειες (Vincent 1995) εγκλωβίζοντας σωματίδια



(φαγοκύτωση) και μεταφέροντας τα σε ανώτερα σημεία του αναπνευστικού όπου υπάρχουν βλεφαρίδες και βλέννα.



Εικόνα 10: Αναπαράσταση αναπνευστικών βρογχιολίων και κυψελιδών στη πνευμονική περιοχή (Aleksandropoulou Viktoria 2003).

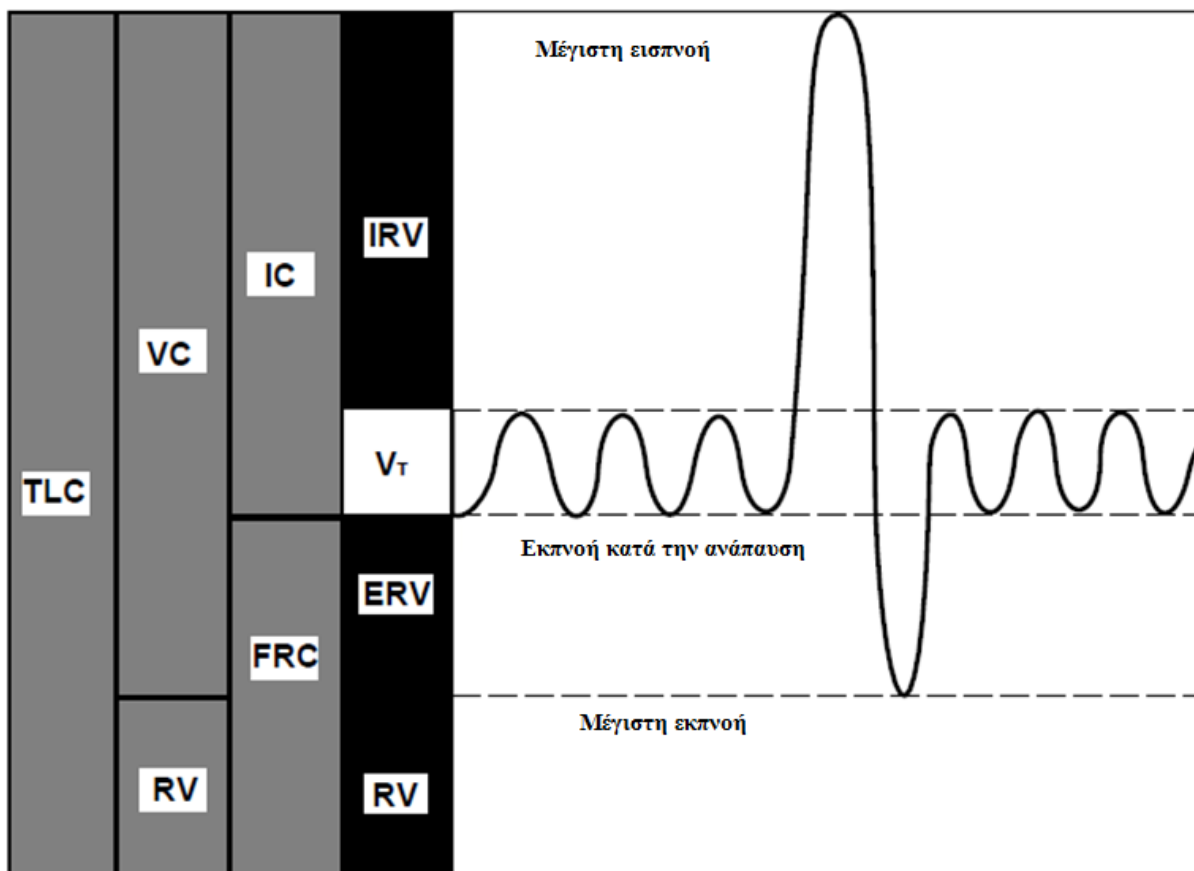
## 2.4 Παράμετροι φυσιολογίας.

Ο όρος φυσιολογία χρησιμοποιείται για να περιγράψει τον τρόπο λειτουργίας ενός βιολογικού είδους. Η λειτουργία αυτή εξαρτάται από διάφορους παράγοντες που στην περίπτωση της μελέτης της εφαρμοσμένης δόσης σωματιδίων είναι οι παράμετροι του εισπνεόμενου όγκου αέρα και της συχνότητας αναπνοής. Διαφορετικές τιμές εισπνεόμενου όγκου και αυξομειώσεις της συχνότητας εισπνοής μεταβάλλουν τη χωρική εναπόθεση των σωματιδίων.

Για έναν ενήλικα άνδρα ο όγκος αέρα που εισπνέεται είναι περίπου  $V_t = 500\text{ml}$ , ο οποίος είναι ίσος με τον όγκο αέρα που εκπνέεται. Κατά την μέγιστη εισπνοή ο όγκος δύναται να φτάσει έως  $3300\text{ml}$  και ορίζεται ως εισπνευστικός όγκος αέρα (IRV) ενώ ο όγκος που καταλαμβάνεται στην εκπνοή ως εκπνευστικός όγκος αέρα (ERV). Το σύνολο του εισπνευστικού όγκου αέρα με την εισερχόμενη ποσότητα  $V_t$  αποτελούν την εισερχόμενη χωρητικότητα (IC) και αυτή μαζί με τον



εκπνευστικό όγκο (ERV) ονομάζονται ως ζωτική χωρητικότητα ( $VC = IRV + ERV + V_T$ ). Στον πνεύμονα υπάρχει πάντα μια μικρή ποσότητα αέρα που την ονομάζουμε υπολειπόμενο όγκο αέρα (RV) που σε συνδυασμό με το εκπνευστικό κλάσμα αποτελούν τη υπόλοιπη λειτουργική χωρητικότητα (FRC). Τέλος, υπάρχει και η έννοια του «νεκρού ανατομικά όγκου» ο οποίος αναφέρεται στον όγκο του αέρα που δεν συμμετέχει στη αναπνοή από τις κυψελίδες (Aleksandropoulou Viktoria 2003). Στην εικόνα 10 περιγράφονται αναλυτικά τα παραπάνω.



Εικόνα 11: Διάγραμμα των ολικών κλασμάτων αέρα που εισέρχονται και εξέρχονται από τους πνεύμονες. TLC = ολική χωρητικότητα πνευμόνων στην εισπνοή (Total Lung Capacity), VC = ζωτική χωρητικότητα (Vital Capacity), RV = υπόλοιπη χωρητικότητα (Residual Volume), FRC = υπόλοιπη λειτουργική χωρητικότητα (Functional Residual Capacity), IC = εισερχόμενη χωρητικότητα (Inspiratory Capacity), IRV = εισπνευστικός όγκος αέρα (Inspiratory Reserve Volume), ERV = εκπνευστικός όγκος αέρα (Expiratory Reserve Volume),  $V_T$  = όγκος αέρα εισπνοής (Tidal Volume) (Schlesinger 1988).

Η δεύτερη παράμετρος φυσιολογίας είναι η συχνότητα αναπνοής (f), δηλαδή ο αριθμός των κύκλων αναπνοών στη μονάδα του χρόνου. Η αναπνοή οφείλεται στη διαφορά πίεσης μεταξύ του οργανισμού και του ατμοσφαιρικού αέρα και συμβαίνει όταν το διάφραγμα εκτονώνονται

δημιουργώντας αρνητική πίεση στον πνεύμονα. Στη συνέχεια εκτονώνεται (εκπνοή) εξάγοντας τον αέρα έως ότου η πίεση να γίνει ίση με την ατμοσφαιρική.

Υπάρχουν δυο βασικοί τρόποι αναπνοής. Ο πρώτος και κυρίαρχος τρόπος είναι μέσω της μύτης και ο δεύτερος που συναντάται λιγότερο μέσω του στόματος. Βέβαια, όλα τα άτομα αναπνέουν εν μέρη και με τους δυο τρόπους ειδικά όταν εκτελούν αυξημένης έντασης δραστηριότητες όπου η απαίτηση του οργανισμού σε οξυγόνο αυξάνεται και για αυτό γίνεται χρήση του στόματος. Από πλευράς αποδοτικότητας, προτιμάται η αναπνοή μέσω της μύτης λόγω της μεγαλύτερης ικανότητας της να φιλτράρει τον εισερχόμενο αέρα, κατακρατώντας σωματίδια με τη βοήθεια των βλεφαρίδων και της αναπνευστικής βλέννας που διαθέτει στο εσωτερικό της.

Η αναπνοή ανάμεσα στα άτομα διαφορετικής ηλικίας και φύλου ποικίλει. Τα ενήλικα άτομα αναπνέουν μεγαλύτερους όγκους αέρα ενώ η συχνότητα αναπνοής είναι μικρότερη σε σχέση με τα παιδιά. Αυτό οφείλεται στην εντονότερη σωματική δραστηριότητα των παιδιών κατά τη διάρκεια της ημέρας αυξάνοντας τον ρυθμό αναπνοής τους. Επίσης, οι γυναίκες λόγω μικρότερου μεγέθους και ανατομίας αεραγωγών του αναπνευστικού συστήματος προσλαμβάνουν μικρότερες ποσότητες αέρα, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι η πιθανή τους δόση σε σωματίδια να είναι λιγότερη σε σχέση με τους άνδρες, όπως φαίνεται στον πίνακα 3.

Παράμετρος	Εκτεθειμένο Άτομο		
	Αντρας	Γυναίκα	Βρέφος (3 μηνών)
<i>FRC</i> : Υπόλοιπη λειτουργική χωρητικότητα (mL)	3301	2681	148
<i>V<sub>D</sub>(ET)</i> : Εξωθωρακική “νεκρή” περιοχή (mL)	50	40	2,6
<i>V<sub>D</sub>(BB)</i> : Ανατομικά “νεκρή” περιοχή της τραχείας και των βρόγχων(mL)	49	40	4,5
<i>V<sub>D</sub>(bb)</i> : “Νεκρή” περιοχή βρογχολίων (mL)	47	44	6,8
<i>d<sub>0</sub></i> :διάμετρος τραχείας (cm)	1,65	1,53	0,616
<i>d<sub>9</sub></i> :διάμετρος του πρώτου βρογχιόλιου (cm)	0,165	0,159	0,099
<i>d<sub>16</sub></i> : διάμετρος του πρώτου αναπνευστικού βρογχιόλιου (cm)	0,051	0,048	0,020
<i>Κατά τη διάρκεια του ύπνου</i>			
<i>B</i> : Ογκομετρικός ρυθμός αναπνοής (m <sup>3</sup> /h)	0,45	0,32	0,99
<i>V<sub>T</sub></i> : Όγκος που λαμβάνεται ανά εισπνοή (mL)	625	444	39
<i>V</i> : Ογκομετρική παροχή αέρα (mL/sec)	250	178	50
<i>f</i> : Ρυθμός αναπνοής (αναπνοές/min)	12	12	38
<i>Ενώ κάθεται</i>			
<i>B</i> : Ογκομετρικός ρυθμός αναπνοής (m <sup>3</sup> /h)	0,54	0,39	-
<i>V<sub>T</sub></i> : Όγκος που λαμβάνεται ανά εισπνοή (mL)	750	464	-
<i>V</i> : Ογκομετρική παροχή αέρα (mL/sec)	300	217	-
<i>f</i> : Ρυθμός αναπνοής (αναπνοές/min)	12	14	-
<i>Καθώς εκτελεί ήπια εργασία</i>			
<i>B</i> : Ογκομετρικός ρυθμός αναπνοής (m <sup>3</sup> /h)	1,5	1,25	0,19
<i>V<sub>T</sub></i> : Όγκος που λαμβάνεται ανά εισπνοή (mL)	1250	992	66
<i>V</i> : Ογκομετρική παροχή αέρα (mL/sec)	833	694	106
<i>f</i> : Ρυθμός αναπνοής (αναπνοές/min)	20	21	48
<i>Καθώς εκτελεί βαριές εργασίες</i>			
<i>B</i> : Ογκομετρικός ρυθμός αναπνοής (m <sup>3</sup> /h)	3	2,7	-
<i>V<sub>T</sub></i> : Όγκος που λαμβάνεται ανά εισπνοή (mL)	1920	1364	-
<i>V</i> : Ογκομετρική παροχή αέρα (mL/sec)	1670	1500	-
<i>f</i> : Ρυθμός αναπνοής (αναπνοές/min)	26	33	-

Πίνακας 3: Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων ανατομίας και φυσιολογίας που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα (Aleksandropoulou Viktoria 2003).

Όπως παρατηρούμε, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τραχείας και των αεραγωγών του άνδρα είναι μεγαλύτερα από αυτά της γυναίκας και ενός βρέφους. Είναι σημαντικό να σημειωθεί εδώ ότι κατά την εκτέλεση διαφορετικής εντάσεως δραστηριοτήτων η ογκομετρική παροχή είναι μεγαλύτερη στους άνδρες έναντι των γυναικών ενώ η συχνότητα εισπνοής μικρότερη. Όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο, αυτό το στοιχείο είναι σημαντικό για τη μελέτη της κίνησης των σωματιδίων εντός του οργανισμού και στη χωρική εναπόθεση τους.

### 3 Έκθεση ανθρώπων σε αέριους ρύπους.

#### 3.1 Σωματίδια και άνθρωπος.

Από την αρχαιότητα ήταν γνωστό πως η κακή ποιότητα αέρα προκαλεί αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, αλλά η ουσιαστική έρευνα και μελέτη της αέριας ρύπανσης ξεκίνησε τον 20ό αιώνα. Αφορμή ήταν ένα περιστατικό στο Βέλγιο που μια μηχανική βλάβη σε εργοστάσιο προκάλεσε την απελευθέρωση μεγάλων συγκέντρωσεων διοξειδίου του θείου με πυκνή ομίχλη στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον, με αποτέλεσμα χιλιάδες άνθρωποι να παρουσιάζουν οξεία πνευμονικά προβλήματα, ενώ 60 έχασαν την ζωή τους (Nemery, Hoet, and Nemmar 2001).

Ο τρόπος με τον οποίο προσβάλλουν τα σωματίδια τον ανθρώπινο οργανισμό ποικίλει. Η είσοδος τους γίνεται μέσω της εισπνοής, κατάποσης και βρώσης ή μέσω δερματική επαφής και άλλων εκτειθέμενων ιστών (πχ μάτια) με μεταφορά μάζας στο εσωτερικό του οργανισμού. Το σημείο που θα εναποτεθούν τα σωματίδια και το μέγεθος της ζημιάς που θα προκαλέσουν εξαρτάται από της συγκέντρωση τους στο περιβάλλον, την εφαρμοσμένη δόση στον οργανισμό, τη χημική σύσταση, τα φυσικά τους χαρακτηριστικά και από τη φυσιολογία του οργανισμού. Η συγκέντρωση σωματιδίων στον χώρο στην οποία είναι εκτεθειμένος ένας άνθρωπος για ένα χρονικό διάστημα ορίζεται ως έκθεση, ενώ ως δόση ορίζεται η ποσότητα που εισέρχεται στον οργανισμό για αυτό το χρονικό διάστημα (Lazaridis 2008). Το σώμα όμως διαθέτει αυτόματους μηχανισμούς καθαρισμού σωματιδίων (πχ βλέννα, γαστρεντερικό σύστημα, μακροφάγα κύτταρα) με αποτέλεσμα ένα μέρος της εισερχόμενης μάζας να απομακρύνεται. Επομένως, η ποσότητα που συσσωρεύεται τελικά στο σώμα καθορίζει το μέγεθος των επιπτώσεων στα όργανα που προσβάλλονται.

Η βραχυπρόθεσμη αλλά και μακροχρόνια έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια συνδέεται με πλήθος ασθενειών και δυσλειτουργιών του αναπνευστικού συστήματος και καρδιαγγειακών παθήσεων (Anderson, Thundiyil, and Stolbach 2012). Τα συνηθέστερα προβλήματα που σχετίζονται με το αναπνευστικό είναι η χρόνια αποφρακτική νόσος (COPD), άσθμα και πνευμονία ενώ από καρδιαγγειακές παθήσεις συνηθέστερη είναι η στεφανιαία νόσος που οφείλεται στην πήξη του αίματος (Anderson, Thundiyil, and Stolbach 2012).

### 3.2 Εναπόθεση σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα.

Όταν ένα σωματίδιο εισέλθει στον οργανισμό μέσω εισπνοής, δύναται να ξεπεράσει τη περιοχή της μύτης και του στόματος (εκτός θώρακα περιοχή) και να διασχίσει μια απόσταση διαμέσου των αεραγωγών του αναπνευστικού συστήματος προτού εναποτεθεί στην τραχειοβρογχική περιοχή ή βαθύτερα στους πνεύμονες, στην περιοχή των κυψελίδων. Η περιοχή στην οποία εναποτίθεται το σωματίδιο εξαρτάται από τον τρόπο εισπνοής (μύτη, στόμα), τον όγκο αέρα που εισπνέεται, τη συχνότητα εισπνοής, τον ρυθμό αναπνοής, την μορφολογία του αναπνευστικού συστήματος αλλά και από τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων (EPA 2010) όπως μέγεθος, πυκνότητα και σχήμα. Η μορφολογία του αναπνευστικού συστήματος διαφέρει από είδος σε είδος όσον αφορά το μέγεθος, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τον τρόπο λειτουργίας αλλά και με βάση την εθνικότητα, την ηλικία και το φύλο.

Η μάζα των σωματιδίων που εισέρχεται στον ανθρώπινο οργανισμό στο ανώτατο σημείο του αναπνευστικού συστήματος (ρινική και στοματική κοιλότητα) στη μονάδα του χρόνου ορίζεται ως εισπνεύσιμο κλάσμα σωματιδίων. Η Διεθνής Επιτροπή Ραδιολογικής Προστασίας (ICRP) έχει καθορίσει τα κριτήρια μελέτης των εισπνεύσιμων σωματιδίων με πειραματικά δεδομένα για σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο  $d_{ae} < 100\mu m$  και ταχύτητες ανέμου από 1 έως 8 m/s (EPA 2010). Πιο συγκεκριμένα, η εισπνευσσιμότητα για σωματίδια  $1\mu m$ ,  $5\mu m$  και  $10\mu m$  είναι 97%, 87% και 77% αντίστοιχα ενώ για σωματίδια άνω των  $50\mu m$  περιορίζεται στο 50%. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εισπνευσσιμότητα χονδρών σωματιδίων είναι αντιστρόφως ανάλογη της έντασης της δραστηριότητας ενός ατόμου καθώς παρατηρείται ποσοτική μείωση τους στις ζώνες απόθεσης τους ειδικότερα για σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη των  $13\mu m$  (Dai et al. 2006).

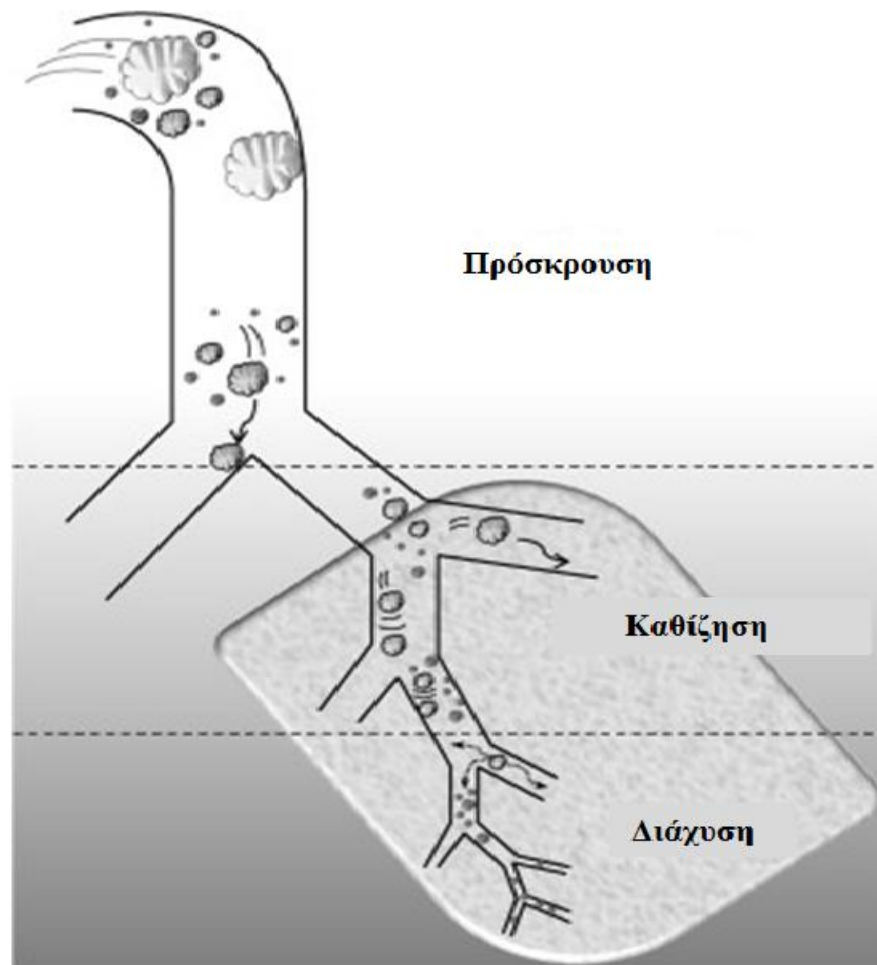
Ο ρυθμός αναπνοής αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στη μελέτη εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα. Παροχές των 15, 30 και 60 l/min αναφέρονται για καθιστική, ήπια και έντονη εργασία αντίστοιχα, ενώ σε περιπτώσεις όπου έχουμε φαρμακευτική επέμβαση μέσω εισπνεύσιμης συσκευής η παροχή μπορεί να φτάσει και στα 120 l/min. Οι μεγάλες παροχές μετατρέπουν την ροή του αέρα σε τυρβώδη στις ανώτερες περιοχές του αναπνευστικού (φάρυγγας) με αποτέλεσμα την εναπόθεση σωματιδίων σε διαφορετικές γενιές του τραχειοβρογχικού δέντρου (Koullapis et al. 2016). Επίσης, έχει βρεθεί ότι σε ήπια παροχή αέρα (15l/min) δημιουργούνται δίνες στο εσωτερικό της μύτης διασκορπίζοντας τα σωματίδια στα

τοιχώματα της μύτης ιδιαίτερα για μεγάλα σωματίδια ( $d_{ae} > 10 \mu m$ ) σε αντίθεση με τα μικρότερα σωματίδια που παραμένουν ανεπηρέαστα (Shang, Inthavong, and Tu 2015).

Η μάζα που έχει εναποτεθεί στους πνεύμονες και την αναπνευστική οδό δεν παραμένει μόνιμα, αλλά απομακρύνεται από τον οργανισμό με αυτόματους μηχανισμούς καθαρισμού. Το διαλυτό κλάσμα των σωματιδίων διαλύεται και απορροφάται με αργούς ρυθμούς στο αίμα, ενώ το μη διαλυτό μεταφέρεται στο φάρυγγα με τη βοήθεια βλεφαρίδων και βλέννας και στη συνέχεια μεταφέρεται στο γαστρεντερικό σύστημα (Heyder et al. 1986). Η απομάκρυνση σωματιδίων από την εκτός θώρακα περιοχή γίνεται με φύσημα της μύτης, φτέρνισμα και κατάποση του σάλιου (μεταφορά στο γαστρεντερικό σύστημα), κατά μήκος των αεραγωγών της τραχειοβρογχικής περιοχής τα σωματίδια απομακρύνονται με την ταυτόχρονη δράση βλεφαρίδων και βλέννας (Vincent 1995) ενώ σε περιοχές όπου δεν υπάρχει αυτή η δυνατότητα (κυψελίδες) αναλαμβάνουν τον καθαρισμό μακροφάγα κύτταρα. Ο ρυθμός απομάκρυνσης είναι αρκετά υψηλός σε περιοχές με βλέννα και βλεφαρίδες, της τάξης των 10-20 λεπτών έως 1 ώρα σε αντίθεση με βαθύτερα σημεία του πνεύμονα όπου απαιτείται περίπου μια ημέρα.

### **3.2.1 Μηχανισμοί εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα.**

Η εναπόθεση των σωματιδίων συμβαίνει κυρίως με πρόσκρουση, καθίζηση, διάχυση-διασπορά (κίνηση Brown, ενώ σε μικρότερο ποσοστό τα σωματίδια εναποτίθενται με ηλεκτροστατική καθίζηση. Η αναχαίτιση είναι εξίσου σημαντικός μηχανισμός αλλά περισσότερο για ινώδη σωματίδια. Οι τρεις βασικότεροι μηχανισμοί απεικονίζονται στην εικόνα 12.



Εικόνα 12: Κύριοι μηχανισμοί εναπόθεσης κατά μήκος της αναπνευστικής οδού (Carvalho, 2010).

Η πρόσκρουση συμβαίνει όταν τα σωματίδια μεγάλης αδράνειας αδυνατούν να ακολουθήσουν τη γραμμή ροής και συγκρούονται στα τοιχώματα των αεραγωγών, συνήθως στις διχοτομήσεις τους (EPA 2010). Ο αριθμός του Stokes (εξίσωση 1) περιγράφει τη πιθανότητα απόθεσης με πρόσκρουση. Όσο υψηλότερος είναι ο αριθμός Stokes, τόσο αυξάνεται η πιθανότητα ένα σωματίδιο να εναποτεθεί με πρόσκρουση.

$$Stk = \frac{\rho_p d^2 V}{18 \eta R} \quad (1)$$

Όπου  $\rho_p$ : πυκνότητα σωματιδίου,  $d^2$ : διάμετρος,  $V$ : η ταχύτητα ροής αέρα,  $\eta$ : ιξώδες και  $R$ : διάμετρος αγωγού. Το φαινόμενο της πρόσκρουσης αποτελεί τον κυρίαρχο μηχανισμό εναπόθεσης για σωματίδια  $PM_{10}$ , τα οποία εναποτίθενται σε περιοχές του ανώτερου αναπνευστικού (ET), όπως μύτη, στόμα, φάρυγγα, λάρυγγα αλλά και μεταγενέστερες περιοχές

όπως στην τραχεία και τις πρώτες γενιές της βρογχικής περιοχής (γενιές 4-15) (Piglion, Fontana, and Vanni 2012).

Η βαρυτική καθίζηση είναι ο δεύτερος σημαντικότερος μηχανισμός εναπόθεσης μετά τη πρόσκρουση, επηρεάζοντας επίσης σωματίδια μεγάλης αδράνειας. Το φαινόμενο παρατηρείται στις περιοχές των βρόγχων, των βρογχιολίων και στη κατώτερη πνευμονική περιοχή (κυψελιδικές κοιλότητες) (EPA 2010). Είναι μια διαδικασία εξαρτώμενη από το χρόνο, τον οποίο χρειάζονται τα σωματίδια για να εναποτεθούν στην επιφάνεια των αγωγών εξαιτίας της βαρύτητας (Carvalho, Peters, and Williams III 2011). Μεγάλες παροχές (πχ έντονη εργασία) δημιουργούν τυρβώδη ροή, μειώνοντας την χρονική διάρκεια των σωματιδίων σε αιώρηση με επακόλουθο τη μείωση του φαινομένου.

Η διάχυση-διασπορά αποτελεί τον μηχανισμό εναπόθεσης κυρίως νανοσωματιδίων ( $d_p < 0.1 \mu m$ ), τα οποία πρακτικά ακολουθούν τη κίνηση Brown (EPA 2010). Πιο συγκεκριμένα, τα σωματίδια αυτού του μεγέθους είναι πολύ μικρά και συγκρούονται με μόρια του εισερχόμενου ρεύματος αέρα με αποτέλεσμα να κινούνται προς τυχαίες κατευθύνσεις με τελικό σημείο την απόθεση στα τοιχώματα αεραγωγών. Το φαινόμενο παρατηρείται εντονότερα στην κυψελιδική περιοχή σε αντίθεση με σωματίδια διαμέτρου μικρότερα των 50nm τα οποία διαχέονται στους βρόγχους και στο ανώτερο αναπνευστικό (ET).

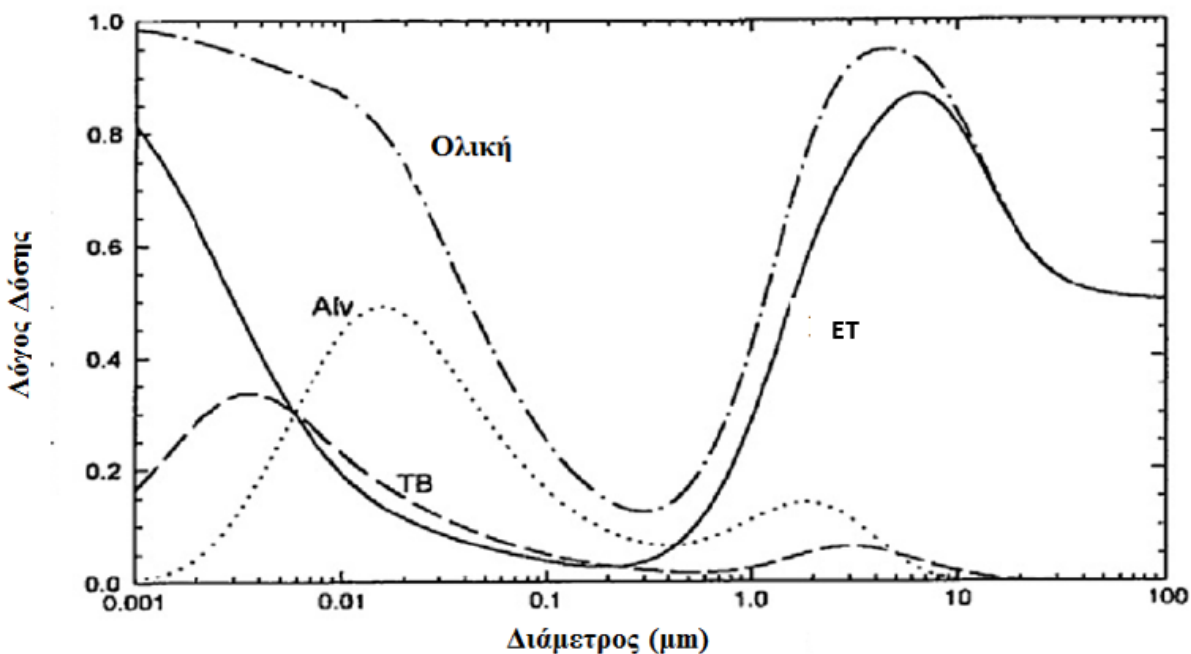
Τέλος, η ηλεκτροστατική καθίζηση είναι το φαινόμενο εναπόθεσης με τη μικρότερη συμβολή στη δόση σωματιδίων στον ανθρώπινο οργανισμό. Αναφέρεται σε σωματίδια που φέρουν ηλεκτρικό φορτίο και αναπτύσσουν μεταξύ τους δυνάμεις Coulomb καθώς κινούνται στη γραμμή ροής αέρα, έλκοντας ή απωθώντας το ένα το άλλο με επακόλουθο να ξεφύγουν από τη ροή και τελικά να προσκολληθούν ή να καθιζάνουν σε κάποιο τμήμα του αγωγού (Vincent 1995). Τα ινώδη σωματίδια (πχ ασβέστης) λόγω του λεπτού σχήματος και του μεγάλου τους μήκους δύναται να μεταφέρουν μεγάλο ηλεκτρικό φορτίο και να εισβάλλουν στα βαθύτερα σημεία του πνεύμονα εξαιτίας του μεγάλου χρόνου αιώρησης τους, καθιστώντας τα ιδιαίτερα επικίνδυνα για την υγεία.

### 3.2.2 Εφαρμοσμένη δόση στο αναπνευστικό σύστημα.

Η ολική δόση σε σωματίδια στο αναπνευστικό σύστημα μπορεί να περιγραφεί ως μια κυρτή συνάρτηση της εφαρμοσμένης δόσης με την αεροδυναμική διάμετρο, με τα κοίλα προς τα πάνω.



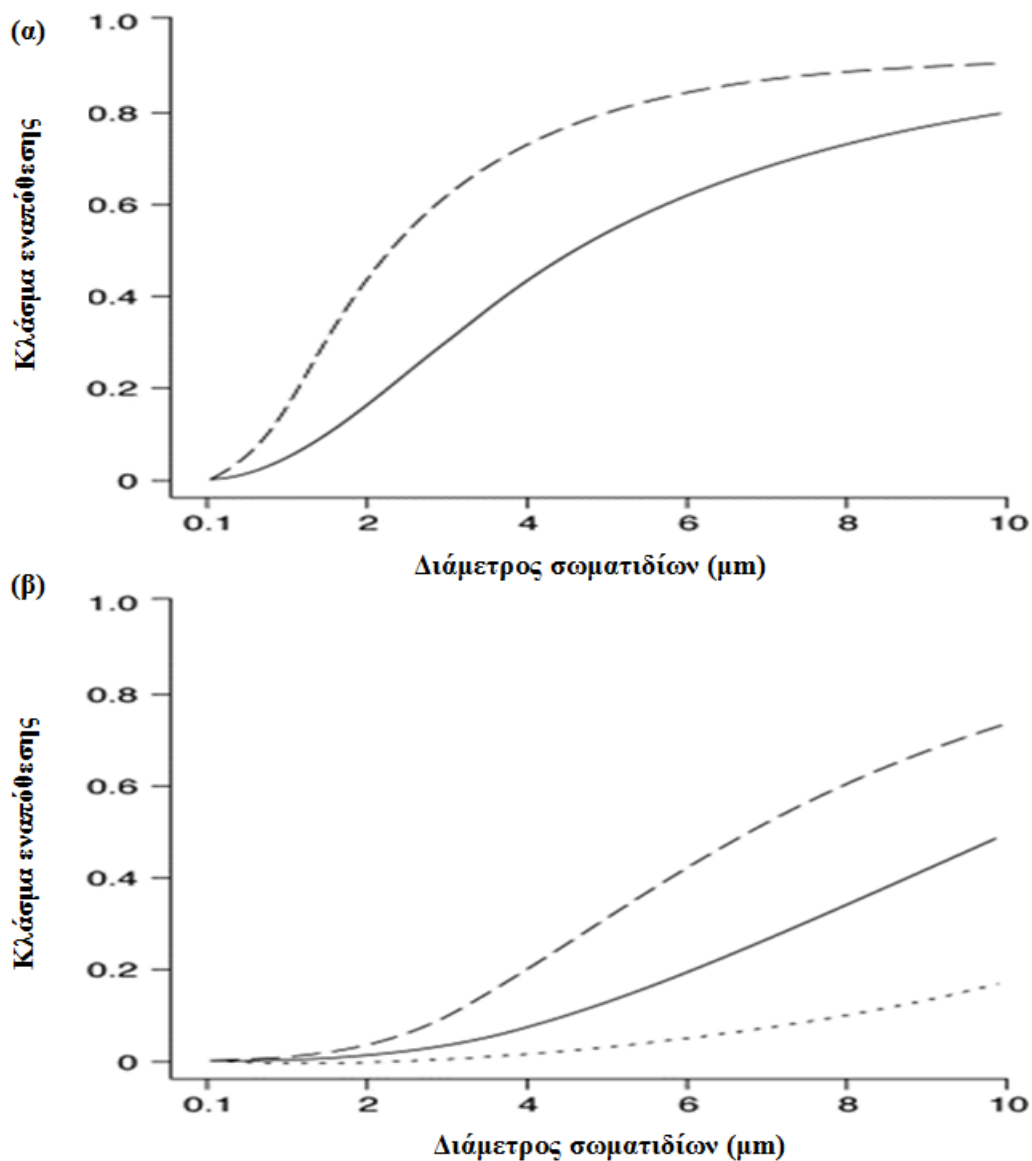
Περιλαμβάνει σωματίδια 1nm έως 100μm και το ελάχιστο της καμπύλης παρατηρείται στο διάστημα μεταξύ 0.1μm και 1μm διότι αυτά τα σωματίδια είναι οριακά μικρά για να εμφανίζουν ελάχιστη καθίζηση και πρόσκρουση αλλά και αρκετά μεγάλα για να διαχέονται (EPA 2010). Επίσης, τα υπό αιώρηση σωματίδια που εγκλωβίζονται κατά την ανταλλαγή αερίων ανάμεσα στις αναπνοές απομακρύνονται από το σύστημα. Στο διάγραμμα 1 δίνεται μια τυπική κατανομή δόσης-αεροδυναμικής διαμέτρου στις κύριες περιοχές εναπόθεσης των σωματιδίων για έναν μέσο ενήλικα άνδρα.



Διάγραμμα 1: Ολική και χωρική εναπόθεση σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα ενήλικου άνδρα με βάση το μοντέλο της ICRP (Hinds, 1999) TB; Τραχειοβρογχική περιοχή, Alv; κυψελιδική περιοχή.

Η πρώτη γραμμή άμυνας του ανθρώπινου οργανισμού είναι η εκτός θώρακα περιοχή (ET) και περιλαμβάνει τη μύτη (ET<sub>1</sub>) και το στόμα (ET<sub>2</sub>). Κύρια λειτουργία της είναι ο πρωτοβάθμιος καθαρισμός του αέρα, ρύθμιση υγρασίας και θερμοκρασίας και μεταφορά του στα επόμενα σημεία του αναπνευστικού συστήματος (Schlesinger 1988), δηλαδή το φάρυγγα, λάρυγγα και τη τραχεία όπου η ροή αποκτά μεγάλη ταχύτητα λόγω στένωσης στο σημείο των φωνητικών χορδών (Lazaridis 2008). Η ανατομία των περιοχών αυτών διαφέρει σημαντικά εξού και οι μεγάλες διαφορές που παρατηρούνται στην συγκέντρωση των σωματιδίων σε αυτές (Vincent 1995). Κυρίαρχος μηχανισμός εναπόθεσης είναι η πρόσκρουση, λόγω των υψηλών ταχυτήτων ροής αέρα που αναπτύσσονται και των κλίσεων των αεραγωγών στις περιοχές αυτές (Schulz

1998). Η μύτη λειτουργεί ως φίλτρο του εισερχόμενου αέρα, ιδιαίτερα για τα χονδρά σωματίδια, με τα εσωτερικά τριχίδια (βλεφαρίδες), το επιθήλιο και τη βλέννα στην άνω επιφάνεια της ρινικής κοιλότητας, και προτιμάται ως μέθοδος αναπνοής σε αντίθεση με το στόμα λόγω μεγαλύτερης αποδοτικότητας. Μια σύγκριση αποδοτικότητας μεταξύ μύτης και στόματος περιγράφεται στο διάγραμμα 2 με διαγράμματα συναρτήσεων μεταξύ του κλάσματος εναπόθεσης και της διαμέτρου των σωματιδίων.



Διάγραμμα 2: Εναπόθεση στη ρινική (α) και στοματική (β) κοιλότητα για διαφορετικές ογκομετρικές παροχές αέρα. α)  $250\text{cm}^3/\text{s}^{-1}$  (ευθεία) και  $1000\text{cm}^3/\text{s}^{-1}$  (διακεκομμένη). β)  $40\text{cm}^3/\text{s}^{-1}$  (κουκκίδες),  $250\text{cm}^3/\text{s}^{-1}$  (ευθεία) και  $1000\text{cm}^3/\text{s}^{-1}$  (διακεκομμένη) (Schulz, 1998).

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 2, η μύτη κατακρατεί περισσότερη μάζα σωματιδίων στο εύρος 1 $\mu$ m έως περίπου 7 $\mu$ m σε σχέση με τη μύτη για ήπια (250cm<sup>3</sup>/s<sup>-1</sup>) και μέτρια (1000cm<sup>3</sup>/s<sup>-1</sup>) δραστηριότητα, με εντονότερη διαφορά στη δεύτερη περίπτωση. Αυτό οφείλεται στον μικρότερο όγκο αέρα που εισέρχεται κατά την εισπνοή από τη μύτη σε αντίθεση με το στόμα αλλά και στη μεγαλύτερη ικανότητα φίλτρανσης της μύτης εξαιτίας του στρώματος επιθηλίου με βλέννα και βλεφαρίδες που συνεισφέρουν στον εγκλωβισμό σωματιδίων στις επιφάνειες της ρινικής κοιλότητας. Η αναπνοή από το στόμα, οδηγεί στην συσσώρευση σωματιδίων στην τραχειοβρογχική περιοχή λόγω της μικρής ικανότητας απομάκρυνσης σωματιδίων αλλά και των μεγάλων ταχυτήτων που αναπτύσσονται καθώς αυτά εισέρχονται απευθείας από το ατμοσφαιρικό περιβάλλον.

Γενικά, για έναν ενήλικα άνδρα η εφαρμοσμένη δόση των PM<sub>10</sub> αγγίζει ποσοστά 90% και 100% στην εκτός θώρακα περιοχή για παροχές 7.5 L/min και 15 L/min αντίστοιχα (EPA 2010). Σε αντίθεση με τους ενήλικες τα παιδιά ηλικίας 5-10 ετών παρουσιάζουν μεγαλύτερη δόση για σωματίδια εύρους 1-3 $\mu$ m στη περιοχή των αεραγωγών, υποδεικνύοντας μικρότερη ικανότητα φίλτρανσης στη περιοχή του κεφαλιού (Xu and Yu 1986).

Η τραχειοβρογχική περιοχή (TB) είναι υπεύθυνη για τον κλιματισμό, μεταφορά και καθαρισμό του αέρα πριν τη μεταφορά του στη κυψελιδική περιοχή (Alv). Περιλαμβάνει τους βρόγχους (γενιές 1-8) και βρογχιόλια (9-15), οι οποίοι είναι ουσιαστικά οι αεραγωγοί του αναπνευστικού μας συστήματος. Κάθε αγωγός διχοτομείται σε δυο απόγονους κλάδους και περιέχει στα τοιχώματα του βλέννα πάνω σε επιθήλιο και ένα σύνολο από βλεφαρίδες, χόνδρους και αδένες βοηθώντας στην απομάκρυνση σωματιδίων από αυτές τις περιοχές (Lazaridis 2008). Επιπλέον, παρατηρείται συσσώρευση σωματιδίων στα σημεία των διακλαδώσεων ως αποτέλεσμα σύγκρουσης αυτών στις επιφάνειες ενώ κατά μήκος των αεραγωγών έχουμε την καθίζηση για τα μεγάλης αδράνειας σωματίδια και διάχυση για τα πολύ μικρά. Τέλος, σωματίδια που αποτυγχάνουν να φθάσουν στην περιοχή των κυψελίδων και παραμένουν σε αιώρηση χωρίς να αποτεθούν απομακρύνονται με την ανταλλαγή αερίων κατά την εκπνοή.

Η κυψελιδική περιοχή (Alv) αποτελεί το κατώτερο και τελικό σημείο μεταφοράς του εισπνεόμενου αέρα όπου και γίνεται η διάλυση του οξυγόνου στο αίμα και απελευθερώνεται διοξείδιο του άνθρακα. Περιλαμβάνει τις γενιές 16-18, ιεροφυλάκια, κυψελιδικούς αεραγωγούς, πνευμονικές κυψελίδες και συνδετικό ιστό. Τα σωματίδια εδώ εναποτίθενται με καθίζηση,

διάχυση-διασπορά και ηλεκτροστατική καθίζηση και απομακρύνονται με τη δράση μακροφάγων κυττάρων (Lazaridis 2008). Η απόδοση εισπνευσιμότητας για αυτή τη περιοχή αυξάνει όσο χαμηλότερος είναι ο ρυθμός εισπνοής διότι τα εισερχόμενα σωματίδια βρίσκονται σε αιώρηση για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα με αποτέλεσμα τη μεταφορά τους στα βαθύτερα σημεία του πνεύμονα (Vincent 1995).

### 3.2.3 Βιολογικοί παράγοντες που επηρεάζουν την εναπόθεση σωματιδίων.

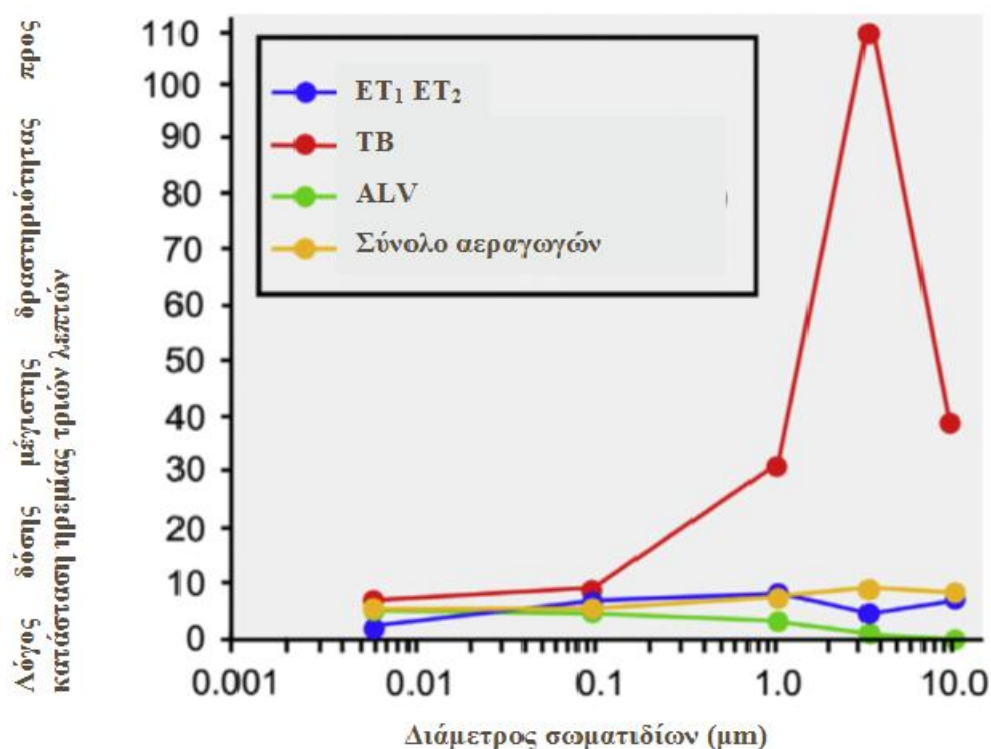
Η εκτίμηση των παραγόντων που επηρεάζουν την δόση των σωματιδίων είναι σημαντική για τον εντοπισμό των ευαίσθητων ομάδων πληθυσμού που κινδυνεύουν από την έκθεση υψηλών συγκεντρώσεων σωματιδίων. Οι διαφορές στη βιολογική απόκριση κατά την έκθεση σε ρυπογόνα περιβάλλοντα μπορεί να οφείλεται ατομικές ευαισθησίες των ατόμων και σε διαφορές δοσολογίας.

Το επίπεδο της φυσικής δραστηριότητας διαμορφώνει τον εισπνεόμενο όγκο ( $V_t$ ) αέρα στη μονάδα του χρόνου και τη συχνότητα εισπνοής ( $f$ ). Καθώς αυξάνεται η ένταση της δραστηριότητας έχουμε αύξηση και των δυο παραγόντων, με αποτέλεσμα την αυξημένη δόση σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα και πιθανότατα διαφορετική χωρική εναπόθεση. Η αυξημένη συχνότητα εισπνοής ( $f$ ) μειώνει τον χρόνο που έχουν τα σωματίδια για να καθιζήσουν ή να μεταφερθούν με διάχυση, ελαττώνοντας την εναπόθεση τους στα κατώτερα σημεία του πνεύμονα, ενώ αυξάνεται η πρόσκρουση στους πρωταρχικούς βρόγχους και την εκτός θώρακα περιοχή για σωματίδια διαμέτρου άνω των  $3\mu m$  (EPA 2010). Το γινόμενο του όγκου ( $V_t$ ) με την συχνότητα εισπνοής ( $f$ ) αποτελεί τον ρυθμό εισπνοής (ογκομετρική παροχή), που είναι ο εισπνεόμενος όγκος αέρα ανά μονάδα χρόνου (Lazaridis 2008).

Η εισπνοή μπορεί να γίνεται με διαφορετικούς τρόπους ανάλογα το άτομο. Οι περισσότεροι άνθρωποι αναπνέουν από τη μύτη σε κατάσταση ηρεμίας, αυξάνοντας την συγκέντρωση σωματιδίων στην ET, ενώ για ελαφριάς έντασης εργασία με μερική αναπνοή από το στόμα, έχουμε αύξηση της δόσης στην TB κυρίως χονδρών σωματιδίων (Lazaridis 2008). Διαφορετικές μέθοδοι εισπνοής έχουν αποδειχθεί ότι επηρεάζουν την εφαρμοσμένη δόση. Βαθιές-αργές αναπνοές ενισχύουν την εναπόθεση στη κατώτερη περιοχή του πνεύμονα σε αντίθεση με

γρήγορες-κοφτές, οι οποίες ενισχύουν την πρόσκρουση στην τραχειοβρογχική περιοχή (Valberg et al. 1982).

Μια μελέτη που εκπονήθηκε με σκοπό τον υπολογισμό της δόσης σε σωματίδια σε αθλητές (η υψηλή σωματική δραστηριότητα αυξάνει τον εισπνεόμενο όγκο έως και 10 φορές) απέδειξε ότι η έντονη σωματική άσκηση μεταβάλλει την περιοχή εναπόθεσης λεπτών και χονδρών σωματιδίων σε σημαντικό βαθμό όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3.

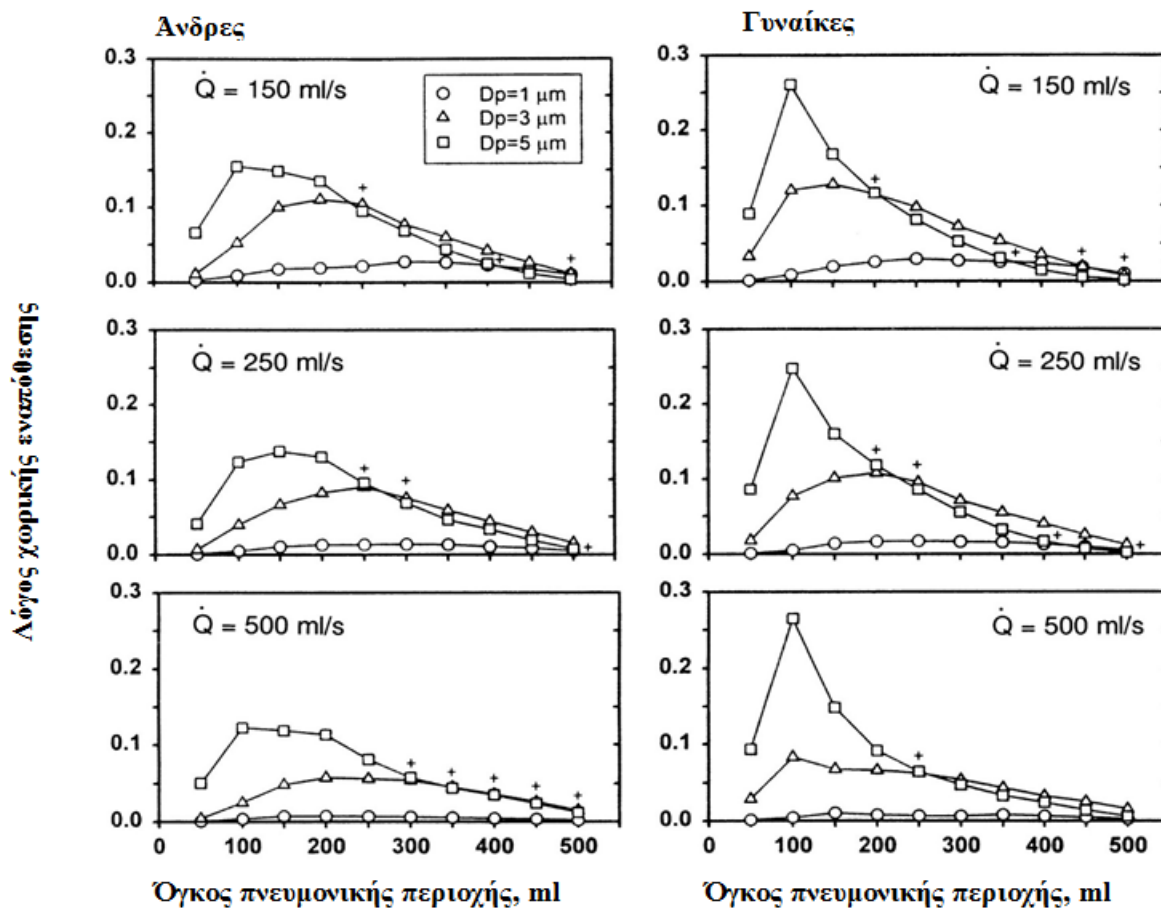


Διάγραμμα 3: Λόγος δόσης έντονης εργασίας προς κατάσταση ηρεμίας με παύσεις τριών λεπτών προς τη διάμετρο των σωματιδίων. Οι μετρήσεις περιλαμβάνουν δείγμα 26 αθλητών για σωματίδια πυκνότητας 1 mg/m<sup>3</sup> (Srasic, 2016).

Παρατηρούμε ότι η συσσώρευση σωματιδίων εύρους 0.1μm έως 10μm είναι πολύ μεγαλύτερη στη τραχειοβρογχική περιοχή κατά τη διάρκεια μέγιστης δυνατής δραστηριότητας σε σχέση με τις υπόλοιπες ζώνες απόθεσης, επαληθεύοντας την διαπίστωση ότι ο αυξημένος ρυθμός εισπνοής επηρεάζει την περιοχή εναπόθεσης σωματιδίων.

Εκτός από τις παραμέτρους εισπνοής ( $V_i$ ,  $f$ ), σημαντικοί είναι και οι παράγοντες της ηλικίας, του φύλου και της ανατομίας του εκάστοτε ατόμου. Η εναπόθεση των σωματιδίων στην εκτός θώρακα και τραχειοβρογχική περιοχή είναι μεγαλύτερη στα παιδιά από ότι στους ενήλικες (EPA

2010) διότι τα παιδιά αναπνέουν συχνότερα από το στόμα σε κατάσταση ηρεμίας και ήπιας δραστηριότητας. Επίσης, η διαφορά οφείλεται στο γεγονός ότι τα παιδιά είναι περισσότερο σωματικά δραστήρια κατά τη διάρκεια της ημέρας σε σχέση με τους ενήλικες. Οι γυναίκες εμφανίζουν σημαντικές διαφορές στην ανατομία και λειτουργία του αναπνευστικού συστήματος σε σχέση με τους άνδρες (μέγεθος, διάμετροι αεραγωγών, παράμετροι αναπνοής) με συνέπεια διαφορές στην εφαρμοσμένη δόση όπως μετρήθηκαν από τον Kim και τους συνεργάτες του (C. S. Kim & Hu, 1998) και φαίνεται στην εικόνα 13. Αυτό οφείλεται στο ότι η γυναίκα διαθέτει αναπνευστικό σύστημα με μικρότερους αεραγωγούς από τον άνδρα αλλά ταυτόχρονα αναπνέει με μικρότερο ρυθμό αλλά μεγαλύτερη συχνότητα (Aleksandropoulou Viktoria 2003).



Εικόνα 13: Συσχέτιση αεροδυναμικής διαμέτρου με λόγο εναπόθεσης για διαφορετικές ογκομετρικές παροχές. Σύγκριση μεταξύ άνδρα και γυναίκας (Kim, 1998).

Τέλος, ασθένειες στην αναπνευστική οδό επιδρούν στην δομή αλλά και τον τρόπο εισπνοής. Άνθρωποι με χρόνιες εμφρακτικές νόσους παρουσιάζουν μεγαλύτερα ποσοστά εναποτιθέμενης

μάζας σωματιδίων εξαιτίας αυξημένου ρυθμού αναπνοής καθώς επίσης και ανομοιόμορφη κατανομή ροή αέρα λόγω του άτακτου τρόπου έμφραξης τμημάτων του αναπνευστικού (Lazaridis 2008).

#### 4 Μεθοδολογία εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Στη παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις χονδρών σωματιδίων ( $PM_{10}$ ) με χρήση του οργάνου Sidepak με σκοπό το προσδιορισμό της εφαρμοσμένης δόσης και της απομάκρυνσης σωματιδίων από τον ανθρώπινο οργανισμό. Τα αντικείμενα μελέτης είναι ένας φοιτητής του Πολυτεχνείου Κρήτης και ένας εργαζόμενος σε ιδιωτική επιχείρηση. Οι περιοχές λήψης των δεδομένων είναι η πόλη των Χανίων και τα Κουνουπιδιανά, δηλαδή η περιοχή που βρίσκεται το Πολυτεχνείο Κρήτης, 15 χλμ βορειοανατολικά από το κέντρο της πόλης. Οι μετρήσεις ελήφθησαν κατά τη διάρκεια περιπάτου κοντά στους κεντρικούς δρόμους κυκλοφορίας της πόλης, σε χώρους αναψυχής και διασκέδασης, στη βιβλιοθήκη του Πολυτεχνείου και το κυλικείο του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων (ΜηχοΠ), σε ανοιχτού και κλειστού τύπου γήπεδα και οχήματα μεταφοράς, με σκοπό τη συλλογή δεδομένων για εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους. Το όργανο ρυθμίστηκε να υπολογίζει συγκεντρώσεις  $PM_{10}$  σε  $\mu g/m^3$  σε μέσους όρους ανά πέντε (5) λεπτά και ήταν τοποθετημένο στη περιοχή του ισχίου καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων εκτός των περιπτώσεων παραμονής σε κτίρια (καφετέριες, οικίες) όπου τοποθετούνταν σε τραπέζι σε κοντινή απόσταση. Η κατανομή μεγέθους μάζας σωματιδίων πραγματοποιήθηκε με τον κρουστήρα Andersen, παίρνοντας δύο διαφορετικές κατανομές, μια για εσωτερικούς και μια για εξωτερικούς χώρους.

Με την ολοκλήρωση συλλογής των δεδομένων ακολούθησε η επεξεργασία παραγωγή αποτελεσμάτων. Αρχικά έγινε διόρθωση των τιμών με ένα συντελεστή διόρθωσης ( $F_{cor} = \text{συγκέντρωση} \cdot 0.86 + 6.42$ ) και έπειτα κατασκευάστηκαν διαγράμματα έκθεσης, δηλαδή συγκέντρωσης – χρόνου και υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι ανά ώρα και ημέρα, οι οποίοι αναγράφονται σε πίνακες. Ο συντελεστής διόρθωσης προέκυψε ύστερα από 24ώρες μετρήσεις που έγιναν με τα όργανα Sidepak και Andersen για δέκα ημέρες όπου διαπιστώθηκε η διασπορά των τιμών μεταξύ τους και επιλέχθηκε η καλύτερη ευθεία. Ακολούθησε η εφαρμογή του μοντέλου ExDoM για τον υπολογισμό της δόσης και της κατακράτησης σωματιδίων στον ανθρώπινο οργανισμό. Κατασκευάστηκαν διαγράμματα και υπολογίστηκαν ποσοστά που

περιγράφουν τη συσσώρευση σωματιδιακής μάζας κατά μήκος της αναπνευστικής οδού, τη ξεχωριστή χωρική δόση και την απομάκρυνση των σωματιδίων. Όπως προαναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3, η εφαρμογή του μοντέλου χρησιμοποιεί τα ανατομικά και φυσιολογικά χαρακτηριστικά ενός νέου Καυκάσιου άνδρα, μέσου ύψους, ηλικίας από 25 – 30 ετών, με αναπνοή από τη μύτη.

Τα αποτελέσματα που θα αναλυθούν παρακάτω θα χωριστούν σε δυο βασικές κατηγορίες. Στην έκθεση για εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους. Στόχος αυτής της προσέγγισης είναι να μελετηθεί χωριστά η δόση και η απομάκρυνση των σωματιδίων από το ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα διότι οι πηγές προέλευσης σωματιδίων, η χημική τους σύσταση, το μέγεθος και η συγκέντρωση τους μεταβάλλεται σημαντικά ανάμεσα στα εσωτερικά και εξωτερικά περιβάλλοντα. Επομένως, η εκτίμηση των παραπάνω παραμέτρων αναμένεται να εμφανίσει διαφορές με επακόλουθο την διαφορετική επίδραση των σωματιδίων στον οργανισμό.

#### 4.1 Όργανο συλλογής δεδομένων και κατανομή μεγέθους μάζας σωματιδίων.

Για την κατανομή μεγέθους - μάζας σωματιδίων σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους χρησιμοποιήθηκε ο κρουστικός δειγματολήπτης Andersen για 24 ώρες στην εκάστοτε περίπτωση. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στην σταθμική (βαρομετρική) μέτρηση της μάζας των σωματιδίων που συλλέγονται πάνω σε φίλτρα με τη βοήθεια ζυγού ακριβείας. Η συσκευή χωρίζεται σε εννιά στάδια φτιαγμένα από κράμα αλουμινίου τα οποία λειτουργούν ως φίλτρα για τον εισερχόμενο αέρα. Η διάμετρος των πόρων των φίλτρων στο εκάστοτε στάδιο διαφέρει έτσι ώστε να συλλέγονται σωματίδια ολόκληρου του εύρους που μελετάμε. Καθώς ο αέρας εισέρχεται στη συσκευή, τα σωματίδια συγκρούονται στα φίλτρα και προσκολλώνται σε αυτά όταν έχουν μεγαλύτερη διάμετρο από αυτή των πόρων, ενώ τα μικρότερα διαπερνάνε τα φίλτρα κατευθυνόμενα στα κατώτερα στάδια. Όσο μικρότερο είναι το σωματίδιο τόσο βαθύτερα εισέρχεται στον δειγματολήπτη (κατά αντιστοιχία με τον ανθρώπινο πνεύμονα). Οι διάμετροι των φίλτρων είναι 0.4, 0.7, 1.1, 2.1, 3.3, 4.7, 5.8, 9.0  $\mu\text{m}$  κατά αύξοντα αριθμό σταδίου. Τα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από αυτή που συγκρατείται στο τελευταίο στάδιο (0.4 – 0.6) συλλέγονται στο backup filter ( $< 0.4$ ).





Εικόνα 14: Κρουστικός δειγματολήπτης Andersen εννιά αλληπάλληλων σταδίων.

Τα αποτελέσματα από τον κρουστήρα θα χρησιμοποιηθούν αργότερα ως αρχείο εισόδου για τον υπολογισμό της εφαρμοσμένης δόσης μέσω του μοντέλου ExDoM.

Η συλλογή των δεδομένων έγινε με χρήση του οργάνου Sidepak, το οποίο διαθέτει μια κύρια και μια εφεδρική μπαταρία για μετρήσεις σε εξωτερικό περιβάλλον με διάρκεια λίγων ωρών, ενώ αντίστοιχα για μετρήσεις σε εσωτερικούς χώρους συνδέεται με καλώδιο σε πρίζα. Το όργανο διαθέτει αντλία αέρα παροχής από 0.7 έως 1.8 l/min και περιέχει ανιχνευτή σκέδασης φωτός 90 μοιρών με δίοδο ακτίνας laser 670 nm ανιχνεύοντας σωματίδια διαμέτρου 1, 2.5 ή 10 $\mu$ m βάση επιλογής του χρήστη, με μέγιστη καταγραμμένη συγκέντρωση τα 20 mg/m<sup>3</sup>. Αποθηκεύει δεδομένα συγκέντρωσης-χρόνου σε μονάδες mg/m<sup>3</sup> ανά λεπτό ή πέντε λεπτά ανάλογα τη ρύθμιση σε εσωτερικό σκληρό δίσκο. Όσον αφορά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, οι διαστάσεις του είναι 106 x 92 x 70 mm, ζυγίζει περίπου 0.5 kg με τη μπαταρία και συνδέεται με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή με καλώδιο USB 1.1, ο οποίος πρέπει να «τρέχει» σε λειτουργικό Windows 7 ή XP. Τέλος, η θερμοκρασία του χώρου μετρήσεων δεν πρέπει να ξεπερνά τους 50 βαθμούς Κελσίου και η υγρασία από 0-95%.



Εικόνα 15: Όργανο καταγραφής δεδομένων έκθεσης. Μοντέλο Sidepak AM510.



Εικόνα 16: Πρόσωση οργάνου Sidepak με απεικόνιση των πλήκτρων λειτουργίας.

Αρχικά ανοίγουμε το όργανο πιέζοντας παρατεταμένα το πλήκτρο KAPTEΛΑ. Θα αρχίσει να γίνεται προθέρμανση του οργάνου με την οθόνη να γράφει «WARM UP». Όταν η ένδειξη αλλάξει σε «SURVEY» mode τότε πιέζουμε και πάλι KAPTEΛΑ και επιλέγουμε «ZERO CAL» για να κάνουμε βαθμονόμηση, η οποία γίνεται με τοποθέτηση ειδικού φίλτρου στο στόμιο της αντλίας αέρα για ένα λεπτό. Ύστερα, μέσω του πλήκτρου KAPTEΛΑ επιστρέφουμε στο κύριο μενού και επιλέγουμε «DATA LOG» και στη συνέχεια «PROG 1» ή «PROG 2» ανάλογα το πρόγραμμα το οποίο θέλουμε να «τρέξουμε», πιέζοντας το πλήκτρο ΒΕΛΟΣ για επιβεβαίωση και αρχίζει η καταγραφή των δεδομένων, κάτω από την ταμπέλα «LOGGING DATA». Η διαμόρφωση των προγραμμάτων 1 και 2 γίνεται με σύνδεση του οργάνου σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και με χρήση κατάλληλου προγράμματος που παρέχει ο κατασκευαστής. Όταν ολοκληρώσουμε τις μετρήσεις, πιέζουμε το πλήκτρο KAPTEΛΑ και έπειτα το πλήκτρο με το βέλος για να γίνει αποθήκευση των δεδομένων. Η αποθήκευση των δεδομένων απεικονίζεται με την ένδειξη «TEST #» και τον αύξοντα αριθμό της μέτρησης, για παράδειγμα «TEST #2». Τέλος, απενεργοποιούμε το όργανο πιέζοντας παρατεταμένα για τρία δευτερόλεπτα το πλήκτρο KAPTEΛΑ.

## 5 Ανάλυση αποτελεσμάτων

### 5.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων έκθεσης φοιτητή για εσωτερικούς και ανοιχτά περιβάλλοντα.

Οι πίνακες που ακολουθούν περιγράφουν τους μέσους όρους έκθεσης καθώς και το μέγιστο-ελάχιστο των δεδομένων που λήφθηκαν για τον υπολογισμό της έκθεσης του φοιτητή ανά ημέρα και ώρα έκθεσης. Δίνεται στη συνέχεια μια περιγραφή των δραστηριοτήτων της κάθε ημέρας για καλύτερη κατανόηση των διακυμάνσεων των τιμών και έπειτα παρουσιάζεται το διάγραμμα έκθεσης-χρόνου για τη πρώτη ημέρα.

Πίνακας 4: Πρώτη ημέρα μετρήσεων έκθεσης φοιτητή.

Ωρα	Μέσος Όρος (μg/m <sup>3</sup> )	Μέγιστο (μg/m <sup>3</sup> )	Ελάχιστο (μg/m <sup>3</sup> )
0:00 - 1:00 πμ	12.37	18.46	8.14
1:00 - 2:00 πμ	20.83	21.9	18.46
2:00 - 3:00 πμ	23.05	23.62	21.9
3:00 - 4:00 πμ	23.91	24.48	23.62
4:00 - 5:00 πμ	14.85	25.34	14.16
5:00 - 6:00 πμ	19.82	22.76	17.6
6:00 - 7:00 πμ	25.48	27.92	21.9
7:00 - 8:00 πμ	31.15	33.08	28.78
8:00 - 9:00 πμ	34.59	37.38	31.36
9:00 - 10:00 πμ	34.80	37.38	30.5
10:00 - 11:00 πμ	31.36	34.8	27.92
11:00 - 12:00 πμ	27.99	31.36	24.48
12:00 - 1:00 μμ	17.74	26.2	13.3
1:00 - 2:00 μμ	30.93	49.42	23.62
2:00 - 3:00 μμ	33.51	34.8	32.22
3:00 - 4:00 μμ	36.02	37.38	34.8
4:00 - 5:00 μμ	39.58	41.68	12.44

<b>5:00 – 6:00 μμ</b>	15.24	17.6	10.72
<b>6:00 – 7:00 μμ</b>	20.68	23.62	17.6
<b>7:00 – 8:00 μμ</b>	26.56	29.64	23.62
<b>8:00 – 9:00 μμ</b>	32.08	34.8	29.64
<b>9:00 – 10:00 μμ</b>	37.24	39.1	34.8
<b>10:00 -11:00 μμ</b>	26.20	41.68	12.44
<b>11:00 -12:00 μμ</b>	20.68	22.76	17.6

Η πρώτη ημέρα ημέρα μετρήσεων περιλαμβάνει μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν εντός της οικίας διαμονής κοντά στο κέντρο της πόλης, στη βιβλιοθήκη, το κυλικείο και το γήπεδο του Πολυτεχνείου Κρήτης αλλά και σε περίπατο και αναμονή σε στάση λεωφορείου. Πιο συγκεκριμένα, οι πρώτες εννιά ώρες (0:00 – 09:00πμ) αφορούν μετρήσεις στη διάρκεια του ύπνου όπου η συγκέντρωση κυμαινόταν κατά μέσο όρο στα  $24.08 \pm 7.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Στο διάστημα 9:30 – 11:00 πμ πραγματοποιήθηκαν μικρές εργασίες στο σπίτι, όπως καθάρισμα με σκούπα και πλύσιμο των πιάτων που έδειξαν μεταβολή στη αέρια συγκέντρωση στα  $33.08 \pm 2.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , το οποίο οφείλεται κυρίως στην επαναιώρηση της σκόνης του εδάφους από τη χρήση της σκούπας. Τις ώρες 11:00 – 12:00 πμ και 16:00 – 17:00 μμ έχουμε περπάτημα με αναμονή σε στάση λεωφορείου με τη συγκέντρωση να φτάνει τιμές  $27.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και  $39.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  αντίστοιχα. Κατά τη διάρκεια παραμονής στο κτίριο της βιβλιοθήκης για τις ώρες 1:00 – 4:00 μμ η έκθεση έφθασε στο ύψος των  $33.48 \pm 4.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$  όπου και παρατηρήθηκε η μέγιστη τιμή για την πρώτη ημέρα ( $49.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) στις 1:00 – 2:00 μμ όπου η διέλευση των φοιτητών ήταν μέγιστη με αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης των  $\text{PM}_{10}$  από τη συνεχόμενη κίνηση αυτών. Τέλος, ακολούθησε τρίωρη αθλητική δραστηριότητα στο γήπεδο μπάσκετ του Πολυτεχνείου με μέση συγκέντρωση στα  $26.43 \pm 5.69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Σημειώνεται εδώ πως το όργανο ήταν τοποθετημένο σε ένα τοίχωμα ύψους 0.5μ περίπου σε σημείο εκτός αθλητικού δαπέδου για λόγους ασφαλείας. Στο διάγραμμα 4 παρουσιάζεται η συνολική έκθεση της πρώτης ημέρας.



Διάγραμμα 4: Συνολική έκθεση σε PM<sub>10</sub> κατά τη διάρκεια της πρώτης ημέρας έκθεσης του φοιτητή.

Το διάγραμμα έχει «χωριστεί» σε τμήματα με τη βοήθεια καθέτων γραμμών για ευκολότερο διαχωρισμό των χώρων όπου έγιναν οι μετρήσεις με βάση την ώρα της ημέρας. Συνοψίζοντας, ο μέσος όρος της συγκέντρωσης για την πρώτη ημέρα κυμαίνεται στα  $26.60 \pm 8.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Αναλυτικότερα, ο μέσος όρος για εσωτερικούς χώρους βρίσκεται στα  $26.21 \pm 8.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ενώ για το εξωτερικό περιβάλλον στα  $28.06 \pm 7.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$  με μέγιστη και ελάχιστη τιμή ημέρας στα 49.42 και  $8.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$  αντίστοιχα.

Η δεύτερη ημέρα μετρήσεων περιέχει σχεδόν τις ίδιες δραστηριότητες με τη πρώτη, με μοναδική αλλαγή τον χώρο του γηπέδου με μια καφετέρια στη περιοχή Κουμ Καπί στο κέντρο της πόλης.

Πίνακας 5: Δεύτερη ημέρα μετρήσεων έκθεσης φοιτητή.

Ωρα	Μέσος Όρος ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Μέγιστο ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Ελάχιστο ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
0:00 - 1:00 πμ	12.30	17.60	8.14
1:00 - 2:00 πμ	20.83	21.90	18.46
2:00 - 3:00 πμ	23.05	23.62	21.90
3:00 - 4:00 πμ	23.91	24.48	23.62
4:00 - 5:00 πμ	15.50	20.18	12.44
5:00 - 6:00 πμ	20.06	27.92	19.32

6:00 – 7:00 πμ	27.20	27.92	26.20
7:00 – 8:00 πμ	27.06	27.92	26.20
8:00 – 9:00 πμ	27.20	27.92	26.20
9:00 – 10:00 πμ	26.77	27.92	26.20
10:00 – 11:00 πμ	26.99	27.92	26.20
11:00 – 12:00 πμ	26.99	27.92	26.20
12:00 – 1:00 μμ	14.90	25.34	12.44
1:00 – 2:00 μμ	20.18	23.62	18.46
2:00 – 3:00 μμ	26.06	29.64	24.48
3:00 – 4:00 μμ	31.65	35.66	30.50
4:00 – 5:00 μμ	36.88	39.96	34.80
5:00 – 6:00 μμ	41.54	43.40	12.44
6:00 – 7:00 μμ	18.10	16.74	12.44
7:00 – 8:00 μμ	48.85	48.56	17.60
8:00 – 9:00 μμ	50.64	50.28	48.56
9:00 – 10:00 μμ	23.28	52.86	16.74
10:00 -11:00 μμ	18.10	18.46	15.88
11:00 -12:00 μμ	14.02	19.32	10.72

Οι δραστηριότητες της δεύτερης ημέρας ξεκινάνε με μέτρηση στο σπίτι για τις πρώτες εννιά ώρες κατά τη διάρκεια του ύπνου χωρίς ιδιαίτερες διαφορές από τη πρώτη μέρα, με μέσο όρο  $22.52 \pm 2.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ακολουθεί χρήση Η/Υ για τις επόμενες δύο ώρες χωρίς αξιοσημείωτη μεταβολή της συγκέντρωσης. Στη διάρκεια 12:00 – 1:00 μμ παρατηρούμε μείωση της αέριας συγκέντρωσης κατά τη διάρκεια παραμονής στο χώρο του κυλικείου του τμήματος ΜηΧΟΠ και στη συνέχεια έπεται τετράωρη παραμονή στη βιβλιοθήκη της σχολής με τη συγκέντρωση να κυμαίνεται στα  $29.60 \pm 6.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Στη συνέχεια, ο περίπατος στους δρόμους της πόλης για μια ώρα με προορισμό την καφετέρια στη περιοχή Κουμ Καπί έδειξε αρκετά υψηλή συγκέντρωση, η οποία οφείλεται στη αυξημένη κυκλοφορία και κυμάνθηκε στα  $41.53 \pm 8.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ενώ στη καφετέρια οι τιμές ήταν υψηλότερες εξαιτίας του μεγάλου αριθμού καπνιζόντων στον χώρο με τη συγκέντρωση να φτάνει στα  $30.09 \pm 16.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Το διάγραμμα 5 απεικονίζει την δεύτερη ημέρα έκθεσης για τον φοιτητή.



Διάγραμμα 5: Συνολική έκθεση σε  $PM_{10}$  κατά τη διάρκεια της δεύτερης ημέρας έκθεσης του φοιτητή.

Ο μέσος όρος συγκέντρωσης σωματιδίων για τη δεύτερη μέρα κυμαίνεται στα  $26.17 \pm 10.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  με μέγιστη τιμή τα  $52.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και ελάχιστη στα  $8.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η συγκέντρωση στο σύνολο των εσωτερικών χώρων για αυτή τη μέρα βρέθηκε στα  $24.69 \pm 8.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ενώ για τους εξωτερικούς χώρους στα  $32.40 \pm 11.31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Για την τρίτη ημέρα μετρήσεων έχουμε:

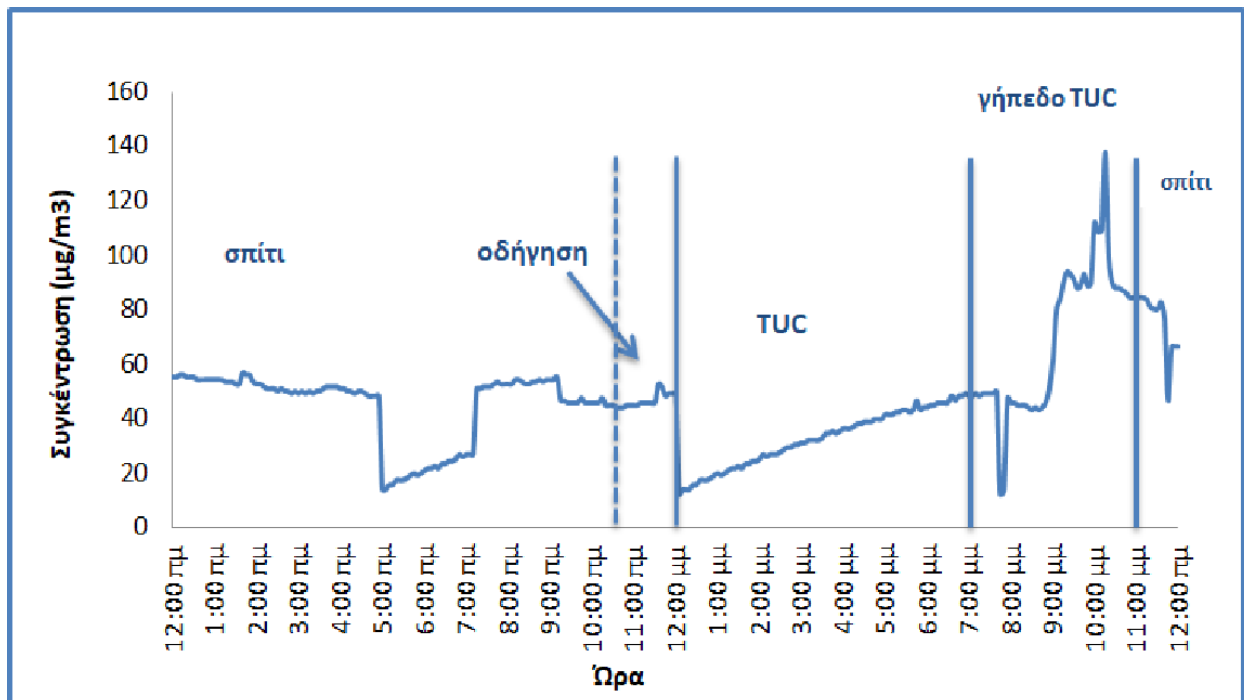
Πίνακας 6: Πίνακας μετρήσεων τρίτης ημέρας έκθεσης φοιτητή.

Ώρα	Μέσος Όρος ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Μέγιστο ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Ελάχιστο ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
0:00 - 01:00 πμ	55.225	56.30	54.58
1:00 - 2:00 πμ	54.508	57.16	52.86
2:00 - 3:00 πμ	51.068	52.86	49.42
3:00 - 4:00 πμ	50.710	52.00	49.42
4:00 - 5:00 πμ	49.707	51.14	48.56
5:00 - 6:00 πμ	17.528	20.18	14.16
6:00 - 7:00 πμ	23.692	27.06	21.04
7:00 - 8:00 πμ	45.980	53.72	27.06
8:00 - 9:00 πμ	53.720	54.58	52.86



<b>9:00 - 10:00πμ</b>	48.488	55.44	45.98
<b>10:00 – 11:00 πμ</b>	45.335	47.70	44.26
<b>11:00 – 12:00 πμ</b>	47.700	52.86	45.12
<b>12:00 – 1:00 μμ</b>	19.822	49.42	17.60
<b>1:00 – 2:00 μμ</b>	25.483	28.78	23.62
<b>2:00 -3:00 μμ</b>	31.145	34.80	29.64
<b>3:00 -4:00 μμ</b>	36.520	39.10	34.80
<b>4:00 – 5:00 μμ</b>	41.250	43.40	39.10
<b>5:00 – 6:00 μμ</b>	44.905	48.56	43.40
<b>6:00 – 7:00 μμ</b>	48.775	49.42	46.84
<b>7:00 – 8:00 μμ</b>	45.048	50.28	43.40
<b>8:00 – 9:00 μμ</b>	83.748	94.14	51.14
<b>9:00 – 10:00 μμ</b>	95.745	138.00	84.68
<b>10:00 – 11:00 μμ</b>	73.643	84.68	46.84
<b>11:00 – 12:00 μμ</b>	56.372	66.62	56.30

Η τρίτη μέρα ξεκινά και πάλι με ύπνο από τις 0:00 πμ και αφύπνιση στις 09:00 πμ. Έπειτα ακολούθησαν καθαριότητες στο σπίτι για μια ώρα, όπως σκούπισμα και σφουγγάρισμα με τη συγκέντρωση να κυμαίνεται στα  $48.49 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 3.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Κατά τις 11:00 πμ έχουμε οδήγηση με το αυτοκίνητο και άφιξη στο χώρο του Πολυτεχνείου στις 12:00 μμ χωρίς σημαντική διαφορά στη συγκέντρωση σωματιδίων, για την ακρίβεια στα  $47.70 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 2.69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Τις ώρες 12:00 μμ μέχρι 19:00 μμ έγιναν μετρήσεις στη βιβλιοθήκη με τη συγκέντρωση να φτάνει στα  $36.17 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 9.72 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και στη συνέχεια ακολούθησε αθλητική δραστηριότητα στο γήπεδο μπάσκετ όπου η συγκέντρωση έφτασε στα  $75.84 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 25.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Τέλος, στις 10:00 μμ ελήφθησαν μετρήσεις για δύο ώρες στο σπίτι χωρίς αξιοσημείωτη δραστηριότητα με την έκθεση να κυμαίνεται στα  $68.56 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 12.87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



Διάγραμμα 6: Συνολική έκθεση σε  $PM_{10}$  κατά τη διάρκεια της τρίτης ημέρας έκθεσης του φοιτητή.

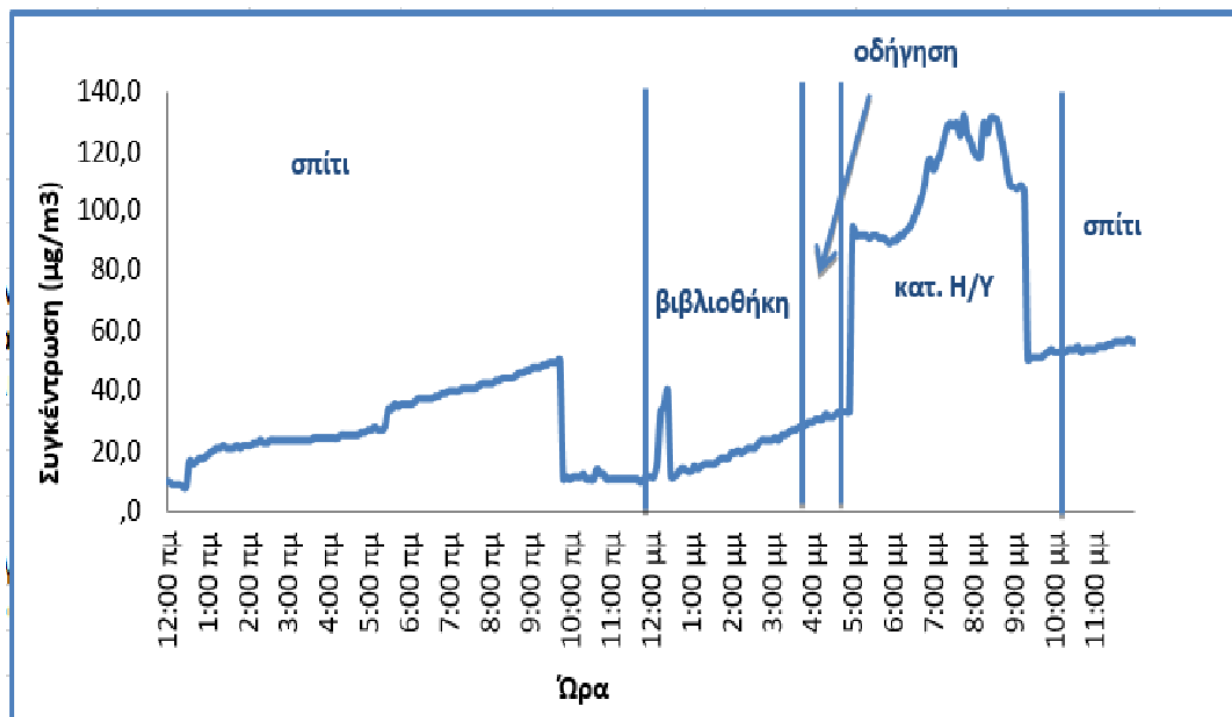
Ο μέσος όρος συγκέντρωσης σε σωματίδια για τη τρίτη ημέρα κυμάνθηκε στα  $48.40 \pm 19.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  με μέγιστη τιμή στα  $138.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και ελάχιστη στα  $14.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Στους εσωτερικούς χώρους η μέση συγκέντρωση βρέθηκε στα  $44.48 \pm 14.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ενώ για τους εξωτερικούς στα  $75.84 \pm 25.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Η τέταρτη ημέρα μετρήσεων περιέχει παρόμοιες δραστηριότητες με τις προηγούμενες ημέρες με τη διαφορά ότι έγιναν μετρήσεις και σε κατάστημα υπολογιστών με υπηρεσίες διαδικτύου. Αναλυτικότερα, η αφύπνιση πραγματοποιήθηκε στις 11:00 πμ με τη συγκέντρωση των  $PM_{10}$  στη διάρκεια της νύκτας να κυμαίνεται στα  $21.58 \pm 6.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$  με την επόμενη ώρα να γίνεται σκούπισμα στο χώρο της κουζίνας και καθιστικού με τη συγκέντρωση να βρίσκεται στα  $10.72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Από τις 12:00 μμ έως και τις 5:00 μμ έγιναν μετρήσεις στη βιβλιοθήκη του Πολυτεχνείου, χωρίς μεγάλη παρουσία από άλλους φοιτητές και τη συγκέντρωση να φτάνει κατά μέσο όρο στα  $25.95 \pm 9.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ενώ ακολούθησε επίσκεψη στο κατάστημα υπολογιστών και παραμονή στο χώρο για πέντε ώρες και τη συγκέντρωση να αγγίζει τα  $101.92 \pm 23.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Αξίζει να σημειωθεί εδώ πως το κάπνισμα στον χώρο ήταν έντονο σε όλη τη διάρκεια παραμονής στο κατάστημα, το οποίο εξηγεί την υψηλή συγκέντρωση. Η μέτρηση από τις 10:00

μμ έως και τις 12:00 πμ πραγματοποιήθηκε στο σπίτι, με παρακολούθηση τηλεόρασης και τη συγκέντρωση να φτάνει τα  $17.74 \pm 9.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Πίνακας 7: Πίνακας μετρήσεων της τέταρτης ημέρας έκθεσης φοιτητή.

Ωρα	Μέσος Όρος ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Μέγιστο ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Ελάχιστο ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
12:00 πμ	12.297	17.60	8.14
1:00 πμ	20.825	21.90	18.46
2:00 πμ	23.047	23.62	21.90
3:00 πμ	23.907	24.48	23.62
4:00 πμ	25.197	26.20	24.48
5:00 πμ	13.472	32.22	27.06
6:00 πμ	13.472	34.80	21.90
7:00 πμ	19.033	22.76	17.60
8:00 πμ	22.269	21.90	17.60
9:00 πμ	16.310	26.20	10.72
10:00 πμ	11.652	14.16	10.72
11:00 πμ	26.025	11.58	9.86
12:00 μμ	46.281	40.82	37.38
1:00 μμ	53.290	41.68	14.16
2:00 μμ	16.955	19.32	12.44
3:00 μμ	21.183	23.62	16.74
4:00 μμ	17.428	94.14	15.88
5:00 μμ	59.597	91.56	88.98
6:00 μμ	91.130	117.36	91.56
7:00 μμ	113.848	131.98	118.22
8:00 μμ	125.602	131.12	107.04
9:00 μμ	98.297	108.76	15.88
10:00 μμ	18.102	18.46	16.74
11:00 μμ	17.385	59.74	9.86



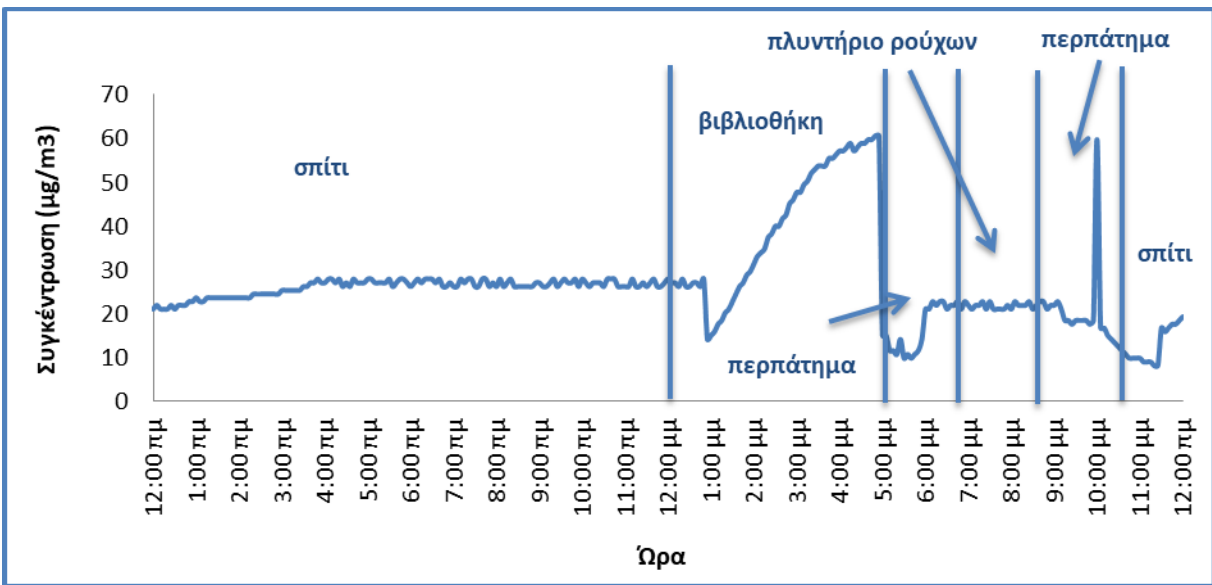
Διάγραμμα 7: Συνολική έκθεση σε  $PM_{10}$  για την τέταρτη ημέρα έκθεσης του φοιτητή.

Η μέση συγκέντρωση των  $PM_{10}$  για τη τέταρτη μέρα βρέθηκε  $38.49 \pm 35.91 \mu g/m^3$ , παρατηρήθηκε μέγιστο στις 7:38 μμ της τάξης των  $131.98 \mu g/m^3$  και ελάχιστο στις 12:28 πμ με τιμή  $8.14 \mu g/m^3$ . Για τους εσωτερικούς χώρους στο σύνολο της ημέρας η μέση συγκέντρωση ταυτίζεται με τον παραπάνω μέσο όρο καθώς δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε εξωτερικό περιβάλλον.

Τέλος, η πέμπτη μέρα μετρήσεων του φοιτητή ξεκινάει με μέτρηση στη διάρκεια του ύπνου για τις ώρες 00:00 – 12:00 με τη συγκέντρωση να κυμαίνεται στα  $25.97 \pm 1.88 \mu g/m^3$ . Ακολούθησε παραμονή στον χώρο του κυλικείου μέχρι τις 13:00 με συγκέντρωση  $PM_{10}$  στα  $25.91 \mu g/m^3$  και στη συνέχεια έγιναν μετρήσεις στη βιβλιοθήκη για τις επόμενες 5 ώρες. Η μέση ωριαία συγκέντρωση βρέθηκε  $43.01 \pm 14.62 \mu g/m^3$ . Στις 17:00 – 18:00 ο περίπατος μέχρι τη στάση του λεωφορείου με αναμονή λίγων λεπτών έδειξε τη συγκέντρωση να βρίσκεται στα  $12.08 \pm 1.96 \mu g/m^3$  ενώ έπειτα πραγματοποιήθηκε επίσκεψη σε κατάστημα πλυντηρίων ρούχων με παραμονή στο χώρο για το διάστημα 18:00 - 19:00, με τη συγκέντρωση να είναι  $21.97 \pm 0.77 \mu g/m^3$ . Τέλος, με τον περίπατο από τις 19:00 – 20:00 προς το σπίτι και την παραμονή εκεί μέχρι την ολοκλήρωση του 24ώρου, η συγκέντρωση των  $PM_{10}$  κυμάνθηκε στα  $16.29 \pm 8.56 \mu g/m^3$ .

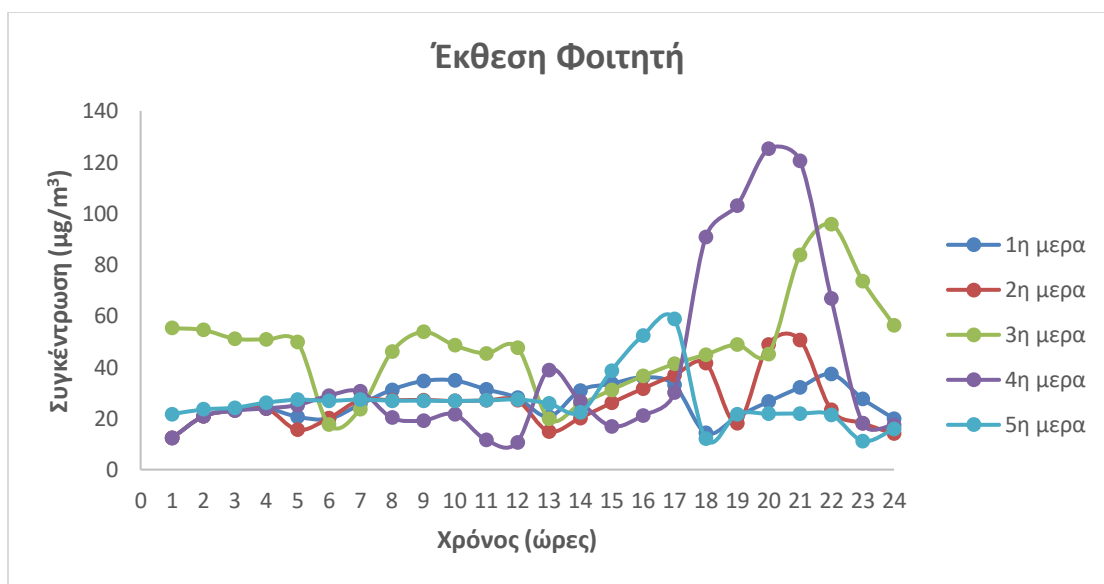
Πίνακας 8: Πίνακας μετρήσεων πέμπτης ημέρας έκθεσης του φοιτητή.

Ωρα	Μέσος Όρος ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Μέγιστο ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Ελάχιστο ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
<b>12:00 πμ</b>	21.69	46.840	42.540
<b>1:00 πμ</b>	23.48	49.420	45.980
<b>2:00 πμ</b>	24.19	50.280	48.560
<b>3:00 πμ</b>	26.13	53.720	51.140
<b>4:00 πμ</b>	27.28	54.580	52.860
<b>5:00 πμ</b>	26.85	57.160	53.720
<b>6:00 πμ</b>	27.35	57.160	54.580
<b>7:00 πμ</b>	26.92	57.160	53.720
<b>8:00 πμ</b>	26.92	57.160	53.720
<b>9:00 πμ</b>	26.77	57.160	53.720
<b>10:00 πμ</b>	26.99	57.160	53.720
<b>11:00 πμ</b>	27.35	57.160	53.720
<b>12:00 πμ</b>	25.84	18.460	15.880
<b>1:00 μμ</b>	22.26	19.320	17.600
<b>2:00 μμ</b>	38.67	16.740	10.720
<b>3:00 μμ</b>	52.36	21.040	16.740
<b>4:00 μμ</b>	58.74	18.460	15.880
<b>5:00 μμ</b>	12.08	18.460	15.880
<b>6:00 μμ</b>	21.69	59.740	16.740
<b>7:00 μμ</b>	21.76	16.740	9.000
<b>8:00 μμ</b>	21.90	21.900	8.140
<b>9:00 μμ</b>	21.47	23.620	21.040
<b>10:00 μμ</b>	11.22	24.480	23.620
<b>11:00 μμ</b>	15.74	26.200	24.480



Διάγραμμα 8: Συνολική έκθεση σε  $PM_{10}$  για την πέμπτη ημέρα μετρήσεων του φοιτητή.

Η μέση ημερήσια συγκέντρωση βρέθηκε  $35.67 \pm 17.85 \mu g/m^3$  με μέγιστη τιμή τα  $59.74 \mu g/m^3$  στις 4:58 μμ στη διάρκεια του περιπάτου και ελάχιστη τιμή τα  $8.14 \mu g/m^3$  στις 5:32 μμ και πάλι στη διάρκεια του περιπάτου. Μέσος όρος συγκέντρωσης σε εσωτερικούς χώρους, δηλαδή στο σπίτι για αυτή την ημέρα βρέθηκε στα  $39.79 \pm 16.58 \mu g/m^3$  ενώ για το εξωτερικό περιβάλλον στα  $23.32 \pm 15.71 \mu g/m^3$ .



Διάγραμμα 9: Συγκέντρωση  $PM_{10}$  σωματιδίων σε 24ωρη διάρκεια για τις πέντε ημέρες έκθεσης του φοιτητή.

Στο διάγραμμα 9 παρατηρούμε πως διαμορφώθηκε η έκθεση για τις πέντε ημέρες μετρήσεων έκθεσης του φοιτητή σε 24ωρη βάση. Την τέταρτη μέρα έχουμε τις υψηλότερες τιμές συγκεντρώσεων με μέγιστη τα  $131.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

## 5.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων έκθεσης εργαζομένου νυχτερινό κέντρο διασκέδασης για εσωτερικούς χώρους και εξωτερικά περιβάλλοντα.

Σε αυτή την ενότητα θα περιγραφούν οι δραστηριότητες και οι χώροι που παρευρέθη ο εργαζόμενος με σκοπό να διερευνηθούν οι διαφορές στην έκθεση και δόση αιωρούμενων σωματιδίων μεταξύ του εργαζομένου και του φοιτητή.

Η πρώτη ημέρα έκθεσης ξεκινά με μέτρηση στον χώρο εργασίας στις 22:00 έως τις 06:00 τα ξημερώματα, με μέσο όρο συγκέντρωσης  $\text{PM}_{10}$  στα  $83.45 \pm 33.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στην οικία διαμονής κατά τη διάρκεια του ύπνου, από τις 06:00 έως τις 14:00 με τη συγκέντρωση να κυμαίνεται στα  $27.81 \pm 5.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και έπειτα σε καφετέρια σε εσωτερικό χώρο από τις 14:00 έως τις 18:30 με τη συγκέντρωση των χονδρών να είναι  $63.42 \pm 22.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι η καφετέρια ήταν σχεδόν πλήρης από θαμώνες και το κάπνισμα αρκετό. Μετά από τη καφετέρια έγινε μετάβαση με όχημα σε κλειστό γήπεδο μπάσκετ όπου και ακολούθησε δίωρη αθλητική δραστηριότητα ( 19:00 – 21:00 ) με συγκέντρωση  $40.37 \pm 11.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Για το υπόλοιπο διάστημα της ημέρας, από τις 21:00 έως τις 22:00 οι μετρήσεις έγιναν στην οικία διαμονής για ξεκούραση χωρίς συγκεκριμένη δραστηριότητα, με τη συγκέντρωση στο χώρο να είναι  $34.93 \pm 4.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



Διάγραμμα 10: Συνολική έκθεση σε PM<sub>10</sub> κατά τη διάρκεια της πρώτης ημέρας έκθεσης του εργαζομένου.

Στον πίνακα 9 φαίνονται οι μέσοι όροι συγκέντρωσης των PM<sub>10</sub> μαζί με τις μέγιστες και ελάχιστες τους τιμές.

Πίνακας 9: Πρώτη ημέρα μετρήσεων έκθεσης εργαζομένου.

Ωρα	Μέσος Όρος (μg/m <sup>3</sup> )	Μέγιστο (μg/m <sup>3</sup> )	Ελάχιστο (μg/m <sup>3</sup> )
22:00 – 23:00 μμ	42.25	81.24	17.60
23:00 – 0:00 πμ	80.81	102.74	63.18
0:00 - 1:00 πμ	95.93	129.40	74.36
1:00 - 2:00 πμ	67.48	92.42	43.40
2:00 – 3:00 πμ	86.40	113.06	58.88
3:00 – 4:00 πμ	129.47	178.42	68.34
4:00 – 5:00 πμ	112.20	143.16	83.82
5:00 – 6:00 πμ	58.95	78.66	38.24
6:00 – 7:00 πμ	25.41	28.78	12.44
7:00 – 8:00 πμ	24.98	28.78	12.44
8:00 – 9:00 πμ	25.20	28.78	12.44
9:00 – 10:00 πμ	28.14	28.78	12.44
10:00 – 11:00 πμ	25.41	28.78	12.44



<b>11:00 – 12:00 πμ</b>	<b>24.98</b>	28.78	12.44
<b>12:00 – 1:00 μμ</b>	<b>29.61</b>	33.54	27.06
<b>1:00 – 2:00 μμ</b>	<b>37.84</b>	41.48	34.20
<b>2:00 – 3:00 μμ</b>	<b>49.49</b>	70.06	23.62
<b>3:00 – 4:00 μμ</b>	<b>73.86</b>	116.50	60.60
<b>4:00 – 5:00 μμ</b>	<b>76.15</b>	121.66	61.46
<b>5:00 – 6:00 μμ</b>	<b>80.24</b>	106.18	70.92
<b>6:00 – 7:00 μμ</b>	<b>41.47</b>	76.94	27.92
<b>7:00 – 8:00 μμ</b>	<b>36.52</b>	50.28	14.16
<b>8:00 – 9:00 μμ</b>	<b>44.55</b>	55.44	26.20
<b>9:00 – 10:00 μμ</b>	<b>34.51</b>	40.82	26.20

Η δεύτερη ημέρα μετρήσεων για τον εργαζόμενο ξεκινάει και πάλι με μέτρηση στο χώρο εργασίας, στον οποίο η μέση συγκέντρωση για τις οχτώ ώρες εργασίας (0:00-8:00) βρέθηκε στα  $69.24 \pm 36.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ακολούθησε ανάπαυση στην οικία διαμονής για τις επόμενες οχτώ ώρες με τη συγκέντρωση των  $\text{PM}_{10}$  να κυμαίνεται στα  $42.66 \pm 37.27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Στη συνέχεια, ακολούθησε οδήγηση Ι.Χ για μια ώρα και από 17:00 έως τις 20:00 πραγματοποιήθηκε μέτρηση σε εσωτερικό χώρο καφετέριας, όπου παρατηρήθηκε συγκέντρωση  $63.30 \pm 15.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ενώ τις υπόλοιπες ώρες (20:00 – 0:00) με παραμονή στο σπίτι, εκτελέστηκαν δραστηριότητες καθαρισμού του χώρου και μαγείρεμα με μέσο όρο συγκέντρωσης ολικών σωματιδίων  $39.24 \pm 29.91 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Στον πίνακα 10 δίνονται οι μέσοι όροι, η μέγιστη και ελάχιστη τιμή της συγκέντρωσης των  $\text{PM}_{10}$  για κάθε ώρα της ημέρας ξεχωριστά, ενώ στο διάγραμμα 11 γίνεται γραφική αναπαράσταση της διακύμανσης της συγκέντρωσης με το χρόνο.

Πίνακας 10: Δεύτερη ημέρα μετρήσεων έκθεσης εργαζομένου.

<b>Ωρα</b>	<b>Μέσος Όρος (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>Μέγιστο (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>Ελάχιστο (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>
<b>0:00 - 1:00 πμ</b>	<b>29.43</b>	37.38	14.16
<b>1:00 - 2:00 πμ</b>	<b>42.25</b>	45.98	39.10
<b>2:00 – 3:00 πμ</b>	<b>58.16</b>	68.34	45.98

<b>3:00 – 4:00 πμ</b>	<b>58.67</b>	76.08	36.52
<b>4:00 – 5:00 πμ</b>	<b>83.46</b>	106.18	64.90
<b>5:00 – 6:00 πμ</b>	<b>96.58</b>	123.38	79.52
<b>6:00 – 7:00 πμ</b>	<b>133.20</b>	161.22	101.88
<b>7:00 – 8:00 πμ</b>	<b>52.14</b>	174.98	23.62
<b>8:00 – 9:00 πμ</b>	<b>63.18</b>	77.80	49.42
<b>9:00 – 10:00 πμ</b>	<b>108.12</b>	138.86	88.12
<b>10:00 – 11:00 πμ</b>	<b>31.65</b>	96.72	10.72
<b>11:00 – 12:00 πμ</b>	<b>16.38</b>	18.46	12.44
<b>12:00 – 1:00 μμ</b>	<b>17.60</b>	17.60	17.60
<b>1:00 – 2:00 μμ</b>	<b>19.03</b>	26.20	9.86
<b>2:00 – 3:00 μμ</b>	<b>41.97</b>	49.42	33.08
<b>3:00 – 4:00 μμ</b>	<b>43.40</b>	45.98	42.54
<b>4:00 – 5:00 μμ</b>	<b>33.37</b>	43.40	15.02
<b>5:00 – 6:00 μμ</b>	<b>44.69</b>	51.14	35.66
<b>6:00 – 7:00 μμ</b>	<b>69.49</b>	78.66	55.44
<b>7:00 – 8:00 μμ</b>	<b>75.72</b>	87.26	55.44
<b>8:00 – 9:00 μμ</b>	<b>61.96</b>	194.76	39.10
<b>9:00 – 10:00 μμ</b>	<b>47.63</b>	53.72	42.54
<b>10:00 – 11:00 μμ</b>	<b>18.17</b>	42.54	7.28
<b>11:00 – 12:00 πμ</b>	<b>11.08</b>	11.58	9.86



Διάγραμμα 11: Συνολική έκθεση σε PM10 κατά τη διάρκεια της δεύτερης ημέρας έκθεσης του εργαζομένου.

Η τρίτη ημέρα έκθεσης είναι όμοια με την προηγούμενη. Οι μετρήσεις ξεκινάνε στον χώρο εργασίας για έξι ώρες, ακολουθεί η ξεκούραση στο σπίτι, μετά περίπατος στη περιοχή Κουμπέ, παραμονή σε καφετέρια για το χρονικό διάστημα 16:00 – 20:00 και τέλος επιστροφή στην οικία διαμονής.

Πίνακας 11: Τρίτη ημέρα μετρήσεων έκθεσης εργαζομένου.

Ωρα	Μέσος Όρος ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Μέγιστο ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Ελάχιστο ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
0:00 - 1:00 πμ	42.25	81.24	17.60
1:00 - 2:00 πμ	80.81	102.74	63.18
2:00 - 3:00 πμ	95.93	129.40	74.36
3:00 - 4:00 πμ	67.48	92.42	43.40
4:00 - 5:00 πμ	86.40	113.06	58.88
5:00 - 6:00 πμ	129.47	178.42	68.34
6:00 - 7:00 πμ	112.20	143.16	83.82
7:00 - 8:00 πμ	58.95	78.66	38.24
8:00 - 9:00 πμ	25.41	28.78	12.44
9:00 - 10:00 πμ	24.98	28.78	12.44
10:00 - 11:00 πμ	25.20	28.78	12.44

11:00 – 12:00 πμ	26.99	36.52	13.30
12:00 – 1:00 μμ	40.18	42.54	37.38
1:00 – 2:00 μμ	39.24	45.98	21.04
2:00 – 3:00 μμ	31.36	37.38	27.06
3:00 – 4:00 μμ	48.92	57.16	39.96
4:00 – 5:00 μμ	59.17	72.64	46.84
5:00 – 6:00 μμ	79.38	89.84	68.34
6:00 – 7:00 μμ	90.63	101.02	76.94
7:00 – 8:00 μμ	109.69	125.10	95.00
8:00 – 9:00 μμ	27.63	36.52	12.44
9:00 – 10:00 μμ	41.54	45.12	37.38
10:00 – 11:00 μμ	46.77	48.56	44.26
11:00 – 12:00 πμ	51.43	56.30	48.56



Διάγραμμα 12: Συνολική έκθεση σε PM10 κατά τη διάρκεια της τρίτης ημέρας έκθεσης του εργαζομένου.

Η τέταρτη ημέρα μετρήσεων της έκθεσης σε σωματίδια για τον εργαζόμενο ξεκινάει με οχτάωρη μέτρηση στο νυχτερινό κέντρο, από τις 00:00 – 08:00 με συγκέντρωση  $69.24 \pm 36.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , έπειτα έγινε λήψη μετρήσεων στην οικία διαμονής την ώρα της ανάπαυσης από τις 08:00 –

14:00 με συγκέντρωση  $42.53 \pm 37.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (ανοιχτά παράθυρα), μαγείρεμα και σκούπισμα (με ηλεκτρική σκούπα) όλου του σπιτιού για τις επόμενες δύο ώρες με μη αξιοσημείωτη αύξηση της συγκέντρωσης ενώ στις 16:00 με 21:00 ακολούθησε περπάτημα και ανάπαυση στο δημοτικό στάδιο Χανίων με τη συγκέντρωση στο ανοιχτό περιβάλλον να κυμαίνεται στα  $62.97 \pm 24.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Τέλος, έχουμε επιστροφή στο σπίτι για τις ώρες 21:00 – 0:00.



Διάγραμμα 13: Συνολική έκθεση σε PM10 κατά τη διάρκεια της τέταρτης ημέρας έκθεσης του εργαζομένου.

Πίνακας 12: Τέταρτη μέρα μετρήσεων έκθεσης εργαζομένου.

Ωρα	Μέσος Όρος ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Μέγιστο ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Ελάχιστο ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
0:00 - 1:00 πμ	29.43	37.38	14.16
1:00 - 2:00 πμ	42.25	45.98	39.10
2:00 - 3:00 πμ	58.16	68.34	45.98
3:00 - 4:00 πμ	58.67	76.08	36.52
4:00 - 5:00 πμ	83.46	106.18	64.90
5:00 - 6:00 πμ	96.58	123.38	79.52
6:00 - 7:00 πμ	133.20	161.22	101.88
7:00 - 8:00 πμ	52.14	174.98	23.62
8:00 - 9:00 πμ	63.18	77.80	49.42
9:00 - 10:00 πμ	108.12	138.86	88.12

<b>10:00 – 11:00 πμ</b>	<b>31.65</b>	96.72	10.72
<b>11:00 – 12:00 πμ</b>	<b>16.38</b>	18.46	12.44
<b>12:00 – 1:00 μμ</b>	<b>17.60</b>	17.60	17.60
<b>1:00 – 2:00 μμ</b>	<b>19.03</b>	26.20	9.86
<b>2:00 – 3:00 μμ</b>	<b>41.97</b>	49.42	33.08
<b>3:00 – 4:00 μμ</b>	<b>43.40</b>	45.98	42.54
<b>4:00 – 5:00 μμ</b>	<b>44.92</b>	43.40	15.02
<b>5:00 – 6:00 μμ</b>	<b>44.69</b>	51.14	35.66
<b>6:00 – 7:00 μμ</b>	<b>69.49</b>	78.66	55.44
<b>7:00 – 8:00 μμ</b>	<b>75.72</b>	87.26	55.44
<b>8:00 – 9:00 μμ</b>	<b>61.96</b>	194.76	39.10
<b>9:00 – 10:00 μμ</b>	<b>47.63</b>	53.72	42.54
<b>10:00 – 11:00 μμ</b>	<b>18.17</b>	42.54	7.28
<b>11:00 – 12:00 πμ</b>	<b>11.08</b>	11.58	9.86

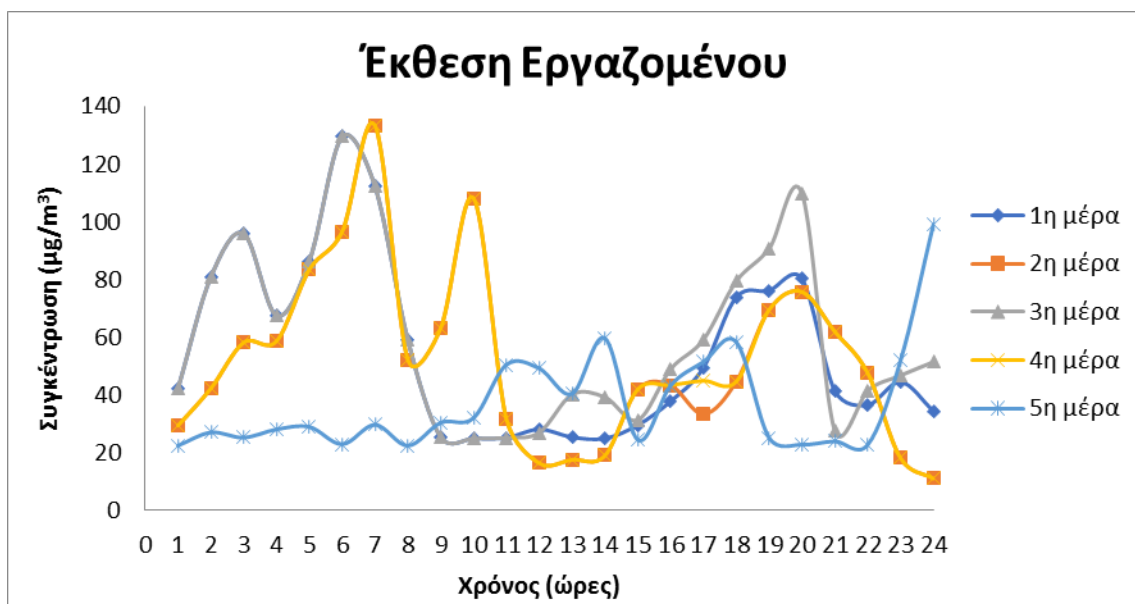
Η πέμπτη ημέρα έκθεσης του εργαζομένου δεν περιλαμβάνει εργασία. Οι μετρήσεις ξεκινάνε με οχτάωρη μέτρηση στο σπίτι κατά τη διάρκεια του ύπνου με το πρωινό να ακολουθεί. Στις 9:00 έγινε αναχώρησγ από την οικία διαμονής στη περιοχή Κουμπέ για περπάτημα μέχρι τα ΚΤΕΛ Χανίων και αργότερα στο λιμάνι μέχρι τις 12:00 για δίωρη ανάπαυση στον Δημοτικό Κήπο. Στο διάστημα 9:00-12:00 η συγκέντρωση κυμάνθηκε στα  $43.93 \pm 9.94 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ενώ στον Δημοτικό Κήπο βρέθηκε  $50.07 \pm 21.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Έπειτα, ακολούθησε περίπατος έως τη πλατεία Σπλάτζια και παραμονή σε καφετέρια της περιοχής για το διάστημα 15:00-17:00, με τιμή συγκέντρωσης να παρατηρείτε  $47.38 \pm 5.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Στις 17:00-18:00 έχουμε επιστροφή στην οικία διαμονής και παραμονή μέχρι τις 21:00, χωρίς αξιοσημείωτες δραστηριότητες και με τη συγκέντρωση στο χώρο να βρίσκεται στα  $24.00 \pm 5.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Τέλος, στις 21:00 έγινε αναχώρηση για το κέντρο της πόλης, αυτή τη φορά με το αμάξι και στις 22:00 με 00:00 οι μετρήσεις έγιναν στον εξωτερικό χώρο μιας καφετέριας όπου η συγκέντρωση των  $\text{PM}_{10}$  κυμάνθηκε στα  $76.94 \pm 29.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Πίνακας 13: Πέμπτη μέρα μετρήσεων έκθεσης εργαζομένου.

Ωρα	Μέσος Όρος ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Μέγιστο ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Ελάχιστο ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
0:00 - 1:00 πμ	22.47	28.78	10.72
1:00 - 2:00 πμ	27.06	31.36	10.72
2:00 - 3:00 πμ	25.27	29.64	17.60
3:00 - 4:00 πμ	28.14	31.36	21.90
4:00 - 5:00 πμ	29.00	30.50	27.06
5:00 - 6:00 πμ	22.98	31.36	10.72
6:00 - 7:00 πμ	29.71	31.36	27.92
7:00 - 8:00 πμ	22.47	28.78	10.72
8:00 - 9:00 πμ	30.43	33.08	28.78
9:00 - 10:00 πμ	32.08	40.82	21.90
10:00 - 11:00 πμ	50.50	54.58	42.54
11:00 - 12:00 πμ	49.21	58.02	40.82
12:00 - 1:00 μμ	40.46	51.14	10.72
1:00 - 2:00 μμ	59.67	102.74	27.06
2:00 - 3:00 μμ	24.48	34.80	12.44
3:00 - 4:00 μμ	43.26	47.70	36.52
4:00 - 5:00 μμ	51.50	54.58	48.56
5:00 - 6:00 μμ	58.31	62.32	53.72
6:00 - 7:00 μμ	25.20	45.12	16.74
7:00 - 8:00 μμ	22.83	24.48	21.04
8:00 - 9:00 μμ	23.98	30.50	19.32
9:00 - 10:00 μμ	22.76	24.48	21.04
10:00 - 11:00 μμ	51.86	77.80	22.76
11:00 - 12:00 πμ	98.94	113.92	79.52



Διάγραμμα 14: Συνολική έκθεση σε PM10 κατά τη διάρκεια της πέμπτης ημέρας έκθεσης του εργαζομένου.



Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι εν ώρα εργασίας κατά τις πρώτες πρωινές ώρες, ο εργαζόμενος είναι εκτεθειμένος σε υψηλές συγκεντρώσεις PM<sub>10</sub> σε αντίθεση με τις απογευματινές ώρες όπου η έκθεση μειώνεται. Η μέση ημερήσια συγκέντρωση ήταν  $51.60 \pm 29.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της συγκέντρωσης σημειώθηκε την δεύτερη ημέρα μετρήσεων με τιμές  $194.76 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και  $7.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$  αντίστοιχα.



## 6 Εφαρμογή μοντέλου ExDoM για τον υπολογισμό δόσης και απομάκρυνσης σωματιδίων έκθεσης φοιτητή.

Για τον υπολογισμό της εφαρμοσμένης δόσης και απομάκρυνσης αιωρούμενων σωματιδίων που έχουν εισχωρήσει και εναποτεθεί εντός του αναπνευστικού συστήματος, θα χρησιμοποιηθεί το ημι-εμπειρικό μοντέλο ExDoM όπως έχει αναφερθεί. Συγκεκριμένα, το μοντέλο χρησιμοποιεί κάποια δεδομένα εισόδου που εισάγει ο χρήστης κατά τη χρήση του λογισμικού και τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε αρχεία εξόδου.

Ακολουθεί βήμα βήμα η λειτουργία του προγράμματος:

```
THE PROGRAM CALCULATES THE DEPOSITION AND CLEARANCE  
OF AEROSOL PARTICLES IN THE HUMAN RESPIRATORY TRACT.  
  
PARTICLE DOSE CALCULATION <NUMBER CONCENTRATIONS? Y/N>
```

Αρχικά το πρόγραμμα ρωτάει εάν τα δεδομένα που θα εισαχθούν είναι δεδομένα αριθμητικής συγκέντρωσης. Επιλέγουμε όχι πληκτρολογώντας N διότι εμείς έχουμε δεδομένα σε συγκεντρώσεις μάζας-χρόνου.

```
THE PROGRAM CALCULATES THE DEPOSITION AND CLEARANCE  
OF AEROSOL PARTICLES IN THE HUMAN RESPIRATORY TRACT.  
  
PARTICLE DOSE CALCULATION <NUMBER CONCENTRATIONS? Y/N>  
N  
  
CALCULATE DOSE FOR VARIABLE EXPOSURE  
<REQUIRES INPUT FILE WITH DATA ON HOURLY BASIS>? <Y/N>
```

Στη συνέχεια πληκτρολογούμε Y διότι τα δεδομένα μας μεταβάλλονται ανά ώρα και όχι ανά ημέρα. Σε περίπτωση που είχαμε μετρήσεις ημερήσιας μεταβολής θα επιλέγαμε N.

```
EXPOSURE DURATION <HOW MANY DAYS OF AVAILABLE DATA IN  
INPUT FILE>?  
1_
```

Εδώ εισάγουμε μια ημέρα γιατί τα αρχεία INPUT.txt που κατασκευάσαμε, περιέχουν δεδομένα μιας ημέρας.

```
GIVE TIME AFTER INITIAL INTAKE TO CALCULATE THE  
RETENTION IN EACH REGION<IN DAYS>:
```

Εισάγουμε τώρα για πόσες μέρες θέλουμε το πρόγραμμα να υπολογίσει τη παραμένουσα σωματιδιακή ύλη μετά την έκθεση, στη περίπτωση μας μια μέρα μετά.

```
SELECT EXPOSED SUBJECT :  
ADULT:  <1> MALE          <2> FEMALE  
15Y:    <3> MALE          <4> FEMALE  
CHILD:  <4> 10Y           <6> 5Y  
BABY:   <7> 1Y            <8> 3 MONTHS  
<9> USER DEFINED
```

Εδώ επιλέγουμε το υποκείμενο μελέτης, το οποίο είναι ένας άντρας ενήλικας, άρα πληκτρολογούμε και πάλι 1.

```
SELECT BREATHING TYPE: <1>NOSE <2>MOUTH
```

Επιλέγουμε τρόπο αναπνοής μέσω της μύτης, επομένως πληκτρολογούμε 1.

```
GIVE PARTICLE DENSITY:  
1.5_
```

Εισάγουμε τη πυκνότητα των σωματιδίων σε g/cm<sup>3</sup>. Επιλέγουμε τιμή 1.5 g/cm<sup>3</sup>, η οποία είναι η μέση τιμή πυκνότητας των σωματιδίων (Aleksandropoulou and Lazaridis 2013b).

```
GIVE PARTICLE SHAPE FACTOR:  
1_
```

Ερώτηση συντελεστή σχήματος σωματιδίων. Επιλέγουμε τιμή 1 η οποία αντιστοιχεί σε σφαιρικά σωματίδια (Aleksandropoulou and Lazaridis 2013b).

```
GIVE INPUT FILE <EXPOSURE DATA>:  
INPUT.txt_
```

Εδώ εισάγουμε το αρχείο εισόδου που περιέχει τις ωριαίες μέσες τιμές των μετρήσεων μας, για κάποια συγκεκριμένη στιγμή της ημέρας.

```
GIVE 1 FOR TOTAL CONCENTRATION OR  
2 FOR DIFFERENT CONCENTRATIONS FOR THE TWO MODES :  
1
```

Εδώ ερωτούμαστε εάν θέλουμε ολικές συγκεντρώσεις ή ξεχωριστές συγκεντρώσεις για τις δύο κατηγορίες σωματιδίων (λεπτά και χονδρά). Επιλέγουμε 1.

```
RAW IMPACTOR DATA? <Y/N>
Y
```

Ερώτηση για δεδομένα από κρουστικό δειγματολήπτη. Πληκτρολογούμε Y.

```
GIVE INFILE <IMPACTOR DATA>:
mass.txt
```

Εισαγωγή ονόματος αρχείου που περιέχει τη κατανομή μεγέθους μάζας από τον κρουστήρα Andersen.

```
GIVE NUMBER OF IMPACTOR STAGES:
9
```

Ο αριθμός σταδίων του κρουστήρα Andersen είναι 9, επομένως πληκτρολογούμε το 9 στην παραπάνω ερώτηση.

```
DAY: 1

Mass distribution:

      *
      *
      *
    * *
    * *
    * *
  * * *
  * * *
* * * *
1 2 3 4 5 6 7 8

N1: 5
N2:      8

PLEASE CHECK IF N1 IS ACCEPTED
ACCEPT N1? <Y/N>
N
```

```
GIVE NEW N1:
4
```

Εισαγωγή νέου αριθμού N1=4. Το τέταρτο στάδιο του κρουστήρα είναι το σημείο αποκοπής για λεπτά σωματίδια μεγαλύτερα από 1.52μm.

```
USE ALL THE DATA? <Y/N>
Y
```

Ερώτηση για την χρήση όλων των δεδομένων.

```
CONTINUE WITH CLEARANCE? <Y/N>  
Y
```

Ερώτηση υπολογισμού καθαρισμού σωματιδίων. Επιλέγουμε Y.

```
GIVE PARTICLE ABSORPTION BEHAVIOR CLASS<F/M/S/U:for user defined>:  
S
```

Επιλογή μεσαίας απορρόφησης στο αίμα, διότι είναι άγνωστη η χημική σύσταση των σωματιδίων (Aleksandropoulou and Lazaridis 2013b).

```

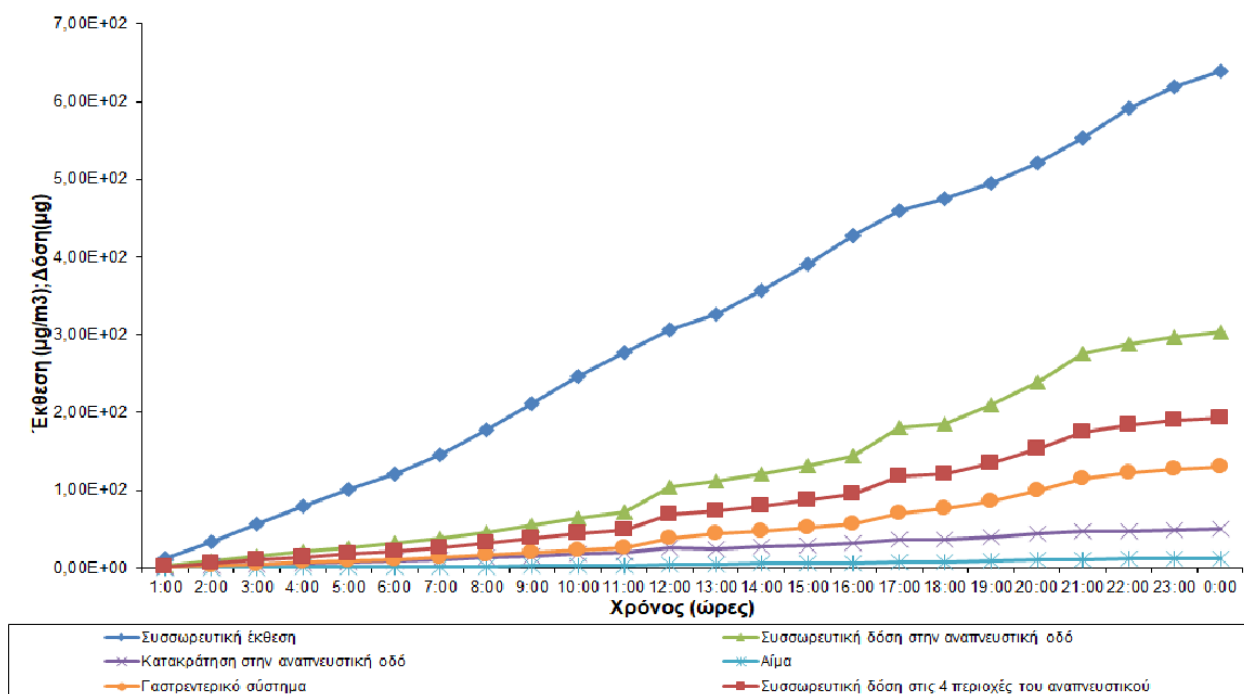
1      1
1      2
1      3
1      4
1      5
1      6
1      7
1      8
1      9
1     10
1     11
1     12
1     13
1     14
1     15
1     16
1     17
1     18
1     19
1     20
1     21
1     22
1     23
1     24
1
MATERIAL <ug> IN SOURCE COMPONENTS AFTER      1.0 DAYS:
ET2   surface fluid:      0.12302E-02
      Particles in airway wall:  0.2474E-02
LNet  All Transformations:  0.11753E-01
BB     Mucous gel:        0.86671E-01
      Mucous sol:        0.18147E-02
      Particles in airway wall:  0.43830E-01
bb     Mucous gel:        0.74375E-01
      Mucous sol:        0.13474E-02
      Particles in airway wall:  0.12597E+01
      Alveolar Interstitium:  0.51784E+01
LNth  All Transformations:  0.12890E-05
GI Tract:  1.782656318027876E-005
BLOOD   :  4.264465798769379E-003
SUM:    6.66346319632970
Hourly Daily Dose printed on RESULTSDOSE.txt
Daily Dose printed on DAILYSUMDOSE.txt
Retention results printed on RetentionMODE.txt files
Fortran Pause - Enter command<CR> or <CR> to continue.
_

```

Ολοκλήρωση λειτουργίας του προγράμματος και ονοματοποίηση των αρχείων εξόδου των δεδομένων.

## 6.1 Υπολογισμός εφαρμοσμένης δόσης φοιτητή.

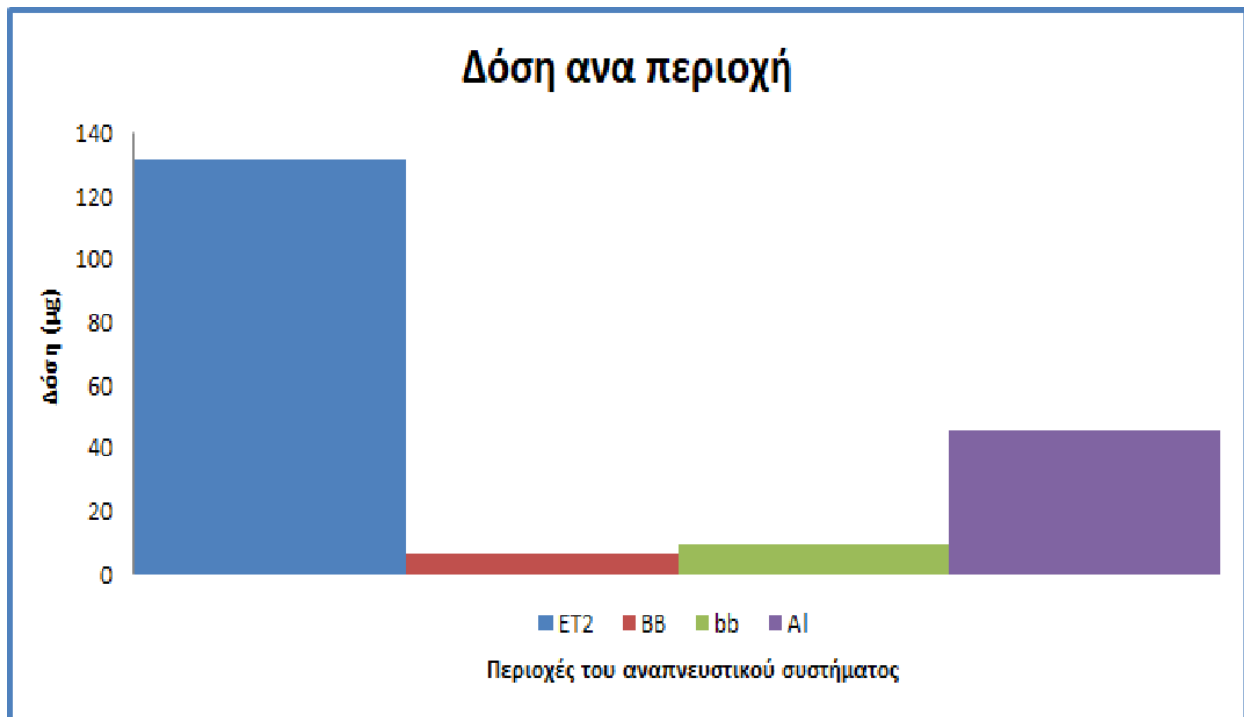
Για τον υπολογισμό της εφαρμοσμένης δόσης του φοιτητή βρέθηκε ότι για τη πρώτη μέρα έκθεσης η ολική δόση (λεπτά και χονδρά σωματίδια) είχε μέση τιμή ανά ώρα  $12.64 \pm 10.55 \mu\text{g/h}$  με **μέγιστη** τιμή τα  $37.43 \mu\text{g/h}$  στις 16:00 – 17:00 μμ, **ελάχιστη** τα  $3.23 \mu\text{g/h}$  στις 00:00 – 01:00.



Διάγραμμα 15: Συσσωρευτική έκθεση-δόση ολικών σωματιδίων εντός του αναπνευστικού συστήματος και κατακράτηση σωματιδίων για τη πρώτη ημέρα έκθεσης του φοιτητή.

Στο διάγραμμα 15 φαίνεται η συσσωρευτική έκθεση και δόση και η εναπόθεση σωματιδίων εντός του αναπνευστικού συστήματος, η απορρόφηση των διαλυτών κλασμάτων στο αίμα, η δόση στο γαστρεντερικό σύστημα (GI Tract) και η συσσωρευτική δόση στις τέσσερις περιοχές του αναπνευστικού (ET<sub>2</sub>, BB, bb, Al). Παρατηρούμε ότι η έκθεση και η δόση κλιμακώνεται χαρακτηριστικά τις απογευματινές ώρες σε αντίθεση με τις πρωινές εξαιτίας των ήπιων δραστηριοτήτων το πρωί σε αντίθεση με το απόγευμα.

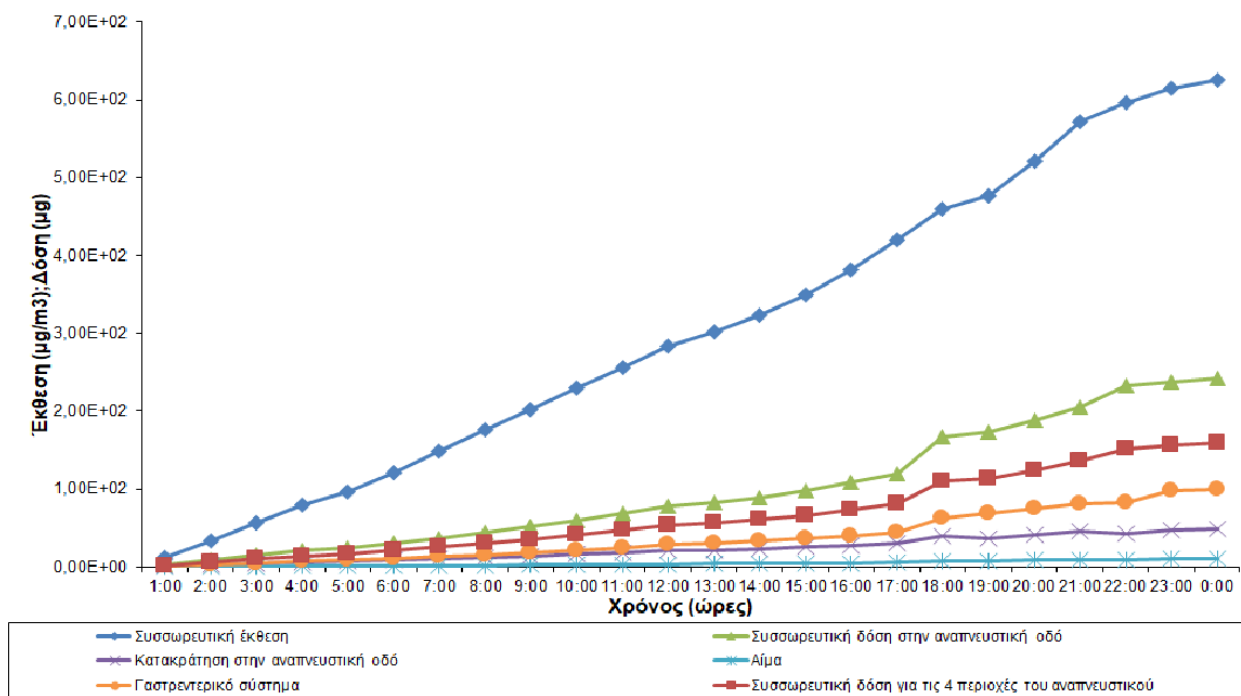
Η συνολική δόση της πρώτης ημέρας για τις τέσσερις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος απεικονίζεται στο διάγραμμα 16.



Διάγραμμα 16: Συνολική δόση ανά περιοχή του αναπνευστικού συστήματος την πρώτη ημέρα έκθεσης του φοιτητή.

Παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο μέρος των σωματιδίων εναποτίθεται στη περιοχή του στόματος (ET<sub>2</sub>) και στην κυψελιδική περιοχή (Al) σε αντίθεση με την τραχειοβρογχική περιοχή (BB, bb) όπου η δόση είναι συγκριτικά μικρότερη.

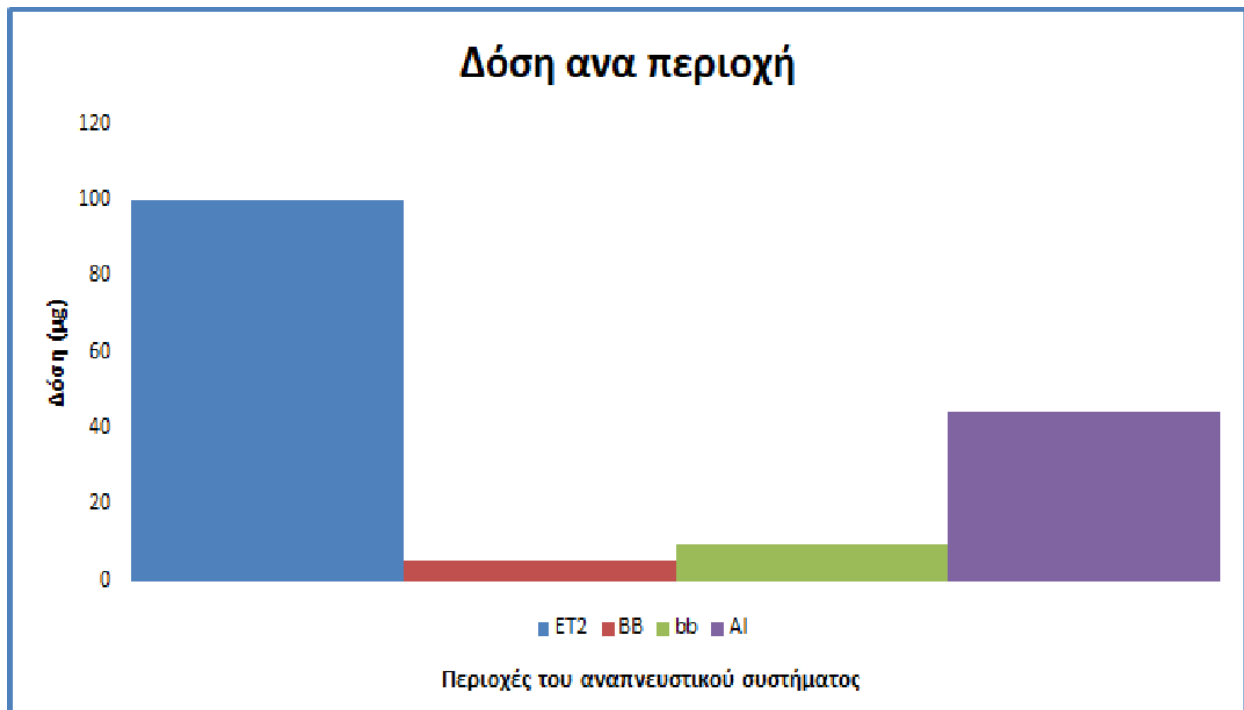
Τη **δεύτερη μέρα** έκθεσης η μέση ωριαία δόση ήταν **10.12 ± 27.18 μg/h** με **μέγιστη** τιμή τα **47.12 μg/h** στις 17:00-18:00 και **ελάχιστη** τα **3.21 μg/h** στις 00:00-01:00.



Διάγραμμα 17: Συσσωρευτική έκθεση-δόση ολικών σωματιδίων εντός του αναπνευστικού συστήματος και κατακράτηση σωματιδίων για τη δεύτερη ημέρα έκθεσης του φοιτητή.

Η συνολική δόση για τις τέσσερις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος (ET<sub>2</sub>, BB, bb, Al) για τη δεύτερη μέρα φαίνεται στο διάγραμμα 18.

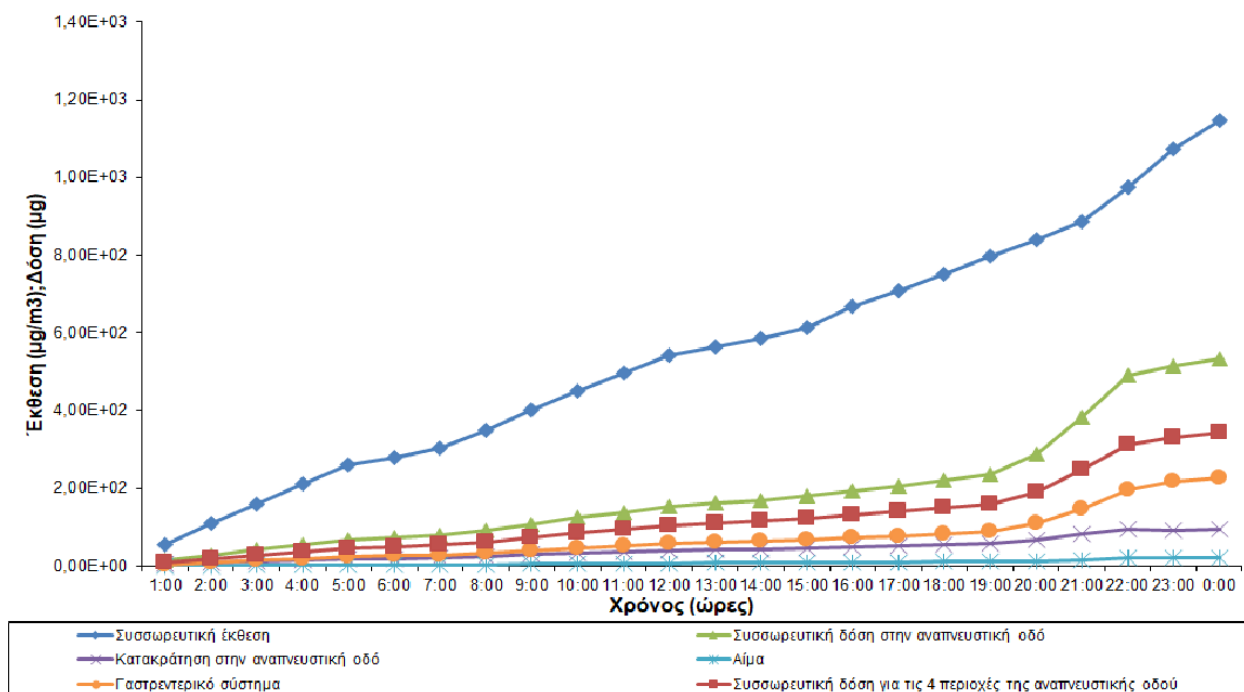




Διάγραμμα 18: Συνολική δόση ανά περιοχή του αναπνευστικού συστήματος την δεύτερη ημέρα έκθεσης του φοιτητή.

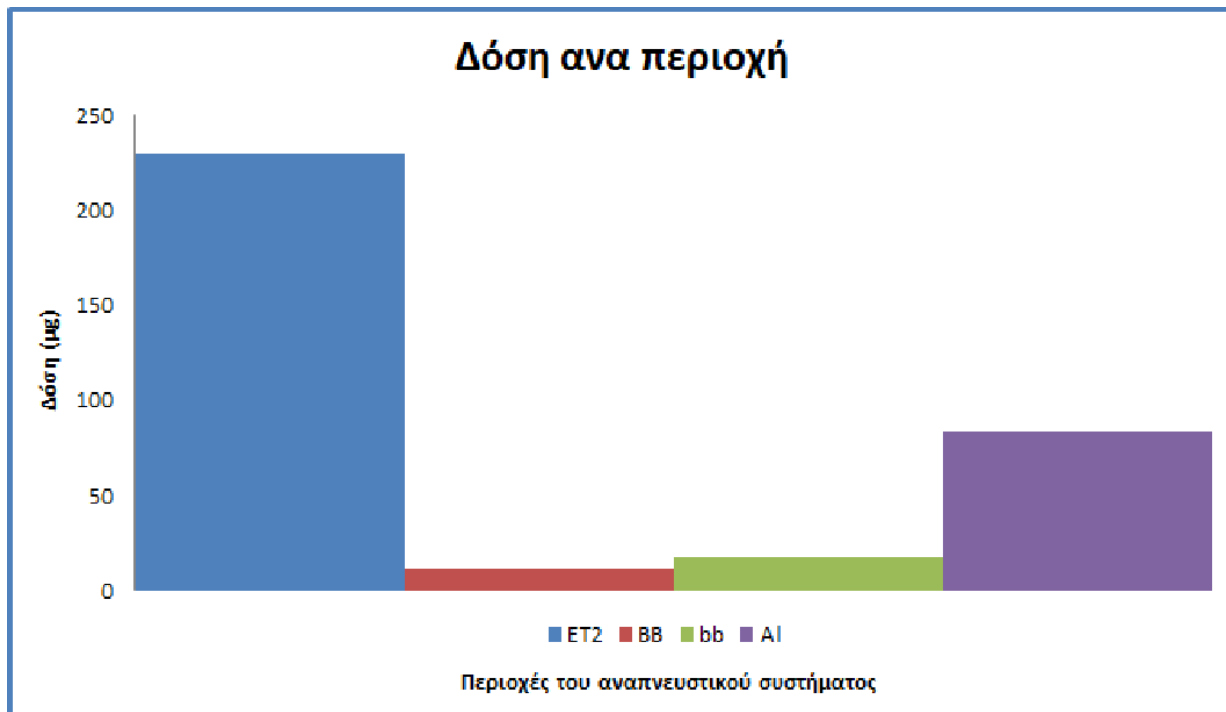
Και πάλι η περιοχή του στόματος αποτελεί τη περιοχή με τη μεγαλύτερη δόση ολικών σωματιδίων, όπως και τη πρώτη ημέρα έκθεσης.

Την **τρίτη ημέρα** έκθεσης η **μέση ημερήσια δόση** βρέθηκε στα **22.21 ± 26.14 μg/h** με **μέγιστη** τιμή τα **108.55 μg/h** και **ελάχιστη** τα **4.58 μg/h**.



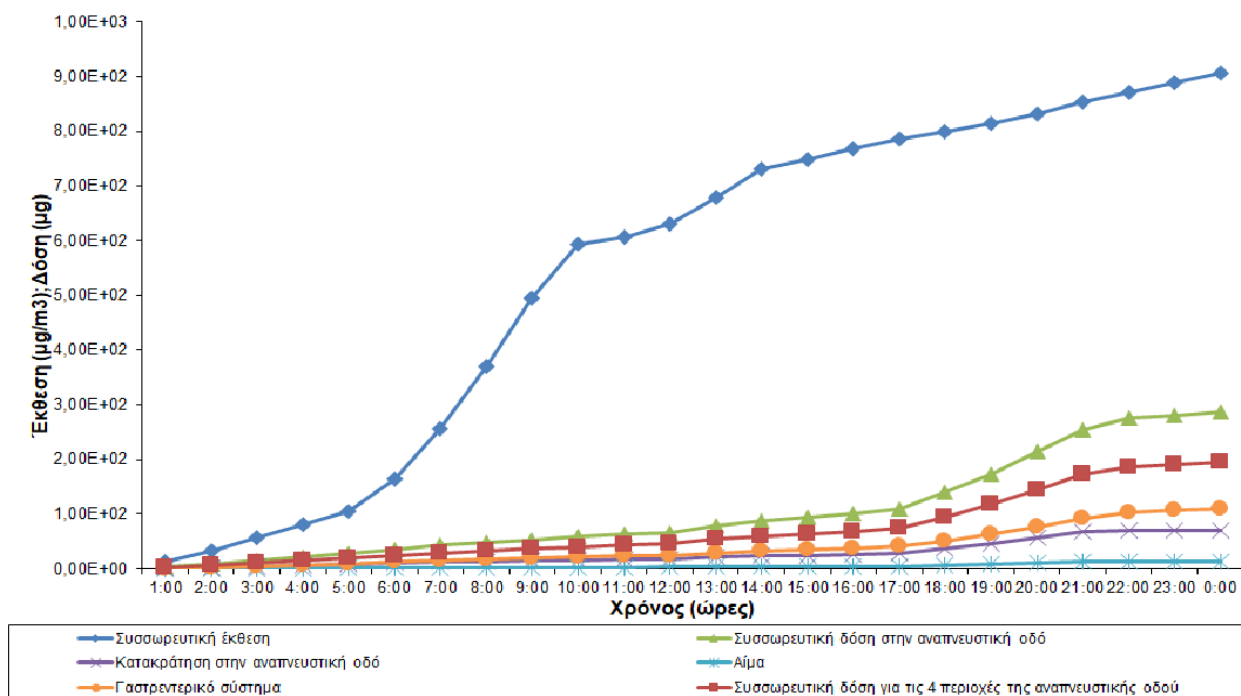
Διάγραμμα 19: Συσσωρευτική έκθεση-δόση ολικών σωματιδίων εντός του αναπνευστικού συστήματος και κατακράτηση σωματιδίων για τη τρίτη ημέρα έκθεσης του φοιτητή.

Η δόση σε όλες τις περιοχές είναι αυξημένη σε σχέση με τις προηγούμενες ημέρες κυρίως εξαιτίας της αθλητικής δραστηριότητας στο χώρο του Πολυτεχνείου τις ώρες 19:00-22:00 λόγω του μεγαλύτερου ρυθμού και συχνότητα εισπνοής κατά τη διάρκεια της δραστηριότητας. Αυτό φαίνεται και από το γεγονός ότι η συσσωρευτική δόση για τις τέσσερις περιοχές της αναπνευστικής οδού την τρίτη μέρα έφθασε την τιμή **342.16 µg** ενώ την πρώτη και δεύτερη μέρα ήταν **193.85 µg** και **159.19 µg** αντίστοιχα. Η ολική δόση ανά περιοχή αναπνευστικής οδού φαίνεται στο διάγραμμα 20.

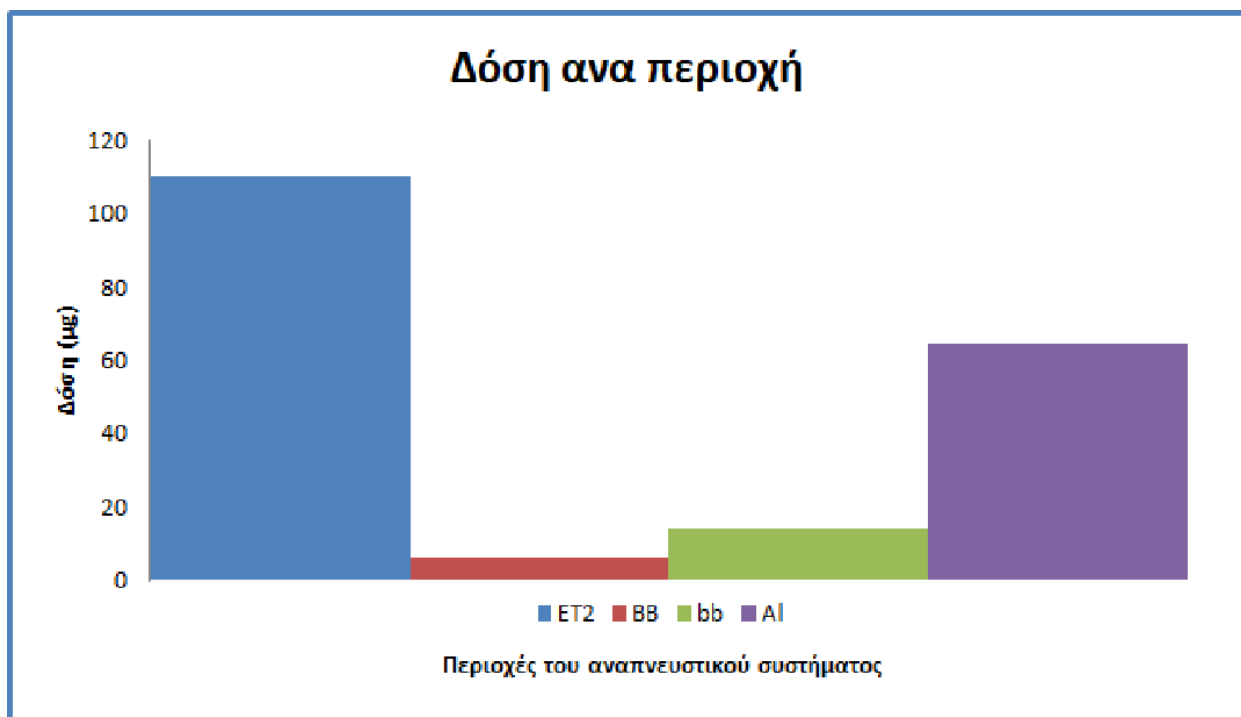


Διάγραμμα 20: Συνολική δόση ανά περιοχή του αναπνευστικού συστήματος την τρίτη ημέρα έκθεσης του φοιτητή.

Για τη **τέταρτη μέρα** μετρήσεων, έχουμε τη μέση ημερήσια δόση να κυμαίνεται στα **11.94 ± 11.69 μg/h** και να παρατηρείται η μέγιστη τιμή **40.83 μg** στις 19:00-20:00 κατά την παραμονή σε χώρο ηλεκτρονικών υπολογιστών, ενώ η ελάχιστη τιμή **3.21 μg** παρατηρήθηκε στις 00:00-01:00 κατά τη διάρκεια του ύπνου. Η ολική δόση σωματιδίων για τις τέσσερις περιοχές της αναπνευστικής οδού φαίνεται στο διάγραμμα 22.

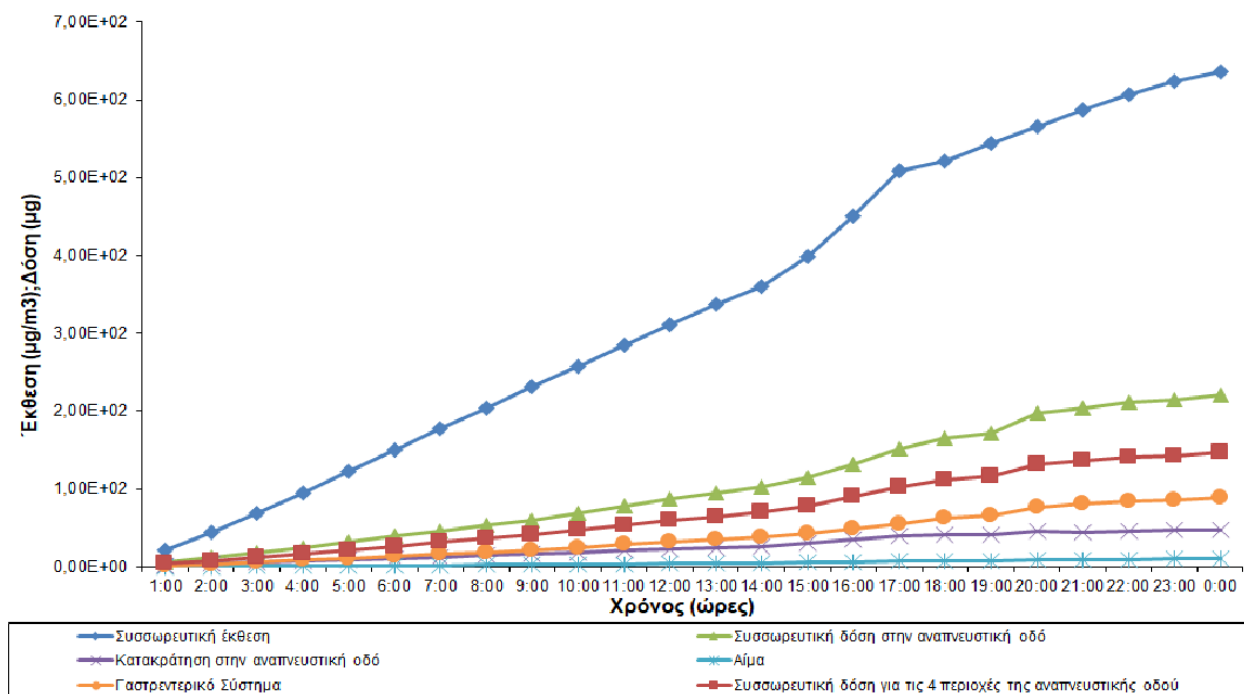


Διάγραμμα 21: Συσσωρευτική έκθεση-δόση ολικών σωματιδίων εντός του αναπνευστικού συστήματος και κατακράτηση σωματιδίων για τη τέταρτη ημέρα έκθεσης του φοιτητή.

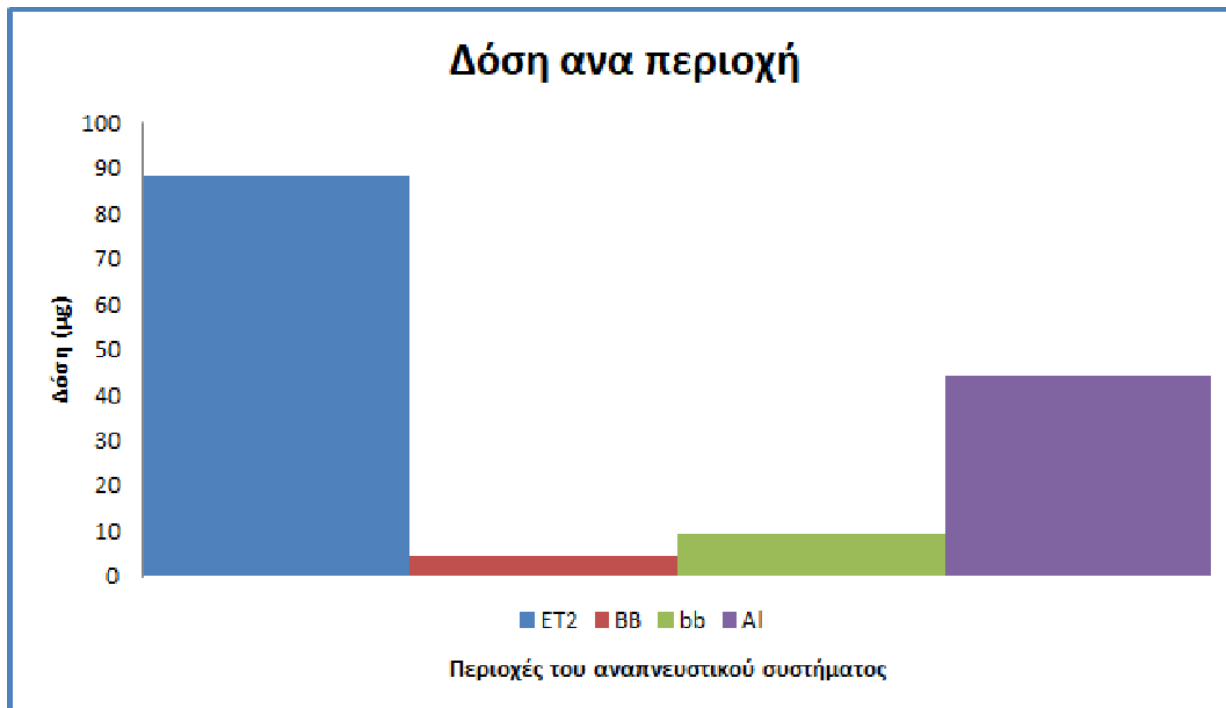


Διάγραμμα 22: Συνολική δόση ανά περιοχή του αναπνευστικού συστήματος την τέταρτη ημέρα έκθεσης του φοιτητή.

Για την πέμπτη ημέρα έκθεσης η μέση ημερήσια δόση βρέθηκε στα  $9.17 \pm 4.98 \mu\text{g}/\text{hour}$  με μέγιστη τιμή στα  $25.08 \mu\text{g}/\text{hour}$  και ελάχιστη στα  $3.66 \mu\text{g}/\text{hour}$ . Η μέγιστη τιμή διαπιστώθηκε στις 19:00-20:00 στη διάρκεια περιπάτου ενώ η ελάχιστη κατά τη παραμονή στο σπίτι στις 22:00-23:00.



Διάγραμμα 23: Συσσωρευτική έκθεση-δόση ολικών σωματιδίων εντός του αναπνευστικού συστήματος και κατακράτηση σωματιδίων για τη πέμπτη ημέρα έκθεσης του φοιτητή.



Διάγραμμα 24: Συνολική δόση ανά περιοχή του αναπνευστικού συστήματος την πέμπτη ημέρα έκθεσης του φοιτητή.

Για τα δεδομένα έκθεσης του φοιτητή στο σύνολο των πέντε ημερών βρέθηκε ότι η μέση ημερήσια ολική δόση (για τις πέντε περιοχές) κυμάνθηκε στα  $317.23 \pm 125.17 \mu\text{g/day}$  με τις περιοχές ET<sub>1</sub>, ET<sub>2</sub>, BB, bb, AL να δέχονται  $109.95 \pm 47.15 \mu\text{g/day}$ ,  $131.78 \pm 56.70 \mu\text{g/day}$ ,  $7.02 \pm 2.89 \mu\text{g/day}$ ,  $12.11 \pm 3.61 \mu\text{g/day}$ ,  $56.37 \pm 17.44 \mu\text{g/day}$  αντίστοιχα.

Πίνακας 14: Μέση ημερήσια δόση ολικών σωματιδίων για κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος (ΑΣ) με το πέρας των πέντε ημερών έκθεσης του φοιτητή.

Περιοχή ΑΣ	ET <sub>1</sub>	ET <sub>2</sub>	BB	bb	AL
<b>Μέση</b>					
<b>Ημερήσια</b>	109.95 ± 47.15	131.78 ± 56.70	7.02 ± 2.89	12.11 ± 3.61	56.37 ± 17.44
<b>Δόση (μg/day)</b>					

Επίσης, ο πίνακας 15 μας δείχνει τη μέση ωριαία δόση που δέχεται η κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος για κάθε μέρα έκθεσης, βάση του μοντέλου ExDoM.

Πίνακας 15: Μέση ωριαία δόση ολικών σωματιδίων ανά περιοχή αναπνευστικού συστήματος του φοιτητή.

Μέση ωριαία δόση ανά ημέρα έκθεσης (μg/hr)	ET <sub>1</sub>	ET <sub>2</sub>	BB	bb	AL
1 <sup>η</sup> μέρα	4.57 ± 4.43	5.48 ± 5.34	0.29 ± 0.26	0.41 ± 0.11	1.90 ± 0.63
2 <sup>η</sup> μέρα	3.48 ± 3.83	4.18 ± 4.62	0.22 ± 0.23	0.40 ± 0.16	1.84 ± 0.85
3 <sup>η</sup> μέρα	7.95 ± 10.73	9.55 ± 12.94	0.50 ± 0.63	0.73 ± 0.30	3.48 ± 1.76
4 <sup>η</sup> μέρα	3.83 ± 3.78	4.58 ± 4.51	0.25 ± 0.25	0.59 ± 0.54	2.69 ± 2.61
5 <sup>η</sup> μέρα	3.07 ± 1.95	3.67 ± 2.35	0.20 ± 0.12	0.40 ± 0.16	1.84 ± 0.79

Τη τρίτη ημέρα μετρήσεων παρατηρείται μέγιστη τιμή της μέσης ωριαίας δόσης με τιμή στα 52.26 μg για την περιοχή ET<sub>2</sub> ενώ η ελάχιστη τιμή παρατηρείται την πέμπτη ημέρα για την τραχειοβρογχική περιοχή στα 0.08 μg.

Είναι σημαντικό να υπολογισθεί, πέραν της έκθεσης και δόσης αιωρούμενων σωματιδίων και η κατακράτηση μάζας σωματιδίων μετά το πέρασμα των πέντε ημερών, δηλαδή τη ποσότητα που τελικά παραμένει στο σώμα. Κάνοντας χρήση των αρχείων RetentionTotal που προκύπτουν απο την εφαρμογή του ExDoM, δίνονται πληροφορίες για τη συσσώρευση σωματιδίων σε κάθε περιοχή ενδιαφέροντος, δηλαδή ET<sub>2</sub> sur, ET seq, BB gel, BB sol, BB seq, bb gel, bb sol, bb seq, Al, λεμφαδένες (LNth, LNet), απορρόφηση στο αίμα και μεταφορά στο γαστρεντερικό σύστημα. Τα ακρόνυμα sur υποδηλώνουν την κατακράτηση σωματιδίων στην επιφάνεια της περιοχής στο επιθήλιο ενώ το ακρόνυμο gel αναφέρεται στη συσσώρευση σωματιδίων στη βλέννα.

Πίνακας 16: Κατακράτηση σωματιδίων στον οργανισμό για τις πέντε ημέρες έκθεσης του φοιτητή.

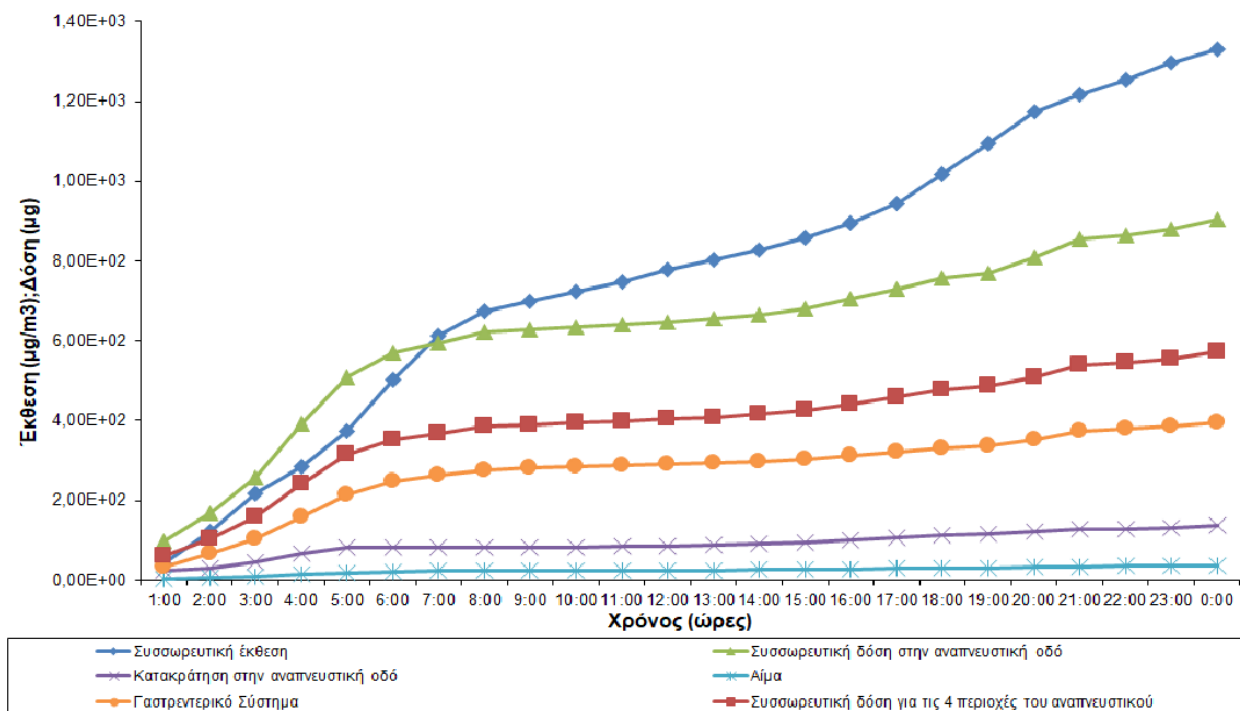
Περιοχή	Κατακράτηση σε μg (για τις πέντε μέρες έκθεσης)	Περιοχή	Κατακράτηση σε μg (για τις πέντε μέρες έκθεσης)
ET <sub>2</sub> _sur	4,202	bb_sol	20,660
ET_seq	0,296	bb_seq	0,379
BB_gel	6,106	Al	252,663
BB_sol	10,458	GI tract	652,565
BB_seq	0,220	LNth	0,003
bb_gel	16,320	LNet	0,000
Blood	70,658		

## 6.2 Υπολογισμός εφαρμοσμένης δόσης εργαζόμενου.

Για τον υπολογισμό της δόσης ολικών σωματιδίων του εργαζόμενου ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με παραπάνω, στον υπολογισμό της δόσης του φοιτητή. Τα δεδομένα από τις μετρήσεις του οργάνου Sidepak χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου του προγράμματος ExDoM και προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα.

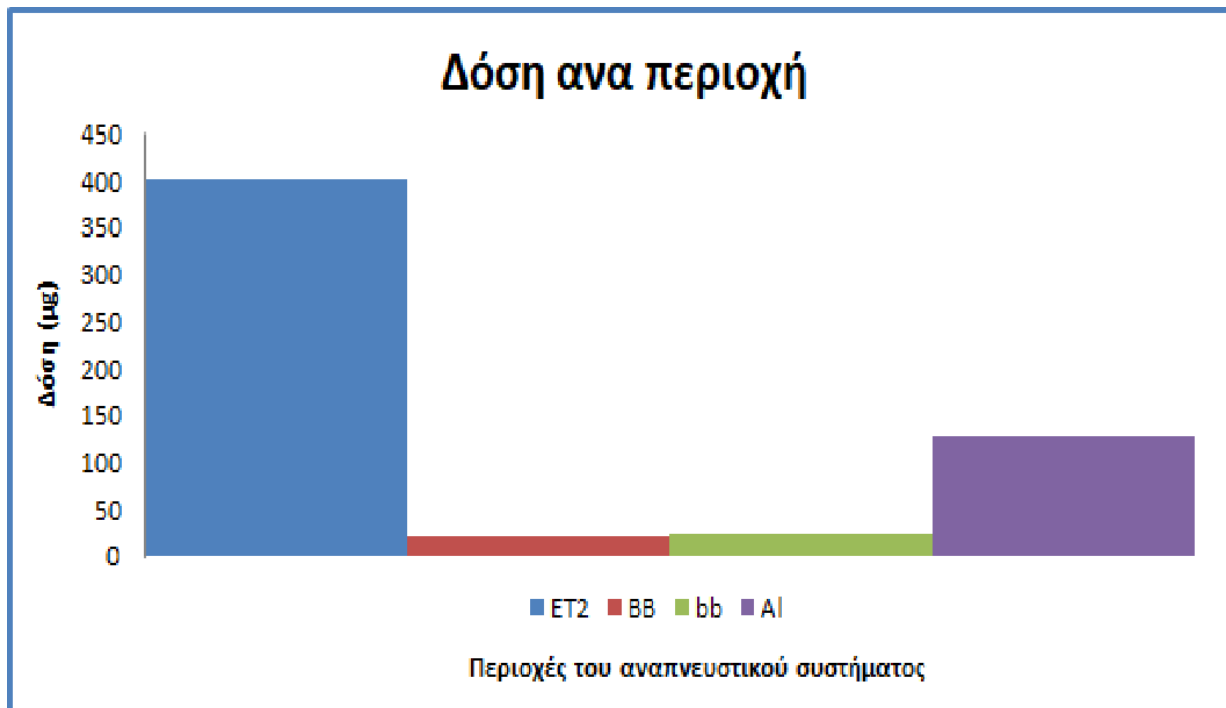
Για την **πρώτη μέρα** έκθεσης του εργαζόμενου προέκυψε ότι η **μέση ωριαία δόση** είχε τιμή  **$37.74 \pm 37.38 \mu\text{g}/\text{hour}$**  με **μέγιστη** τιμή εν ώρα εργασίας στις 03:00-04:00 στα  **$133.82 \mu\text{g}/\text{hour}$**  και **ελάχιστη** στα  **$6.53 \mu\text{g}$**  κατά τη διάρκεια του ύπνου στις 11:00-12:00.





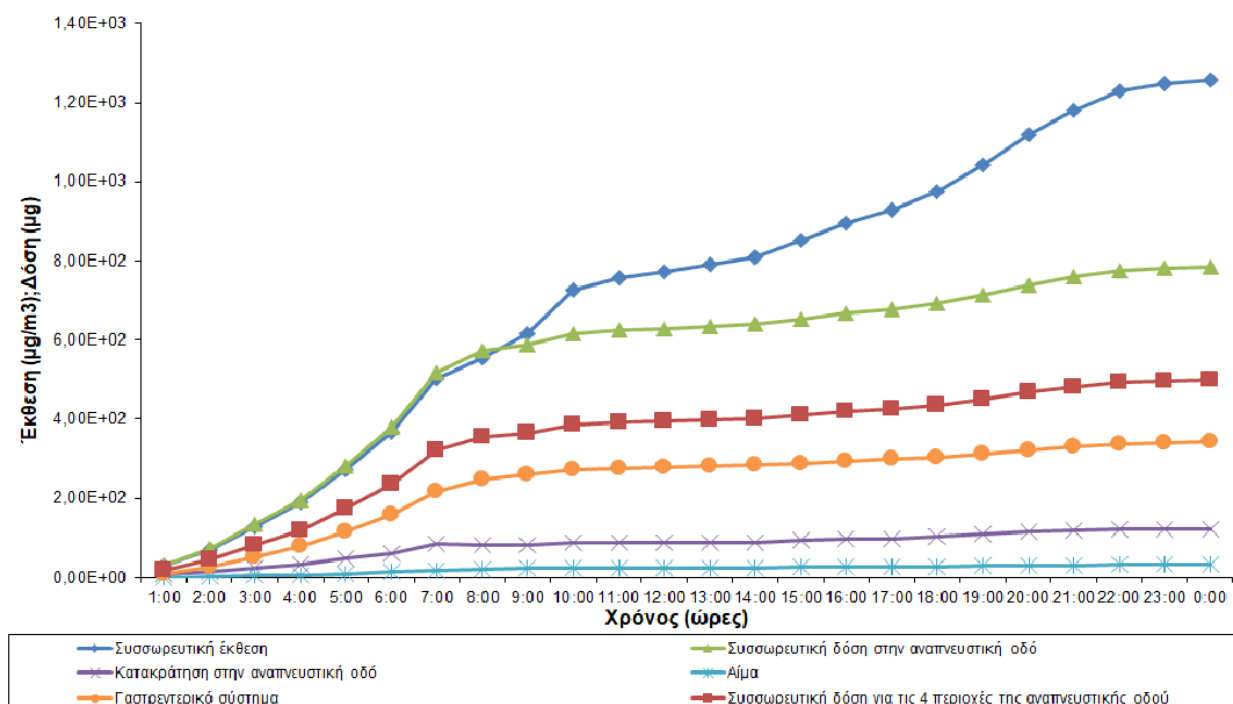
Διάγραμμα 25: Συσσωρευτική έκθεση και δόση ολικών σωματιδίων εντός του αναπνευστικού συστήματος και κατακράτηση σωματιδίων για τη πρώτη ημέρα έκθεσης του εργαζομένου.

Στο διάγραμμα 26 φαίνεται η συνολική δόση σωματιδίων για κάθε περιοχή της αναπνευστικής οδού. Παρατηρούμε ότι οι τιμές είναι πολύ μεγαλύτερες από τις τιμές της δόσης του φοιτητή, το οποίο οφείλεται στην υψηλή συγκέντρωση των PM εν ώρα εργασίας στο νυχτερινό κέντρο.

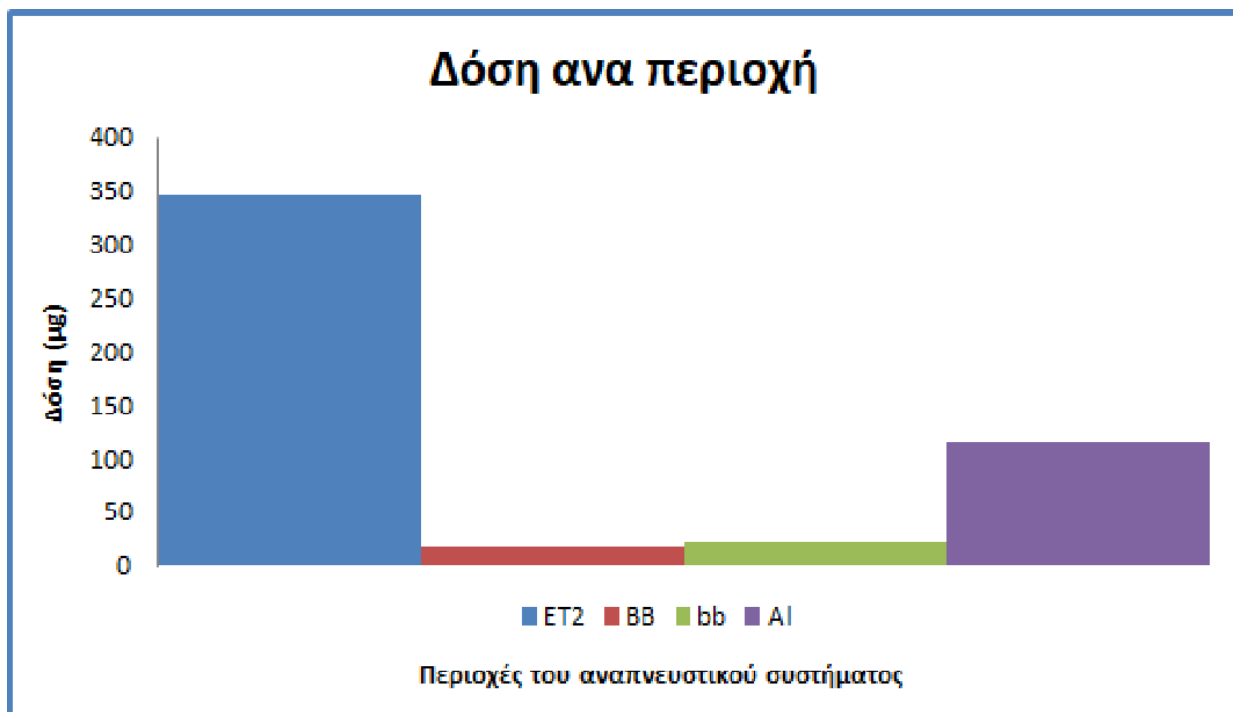


Διάγραμμα 26: Συνολική δόση ανά περιοχή του αναπνευστικού συστήματος την πρώτη ημέρα έκθεσης του εργαζομένου.

Για τη **δεύτερη μέρα** έκθεσης του εργαζομένου, η μέση ωριαία δόση βρέθηκε στα  **$32.72 \pm 34.54$  μg/hour**, με **μέγιστη** τιμή τα **137.68 μg/hour** και **ελάχιστη** τα **3.61 μg/hour**. Όπως και στη πρώτη μέρα έκθεσης, η μέγιστη δόση λαμβάνεται εν ώρα εργασίας στις 06:00-07:00 ενώ η ελάχιστη στις 23:00-00:00 στο σπίτι. Η ολική δόση για την περιοχή του στόματος είχε τιμή 345.17 μg, η τραχειοβρογχική περιοχή 17.53 μg, η περιοχή των βρογχιολίων 21.96 μg και η κυψελιδική περιοχή 114.64 μg όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 28.

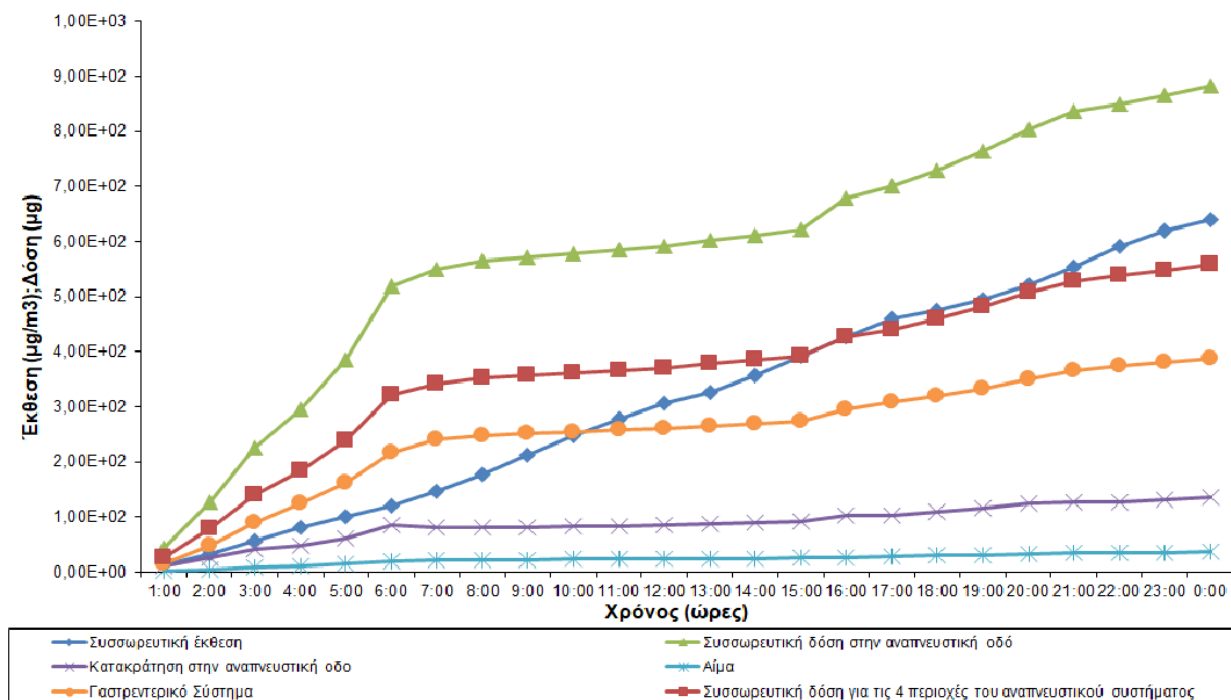


Διάγραμμα 27: Συσσωρευτική έκθεση και δόση ολικών σωματιδίων εντός του αναπνευστικού συστήματος και κατακράτηση σωματιδίων για τη δεύτερη ημέρα έκθεσης του εργαζομένου.

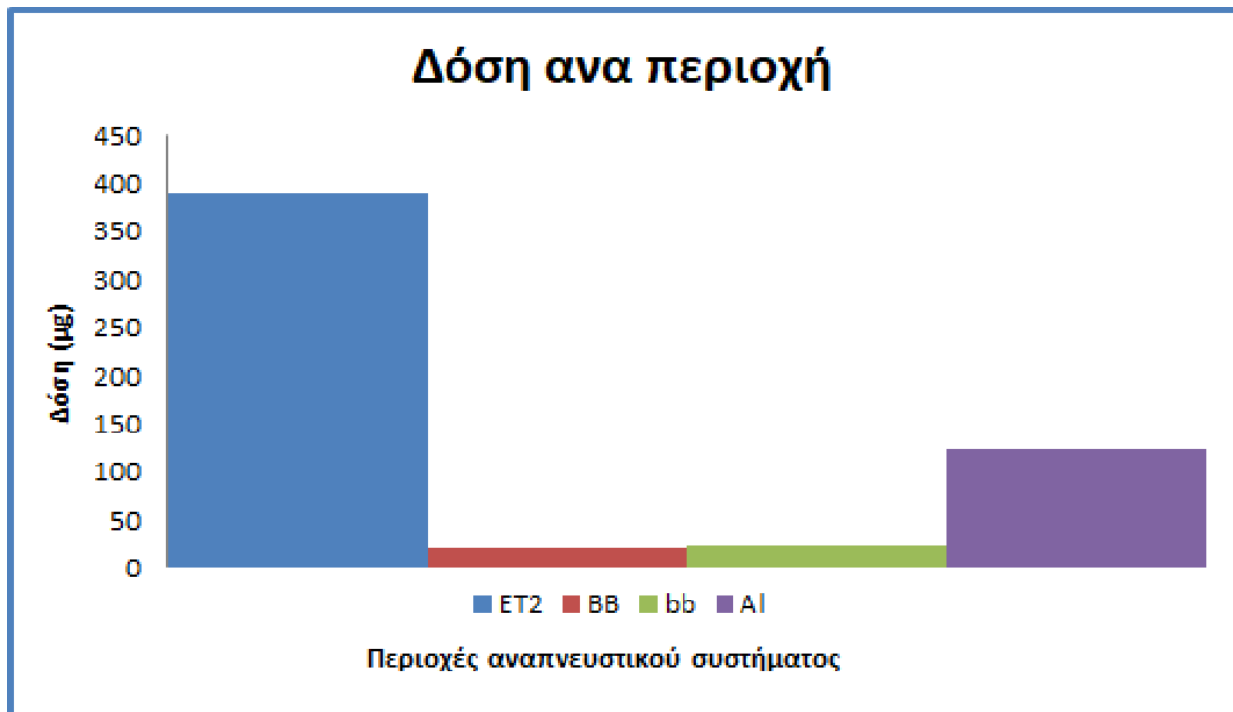


Διάγραμμα 28: Συνολική δόση ανά περιοχή του αναπνευστικού συστήματος την πρώτη ημέρα έκθεσης του εργαζομένου.

Την **τρίτη ημέρα** έκθεσης του εργαζομένου, η **μέση ωριαία δόση** κυμάνθηκε στα  **$36.77 \pm 34.74$   $\mu\text{g}/\text{hour}$** , με **μέγιστη** στα  **$133.82 \mu\text{g}$**  και **ελάχιστη** στα  **$6.53 \mu\text{g}$** .

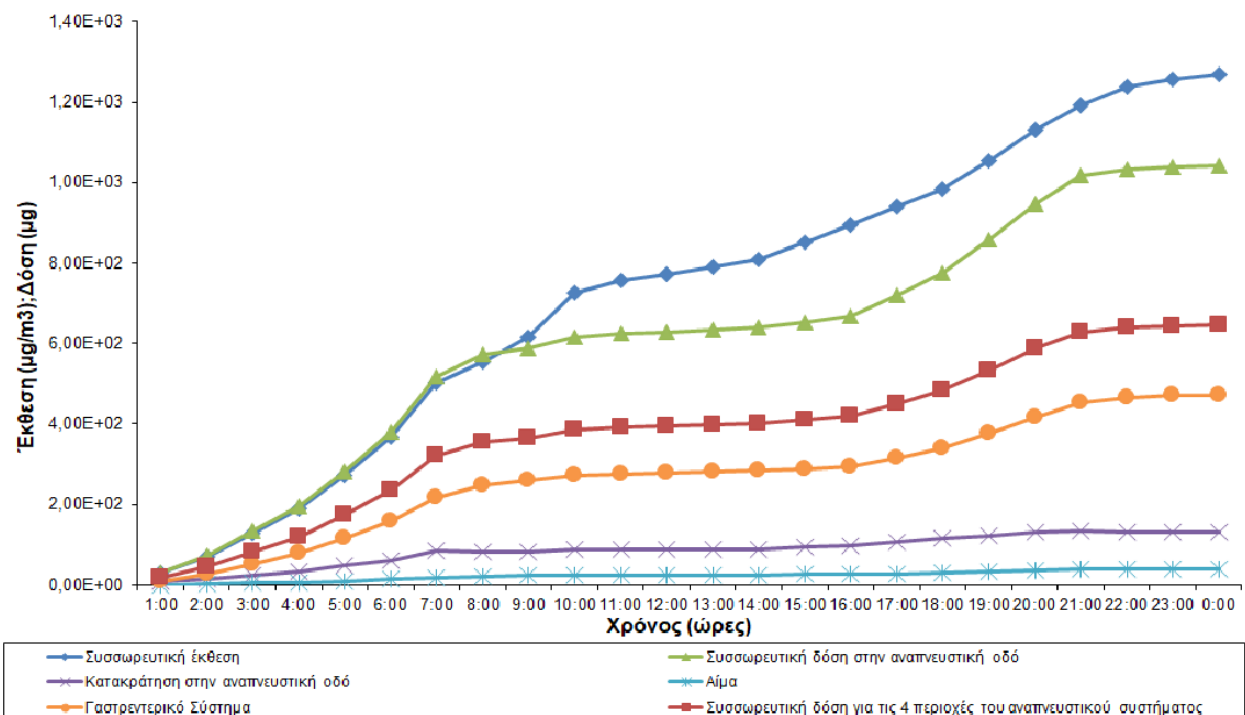


Διάγραμμα 29: Συσσωρευτική έκθεση-δόση ολικών σωματιδίων εντός του αναπνευστικού συστήματος και κατακράτηση σωματιδίων για τη τρίτη ημέρα έκθεσης του εργαζομένου.

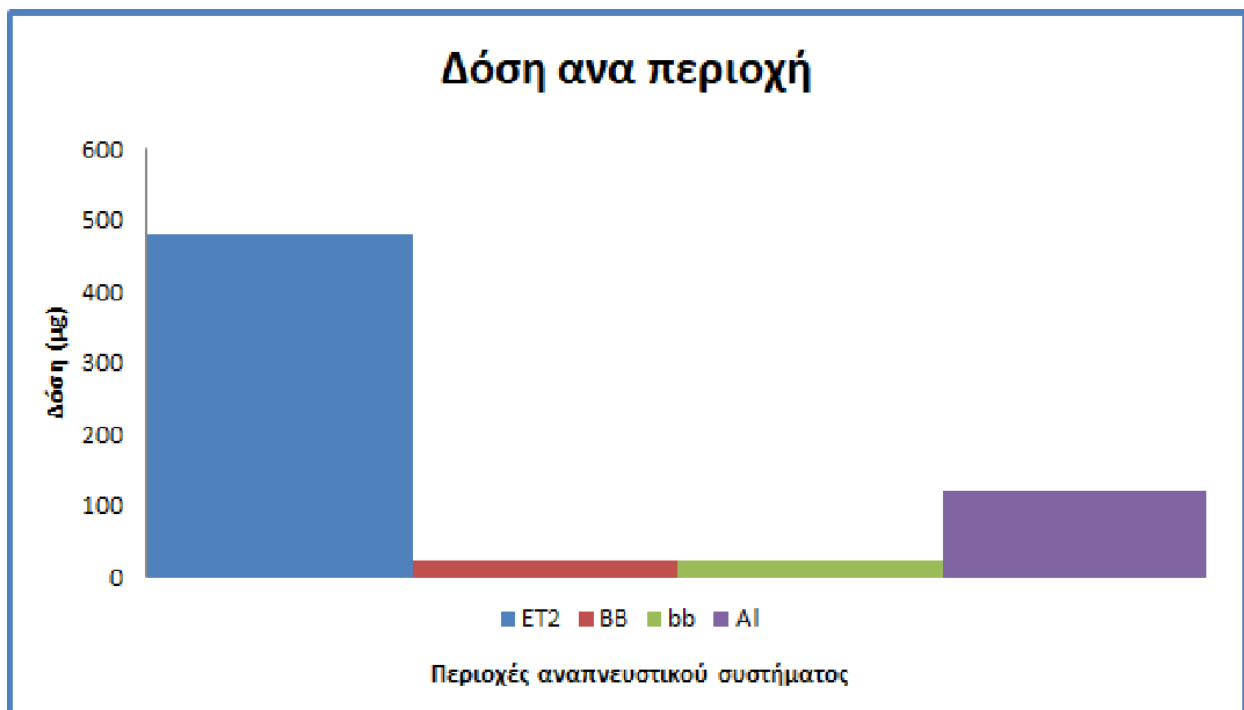


Διάγραμμα 30: Συνολική δόση ανά περιοχή του αναπνευστικού συστήματος την τρίτη ημέρα έκθεσης του εργαζομένου.

Για την **τέταρτη ημέρα** μετρήσεων έχουμε **μέση ωριαία δόση  $43.47 \pm 37.11 \mu\text{g}/\text{hour}$** , **μέγιστη τιμή δόσης  $137.68 \mu\text{g}/\text{hour}$**  και **ελάχιστη  $3.61 \mu\text{g}/\text{hour}$**  και το διάγραμμα έκθεσης και δόσης για τις περιοχές του αναπνευστικού και της κατακράτησης των ολικών σωματιδίων φαίνεται στο διάγραμμα 32.

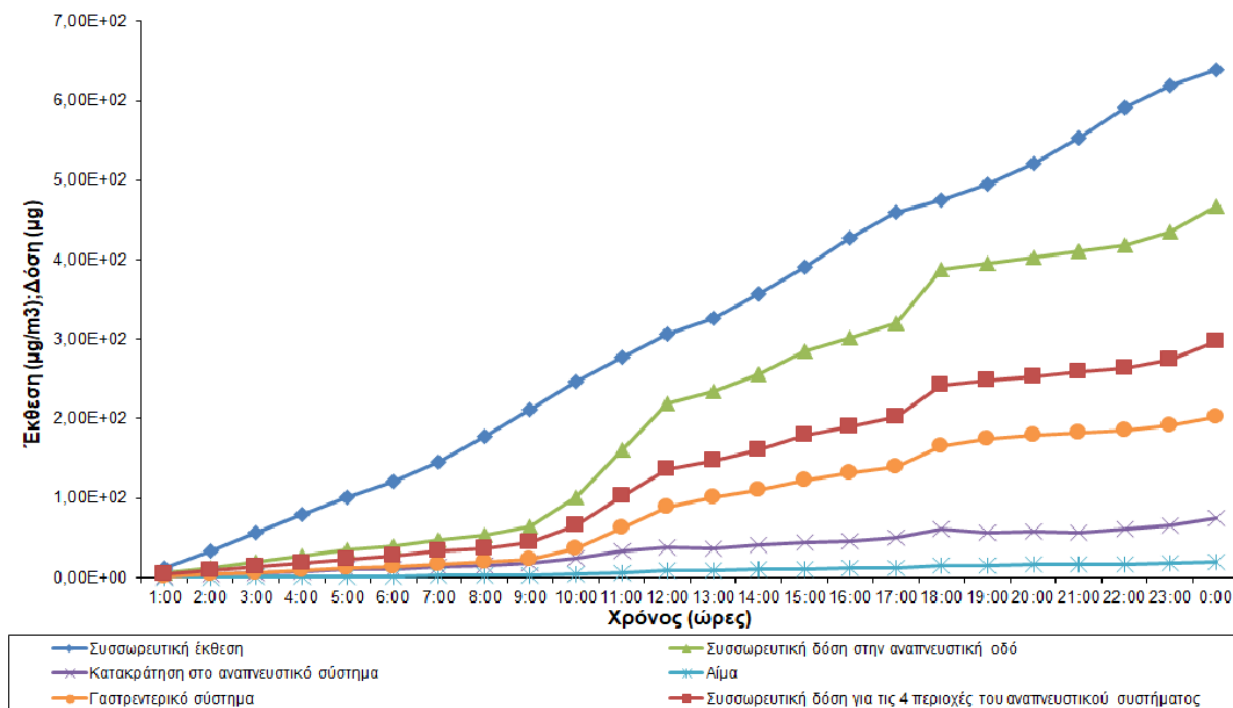


Διάγραμμα 31: Συσσωρευτική έκθεση-δόση ολικών σωματιδίων εντός του αναπνευστικού συστήματος και κατακράτηση σωματιδίων για τη τέταρτη ημέρα έκθεσης του εργαζομένου.

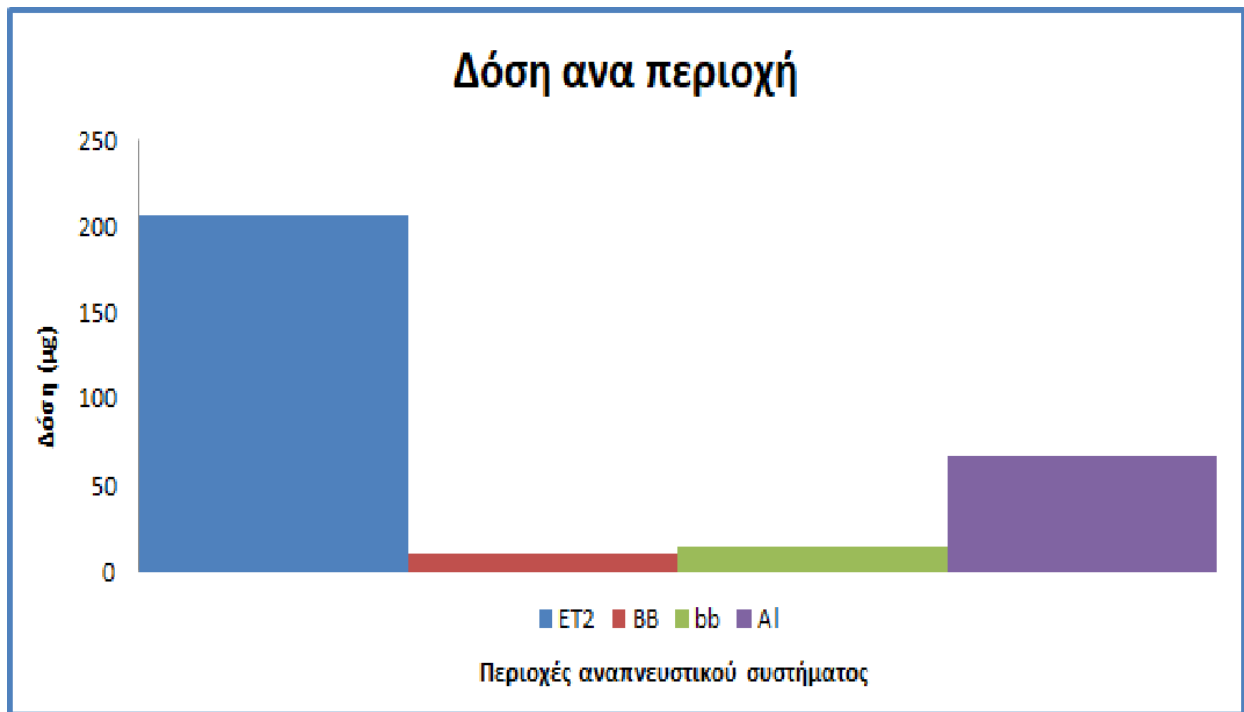


Διάγραμμα 32: Συνολική δόση ανά περιοχή του αναπνευστικού συστήματος την τέταρτη ημέρα έκθεσης του εργαζομένου.

Τέλος, για την **πέμπτη ημέρα** έκθεσης του εργαζομένου έχουμε **μέση ωριαία δόση  $19.50 \pm 18.58 \mu\text{g}/\text{hour}$** , **μέγιστη τιμή δόσης  $67.54 \mu\text{g}/\text{hour}$**  και **ελάχιστη  $5.87 \mu\text{g}/\text{hour}$** .



Διάγραμμα 33: Συσσωρευτική έκθεση-δόση ολικών σωματιδίων εντός του αναπνευστικού συστήματος και κατακράτηση σωματιδίων για τη πέμπτη ημέρα έκθεσης του εργαζομένου.



Διάγραμμα 34: Συνολική δόση ανά περιοχή του αναπνευστικού συστήματος την πέμπτη ημέρα έκθεσης του εργαζομένου.

Για το σύνολο των πέντε ημερών έκθεσης του εργαζομένου σε νυχτερινό κέντρο διασκέδασης βρέθηκε ότι η **μέση ημερήσια** δόση των ολικών σωματιδίων κυμαινόταν στα **816.95 ± 215.70 μg/day** με τις περιοχές ET<sub>1</sub>, ET<sub>2</sub>, BB, bb, AI να δέχονται κατά μέσο όρο **301.92 ± 83.14 μg/day**, **364.45 ± 100.59 μg/day**, **18.46 ± 4.91 μg/day**, **21.26 ± 4.33 μg/day**, **110.87 ± 25.43 μg/day** αντίστοιχα.

Πίνακας 17: Μέση δόση ολικών σωματιδίων για κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος (ΑΣ) με το πέρας των πέντε ημερών έκθεσης του εργαζομένου.

Περιοχή ΑΣ	ET <sub>1</sub>	ET <sub>2</sub>	BB	bb	AL
<b>Μέση</b>					
<b>Ημερήσια</b>	<b>301.92 ± 83.14</b>	<b>364.45 ±</b>	<b>18.46 ± 4.91</b>	<b>21.26 ± 4.33</b>	<b>110.87 ± 25.43</b>
<b>Δόση (μg/day)</b>		<b>100.59</b>			



Πίνακας 18: Μέση ωριαία δόση ολικών σωματιδίων ανά περιοχή αναπνευστικού συστήματος του εργαζομένου.

<b>Μέση ωριαία</b>					
<b>δόση ανά</b>					
<b>ημέρα</b>	<b>ET<sub>1</sub></b>	<b>ET<sub>2</sub></b>	<b>BB</b>	<b>bb</b>	<b>AL</b>
<b>έκθεσης</b>					
<b>(μg/hr)</b>					
1 <sup>η</sup> μέρα	13.86 ± 14.51	16.74 ± 17.59	0.85 ± 0.86	0.99 ± 0.64	5.30 ± 3.95
2 <sup>η</sup> μέρα	11.92 ± 13.40	14.38 ± 16.24	0.73 ± 0.79	0.92 ± 0.61	4.78 ± 3.68
3 <sup>η</sup> μέρα	13.47 ± 13.53	16.28 ± 16.39	0.83 ± 0.80	1.01 ± 0.61	5.18 ± 3.68
4 <sup>η</sup> μέρα	16.52 ± 14.62	19.93 ± 17.69	1.00 ± 0.86	0.94 ± 0.61	5.08 ± 3.68
5 <sup>η</sup> μέρα	7.14 ± 7.61	8.59 ± 9.17	0.44 ± 0.45	0.57 ± 0.29	2.76 ± 1.55

Η κατακράτηση των ολικών σωματιδίων από τον οργανισμό για τις πέντε ημέρες έκθεσης του εργαζόμενου απεικονίζονται στον πίνακα 19.

Πίνακας 19: Κατακράτηση σωματιδίων στον οργανισμό για τις πέντε ημέρες έκθεσης του εργαζόμενου.

<b>Περιοχή</b>	<b>Συσσώρευση σε μg (για τις πέντε μέρες έκθεσης)</b>	<b>Περιοχή</b>	<b>Συσσώρευση σε μg (για τις πέντε μέρες έκθεσης)</b>
ET <sub>2</sub> _sur	8,052	bb_sol	36,375
ET_seq	0,817	bb_seq	0,665
BB_gel	7,930	Al	496,008
BB_sol	28,124	GI tract	1801,763
BB_seq	0,576	LNth	0,008
bb_gel	23,933	LNet	0,001
Blood	166,728		

### 6.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων φοιτητή και εργαζομένου σε εσωτερικούς χώρους και ανοιχτά περιβάλλοντα.

Σε αυτό το σημείο θα μελετήσουμε την διαφορετική επίδραση που έχουν διάφορα περιβάλλοντα έκθεσης και για τα δύο υποκείμενα μελέτης. Όσον αφορά την έκθεση και δόση του φοιτητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, οι εσωτερικοί χώροι που έγιναν μετρήσεις περιλαμβάνουν το κυλικείο και η βιβλιοθήκη του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, χώροι αναψυχής (καφετέριες, καταστήματα ηλεκτρονικών υπολογιστών), μέσα μαζικής μεταφοράς και η κατοικία διαμονής ενώ πραγματοποιήθηκαν περίπατοι και αθλητικές δραστηριότητες για μετρήσεις στο εξωτερικό περιβάλλον. Η μέση τιμή έκθεσης με την τυπική της απόκλιση για τα εσωτερικά και εξωτερικά περιβάλλοντα που βρέθηκε ο φοιτητής φαίνονται στον πίνακα 20, ενώ αντίστοιχα η μέση τιμή της δόσης με την τυπική της απόκλιση στον πίνακα 21.

Πίνακας 20: Μέση έκθεση σε ολικά σωματίδια σε εσωτερικούς χώρους και εξωτερικά περιβάλλοντα για φοιτητή του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Μικροπεριβάλλοντα					
	Βιβλιοθήκη και κυλικείο TUC	Χώροι Αναψυχής	Περίπατοι και γήπεδο TUC	Οικία Διαμονής	Μέσα Μεταφοράς
<b>Μέση έκθεση μg/h</b>	32.01±11.39	70.96±34.07	39.14±26.82	27.38±12.67	34.67±8.92

Η αντίστοιχη δόση που προκύπτει με τη βοήθεια του μοντέλου ExDoM για τα παραπάνω δεδομένα έκθεσης φαίνεται στον πίνακα 21.

Πίνακας 21: Μέση δόση ολικών σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους και εξωτερικά περιβάλλοντα για φοιτητή του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Χώρος Μετρήσεων	Βιβλιοθήκη και κυλικείο TUC	Χώροι Αναψυχής	Περίπατοι και γήπεδο TUC	Οικία Διαμονής	Μέσα Μεταφοράς
<b>Μέση δόση μg/h</b>	10.44±3.71	36.65±30.35	38.73±31.11	7.81±3.90	23.63±13.08

Πίνακας 22: Μέση ωριαία δόση και ποσοστό ολικής δόσης για τις πέντε μέρες έκθεσης.

ΩΡΑ	Δόση (μg)	%
1η	0.0188	1.23%
2η	0.0231	1.52%
3η	0.0238	1.56%
4η	0.0245	1.61%
5η	0.0228	1.50%
6η	0.0186	1.22%
7η	0.0221	1.45%
8η	0.0249	1.64%
9η	0.0288	2.72%
10η	0.0303	3.07%
11η	0.0280	3.06%
12η	0.0432	4.15%
13η	0.0247	3.47%
14η	0.0258	3.62%
15η	0.0301	4.22%
16η	0.0365	5.13%
17η	0.0579	6.44%
18η	0.0692	5.26%
19η	0.0542	6.70%
20η	0.1028	9.29%
21η	0.1227	12.23%
22η	0.1111	9.67%
23η	0.0306	5.05%
24η	0.0255	4.19%

Όπως παρατηρούμε στον πίνακα 22, στις 20:00 – 21:00 έχουμε το μεγαλύτερο μέρος της δόσης που αγγίζει το 12.23%, το οποίο οφείλεται στους χώρους αναψυχής που επισκέφθηκε ο φοιτητής εκείνες τις ώρες, όπως καφετέριες και καταστήματα Η/Υ, όπου το κάπνισμα και ο αυξημένος αριθμός διέλευσης ατόμων αποτελούν τις κύριες αιτίες υψηλών τιμών συγκέντρωσης σωματιδίων.

Πίνακας 23: Μέση έκθεση ολικών σωματιδίων εργαζομένου σε εσωτερικούς χώρους και εξωτερικά περιβάλλοντα.

Μικροπεριβάλλοντα					
Χώρος Μετρήσεων	Νυχτερινό κέντρο διασκέδασης	Χώροι Αναψυχής	Εξωτερικοί Χώροι	Οικία Διαμονής	Μέσα Μεταφοράς
Μέση έκθεση μg/h	76.31±31.08	59.74±24.32	51.66±14.59	37.47±23.85	35.27±17.89

Πίνακας 24: Μέση δόση ολικών σωματιδίων εργαζομένου σε εσωτερικούς χώρους και εξωτερικά περιβάλλοντα.

Χώρος Μετρήσεων	Νυχτερινό κέντρο διασκέδασης	Χώροι Αναψυχής	Εξωτερικοί Χώροι	Οικία Διαμονής	Μέσα Μεταφοράς
Μέση δόση μg/h	80.71±32.33	23.59±7.28	11.69±7.28	11.69±8.18	19.35±21.2

Πίνακας 25: Ποσοστιαία εφαρμοσμένη δόση ολικών σωματιδίων εργαζομένου ανά ώρα έκθεσης, για τις πέντε ημέρες συνολικά.

ΩΡΑ	Δόση (μg)	%
1η	0.0513	4.41%
2η	0.0606	5.22%
3η	0.0772	6.64%
4η	0.0813	7.00%
5η	0.0943	8.12%
6η	0.0980	8.44%
7η	0.0829	7.12%
8η	0.0379	3.25%
9η	0.0137	1.10%
10η	0.0264	1.98%
11η	0.0218	1.47%
12η	0.0196	1.29%
13η	0.0104	1.25%

<b>14η</b>	0.0129	1.63%
<b>15η</b>	0.0202	2.75%
<b>16η</b>	0.0308	3.84%
<b>17η</b>	0.0319	4.56%
<b>18η</b>	0.0467	5.22%
<b>19η</b>	0.0394	5.22%
<b>20η</b>	0.0492	5.96%
<b>21η</b>	0.0435	4.18%
<b>22η</b>	0.0155	2.86%
<b>23η</b>	0.0142	2.65%
<b>24η</b>	0.0202	3.85%

## 7 Συμπεράσματα - Προτάσεις

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν να διερευνηθεί και να συγκριθεί η έκθεση και δόση σε αιωρούμενα σωματίδια για δύο άτομα με διαφορετικό τρόπο ζωής και δραστηριότητες. Επιλέξαμε έναν φοιτητή του Πολυτεχνείου Κρήτης και έναν εργαζόμενο σε νυχτερινό κέντρο διασκέδασης. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε το όργανο Sidepak της εταιρίας TSI, το οποίο υπολογίζει την συγκέντρωση των  $PM_{10}$  στον χώρο, ακολούθησε επεξεργασία των δεδομένων και έγινε υπολογισμός της εφαρμοσμένης δόσης και κατακράτησης σωματιδίων με χρήση του μοντέλου ExDoM (Aleksandropoulou and Lazaridis 2013b).

Από τα αποτελέσματα στην ενότητα 5 προκύπτει ότι ο χώρος εργασίας και οι χώροι αναψυχής αποτελούν τους σημαντικότερους χώρους έκθεσης και δόσης αιωρούμενων σωματιδίων για τον εργαζόμενο ενώ για τον φοιτητή είναι οι χώροι αναψυχής και το εξωτερικό περιβάλλον. Ο κακός σχεδιασμός του κτιρίου, ο ανεπαρκής αερισμός των χώρων και οι εσωτερικές πηγές σωματιδίων είναι οι κύριες αιτίες υψηλών συγκεντρώσεων στο νυχτερινό κέντρο με αποτέλεσμα η δόση των ολικών σωματιδίων να κορυφώνεται εν ώρα εργασίας για τον εργαζόμενο. Η πρόσληψη σωματιδίων για τον φοιτητή εμφανίζει μέγιστη τιμή κατά τη διάρκεια των περιπάτων στο κέντρο της πόλης των Χανίων, το οποίο οφείλεται στην αυξημένη κυκλοφορία των μέσων μεταφοράς.

Όσον αφορά τις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος που επιβαρύνθηκαν περισσότερο, προκύπτει ότι για τον εργαζόμενο η περιοχή μύτης και στόματος δέχθηκαν συνολικά το 81.57% της εφαρμοσμένης δόσης, με την κυψελιδική περιοχή να ακολουθεί με 13.57% και τέλος οι βρόγχοι με τα βρογχιόλια να δέχονται τη μικρότερη ποσότητα σε ποσοστό 4.86% συνολικά. Αντίστοιχα, τα αποτελέσματα της έκθεσης του φοιτητή φανερώνουν την  $ET_1$  και  $ET_2$  περιοχή να δέχονται το 76.20% της δόσης, η περιοχή κυψελίδων το 17.77% και οι περιοχές BB,bb το 6.03%.

Σύμφωνα με έρευνα που έγινε σε αίθουσες του πανεπιστημίου της Σλοβακίας (Burdova, Vilcekova, and Meciarova 2016), η μέση συγκέντρωση των  $PM_{10}$  βρέθηκε μεταξύ 64.26 – 95.50  $\mu g/m^3$  ενώ οι μετρήσεις στους χώρους του Πολυτεχνείου, σε αίθουσες και κυλικεία είναι αρκετά μικρότερη, δηλαδή στα 32.01  $\mu g/m^3$ . Επίσης, η μέση ωριαία έκθεση σε ολικά σωματίδια στο

αστικό περιβάλλον των Χανίων υπολογίστηκε στα 39,14  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  για τον φοιτητή και στα 51.55  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  για τον εργαζόμενο, τιμές μεγαλύτερες από τη μέγιστη τιμή συγκέντρωσης (33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) που παρατηρήθηκε σε μετρήσεις που έλαβαν χώρα σε διάφορες πόλεις της Ελβετίας (Monn et al. 1995). Τέλος, η μέση ωριαία συγκέντρωση  $\text{PM}_{10}$  στην οικία του φοιτητή ήταν 27.38  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ενώ του εργαζομένου 37.47  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  οι οποίες είναι αρκετά μεγαλύτερες συγκριτικά με ένα πείραμα που έγινε σε δύο κατοικίες της Ελβετίας οι οποίες παρουσίασαν μέσες τιμές 21.4 και 24.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  αντίστοιχα (Monn et al. 1997). Να σημειωθεί ότι τα νούμερα αυτά αφορούν οικίες χωρίς καπνιστές.

Όπως προαναφέρθηκε, ο χώρος εργασίας του εργαζομένου οι χώροι αναψυχής αποτελούν περιβάλλοντα που μπορούν να αναπτύξουν υψηλές συγκεντρώσεις σε αιωρούμενα σωματίδια, είτε αυτές οφείλονται σε εσωτερικές πηγές είτε στην ανθρώπινη δραστηριότητα. Για την επίτευξη καλής ποιότητας εσωτερικού αέρα και διατήρηση χαμηλών συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων, προτείνονται οι παρακάτω ενέργειες.

- Το κάπνισμα να μη γίνεται σε εσωτερικό χώρο αλλά στο εξωτερικό περιβάλλον.
- Συχνό καθαρίσμα πατώματος και επίπλων για απομάκρυνση της σκόνης και άλλων σωματιδίων από τις επιφάνειες.
- Καθαρισμός τυχόν μούχλας που αναπτύσσεται στους τοίχους εξαιτίας υψηλών επιπέδων υγρασίας. Συνίσταται η εγκατάσταση αφυγραντήρα.
- Κατάργηση οποιουδήποτε είδους αρωματικών ψεκαστήρων χώρου, τα οποία περιέχουν πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC).
- Συχνή συντήρηση συστημάτων ψύξης-θέρμανσης (air conditioners) με καθαρισμό των φίλτρων τους.
- Καθημερινός αερισμός των χώρων με ανοιχτά παράθυρα για κάποιες ώρες, εάν είναι εφικτό, με σκοπό την ανανέωση του εσωτερικού αέρα.
- Ορθός σχεδιασμός και εγκατάσταση συστημάτων αερισμού όταν χρησιμοποιούνται συστήματα καύσης για θέρμανση των χώρων όπως τζάκια, ξυλόσομπες και καυστήρες υγραερίου.

## Βιβλιογραφία

- Aleksandropoulou, Victoria, and Mihalis Lazaridis. 2013a. "Development and Application of a Model (ExDoM) for Calculating the Respiratory Tract Dose and Retention of Particles under Variable Exposure Conditions." *Air Quality, Atmosphere & Health* 6 (1): 13–26. doi:10.1007/s11869-010-0126-z.
- . 2013b. "Development and Application of a Model (ExDoM) for Calculating the Respiratory Tract Dose and Retention of Particles under Variable Exposure Conditions." *Air Quality, Atmosphere & Health* 6 (1): 13–26. doi:10.1007/s11869-010-0126-z.
- Aleksandropoulou Viktoria. 2003. "Μελέτη Της Εναπόθεσης Και Μεταφοράς Σωματιδίων Στο Ανθρώπινο Αναπνευστικό Σύστημα."
- Anderson, Jonathan O., Josef G. Thundiyil, and Andrew Stolbach. 2012. "Clearing the Air: A Review of the Effects of Particulate Matter Air Pollution on Human Health." *Journal of Medical Toxicology* 8 (2): 166–75. doi:10.1007/s13181-011-0203-1.
- Bardana, Emil J., and Anthony Montanaro. 1996. *Indoor Air Pollution and Health*. Taylor & Francis.
- Bell, M L, and D L Davis. 2001. "Reassessment of the Lethal London Fog of 1952: Novel Indicators of Acute and Chronic Consequences of Acute Exposure to Air Pollution." *Environmental Health Perspectives* 109 (Suppl 3): 389–94.
- Burdova, Eva Kridlova, Silvia Vilcekova, and Ludmila Meciarova. 2016. "Investigation of Particulate Matters of the University Classroom in Slovakia." *Sustainable Built Environment Tallinn and Helsinki Conference SBE16* 96 (September): 620–27. doi:10.1016/j.egypro.2016.09.111.
- Carvalho, Thiago C., Jay I. Peters, and Robert O. Williams III. 2011. "Influence of Particle Size on Regional Lung Deposition – What Evidence Is There?" *International Journal of Pharmaceutics* 406 (1–2): 1–10. doi:10.1016/j.ijpharm.2010.12.040.
- Dai, Yu-Tung, Yow-Jer Juang, Yi-ying Wu, Patrick N. Breyse, and Der-Jen Hsu. 2006. "In Vivo Measurements of Inhalability of Ultralarge Aerosol Particles in Calm Air by Humans." *Journal of Aerosol Science* 37 (8): 967–73. doi:10.1016/j.jaerosci.2005.10.002.
- Douwes, J., P. Thorne, N. Pearce, and D. Heederik. 2003. "Bioaerosol Health Effects and Exposure Assessment: Progress and Prospects." *Annals of Occupational Hygiene* 47 (3): 187–200. doi:10.1093/annhyg/meg032.
- EPA. 1996. "Air Quality Criteria for Particulate Matter Volume II."
- . 2010. "Integrated Science Assessment for Particulate Matter."
- Feng, Shaolong, Dan Gao, Fen Liao, Furong Zhou, and Xinming Wang. 2016. "The Health Effects of Ambient PM<sub>2.5</sub> and Potential Mechanisms." *Ecotoxicology and Environmental Safety* 128 (June): 67–74. doi:10.1016/j.ecoenv.2016.01.030.
- Fung, Frederick, and William G. Hughson. 2003. "Health Effects of Indoor Fungal Bioaerosol Exposure." *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 18 (7): 535–44. doi:10.1080/10473220301451.
- Harrison, Roy M., and M. Jones. 1995. "The Chemical Composition of Airborne Particles in the UK Atmosphere." *Science of The Total Environment* 168 (3): 195–214. doi:10.1016/0048-9697(95)04536-A.



- Heyder, J., J. Gebhart, G. Rudolf, C.F. Schiller, and W. Stahlhofen. 1986. "Deposition of Particles in the Human Respiratory Tract in the Size Range 0.005–15 Mm." *Journal of Aerosol Science* 17 (5): 811–25. doi:10.1016/0021-8502(86)90035-2.
- ICRP. 1994. "Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection." Pergamon.
- Jones, A. P. 1999. "Indoor Air Quality and Health." *Atmospheric Environment* 33 (28): 4535–64. doi:10.1016/S1352-2310(99)00272-1.
- Kampa, Marilena, and Elias Castanas. 2008. "Human Health Effects of Air Pollution." *Environmental Pollution*, Proceedings of the 4th International Workshop on Biomonitoring of Atmospheric Pollution (With Emphasis on Trace Elements), 151 (2): 362–67. doi:10.1016/j.envpol.2007.06.012.
- Kim, Chong S., and S. C. Hu. 1998. "Regional Deposition of Inhaled Particles in Human Lungs: Comparison between Men and Women." *Journal of Applied Physiology* 84 (6): 1834.
- Kim, Ki-Hyun, Ehsanul Kabir, and Shamin Kabir. 2015. "A Review on the Human Health Impact of Airborne Particulate Matter." *Environment International* 74 (January): 136–43. doi:10.1016/j.envint.2014.10.005.
- Koullapis, P.G., S.C. Kassinos, M.P. Bivolarova, and A.K. Melikov. 2016. "Particle Deposition in a Realistic Geometry of the Human Conducting Airways: Effects of Inlet Velocity Profile, Inhalation Flowrate and Electrostatic Charge." *Selected Articles from the International Conference on CFD in Medicine and Biology (Albufeira, Portugal – August 30th - September 4th, 2015)* 49 (11): 2201–12. doi:10.1016/j.jbiomech.2015.11.029.
- Lazaridis. 2008. *Ποιότητα Αέρα Σε Εσωτερικούς Χώρους*. Tziola.
- . 2010. *Ατμοσφαιρική Ρύπανση Με Στοιχεία Μετεωρολογίας*. Second. Tziola.
- Monn, Ch., O. Braendli, G. Schaeppi, Ch. Schindler, U. Ackermann-Liebrich, and Ph. Leuenberger. 1995. "Particulate Matter < 10 Mm (PM10) and Total Suspended Particulates (TSP) in Urban, Rural and Alpine Air in Switzerland." *Atmospheric Environment* 29 (19): 2565–73. doi:10.1016/1352-2310(95)94999-U.
- Monn, Ch., A. Fuchs, D. Högger, M. Junker, D. Kogelschatz, N. Roth, and H.-U. Wanner. 1997. "Particulate Matter Less than 10 Mm (PM10) and Fine Particles Less than 2.5 Mm (PM2.5): Relationships between Indoor, Outdoor and Personal Concentrations." *Science of The Total Environment* 208 (1): 15–21. doi:10.1016/S0048-9697(97)00271-4.
- Namieśnik, Jacek, Tadeusz Górecki, Bożena Kozdroń-Zabiega ła, and Jerzy Łukasiak. 1992. "Indoor Air Quality (IAQ), Pollutants, Their Sources and Concentration Levels." *Building and Environment* 27 (3): 339–56. doi:10.1016/0360-1323(92)90034-M.
- Nemery, Benoît, Peter HM Hoet, and Abderrahim Nemmar. 2001. "The Meuse Valley Fog of 1930: An Air Pollution Disaster." *The Lancet* 357 (9257): 704–8. doi:10.1016/S0140-6736(00)04135-0.
- Neuberger, Manfred, Michael G Schimek, Friedrich Horak Jr., Hanns Moshhammer, Michael Kundi, Thomas Frischer, Bostjan Gomisek, Hans Puxbaum, and Helger Hauck. 2004. "Acute Effects of Particulate Matter on Respiratory Diseases, Symptoms and Functions:: Epidemiological Results of the Austrian Project on Health Effects of Particulate Matter (AUPHEP)." *Atmospheric Environment*, Includes Special Issue Section on Results from the Austrian Project on Health Effects of Particulates (AUPHEP), 38 (24): 3971–81. doi:10.1016/j.atmosenv.2003.12.044.
- Piglione, Maria Chiara, Daniela Fontana, and Marco Vanni. 2012. "Simulation of Particle Deposition in Human Central Airways." *European Journal of Mechanics - B/Fluids* 31 (January): 91–101. doi:10.1016/j.euromechflu.2011.08.003.

- Pöschl, Ulrich. 2005. "Atmospheric Aerosols: Composition, Transformation, Climate and Health Effects." *Angewandte Chemie International Edition* 44 (46): 7520–40. doi:10.1002/anie.200501122.
- Schlesinger. 1988. *Air Pollution, the Automobile, and Public Health*. Washington DC: National Academy Press.
- Schulz, Holger. 1998. "Mechanisms and Factors Affecting Intrapulmonary Particle Deposition: Implications for Efficient Inhalation Therapies Holger Schulz." *Pharmaceutical Science & Technology Today* 1 (8): 326–44. doi:10.1016/S1461-5347(98)00089-3.
- Shang, Y.D., K. Inthavong, and J.Y. Tu. 2015. "Detailed Micro-Particle Deposition Patterns in the Human Nasal Cavity Influenced by the Breathing Zone." *Computers & Fluids* 114 (July): 141–50. doi:10.1016/j.compfluid.2015.02.020.
- Shaughnessy, William J., Mohan M. Venigalla, and David Trump. 2015. "Health Effects of Ambient Levels of Respirable Particulate Matter (PM) on Healthy, Young-Adult Population." *Atmospheric Environment* 123, Part A (December): 102–11. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.10.039.
- Teoldi, Federico, Marco Lodi, Emilio Benfenati, Andrea Colombo, and Diego Baderna. 2016. "Air Quality in the Olona Valley and in Vitro Human Health Effects." *Science of The Total Environment*. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.11.203.
- Valberg, P. A., J. D. Brain, S. L. Sneddon, and S. R. LeMott. 1982. "Breathing Patterns Influence Aerosol Deposition Sites in Excised Dog Lungs." *Journal of Applied Physiology* 53 (4): 824.
- Valvanidis Athanasios, Fiotakis Konstantinos, and Vlacogianni Thomais. 2008. "Airborne Particulate Matter and Human Health: Toxicological Assessment and Importance of Size and Composition of Particles for Oxidative Damage and Carcinogenic Mechanisms: Journal of Environmental Science and Health, Part C: Vol 26, No 4." <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10590500802494538>.
- Vincent, James. 1995. *Aerosol Science for INDUSTRIAL HYGIENISTS*.
- WHO. 2002. *The World Health Report 2002-Reducing Risks, Promoting Healthy Life*.
- . 2005. "Air Quality Guidelines, Global Update."
- Xu, G. B., and C. P. Yu. 1986. "Effects of Age on Deposition of Inhaled Aerosols in the Human Lung." *Aerosol Science and Technology* 5 (3): 349–57. doi:10.1080/02786828608959099.
- Yang, Hsuan-Chia, Shu-Hao Chang, Richard Lu, and Der-Ming Liou. 2016. "The Effect of Particulate Matter Size on Cardiovascular Health in Taipei Basin, Taiwan." *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 137 (December): 261–68. doi:10.1016/j.cmpb.2016.08.014.