

# ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



Δημιουργία μία φιλικής προς τον χρήστη γραφικής  
πλατφόρμας για το μοντέλο ExDoM2 (Exposure Dose  
Model2) και η εφαρμογή του στο μετρό της Αθήνας

Μεταπτυχιακή Εργασία  
Εμμανουήλ Παπαγιαννάκης

**Εξεταστική Επιτροπή**  
Μιχαήλ Λαζαρίδης (επιβλέπων)  
Νικόλαος Καλογεράκης  
Διονυσία Κολοκοτσά

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2015

Παλεύουμε για ένα  
τίποτα, που ωστόσο  
είναι το παν.....  
Ελύτης



## Περίληψη

Η μελέτη των αιωρούμενων σωματιδίων αποτελεί αντικείμενο έντονου ενδιαφέροντος λόγω των επιπτώσεων τους στην υγεία του ανθρώπου. Τα αιωρούμενα σωματίδια έρχονται σε άμεση επαφή με το ανθρώπινο σώμα. Υπάρχουν τρεις οδοί εισροής των ρύπων στο ανθρώπινο σώμα : η εισπνοή, η κατάποση και η επαφή με το δέρμα. Το αναπνευστικό σύστημα ωστόσο , αποτελεί την κύρια οδό μέσω της οποίας εισέρχονται σωματίδια στον ανθρώπινο οργανισμό. Η ποσότητα των σωματιδίων που εναποτίθεται και συσσωρεύεται στο αναπνευστικό σύστημα, μεταφέρεται στη συνέχεια στο υπόλοιπο σώμα και καθορίζει την απόκριση του οργανισμού. Οι επιπτώσεις των σωματιδίων στην ανθρώπινη υγεία έχουν μελετηθεί σε πλήθος επιδημιολογικών και τοξικολογικών μελετών αλλά δεν υπάρχει ακόμα μια σαφής εικόνα για τους μηχανισμούς που τις καθορίζουν. Ωστόσο, τα συμπεράσματα των μελετών έχουν οδηγήσει στην κατανόηση των μηχανισμών με τους οποίους η σωματιδιακή ύλη που βρίσκεται στην ατμόσφαιρα εισέρχεται στον οργανισμό, εναποτίθεται και παραμένει εκεί για μεγάλο χρονικό διάστημα (συγκέντρωση - έκθεση - δόση - συσσωρευση). Οι μελέτες αυτές έχουν οδηγήσει στη δημιουργία μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης των παραπάνω μηχανισμών, όπως και το μοντέλο ExDoM2, πάνω στο οποίο θα στηριχτούμε στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή.

Στόχος της εργασίας αυτής ήταν η εφαρμογή και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων του μοντέλου ExDoM2 μέσω μιας εύχρηστης και αυτόνομης πλατφόρμας. Χρησιμοποιήθηκε Matlab για την διεπαφή εισαγωγής δεδομένων (GUI) και Java – HTML για την κατασκευή της διαδικτυακής διεπαφής παρουσίασης των αποτελεσμάτων (WEB-GUI) , στοχεύοντας σε ένα εύχρηστο και ενοποιημένο περιβάλλον παραμετροποίησης, εισαγωγής δεδομένων και προβολής των αποτελεσμάτων.

Το αποτέλεσμα της εργασίας ήταν η δημιουργία μίας φιλικής στον χρήστη, διεπαφής, η οποία επιτρέπει την εύκολη επιλογή των παραμέτρων και δεδομένων εισόδου για την εφαρμογή του μοντέλου μέσα από ένα εύκολα κατανοητό γραφικό περιβάλλον και την εξαγωγή – προβολή των αποτελεσμάτων σε μία διαδραστική διαδικτυακή διεπαφή, στην οποία ο χρήστης εύκολα μπορεί να προβάλει αλλά και να εξαγάγει τα αποτελέσματα στη επιθυμητή μορφή αρχείων. Το περιβάλλον εργασίας σχεδιάστηκε με βασικό κριτήριο την εύκολη λειτουργία σε επίπεδο χρήστη , την αυτονομία του καθώς επίσης και με βάση την αξιοποίηση, όσο ήταν δυνατό στη χρήση, λογισμικού ανοικτού κώδικα.

Μετά την ολοκλήρωσή της, η πλατφόρμα του ExDoM2, χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή του μοντέλου στο μετρό της Αθήνας, για εργαζόμενους και επιβάτες στις 2 γραμμές (μπλε και κόκκινη). Με το ExDoM2 υπολογίστηκε η εναπόθεση και η κατακράτηση  $PM_{10}$  σωματιδίων τόσο σε γυναίκες όσο και άντρες, εργαζόμενους και μεταφερόμενους. Η υψηλότερη δόση παρατηρήθηκε για τους άντρες που κινήθηκαν ή εργάστηκαν στην κόκκινη γραμμή.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η πλατφόρμα αυτή, μετά από συγκεκριμένες τροποποιήσεις θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για την εφαρμογή και άλλων μοντέλων που έχουν να κάνουν με την μελέτη των αιωρούμενων σωματιδίων και τις επιπτώσεις τους στην υγεία του ανθρώπου.

## Περιεχόμενα

Πίνακες .....	9
<b>1. Αιωρούμενα Σωματίδια .....</b>	<b>10</b>
1.1 Γενικά .....	10
1.2 Φυσικές ιδιότητες των σωματιδίων .....	11
1.2.1 Μέγεθος σωματιδίου .....	11
1.2.2 Σχήμα σωματιδίου .....	11
1.2.3 Πυκνότητα σωματιδίου .....	13
1.2.4 Συγκέντρωση σωματιδίων .....	13
1.3 Χημικές ιδιότητες των σωματιδίων .....	14
1.4 Χαρακτηριστικά των πηγών .....	14
1.5 Τα αιωρούμενα σωματίδια στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα .....	17
1.5.1 Ταξινόμηση των ΑΣ με βάση την συμπεριφορά τους .....	17
1.5.2 PM <sub>10</sub> .....	19
1.6 Έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια – Δόση .....	20
1.7 Επιπτώσεις των σωματιδίων στην υγεία του ανθρώπου .....	22
1.7.1 Κλάσματα σωματιδίων εισπνοής με βάση το διεθνές πρότυπο .....	22
1.7.2 Επιπτώσεις των σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό .....	23
<b>2. Το αναπνευστικό σύστημα .....</b>	<b>25</b>
2.1 Ανατομία του αναπνευστικού συστήματος .....	25
2.1.1 Ανώτερο αναπνευστικό σύστημα .....	28
2.1.2 Τραχειοβρογχική περιοχή .....	29
2.1.3 Περιοχή κυψελίδων .....	30
2.2 Παράμετροι φυσιολογίας .....	32
<b>3. Εναπόθεση σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα .....</b>	<b>34</b>
3.1 Γενικά .....	34
3.2 Μηχανισμοί εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό .....	34
3.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την εναπόθεση σωματιδίων στο αναπνευστικό .....	36
<b>4. Καθαρισμός σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα .....</b>	<b>38</b>
4.1 Γενικά .....	38
4.2 Μηχανισμοί απομάκρυνσης σωματιδίων από το ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα .....	39
4.3 Κινητική της απομάκρυνσης .....	40
<b>5. Το μοντέλο υπολογισμού ExDoM2 .....</b>	<b>41</b>
5.1 Γενικά .....	41

5.2	Περιγραφή του μοντέλου ExDoM2.....	42
5.3	Σύγκριση μοντέλου ExDoM και ExDoM2 .....	44
<b>6.</b>	<b>Σχεδίαση &amp; Λειτουργία Γραφικής Διεπαφής (GUI).....</b>	<b>51</b>
6.1	Δομή GUI πλατφόρμας .....	51
6.2	Λειτουργία και αξιολόγηση Συστήματος.....	51
6.3	Διεπαφή εισόδου δεδομένων – παραμετροποίησης μοντέλου .....	52
6.3.1	Γραφικό περιβάλλον εκκίνησης ExDoM2.....	52
6.3.2	Συγκέντρωση μάζας (mass concentration) .....	54
6.3.2.1	Διάρκεια έκθεσης (Exposure Duration).....	55
6.3.2.2	Φύλο και ηλικία εκτιθέμενου ατόμου (Gender & Age) .....	56
6.3.2.3	Τρόπος εισπνοής εκτιθέμενου ατόμου (Breathing Type) .....	59
6.3.2.4	Συγκέντρωση αιρούμενων σωματιδίων (Concentration type) .....	60
6.3.2.5	Πυκνότητα σωματιδίων και συντελεστής σχήματος (Particle density & Shape factor) .....	61
6.3.2.6	Χρονική διάρκεια υπολογισμού της διαδικασίας καθαρισμού .....	63
6.3.2.7	PM ή PM Bound-Metal .....	64
6.3.2.8	Υπολογισμός δόσης μετά την εφραμογή της διαδικασίας καθαρισμού. ....	66
6.3.2.9	Διαθεσιμότητα πειραματικών δεδομένων συγκέντρωσης μάζας σωματιδίων (Experimental data on mass available).....	69
6.3.2.10	Τρόπος εισαγωγής πειραματικών δεδομένων κατανομής μάζας σωματιδίων στο επισυναπτόμενο αρχείο (Experimental mass data xls file).....	71
	.....	73
6.3.2.11	Τρόπος εισαγωγής πειραματικών δεδομένων ωριαίας κατανομής μάζας σωματιδίων στο επισυναπτόμενο αρχείο HOURLY_SIZE_DISTRIBUTION.xls .....	74
6.3.2.12	Αρχείο Εισόδου (Input File) για mass concentration .....	77
6.3.3	Συγκέντρωση βάση των αριθμό σωματιδίων (number concentration).....	81
6.3.3.1	Φύλο και ηλικία εκτιθέμενου ατόμου (Gender & Age) .....	82
6.3.3.2	Τρόπος εισπνοής εκτιθέμενου ατόμου (Breathing Type) .....	84
6.3.3.3	Πυκνότητα σωματιδίων και συντελεστής σχήματος (Particle density & Shape factor) .....	84
6.3.3.4	Εισαγωγή χρονικού διαστήματος πειραματικών μετρήσεων (Time Interval of Measurements) .....	85
6.3.3.5	Αριθμός πλήθους διαμέτρων αποκοπής σωματιδίων (Particles Cut-off Diameter).....	86
6.3.3.6	Αριθμός πειραματικών μετρήσεων οργάνου (Number of Time Steps) .....	87
6.3.3.7	Αρχείο εισόδου (input file) για number concentration .....	88

6.4	Διεπαφή εξόδου αποτελεσμάτων ExDoM2.....	91
6.4.1	1 <sup>η</sup> Διεπαφή εξόδου.....	91
6.4.2	2η Διεπαφή εξόδου.....	91
6.4.3	3η Διεπαφή εξόδου.....	93
<b>7.</b>	<b>Εφαρμογή του ExDoM2 στο μετρό της Αθήνας.....</b>	<b>96</b>
7.1	Γενικά.....	96
7.2	Τα επίπεδα σωματιδιακής ύλης στα δίκτυα του Μετρό.....	96
7.3	Συσχέτιση της επίδρασης της λειτουργίας του μετρό στη δημόσια υγεία.....	99
7.4	Γενικά χαρακτηριστικά του μετρό στην Ελλάδα.....	99
7.5	Τεχνικά χαρακτηριστικά.....	101
7.6	Επιβατική κίνηση.....	102
7.7	Εφαρμογή του μοντέλου ExDoM2 στο μετρό της Αθήνας.....	103
7.7.1	Scenario-1: Ενήλικος ο οποίος χρησιμοποιεί το μετρό (μπλε & κόκκινη γραμμή) για 1 ώρα.....	105
7.7.2	Scenario-2: Ενήλικος εργαζόμενος του μετρό (μπλε & κόκκινη γραμμή) για 8-ώρο.....	106
7.7.3	Ανάλυση αποτελεσμάτων ExDoM2 μοντέλου.....	109
7.7.4	Το μετρό της Αθήνας σε σχέση με αυτό της Βαρκελώνης.....	110
<b>8.</b>	<b>Συμπεράσματα.....</b>	<b>112</b>
	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>113</b>
	Ελληνική Βιβλιογραφία.....	113
	Ξένη Βιβλιογραφία.....	113
	Ηλεκτρονικές διευθύνσεις.....	115

## Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1 - Κατηγορίες αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας (Λαζαρίδης,2010). ....	10
Εικόνα 2 -Στατιστική κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων (Λαζαρίδης,2010). ....	13
Εικόνα 3 - Ταξινόμηση των αιωρούμενων σωματιδίων σε εσπνεύσιμα, θωρακικά και αναπνεύσιμα βάσει της διαμέτρου τους. Το ποσοστό αφορά την διείσδυση σε κάθε περιοχή (Λαζαρίδης,2010). ....	17
Εικόνα 4 – Καμπύλες μεγέθους αποκοπής αιωρούμενων σωματιδίων.....	19
Εικόνα 5 - Σχηματική απεικόνιση της σειράς βημάτων που οδηγούν από την εκπομπή αέριων ρύπων σε πιθανές επιπτώσεις τους στην υγεία (Λαζαρίδης, 2010). ....	21
Εικόνα 6 - Ανατομία του αναπνευστικού συστήματος (ICRP,2015) .....	26
Εικόνα 7 - Απλό γεωμετρικό μοντέλο των πηγών και των στόχων που σχετίζονται με την δόση στους επιθηλιακούς ιστούς της βρογχικής και εκτός θώρακα περιοχής (ICRP, 1994). .....	27
Εικόνα 8 - Το ανώτερο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα .....	28

Εικόνα 9 - Το επιθήλιο στην περιοχή της τραχείας.....	29
Εικόνα 10 - Επιφάνεια τομής των κυψελίδων .....	30
Εικόνα 11 - Η κυψελιδική περιοχή των πνευμόνων (Λαζαρίδης 2010). ....	30
Εικόνα 12 - Σχέδιο της κυψελιδικής περιοχής των πνευμόνων.....	31
Εικόνα 13 Πρόσκρουση .....	34
Εικόνα 14 Καθίζηση.....	34
Εικόνα 15 - Διάχυση .....	35
Εικόνα 16 Ηλεκτροστατική Καθίζηση.....	35
Εικόνα 17 - Αναχαίτιση.....	35
Εικόνα 18 - Κυριότεροι μηχανισμοί εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα. ....	36
Εικόνα 19 - Ποσοστό εναπόθεσης σωματιδίων στις 5 περιοχές της αναπνευστικής οδού, σύμφωνα με ICRP 66. ....	37
Εικόνα 20 - Ποσοστό εναπόθεσης της εισπνεόμενης μάζας σωματιδίων διαμέτρου 1 $\mu\text{m}$ στις 5 περιοχές της αναπνευστικής οδού συναρτήσει της συμμετοχής της μύτης στην εισπνοή (ICRP-1994).....	38
Εικόνα 21 - Block διάγραμμα της διαδικασίας καθαρισμού από το αναπνευστικό σύστημα.....	42
Εικόνα 22 - Αναθεωρημένο μοντέλο μεταφοράς σωματιδίων από κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος (ICRP 2015). ....	44
Εικόνα 23 - Μεταφορά σωματιδίων μεταξύ των τμημάτων ET1 και ET2 στο νέο μοντέλο ICRP-2015 .....	45
Εικόνα 24 - Εναπόθεση ανά περιοχή, εισπνεόμενων σωματιδίων 5 $\mu\text{m}$ MAD, σε εκτιθέμενους εργαζόμενους που εκτελούν ελαφρά εργασία (ICRP-2015).....	46
Εικόνα 25 - Αντικατάσταση των τμημάτων $BB_1, BB_2$ & $bb_1, bb_2$ από τα $BB'$ & $bb'$ αντίστοιχα, σύμφωνα με το ανανεωμένο μοντέλο ICRP-2015, στην βρογχική περιοχή. ....	47
Εικόνα 26 - Αντικατάσταση των 3 τμημάτων AI1, AI2 και AI3 της περιοχής AI από το τμήμα ALV και προσθήκη τμήματος ενδιάμεσων ιστών INT .....	47
Εικόνα 27 - ICRP1994 vs ICRP2015 κύριες διαφοροποιήσεις .....	48
Εικόνα 28 - PBPK μοντέλο .....	49
Εικόνα 29 - Block διάγραμμα πλατφόρμας ExDoM2 .....	51
Εικόνα 30 - Γραφικό περιβάλλον εκκίνησης πλατφόρμας.....	52
Εικόνα 31 - Block διάγραμμα λειτουργίας GUI εισόδου.....	53
Εικόνα 32 - Mass Concentration αρχική οθόνη .....	54
Εικόνα 33 - Διάρκεια έκθεσης (Exposure Duration).....	55
Εικόνα 34 - Φύλο και ηλικία εκτιθέμενου ατόμου (Gender & Age) .....	56
Εικόνα 35 - Διαθέσιμες επιλογές εκτιθέμενου ατόμου με βάση το φύλο και την ηλικία.....	57
Εικόνα 36 - Τρόπος εισπνοής εκτιθέμενου ατόμου (Breathing Type).....	59
Εικόνα 37 - Διαθέσιμες επιλογές τύπου αναπνοής .....	60
Εικόνα 38 - Συγκέντρωση αιρούμενων σωματιδίων (Concentration type) .....	61
Εικόνα 39 - Πυκνότητα σωματιδίων και συντελεστής σχήματος (Particle density & Shape factor) .....	62
Εικόνα 40 - Χρονική διάρκεια υπολογισμού της διαδικασίας καθαρισμού .....	63
Εικόνα 41 - PM ή PM Bound-Metal .....	64
Εικόνα 42 - Διαθέσιμα μέταλλα για επιλογή .....	65
Εικόνα 43 - Υπολογισμός δόσης μετά την εφαρμογή της διαδικασίας καθαρισμού. ....	66
Εικόνα 44 - Εφαρμογή PBPK μοντέλου .....	67
Εικόνα 45 – Απορρόφηση στο αίμα (Blood Absorption Behavior) .....	67

Εικόνα 46 – – Απορρόφηση στο αίμα (Blood Absorption Behavior) .....	68
Εικόνα 47 - Μη διαθεσιμότητα PBPK μοντέλου για επιλογή PM σωματιδίων.....	69
Εικόνα 48 - Διαθεσιμότητα πειραματικών δεδομένων συγκέντρωσης μάζας σωματιδίων ..	69
Εικόνα 49 - Διαφορετικό περιβάλλον έκθεσης.....	70
Εικόνα 50 – Μενού επισύναψης αρχείου κατανομής μάζας σωματιδίων και εισαγωγή παραμέτρων του οργάνου μέτρησης ( επιλογή "NO"). .....	70
Εικόνα 51 - Μενού επισύναψης αρχείου ωριαίας κατανομής μάζας σωματιδίων (επιλογή "YES").....	71
Εικόνα 52 - Experimental Data on Mass panel.....	71
Εικόνα 53 - Οδηγίες εισαγωγής παραμέτρων : Experimental mass data xls file .....	72
Εικόνα 54 - Οδηγίες εισαγωγής παραμέτρων : Impactor stages – Fine particles cut-off point .....	73
Εικόνα 55 - Hourly Size Distribution File panel .....	74
Εικόνα 56 - Οδηγός συμπλήρωσης φύλλου "MEANCUTOFFS", του αρχείου "HOURLY_SIZE_DISTRIBUTION.xls" .....	75
Εικόνα 57 - Οδηγός συμπλήρωσης φύλλου "MASS_CONCENTRATION", του "HOURLY_SIZE_DISTRIBUTION.xls" .....	76
Εικόνα 58 - Αρχείο Εισόδου (Input File) για mass concentration .....	77
Εικόνα 59 - 1ο παράδειγμα συμπλήρωσης Input File.....	78
Εικόνα 60 - 2ο παράδειγμα συμπλήρωσης Input File.....	79
Εικόνα 61 - 2ο παράδειγμα συμπλήρωσης Input File.....	80
Εικόνα 62 - Number Concentration αρχική οθόνη.....	81
Εικόνα 63 - Φύλο και ηλικία εκτιθέμενου ατόμου (Gender & Age) .....	82
Εικόνα 64 - Διαθέσιμες επιλογές εκτιθέμενου ατόμου με βάση το φύλο και την ηλικία.....	83
Εικόνα 65 – Πεδίο : Χρονικό διάστημα επανάληψης μέτρησης (Time Interval of Measurements) .....	85
Εικόνα 66 - Πεδίο : Particles Cut-off Diameter.....	86
Εικόνα 67 - Πλήθος διαμέτρων σωματιδίων στο φύλλο εργασίας 'number concentration' .	86
Εικόνα 68 - Πεδίο : Number of Time Steps .....	87
Εικόνα 69 - Time Steps στο φύλλο εργασίας 'physical activity' .....	87
Εικόνα 70 -Αρχείο εισόδου (input file) για number concentration .....	88
Εικόνα 71 - Παράδειγμα συμπλήρωσης φύλλου εργασίας "physical activity" του Input File για number concentration .....	89
Εικόνα 72 - Παράδειγμα συμπλήρωσης φύλλου εργασίας "number concentration" του Input File για number concentration .....	90
Εικόνα 73 - 1η Διεπαφή Εξόδου για PM mass concentration χωρίς καθαρισμό.....	91
Εικόνα 74 - 2η Διεπαφή Εξόδου για PM mass concentration με καθαρισμό .....	92
Εικόνα 75 - 3η Διεπαφή εξόδου .....	93
Εικόνα 76 - Διαδραστική προβολή με fancy-box των τιμών δόση στα ανθρώπινα όργανα ..	94
Εικόνα 77 - Προβολή δεδομένων εισόδου στο ExDoM2 μέσω fancy-box.....	94
Εικόνα 78 - Απεικόνιση γραφικής παράστασης με χρήση fancy box.....	95
Εικόνα 79 - Δίκτυο Γραμμής-2 (κόκκινη) και Γραμμής-3 (μπλε) του μετρό της Αθήνας.....	100
Εικόνα 80 - Κατανομή επιβατικής κίνησης ανά σταθμό του μετρό Αθήνας .....	103
Εικόνα 81 - Εναπόθεση σωματιδίων στις περιοχές του HRTM, εντός του συρμού για 1 ώρα .....	105



Εικόνα 82 - Εναπόθεση σωματιδίων στις περιοχές του HRTM, εντός του συρμού για εργαζόμενο (8-ωρο) .....	106
Εικόνα 83 - Κατακράτηση σωματιδίων κατά τον καθαρισμό, στις διάφορες περιοχές του ICRP2015, 8ωρη ελαφριά εργασία εντός του συρμού .....	107
Εικόνα 84 - Ραβδόγραμμα : Κατακράτηση σωματιδίων κατά τον καθαρισμό, στις διάφορες περιοχές του ICRP2015, μετά από 8ώρες ελαφριά εργασία εντός του συρμού .....	108
Εικόνα 85 – PM <sub>2,5</sub> δόση στο HRTM, για 15λεπτη παραμονή εντός συρμού του μετρό της Βαρκελώνης (Vânia Martins, κ.ά, 2015). Περιοχές του HRT : ET- extrathoracic,TB – tracheobronchialandAI – alveolar–interstitial.....	111
Εικόνα 86 – PM <sub>2,5</sub> δόση στο HRTM, για 15λεπτη παραμονή εντός συρμού του μετρό της Αθήνας (Μετρήσεις - Μάμμη-Γαλάνη Έλενα). Περιοχές του HRT : ET- extrathoracic,TB – tracheobronchialandAI – alveolar–interstitial.....	111

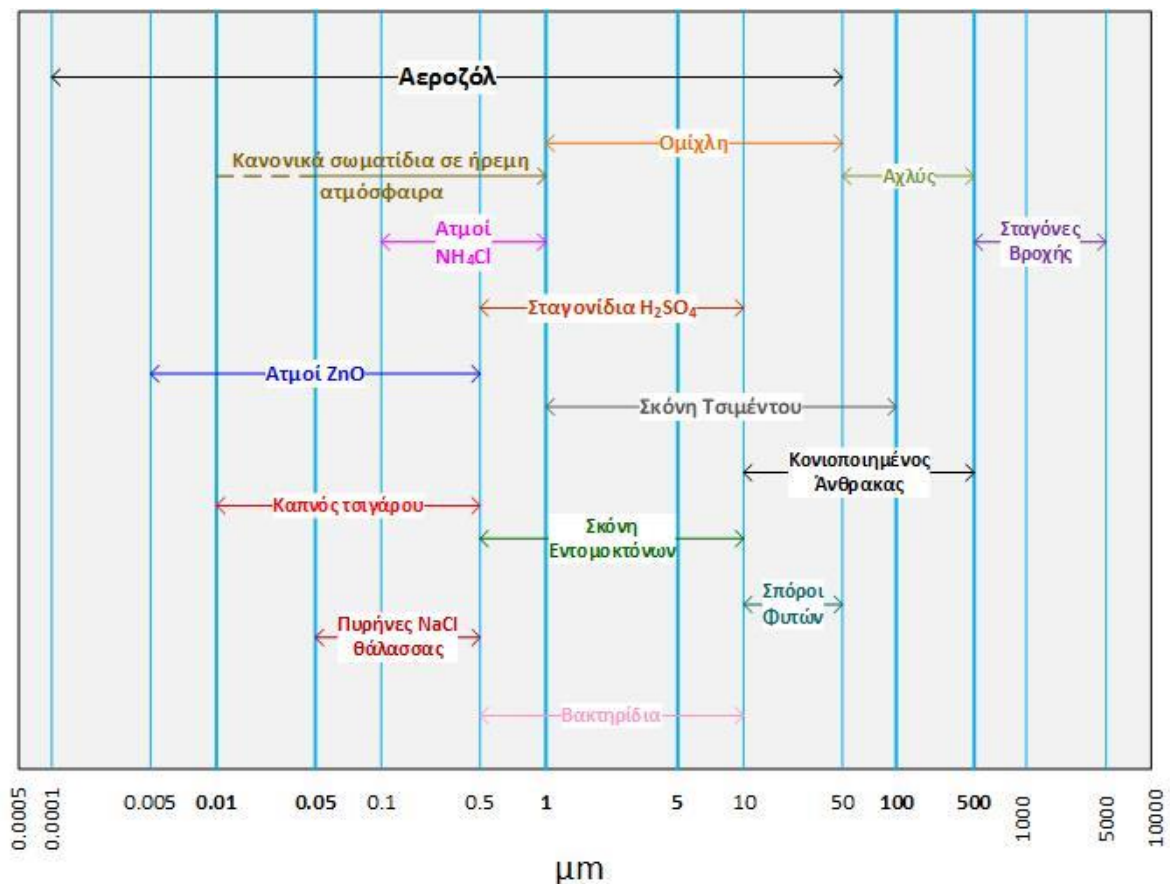
## Πίνακες

Πίνακας 1 - Πηγές Αιωρούμενων Σωματιδίων (Morawska και Salthammer, 2003).....	16
Πίνακας 2 - Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων ανατομίας και φυσιολογίας που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα (ICRP, 1994).....	33
Πίνακας 3 - Πίνακας ταχύτητας κίνησης του στρώματος βλέννας στην τραχειοβρογχική περιοχή του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος και αντίστοιχοι χρόνοι υποδιπλασιασμού (Lee κ.ά., 1979). .....	40
Πίνακας 4 - Κλάσμα ολικής ποσότητας αέρα που διέρχεται από το στόμα και την μύτη (ICRP-1994).....	60
Πίνακας 5 - Πίνακας πειραματικών δεδομένων οργάνου μέτρησης.....	72
Πίνακας 6 - Πίνακας πειραματικών δεδομένων οργάνου μέτρησης.....	74
Πίνακας 7 - Επίπεδα PM <sub>10</sub> (μέση τιμή & εύρος) σε µg/m <sup>3</sup> για διαφορετικά συστήματα μετρό ανά τον κόσμο .....	97
Πίνακας 8 - Επίπεδα PM <sub>2,5</sub> (μέση τιμή & εύρος) σε µg/m <sup>3</sup> για διαφορετικά συστήματα μετρό ανά τον κόσμο .....	97
Πίνακας 9 - Γενικές πληροφορίες & τεχνικά χαρακτηριστικά συρμών μετρό Αθήνας.....	101
Πίνακας 10 - Ποσοστά επιβιβάσεων ανά σταθμό και για τις δύο γραμμές του μετρό για το έτος 2009 (www.amel.gr).....	102
Πίνακας 11 - Μέση τιμή συγκέντρωσης PM10 σωματιδίων στην μπλε και κόκκινη γραμμή του μετρό της Αθήνας, εντός συρμού, σύμφωνα με μετρήσεις που έγιναν από την Μάμμη-Γαλάνη Έλενα (2014). .....	104
Πίνακας 12 - Παραμετροποίηση του ExDoM2 για το μετρό της Αθήνας .....	104

# 1. Αιωρούμενα Σωματίδια

## 1.1 Γενικά

Τα αιωρούμενα σωματίδια (ΑΣ) ή αλλιώς αεροζόλ είναι μικρά, σωματίδια, στερεάς ή υγρής μορφής τα οποία παραμένουν αιωρούμενα στο μέσο μεταφοράς και εκπέμπονται ή σχηματίζονται δευτερογενώς μέσα στην ατμόσφαιρα. Η σωματιδιακή αυτή ύλη στην ατμόσφαιρα αποτελείται από ένα μίγμα στερεών σωματιδίων και σταγόνων που ποικίλλουν σε συγκέντρωση καθώς και στα φυσικά, χημικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά τους. Τα σωματίδια είναι πιθανό να αποτελούν προϊόντα καύσης, αιώρησης εδαφικού υλικού, εκπομπής από τη θάλασσα ή να παράγονται δευτερογενώς μέσω χημικών αντιδράσεων στην ατμόσφαιρα (Λαζαρίδης 2010 ;Morawska κ.ά., 1999; EPA, 2002; Κουιμτζής κ.ά., 1998). Μπορούν να δράσουν ως μεταφορείς για χημικά στοιχεία και ενώσεις καθώς και για βιολογικούς ρυπαντές που απορροφώνται ή προσκολλώνται πάνω τους. Τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων ποικίλλουν βάσει του τρόπου παραγωγής τους και των φυσικοχημικών διεργασιών που επιδρούν σε αυτά στην ατμόσφαιρα. Στην Εικόνα 1 δίνονται οι κατηγορίες των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα βάσει της προέλευσης και σύστασης τους αναφορικά προς το μέγεθος τους.



Εικόνα 1 - Κατηγορίες αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας (Λαζαρίδης,2010).

Η συμπεριφορά των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα σχετίζεται άμεσα με τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά τους. Οι σημαντικότερες φυσικές ιδιότητες των σωματιδίων είναι το μέγεθος, η μάζα, το πλήθος και η επιφάνεια τους, καθώς και οι κατανομές αυτών συναρτήσει του μεγέθους, το σχήμα, η πτητικότητα, διαλυτότητα, υγροσκοπικότητα και το ηλεκτρικό τους φορτίο (Schwela κ.ά., 2002). Όλες οι παραπάνω επηρεάζουν την εναπόθεση και μεταφορά των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα. Από την άλλη μεριά, η χημική σύσταση των σωματιδίων σχετίζεται κυρίως με τις επιπτώσεις που έχει στον οργανισμό και διακρίνεται στη στοιχειακή, ανόργανη και οργανική σύσταση τους (Schwela κ.ά., 2002; EPA, 2002). Η χημική σύσταση χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της πηγής από την οποία προέρχονται τα σωματίδια (Κουμπτζής, 1998).

## 1.2 Φυσικές ιδιότητες των σωματιδίων

Οι φυσικές ιδιότητες των σωματιδίων παίζουν καθοριστικό ρόλο στην επίδραση της συμπεριφοράς τους στο αναπνευστικό σύστημα. Τα πιο σημαντικά φυσικά χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων είναι :

### 1.2.1 Μέγεθος σωματιδίου

Το μέγεθος του σωματιδίου αποτελεί την πιο σημαντική παράμετρο για τον χαρακτηρισμό της συμπεριφοράς του. Όλες οι ιδιότητες των σωματιδίων εξαρτώνται από το μέγεθος τους, μερικές σε πολύ μεγάλο βαθμό. Το εύρος του μεγέθους των σωματιδίων είναι πολύ μεγάλο και μπορεί να κυμαίνεται από μερικά νανόμετρα (nm) έως αρκετές δεκάδες μικρόμετρα ( $\mu\text{m}$ ). Το μέγεθος των αεροζόλ δεν χαρακτηρίζει απλά τις ιδιότητες του, αλλά, πολλές φορές η φύση των νόμων που διέπουν τα σωματίδια αλλάζει με το μέγεθος. Αυτό δείχνει το μέγεθος της συμβολής του μεγέθους του αεροζόλ στις ιδιότητες του καθώς και την αναγκαιότητα μελέτης του.

### 1.2.2 Σχήμα σωματιδίου

Το σχήμα των υγρών αεροζόλ είναι συνήθως σφαιρικό. Για σφαιρικό σωματίδιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί η φυσική διάμετρος του. Αντίθετα, τα στερεά αεροζόλ έχουν συνήθως περίπλοκα σχήματα. Έτσι, σωματίδια που σχηματίζονται ύστερα από κρούσεις έχουν ακανόνιστα σχήματα, ενώ, κάποια κρυσταλλικά σωματίδια εμφανίζουν γεωμετρικά σχήματα. Κατά την ανάπτυξη της θεωρίας των αεροζόλ είναι αναγκαίο να θεωρηθεί ότι τα σωματίδια έχουν σφαιρικό σχήμα. Για την εφαρμογή αυτών των θεωριών συνήθως χρησιμοποιούνται παράγοντες διόρθωσης, όπως η ισοδύναμη διάμετρος, για το χαρακτηρισμό των μη σφαιρικών σωματιδίων. Ως ισοδύναμη διάμετρος ορίζεται η διάμετρος ενός σφαιρικού σωματιδίου που έχει τις ίδιες ιδιότητες και χαρακτηριστικά με ένα μη σφαιρικό σωματίδιο ίδιου όγκου.

Ένας ακόμα όρος που χρησιμοποιείται συχνά στην περιγραφή του μεγέθους των σωματιδίων ενός αεροζόλ είναι η ισοδύναμη αεροδυναμική διάμετρος που εκφράζει το μέγεθος τους με ομοιόμορφο τρόπο. Πρόκειται για τη διάμετρο μιας σφαίρας με πυκνότητα  $1\text{g/cm}^3$  που έχει την ίδια ταχύτητα καθίζησης με το σωματίδιο υπό εξέταση. Η αεροδυναμική διάμετρος είναι μια πολύ χρήσιμη παράμετρος, επειδή σχετίζεται με το χρόνο παραμονής των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, καθώς και με την απόθεση τους στο αναπνευστικό σύστημα (EPA, 2002). Υπολογίζεται σε σχέση με την ισοδύναμη κατά όγκο διάμετρο από την εξίσωση (1):

$$d_{ae} = d_e \sqrt{\frac{\rho}{\chi\rho_0} \frac{C(d_e)}{C(d_{ae})}} \quad (1)$$

όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα του σωματιδίου ενώ  $\rho_0 = 1\text{ g/m}^3$ . Ακόμα, ο όρος  $\chi$  σχετίζεται με το σχήμα του σωματιδίου και το πεδίο τιμών του είναι μεταξύ 1 (σφαίρα) και 2 (Hinds, 1999). Οι όροι  $C(d_e)$  και  $C(d_{ae})$  εκφράζουν ένα παράγοντα γνωστό ως συντελεστή διόρθωσης Cunningham που εκφράζει την απόκλιση της οπισθέλκουσας δύναμης από τον νόμο του Stokes και δίνεται π.χ. για την ισοδύναμη διάμετρο κατά όγκο από την εξίσωση (2) (Seinfeld και Pandis, 1998):

$$C(d_e) = 1 + \left(\frac{\lambda}{d_e}\right) \left[2,514 + 0,8e^{-0,55\left(\frac{d_e}{\lambda}\right)}\right] \quad (2)$$

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

Τα σωματίδια διαμέτρου μικρότερης των  $0,5\text{ }\mu\text{m}$  περιγράφονται καλύτερα από το θερμοδυναμικά ισοδύναμο μέγεθος τους ( $d_{th}$ ) που είναι η διάμετρος ενός σφαιρικού σωματιδίου που έχει τον ίδιο συντελεστή διάχυσης με το σωματίδιο υπό εξέταση. Η ισοδύναμη θερμοδυναμική διάμετρος μπορεί να υπολογιστεί βάσει των παραμέτρων που καθορίζουν την διάχυση του σωματιδίου με την εξίσωση (3):

$$d_{th} = \frac{kTC(d_e)}{3\pi\mu D} \quad (3)$$

όπου  $D$  είναι ο συντελεστής διάχυσης ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ),  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία ( $310,15\text{ K}$ ),  $k$  η σταθερά του Boltzmann ( $0,013622779 \times 10^{-23}$ ) και  $\mu$  το δυναμικό ιξώδες του αέρα ( $1,90 \times 10^{-4}\text{ Poise}$ ). Ακόμα σχετίζεται με την ισοδύναμη αεροδυναμική διάμετρο του σωματιδίου με την σχέση (4):

$$d_{th} = d_{ae} \sqrt{\frac{\chi\rho_0}{\rho} * \frac{C(d_e)}{C(d_{ae})}} \quad (4)$$

Οι παραπάνω εκφράσεις του μεγέθους των σωματιδίων καθώς και οι σχέσεις που τις συνδέουν θα χρησιμοποιηθούν στα επόμενα κεφάλαια για την μελέτη της εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα.

Τα σωματίδια ταξινομούνται σε μεγάλα και μικρά (ή ως χονδρά και λεπτά) συναρτήσει της διαμέτρου τους. Ιδιαίτερα όσο αφορά την ποιότητα του αέρα διακρίνονται στα  $\text{PM}_{2,5}$  και  $\text{PM}_{10}$  (EPA, 2002). Μικρά (fine) θεωρούνται τα  $\text{PM}_{2,5}$ , δηλαδή τα σωματίδια αεροδυναμικής διαμέτρου μικρότερης των  $2,5\mu\text{m}$  ενώ μεγάλα (coarse) η διαφορά  $\text{PM}_{10} - \text{PM}_{2,5}$  (Schwela κ.ά.,

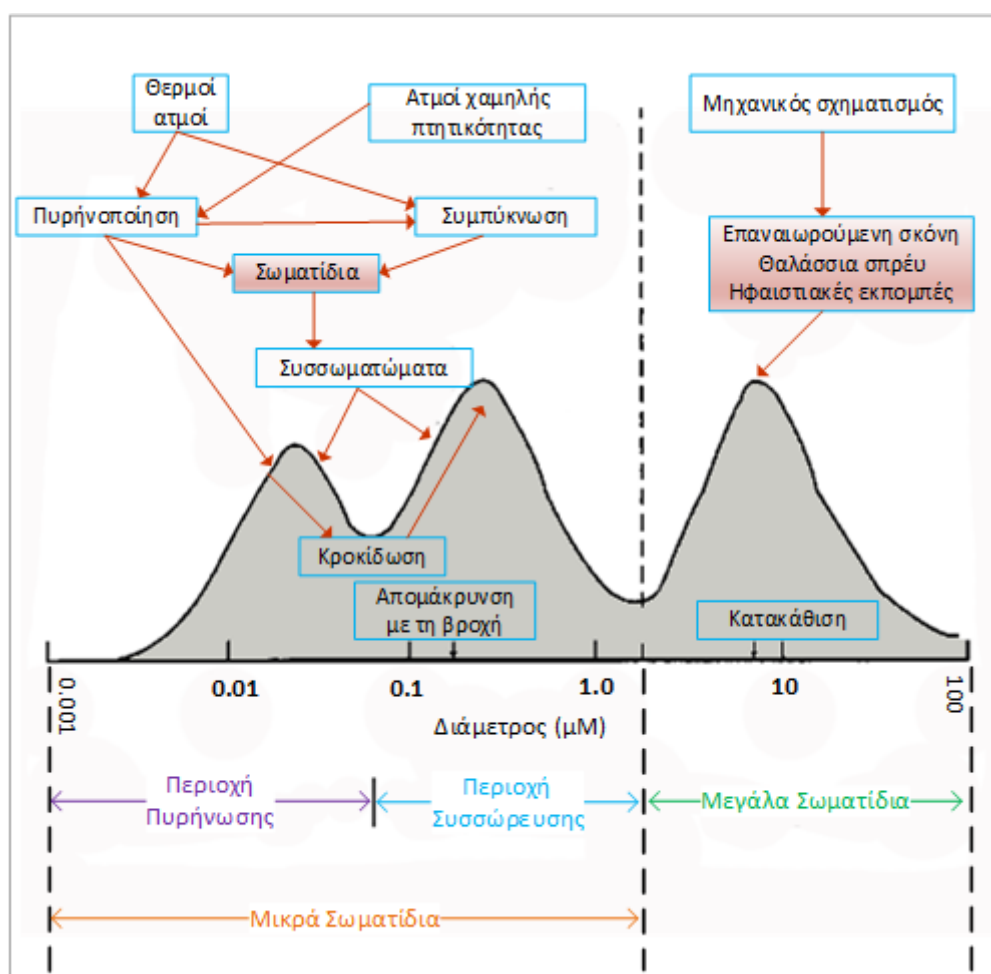
2002). Τα μικρά διακρίνονται σε σωματίδια διαμέτρου πυρήνα ή πολύ μικρά σωματίδια ( $<0,2\mu\text{m}$ ) και σε συσσωματώματα ( $0,2-2,5\mu\text{m}$ ).

### 1.2.3 Πυκνότητα σωματιδίου

Ως πυκνότητα σωματιδίου ορίζεται ο λόγος της μάζας ανά μονάδα όγκου του σωματιδίου. Συνήθως εκφράζεται σε  $\text{kg}/\text{m}^3$  ή σε  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Τα υγρά σωματίδια, αυτά που έχουν προέλθει από το έδαφος ή από θρύμματα θεωρούνται ότι έχουν την ίδια πυκνότητα όπως η μητρική τους προέλευση. Σωματίδια τα οποία προέρχονται από καπνούς ή καυσαέρια έχουν φαινόμενες πυκνότητες αρκετά μικρότερες από αυτές που υπολογίζονται με βάση τη χημική τους σύσταση. Αυτό οφείλεται στα μεγάλα κενά που υπάρχουν στη δομή τους. Η πυκνότητα των ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων κυμαίνεται από  $1,3$  έως  $1,8\text{g}/\text{cm}^3$  με μέση τιμή  $1,5\text{g}/\text{cm}^3$  (Zhang κ.ά., 2005).

### 1.2.4 Συγκέντρωση σωματιδίων

Η συγκέντρωση του αεροζόλ ορίζεται ως η συγκέντρωση μάζας (mass concentration) η οποία αναφέρεται στη μάζα των σωματιδίων ανά μονάδα όγκου του μίγματος. Ως μονάδες, συνήθως, χρησιμοποιούνται οι  $\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\text{mgr}/\text{m}^3$  και  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Μια άλλη συχνή μονάδα μέτρησης της συγκέντρωσης των αεροζόλ είναι η συγκέντρωση με βάση τον αριθμό (number



Εικόνα 2 -Στατιστική κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων (Λαζαρίδης,2010).

concentration) η οποία αναφέρεται στον αριθμό των σωματιδίων ανά μονάδα όγκου του μίγματος. Εκφράζεται με  $\#/m^3$  ή  $\#/cm^3$  και συνήθως χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των βιοαεροζόλ ή των λεπτόκοκκων σωματιδίων.

Η μάζα και το πλήθος των σωματιδίων εκφράζουν την συγκέντρωση τους στην ατμόσφαιρα και επομένως καθορίζουν την δόση τους στο αναπνευστικό. Τα περισσότερα αεροζόλ στη φύση και σε περιβάλλοντα εργασίας είναι πολυδιάσπορα δηλαδή τα σωματίδια που τα απαρτίζουν ποικίλουν σε διαστάσεις. Έτσι η μάζα και το πλήθος των σωματιδίων αλλά και η επιφάνεια και ο όγκος τους εκφράζονται με κατανομές συναρτήσεως του μεγέθους των σωματιδίων (Εικόνα 2).

### 1.3 Χημικές ιδιότητες των σωματιδίων

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

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

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

Τέλος, το ενδιαφέρον για τη στοιχειακή σύσταση ανακύπτει από τις δυνητικές επιπτώσεις στην υγεία των βαρέων στοιχείων όπως ο μόλυβδος, το αρσενικό, ο υδράργυρος και το κάδμιο και από την πιθανότητα της χρήσης των στοιχείων ως ιχνηλάτες της πηγής των σωματιδίων. Υδατοδιαλυτά ιόντα όπως του καλίου, του νατρίου, τα φωσφορικά, τα θειώδη, τα αμμωνιακά και τα νιτρικά συνδέονται με το νερό στο εσωτερικό περιβάλλον και μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και για την κατανομή των πηγών (Morawska και Salthammer, 2003).

### 1.4 Χαρακτηριστικά των πηγών

Ένας από τους στόχους της μελέτης των φυσικών και χημικών χαρακτηριστικών των αιωρούμενων σωματιδίων είναι και ο προσδιορισμός των πηγών τους. Το να είμαστε σε

θέση να εντοπίσουμε τις πηγές των αιωρούμενων σωματιδίων είναι πολύ σημαντικό λόγω των δυσμενών επιπτώσεων τους στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον. Οι φυσικές και οι χημικές ιδιότητες των σωματιδίων αποτελούν χαρακτηριστικά των πηγών και διαφέρουν ανάλογα με τη πηγή προέλευσης τους.

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

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

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

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

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

(Morawska και Salthammer, 2003)

Παρόλα αυτά, εμφανίζεται μεγάλη πολυπλοκότητα όσο αφορά την κατανομή των σωματιδίων από τις διάφορες πηγές. Αυτό συμβαίνει διότι στην ατμόσφαιρα απαντάται ένα μείγμα ρύπων από πολλές και διαφορετικές πηγές, το οποίο υποβάλλεται σε συνεχείς αλλαγές κατά το πέρασμα του χρόνου από διάφορους μηχανισμούς. Η ύπαρξη τέτοιων μηχανισμών, όπως η βαρυτική εναπόθεση των σωματιδίων, υποβάλει το έργο του

εντοπισμού των πηγών σε περισσότερες δυσκολίες. Τέλος είναι σπάνιο συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων να είναι μοναδικά για μία και μόνο πηγή.

Στους εσωτερικούς χώρους τα ΑΣ έχουν ιδιαίτερη σημασία για τους ενοίκους αυτών. Συνήθως τα ΑΣ στους εσωτερικούς χώρους προέρχονται από ατμοσφαιρικά σωματίδια τα οποία εισχωρούν στο εσωτερικό των κτιρίων και παραμένουν αιωρούμενα μέσα στον αέρα, από σωματίδια που εκπέμπονται στο εσωτερικό των κτιρίων, ενώ έχει παρατηρηθεί και η δημιουργία ΑΣ μέσω χημικών αντιδράσεων αέριων ενώσεων που προϋπάρχουν στους εσωτερικούς χώρους. Πηγές αιωρούμενων σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους οικιών μπορούν να θεωρηθούν πολλές καθημερινές δραστηριότητες, όπως το κάπνισμα, το μαγείρεμα, οι σόμπες αερίου, το σκούπισμα ή το πλύσιμο των πιάτων. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται πηγές αιωρούμενων σωματιδίων τόσο σε εσωτερικούς χώρους όσο και σε εξωτερικούς οι οποίες διαχωρίζονται σε φυσικές και ανθρωπογενείς (Πίνακας 1).

**Πίνακας 1 - Πηγές Αιωρούμενων Σωματιδίων (Morawska και Salthammer, 2003)**

<b><u>Φυσικές Εξωτερικές Πηγές</u></b>	<b><u>Πηγές Εσωτερικών Χώρων</u></b>
Υπολείμματα εδάφους και πετρωμάτων	Χρήστες των κτιρίων (δέρμα, μαλλιά κ.α.)
Δασικές πυρκαγιές (συνδυασμός καπνού και σκόνης)	Φυτά και κατοικίδια
Θαλασσινό αλάτι	Μαγείρεμα
Ηφαιστειακά κατάλοιπα (σκόνη και καπνός που εκτοξεύονται ψηλά στην ατμόσφαιρα)	Δομικά υλικά, ειδικά ίνες ορυκτών υλικών
	Κάπνισμα
<b><u>Ανθρωπογενείς Εξωτερικές Πηγές</u></b>	Άλλες καύσεις
Καύσεις υγρών καυσίμων και βιομηχανικές διεργασίες	Υλικά συντήρησης
Διαφεύγουσες εκπομπές της βιομηχανίας (διάβρωση αποθηκευτικών δοχείων, χωματόδρομοι, χρήση εργαλείων και μηχανημάτων)	Λοιπές Δραστηριότητες (καθάρισμα, χειροτεχνίες κλπ.)
Μη βιομηχανικές διαφεύγουσες εκπομπές (παρασυρόμενη σκόνη από δρόμους, γεωργικές εργασίες και κατασκευές)	
Μεταφορές	

Σημαντικά επίσης είναι και τα αιωρούμενα σωματίδια που απελευθερώνονται στο εργασιακό περιβάλλον με αποτέλεσμα να τα εισπνέουν οι εργαζόμενοι. Το ενδιαφέρον εντοπίζεται στο ότι μεγάλος αριθμός ανθρώπων εργάζεται είτε σε γραφεία, είτε σε



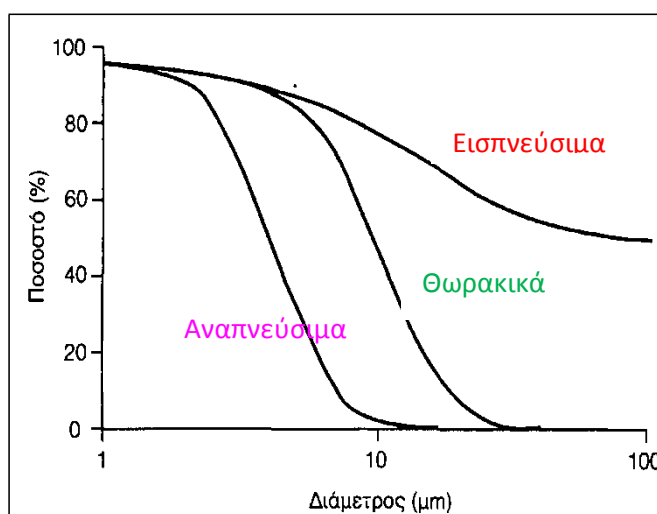
εργοστάσια, είτε στους αγρούς με αποτέλεσμα να δέχονται την επίδραση των ΑΣ στον οργανισμό τους. Εξαρτώμενα από τοπικούς παράγοντες όπως η διαρρύθμιση του εργασιακού χώρου, οι διεργασίες που συντελούνται και ο εξαερισμός, τα σωματίδια στα οποία εκτίθενται οι εργαζόμενοι ενδέχεται να είναι πολύ πρόσφατα εκπεμπόμενα, συνηθέστερα όχι πάνω από μερικά λεπτά της ώρας (Abt κ.ά., 2000, James κ.ά., 2000).

Τέλος, ένα ξεχωριστό πεδίο μελέτης αποτελούν τα βιομηχανικά αεροζόλ τα οποία καθορίζονται από τον τύπο της βιομηχανίας, τις διεργασίες που συντελούνται σε αυτήν και τη φύση του προϊόντος. Στο εσωτερικό μιας βιομηχανίας αεροζόλ παράγονται κατά τις δραστηριότητες επεξεργασίας. Για παράδειγμα η συγκόλληση παράγει αναθυμιάσεις, αλυσίδες συσσωμάτωσης πολύ λεπτών σωματιδίων. Μηχανικές διεργασίες όπως το τρόχισμα ή το φινίρισμα μιας επιφάνειας παράγουν αδρά σωματίδια. Ακόμη η ρύπανση από ΑΣ μπορεί να οφείλεται και σε αστοχία υλικών ή κατασκευών που προορίζονται να προστατεύουν από αυτά τους εργαζόμενους καθώς και τους χώρους που αυτοί κινούνται (Baron και Willeke, 2005; SCENIHR, 2006).

## 1.5 Τα αιωρούμενα σωματίδια στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα

### 1.5.1 Ταξινόμηση των ΑΣ με βάση την συμπεριφορά τους

Τα αιωρούμενα σωματίδια διακρίνονται σε **εισπνεύσιμα**, **θωρακικά** και **αναπνεύσιμα** βάσει της ικανότητας τους να διεισδύσουν στις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος. Αναλυτικότερα, **εισπνεύσιμα** χαρακτηρίζονται τα σωματίδια που μπορούν να εισέλθουν και αποθέτονται στο τμήμα του αναπνευστικού συστήματος της περιοχής του κεφαλιού. **Θωρακικά** είναι τα σωματίδια που διασχίζουν τον λάρυγγα και τους πνεύμονες. Τέλος τα **αναπνεύσιμα** σωματίδια είναι το μέρος των θωρακικών που φθάνει στην περιοχή όπου πραγματοποιείται η ανταλλαγή των αερίων. Οι ορισμοί αυτοί χρησιμοποιούνται για πρακτικούς σκοπούς και η αντιστοίχηση τους σε διαμέτρους σωματιδίων, όπως υιοθετήθηκε από τον διεθνή οργανισμό πιστοποίησης ISO (EPA,2002), δίνεται στο διάγραμμα



Εικόνα 3 - Ταξινόμηση των αιωρούμενων σωματιδίων σε εισπνεύσιμα, θωρακικά και αναπνεύσιμα βάσει της διαμέτρου τους. Το ποσοστό αφορά την διείσδυση σε κάθε περιοχή (Λαζαρίδης,2010).

της Εικόνας 3. Η αντίστοιχη καμπύλη για τα  $PM_{10}$  συμπίπτει σχεδόν με αυτή των θωρακικών ενώ για τα  $PM_{2,5}$  βρίσκεται πιο αριστερά στο διάγραμμα από αυτή των αναπνεύσιμων (EPA, 2002).

Σύμφωνα με τα παραπάνω ορίζεται ως «εισπνευσιμότητα» το ποσοστό των σωματιδίων μιας συγκεκριμένης αεροδυναμικής διαμέτρου που είναι δυνατόν να εισέλθουν στο αναπνευστικό σύστημα μέσω της αναπνοής από τη μύτη ή το στόμα σε σχέση με την ποσότητα (πλήθος ή μάζα) τους στον περιβάλλοντα αέρα. Είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται στον καθορισμό της εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα. Η εισπνευσιμότητα,  $n_0$ , έχει βρεθεί πως εξαρτάται πέρα από το μέγεθος των σωματιδίων και από την ταχύτητα του ανέμου ( $U$ ) και μπορεί να εκτιμηθεί με την παρακάτω εξίσωση για σωματίδια έως  $100\mu m$  και ταχύτητες ανέμου μεταξύ 1 και 9 m/s (ICRP-1994):

$$n_0 = 1 - 0,5 \left[ 1 - (7,6 \times 10^{-4} d_{ae}^{2,8} + 1)^{-1} \right] + 10^{-5} U^{2,75} e^{(0,55 d_{ae})} \quad (5)$$

Αν και σε εξωτερικούς χώρους πολλές φορές η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να ξεπεράσει τα 9 m/s, στο εσωτερικό κτιρίων δεν ξεπερνά συνήθως τα 0,5 m/s (Kennedy κ.ά., 2002). Έχει βρεθεί μάλιστα πως σε ταχύτητα ανέμου μικρότερης του 0,1 m/s το κλάσμα των σωματιδίων που τελικά εισέρχεται στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου είναι μεγαλύτερο απ' ό,τι σε ταχύτητα 1 m/s (Aitken κ.ά., 1999)

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

$$n_0 = 1 - \left[ 1 - e^{(13,56 + 0,4343 \log(d_{ae}))^{-4,88}} \right]^{-1} \quad (6)$$

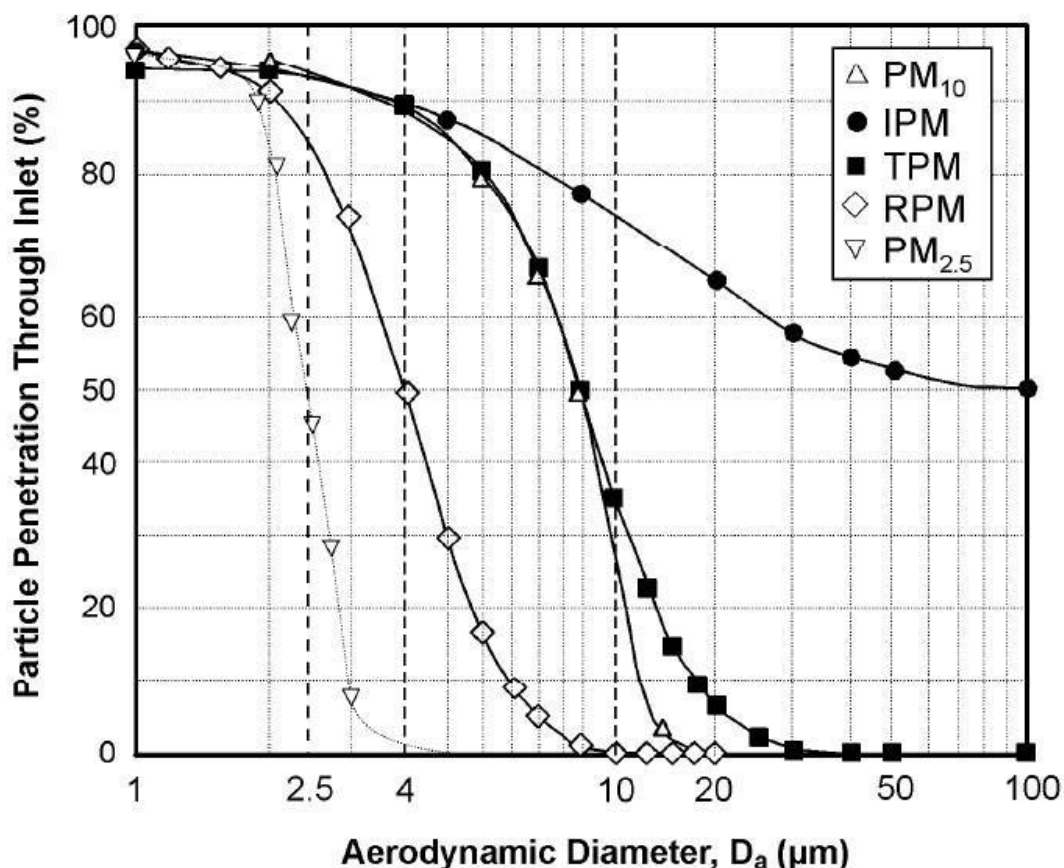
Τέλος για εισπνοή από το στόμα σε ταχύτητες ανέμου μικρότερες από 1m/s χρησιμοποιείται η εξίσωση (Brown,2005):

$$n_0 = (1 + 0,44) \left[ 1 + 0,44 e^{(0,0195 d_{ae})} \right]^{-1} \quad (7)$$

Αυτό που γενικά ισχύει είναι ότι τα  $PM_{10}$  εισέρχονται σε μεγάλο ποσοστό στο αναπνευστικό σύστημα ενώ μεγαλύτερα σωματίδια φιλτράρονται σε ποσοστό έως και 50%. Ακόμα έχει βρεθεί πως η εισπνευσιμότητα εξαρτάται από τον τρόπο αναπνοής, δηλαδή από την αναπνοή μέσω μύτης ή στόματος και από την διεύθυνση του στόματος του ατόμου σε σχέση με αυτή του ανέμου.

### 1.5.2 PM<sub>10</sub>

Το κλάσμα PM<sub>10</sub> είναι ένα κλάσμα ΑΣ στο οποίο εντοπίζονται αυτά τα σωματίδια τα οποία έχουν τη δυνατότητα να εισχωρήσουν στη θωρακική περιοχή του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος (Vincent, 1981; Proctor κ.ά., 2004). Τα PM<sub>10</sub>, όπως ορίζονται από την Environmental Protection Agency (EPA), αναφέρονται στα σωματίδια που συλλέγονται από δειγματολήπτες με ένα ανώτερο σημείο διαχωρισμού των 10μm. Οι μετρητές που καταγράφουν σωματίδια αυτού του μεγέθους βασίζουν τη δειγματοληψία τους στην αεροδυναμική διάμετρο και μια σχετικά απότομη καμπύλη εισχώρησης.



Εικόνα 4 – Καμπύλες μεγέθους αποκοπής αιωρούμενων σωματιδίων.

Καθορισμένη σωματιδιακή διείσδυση με βάση πέντε διαφορετικά κριτήρια δειγματοληψίας αναφορικά με το μέγεθος. Στις καμπύλες σωματιδιακής διείσδυσης τα εσπνεύσιμα ΑΣ (IPM), θωρακικά ΑΣ (TPM) και αναπνεύσιμα ΑΣ (RPM) είναι σύμφωνα με τους ορισμούς των American Conference of Governmental and Industrial Hygienists (1994) (EPA, 2004).

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως τα σωματίδια κατηγοριοποιούνται σε εσπνεύσιμα, θωρακικά και αναπνεύσιμα σωματίδια σύμφωνα με το άνω όριο μεγέθους τους (upper size cut). Τα εσπνεύσιμα σωματίδια IPM (Inspirable Particle Mass) εισέρχονται στον αναπνευστικό σωλήνα ξεκινώντας με τους αεραγωγούς της κεφαλής. Τα θωρακικά σωματίδια TPM (Thoracic Particle Mass) προχωρούν δια μέσω του λάρυγγα και φθάνουν στους πνευμονικούς αεραγωγούς και την περιοχή ανταλλαγής αερίων του πνεύμονα. Τα αναπνεύσιμα σωματίδια RPM (Respirable Particle Mass) αποτελούν ένα υποσύνολο των

θωρακικών που έχει περισσότερες πιθανότητες να φθάσει την περιοχή ανταλλαγής αερίων του πνεύμονα. Οι καμπύλες που ορίζουν τα IPM, TPM και RPM φαίνονται στην Εικόνα 4.

Θα μπορούσαμε να πούμε ότι τα  $PM_{10}$  είναι ένας καλός δείκτης για τα θωρακικά σωματίδια (TPM). Καθώς φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα οι καμπύλες για τις δύο αυτές παράμετρους έχουν το ίδιο σημείο αποκοπής (cut point) για το 50% του κλάσματος. Αυτό μεταφράζεται ως σημείο συλλογής του 50% των σωματιδίων κάτω ή εντός ενός αεροδυναμικού εύρους μεγέθους. Παρόλαυτα η καμπύλη για το θωρακικό κλάσμα δεν έχει την ίδια απότομη κλίση με αυτήν για το κλάσμα των  $PM_{10}$  και επομένως το πρώτο περιέχει κάποια σωματίδια διαμέτρου μεταξύ 10 και 30 $\mu m$  που εξαιρούνται από το δεύτερο.

Η επιλογή των  $PM_{10}$  ως δείκτη βασίστηκε σε λόγους που αφορούν την υγεία και είχε σκοπό την στροφή του επιστημονικού ενδιαφέροντος σε αυτά τα σωματίδια που είναι αρκετά μικρά ώστε να φθάσουν στη θωρακική περιοχή του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος. Ο ορισμός των  $PM_{10}$  ως δείκτη για τα θωρακικά σωματίδια είναι ένας συμβιβασμός που έγινε μεταξύ της επιθυμίας για συλλογή όλων των σωματιδίων που μπορεί να μπουν στη θωρακική περιοχή και της ανάγκης για σχεδίαση ενός οργάνου του οποίου η δειγματοληψία να είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος του σωματιδίου ή την ταχύτητα του αέρα. Το πλεονέκτημα που ανακύπτει από τη διαφορά που παρατηρήθηκε παραπάνω μεταξύ των δύο καμπυλών είναι ο περιορισμός του προβλήματος της πεπερασμένης απόδοσης συλλογής όπως αυτή καθορίζεται από την καμπύλη για τη θωρακική διείσδυση για σωματίδια μεγαλύτερα από την αεροδυναμική διάμετρο των 10 $\mu m$  (EPA, 2004).

Τα  $PM_{10}$  αποτελούν κίνδυνο υγείας εφόσον εισπνευστούν και εναποτεθούν στους ανθρώπινους πνεύμονες. Μειώνοντας τις συγκεντρώσεις τους έχει φανεί ότι υπάρχει η δυνατότητα να αποκομιστούν οφέλη για την υγεία των εργαζόμενων (Chau κ.ά., 2006).

## 1.6 Έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια – Δόση

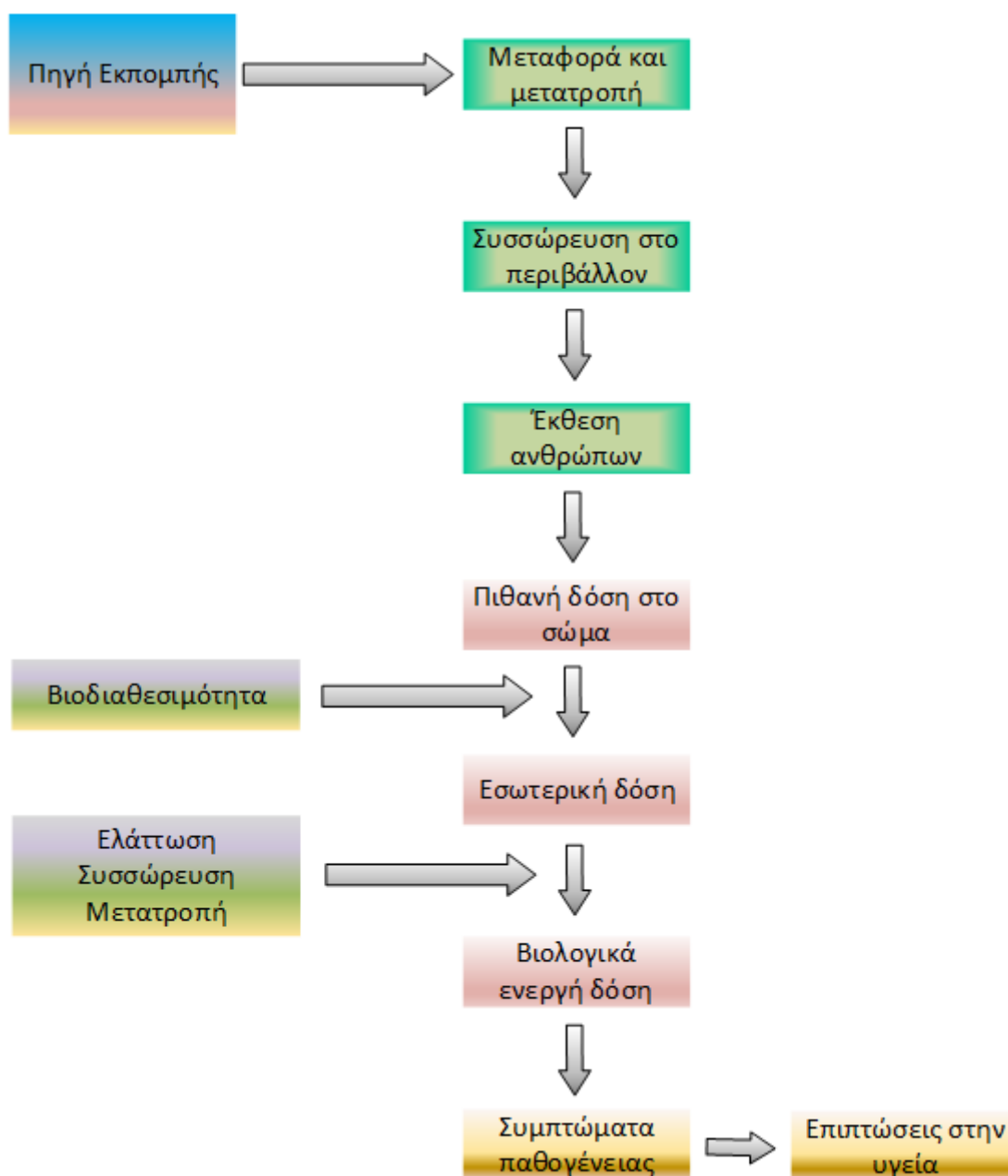
Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι έρχονται σε άμεση επαφή με το ανθρώπινο σώμα. Υπάρχουν δύο οδοί εισροής των ρύπων στο σώμα του ανθρώπου : η εισπνοή και η επαφή με το δέρμα. Η πρώτη αποτελεί την πιο σημαντική οδό και για αυτό το λόγο απασχολεί το μεγαλύτερο μέρος της ερευνητικής κοινότητας.

Μια αέρια χημική ένωση για να μπορέσει να είναι αναπνεύσιμη πρέπει να έχει το κατάλληλο μέγεθος. Έτσι, η διάμετρος πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 0,01-12  $\mu m$ . Η κλίμακα αυτή είναι αρκετά μεγάλη και περιλαμβάνει πλήθος σωματιδίων ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ , fine, ultrafine). Η κάθε κατηγορία, όπως αναφέραμε και προηγουμένως, επιδρά διαφορετικά στον άνθρωπο, ανάλογα με το μέγεθος του σωματιδίου. Αυτό, βέβαια, από μόνο του δεν είναι αρκετό αφού υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που παίζουν ρόλο στον τρόπο επίδρασης του ρύπου στον άνθρωπο.

Πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση της εναπόθεσης των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα θα ορίσουμε δύο σημαντικές παραμέτρους: την έκθεση και τη δόση.

Ως **έκθεση (exposure)** ορίζουμε τη συγκέντρωση του ρύπου που έρχεται σε επαφή με τον άνθρωπο σε ορισμένη χρονική περίοδο. Η επαφή γίνεται με την περιοχή του σώματος που βρίσκεται κοντά στις αναπνευστικές οδούς (στόμα και μύτη).

Ως **δόση (dose)** ορίζουμε την ποσότητα του ρύπου που εναποτίθεται σε διάφορα μέρη του αναπνευστικού συστήματος καθώς και σε άλλες περιοχές του σώματος σε ορισμένη χρονική περίοδο. Η δόση συγκεκριμένης τοξικής ένωσης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως ο χρόνος εναπόθεσης και ο καθαρισμός της (clearance) από τη συγκεκριμένη περιοχή του σώματος. Η δόση που δέχεται ένα συγκεκριμένο όργανο ή ένας ιστός του σώματος μπορεί να οδηγήσει σε τραυματισμό του καθώς και σε αναμόρφωση της λειτουργίας του.



Εικόνα 5 - Σχηματική απεικόνιση της σειράς βημάτων που οδηγούν από την εκπομπή αέριων ρύπων σε πιθανές επιπτώσεις τους στην υγεία (Λαζαρίδης, 2010).

Στο σχήμα της Εικόνας 5, παρουσιάζεται η συνεχή σειρά γεγονότων και διεργασιών που οδηγούν τους ρύπους από την πηγή εκπομπής σε επαφή με τον άνθρωπο (έκθεση) και τέλος, σε δόση στο ανθρώπινο σώμα και σε πιθανά προβλήματα στην υγεία.

Παρατηρείται, λοιπόν, ότι σημαντικό ρόλο παίζει τόσο η συγκέντρωση στην οποία βρίσκεται ο ρύπος, ο χρόνος έκθεσης καθώς και το ποσοστό αυτού που θα απορροφηθεί από το ανθρώπινο σώμα (δόση). Έτσι, λοιπόν, εφόσον κάποιος βρεθεί σε περιβάλλον όπου η συγκέντρωση του ρύπου βρίσκεται σε όρια άνω του επιτρεπτού και εκτεθεί σε αυτά για χρόνο επαρκή τότε είναι ικανός να εκδηλώσει συμπτώματα. Αυτό δηλώνει ότι προκειμένου να εμφανιστεί κάποιο σύμπτωμα είναι αναγκαίο τόσο η συγκέντρωση του επιβλαβή ρύπου να βρίσκεται σε αυξημένα επίπεδα όσο ο χρόνος έκθεσης να είναι επαρκής ώστε να επιτρέψει την επαφή, είσοδο και αλληλεπίδραση αυτού με τον άνθρωπο σε ικανοποιητικό βαθμό.

## 1.7 Επιπτώσεις των σωματιδίων στην υγεία του ανθρώπου

Τα αιωρούμενα σωματίδια είναι βλαβερά για το αναπνευστικό σύστημα και η αρνητικές τους επιπτώσεις σε αυτό εξαρτώνται από την τοξικότητά τους. Από την άλλη μεριά, ακόμα και τα μη τοξικής προέλευσης σωματίδια μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικά προβλήματα του αναπνευστικού. Για παράδειγμα η σκόνη, η οποία είναι και η πιο συνηθισμένη μορφή σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, παρόλο που είναι ανόργανη και μη τοξική, μπορεί να εισέλθει (ειδικά οι μικρότεροι από τους κόκκους της) ως τις κυψελίδες των πνευμόνων και να συσσωρευτεί, με αποτέλεσμα χρόνια προβλήματα του αναπνευστικού.

### 1.7.1 Κλάσματα σωματιδίων εισπνοής με βάση το διεθνές πρότυπο

Το κλάσμα των σωματιδίων του αέρα που εισπνέεται στο ανθρώπινο σώμα εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων. Τα εισπνεόμενα σωματίδια μπορούν να συγκεντρωθούν σε κάποιο σημείο του σώματος και να προκαλέσουν κοντά σε αυτό φθορές, στην περίπτωση που είναι καρκινογενή, πολύ μικρά ή ικανά να προκαλέσουν κάποιο άλλο είδος φθοράς. Το διεθνές πρότυπο ISO 7708 δίνει τους ορισμούς των κλασμάτων μεγέθους σωματιδίων που χρησιμοποιούνται στη δειγματοληψία που σχετίζεται με την ανθρώπινη υγεία:

- **Κλάσμα εισπνοής :** Το κλάσμα μάζας των ολικών σωματιδίων του ατμοσφαιρικού αέρα που αναπνέεται από τη μύτη και το στόμα (TSP, total suspended particles, ολικά αιωρούμενα σωματίδια).
- **Θωρακικό κλάσμα:** Το κλάσμα μάζας των εισπνεόμενων σωματιδίων που διεισδύει μετά το λάρυγγα. Η μέση τιμή του μεγέθους των σωματιδίων αυτών είναι μικρότερη ή ίση με 10 $\mu$ m (PM<sub>10</sub>).

- **Κλάσμα αναπνοής:** Το κλάσμα μάζας των εισπνεόμενων σωματιδίων που διεισδύει στους αεραγωγούς του πνεύμονα.
- **Το κλάσμα αναπνοής υψηλού κινδύνου** που χρησιμοποιείται στην περίπτωση που πρέπει να προστατευτούν παιδιά ή ασθενείς, έχει μέση διάμετρο σωματιδίων 2,5  $\mu\text{m}$  (PM<sub>2.5</sub>).
- **Το κλάσμα αναπνοής «υγιούς ενήλικου»** που χρησιμοποιείται στην περίπτωση που πρέπει να προστατευθούν υγιείς ενήλικοι, έχει μέση διάμετρο σωματιδίων 4,25  $\mu\text{m}$ .

Όπως θα δούμε αναλυτικότερα και σε επόμενο κεφάλαιο, μετά την εισχώρηση των σωματιδίων στο αναπνευστικό, αυτά μπορούν να διαλυθούν στην υγρή φάση των βρόγχων και στη συνέχεια να εισέλθουν στους λεμφαδένες ή στην κυκλοφορία. Τα σωματίδια που εισέρχονται στην περιοχή των κυψελίδων υπόκεινται σε απορροφητικούς και μη μηχανισμούς απομάκρυνσης. Στις κυψελίδες, ο κύριος μηχανισμός απομάκρυνσης είναι η φαγοκύτωση από τα κυψελιδικά μακροφάγα κύτταρα και η μετακίνησή τους με αυτά στην περιοχή που αρχίζει το στρώμα της βλέννας που κινείται προς το φάρυγγα (Αλεξανδροπούλου, 2003). Η βιολογική τους ημίσεια ζωή μπορεί να κυμανθεί από μέρες μέχρι χρόνια. Τελικά, η μακροχρόνια εισπνοή των σωματιδίων μπορεί να προκαλέσει διάφορες μορφές πνευμονοκονιάσεων, άσθμα και σε κάποιες περιπτώσεις καρκινογένεση. Οι οργανικές κόνεις μπορούν επίσης να προκαλέσουν και αλλεργικές αντιδράσεις.

### 1.7.2 Επιπτώσεις των σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό

Η σωματιδιακή ρύπανση του αέρα ήταν από τους πρώτους τύπους ρύπανσης που αποδείχτηκε πως έχει σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία οδηγώντας σε σταθερή επιδείνωση της υγείας είτε μακροπρόθεσμα είτε βραχυπρόθεσμα ακόμη και σε πολύ χαμηλά επίπεδα (Sousa κ.ά., 2012).. Η πληθώρα των στοιχείων από μεγάλο αριθμό επιδημιολογικών μελετών για βραχυχρόνια απόκριση κατέδειξαν πως μια αύξηση περίπου  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  στην ημερήσια μέση συγκέντρωση για αιωρούμενα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο  $\leq 10\mu\text{m}$  σχετίζεται με μια αύξηση 0,9% κατά προσέγγιση στην ημερήσια θνησιμότητα που σχετίζεται με το καρδιαγγειακό σύστημα, 1,3% στην αντίστοιχη θνησιμότητα λόγω ασθενειών του αναπνευστικού συστήματος και 0,6% στην ημερήσια θνησιμότητα όλων των αιτιών (WHO, 2006). Επιπλέον οι εισαγωγές στο νοσοκομείο και οι ιατρικές επισκέψεις αυξάνονται εξίσου σημαντικά για διάφορες αναπνευστικές παθήσεις και ως ένα βαθμό και για καρδιαγγειακά νοσήματα (WHO, 2006).

Εκτιμάται πως η έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια προκαλεί 800.000 θανάτους το χρόνο παγκοσμίως. Παιδιά, άτομα προχωρημένης ηλικίας και ασθενείς με ιστορικό καρδιοαναπνευστικών ασθενειών (συμπεριλαμβανομένου του άσθματος), αποτελούν τον πιο επιρρεπή πληθυσμό στις επιπτώσεις της αέριας ρύπανσης (Sousa κ.ά., 2012).



Το αναπνευστικό σύστημα είναι η κύρια οδός πρόσληψης σωματιδίων. Η δομή και η λειτουργία του μαζί με τις φυσικές και αεροδυναμικές ιδιότητες των σωματιδίων καθορίζουν το πού και πώς τα σωματίδια θα εναποτεθούν και το εάν θα κρατηθούν ή αν θα απομακρυνθούν. Αλλαγές στον τρόπο αναπνοής, που σχετίζονται με τη διαδρομή και τα επίπεδα αερισμού, επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό το σημείο του αναπνευστικού συστήματος που θα πραγματοποιηθεί η εναπόθεση των εισπνεόμενων σωματιδίων.

Τα λεπτά σωματίδια καθώς και τα αδρά σωματίδια μικρού μεγέθους εναποτίθενται κυρίως στη θωρακική (τραχειοβρογχική και πνευμονική) περιοχή και τα μεγαλύτερα σωματίδια εναποτίθενται στη ρινοφαρυγγική περιοχή κατά τη διάρκεια της αναπνοής μέσω της μύτης. Η στοματορινική αναπνοή που συνδυάζεται με ρυθμούς αερισμού που υπερβαίνουν τα 0,35 l/min μπορούν να μεταβάλλουν σημαντικά τους τρόπους εναπόθεσης.

Βραχυπρόθεσμη έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις σκόνης, όξινων και βασικών αεροζόλ έχει αναφερθεί πως προκαλεί στένωση των βρόγχων λόγω του ερεθισμού με χημική ή/και μηχανική διέγερση των νευρικών υποδοχέων που βρίσκονται στους βρόγχους. Ασθενείς που υποφέρουν από άσθμα ή εμφύσημα διατρέχουν μεγαλύτερο κίνδυνο, καθώς αυξημένες συγκεντρώσεις ΑΣ μπορεί να οδηγήσουν σε κλιμακωτή επιδείνωση της στένωσης των βρόγχων (Maroni κ.ά., 1995).

Παρά το ότι η πλειοψηφία των επιδημιολογικών ερευνών έχει επικεντρωθεί στις βραχυπρόθεσμες επιπτώσεις της έκθεσης σε ΑΣ, ορισμένες μελέτες προτείνουν ότι η μακροπρόθεσμη έκθεση μπορεί να είναι πιο σημαντική σε όρους δημόσιας υγείας (Lazaridis και Colbeck, 2010). Αναλύσεις δείχνουν ότι στις μελέτες χρονοσειρών δεν υπάρχει κάποια απόδειξη ότι οι θάνατοι ή η νοσηλεία στα νοσοκομεία έχει να κάνει με την έκθεση μερικών ημερών. Αντιθέτως, η ισχύς των αποτελεσμάτων αυξάνει με την αύξηση της διάρκειας της έκθεσης στην αέρια ρύπανση, προτείνοντας έτσι πως η σωρευτική έκθεση έχει ισχυρότερη επίδραση στη θνησιμότητα, από ότι η μεταβαλλόμενη από μέρα σε μέρα έκθεση (Brunekreef και Holgate, 2002). Υπάρχουν μελέτες που σχετίζουν μη θανατηφόρα ισχαιμικά περιστατικά με την αύξηση της συγκέντρωσης των λεπτών ΑΣ στην ατμόσφαιρα και την εκδήλωση ελαφρύτερων συνεπειών στην υγεία για μη αστικά περιβάλλοντα από ότι για αστικά (Miller κ.ά., 2007) ενώ υπάρχουν και στοιχεία από μακροχρόνια έρευνα της Αμερικάνικης Κοινότητας για τον Καρκίνο (American Cancer Society, ACS) σε περίπου 1,2 εκατομμύρια ενήλικες (Pope III κ.ά., 2002). Αυτή η μελέτη έδειξε ότι υπάρχει σχέση μεταξύ των περιβαλλοντικών PM<sub>2,5</sub> και αυξημένου κινδύνου εμφάνισης θνησιμότητας που βασίζεται στον καρκίνο του πνεύμονα αλλά και σε καρδιοπνευμονικά αίτια. Κάθε περίπτωση αύξησης κατά 10μg/m<sup>3</sup> σε μακροπρόθεσμο μέσο όρο για PM<sub>2,5</sub> σχετίζεται με μια αύξηση της τάξεως του 4%, 6% και 8% όλων των συνεπειών, καρδιοπνευμονικής θνησιμότητας και θνησιμότητας λόγω καρκίνου στον πνεύμονα.

Επιπλέον έχει προταθεί πως η έκθεση σε ΑΣ σχετίζεται με μειωμένη ανάπτυξη των πνευμόνων στα παιδιά και ακόμη πως η μετατόπιση παιδιών από περιοχές με υψηλές συγκεντρώσεις ΑΣ σε άλλες με χαμηλότερες (και το αντίστροφο) μπορεί να προκαλέσει αλλαγές στην διαδικασία ανάπτυξης των πνευμόνων οι οποίες αντικατοπτρίζουν τις αλλαγές της έκθεσης στα σωματίδια (Lazaridis και Colbeck, 2010).



## 2. Το αναπνευστικό σύστημα

### 2.1 Ανατομία του αναπνευστικού συστήματος

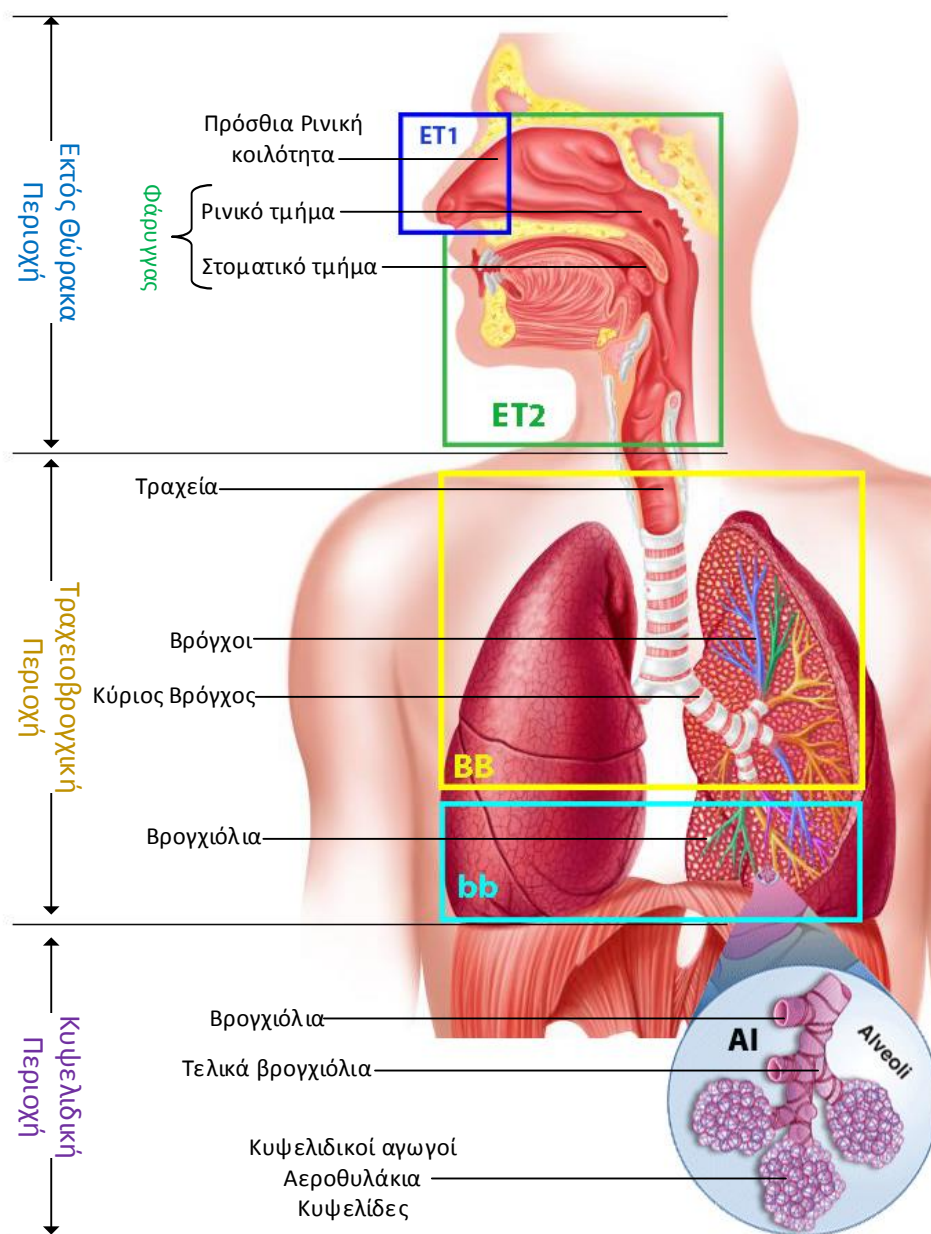
Η δόση των αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα εξαρτάται από την μορφολογία του η οποία προκαλεί μεταβολές στην πίεση, ταχύτητα ροής, κατεύθυνση και υγρασία του αέρα που κινείται μέσα σε αυτό. Το αναπνευστικό σύστημα όσο αφορά την εκτίμηση δόσεων στους ιστούς του διακρίνεται σε τρεις περιοχές (Εικόνα 6), (EPA,2002; ICRP, 1994; Schlesinger, 1988):

- **Ανώτερο αναπνευστικό ή εκτός θώρακα περιοχή (ET):** αποτελείται από την πρόσθια ρινική κοιλότητα (ET1), την ύστερη ρινική κοιλότητα, τον λάρυγγα, τον φάρυγγα και το στόμα (ET2).
- **Τραχειοβρογχική περιοχή (TB):** περιλαμβάνει την τραχεία και τους πρωτεύοντες βρόγχους (BB), τους δευτερεύοντες βρόγχους που ακολουθούν (διακλαδώσεις) και τους τελικούς βρόγχους (bb).
- **Κυψελιδική περιοχή (AI):** αποτελείται από τους αναπνευστικούς βρόγχους, τις πνευμονικές κυψελίδες (κυψελιδικοί αεραγωγοί και αεροθυλάκια) και τον συνδετικό ιστό.

Ο παραπάνω διαχωρισμός του αναπνευστικού συστήματος γίνεται με κριτήριο τη λειτουργία που επιτελεί κάθε περιοχή (Schlesinger, 1988). Ο αέρας μεταφέρεται μέσω του ανώτερου αναπνευστικού συστήματος, της τραχείας και των βρόγχων από το εξωτερικό περιβάλλον στα σημεία που πραγματοποιείται η ανταλλαγή αερίων (αναπνοή) τα οποία αποτελούν την κυψελιδική περιοχή. Η ανατομία του αναπνευστικού συστήματος περιγράφεται και μέσω απλού γεωμετρικού μοντέλου όπου κάθε τμήμα της αναπνευστικής οδού θεωρείται ως κυλινδρικός αγωγός κατάλληλου διαμετρήματος και πάχους τοιχωμάτων, όπως φαίνεται στο σχήμα της Εικόνας 7 (ICRP,1994). Η κυτταρική σύσταση των αεραγωγών είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς αποτελούν τους ιστούς όπου αποθέτονται και στη συνέχεια κινούνται τα σωματίδια που εισέρχονται με την εισπνοή του αέρα.

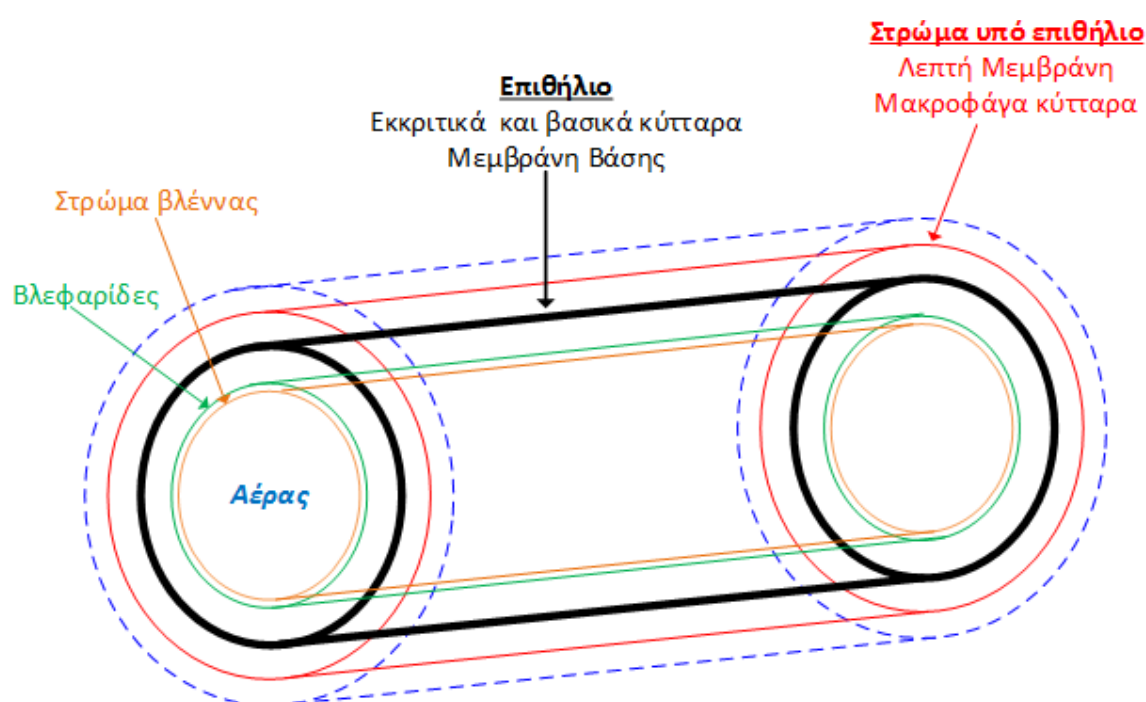
Αναλυτικότερα, το αναπνευστικό σύστημα από καθαρά μηχανιστική άποψη αποτελείται από ένα σύστημα αεραγωγών που συνδέονται μεταξύ τους σε συγκεκριμένα σημεία διακλάδωσης. Η διακλάδωση του αεραγωγού μεγαλύτερης διαμέτρου πραγματοποιείται συνήθως διχοτομικά, δηλαδή ένας κύριος κλάδος (πρόγονος) διαιρείται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

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



Εικόνα 6 - Ανατομία του αναπνευστικού συστήματος (ICRP, 2015)

Στο μοντέλο του Weibel θεωρείται πως το αναπνευστικό σύστημα αποτελείται από 23 γενιές και όπως αναφέρθηκε και παραπάνω οι γενιές 0-15 παριστάνουν τους αγωγούς μεταφοράς του αέρα (conducting). Στο μοντέλο Weibel A κάθε αεραγωγός του αναπνευστικού συστήματος θεωρείται πως διχοτομείται κάτι που απλουστεύει την διαχείριση και εφαρμογή μορφολογικών χαρακτηριστικών στα μοντέλα αλλά δεν ανταποκρίνεται στην πραγματική μορφή του αναπνευστικού συστήματος (Schlesinger, 1988). Μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη τους την ασυμμετρία του αναπνευστικού συστήματος έχουν κατασκευαστεί αλλά το μοντέλο του Weibel A παραμένει το μοναδικό που συνυπολογίζει την ανατομική ποικιλότητα κάθε ατόμου. Άλλα μοντέλα που χρησιμοποιούνται συχνά είναι των Yeh και Schum (1980), Phalen (1985) και το τροποποιημένο βάσει των παραπάνω μοντέλο του Weibel που χρησιμοποιείται από την ICRP (Abd El Hady κ.ά., 1997).



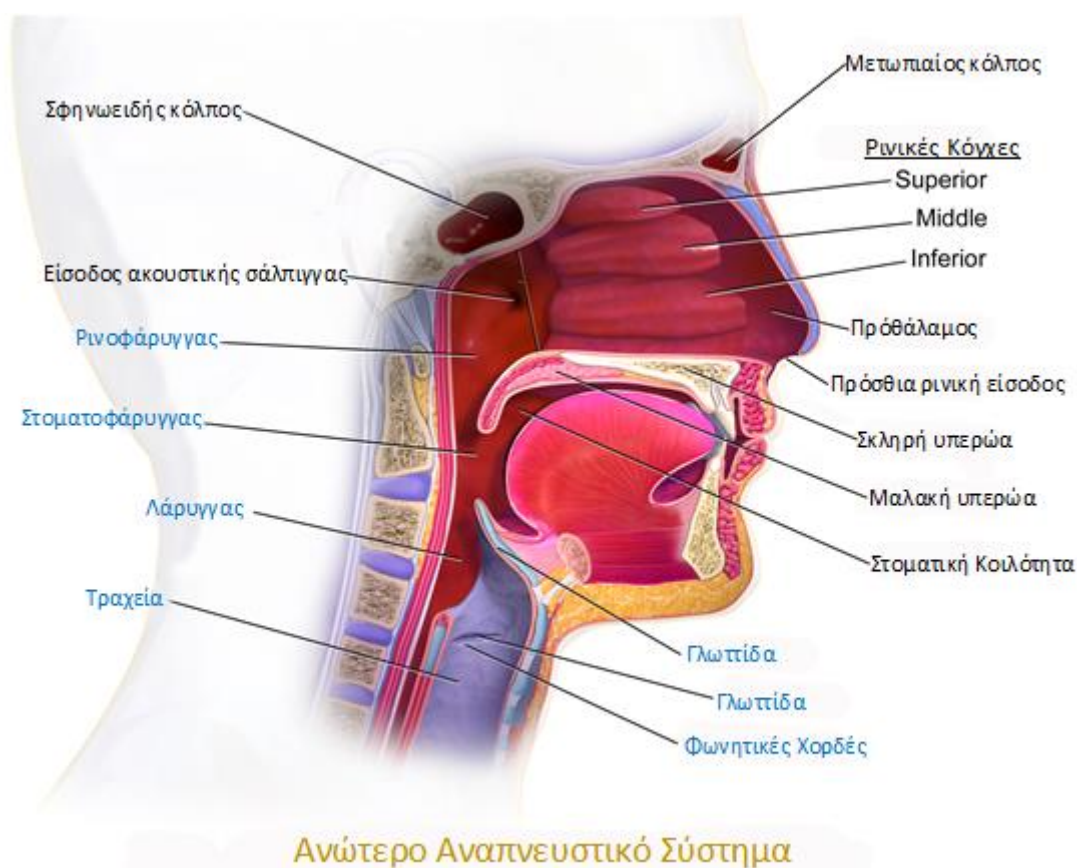
Εικόνα 7 - Απλό γεωμετρικό μοντέλο των πηγών και των στόχων που σχετίζονται με την δόση στους επιθηλιακούς ιστούς της βρογχικής και εκτός θώρακα περιοχής (ICRP, 1994).

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

Στις παρακάτω παραγράφους περιγράφεται η λειτουργικότητα κάθε περιοχής του αναπνευστικού συστήματος και αναλύεται η κυτταρολογική τους σύσταση.

### 2.1.1 Ανώτερο αναπνευστικό σύστημα

Η βασική λειτουργία του ανώτερου αναπνευστικού συστήματος είναι ο πρωτοβάθμιος καθαρισμός του αέρα, η ρύθμιση της υγρασίας και θερμοκρασίας του και η μεταφορά του στην τραχεία και τους πνεύμονες (ICRP,1994; Schlesinger,1988). Όταν εισπνέουμε από τη μύτη ο κλιματισμός του αέρα ξεκινά στα ρουθούνια και συνεχίζεται στα υπόλοιπα μέρη της περιοχής. Ο καθαρισμός του αέρα πραγματοποιείται με πρόσκρουση και διάχυση στην πρόσθια ρινική είσοδο και συνεχίζει με φιλτράρισμα των σωματιδίων στο τριχωτό που βρίσκεται πίσω από την είσοδο. Στην περιοχή αυτή βρίσκονται και λεμφαγγεία. Ο αέρας οδηγείται στον προθάλαμο και στη συνέχεια στην ρινική κοιλότητα. Τα τοιχώματα της περιοχής καλύπτονται από αναπνευστική βλέννα που περιέχει ένα μεγάλο δίκτυο αγγείων και αδένων και καλύπτεται από ένα στρώμα κύτταρων επιθηλίου που διαθέτουν βλεφαρίδες. Το στρώμα αυτό μετακινεί τη βλέννα και το πάχος του μπορεί να φτάσει τα 15μm στην περιοχή ET2. Στην ρινική κοιλότητα εμφανίζονται τα ιγμόρεια και οι ρινοδακρυϊκοί αδένες ως μικροί αγωγοί ή οπές τα οποία σε συνδυασμό με τα παραπάνω επιτυγχάνουν ικανοποιητική θέρμανση και ύγρανση του αέρα (Εικόνα 8).



Εικόνα 8 - Το ανώτερο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα

Μετά τον προθάλαμο η ροή του αέρα μεταβάλλεται απότομα καθώς κινείται οριζόντια στη ρινική κοιλότητα και μέσα από το διάφραγμα. Στη συνέχεια εξέρχεται από την ύστερη ρινική είσοδο και ρέει κάθετα στον φάρυγγα, τον λάρυγγα και την τραχεία. Οι μεταβολές αυτές στη ροή αυξάνουν την εναπόθεση σωματιδίων λόγω πρόσκρουσης στα τοιχώματα. Στο λάρυγγα βρίσκονται και οι φωνητικές χορδές που επιτρέπουν την διόδο του αέρα στην τραχεία μέσω λεπτής σχισμής. Έτσι η ταχύτητα του αέρα αυξάνεται σημαντικά και μεγάλο ποσοστό των σωματιδίων αποθέτεται στην περιοχή αυτή.

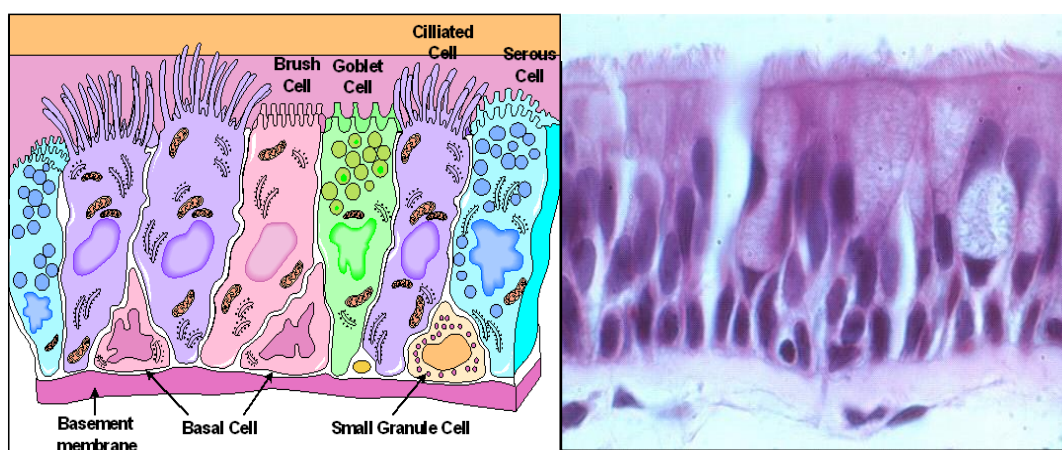


Εναλλακτικά, αν το άτομο αναπνέει από το στόμα μέρος της απόθεσης πραγματοποιείται εκεί. Οι περιοχές ET1 και ET2 διαφέρουν όσο αφορά τον ιστό στο επιθήλιο που για την πρώτη περιέχει κερατίνη ενώ για την δεύτερη βλεφαρίδες (ICRP, 1994). Ακόμα η εναπόθεση στο στόμα είναι μικρότερη απ' ότι στη μύτη και είναι χαρακτηριστικό ότι οι διαστάσεις του στόματος ποικίλλουν σημαντικά μεταξύ ατόμων (Schlesinger, 1988).

### 2.1.2 Τραχειοβρογχική περιοχή

Η τραχειοβρογχική περιοχή ξεκινά από την τραχεία (γενιά 0) και φθάνει ως τα τελικά βρογχιόλια (γενιά 15). Διακρίνεται στην βρογχική περιοχή (BB, γενιές 0 – 8) και την περιοχή των βρογχολίων (bb, γενιές 9 –15) και περιλαμβάνει ένα δίκτυο λεμφαγγείων (ICRP, 1994). Στόχος της είναι η μεταφορά και ο κλιματισμός του αέρα καθώς και ο καθαρισμός του με εναπόθεση σωματιδίων λόγω πρόσκρουσης, καθίζησης και διάχυσης.

Το δέντρο αεραγωγών της τραχειοβρογχικής περιοχής ξεκινά από την τραχεία. Η τραχεία διατηρείται μόνιμα ανοιχτή από χόνδρους και τα τοιχώματά της καλύπτονται από αναπνευστική βλέννα και αρκετούς αδένες. Το στρώμα βλέννας (~5μm) στην επιφάνεια του επιθηλίου (Εικόνα 9) κινείται προς το φάρυγγα με τη βοήθεια των βλεφαρίδων. Οι σημαντικότεροι τύποι κυττάρων είναι τα βασικά κύτταρα (33%), κύτταρα με βλεφαρίδες (cilia, 49%), καλυκοειδή κύτταρα (goblet, 9%) και άλλοι τύποι κυττάρων (εκκριτικά και κοκκία, 9%) (ICRP, 1994). Οι πυρήνες των εκκριτικών και βασικών κυττάρων είναι ο ευαίσθητος ιστός της περιοχής.



Εικόνα 9 - Το επιθήλιο στην περιοχή της τραχείας.

Στο σχέδιο αριστερά δίνονται οι ονομασίες των κυττάρων που το απαρτίζουν, ενώ δεξιά δίνεται φωτογραφία του σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (Λαζαρίδης 2010).

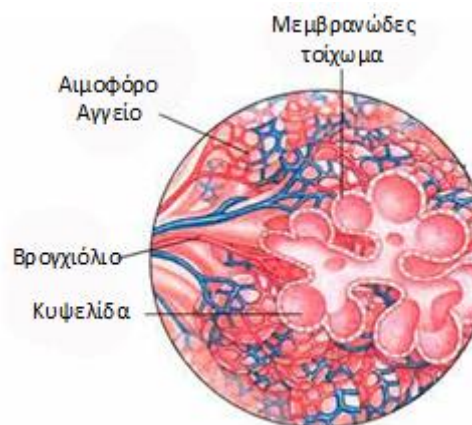
Στη συνέχεια η τραχεία διαιρείται σε 2 κύριους βρόγχους με τοιχώματα ίδιας κυτταρικής σύστασης με την τραχεία. Οι κύριοι βρόγχοι διακλαδίζονται στους λοβώδεις βρόγχους (γενιές 2 και 3) που εισέρχονται στους πνεύμονες (3 στον δεξί λοβό και 2 στον αριστερό) και αυτοί με τη σειρά τους στους τμηματικούς βρόγχους (γενιά 4) που εισέρχονται στις κοιλότητες που απαρτίζουν τους πνεύμονες και διαιρούνται περαιτέρω (Schlesinger, 1988). Οι βρόγχοι καλύπτονται από αναπνευστική βλέννα πάνω σε επιθήλιο

με βλεφαρίδες που οδηγεί τη βλέννα προς την τραχεία. Τα τοιχώματα αποτελούνται κυρίως από κύτταρα με βλεφαρίδες (56%) και καλυκοειδή κύτταρα (26%) (Εικόνα 9).

Τα βρογχιόλια που ακολουθούν δεν διαθέτουν χόνδρους και αδένες. Τα τοιχώματα τους έχουν ένα στρώμα από αναπνευστικό επιθήλιο που αποτελείται από κύτταρα κυβοειδή και κινοειδή με βλεφαρίδες ή χωρίς (εκκριτικά κύτταρα και κύτταρα Clara ευαίσθητος ιστός) ενώ σπάνια συναντώνται βασικά κύτταρα. Ο συνδετικός ιστός είναι λιγότερος απ' ότι στους βρόγχους ενώ επικρατεί μεγάλο πλήθος λεμφαγγείων.

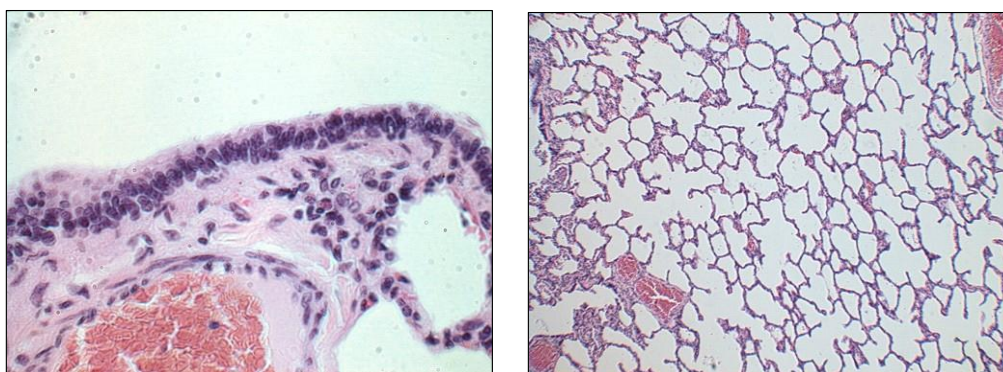
### 2.1.3 Περιοχή κυψελίδων

Η κυψελιδική περιοχή αποτελείται από τα αναπνευστικά βρογχιόλια (γενιές 16–18), τα αεροθυλάκια, τους κυψελιδικούς αεραγωγούς και τις κυψελίδες (Εικόνα 10). Στόχος της περιοχής είναι η αναπνοή, αλλά και λειτουργίες που σχετίζονται με τους ενδοκρινείς αδένες και την άμυνα του οργανισμού. Τα σωματίδια που φθάνουν σε αυτή την περιοχή έχουν μικρό μέγεθος και αποθέτονται λόγω καθίζησης και διάχυσης (Fung, 1990).



Εικόνα 10 - Επιφάνεια τομής των κυψελίδων

Τα τελικά βρογχιόλια διακλαδίζονται στα αναπνευστικά βρογχιόλια τα οποία χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη των κυψελίδων. Το ποσοστό των κυψελίδων αυξάνεται στις περιφέρειες των πνευμόνων και όταν ο αεραγωγός καλύπτεται πλήρως από κυψελίδες ονομάζεται κυψελιδικός αεραγωγός ο οποίος μπορεί να διακλαδωθεί σε άλλους αεραγωγούς ή αεροθυλάκια (Εικόνα 11-12). Τα τοιχώματα της περιοχής αποτελούνται από δύο τύπους κυττάρων επιθηλίου και εκκριτικά κύτταρα που παράγουν την αναπνευστική βλέννα.

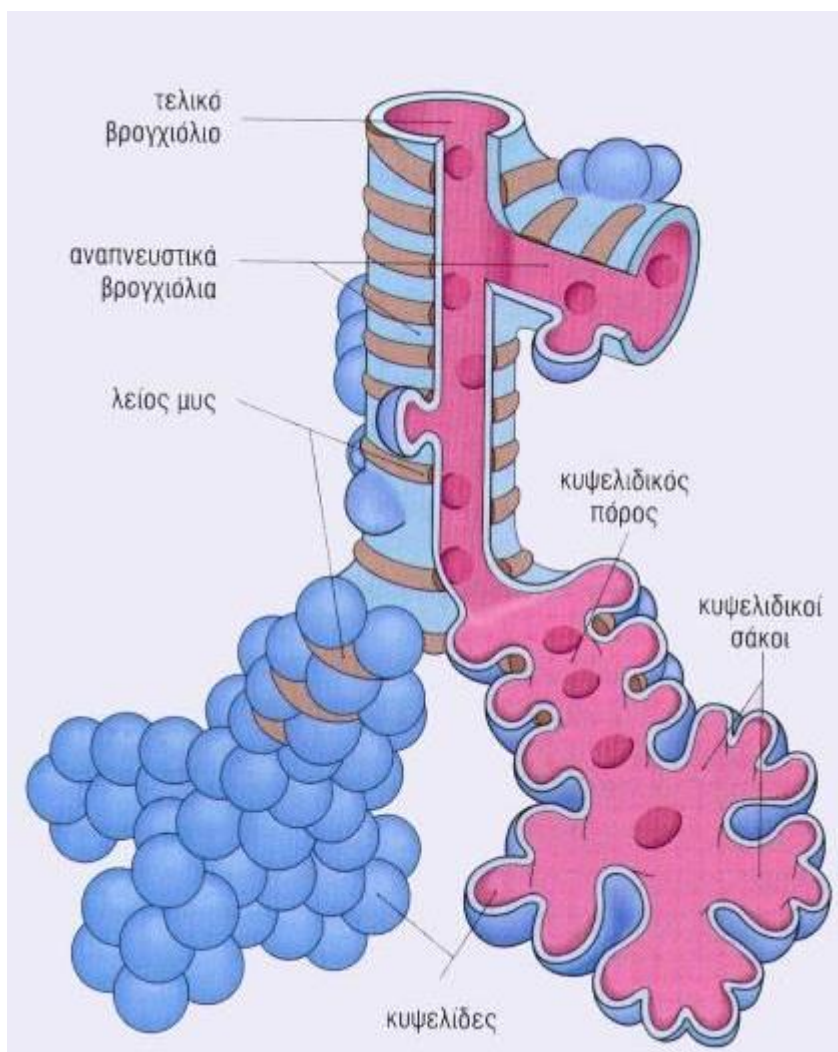


Εικόνα 11 - Η κυψελιδική περιοχή των πνευμόνων (Λαζαρίδης 2010).

(α) κυψελίδες κοντά σε αρτηρία και (β) εγκάρσια τομή της κυψελιδικής περιοχής των πνευμόνων.

Οι πνεύμονες ενός ενήλικα ανθρώπου περιλαμβάνουν περίπου 300 εκατομμύρια κυψελίδες (Fung, 1990). Το πλήθος των κυψελίδων καθώς και των διακλαδώσεων ποικίλλει ανάλογα το είδος αλλά και μεταξύ ατόμων του ίδιου είδους. Ακόμα η ολική επιφάνεια των

κυψελίδων μεταβάλλεται και έχει βρεθεί πως σχετίζεται με τη συνολική μάζα του σώματος (ICRP, 1994).



Εικόνα 12 - Σχέδιο της κυψελιδικής περιοχής των πνευμόνων.

Εδώ φαίνονται τα αναπνευστικά βρογχιόλια, οι πνευμονικές κυψελίδες και αεροθυλάκια καθώς και οι φλέβες (γραμμή πάνω στα βρογχιόλια) και το πλέγμα των τριχοειδών αγγείων πάνω στις κυψελίδες.

Οι πνεύμονες περιλαμβάνουν δύο λεμφικά δίκτυα. Το επιφανειακό δίκτυο και ένα σε μεγαλύτερο βάθος. Ένα πλέγμα από αγγεία (λεμφαγγεία) συνδέει τα δύο δίκτυα. Τα μεγαλύτερα από αυτά τα αγγεία καταλήγουν σε λεμφαδένες με πιο σημαντικούς αυτούς που βρίσκονται κατά μήκος της τραχείας και των κύριων βρόγχων και στις διακλαδώσεις των βρόγχων και βρογχιολίων (ICRP, 1994). Στην κυψελιδική περιοχή περιλαμβάνονται λεμφικός ιστός, λεμφαγγεία αλλά και βρογχικοί λεμφαδένες. Το συνολικό δίκτυο λεμφαγγείων απορρέει τελικά στην γενική κυκλοφορία του αίματος.

## 2.2 Παράμετροι φυσιολογίας

Η φυσιολογία του αναπνευστικού συστήματος ασχολείται με την ροή του αέρα κατά την είσοδο και έξοδο του από τη μύτη και το στόμα αλλά και κατά την κίνηση του στους αεραγωγούς του αναπνευστικού συστήματος. Παράμετροι που αφορούν τον τρόπο και τον ρυθμό παροχής του αέρα χρησιμοποιούνται στον καθορισμό της πρόσληψης σωματιδίων μετά από έκθεση σε δεδομένη ατμοσφαιρική συγκέντρωση. Παράλληλα οι παράμετροι που καθορίζουν τη φυσιολογία του αναπνευστικού συστήματος είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό του ποσοστού της εισπνεόμενης σωματιδιακής ύλης που θα εναποτεθεί στις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος.

Οι παράμετροι φυσιολογίας διακρίνονται σε δύο κατηγορίες (ICRP, 2002). Η πρώτη κατηγορία αφορά τον όγκο του αέρα στους πνεύμονες κατά τη διάρκεια ενός κύκλου αναπνοής. Σχετίζεται άμεσα με την ηλικία, το ύψος, βάρος, φύλο, την φυλή και την κατάσταση υγείας του ατόμου.

Η δεύτερη κατηγορία παραμέτρων φυσιολογίας αφορά τον τρόπο και τον ρυθμό με τον οποίο επαναλαμβάνεται ένας κύκλος αναπνοής. Ειδικότερα, ως «τρόπος αναπνοής» ορίζεται η κατανομή του αέρα κατά την εισπνοή μεταξύ μύτης και στόματος. Με βάση τον τρόπο αναπνοής οι άνθρωποι χαρακτηρίζονται, για τους σκοπούς της εκτίμησης της δόσης, ως άτομα που αναπνέουν μόνο από τη μύτη (nose breathers) ή και από τις δύο εισόδους (nasal augmenters) όταν εκτελούν ήπια δραστηριότητα (ICRP, 2002). Βέβαια υπάρχει και ένα ποσοστό ατόμων που αναπνέουν μερικώς από το στόμα, αλλά αυτό οφείλεται κυρίως σε ανατομικούς λόγους ή λόγους υγείας.

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

Ο όγκος που λαμβάνεται ανά αναπνοή επηρεάζεται και από το φύλο και την ηλικία του ατόμου (Hofmann κ.ά., 2002; Bergmann και Hofmann, 1999; Venkataraman και Kao, 1999). Ένα ενήλικο άτομο εισπνέει περισσότερο όγκο αέρα ανά αναπνοή απ' ό,τι ένα παιδί και λιγότερο απ' ό,τι ένας μεσήλικας. Το αντίθετο ισχύει για την συχνότητα αναπνοής που ελαττώνεται με την ηλικία. Στον Πίνακα 2 δίνονται ενδεικτικά τιμές των παραμέτρων φυσιολογίας για Καυκάσια άτομα κάτω από διάφορες δραστηριότητες. Παράλληλα δίνονται οι βασικοί παράμετροι ανατομίας (διάμετροι αεραγωγών) που χρησιμοποιούνται



ως συντελεστές συσχέτισης της απόθεσης των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα του Καυκάσιου άντρα (άτομο αναφοράς) και μίας γυναίκας.

Πίνακας 2 - Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων ανατομίας και φυσιολογίας που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα (ICRP, 1994)

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

### 3. Εναπόθεση σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα

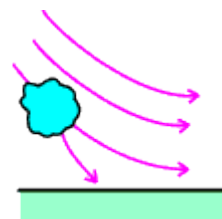
#### 3.1 Γενικά

Η συγκέντρωση και τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα μαζί με τις παραμέτρους φυσιολογίας δεν καθορίζουν μονομερώς την δόση που θα δεχτεί το αναπνευστικό σύστημα (Schlesinger, 1988). Η ποσοτικοποίηση της δόσης πραγματοποιείται με την εκτίμηση της μάζας που αποτίθεται στο αναπνευστικό σύστημα με διάφορους μηχανισμούς. Η εναπόθεση των σωματιδίων σχετίζεται με την απομάκρυνση τους από την αιωρούμενη κατάσταση και την καθίζηση τους στο αναπνευστικό σύστημα. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η θέση εναπόθεσης των σωματιδίων που καθορίζει την μετέπειτα μεταφορά και απομάκρυνση τους από τους αεραγωγούς του αναπνευστικού συστήματος. Παρακάτω θα αναλυθούν οι μηχανισμοί εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα και οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση της στις διάφορες περιοχές του.

#### 3.2 Μηχανισμοί εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό

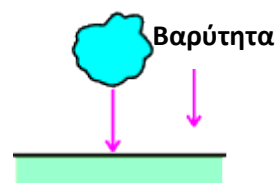
Οι κύριοι μηχανισμοί εναπόθεσης των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα είναι οι εξής :

- **Πρόσκρουση** : οφείλεται στην ανικανότητα των σωματιδίων να ακολουθήσουν τις γραμμές ροής όταν αυτές αλλάζουν απότομα κατεύθυνση ή ταχύτητα (Εικόνα 13). Είναι ο σημαντικότερος μηχανισμός εναπόθεσης για σωματίδια ισοδύναμης αεροδυναμικής διαμέτρου μεγαλύτερης του 0,5μm στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα (ICRP, 2002). Η πιθανότητα εναπόθεσης ενός σωματιδίου λόγω πρόσκρουσης είναι ανάλογη της ταχύτητας του αέρα, του ρυθμού αναπνοής, του μεγέθους και της πυκνότητας του σωματιδίου (Schlesinger, 1988).



Εικόνα 13  
Πρόσκρουση

- **Καθίζηση** : είναι η εναπόθεση σωματιδίων στο αναπνευστικό εξαιτίας της βαρύτητας (Εικόνα 14). Όταν η επίδραση της βαρύτητας γίνει μεγαλύτερη της άνωσης και της αντίστασης του αέρα τα σωματίδια εγκαταλείπουν τις γραμμές ροής και καθιζάνουν με σταθερή ταχύτητα στις επιφάνειες της αναπνευστικής οδού (EPA, 2002). Αποτελεί όπως και η πρόσκρουση σημαντικό μηχανισμό για σωματίδια ισοδύναμης αεροδυναμικής διαμέτρου μεγαλύτερης των 0,5μm όταν αυτά κινούνται στους μικρότερους αεραγωγούς του αναπνευστικού συστήματος



Εικόνα 14  
Καθίζηση

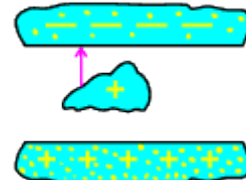
(Schlesinger, 1988). Η πιθανότητα εναπόθεσης ενός σωματιδίου λόγω καθίζησης είναι ανάλογη του χρόνου παραμονής στους αεραγωγούς, του μεγέθους και της πυκνότητας του σωματιδίου και αντιστρόφως ανάλογη του ρυθμού αναπνοής. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η εναπόθεση σωματιδίων αποτελεί βασικό μηχανισμό εναπόθεσης σωματιδίων στην περιοχή εκτός θώρακα και στους αναπνευστικούς αεραγωγούς της κυψελιδικής περιοχής. Η σχετική συνεισφορά της πρόσκρουσης και της καθίζησης στην απόθεση σωματιδίων σε μια διακλάδωση στις αρχικές γενιές των πνευμόνων έχει βρεθεί πως είναι περίπου ίση. Διαφέρουν όμως στη θέση απόθεσης των σωματιδίων αφού τα περισσότερα σωματίδια επικάθονται λόγω πρόσκρουσης στη διακλάδωση ενώ λόγω καθίζησης σε όλο το μήκος των αεραγωγών (Balashazy κ.ά., 1999).

- **Διάχυση** : αποτελεί βασικό μηχανισμό απόθεσης των σωματιδίων στα βρογχιόλια και την κυψελιδική περιοχή όπου η ταχύτητα ροής είναι ιδιαίτερα χαμηλή αλλά και στην περιοχή εκτός θώρακα όπου η ροή του αέρα είναι τυρβώδης (Εικόνα 15, ICRP-2002). Αφορά κυρίως σωματίδια διαμέτρου μικρότερης των  $0,2\mu\text{m}$  κινούνται ακολουθώντας τυχαίες κατευθύνσεις καθώς βομβαρδίζονται από μόρια αέρα (Schlesinger, 1988).



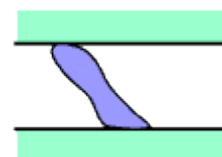
Εικόνα 15 - Διάχυση

- **Ηλεκτροστατική καθίζηση** : τα πρωτογενή σωματίδια είναι συχνά ηλεκτρικά φορτισμένα και σε περίπτωση εισπνοής τους παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά εναπόθεσης που δεν μπορούν να ερμηνευθούν από τους υπόλοιπους μηχανισμούς απόθεσης (Εικόνα 16). Η εναπόθεση των ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων οφείλεται σε ηλεκτροστατική καθίζηση και είναι αντιστρόφως ανάλογη του μεγέθους των σωματιδίων και της ταχύτητας ροής του αέρα (EPA, 2002). Ωστόσο, η εισπνοή ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων είναι σπάνια αφού το φορτίο των πρωτογενών σωματιδίων γρήγορα εξουδετερώνεται από τα ιόντα της ατμόσφαιρας (Schlesinger, 1988). Έτσι η εναπόθεση μέσω αυτού του μηχανισμού είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με άλλων υπάρχουν όμως ενδείξεις ότι αποτελεί βασικό μηχανισμό εναπόθεσης των πολύ λεπτών σωματιδίων στην τραχειοβρογχική περιοχή (EPA, 2002).



Εικόνα 16  
Ηλεκτροστατική  
Καθίζηση

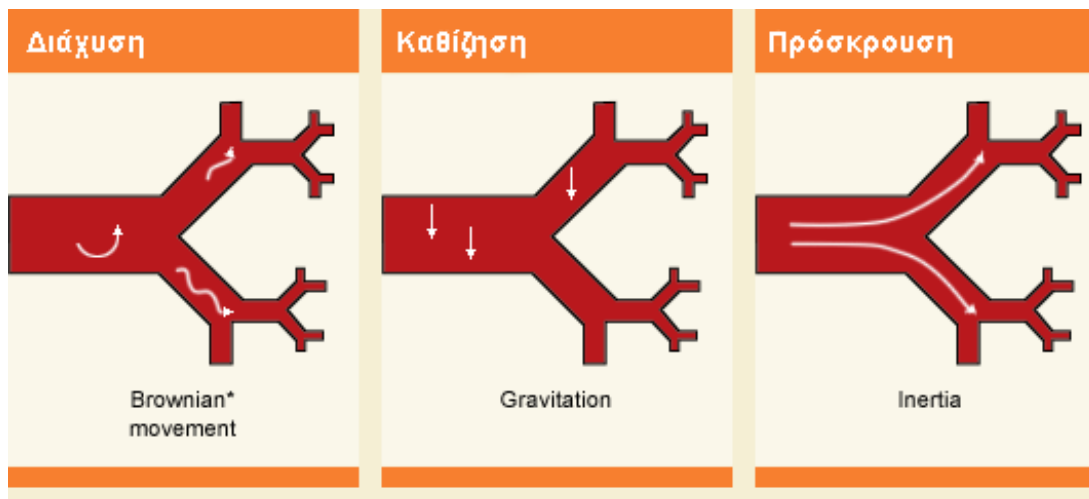
- **Αναχαίτιση** : οφείλεται στην φυσική επαφή των σωματιδίων με τα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού (Εικόνα 17). Η αναχαίτιση εξαρτάται από το μέγεθος και το σχήμα του σωματιδίου και είναι σημαντική για σωματίδια με ινώδη μορφή (ICRP, 2002). Τα σωματίδια μεγέθους  $0,2\mu\text{m} - 0,5\mu\text{m}$



Εικόνα 17 - Αναχαίτιση

δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από κανέναν από τους παραπάνω μηχανισμούς και εναποτίθενται ελάχιστα στο αναπνευστικό σύστημα μέσω καθίζησης (ΕΡΑ, 2002).

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω οι κυριότεροι μηχανισμοί (Εικόνα 18) στους οποίους οφείλεται το μεγαλύτερο ποσοστό εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα είναι η πρόσκρουση, η καθίζηση και η διάχυση



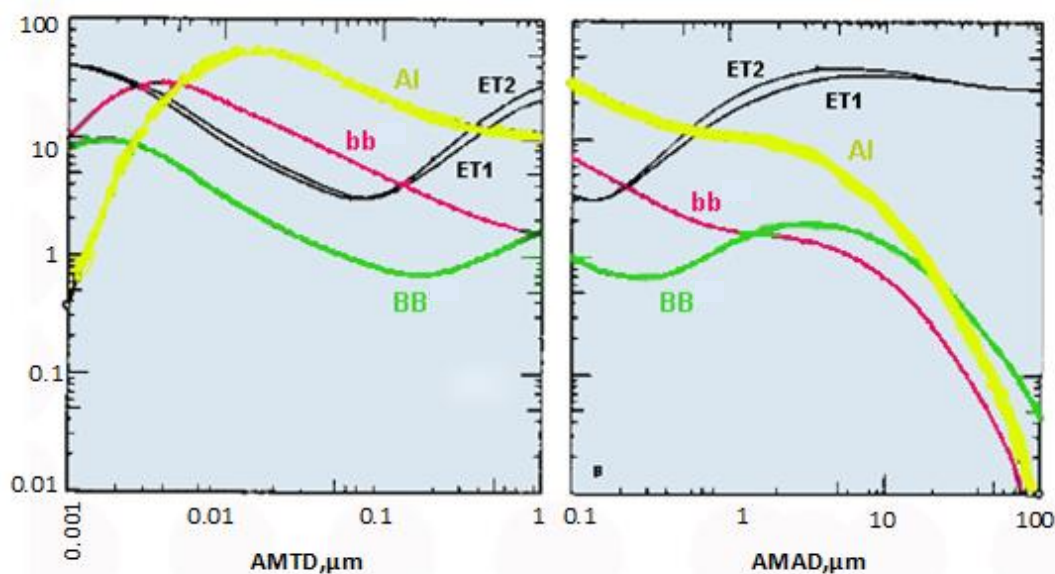
Εικόνα 18 - Κυριότεροι μηχανισμοί εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα

### 3.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την εναπόθεση σωματιδίων στο αναπνευστικό

Το ποσοστό των σωματιδίων που εισέρχονται στο αναπνευστικό σύστημα εξαρτάται από το μέγεθος τους όπως και από τη συχνότητα και τον τρόπο αναπνοής. Το μέγεθος τους σχετίζεται αρχικά με τους μηχανισμούς εναπόθεσης που επιδρούν σε αυτά. Στο διάγραμμα της Εικόνας 19, δίνεται το ποσοστό της μάζας σωματιδίων που αποθέτεται σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος συναρτήσει της διαμέτρου τους.

Σε όλες τις περιοχές παρατηρείται τοπικά ελάχιστο για τα σωματίδια μεγέθους συσσωματώματος. Το μεγαλύτερο μέρος των σωματιδίων κάθε διαμέτρου αποθέτεται στην περιοχή εκτός θώρακα και μόνο το πεδίο διαμέτρων από 0,005μm έως περίπου 0,25μm κυριαρχεί στην κυψελιδική περιοχή (Λαζαρίδης, 2010). Ακόμα στην τραχειοβρογχική περιοχή η εναπόθεση των μικρών σωματιδίων παρουσιάζει μεγαλύτερη απόδοση στην περιοχή bb ενώ των μεγάλων στην BB. Το μέγεθος τους σχετίζεται όπως έχει ήδη αναφερθεί και με την εισπνευστικότητα τους. Όσο αφορά τον τρόπο αναπνοής, δηλαδή την εισπνοή από τη μύτη ή το στόμα, πέρα από την διαφορετική εισπνευστικότητα, αυτή καθορίζει και την ποσότητα των διαθέσιμων σωματιδίων στους πνεύμονες. Στο διάγραμμα της Εικόνας 20 δίνεται η εναπόθεση στις 5 περιοχές του αναπνευστικού συστήματος καθώς και η ολική, συναρτήσει της συμμετοχής της μύτης στην εισπνοή (η ταχύτητα του ανέμου θεωρείται μηδενική).

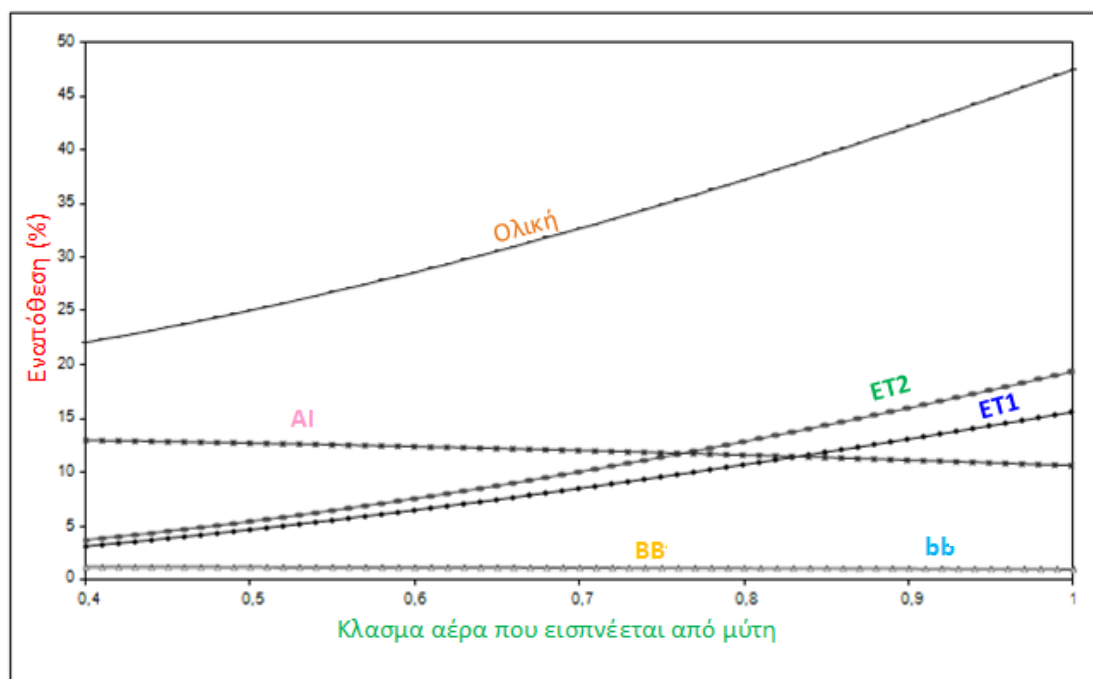
Αναπνέοντας από την μύτη ένα μεγάλο μέρος των πολύ λεπτών σωματιδίων φιλτράρεται μέσω διάχυσης. Η εναπόθεση σε αυτή την περίπτωση εξαρτάται από το μέγεθος του σωματιδίου, την πυκνότητα και την ροή του αέρα ενώ για συνδυασμένη αναπνοή μόνο από το μέγεθος (Schlesinger, 1988). Αναπνέοντας από το στόμα λιγότερα σωματίδια καθιζάνουν στην ΕΤ περιοχή ενώ στους πνεύμονες αποθέτονται τελικά περισσότερα αλλά και μεγαλύτερα σωματίδια. Ωστόσο ένα μεγάλο μέρος των σωματιδίων εξέρχεται με την εκπνοή και έτσι η συνολική εναπόθεση είναι μεγαλύτερη για εισπνοή από τη μύτη. Πρέπει να σημειωθεί εδώ πως αν και η δόση σε αυτήν την περίπτωση είναι μεγαλύτερη εντοπίζεται κυρίως στην εκτός θώρακα περιοχή απ' όπου τα σωματίδια απομακρύνονται γρήγορα εκτός του οργανισμού.



Εικόνα 19 - Ποσοστό εναπόθεσης σωματιδίων στις 5 περιοχές της αναπνευστικής οδού, σύμφωνα με ICRP 66. Το κλάσμα της μάζας που παραμένει στις περιοχές της αναπνευστικής οδού μετά από έναν πλήρη κύκλο αναπνοής παρουσιάζεται ως συνάρτηση της διαμέτρου των σωματιδίων που διακρίνεται σε αεροδυναμική (AMAD) και θερμοδυναμική (AMTD) βάσει του κυρίαρχου μηχανισμού εναπόθεσης των σωματιδίων (ICRP-1994).

Η εναπόθεση εξαρτάται και από βιολογικούς παράγοντες που σχετίζονται με το φύλο, την ηλικία, ασθένειες, το είδος και όσο αφορά τους ανθρώπους την εθνικότητα. Όπως αναφέρθηκε και στην περιγραφή του αναπνευστικού συστήματος, οι παραπάνω παράγοντες καθορίζουν την ανατομία του αναπνευστικού συστήματος και την λειτουργία της αναπνοής. Αναλυτικότερα, η εθνικότητα σχετίζεται με τις διαστάσεις του σώματος και κατά συνέπεια και του αναπνευστικού συστήματος με αποτέλεσμα διαφορετική εναπόθεση (ICRP, 1994). Όσο αφορά το φύλο για άτομα της ίδιας εθνικότητας, μια γυναίκα διαθέτει αναπνευστικό σύστημα με αεραγωγούς μικρότερους από ενός άντρα αλλά ταυτόχρονα αναπνέει αέρα με μικρότερο ρυθμό αλλά μεγαλύτερη συχνότητα. Έτσι είναι δύσκολο να φανεί μια καθαρή τάση στην διαφορά εναπόθεσης μεταξύ των δύο φύλων. Ωστόσο σε μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί έχει βρεθεί πως η εναπόθεση των πολύ μικρών σωματιδίων είναι μεγαλύτερη για τις γυναίκες (Kim και Jaques, 2000). Ακόμα, η δομή και η κατάσταση του αναπνευστικού συστήματος ποικίλλουν ανάλογα την ηλικία με αποτέλεσμα να διαφοροποιείται η εναπόθεση των σωματιδίων. Έχει βρεθεί πως το ποσοστό

εναπόθεσης στην εξωθωρακική περιοχή είναι αντιστρόφως ανάλογο με την ηλικία και το ύψος.



Εικόνα 20 - Ποσοστό εναπόθεσης της εισπνεόμενης μάζας σωματιδίων διαμέτρου 1 μm στις 5 περιοχές της αναπνευστικής οδού συναρτήσει της συμμετοχής της μύτης στην εισπνοή (ICRP-1994).

## 4. Καθαρισμός σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα

### 4.1 Γενικά

Ο καθαρισμός σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα αναφέρεται στη φυσική μεταφορά και απομάκρυνση τους από τις επιφάνειες του, όπου είχαν αρχικά αποτεθεί (Schlesinger, 1988). Πρόκειται για φυσικό μηχανισμό άμυνας του οργανισμού απέναντι σε ξένα σώματα που εισβάλλουν σε αυτόν (Gradon κ.ά., 1996). Η γνώση του χρόνου παραμονής των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα μετά την πάροδο της έκθεσης είναι καθοριστική για την απόκριση του. Η απομάκρυνση των σωματιδίων από τις περιοχές που έχουν αποτεθεί γίνεται με τελικό προορισμό το γαστρεντερικό σύστημα, τους τοπικούς λεμφαδένες, το αίμα και ακολούθως όλο τον ανθρώπινο οργανισμό (π.χ. ICRP, 1994; Chang κ.ά., 1991). Οι μηχανισμοί απομάκρυνσης των σωματιδίων εξαρτώνται από την περιοχή στην οποία έχουν εναποτεθεί, τις φυσικοχημικές ιδιότητες τους και από την συγκέντρωση μάζας ή αριθμού των σωματιδίων που έχουν καθιζάνει στην επιφάνεια (ICRP, 1994; Tran κ.ά., 1999 (2); Schlesinger, 1988). Στη συνέχεια αναλύονται οι μηχανισμοί καθαρισμού σωματιδίων σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος καθώς και οι παράγοντες που επηρεάζουν τον καθαρισμό.

## 4.2 Μηχανισμοί απομάκρυνσης σωματιδίων από το ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα

Οι μηχανισμοί μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δυο διεργασίες που δρουν ανταγωνιστικά (ICRP,1994; EPA, 2002):

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

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

### *Περιοχή εκτός θώρακα*

Στο ανώτερο τμήμα του αναπνευστικού συστήματος και συγκεκριμένα την πρόσθια ρινική κοιλότητα τα αδιάλυτα σωματίδια καθαρίζονται με τη μεταφορά τους με τη βλέννα (EPA, 2002). Το στρώμα της βλέννας κινείται με φορά τον ρινοφάρυγγα και στη συνέχεια το φάρυγγα απ' όπου και καταπίνεται προς το γαστρεντερικό σύστημα (Schlesinger, 1988). Θα πρέπει να σημειωθεί πως ως γαστρεντερικό σύστημα θεωρείται το σύστημα που αποτελείται από το στομάχι, το λεπτό έντερο (απορρόφηση σωματιδίων στο αίμα), το άνω και το κατώτερο τμήμα του παχύ εντέρου απ' όπου τα σωματίδια εξέρχονται στα κόπρανα (ICRP, 2002). Στις περιοχές που βρίσκονται μακριά από σημεία του επιθηλίου που έχουν βλεφαρίδες η ροή της βλέννας είναι αντίστροφη και κατευθύνει τα σωματίδια σε θέσεις όπου μπορούν πλέον να απομακρυνθούν με μηχανισμούς όπως το φτέρνισμα. Τα διαλυτά σωματίδια στην ρινική κοιλότητα διαχέονται στο επιθήλιο και αν η ροή της βλέννας είναι πιο αργή φθάνουν στα χαμηλότερα στρώματα του επιθηλίου απ' όπου απορροφώνται στο αίμα (Schlesinger, 1988). Στην στοματική κοιλότητα τα αδιάλυτα σωματίδια απομακρύνονται στο φάρυγγα και καταπίνονται ενώ τα διαλυτά απορροφώνται ταχέως στο αίμα (EPA, 2002). Από την περιοχή τα σωματίδια μπορούν να απομακρυνθούν και με το βήχα ή απόπτωση. Τέλος στο λάρυγγα η ροή της βλέννας από την τραχεία κατευθύνεται στο φάρυγγα απ' όπου τα σωματίδια καταπίνονται (ICRP, 1994).

### *Τραχειοβρογχική περιοχή*

Η περιοχή αυτή καλύπτεται από επιθήλιο που καλύπτεται από στρώμα βλέννας και αποτελεί το βασικό μέσο με το οποίο τα σωματίδια μεταφέρονται στον φάρυγγα και το



γαστρεντερικό σύστημα (Schlesinger, 1988). Αυτό ισχύει για τα αδιάλυτα σωματίδια που μπορούν να απομακρυνθούν και με ενδοκύτωση στα κύτταρα του επιθηλίου και από μακροφάγους ενώ τα διαλυτά μεταφέρονται στο αίμα (EPA, 2002).

### Περιοχή κυψελίδων

Στην περιοχή των κυψελίδων τα σωματίδια υπόκεινται σε απορροφητικούς και μη μηχανισμούς απομάκρυνσης. Ο κύριος μηχανισμός απομάκρυνσης τους είναι η φαγοκύτωση από τα κυψελιδικά μακροφάγα κύτταρα και η μετακίνηση τους με αυτά στην περιοχή όπου αρχίζει το στρώμα της βλέννας που κινείται προς τον φάρυγγα.

## 4.3 Κινητική της απομάκρυνσης

Το ακριβές χρονικό διάστημα στο οποίο λαμβάνει χώρα ο καθαρισμός επηρεάζει την συνολική δόση στο αναπνευστικό σύστημα αλλά και αυτή που φθάνει στα υπόλοιπα όργανα. Στην ΕΤ περιοχή τα σωματίδια που καθιζάνουν στην πρόσθια ρινική περιοχή απομακρύνονται πολύ αργά με τη βλέννα (περίπου 2mm/h) και πιο αποτελεσματικά με το φτέρνισμα και το φύσημα της μύτης (Schlesinger, 1988). Ο χρόνος που απαιτείται ώστε ελαφρά διαλυτά σωματίδια να μεταφερθούν από το πρόσθιο στο μεταγενέστερο τμήμα είναι 10-20 λεπτά (EPA, 2002).

Στην ΤΒ περιοχή η ταχύτητα ροής της βλέννας ελαττώνεται από την τραχεία προς τα επόμενα τμήματα του αναπνευστικού συστήματος όπως δίνεται στον Πίνακα 3. Γενικά ο ρυθμός καθαρισμού σε αυτό το τμήμα του αναπνευστικού συστήματος είναι γρήγορος αλλά έχει βρεθεί πως κάποια αδιάλυτα σωματίδια παραμένουν για διάστημα μεγαλύτερο των 24 ωρών (EPA, 2002).

Πίνακας 3 - Πίνακας ταχύτητας κίνησης του στρώματος βλέννας στην τραχειοβρογχική περιοχή του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος και αντίστοιχοι χρόνοι υποδιπλασιασμού (Lee κ.ά., 1979).

Γενιά	Ταχύτητα βλέννας (mm/min)	Χρόνος υποδιπλασιασμού (min)
0	5,5	15,1
1	4,1	8,1
2	3,0	4,4
3	2,2	2,4
4	1,4	6,4
5	0,88	8,4
6	0,55	11,3
7	0,34	15,7
8	0,21	21,3
9	0,13	29,7
10	0,074	42,8
11	0,044	60,8
12	0,025	97,6
13	0,015	126,9
14	0,0082	195,2
15	0,0046	302,6



Έτσι η απομάκρυνση των σωματιδίων από αυτή την περιοχή διαθέτει μια γρήγορη και μια αργή συνιστώσα που σχετίζεται με σωματίδια που καθιζάνουν σε βρόγχους διαμέτρου μικρότερης του 1 mm και στις διακλαδώσεις τους όπου το στρώμα βλέννας παρουσιάζει συχνά ασυνέχεια (Schlesinger, 1988).

Όσο αφορά την ΑΙ περιοχή υπάρχουν πολύ λίγα στοιχεία για το ρυθμό καθαρισμού της σε ανθρώπους αλλά είναι γνωστό ότι τα σωματίδια παραμένουν για μεγαλύτερο διάστημα σε αυτή από ότι σε τμήματα του αναπνευστικού που καθαρίζονται άμεσα με μεταφορά με τη βλέννα (EPA, 2002). Γενικά ο καθαρισμός της περιοχής περιγράφεται ως μια πολυφασική διαδικασία, όπου κάθε φάση αντιπροσωπεύει ένα διαφορετικό μηχανισμό καθαρισμού, με υψηλούς χρόνους παραμονής μετά την έκθεση.

## 5. Το μοντέλο υπολογισμού ExDoM2

### 5.1 Γενικά

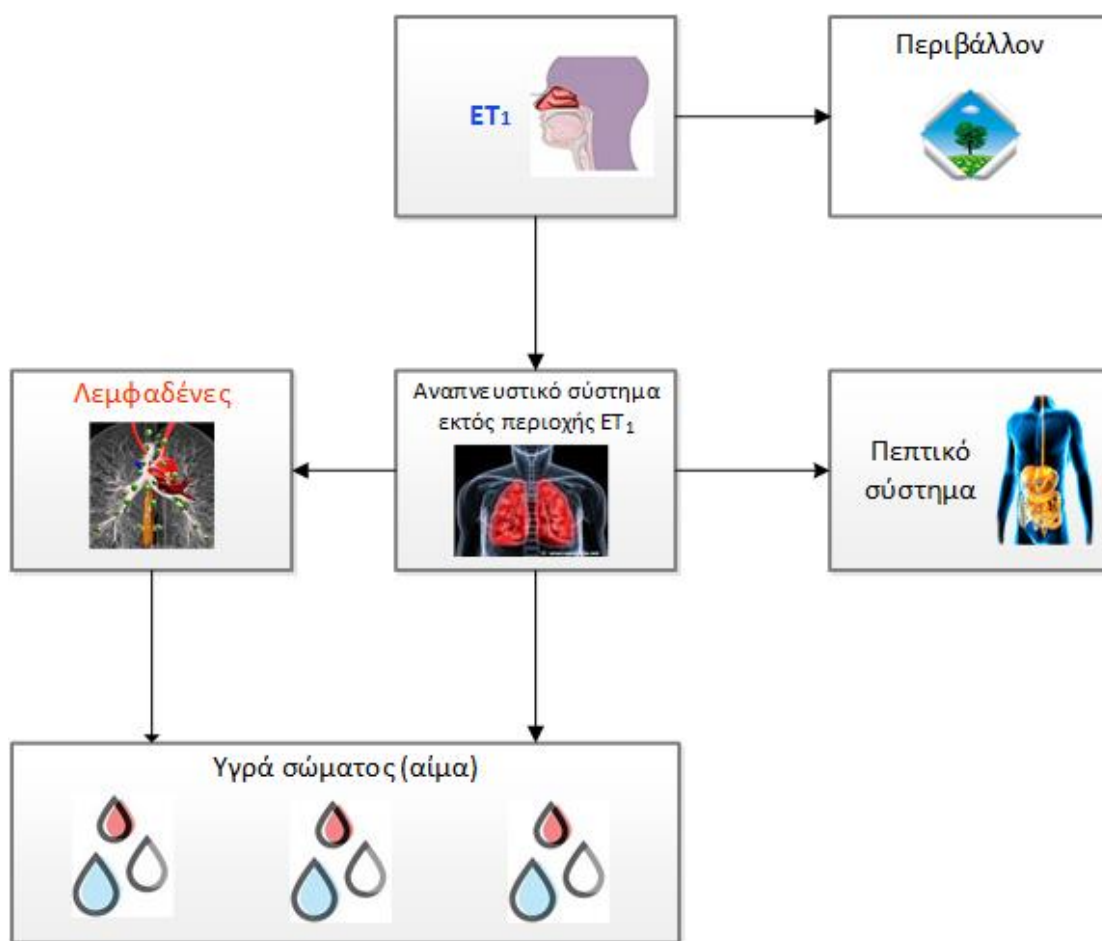
Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί αρκετά μοντέλα υπολογισμού της εναποτιθέμενης δόσης και της απομάκρυνσης/μεταφοράς αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα. Τα μοντέλα προσδιορισμού της εναποτιθέμενης δόσης μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες, τα στατιστικά/ημιεμπειρικά και στα μηχανιστικά ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού του ποσοστού εναπόθεσης σωματιδίων σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος. Αναλυτικότερα, στην πρώτη κατηγορία μοντέλων το ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα θεωρείται πως αποτελείται από διακριτές περιοχές, κάθε μια από τις οποίες δρα σαν φίλτρο στα σωματίδια που τη διαρρέουν με το ρεύμα του εισπνεόμενου και εκπνεόμενου αέρα. Η διαδικασία της εναπόθεσης αντιμετωπίζεται στατικά και η απόδοση κάθε φίλτρου υπολογίζεται από εξισώσεις που προέρχονται από καμπύλες προσέγγισης πειραματικών δεδομένων. Το πιο ευρέως διαδεδομένο και χρησιμοποιούμενο ημιεμπειρικό μοντέλο είναι το Μοντέλο του Ανθρώπινου Αναπνευστικού Συστήματος (Human Respiratory Tract model - HRTM) της διεθνούς υπηρεσίας ακτινοπροστασίας (International Committee on Radiological Protection - ICRP).

Τα ημιεμπειρικά μοντέλα μπορούν να εφαρμοστούν μόνο για τις συνθήκες κάτω από τις οποίες προέκυψαν τα πειραματικά δεδομένα. Υπό τις δεδομένες συνθήκες ωστόσο θεωρούνται πιο αξιόπιστα από τα μηχανιστικά καθώς λόγω της στατιστικής τους φύσης λαμβάνουν υπόψη όλους τους μηχανισμούς που επιδρούν στα σωματίδια.

Από την άλλη πλευρά τα μηχανιστικά μοντέλα προσομοιώνουν κάθε μηχανισμό εναπόθεσης σωματιδίων χωριστά και επιλύουν εξισώσεις μεταφοράς σωματιδίων για τον προσδιορισμό της εναποτιθέμενης δόσης. Αν και η δυναμική των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα καθορίζονται από πολλούς μηχανισμούς όπως η βαρυτική καθίζηση, καθίζηση λόγω διάχυσης, ανάσχεση και ενσφήνωση, θερμοφόρηση, ηλεκτροστατική καθίζηση, συσσωμάτωση, συμπύκνωση και πυρηνοποίηση τα μοντέλα δεν λαμβάνουν υπόψη όλους τους παραπάνω μηχανισμούς στον υπολογισμό της εναπόθεσης των σωματιδίων. Άλλες αδυναμίες κάποιων μηχανιστικών μοντέλων είναι πως δεν λαμβάνουν υπόψη την επίδραση των τοιχωμάτων των αεραγωγών και του στρώματος σωματιδίων που ήδη έχουν αποτεθεί εκεί, την επίδραση των δευτερευόντων αντίστροφων ρευμάτων ροής που δημιουργούνται στις διακλαδώσεις του αναπνευστικού.

Η σημαντικότερη ίσως αδυναμία για την πρακτική εφαρμογή τους είναι πως δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνθήκες μεταβαλλόμενης συγκέντρωσης έκθεσης ή παραμέτρων φυσιολογίας (Aleksandropoulou και Lazaridis, 2010).

Στο σχήμα της Εικόνας 21 φαίνονται τα βασικά στάδια της διαδικασίας μεταφοράς – καθαρισμού των σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα. Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, ένα μέρος των σωματιδίων που εναποτίθεται στην περιοχή ET<sub>1</sub> απομακρύνεται με εξωτερικές διαδικασίες, όπως είναι το φύσημα της μύτης. Στις άλλες περιοχές, ο καθαρισμός γίνεται ανταγωνιστικά ανάμεσα στην διαδικασία μεταφοράς των σωματιδίων προς το πεπτικό σύστημα και τους λεμφαδένες και την διαδικασία απορρόφησης των σωματιδίων από το αίμα. Οι ρυθμοί απομάκρυνσης των σωματιδίων εξαιτίας της διαδικασίας μεταφοράς και της διαδικασίας απορρόφησης στο αίμα, είναι ανεξάρτητοι. Επίσης θεωρείται ότι όλοι οι ρυθμοί καθαρισμού είναι ανεξάρτητοι από την ηλικία και το φύλο του εκτιθέμενου ατόμου.



Εικόνα 21 - Block διάγραμμα της διαδικασίας καθαρισμού από το αναπνευστικό σύστημα

## 5.2 Περιγραφή του μοντέλου ExDoM2

Το μοντέλο ExDoM2 (Chalvatzaki κ.ά., 2015) έχει βασιστεί και δομηθεί πάνω στο μοντέλο ExDoM (Αλεξανδροπούλου, 2010). Ουσιαστικά αποτελεί μία πλήρως αναβαθμισμένη έκδοση του μοντέλου ExDoM, το οποίο πλέον βασίζεται στο αναθεωρημένο μοντέλο του Ανθρώπινου Αναπνευστικού Συστήματος (Human Respiratory Tract Model - HRTM) της διεθνούς υπηρεσίας ακτινοπροστασίας ICRP -2015 (International

Committee on Radiological Protection ), σε σχέση με τον προκάτοχό του που χρησιμοποιεί το ICRP-1994. Ένα βασικό πλεονέκτημα του ExDoM2 μοντέλου είναι ότι ενσωματώνει ένα φαρμακοκινητικό μοντέλο PBPK, το οποίο δεν υπήρχε στην 1η έκδοση. Στην ενότητα 5.3 παρουσιάζονται αναλυτικά οι κύριες διαφορές των 2 μοντέλων. Ας δούμε όμως λίγο πιο αναλυτικά τα βασικά στοιχεία δομής του μοντέλου ExDoM2.

Η δόση σωματιδίων ανά ώρα υπολογίζεται με την βοήθεια της παρακάτω εξίσωσης (8) :

$$H = \sum BC_i DE_{i,j} \quad (8)$$

όπου:

$H$  ο ρυθμός δόσης των σωματιδίων ( $\mu\text{g}/\text{h}$ )

$B$  ο ρυθμός αναπνοής ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

$C_i$  η συγκέντρωση σωματιδίων μεγέθους  $i$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

$DE_{i,j}$  το ποσοστό εναπόθεσης σωματιδίων μεγέθους  $i$  στην περιοχή  $j$

Ο καθαρισμός μιας περιοχής του αναπνευστικού από το υλικό που έχει εναποτεθεί δίνεται από τη σχέση (9):

$$\frac{dR_i(t)}{dt} = -\lambda_i(t)R_i(t) \quad (9)$$

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

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

$$\lambda_i(t) = m_i(t) + s_i(t) \quad (10)$$

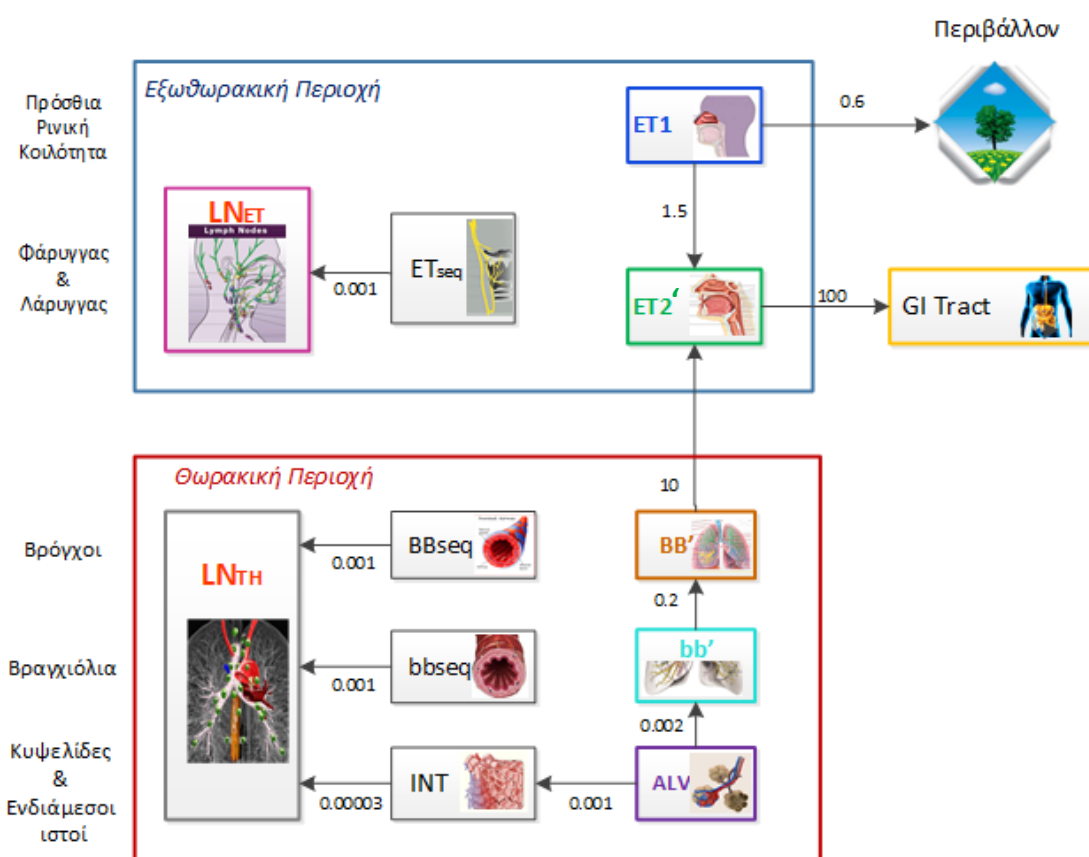
Ακόμα θεωρείται πως οι ρυθμοί μεταφοράς των σωματιδίων είναι ίδιοι για όλα τα υλικά και πως ο ρυθμός απορρόφησης στο αίμα διαφέρει για κάθε υλικό αλλά είναι ο ίδιος για όλες τις περιοχές του αναπνευστικού, συμπεριλαμβάνοντας τους λεμφαδένες, εκτός της πρόσθιας ρινικής κοιλότητας.

Για την προσομοίωση της χρονικής μεταβολής του ρυθμού καθαρισμού, κάθε περιοχή διακρίνεται σε τμήματα απ' όπου τα σωματίδια απομακρύνονται με σταθερό μέσο, αργό ή γρήγορο ρυθμό.

Η μεταφορά των σωματιδίων προς το φάρυγγα, απ' όπου οδηγούνται στο γαστρεντερικό σύστημα, και το περιβάλλον ακολουθεί την πορεία που διαγράφεται με τα βέλη στην Εικόνα 22.

Το μοντέλο ExDoM2 έχει σχεδιαστεί για τον υπολογισμό της έκθεσης, δόσης και συσσώρευσης σωματιδίων στο ΑΑΣ κατά τη διάρκεια αλλά και μετά το πέρας της έκθεσης

για συνθήκες μεταβαλλόμενης έκθεσης. Ο υπολογισμός της εναπόθεσης σωματιδίων στο ΑΑΣ γίνεται βάσει της προσέγγισης ICRP66 και τις διορθώσεις του ICRP-2015 με τη βοήθεια ημιεμπειρικών εξισώσεων ενώ ο καθαρισμός των σωματιδίων από το ICRP-2015. Οι δύο προσεγγίσεις συνδυάστηκαν στο μοντέλο ExDoM2 και επιπλέον έγινε επέκταση τους για τον ταυτόχρονο υπολογισμό της έκθεσης, της εφαρμοσμένης και της εσωτερικής δόσης για διάφορες κατανομές σωματιδίων απ' ευθείας από πειραματικά δεδομένα (συγκέντρωσης μάζας, αριθμού, κατανομής μάζας σωματιδίων). Επιπλέον το μοντέλο μπορεί να υπολογίσει έμμεσα την εναπόθεση και τον καθαρισμό από το ΑΑΣ για τα χημικά συστατικά των σωματιδίων που είναι πολύ σημαντικό για την μελέτη των επιπτώσεων στην υγεία από αιωρούμενα σωματίδια.



Εικόνα 22 - Αναθεωρημένο μοντέλο μεταφοράς σωματιδίων από κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος (ICRP 2015).

Κάθε περιοχή αποτελείται από τμήματα έτσι ώστε να εκφράζεται καλύτερα ο χρονικά μεταβαλλόμενος ρυθμός μεταφοράς. Οι ρυθμοί μεταφοράς σωματιδίων που εμφανίζονται πάνω στα βέλη είναι σε  $d^{-1}$ . Θεωρείται ότι το 0,2% των σωματιδίων που εναποτίθεται στις περιοχές ET2, BB' και bb' παρακρατείται στα τοιχώματα των αεραγωγών (ETseq, BBseq και bbseq αντίστοιχα)

### 5.3 Σύγκριση μοντέλου ExDoM και ExDoM2

Το μοντέλο ExDoM (Αλεξανδροπούλου, 2010) βασίστηκε στο πιο ευρέως διαδεδομένο και χρησιμοποιούμενο ημιεμπειρικό μοντέλο, το Μοντέλο του Ανθρώπινου Αναπνευστικού Συστήματος (Human Respiratory Tract Model - HRTM) της διεθνούς υπηρεσίας ακτινοπροστασίας ICRP (1994) (International Committee on Radiological Protection ), ενώ

το μοντέλο ExDoM2 (Chalvatzaki κ.ά., 2015) αποτελεί αναβάθμιση του ExDoM και βασίζεται στο αναθεωρημένο μοντέλο ICRP (2015). Επίσης το μοντέλο ExDoM2 ενσωματώνει ένα φαρμακοκινητικό (PBPK) μοντέλο.

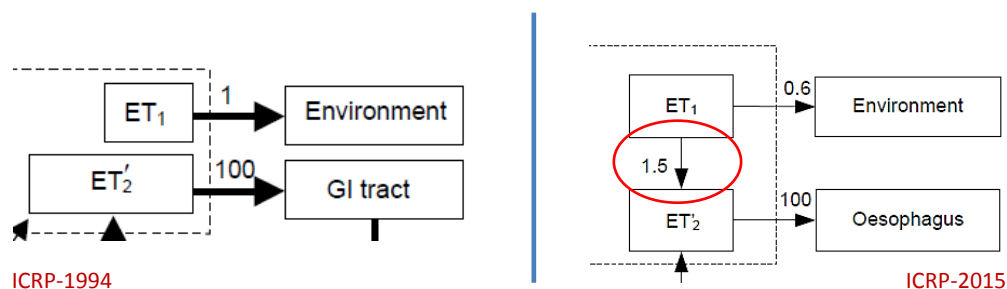
Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι κύριες διαφορές των δύο μοντέλων.:

#### *Νέες αναθεωρημένες τιμές στις παραμέτρους μεταφοράς της ET και TH περιοχής:*

Με βάση νέες πειραματικές μελέτες που διεξήχθησαν, εισήχθησαν στον νέο μοντέλο (ICRP-2015) περισσότερες και πιο αξιόπιστες τιμές στις παραμέτρους μεταφοράς των σωματιδίων στην εξωθωρακική περιοχή (ET), στην βρογχική περιοχή (BB), στην περιοχή των βρογχιολίων (bb) και στην περιοχή των κυψελίδων και των ενδιάμεσων ιστών (AI). Για παράδειγμα το νέο αναθεωρημένο μοντέλο θεωρεί μικρότερη την μεταφορά από τη BB και bb περιοχή προς του θωρακικούς λεμφαδένες LN<sub>TH</sub>, αλλά μεγαλύτερη την μεταφορά προς αυτούς από την AI περιοχή.

#### *Μεταφορά σωματιδίων μεταξύ των τμημάτων ET<sub>1</sub> και ET<sub>2</sub>:*

Παρατηρείται μεταφορά σωματιδίων στην εξωθωρακική περιοχή ET, μεταξύ των τμημάτων ET<sub>1</sub> και ET<sub>2</sub> (Εικόνα 23). Στο ICRP-1994 μοντέλο θεωρήθηκε, σύμφωνα και με τα διαθέσιμα στοιχεία, ότι η εναπόθεση στο τμήμα ET<sub>1</sub> είναι μεγαλύτερη από αυτή στο ET<sub>2</sub> κατά την διάρκεια της αναπνοής από τη μύτη και ότι τα περισσότερα σωματίδια που εναποτίθενται στο τμήμα ET<sub>1</sub>, καθαρίζονται από φύσημα της μύτης και κάποια λίγα καθαρίζονται στο ET<sub>2</sub> τμήμα ή μέσω αυτού στο πεπτικό σε ένα βάθος χρόνου της τάξεως των μερικών ωρών. Παρόλα αυτά και εξαιτίας της έλλειψης ποσοτικών δεδομένων, αυτές οι παραδοχές εφαρμόστηκαν σε μια πιο απλή μορφή. Θεωρήθηκε ότι τα σωματίδια που εναποτίθενται στην ρινική δίοδο κατά την αναπνοή, μοιράζονται ίσα μεταξύ του τμήματος ET<sub>1</sub> και της οπίσθιας ρινικής εισόδου (posterior nasal passage), η οποία είναι μέρος του τμήματος ET<sub>2</sub>. Σύμφωνα όμως με νέες πειραματικές μελέτες (Smith et al, 2011), δημιουργήθηκε μία πιο ακριβής αναπαράσταση της εναπόθεσης και του καθαρισμού στην εξωθωρακική περιοχή (ET). Τα αποτελέσματα από ένα γκρουπ εκτιθέμενων ατόμων, έδειξαν ότι η κατανομή της εναπόθεσης των σωματιδίων στους αεραγωγούς της εξωθωρακικής περιοχής (ET), μπορεί να χαρακτηριστεί από ένα μέσο εναποτιθέμενο κλάσμα της τάξης του 65% στο τμήμα ET<sub>1</sub> και 35% στο ET<sub>2</sub>. Για να υπολογιστούν λοιπόν τα κλάσματα των εισπνεόμενων σωματιδίων που εναποτίθενται στα τμήματα ET<sub>1</sub> και ET<sub>2</sub>, θεωρήθηκε ότι το άθροισμα των κλασμάτων αυτών, αποτελούν και την ολική εναπόθεση στην εξωθωρακική περιοχή (ET), επομένως καταλήγουμε στο 65% και 35% αντίστοιχα.



Εικόνα 23 - Μεταφορά σωματιδίων μεταξύ των τμημάτων ET<sub>1</sub> και ET<sub>2</sub> στο νέο μοντέλο ICRP-2015

Σε πειραματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν (Smith, 2011) σε συνθήκες ελαφριάς εργασίας, σε ενήλικες εργαζόμενους άντρες που εκτέθηκαν σε σωματίδια 5μm, τιμή η οποία αποτελεί την συνιστώμενη τιμή (Median Aerodynamic Diameter), πήραμε τα αποτελέσματα των κλασμάτων εναπόθεσης στα διάφορα τμήματα του αναπνευστικού, που φαίνονται στον πίνακα της Εικόνας 24.

Περιοχή	Άρρεν – Εναπόθεση (%)
ET <sub>1</sub>	47.94
ET <sub>2</sub>	25.82
BB	1.78
bb	1.10
AI	5.32
Total	81.96

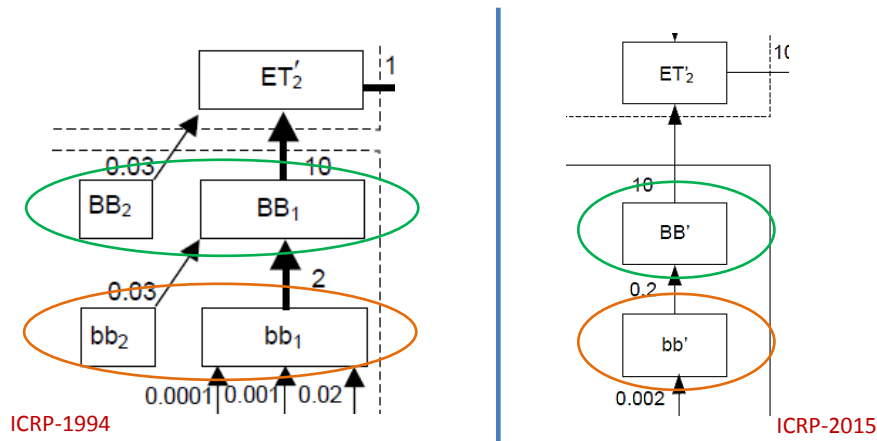
- Τα σωματίδια θεωρήθηκε ότι έχουν πυκνότητα  $3.0g/cm^3$  και συντελεστή σχήματος 1.5.
- Οι αεροδυναμικές διαμέτροι των σωματιδίων, θεωρήθηκε ότι ακολουθούν κανονική κατανομή με γεωμετρική απόκλιση  $\sigma_g=2.50$ .
- Η ελαφρά εργασία καθορίζεται ως εξής :
  - 2.5 ώρες καθιστική εργασία κατά την οποία εισπνέεται  $0.54m^3/h$  αέρας
  - 5.5 ώρες ελαφριά εργασία κατά την οποία εισπνέεται  $1.5m^3/h$  αέρας
  - Και στις δύο δραστηριότητες έχουμε εισπνοή από την μύτη

**Εικόνα 24 - Εναπόθεση ανά περιοχή, εισπνεόμενων σωματιδίων 5μm MAD, σε εκτιθέμενους εργαζόμενους που εκτελούν ελαφρά εργασία (ICRP-2015).**

*Αντικατάσταση –απλοποίηση τμημάτων τα οποία προσομοιώνουν την κατακράτηση των εναποτιθέμενων σωματιδίων στις περιοχές BB και bb. ( $BB_1, BB_2$  &  $bb_1, bb_2 \Rightarrow BB' \& bb'$ ):*

Το αρχικό μοντέλο (ICRP-1994), βασισμένο σε πειραματικές μελέτες, περιλαμβάνει μία αργή φάση καθαρισμού των εναποτιθέμενων σωματιδίων στην BB και bb περιοχή (τμήματα  $BB_2$  &  $bb_2$  στο αρχικό μοντέλο) με ένα μέσο όρο ημίσειας ζωής 23 ημερών. Στο νέο μοντέλο (ICRP-2015) έγινε μία νέα προσέγγιση για την αργή φάση καθαρισμού (αργό στρώμα βλέννας) στο βρογχικό δέντρο, η οποία βασίστηκε σε πρόσφατα πειράματα σε ανθρώπους.

Οι περισσότερες πειραματικές μελέτες, όπως και αυτή του Folk κ.ά (1997,1999), δείχνουν ότι μόνο ένα κλάσμα εναποτιθέμενων σωματιδίων στην περιοχή bb καθαρίζεται αργά, και σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα κυμαίνεται γύρω στο 25%. Έτσι λοιπόν θεωρήθηκε ότι ο αργός καθαρισμός συμβαίνει μόνο στις χαμηλότερες γενιές των βρογχολίων, όπως προτάθηκε και από τον Camner κ.ά (1997), και το μοντέλο απλοποιήθηκε εφαρμόζοντας την παραπάνω παραδοχή για όλα τα σωματίδια που εναποτίθενται στην bb περιοχή. Επίσης θεωρήθηκε ότι εφαρμόζεται και σε όλα τα σωματίδια τα οποία καθαρίζονται από το τμήμα AI προς το bb τμήμα, σε αντίθεση με το ICRP-1994, που λαμβάνει υπόψη ότι ο αργός καθαρισμός λαμβάνει χώρα μόνο για τα σωματίδια που εναποτίθενται απευθείας στις περιοχές BB και bb.



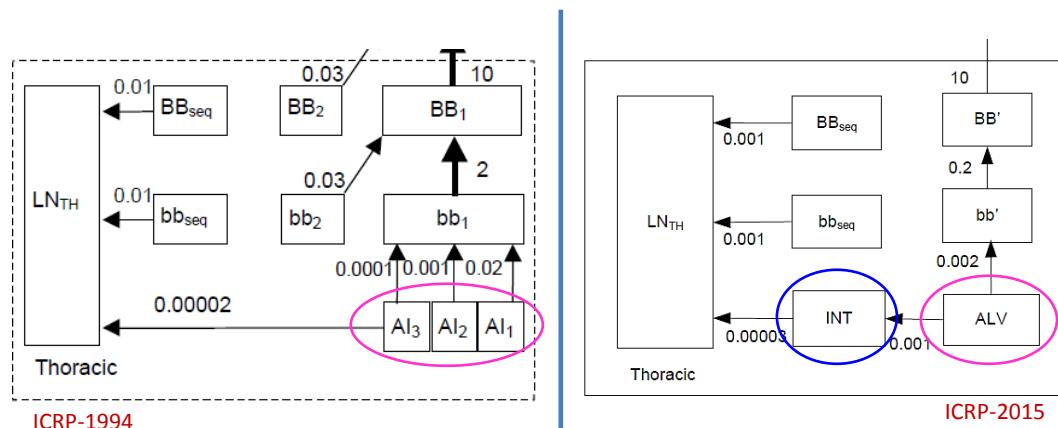
Εικόνα 25 - Αντικατάσταση των τμημάτων  $BB_1, BB_2$  &  $bb_1, bb_2$  από τα  $BB'$  &  $bb'$  αντίστοιχα, σύμφωνα με το ανανεωμένο μοντέλο ICRP-2015, στην βρογχική περιοχή.

Όλες αυτές οι αλλαγές λοιπόν, οδήγησαν απλοποίηση του μοντέλου : Ένα μόνο τμήμα  $BB'$  αντικαθιστά τα τμήματα  $BB_1$  (γρήγορο στρώμα βλέννας) και  $BB_2$  (αργό στρώμα βλέννας) και ένα τμήμα  $bb'$  αντικαθιστά τα τμήματα  $bb_1$  και  $bb_2$  αντίστοιχα (Εικόνα 25).

*Αντικατάσταση των 3 τμημάτων  $AI_1, AI_2$  και  $AI_3$  της περιοχής AI από το τμήμα ALV και προσθήκη τμήματος ενδιάμεσων ιστών INT:*

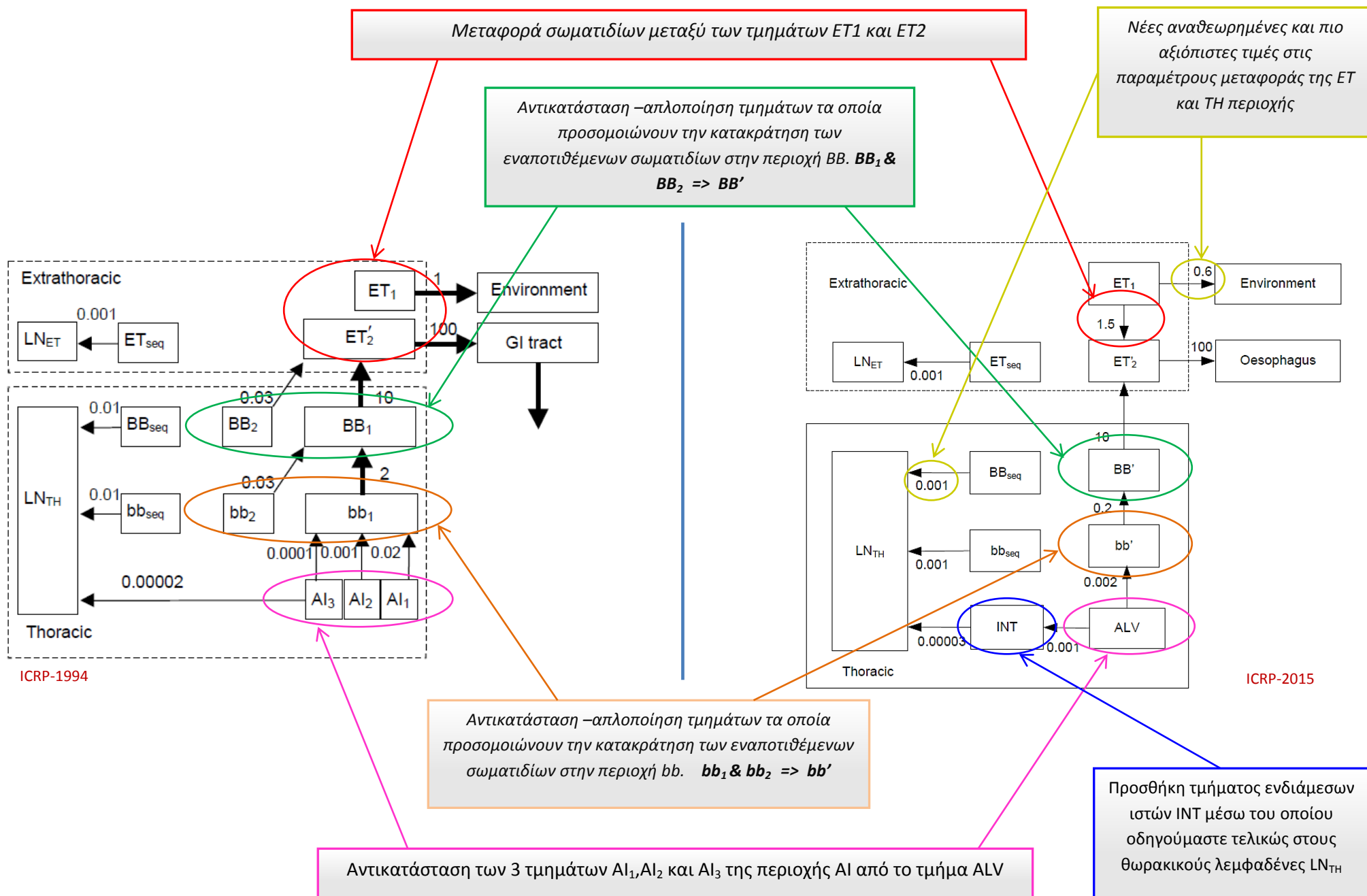
Στο αρχικό μοντέλο ICRP-1994, η περιοχή AI αποτελείται από 3 τμήματα :  $AI_1, AI_2$  και  $AI_3$ , τα οποία κυρίως καθαρίζουν προς το βρογχικό δέντρο, σε ρυθμούς 0.02, 0.001 και  $0.0001d^{-1}$  αντίστοιχα (χρόνοι ημίσειας ζωής 35, 700 και 7000 days) .

Μετά από πολλές πειραματικές νέες μελέτες που έγιναν από την ICRP τα τελευταία χρόνια, αλλά και μετά από επαναξιολόγηση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων της, που χρησιμοποιήθηκαν στο ICRP-1994, η ICRP δημιούργησε ένα νέο τμήμα που προσομοιώνει την μεταφορά από την AI περιοχή και αντικαθιστά τα  $A_1, A_2$  και  $A_3$ . Έτσι το νέο μοντέλο εξελίχθηκε για την περιοχή AI και έγινε πιο απλό και ρεαλιστικό σε σχέση με τον προκάτοχό του. Αντί λοιπόν να έχουμε 3 τμήματα στην AI περιοχή έχουμε μόνο ένα νέο τμήμα, το ALV, το οποίο καθαρίζει τόσο προς το βρογχικό δέντρο όσο και προς ένα νέο τμήμα, αυτό των ενδιάμεσων ιστών (INT), μέσω του οποίου οδηγούμαστε τελικώς στους θωρακικούς λεμφαδένες  $LN_{TH}$  (Εικόνα 26).



Εικόνα 26 - Αντικατάσταση των 3 τμημάτων  $AI_1, AI_2$  και  $AI_3$  της περιοχής AI από το τμήμα ALV και προσθήκη τμήματος ενδιάμεσων ιστών INT





Το νέο αυτό τμήμα των ενδιάμεσων ιστών (INT), δεσμεύει ένα σημαντικό κλάσμα εναποτιθέμενων σωματιδίων της περιοχής AI :

$$\left[ \frac{m_I}{(m_I + m_T)} \right] = 0,32 \quad (11)$$

όπου :

$m_T = 0,002d^{-1}$  ο ρυθμός καθαρισμού από το τμήμα ALV προς την περιοχή βρογχιολίων bb'

$m_I = 0,001d^{-1}$  ο ρυθμός καθαρισμού από το τμήμα ALV προς το τμήμα των ενδιάμεσων ιστών INT

$m_{LN} = 3 * 10^{-5}d^{-1}$  ο ρυθμός καθαρισμού από το τμήμα των ενδιάμεσων ιστών INT προς τους θωρακικούς λεμφαδένες LN<sub>TH</sub>

*Kuempel et al(2001)*

Στα block διαγράμματα των δύο μοντέλων, φαίνονται καθαρά οι κύριες διαφοροποιήσεις των δύο μοντέλων (Εικόνα 27).

### Προσθήκη φαρμακοκινητικού μοντέλου PBPK

Η μοντελοποίηση PBPK (Physiologically based pharmacokinetic modeling), είναι μία μαθηματική τεχνική μοντελοποίησης η οποία προβλέπει την απορρόφηση, την διανομή, τον μεταβολισμό και την απέκκριση συνθετικών ή φυσικών χημικών στοιχείων στο ανθρώπινο σώμα.



Εικόνα 28 - PBPK μοντέλο

Αποτελεί θεμελιώδους σημασίας για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς χημικών στοιχείων και φαρμάκων καθώς και για την εκτίμηση της λειτουργίας τους στο ανθρώπινο οργανισμό. Η μελέτη της φαρμακοκινητικής συμπεριλαμβάνει πειραματικές και θεωρητικές προσεγγίσεις. Οι θεωρητικές προσεγγίσεις αφορούν στην ανάπτυξη φαρμακοκινητικών μοντέλων με τα οποία προβλέπεται η διάθεση του χημικού στοιχείου.

Η χρησιμότητα και η δυνατότητα, που παρέχει ένα μαθηματικό μοντέλο PBPK στην πρόβλεψη της φαρμακοκινητικής, εξαρτάται από τη σωστή επιλογή και ανάπτυξη μαθηματικών εξισώσεων, οι οποίες παραμετροποιούν τους κυριότερους παράγοντες της κινητικής διαδικασίας. Οι παράγοντες αυτοί (μεταβλητές) υπολογίζονται προσαρμόζοντας το μοντέλο στα πειραματικά δεδομένα. Τα μαθηματικά μοντέλα αυτά προσομοιώνουν το ρυθμό διαδικασίας απορρόφησης, κατανομής και απομάκρυνσης και περιγράφουν συγκεντρώσεις του στοιχείου στον οργανισμό σε σχέση με το χρόνο.

Στην περίπτωση μας το PBPK εφαρμόζεται για τα εξής 7 μέταλλα :

- Mn
- Pb
- Cd
- Cr-III & Cr-VI
- As-III & As-V

Για τη συμπεριφορά των μετάλλων As,Pb και Mn, σε κάθε όργανο περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση (12) :

$$\frac{dA_{i,j}}{dt} = Q_i \times (C_{a,j} - C_{v,j}) - Metabolism_{i,j} - Elimination_{i,j} \quad (12)$$

όπου :

$A_{i,j}$	η δόση του στοιχείου $j$ στο όργανο $i$ ( $\mu g$ )
$Q_i$	ο ρυθμός ροής του αίματος στο όργανο $i$ (L/h)
$C_{a,j}$	η αρτηριακή συγκέντρωση του στοιχείου $i$ ( $\mu g/L$ )
$C_{v,j}$	η φλεβική συγκέντρωση του στοιχείου $j$ ( $\mu g/L$ )

Η συμπεριφορά του Cr, σε κάθε όργανο περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση (13):

$$\frac{dA_i}{dt} = KIN \times C_{plasma} - KOUT \times C_i - Metabolism_i - Elimination_i \quad (13)$$

όπου :

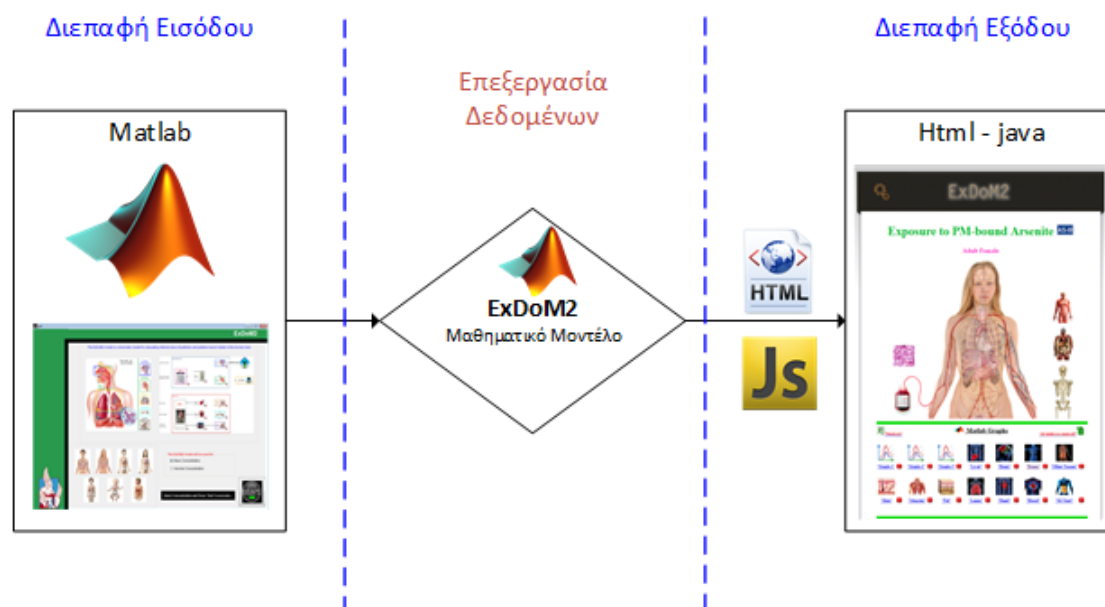
$A_i$	η δόση του στοιχείου Cr στο όργανο $i$ ( $\mu g$ )
$KIN$	ο καθαρισμός του Cr από το πλάσμα στο όργανο (L/h)
$KOUT$	ο καθαρισμός του Cr από το όργανο στο πλάσμα (L/h)
$C_{plasma}$	η συγκέντρωση του Cr στο πλάσμα ( $\mu g/L$ )
$C_i$	η συγκέντρωση του Cr στο όργανο ( $\mu g/L$ )

## 6. Σχεδίαση & Λειτουργία Γραφικής Διεπαφής (GUI)

### 6.1 Δομή GUI πλατφόρμας

Η σχεδίαση του GUI είναι ένα βασικό κομμάτι για την εμφάνιση και τη λειτουργικότητα της πλατφόρμας. Τα κατάλληλα γραφικά, η εύχρηστη δομή, η εύκολη περιήγηση και η δυνατότητα εναλλακτικής απεικόνισης δεδομένων και διαφορετικών τρόπων εκτέλεσης ενεργειών κάνουν την πλατφόρμα ένα άμεσο και εύχρηστο εργαλείο στα χέρια των χρηστών.

Για την πραγματοποίηση του κατασκευαστικού μέρους της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τρία δημοφιλή εργαλεία. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν: Matlab για την δημιουργία του GUI εισόδου δεδομένων και για την δημιουργία του μαθηματικού μοντέλου ExDoM2 (το μοντέλο ExDoM2 αναπτύχθηκε από την υποψήφια Διδάκτωρ Χαλβατζάκη Ελευθερία σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab), HTML και java για την κατασκευή των scripts της δυναμικής ιστοσελίδας για την εμφάνιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου (Εικόνα 29).



Εικόνα 29 - Block διάγραμμα πλατφόρμας ExDoM2

### 6.2 Λειτουργία και αξιολόγηση Συστήματος

Το αποτέλεσμα της εργασίας ήταν η δημιουργία μίας φιλική προς τον χρήστη (user-friendly) πλατφόρμας λογισμικού (GUI), η οποία επιτρέπει στον χρήστη την εισαγωγή των παραμέτρων αλλά και των δεδομένων τα οποία θα χρησιμοποιήσει το μοντέλο για την εφαρμογή του και καταφέρνει να παρουσιάσει σε μία σελίδα web, όλα τα προσφερόμενα αποτελέσματα μέσα από ένα απλό και διαδραστικό περιβάλλον. Η πλατφόρμα αυτή σχεδιάστηκε με οδηγό την ευκολία χρήσης από τον χρήστη όσο αλλά και την ανθεκτικότητα σε βάθος χρόνου. Επίσης τα εργαλεία και ο τρόπος που χρησιμοποιήθηκαν δίνουν την δυνατότητα, κάτω από συγκεκριμένες τροποποιήσεις να παραμετροποιηθεί για την εφαρμογή και παρουσίαση των αποτελεσμάτων οποιουδήποτε αντίστοιχου μοντέλου.

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγράψουμε αναλυτικά την λειτουργία της πλατφόρμας τόσο όσον αφορά την διεπαφή εισόδου, η οποία είναι και πιο περίπλοκη διότι αφορά την ορθή

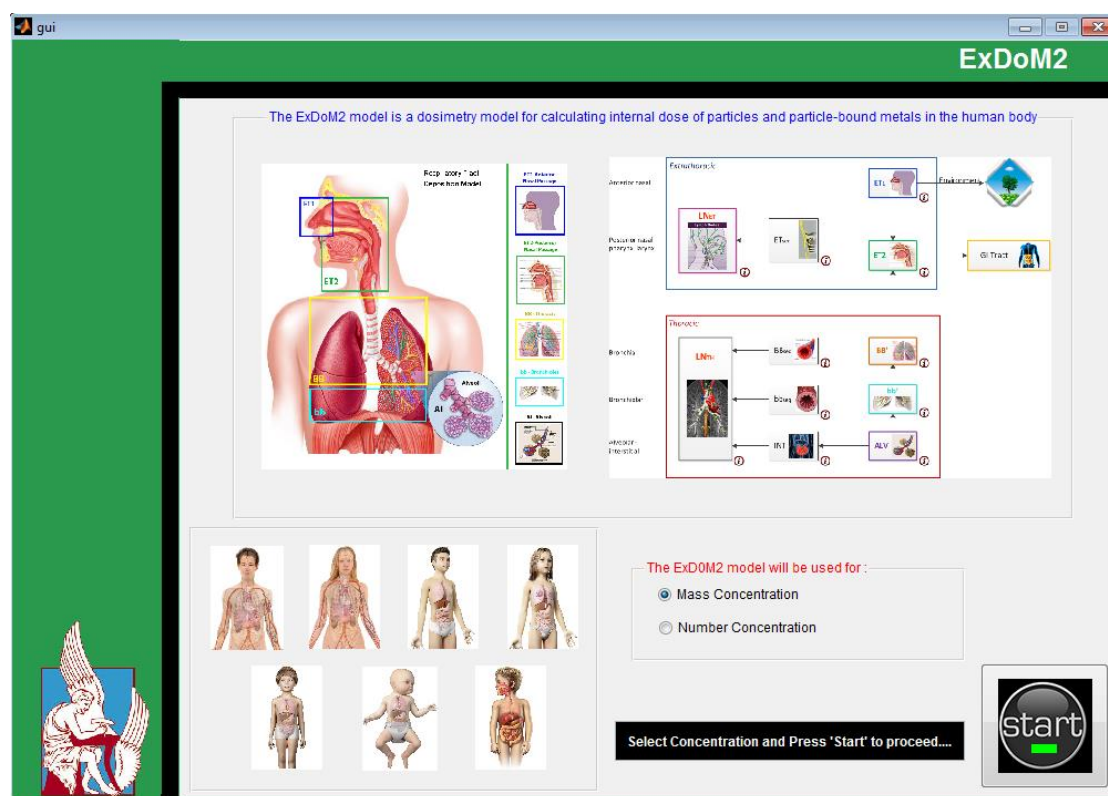
παραμετροποίηση του μοντέλου, όσο και την διεπαφή εξόδου, μέσω της οποίας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στον χρήστη.

### 6.3 Διεπαφή εισόδου δεδομένων – παραμετροποίησης μοντέλου

#### 6.3.1 Γραφικό περιβάλλον εκκίνησης ExDoM2

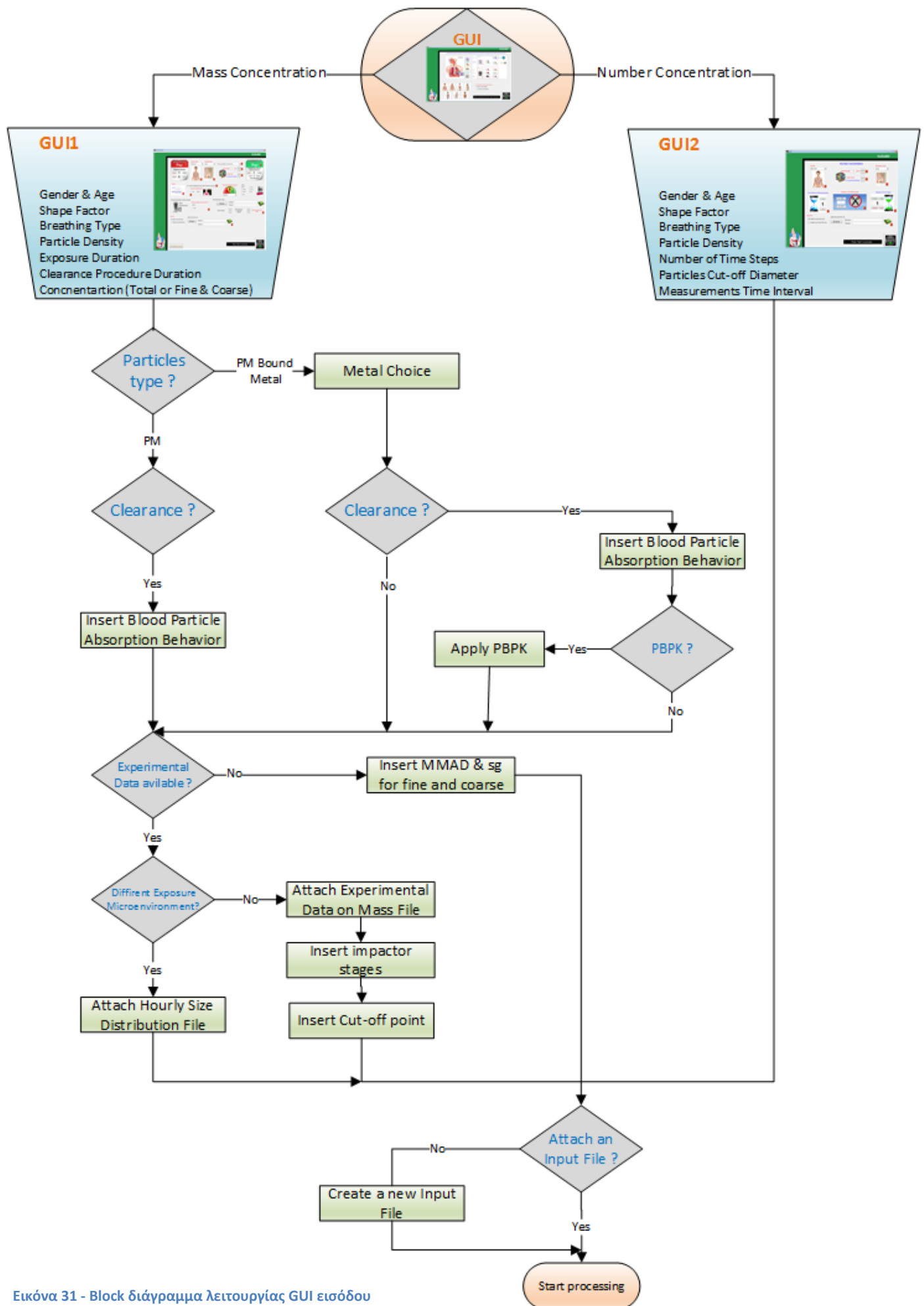
Η πλατφόρμα αρχικά εμφανίζεται με ένα γραφικό περιβάλλον που μας ζητάει των τύπο της συγκέντρωσης των αιρούμενων σωματιδίων που έχουμε στην διάθεσή μας. Υπάρχουν δύο διαθέσιμες επιλογές (Εικόνα 30) :

- η συγκέντρωση μάζας (mass concentration) η οποία αναφέρεται στη μάζα των σωματιδίων ανά μονάδα όγκου του μίγματος σε  $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ .
- η συγκέντρωση με βάση τον αριθμό (number concentration) η οποία αναφέρεται στον αριθμό των σωματιδίων ανά μονάδα όγκου του μίγματος σε  $\#/\text{cm}^3$ .



Εικόνα 30 - Γραφικό περιβάλλον εκκίνησης πλατφόρμας

Στην Εικόνα 31 παρουσιάζεται το block διάγραμμα που στηρίχθηκε η ανάπτυξη της διεπαφής εισόδου δεδομένων, για το μοντέλο και οι βασικές επιλογές που μπορεί να κάνει ο χρήστης για να εφαρμόσει το μοντέλο.



Εικόνα 31 - Block διάγραμμα λειτουργίας GUI εισόδου

### 6.3.2 Συγκέντρωση μάζας (mass concentration)

Επιλέγοντας συγκέντρωσης μάζας (mass concentration) στο γραφικό περιβάλλον εκκίνησης, τότε εμφανίζεται ένα νέο γραφικό περιβάλλον (Εικόνα 32) που επιτρέπει στο χρήστη να παραμετροποιήσει κατάλληλα το μοντέλο για την εφαρμογή του, έχοντας στην διάθεση του δεδομένα συγκέντρωσης μάζας σωματιδίων σε  $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ .

The screenshot shows the 'ExDoM2 Model' window. The interface is divided into several sections:   
 - \*\*Exposure duration\*\*: Two spinners for 'Days' (set to 1) and 'Hours' (set to 0).   
 - \*\*Gender & Age\*\*: A dropdown menu set to 'Male Adult'.   
 - \*\*Breathing Type\*\*: A dropdown menu set to 'Nose'.   
 - \*\*Total Concentration in the Input File\*\*: A dropdown menu.   
 - \*\*Particle density\*\*: A spinner set to '1.5 g/cm<sup>3</sup>'.   
 - \*\*Shape Factor\*\*: A spinner set to '1' with a note '(1 for spherical particles)'.   
 - \*\*Calculation for clearance\*\*: Two spinners for 'Days' (set to 1) and 'Hours' (set to 0) after initial intake.   
 - \*\*Particles\*\*: Radio buttons for 'PM' (selected) and 'PM Bound-Metal'.   
 - \*\*Continue calculating the dose after the Clearance procedure': A checkbox.   
 - \*\*Experimental Data on Mass available': A checkbox.   
 - \*\*Size Distribution': An icon of a container.   
 - \*\*Input File': Radio buttons for 'Attach an Input File (.xls)' (selected) and 'Create a new Input File (.xls)'.   
 - \*\*Attach the Input File .xls': A 'Browse' button and fields for 'Pathname:' and 'Filename:'.   
 - \*\*Print Variables to Cmd\_VW': A button.   
 - \*\*Start button': A large button labeled 'start' with a green progress bar.   
 - \*\*Footer': A black bar with the text 'Press 'Start' to proceed....'

Εικόνα 32 - Mass Concentration αρχική οθόνη

Εδώ ο χρήστης έχει τις εξής δυνατότητες :

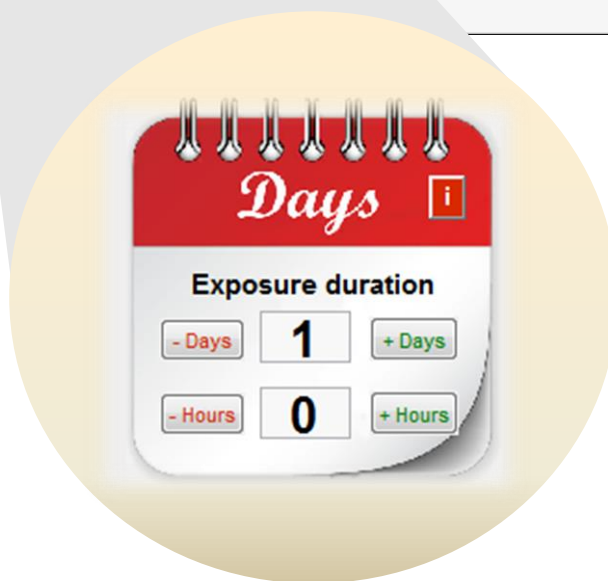
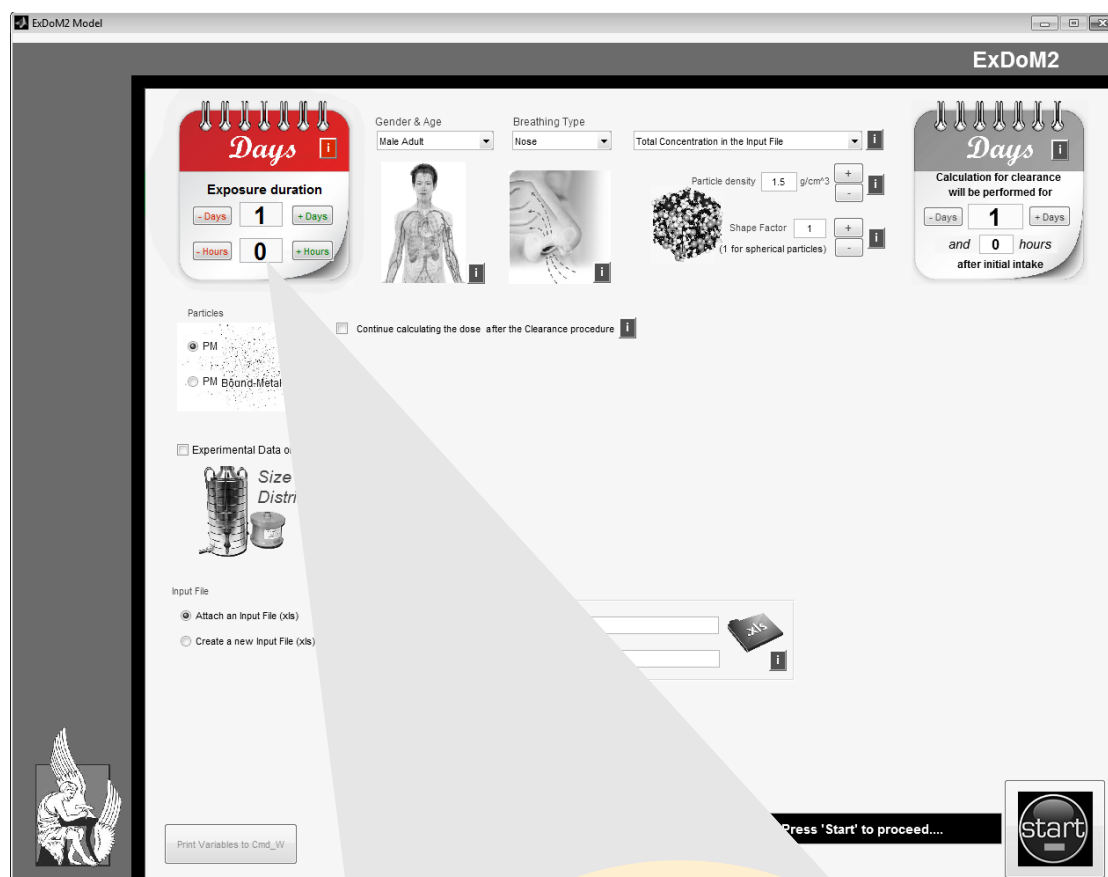
- Επιλογή χρόνου έκθεσης με ακρίβεια ωρών (Exposure Duration)
- Επιλογή φύλου και ηλικίας εκτιθέμενου ατόμου (Gender & Age)
- Επιλογή τρόπου εισπνοής (Breathing Type)
- Επιλογή τύπου δεδομένων συγκέντρωσης σωματιδίων (Concentration type in the input file)
- Εισαγωγή πυκνότητας σωματιδίων (Particle Density)
- Εισαγωγή συντελεστή σχήματος σωματιδίων (Shape Factor)
- Είδος σωματιδίων (PM or PM-Bound-Metal)
- Εφαρμογή διαδικασίας καθαρισμού (Clearance)
- Εισαγωγή πειραματικών δεδομένων κατανομής μεγέθους σωματιδίων (Experimental Data on Mass – Size Distribution)
- Εισαγωγή αρχείου εισόδου (Input File)

Ας δούμε όμως ξεχωριστά το κάθε πεδίο και την ορθή του χρήση, ώστε να παραμετροποιηθεί σωστά το μοντέλο με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα εισόδου του χρήστη.



### 6.3.2.1 Διάρκεια έκθεσης (Exposure Duration)

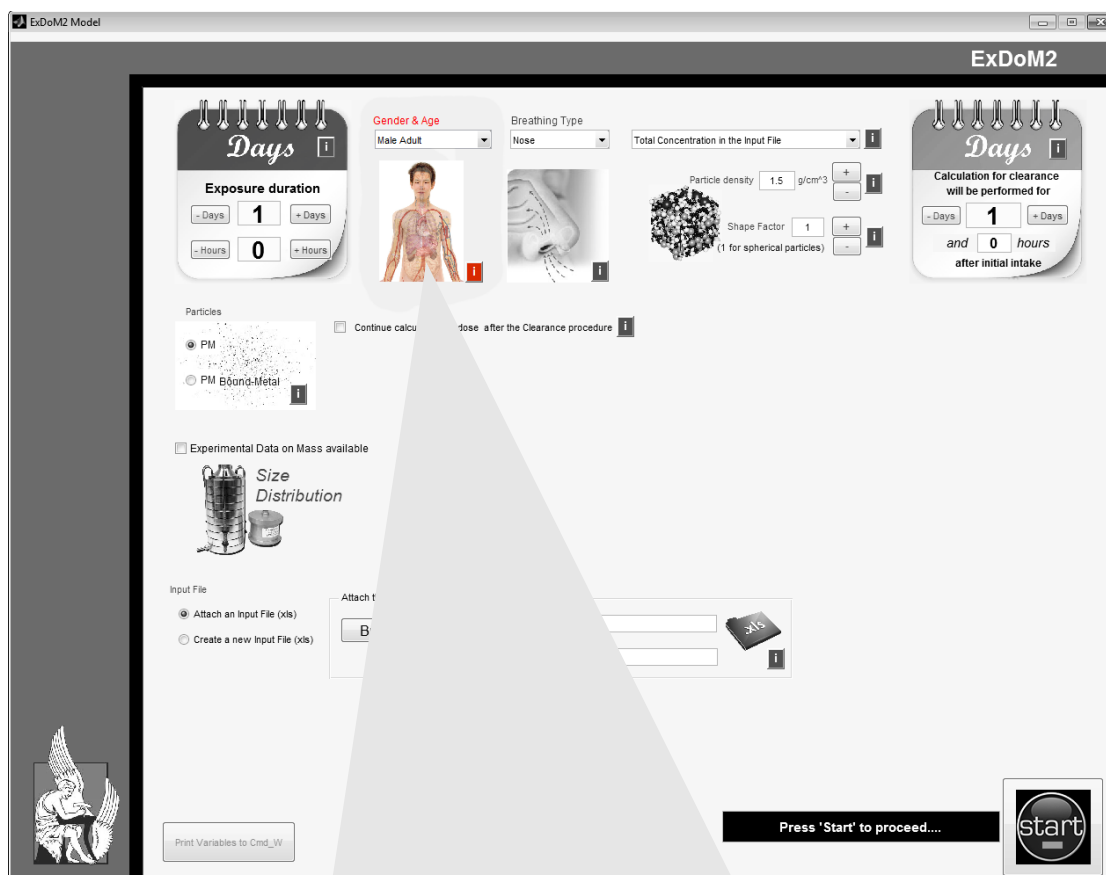
Εδώ ο χρήστης εισάγει την χρονική διάρκεια έκθεση του ατόμου με ακρίβεια ωρών. Κάνοντας χρήση των κουμπιών “+Days” και “-Days”, προσθέτει και αφαιρεί αντίστοιχα ημέρες, ενώ με την χρήση των κουμπιών “+hours” και “-hours”, προσθέτει και αφαιρεί ώρες (Εικόνα 33).



Εικόνα 33 - Διάρκεια έκθεσης (Exposure Duration)

### 6.3.2.2 Φύλο και ηλικία εκτιθέμενου ατόμου (Gender & Age)

Εδώ ο χρήστης επιλέγει την ηλικία και το φύλο του εκτιθέμενου ατόμου (Εικόνα 34).



Εικόνα 34 - Φύλο και ηλικία εκτιθέμενου ατόμου (Gender & Age)

Οι διαθέσιμες επιλογές για το φύλο και την ηλικία του εκτιθέμενου ατόμου είναι (Εικόνα 35) :

**Male - Adult**



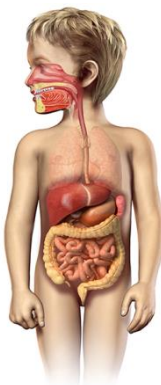
**Male – 15 years old**



**Male – 10 years old**



**Male – 5 years old**



**Female - Adult**



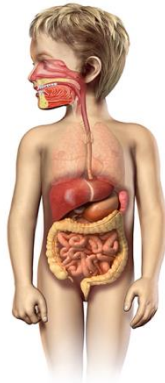
**Female – 15 years old**



**Female – 10 years old**



**Female – 5 years old**



**Baby – 1 year old**



Εικόνα 35 - Διαθέσιμες επιλογές εκτιθέμενου ατόμου με βάση το φύλο και την ηλικία

Τα διαθέσιμα επίπεδα δραστηριότητας (κόπωση) για τους ενήλικους (άρρεν ή θήλυ) είναι :

- 1→ Ύπνος (Sleep)
- 2→ Ανάπαυση (Rest)
- 3→ Ελαφριά εργασία (Light exercise)
- 4→ Βαριά εργασία (Heavy exercise)



(Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται στην **στήλη F**, στο αρχείο εισόδου)

Τα διαθέσιμα επίπεδα δραστηριότητας (κόπωση) για έφηβους, παιδιά και μωρά (άρρεν ή θήλυ), **χωρίς χρήση του PBPΚ μοντέλου** είναι:

- 1→ Ύπνος (Sleep)
- 2→ Ανάπαυση (Rest)
- 3→ Ελαφριά εργασία (Light exercise)



(Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται στην **στήλη F**, στο αρχείο εισόδου)

Τα διαθέσιμα επίπεδα δραστηριότητας (κόπωση) για έφηβους, παιδιά και μωρά (άρρεν ή θήλυ), **με χρήση του PBPΚ μοντέλου** είναι:

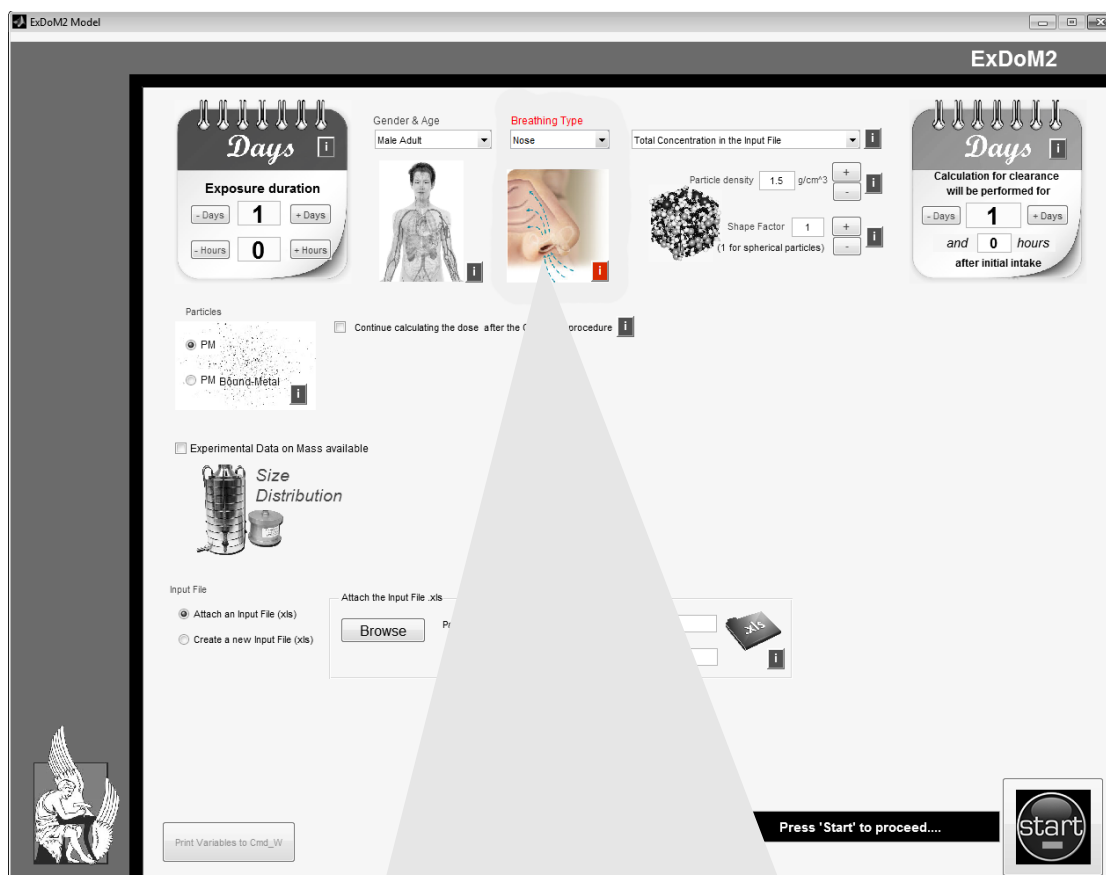
- 1→ Ύπνος (Sleep)
- 2→ Ανάπαυση (Rest)



(Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται στην **στήλη F**, στο αρχείο εισόδου)

### 6.3.2.3 Τρόπος εισπνοής εκτιθέμενου ατόμου (Breathing Type)

Εδώ ο χρήστης επιλέγει τον τύπο αναπνοής του εκτιθέμενου ατόμου (Εικόνα 36).



Εικόνα 36 - Τρόπος εισπνοής εκτιθέμενου ατόμου (Breathing Type)

Οι διαθέσιμες επιλογές για το τύπο της εισπνοής είναι μέσω του στόματος και μέσω της μύτης (Εικόνα 37).

**Αναπνοή από την μύτη  
(nose-breather)**



**Αναπνοή από το στόμα  
(mouth-breather)**



Εικόνα 37 - Διαθέσιμες επιλογές τύπου αναπνοής

Το κλάσμα του ολικού αέρα που διέρχεται από την μύτη ( $F_n$ ), ανάλογα με την δραστηριότητα που εκτελεί το εκτιθέμενο άτομο, φαίνεται στον Πίνακα 4 (ICRP-1994).

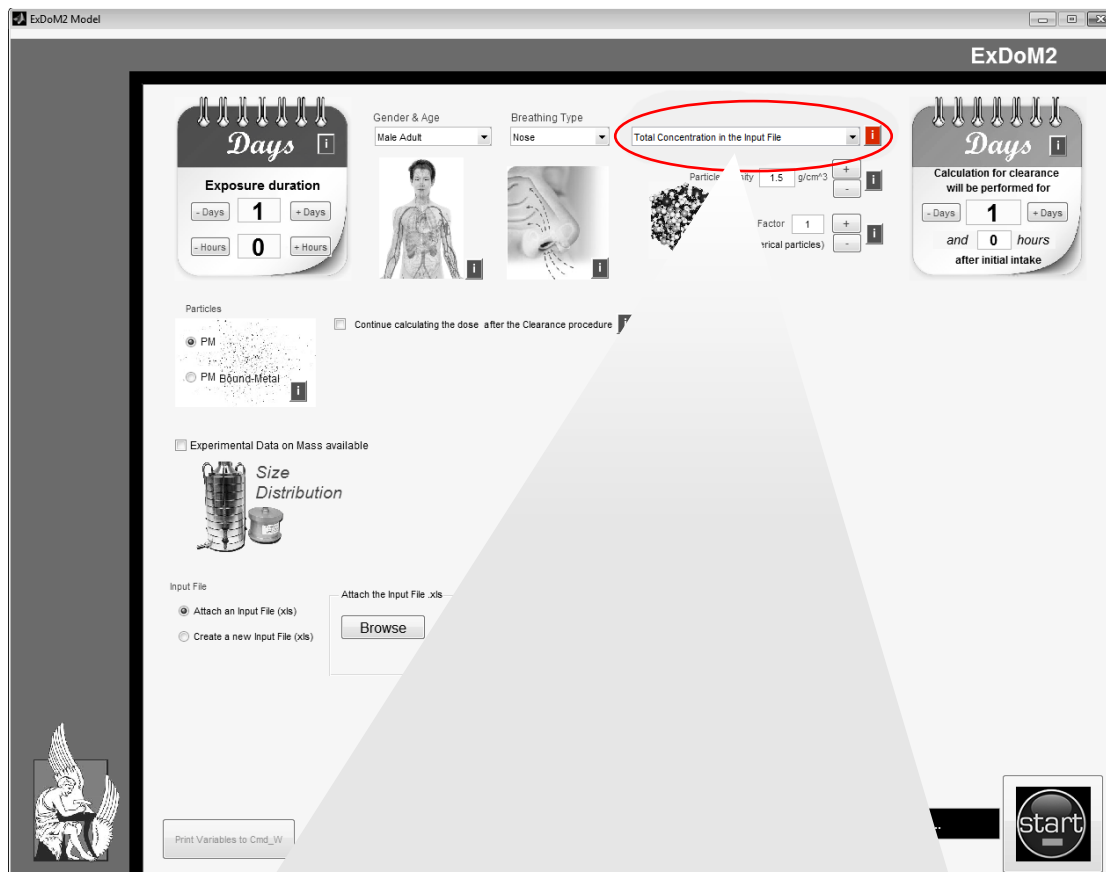
Πίνακας 4 - Κλάσμα ολικής ποσότητας αέρα που διέρχεται από το στόμα και την μύτη (ICRP-1994).

Επίπεδο δραστηριότητας	Αναπνοή από τη μύτη	Αναπνοή από το στόμα
Ύπνος	1	0.7
Ανάπαυση	1	0.7
Ελαφριά εργασία	1	0.4
Βαριά εργασία	0.5	0.3

#### 6.3.2.4 Συγκέντρωση αιρούμενων σωματιδίων (Concentration type)

Εδώ ο χρήστης καλείται να επιλέξει τον τύπο της συγκέντρωσης των αιρούμενων σωματιδίων που έχει στην διάθεση του (Εικόνα 38). Οι διαθέσιμες επιλογές είναι :

- Ξεχωριστές συγκεντρώσεις για λεπτά (fine) και χοντρά (coarse) σωματίδια σε  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η επιλογή αυτή καθορίζει τον τρόπο συμπλήρωσης της **στήλης C & D**, του αρχείου εισόδου (Input file), την συμπλήρωση του οποίου θα δούμε αναλυτικά στην συνέχεια.
- Μια συνολική συγκέντρωση για όλα τα σωματίδια σε  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (total concentration e.g.  $\text{PM}_{10}$ ). Η επιλογή αυτή καθορίζει τον τρόπο συμπλήρωσης της **στήλης C & D**, του αρχείου εισόδου (Input file).

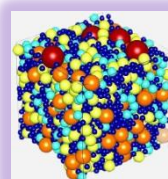


Εικόνα 38 - Συγκέντρωση αιρούμενων σωματιδίων (Concentration type)

### 6.3.2.5 Πυκνότητα σωματιδίων και συντελεστής σχήματος (Particle density & Shape factor)

#### Πυκνότητα σωματιδίων

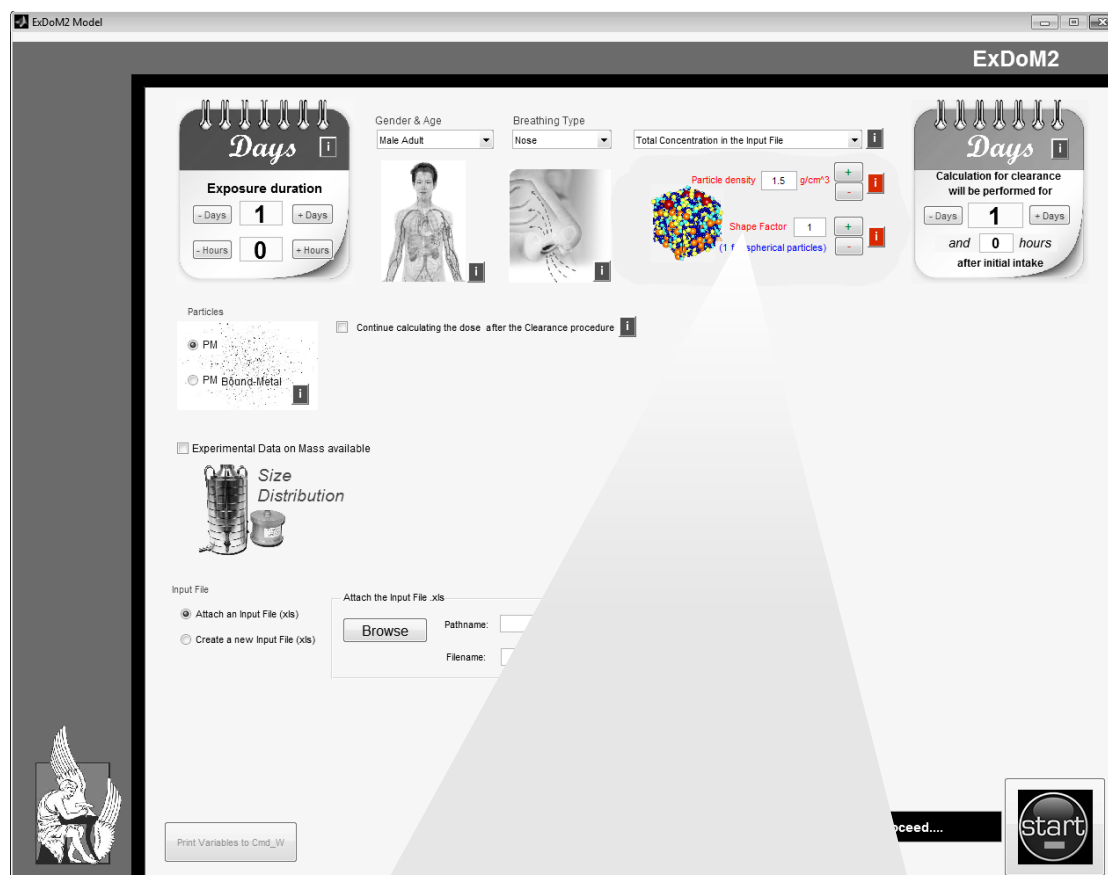
Ο χρήστης καλείται να εισάγει την πυκνότητα των σωματιδίων σε  $\text{g/cm}^3$ .





## Συντελεστής σχήματος

Ο αεροδυναμικός συντελεστής σχήματος είναι μία σταθερά η οποία χρησιμοποιείται για να συσχετίσει την ελκτική δύναμη που εφαρμόζεται σε ένα ακανόνιστου σχήματος αιρούμενο σωματίδιο σε σχέση με μία ισοδύναμη τιμή αναφοράς. Για σφαιρικά σωματίδια χρησιμοποιείται η τιμή «1». Ο χρήστης λοιπόν καλείται να επιλέξει την τιμή αυτή του συντελεστή χρησιμοποιώντας τα (+) και (-) κουμπιά (Εικόνα 39).



Εικόνα 39 - Πυκνότητα σωματιδίων και συντελεστής σχήματος (Particle density & Shape factor)

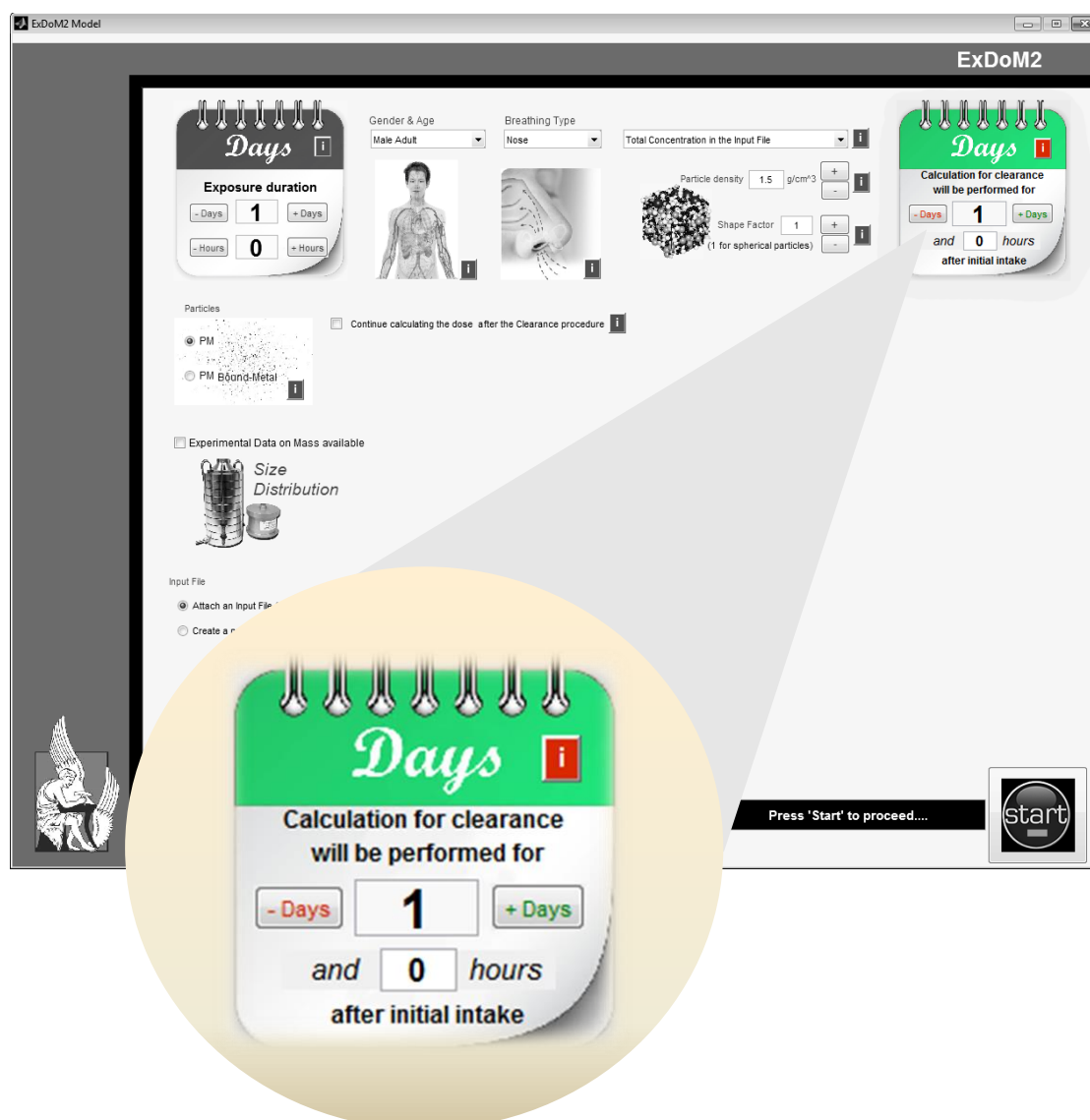
### 6.3.2.6 Χρονική διάρκεια υπολογισμού της διαδικασίας καθαρισμού

Ο χρήστης καλείται να επιλέξει την χρονική διάρκεια πάνω στην οποία θα εκτελεστεί το μοντέλο καθαρισμού (Εικόνα 40). Οι βασικές παραδοχές σ' αυτό το πεδίο είναι:

- Ο χρόνος υπολογισμού της διαδικασίας καθαρισμού περιλαμβάνει και τον χρόνο έκθεσης. Δηλαδή :

$$\text{Time after initial intake} = \text{exposure duration} + \text{post-exposure duration}$$

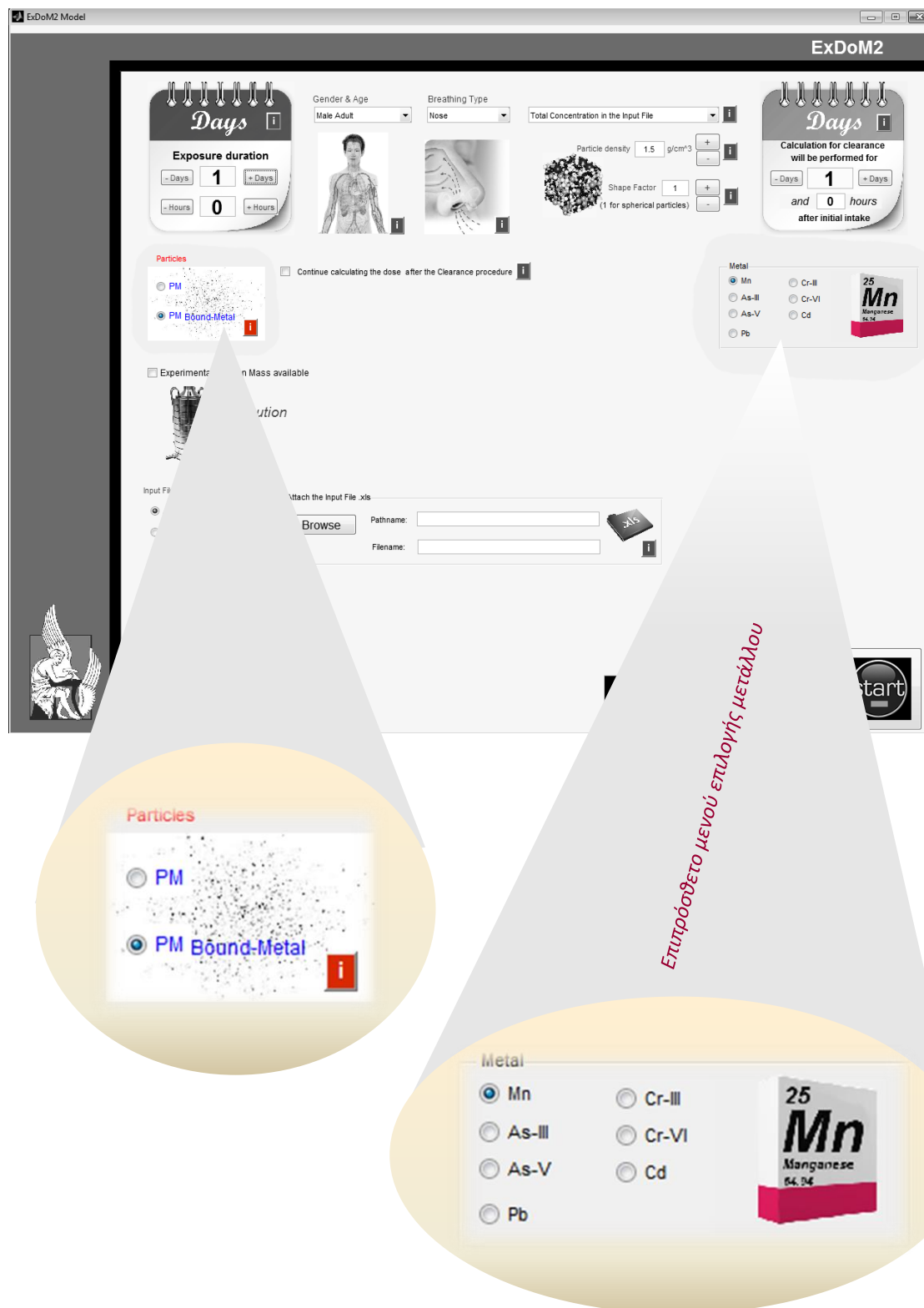
- Η χρονική διάρκεια υπολογισμού της διαδικασίας καθαρισμού πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με της χρονική διάρκεια έκθεσης.
- Αν ο χρήστης έχει ορίσει την διάρκεια έκθεσης σε μη ακέραιο αριθμό ημερών (hours≠0), τότε ο χρόνος της διαδικασίας καθαρισμού «κλειδώνει» και είναι ίσος με το χρόνο έκθεσης.
- Τα αποτελέσματα πάντα βγαίνουν σε ωριαία βάση, όπως επίσης και στα αρχεία εισόδου, οι τιμές είναι πάντα ωριαίες (πχ ωριαία συγκέντρωση).



Εικόνα 40 - Χρονική διάρκεια υπολογισμού της διαδικασίας καθαρισμού

### 6.3.2.7 PM ή PM Bound-Metal

Ο χρήστης καλείται να επιλέξει αν το μοντέλο θα εφαρμοστεί γενικά για PM σωματίδια ή για κάποια από τα διαθέσιμα μέταλλα. Αν ο χρήστης επιλέξει “PM Bound-Metal” τότε εμφανίζεται ένα επιπλέον μενού, αυτό της επιλογής μετάλλου (Εικόνα 41).

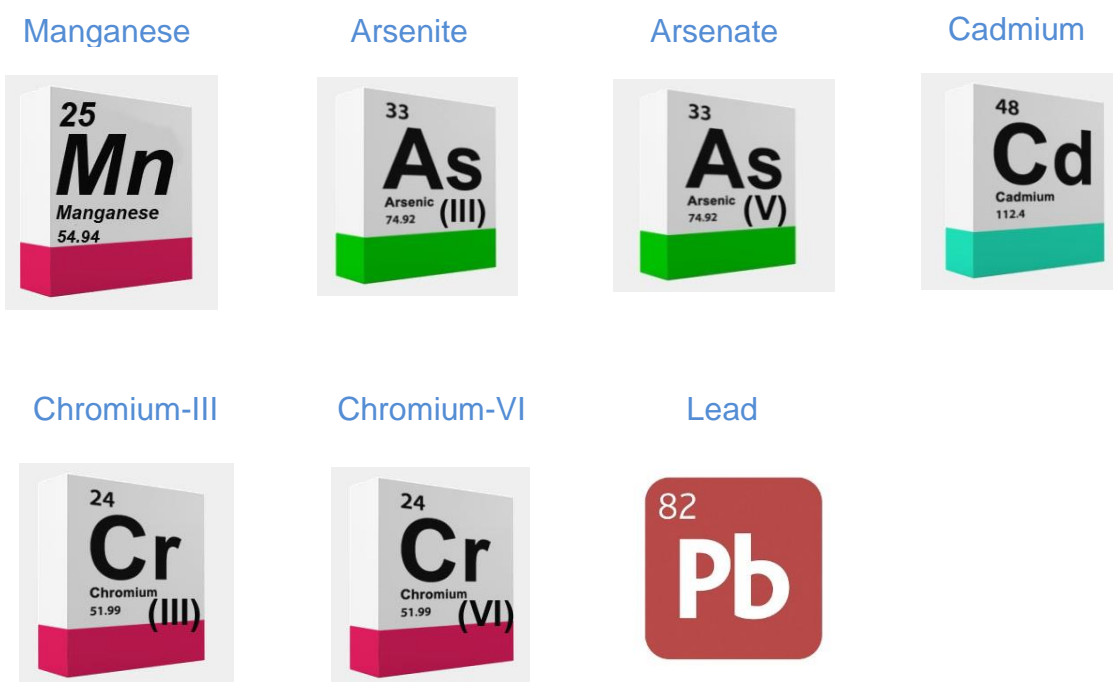


Εικόνα 41 - PM ή PM Bound-Metal

Οι διαθέσιμες επιλογές είναι οι εξής:

### **PM Bound-Metal**

Αυτή η επιλογή αφορά τα παρακάτω μέταλλα (Εικόνα 42) και στα οποία μόνο μπορεί να εφαρμοστεί το PBPK μοντέλο (Physiologically Based Pharmacokinetic Model) :



Εικόνα 42 - Διαθέσιμα μέταλλα για επιλογή

### **PM**

Αυτή η επιλογή αφορά κάθε είδους PM σωματίδια. Όταν ο χρήστης επιλέξει PM, τότε απενεργοποιείται η δυνατότητα εφαρμογής του φαρμακοκινητικού μοντέλου PBPK . Το PBPK μοντέλο, μπορεί να εφαρμοστεί, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω μόνο για τα στοιχεία της Εικόνας 42.

### 6.3.2.8 Υπολογισμός δόσης μετά την εφαρμογή της διαδικασίας καθαρισμού.

Ενεργοποιώντας ο χρήστης το αντίστοιχο checkbox, επιλέγει ουσιαστικά να εφαρμόσει το μοντέλο καθαρισμού. Αυτό το μοντέλο προσομοιώνει την διαδικασία καθαρισμού από το αναπνευστικό σύστημα στο αίμα και στους λεμφαδένες και επίσης προσομοιώνει την όλη κίνηση (καθαρισμό) της βλέννας μέχρι να φτάσει στο πεπτικό σύστημα. Το μοντέλο καθαρισμού συνοδεύεται με επιπλέον μενού στο γραφικό περιβάλλον, που στοχεύει στην ορθή παραμετροποίηση του με βάση τις απαιτήσεις του χρήστη (Εικόνα 43).



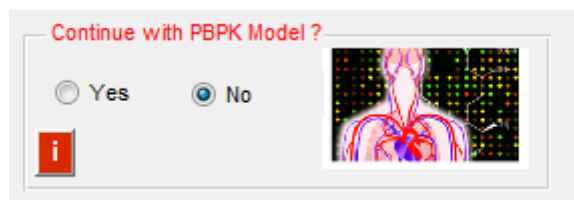
Εικόνα 43 - Υπολογισμός δόσης μετά την εφαρμογή της διαδικασίας καθαρισμού.

Ανάλογα με το είδος των σωματιδίων που έχουμε (PM or PM bound-metal), έχουμε το γραφικό περιβάλλον μας δίνει τις παρακάτω επιλογές για την εφαρμογή του μοντέλου :

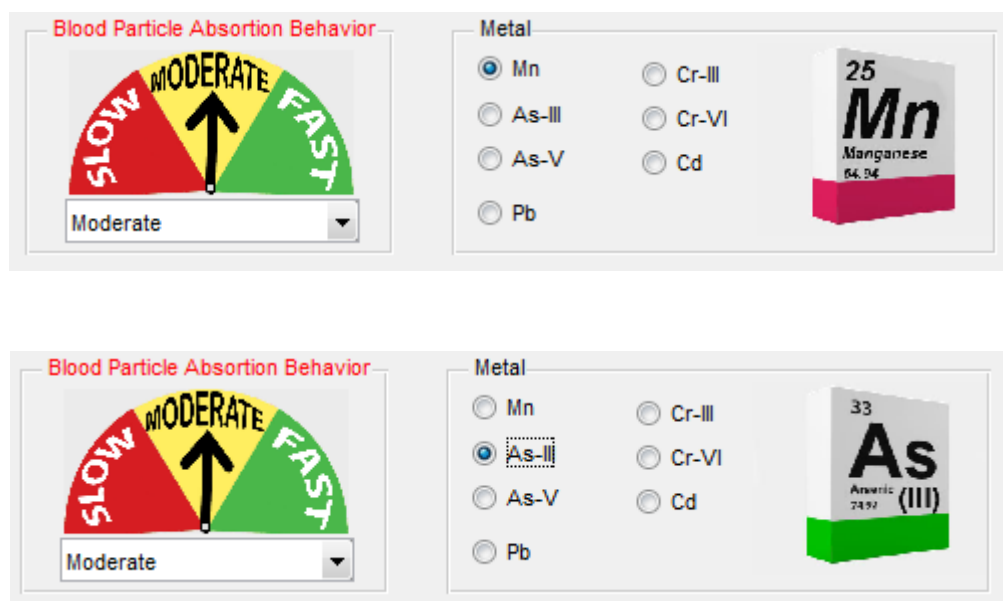
## PM Bound-Metal

Στην περίπτωση που έχουμε επιλέξει PM bound-metal, τότε εμφανίζονται οι επιλογές των Εικόνων 44,45 και 46. Έτσι :

- Μπορούμε να εφαρμόσουμε ή όχι το PBPK μοντέλο (Εικόνα 44). Το μοντέλο PBPK (Physiologically Based Pharmacokinetic Model) όπως προαναφέραμε γενικά είναι ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο προβλέπει την απορρόφηση, την διανομή, το μεταβολισμό και την απέκκριση (ADME) συνθετικών ή φυσικών χημικών ουσιών και συγκεκριμένα στην περίπτωση μας την μεταφορά των συγκεκριμένων βαρέων μετάλλων, από το αίμα στο ανθρώπινο σώμα.
- Μπορούμε να επιλέξουμε την ταχύτητα απορρόφησης από το αίμα (Blood Absorption Speed) των σωματιδίων. Το ExDoM2, μέσω του γραφικού περιβάλλοντος, προτείνει για κάθε ένα από τα διαθέσιμα βαρέα μέταλλα, την τυπική ταχύτητα απορρόφησης από το αίμα, αλλά στα περισσότερα στοιχεία ο χρήστης μπορεί να την αλλάξει (Εικόνες 45-46).



Εικόνα 44 - Εφαρμογή PBPK μοντέλου



Εικόνα 45 – Απορρόφηση στο αίμα (Blood Absorption Behavior)

Blood Particle Absortion Behavior

Moderate

Metal

☐ Mn
 ☐ Cr-III

☐ As-III
 ☐ Cr-VI

☒ As-V
 ☐ Cd

☐ Pb

33  
**As**  
Arsenic  
74.92

(V)

Blood Particle Absortion Behavior

Slow

Metal

☐ Mn
 ☒ Cr-III

☐ As-III
 ☐ Cr-VI

☐ As-V
 ☐ Cd

☐ Pb

24  
**Cr**  
Chromium  
51.99

(III)

Blood Particle Absortion Behavior

Slow

Metal

☐ Mn
 ☐ Cr-III

☐ As-III
 ☒ Cr-VI

☐ As-V
 ☐ Cd

☐ Pb

24  
**Cr**  
Chromium  
51.99

(VI)

Blood Particle Absortion Behavior

Slow

Metal

☐ Mn
 ☐ Cr-III

☐ As-III
 ☐ Cr-VI

☐ As-V
 ☒ Cd

☐ Pb

48  
**Cd**  
Cadmium  
112.4

Blood Particle Absortion Behavior

82  
**Pb**

Pb (element-specific)

Metal

☐ Mn
 ☐ Cr-III

☐ As-III
 ☐ Cr-VI

☐ As-V
 ☐ Cd

☒ Pb

82  
**Pb**  
Lead  
207.2

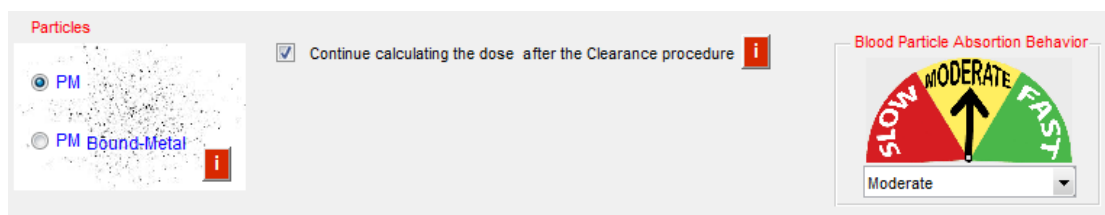
Εικόνα 46 – – Απορρόφηση στο αίμα (Blood Absorption Behavior)

Στην περίπτωση του μολύβδου (Pb), ο χρήστης μπορεί να μείνει με την προτεινόμενη επιλογή για την ταχύτητα απορρόφησης, η οποία είναι ειδικά σχεδιασμένη για το στοιχείο αυτό.



## PM

Αν επιλέξουμε να εφαρμόσουμε το μοντέλο ExDoM2 για PM σωματίδια, ενεργοποιώντας και τη διεργασία καθαρισμού τότε μπορούμε μόνο να επιλέξουμε την ταχύτητα απορρόφησης από το αίμα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 47. Το PBPK μοντέλο δεν είναι διαθέσιμο για PM σωματίδια.



Εικόνα 47 - Μη διαθεσιμότητα PBPK μοντέλου για επιλογή PM σωματιδίων.

### 6.3.2.9 Διαθεσιμότητα πειραματικών δεδομένων συγκέντρωσης μάζας σωματιδίων (Experimental data on mass available).



Εικόνα 48 - Διαθεσιμότητα πειραματικών δεδομένων συγκέντρωσης μάζας σωματιδίων

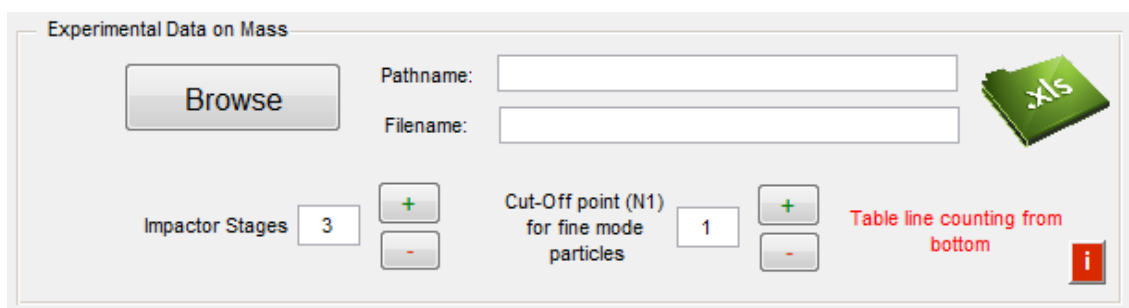
Εφόσον έχουμε διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα για την συγκέντρωση μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων, ενεργοποιούμε το checkbox της Εικόνας 48. Η ενεργοποίησή του εμφανίζει το μενού της Εικόνας 49 που έχει να κάνει με το αν έχουμε μία κατανομή μεγέθους σε όλη την διάρκεια έκθεσης ή το εκτιθέμενο άτομο αλλάζει περιβάλλοντα στα οποία έχουμε διαφορετικές κατανομές μάζας σωματιδίων. Έχουμε λοιπόν τις εξής επιλογές :



Εικόνα 49 - Διαφορετικό περιβάλλον έκθεσης

### Επιλογή “NO”

Επιλέγουμε “NO” (όχι), στην περίπτωση που το εκτιθέμενο άτομο μένει στο ίδιο περιβάλλον και υπάρχει μία και μόνο κατανομή μάζας αιωρούμενων σωματιδίων, για όλη την διάρκεια της έκθεσης. Σε αυτήν την περίπτωση εμφανίζεται το μενού της Εικόνας 50 :



Εικόνα 50 – Μενού επισύναψης αρχείου κατανομής μάζας σωματιδίων και εισαγωγή παραμέτρων του οργάνου μέτρησης ( επιλογή "NO").

Στο παραπάνω μενού της Εικόνας 50:

- Επισυνάπτουμε το αρχείο (.xls file) των πειραματικών δεδομένων με την κατανομή μάζας των αιρούμενων σωματιδίων που προκύπτουν από το όργανο μέτρησης που χρησιμοποιήσαμε.
- Εισάγουμε τον αριθμό επιπέδων του οργάνου μέτρησης που χρησιμοποιήσαμε για το πείραμά μας (impactor stages).
- Εισάγουμε το κατώφλι αποκοπής (Cut-off point) για τα λεπτά σωματίδια (fine particles).

Πληροφορίες για τον τρόπο εισαγωγής των δεδομένων στο επισυναπτόμενο αρχείο excel, παρουσιάζονται αναλυτικά στην παράγραφο 6.3.2.10.

### Επιλογή “YES”

Επιλέγουμε “YES” (ναι), στην περίπτωση που το εκτιθέμενο άτομο αλλάζει περιβάλλον και έτσι έχουμε διαφορετικές κατανομές μεγέθους κατά την διάρκεια έκθεσης. Παραδείγματος χάρη επιλέγουμε “YES” αν:

- 10.00 – 12.00 το εκτιθέμενο άτομο βρίσκεται σπίτι
- 12.00 – 17.00 το εκτιθέμενο άτομο εργάζεται σε εξωτερικό περιβάλλον

Σε αυτή την περίπτωση, λογικά θα έχουμε περισσότερες από μια κατανομή μεγέθους σωματιδίων, έτσι επιλέγουμε “YES” και επισυνάπτουμε ένα αρχείο ωριαίας κατανομής μάζας (hourly size distribution file).

Σε γενικές γραμμές, πάντα επιλέγουμε “Yes” όταν έχουμε περισσότερες από μία κατανομή μάζας σωματιδίων, για οποιονδήποτε λόγο, κατά την διάρκεια έκθεσης. Στην περίπτωση της επιλογής “YES”, εμφανίζεται το μενού της Εικόνας 51.

Εικόνα 51 - Μενού επισύναψης αρχείου ωριαίας κατανομής μάζας σωματιδίων (επιλογή “YES”).

Στο εμφανιζόμενο μενού της Εικόνας 51, όπως αναφέραμε πρέπει να επισυνάψουμε ένα αρχείο ωριαίας κατανομής μάζας σωματιδίων (HOURLY\_SIZE\_DISTRIBUTIONS.xls). Η όλη πληροφορία περιέχεται μέσα σε αυτό το αρχείο. Αυτό το αρχείο, έχει την ιδιαιτερότητα, για κατασκευαστικούς λόγους, να έχει αυτό το συγκεκριμένο όνομα, ώστε το μοντέλο ExDoM2, να μπορεί να τρέξει. Έτσι λοιπόν όποια και να είναι τα δεδομένα που περιέχει, αυτό πρέπει να έχει πάντα το ίδιο όνομα, **HOURLY\_SIZE\_DISTRIBUTIONS.xls**. Πληροφορίες για τον τρόπο εισαγωγής των δεδομένων στο συγκεκριμένο επισυναπτόμενο αρχείο excel, παρουσιάζονται αναλυτικά στην παράγραφο 6.3.2.11.

#### 6.3.2.10 Τρόπος εισαγωγής πειραματικών δεδομένων κατανομής μάζας σωματιδίων στο επισυναπτόμενο αρχείο (Experimental mass data xls file).

Στην παράγραφο αυτή θα περιγράψουμε τον τρόπο εισαγωγής των πειραματικών δεδομένων για το επισυναπτόμενο αρχείο του μενού της Εικόνας 52.

Εικόνα 52 - Experimental Data on Mass panel

Ας θεωρήσουμε ότι έχουμε τα πειραματικά δεδομένα του παρακάτω παραδείγματος.

Πίνακας 5 - Πίνακας πειραματικών δεδομένων οργάνου μέτρησης

**Impactor stage diameter range**

	Lower diameter [ $\mu\text{m}$ ]	Upper diameter [ $\mu\text{m}$ ]	Geometric Mean diameter $\sqrt{\text{Lower diameter} \times \text{Upper diameter}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	Mass concentration [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
<b>Coarse particles</b>	9	10	9.49	26.55
	5.8	9	7.22	20.28
	4.7	5.8	5.22	14.35
	3.3	4.7	3.94	11.90
	2.1	3.3	2.63	7.80
<b>Fine particles</b>	1.1	2.1	1.52	4.18
	0.7	1.1	0.88	2.93
	0.4	0.7	0.53	1.03
	0.01	0.4	0.06	0.80



Data in Excel

1<sup>η</sup> Γραμμή → geometric mean diameter ( $\mu\text{m}$ ), ξεκινάμε από την μικρότερη διάμετρο (0.06  $\mu\text{m}$ ) προς την μεγαλύτερη διάμετρο (9.49  $\mu\text{m}$ )

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	0.06	0.53	0.88	1.52	2.63	3.94	5.22	7.22	9.49
2	0.8	1.03	2.93	4.18	7.8	11.9	14.35	20.28	26.55

2<sup>η</sup> Γραμμή → mass concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Εικόνα 53 - Οδηγίες εισαγωγής παραμέτρων : Experimental mass data xls file

**Impactor stages – Fine particles cut-off point**

Ο αριθμός των επιπέδων του οργάνου μέτρησης (impactor stages), προκύπτει επίσης από τον Πίνακα 5, και ουσιαστικά είναι ο αριθμός των διαφορετικών διαμέτρων που έχουμε.

Το κατώφλι αποκοπής για τα λεπτά σωματίδια (cut-off point for fine particles), προκύπτει από τη διάμετρο που εμείς θεωρούμε σαν κατώφλι αποκοπής, πάντα μέσα στα λογικά όρια.

Έτσι λοιπόν, η εισαγωγή των αντίστοιχων παραμέτρων φαίνεται αναλυτικά στο σχήμα της Εικόνας 54.

### Impactor stage diameter range

	Lower diameter [ $\mu\text{m}$ ]	Upper diameter [ $\mu\text{m}$ ]	Geometric Mean diameter $\sqrt{\text{Lower diameter} \times \text{Upper diameter}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	Mass concentration [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
Coarse particles	9	10	9.49	26.55
	5.8	9	7.22	20.28
	4.7	5.8	5.22	14.35
	3.3	4.7	3.94	11.90
	2.1	3.3	2.63	7.80
Fine particles	1.1	2.1	1.52	4.18
	0.7	1.1	0.88	2.93
	0.4	0.7	0.53	1.03
	0.01	0.4	0.06	0.80

Impactor stages = number of diameters = 9

Cut-off point for fines = Number of table line counting from the bottom of the table = 4

Experimental Data on Mass

Browse Pathname:  .xls

Filename:

Impactor Stages  + -

Cut-Off point (N1) for fine mode particles  + -

Table line counting from bottom

The 4<sup>th</sup> column of the excel is the 4<sup>th</sup> line of our table, and this is the cut-off point for the fines

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	0.06	0.53	0.88	1.52	2.63	3.94	5.22	7.22	9.49
2	0.8	1.03	2.93	4.18	7.8	11.9	14.35	20.28	26.55

Εικόνα 54 - Οδηγίες εισαγωγής παραμέτρων : Impactor stages – Fine particles cut-off point

### 6.3.2.11 Τρόπος εισαγωγής πειραματικών δεδομένων ωριαίας κατανομής μάζας σωματιδίων στο επισυναπτόμενο αρχείο *HOURLY\_SIZE\_DISTRIBUTION.xls*

Στην παράγραφο αυτή θα περιγράψουμε τον τρόπο εισαγωγής των πειραματικών δεδομένων για το επισυναπτόμενο αρχείο *HOURLY\_SIZE\_DISTRIBUTIONS.xls*, του μενού της Εικόνας 55.

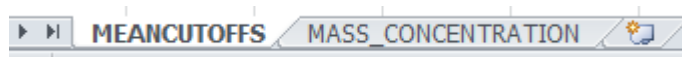


Εικόνα 55 - Hourly Size Distribution File panel



**HOURLY\_SIZE\_DISTRIBUTIONS.xls**

Αυτό το αρχείο αποτελείται από 2 φύλλα, το “MEANCUTOFFS” and the “MASS\_CONCENTRATION”.



#### ➤ MEANCUTOFFS sheet

Ας θεωρήσουμε ότι έχουμε το παρακάτω παράδειγμα του Πίνακα 6.

Πίνακας 6 - Πίνακας πειραματικών δεδομένων οργάνου μέτρησης

#### *Impactor stage diameter range*

	Lower diameter [ μm ]	Upper diameter [ μm ]	Geometric Mean diameter $\sqrt{\text{Lower diameter} \times \text{Upper diameter}}$ [ μm ]	Mass concentration [ μg/m <sup>3</sup> ]
<b>Coarse particles</b>	9	10	9.49	26.55
	5.8	9	7.22	20.28
	4.7	5.8	5.22	14.35
	3.3	4.7	3.94	11.90
	2.1	3.3	2.63	7.80
<b>Fine particles</b>	1.1	<b>2.1</b>	1.52	4.18
	0.7	1.1	0.88	2.93
	0.4	0.7	0.53	1.03
	0.01	0.4	0.06	0.80

Ο τρόπος συμπλήρωσης του φύλλου MEANCUTOFFS, παρουσιάζεται αναλυτικά στο σχήμα της Εικόνας 56.

### Impactor stage diameter range

	Lower diameter [ $\mu\text{m}$ ]	Upper diameter [ $\mu\text{m}$ ]	Geometric Mean diameter $\sqrt{\text{Lower diameter} \times \text{Upper diameter}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	Mass concentration [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
Coarse particles	9	10	9.49	26.55
	5.8	9	7.22	20.28
	4.7	5.8	5.22	14.35
	3.3	4.7	3.94	11.90
	2.1	3.3	2.63	7.80
Fine particles	1.1	2.1	1.52	4.18
	0.7	1.1	0.88	2.93
	0.4	0.7	0.53	1.03
	0.01	0.4	0.06	0.80

Each line in the sheet contains the mean diameter ( $\mu\text{m}$ ) for a different hour. We start from the smallest diameter (0.06  $\mu\text{m}$ ) to the largest diameter (9.49  $\mu\text{m}$ ).

Cut-off point for fines =  
Number of table line  
counting from the  
bottom of the table = 4

Impactor stages = number of diameters = 9

Column O: number of impactor stage.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	0.06	0.53	0.88	1.52	2.63	3.94	5.22	7.22	9.49							
2	0.06	0.53	0.88	1.52	2.63	3.94	5.22	7.22	9.49						9	4
3	0.06	0.53	0.88	1.52	2.63	3.94	5.22	7.22	9.49						9	4
4	0.06	0.53	0.88	1.52	2.63	3.94	5.22	7.22	9.49						9	4
5	0.06	0.53	0.88	1.52	2.63	3.94	5.22	7.22	9.49						9	4
6	0.06	0.53	0.88	1.52	2.63	3.94	5.22	7.22	9.49						9	4
7	0.06	0.53	0.88	1.52	2.63	3.94	5.22	7.22	9.49						9	4
8	0.06	0.53	0.88	1.52	2.63	3.94	5.22	7.22	9.49						9	4
9	0.06	0.53	0.88	1.52	2.63	3.94	5.22	7.22	9.49						9	4
10	0.06	0.53	0.88	1.52	2.63	3.94	5.22	7.22	9.49						9	4
11	0.06	0.53	0.88	1.52	2.63	3.94	5.22	7.22	9.49						9	4
12	0.06	0.53	0.88	1.52	2.63	3.94	5.22	7.22	9.49						9	4
13	0.06	0.53	0.88	1.52	2.63	3.94	5.22	7.22	9.49						9	4
14	0.06	0.53	0.88	1.52	2.63	3.94	5.22	7.22	9.49						9	4
15	0.06	0.53	0.88	1.52	2.63	3.94	5.22	7.22	9.49						9	4
16	0.06	0.53	0.88	1.52	2.63	3.94	5.22	7.22	9.49						9	4
17	0.06	0.53	0.88	1.52	2.63	3.94	5.22	7.22	9.49						9	4
18	0.06	0.53	0.88	1.52	2.63	3.94	5.22	7.22	9.49						9	4
19	0.06	0.53	0.88	1.52	2.63	3.94	5.22	7.22	9.49						9	4
20	0.06	0.53	0.88	1.52	2.63	3.94	5.22	7.22	9.49						9	4
21	0.06	0.53	0.88	1.52	2.63	3.94	5.22	7.22	9.49						9	4
22	0.06	0.53	0.88	1.52	2.63	3.94	5.22	7.22	9.49						9	4
23	0.06	0.53	0.88	1.52	2.63	3.94	5.22	7.22	9.49						9	4
24	0.06	0.53	0.88	1.52	2.63	3.94	5.22	7.22	9.49						9	4

**Column P:** Cut-off point for fine particles. We start our count from the smallest diameter. In this example the cut-off point for fine particles is 4<sup>th</sup> place. The 4<sup>th</sup> place represents → 1.1-2.1

Εικόνα 56 - Οδηγός συμπλήρωσης φύλλου "MEANCUTOFFS", του αρχείου "HOURLY\_SIZE\_DISTRIBUTION.xls"



➤ **MASS\_CONCENTRATION** sheet

Για το ίδιο παράδειγμα:

**Impactor stage diameter range**

	Lower diameter [ $\mu\text{m}$ ]	Upper diameter [ $\mu\text{m}$ ]	Geometric Mean diameter $\sqrt{\text{Lower diameter} \times \text{Upper diameter}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	Mass concentration [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
<b>Coarse particles</b>	9	10	9.49	26.55
	5.8	9	7.22	20.28
	4.7	5.8	5.22	14.35
	3.3	4.7	3.94	11.90
	2.1	3.3	2.63	7.80
<b>Fine particles</b>	1.1	2.1	1.52	4.18
	0.7	1.1	0.88	2.93
	0.4	0.7	0.53	1.03
	0.01	0.4	0.06	0.80

Each line in the excel sheet contains the mass concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) for a different hour

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	0.8	1.03	2.93	4.18	7.8	11.9	14.35	20.28	26.55
2	0.8	1.03	2.93	4.18	7.8	11.9	14.35	20.28	26.55
3	0.8	1.03	2.93	4.18	7.8	11.9	14.35	20.28	26.55
4	0.8	1.03	2.93	4.18	7.8	11.9	14.35	20.28	26.55
5	0.8	1.03	2.93	4.18	7.8	11.9	14.35	20.28	26.55
6	0.8	1.03	2.93	4.18	7.8	11.9	14.35	20.28	26.55
7	0.8	1.03	2.93	4.18	7.8	11.9	14.35	20.28	26.55
8	0.8	1.03	2.93	4.18	7.8	11.9	14.35	20.28	26.55
9	0.8	1.03	2.93	4.18	7.8	11.9	14.35	20.28	26.55
10	0.8	1.03	2.93	4.18	7.8	11.9	14.35	20.28	26.55
11	0.8	1.03	2.93	4.18	7.8	11.9	14.35	20.28	26.55
12	0.8	1.03	2.93	4.18	7.8	11.9	14.35	20.28	26.55
13	0.8	1.03	2.93	4.18	7.8	11.9	14.35	20.28	26.55
14	0.8	1.03	2.93	4.18	7.8	11.9	14.35	20.28	26.55
15	0.8	1.03	2.93	4.18	7.8	11.9	14.35	20.28	26.55
16	0.8	1.03	2.93	4.18	7.8	11.9	14.35	20.28	26.55
17	0.8	1.03	2.93	4.18	7.8	11.9	14.35	20.28	26.55
18	0.8	1.03	2.93	4.18	7.8	11.9	14.35	20.28	26.55
19	0.8	1.03	2.93	4.18	7.8	11.9	14.35	20.28	26.55
20	0.8	1.03	2.93	4.18	7.8	11.9	14.35	20.28	26.55
21	0.8	1.03	2.93	4.18	7.8	11.9	14.35	20.28	26.55
22	0.8	1.03	2.93	4.18	7.8	11.9	14.35	20.28	26.55
23	0.8	1.03	2.93	4.18	7.8	11.9	14.35	20.28	26.55
24	0.8	1.03	2.93	4.18	7.8	11.9	14.35	20.28	26.55

Εικόνα 57 - Οδηγός συμπλήρωσης φύλλου "MASS\_CONCENTRATION", του "HOURLY\_SIZE\_DISTRIBUTION.xls"

Οι κατανομές μεγέθους σωματιδίων χρησιμοποιούνται από το μοντέλο ExDoM2 για τον υπολογισμό της μέσης αεροδυναμικής διαμέτρου μάζας (MMAD) και της τυπική απόκλιση (sg) της κατανομής μεγέθους σωματιδίων ξεχωριστά για κάθε κλάσμα (λεπτά, χονδρά) με βάση τη μεθοδολογία του Hinds (1999). Δεν πρέπει να συγχέουμε τη γεωμετρική μέση διάμετρο με τη MMAD.

### 6.3.2.12 Αρχείο Εισόδου (Input File) για mass concentration

Το αρχείο εισόδου επισυνάπτεται στο μενού που φαίνεται στην Εικόνα 58. Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να επισυνάψει ένα αρχείο το οποίο το έχει ήδη συμπληρώσει μέσω της επιλογής “Attach an Input File (xls)” ή να δημιουργήσει ένα νέο αρχείο μέσω της επιλογής “Create a new Input File (xls)”. Ο τρόπος εισαγωγής δεδομένων σε ένα αρχείο εισόδου, θα περιγραφεί μέσω τριών παραδειγμάτων, ώστε να γίνει καλύτερη η κατανόηση του (σχήματα εικόνων 59,60 και 61).

Εικόνα 58 - Αρχείο Εισόδου (Input File) για mass concentration

## 1<sup>ο</sup> Παράδειγμα συμπλήρωσης Input File



### Data in Excel

- Ο υπολογισμός θα πραγματοποιηθεί για 1 day = 24 hrs. Κάθε γραμμή του πίνακα αντιπροσωπεύει μία ώρα.
- Υπάρχει διαθέσιμη συγκέντρωση για τα λεπτά σωματίδια (**fine particles**) σε  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- Υπάρχει διαθέσιμη συγκέντρωση για τα χοντρά σωματίδια (**coarse particles**) σε  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Στην περίπτωση που έχουμε μία συνολική συγκέντρωση και όχι 2 διαφορετικές για τα λεπτά και τα χοντρά (fine and coarse), βάζουμε την ίδια συγκέντρωση και στις 2 στήλες C & D (2<sup>ο</sup> παράδειγμα).

	<u>HOURS (24)</u>		<u>COARSE PARTICLES</u> Συγκέντρωση των χοντρών σωματιδίων σε $\mu\text{g}/\text{cm}^3$		<u>ACTIVITY</u> Δραστηριότητα του ατόμου		
	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	20	30	0	1	
2	1	2	20	30	0	1	
3	1	3	20	30	0	1	
4	1	4	20	30	0	1	
5	1	5	20	30	0	1	
6	1	6	20	30	0	1	
7	1	7	20	30	0	1	
8	1	8	20	30	0	1	
9	1	9	21,5	33,5	5	3	
10	1	10	21,5	33,5	5	3	
11	1	11	21,5	33,5	5	3	
12	1	12	21,5	33,5	5	3	
13	1	13	21,5	33,5	5	3	
14	1	14	21,5	33,5	5	3	
15	1	15	21,5	33,5	5	3	
16	1	16	21,5	33,5	5	3	
17	1	17	20	30	0	2	
18	1	18	20	30	0	2	
19	1	19	20	30	0	2	
20	1	20	20	30	0	2	
21	1	21	20	30	0	2	
22	1	22	20	30	0	2	
23	1	23	20	30	0	2	
24	1	24	20	30	0	2	
25							
26							
27							

Εδώ έχουμε μόνο 1ημέρα

Συγκέντρωση λεπτών σωματιδίων σε  $\mu\text{g}/\text{cm}^3$

Εισαγωγή της ταχύτητας του ανέμου σε m/sec

- 1→ Ύπνος
- 2→ Ανάπαυση
- 3→ Ελαφριά εργασία
- 4→ Βαριά εργασία

Εικόνα 59 - 1ο παράδειγμα συμπλήρωσης Input File

## 2° Παράδειγμα συμπλήρωσης Input File



### Data in Excel

- Ο υπολογισμός θα πραγματοποιηθεί για 1 day = 24 hrs. Κάθε γραμμή του πίνακα αντιπροσωπεύει μία ώρα.
- Υπάρχει διαθέσιμη συνολική συγκέντρωση για σωματίδια ( $PM_{10}$ ) σε  $\mu g/m^3$ . Δεν έχουμε διαφορετικές συγκεντρώσεις για τα λεπτά και χοντρά σωματίδια.

Εδώ έχουμε μία συνολική συγκέντρωση και όχι 2 διαφορετικές για τα λεπτά και τα χοντρά (fine and coarse), έτσι βάζουμε την ίδια συγκέντρωση και στις 2 στήλες C & D.

Εικόνα 60 - 2ο παράδειγμα συμπλήρωσης Input File

	<u>HOURS (24)</u>		<u><math>PM_{10}</math> PARTICLES</u> Συγκέντρωση σωματιδίων σε $\mu g/cm^3$		<u>ACTIVITY</u> Δραστηριότητα του ατόμου	
	A	B	C	D	E	F
1	1	1	50	50	0	1
2	1	2	50	50	0	1
3	1	3	50	50	0	1
4	1	4	50	50	0	1
5	1	5	50	50	0	1
6	1	6	50	50	0	1
7	1	7	50	50	0	1
8	1	8	50	50	0	1
9	1	9	53,5	53,5	5	3
10	1	10	53,5	53,5	5	3
11	1	11	53,5	53,5	5	3
12	1	12	53,5	53,5	5	3
13	1	13	53,5	53,5	5	3
14	1	14	53,5	53,5	5	3
15	1	15	53,5	53,5	5	3
16	1	16	53,5	53,5	5	3
17	1	17	50	50	0	2
18	1	18	50	50	0	2
19	1	19	50	50	0	2
20	1	20	50	50	0	2
21	1	21	50	50	0	2
22	1	22	50	50	0	2
23	1	23	50	50	0	2
24	1	24	50	50	0	2
25						
26						
27						

DAY

$PM_{10}$  PARTICLES

WIND SPEED

Εδώ έχουμε μόνο 1ημέρα

Συγκέντρωση σωματιδίων σε  $\mu g/cm^3$

Εισαγωγή της ταχύτητας του ανέμου σε m/sec

➤ 1→ Ύπνος  
➤ 2→ Ανάπαυση  
➤ 3→ Ελαφριά εργασία  
➤ 4→ Βαριά εργασία

### 3° Παράδειγμα συμπλήρωσης Input File



#### Data in Excel

- Ο υπολογισμός θα πραγματοποιηθεί για 2 days = 48 hrs. Κάθε γραμμή του πίνακα αντιπροσωπεύει μία ώρα.
- Υπάρχει διαθέσιμη συνολική συγκέντρωση για σωματίδια ( $PM_{10}$ ) σε  $\mu g/m^3$ . Δεν έχουμε διαφορετικές συγκεντρώσεις για τα λεπτά και χοντρά σωματίδια.

Εδώ έχουμε μία συνολική συγκέντρωση και όχι 2 διαφορετικές για τα λεπτά και τα χοντρά (fine and coarse), έτσι βάζουμε την ίδια συγκέντρωση και στις 2 στήλες **C & D**.

		<u>HOURS (24)</u>		<u>PM<sub>10</sub> PARTICLES</u> Συγκέντρωση σε $\mu g/cm^3$		<u>ACTIVITY</u>	
		A	B	C	D	E	F
1	1	1	1	50	50	0	1
2	1	1	2	50	50	0	1
3	1	1	3	50	50	0	1
4	1	1	4	50	50	0	1
5	1	1	5	50	50	0	1
6	1	1	6	50	50	0	1
7	1	1	7	50	50	0	1
8	1	1	8	50	50	0	1
9	1	1	9	53,5	53,5	5	3
10	1	1	10	53,5	53,5	5	3
11	1	1	11	53,5	53,5	5	3
12	1	1	12	53,5	53,5	5	3
13	1	1	13	53,5	53,5	5	3
14	1	1	14	53,5	53,5	5	3
15	1	1	15	53,5	53,5	5	3
16	1	1	16	53,5	53,5	5	3
17	1	1	17	50	50	0	2
18	1	1	18	50	50	0	2
19	1	1	19	50	50	0	2
20	1	1	20	50	50	0	2
21	1	1	21	50	50	0	2
22	1	1	22	50	50	0	2
23	1	1	23	50	50	0	2
24	1	1	24	50	50	0	2
25	2	1	1	48	48	0	1
26	2	2	2	48	48	0	1
27	2	2	3	48	48	0	1
28	2	2	4	48	48	0	1
29	2	2	5	48	48	0	1
30	2	2	6	48	48	0	1
31	2	2	7	48	48	0	1
32	2	2	8	48	48	0	1
33	2	2	9	52,5	52,5	4	3
34	2	2	10	52,5	52,5	4	3
35	2	2	11	52,5	52,5	4	3
36	2	2	12	52,5	52,5	4	3
37	2	2	13	52,5	52,5	4	3
38	2	2	14	52,5	52,5	4	3
39	2	2	15	52,5	52,5	4	3
40	2	2	16	52,5	52,5	4	3
41	2	2	17	49	49	0	2
42	2	2	18	49	49	0	2
43	2	2	19	49	49	0	2
44	2	2	20	49	49	0	2
45	2	2	21	49	49	0	2
46	2	2	22	49	49	0	2
47	2	2	23	49	49	0	2
48	2	2	24	49	49	0	2

- 1→ Ύπνος  
➤ 2→ Ανάπαυση  
➤ 3→ Ελαφριά εργασία  
➤ 4→ Βαριά εργασία

Εικόνα 61 - 2ο παράδειγμα συμπλήρωσης Input File

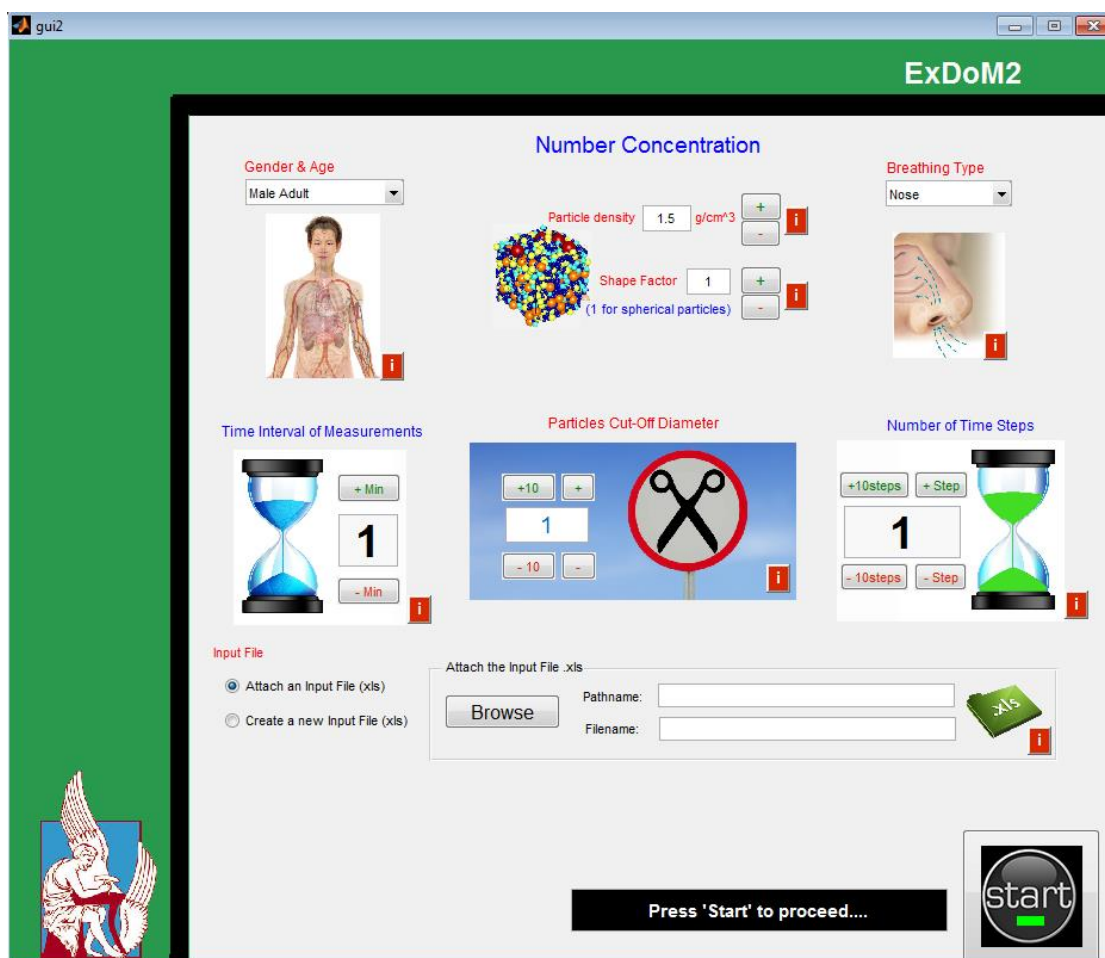
DAY  
Εδώ έχουμε 2ημέρες

PM<sub>10</sub> PARTICLES  
Συγκέντρωση σε  $\mu g/cm^3$

WIND SPEED  
m/sec

### 6.3.3 Συγκέντρωση βάση των αριθμό σωματιδίων (number concentration)

Επιλέγοντας number concentration στο γραφικό περιβάλλον εκκίνησης, τότε εμφανίζεται ένα νέο γραφικό περιβάλλον (Εικόνα 62) που επιτρέπει στο χρήστη να παραμετροποιήσει κατάλληλα το μοντέλο για την εφαρμογή του, έχοντας στην διάθεση του δεδομένα συγκέντρωσης βάση των αριθμό σωματιδίων σε  $\#/cm^3$ .



Εικόνα 62 - Number Concentration αρχική οθόνη

Εδώ ο χρήστης έχει τις εξής δυνατότητες :

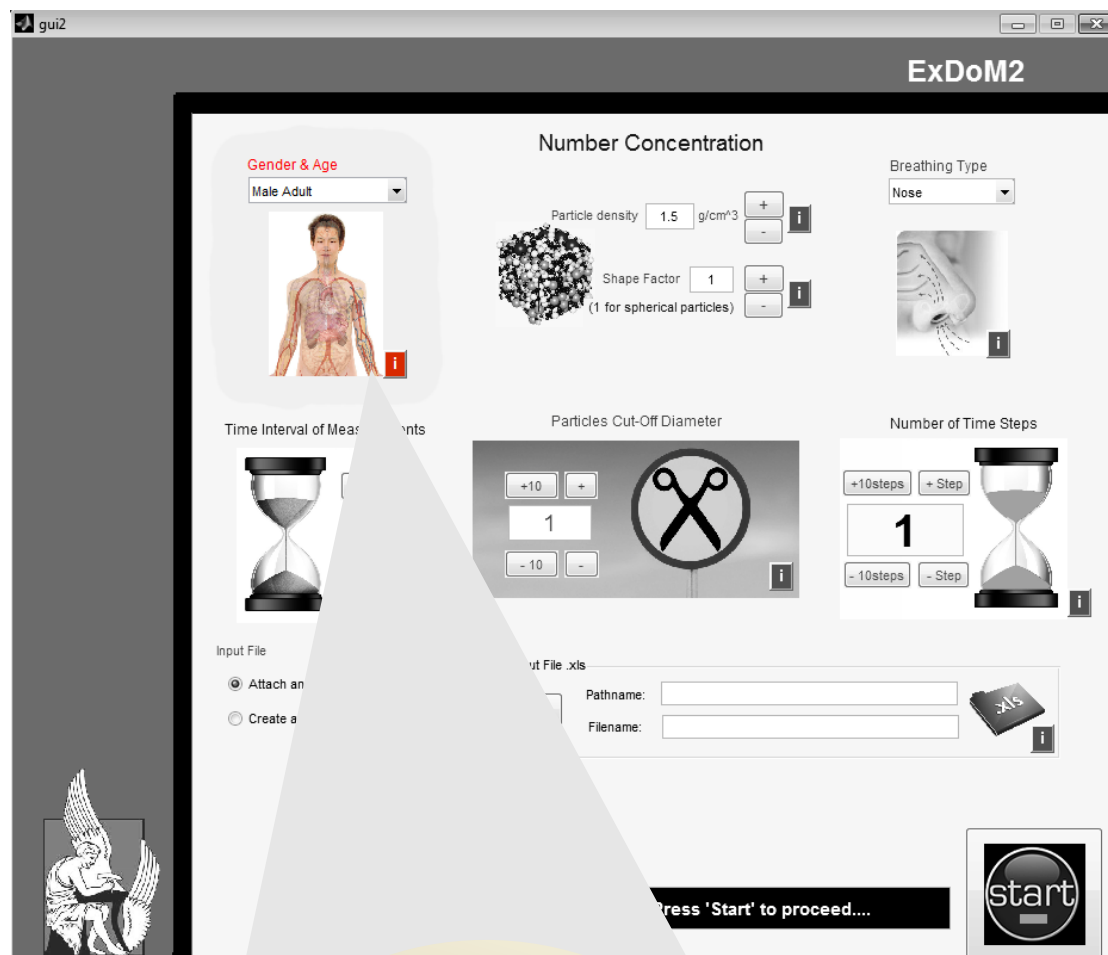
- Επιλογή φύλου και ηλικίας εκτιθέμενου ατόμου (Gender & Age)
- Επιλογή τρόπου εισπνοής (Breathing Type)
- Εισαγωγή πυκνότητας σωματιδίων (Particle Density)
- Εισαγωγή συντελεστή σχήματος σωματιδίων (Shape Factor)
- Εισαγωγή χρονικού διαστήματος πειραματικών μετρήσεων (Time Interval of Measurements)
- Αριθμός πλήθους διαμέτρων αποκοπής σωματιδίων (Particles Cut-off Diameter)
- Αριθμός πειραματικών μετρήσεων οργάνου (Number of Time Steps)
- Εισαγωγή αρχείου εισόδου (Input File)



Ας δούμε όμως ξεχωριστά το κάθε πεδίο και την ορθή του χρήση, ώστε να παραμετροποιηθεί σωστά το μοντέλο με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα εισόδου του χρήστη.

### 6.3.3.1 Φύλο και ηλικία εκτιθέμενου ατόμου (Gender & Age)

Εδώ ο χρήστης επιλέγει την ηλικία και το φύλο του εκτιθέμενου ατόμου (Εικόνα 63).



Εικόνα 63 - Φύλο και ηλικία εκτιθέμενου ατόμου (Gender & Age)



Οι διαθέσιμες επιλογές για το φύλο και την ηλικία του εκτιθέμενου ατόμου είναι (Εικόνα 64) :

**Male - Adult**



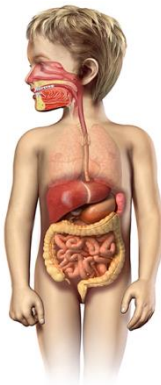
**Male – 15 years old**



**Male – 10 years old**



**Male – 5 years old**



**Female - Adult**



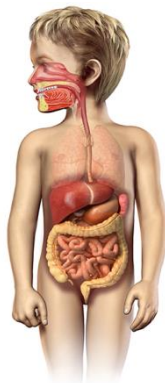
**Female – 15 years old**



**Female – 10 years old**



**Female – 5 years old**



**Baby – 1 year old**



Εικόνα 64 - Διαθέσιμες επιλογές εκτιθέμενου ατόμου με βάση το φύλο και την ηλικία

Τα διαθέσιμα επίπεδα δραστηριότητας (κόπωση) για τους ενήλικους (άρρεν ή θήλυ) είναι :

- 1→ Ύπνος (Sleep)
- 2→ Ανάπαυση (Rest)
- 3→ Ελαφριά εργασία (Light exercise)
- 4→ Βαριά εργασία (Heavy exercise)



(Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται στην **στήλη C**, στο αρχείο εισόδου)

Τα διαθέσιμα επίπεδα δραστηριότητας (κόπωση) για έφηβους, παιδιά και μωρά (άρρεν ή θήλυ) είναι:

- 1→ Ύπνος (Sleep)
- 2→ Ανάπαυση (Rest)
- 3→ Ελαφριά εργασία (Light exercise)

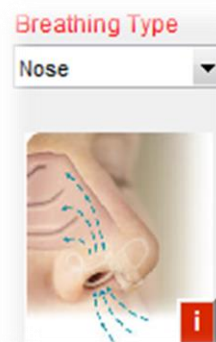


(Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται στην **στήλη C**, στο αρχείο εισόδου)

#### 6.3.3.2 Τρόπος εισπνοής εκτιθέμενου ατόμου (Breathing Type)

Για τον τρόπο εισπνοής του εκτιθέμενου ατόμου ισχύει ακριβώς ότι ισχύει και στην περίπτωση που έχουμε mass concentration (βλέπε παράγραφο 6.3.2.3). Οι διαθέσιμες επιλογές, λοιπόν για το τύπο της εισπνοής είναι δύο :

- μέσω του στόματος (mouth-breather).
- μέσω της μύτης (nose-breather).

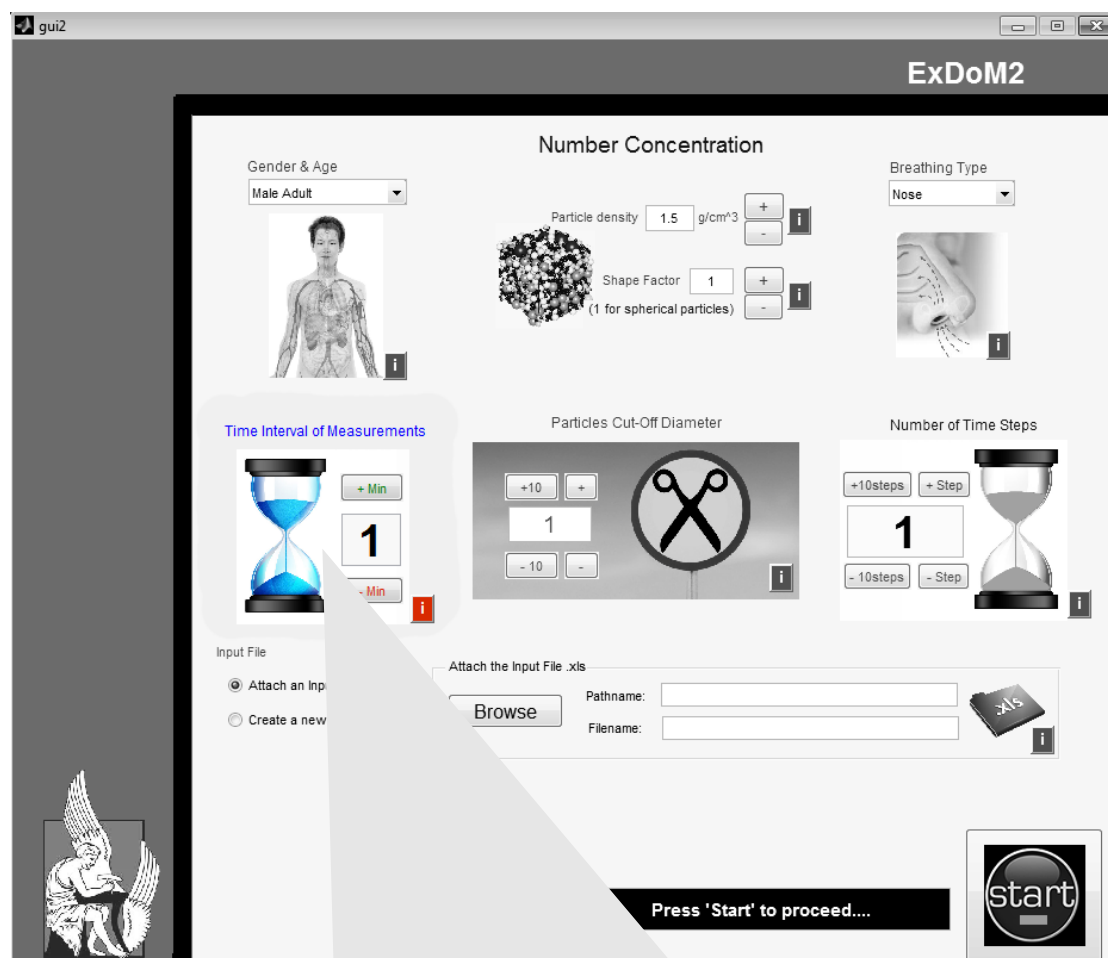


#### 6.3.3.3 Πυκνότητα σωματιδίων και συντελεστής σχήματος (Particle density & Shape factor)

Και εδώ ισχύει ακριβώς ότι ισχύει και στην περίπτωση που έχουμε mass concentration (βλέπε παράγραφο 6.3.2.5). Ο χρήστης καλείται να εισάγει την πυκνότητα των σωματιδίων σε  $\text{g/cm}^3$  και τον αεροδυναμικό συντελεστή σχήματος, ο οποίος είναι μία σταθερά η οποία χρησιμοποιείται για να συσχετίσει την ελκτική δύναμη που εφαρμόζεται σε ένα ακανόνιστου σχήματος αιρούμενο σωματίδιο σε σχέση με μία ισοδύναμη τιμή αναφοράς. Για σφαιρικά σωματίδια χρησιμοποιείται η τιμή «1». Ο χρήστης λοιπόν καλείται να επιλέξει την τιμή αυτή του συντελεστή χρησιμοποιώντας τα (+) και (-) κουμπιά (Εικόνα 39).

#### 6.3.3.4 Εισαγωγή χρονικού διαστήματος πειραματικών μετρήσεων (Time Interval of Measurements)

Αυτό το πεδίο (Εικόνα 65) καθορίζεται από το χρόνο που ρυθμίστηκε το όργανο μετρήσεων, για να παίρνει μετρήσεις. Ουσιαστικά είναι το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από μία μέτρηση στην επόμενη. Το χρονικό διάστημα αυτό χρησιμοποιείται και στο αρχείο εισόδου στην στήλη-A του φύλλου εργασίας 'physical activity'. Στην παράγραφο 6.3.3.7 υπάρχουν αναλυτικές οδηγίες συμπλήρωσης του αρχείου εισόδου.



Εικόνα 65 – Πεδίο : Χρονικό διάστημα επανάληψης μέτρησης (Time Interval of Measurements)

### 6.3.3.5 Αριθμός πλήθους διαμέτρων αποκοπής σωματιδίων (Particles Cut-off Diameter)

Αυτό το πεδίο (Εικόνα 66) καθορίζεται από το πλήθος των διαμέτρων των σωματιδίων που έχουμε. Το πεδίο αυτό χρησιμοποιείται και στο αρχείο εισόδου στην γραμμή-1 του φύλλου εργασίας 'number concentration' (Εικόνα 67).

Στην παράγραφο 6.3.3.7 υπάρχουν αναλυτικές οδηγίες συμπλήρωσης του αρχείου εισόδου.



Εικόνα 66 - Πεδίο : Particles Cut-off Diameter

Πλήθος διαμέτρων = Αριθμός στηλών πίνακα = 18

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1		14,6	15,1	15,7	16,3	16,8	17,5	18,1	18,8	19,5	20,2	20,9	21,7	22,5	23,3	24,1	25	25,9	26,9
2	5	7,68E+02	1,44E+03	2,80E+03	2,49E+03	1,43E+03	2,50E+03	1,80E+03	2,39E+03	2,58E+03	2,59E+03	2,38E+03	3,43E+03	2,83E+03	2,14E+03	4,38E+03	3,19E+03	3,64E+03	5,07E+03
3	10	1,11E+03	1,39E+03	2,59E+03	3,02E+03	3,26E+03	2,13E+03	2,57E+03	2,91E+03	2,05E+03	2,92E+03	2,49E+03	3,00E+03	2,59E+03	3,75E+03	3,28E+03	4,33E+03	3,56E+03	3,56E+03
4	15	1,72E+03	1,69E+03	1,80E+03	5,32E+02	1,51E+03	1,93E+03	2,04E+03	1,34E+03	1,79E+03	3,03E+03	2,34E+03	3,17E+03	3,80E+03	3,13E+03	3,96E+03	3,40E+03	4,15E+03	4,01E+03
5	20	3,60E+03	3,08E+03	2,99E+03	3,72E+03	2,22E+03	2,57E+03	3,60E+03	3,65E+03	5,00E+03	4,65E+03	4,83E+03	4,04E+03	4,26E+03	5,32E+03	4,17E+03	4,11E+03	4,57E+03	5,12E+03
6	25	3,79E+03	3,26E+03	3,43E+03	4,52E+03	6,43E+03	4,83E+03	5,84E+03	4,30E+03	4,69E+03	4,67E+03	4,22E+03	4,67E+03	4,35E+03	5,22E+03	5,17E+03	5,43E+03	4,48E+03	5,39E+03
7	30	8,51E+04	9,53E+04	9,28E+04	9,25E+04	9,37E+04	1,05E+05	9,99E+04	1,15E+05	1,22E+05	1,22E+05	1,19E+05	1,15E+05	1,31E+05	1,38E+05	1,41E+05	1,60E+05	1,61E+05	1,57E+05
8	35	1,97E+05	2,01E+05	2,07E+05	2,14E+05	2,30E+05	2,24E+05	2,63E+05	2,67E+05	2,90E+05	2,95E+05	3,02E+05	3,04E+05	3,08E+05	3,12E+05	3,18E+05	3,48E+05	3,51E+05	3,59E+05
9	40	2,38E+05	2,27E+05	2,28E+05	2,22E+05	2,54E+05	2,65E+05	2,77E+05	3,00E+05	3,09E+05	3,36E+05	3,47E+05	3,58E+05	3,80E+05	4,03E+05	4,13E+05	4,56E+05	4,70E+05	4,94E+05
10	45	2,38E+05	2,22E+05	2,20E+05	2,13E+05	2,35E+05	2,38E+05	2,55E+05	2,60E+05	2,95E+05	3,01E+05	2,94E+05	3,21E+05	3,42E+05	3,54E+05	3,43E+05	3,70E+05	3,95E+05	4,10E+05
11	50	1,83E+05	1,64E+05	1,66E+05	1,90E+05	1,92E+05	2,10E+05	2,28E+05	2,48E+05	2,61E+05	2,58E+05	2,65E+05	2,90E+05	2,91E+05	3,11E+05	3,20E+05	3,36E+05	3,55E+05	3,82E+05
12	55	3,38E+05	3,26E+05	3,13E+05	3,08E+05	3,23E+05	2,99E+05	3,14E+05	3,19E+05	3,50E+05	3,35E+05	3,23E+05	3,28E+05	3,49E+05	3,47E+05	3,45E+05	3,85E+05	3,89E+05	4,17E+05
13	60	2,92E+05	2,74E+05	2,90E+05	3,00E+05	2,97E+05	3,15E+05	3,27E+05	3,14E+05	3,34E+05	3,45E+05	3,45E+05	3,45E+05	3,54E+05	3,59E+05	3,75E+05	3,73E+05	3,80E+05	3,99E+05
14	65	2,10E+05	2,03E+05	2,02E+05	1,92E+05	2,11E+05	2,05E+05	2,24E+05	2,33E+05	2,31E+05	2,31E+05	2,46E+05	2,53E+05	2,44E+05	2,70E+05	2,58E+05	2,64E+05	2,70E+05	2,83E+05
15	70	1,89E+05	1,68E+05	1,67E+05	1,57E+05	1,65E+05	1,68E+05	1,57E+05	1,65E+05	1,61E+05	1,68E+05	1,69E+05	1,76E+05	1,76E+05	1,78E+05	1,82E+05	1,89E+05	1,89E+05	1,98E+05
16	75	2,57E+05	2,42E+05	2,28E+05	2,23E+05	2,45E+05	2,39E+05	2,31E+05	2,23E+05	2,14E+05	2,16E+05	2,02E+05	2,00E+05	2,14E+05	1,93E+05	1,91E+05	1,78E+05	1,75E+05	1,68E+05
17	80	4,52E+05	4,45E+05	4,38E+05	4,19E+05	4,26E+05	4,23E+05	4,19E+05	4,10E+05	3,85E+05	3,87E+05	3,36E+05	3,10E+05	2,98E+05	2,89E+05	2,82E+05	2,60E+05	2,56E+05	2,35E+05
18	85	6,30E+05	6,43E+05	7,08E+05	7,50E+05	7,87E+05	8,63E+05	9,25E+05	9,68E+05	9,66E+05	9,81E+05	9,35E+05	9,19E+05	9,24E+05	9,50E+05	9,10E+05	8,51E+05	8,60E+05	8,41E+05
19	90	2,13E+05	1,90E+05	1,97E+05	2,19E+05	2,38E+05	2,74E+05	3,03E+05	3,31E+05	3,73E+05	4,36E+05	4,83E+05	5,69E+05	6,17E+05	6,76E+05	7,06E+05	7,30E+05	7,63E+05	7,56E+05
20	95	8,71E+04	5,87E+04	6,11E+04	6,67E+04	6,68E+04	8,31E+04	8,75E+04	1,01E+05	1,26E+05	1,48E+05	1,65E+05	1,80E+05	2,04E+05	2,41E+05	2,64E+05	3,06E+05	3,60E+05	3,98E+05
21	100	4,66E+04	3,66E+04	3,16E+04	2,78E+04	3,32E+04	3,51E+04	4,02E+04	4,66E+04	5,06E+04	6,32E+04	6,94E+04	8,18E+04	9,18E+04	1,12E+05	1,27E+05	1,43E+05	1,70E+05	1,92E+05
22	105	2,82E+04	1,83E+04	1,44E+04	1,80E+04	1,87E+04	1,90E+04	2,18E+04	2,72E+04	2,75E+04	3,35E+04	3,96E+04	4,21E+04	5,33E+04	6,89E+04	6,97E+04	8,07E+04	9,84E+04	1,09E+05
23	110	2,72E+04	1,50E+04	1,14E+04	1,16E+04	1,26E+04	1,29E+04	1,21E+04	1,81E+04	1,83E+04	2,26E+04	2,86E+04	2,81E+04	3,53E+04	4,49E+04	5,22E+04	5,98E+04	6,52E+04	7,75E+04
24	115	1,55E+04	8,33E+03	1,06E+04	9,67E+03	8,97E+03	1,02E+04	1,40E+04	9,64E+03	1,86E+04	1,83E+04	2,15E+04	2,24E+04	3,01E+04	3,48E+04	4,13E+04	4,85E+04	5,02E+04	6,04E+04
25	120	1,60E+04	1,19E+04	8,14E+03	8,17E+03	8,01E+03	7,68E+03	8,36E+03	9,80E+03	1,15E+04	1,05E+04	1,67E+04	1,62E+04	2,11E+04	2,72E+04	2,97E+04	3,08E+04	3,49E+04	4,36E+04
26	125	7,25E+03	5,14E+03	3,67E+03	4,71E+03	5,56E+03	8,04E+03	7,13E+03	9,57E+03	1,04E+04	1,23E+04	1,11E+04	1,32E+04	1,66E+04	2,00E+04	2,52E+04	2,46E+04	3,44E+04	3,73E+04
27	130	9,93E+03	5,45E+03	4,49E+03	5,32E+03	4,44E+03	3,69E+03	6,17E+03	7,43E+03	6,31E+04	1,10E+04	1,13E+04	1,02E+04	1,43E+04	1,54E+04	2,25E+04	2,22E+04	2,96E+04	
28	135	1,06E+04	5,42E+03	4,98E+03	5,87E+03	3,73E+03	5,12E+03	3,35E+03	8,12E+03	6,74E+03	1,44E+03	7,71E+03	1,16E+04	1,45E+04	1,37E+04	1,65E+04	2,10E+04	2,23E+04	2,55E+04
29	140	8,43E+03	4,40E+03	3,48E+03	3,02E+03	2,54E+03	5,27E+03	3,39E+03	4,36E+03	6,37E+03	7,15E+03	6,48E+03	9,45E+03	1,19E+04	1,25E+04	1,39E+04	1,61E+04	1,78E+04	2,22E+04

'number\_concentration' sheet



Time Interval=5min

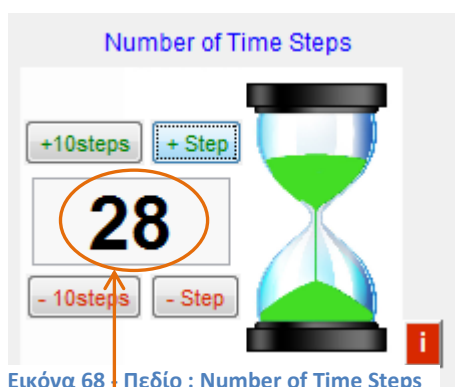
Συγκέντρωση σωματιδίων

Εδώ έχουμε τον χρόνο στον οποίο το όργανο ρυθμίστηκε να παίρνει μετρήσεις

#/cm<sup>3</sup>

Εικόνα 67 - Πλήθος διαμέτρων σωματιδίων στο φύλλο εργασίας 'number concentration'

### 6.3.3.6 Αριθμός πειραματικών μετρήσεων οργάνου (Number of Time Steps)



Εικόνα 68 Πεδίο : Number of Time Steps

Αυτό το πεδίο (Εικόνα 68) καθορίζεται ουσιαστικά από το πλήθος των μετρήσεων των σωματιδίων που παίρνουμε με το όργανο μέτρησης που χρησιμοποιούμε. Το πεδίο αυτό χρησιμοποιείται και στο αρχείο εισόδου στην στήλη-1 του φύλλου εργασίας “physical activity” (Εικόνα 69).

Στην παράγραφο 6.3.3.7 υπάρχουν αναλυτικές οδηγίες συμπλήρωσης του αρχείου εισόδου.

	A	B	C	D
1	5	5,5	1	
2	10	5,5	1	
3	15	5,5	1	
4	20	5,5	1	
5	25	5,5	1	
6	30	5,5	1	
7	35	5,5	1	
8	40	5,5	1	
9	45	5,5	1	
10	50	5,5	1	
11	55	5,5	1	
12	60	5,5	1	
13	65	5,5	1	
14	70	5,5	1	
15	75	5,5	1	
16	80	5,5	1	
17	85	5,5	1	
18	90	5,5	1	
19	95	5,5	1	
20	100	5,5	1	
21	105	5,5	1	
22	110	5,5	1	
23	115	5,5	1	
24	120	5,5	1	
25	125	5,5	1	
26	130	5,5	1	
27	135	5,5	1	
28	140	5,5	1	

Time Interval=5min

WIND SPEED

ACTIVITY

Εδώ έχουμε τον χρόνο στον οποίο το όργανο ρυθμίστηκε να παίρνει μετρήσεις

Εισαγωγή της ταχύτητας του ανέμου σε m/sec

Δραστηριότητα του ατόμου

“physical activity” sheet

Εικόνα 69 - Time Steps στο φύλλο εργασίας 'physical activity'

### 6.3.3.7 Αρχείο εισόδου (input file) για number concentration

Το αρχείο εισόδου επισυνάπτεται στο μενού που φαίνεται στην Εικόνα 70. Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να επισυνάψει ένα αρχείο το οποίο το έχει ήδη συμπληρώσει μέσω της επιλογής “Attach an input file (xls)” ή να δημιουργήσει ένα νέο αρχείο μέσω της επιλογής “Create a new input file (xls)”. Ο τρόπος εισαγωγής δεδομένων σε ένα αρχείο εισόδου, περιγράφεται αναλυτικά στα σχήματα των Εικόνων 71 και 72.

ExDoM2 Model

ExDoM2

Days

Exposure duration

Days: 1

Hours: 0

Gender & Age

Male Adult

Breathing Type

Nose

Total Concentration in the Input File

Particle density: 1.5 g/cm<sup>3</sup>

Shape Factor: 1 (1 for spherical particles)

Calculation for clearance will be performed for

Days: 1

and 0 hours after initial intake

Particles

PM

PM Bound-Metal

Continue calculating the dose after the Clearance procedure

Continue with PBPK Model?

Yes

No

Blood Particle Absorption Behavior

Slow

Moderate

Fast

Metal

Mn

Cr-III

As-III

Cr-VI

As-V

Cd

Pb

Experimental Data on Mass available

Size Distribution

Different exposure microenvironment?

No

Yes

Experimental Data on Mass

Browse

Pathname:

Filename:

Impactor Stages: 3

Cut-Off point (N1) for fine mode particles: 1

Table line counting from bottom

Input File

Attach the Input File .xls

Attach an Input File (xls)

Create a new Input File (xls)

Browse

Pathname:

Filename:

start

Press 'Start' to proceed....

Εικόνα 70 -Αρχείο εισόδου (input file) για number concentration



## Παράδειγμα συμπλήρωσης Input File για number concentration



Data in Excel – 1<sup>st</sup> sheet 'physical activity'

- Ο υπολογισμός θα πραγματοποιηθεί για 140 min. Κάθε γραμμή του πίνακα αντιπροσωπεύει ένα time step μετρήσεων από το όργανο μέτρησης (time step =5mins ).
- Υπάρχει διαθέσιμη συγκέντρωση πλήθους σωματιδίων σε  $\#/cm^3$ .
- Υπάρχει διαθέσιμη πληροφορία για τις διαμέτρους των σωματιδίων έκθεσης.

Time Interval=5min

Εδώ έχουμε τον χρόνο στον οποίο το όργανο ρυθμίστηκε να παίρνει μετρήσεις

WIND SPEED

Εισαγωγή της ταχύτητας του ανέμου σε m/sec

ACTIVITY

Δραστηριότητα του ατόμου

	A	B	C	D
1	5	5,5	1	
2	10	5,5	1	
3	15	5,5	1	
4	20	5,5	1	
5	25	5,5	1	
6	30	5,5	1	
7	35	5,5	1	
8	40	5,5	1	
9	45	5,5	1	
10	50	5,5	1	
11	55	5,5	1	
12	60	5,5	1	
13	65	5,5	1	
14	70	5,5	1	
15	75	5,5	1	
16	80	5,5	1	
17	85	5,5	1	
18	90	5,5	1	
19	95	5,5	1	
20	100	5,5	1	
21	105	5,5	1	
22	110	5,5	1	
23	115	5,5	1	
24	120	5,5	1	
25	125	5,5	1	
26	130	5,5	1	
27	135	5,5	1	
28	140	5,5	1	

- 1→ Υπνος  
➤ 2→ Ανάπαυση  
➤ 3→ Ελαφριά εργασία  
➤ 4→ Βαριά εργασία



'physical activity' sheet

Εικόνα 71 - Παράδειγμα συμπλήρωσης φύλλου εργασίας "physical activity" του Input File για number concentration





## Data in Excel – 2<sup>nd</sup> sheet 'number concentration (# cm-3)'

Time Interval=5min

Εδώ έχουμε τον χρόνο στον οποίο το όργανο ρυθμίστηκε να παίρνει μετρήσεις

- Ο υπολογισμός θα πραγματοποιηθεί για 140 min. Κάθε γραμμή του πίνακα αντιπροσωπεύει ένα time step μετρήσεων από το όργανο μέτρησης (time step =5mins).
- Υπάρχει διαθέσιμη συγκέντρωση πλήθους σωματιδίων σε #/cm<sup>3</sup>.
- Υπάρχει διαθέσιμη πληροφορία για τις διαμέτρους των σωματιδίων έκθεσης.

### Particles Cut-Off diameters

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1		14,6	15,1	15,7	16,3	16,8	17,5	18,1	18,8	19,5	20,2	20,9	21,7	22,5	23,3	24,1	25	25,9	26,9
2	5	7,68E+02	1,44E+03	2,80E+03	2,49E+03	1,43E+03	2,50E+03	1,80E+03	2,39E+03	2,58E+03	2,59E+03	2,38E+03	3,43E+03	2,83E+03	2,14E+03	4,38E+03	3,19E+03	3,84E+03	5,07E+03
3	10	1,11E+03	1,39E+03	2,59E+03	3,02E+03	3,26E+03	2,13E+03	2,57E+03	2,91E+03	2,05E+03	2,92E+03	2,49E+03	3,00E+03	2,59E+03	3,75E+03	3,28E+03	4,33E+03	3,56E+03	3,55E+03
4	15	1,72E+03	1,69E+03	1,80E+03	5,32E+02	1,51E+03	1,93E+03	2,04E+03	1,34E+03	1,79E+03	3,03E+03	2,34E+03	3,17E+03	3,80E+03	3,13E+03	3,96E+03	3,40E+03	4,15E+03	4,01E+03
5	20	3,60E+03	3,08E+03	2,99E+03	3,72E+03	2,22E+03	2,57E+03	3,60E+03	3,65E+03	5,00E+03	4,65E+03	4,83E+03	4,04E+03	4,26E+03	5,32E+03	4,17E+03	4,11E+03	4,57E+03	5,12E+03
6	25	3,79E+03	3,26E+03	3,43E+03	4,52E+03	6,43E+03	4,83E+03	5,84E+03	4,30E+03	4,69E+03	4,67E+03	4,22E+03	4,67E+03	4,35E+03	5,22E+03	5,17E+03	5,43E+03	4,48E+03	5,39E+03
7	30	8,51E+04	9,53E+04	9,28E+04	9,25E+04	9,37E+04	1,05E+05	9,99E+04	1,15E+05	1,22E+05	1,22E+05	1,19E+05	1,15E+05	1,31E+05	1,38E+05	1,41E+05	1,60E+05	1,61E+05	1,57E+05
8	35	1,97E+05	2,01E+05	2,07E+05	2,14E+05	2,30E+05	2,24E+05	2,63E+05	2,67E+05	2,90E+05	2,95E+05	3,02E+05	3,04E+05	3,08E+05	3,12E+05	3,18E+05	3,48E+05	3,51E+05	3,59E+05
9	40	2,38E+05	2,27E+05	2,28E+05	2,22E+05	2,54E+05	2,65E+05	2,77E+05	3,00E+05	3,09E+05	3,36E+05	3,47E+05	3,58E+05	3,80E+05	4,03E+05	4,13E+05	4,56E+05	4,70E+05	4,94E+05
10	45	2,38E+05	2,22E+05	2,20E+05	2,13E+05	2,35E+05	2,38E+05	2,55E+05	2,60E+05	2,95E+05	3,01E+05	2,94E+05	3,21E+05	3,42E+05	3,54E+05	3,43E+05	3,70E+05	3,95E+05	4,10E+05
11	50	1,83E+05	1,64E+05	1,66E+05	1,90E+05	1,92E+05	2,10E+05	2,26E+05	2,48E+05	2,61E+05	2,58E+05	2,65E+05	2,90E+05	2,91E+05	3,11E+05	3,20E+05	3,36E+05	3,55E+05	3,82E+05
12	55	3,38E+05	3,26E+05	3,13E+05	3,08E+05	3,23E+05	2,99E+05	3,14E+05	3,19E+05	3,50E+05	3,35E+05	3,23E+05	3,28E+05	3,49E+05	3,47E+05	3,45E+05	3,85E+05	3,89E+05	4,17E+05
13	60	2,92E+05	2,74E+05	2,90E+05	3,00E+05	2,97E+05	3,15E+05	3,27E+05	3,14E+05	3,34E+05	3,45E+05	3,45E+05	3,45E+05	3,54E+05	3,59E+05	3,75E+05	3,73E+05	3,80E+05	3,99E+05
14	65	2,10E+05	2,03E+05	2,02E+05	1,92E+05	2,11E+05	2,05E+05	2,24E+05	2,33E+05	2,31E+05	2,31E+05	2,46E+05	2,53E+05	2,44E+05	2,70E+05	2,58E+05	2,64E+05	2,70E+05	2,83E+05
15	70	1,89E+05	1,68E+05	1,67E+05	1,57E+05	1,65E+05	1,68E+05	1,57E+05	1,65E+05	1,61E+05	1,68E+05	1,69E+05	1,76E+05	1,76E+05	1,78E+05	1,82E+05	1,89E+05	1,89E+05	1,98E+05
16	75	2,57E+05	2,42E+05	2,28E+05	2,23E+05	2,45E+05	2,39E+05	2,31E+05	2,23E+05	2,14E+05	2,16E+05	2,02E+05	2,00E+05	2,14E+05	1,93E+05	1,91E+05	1,78E+05	1,75E+05	1,68E+05
17	80	4,52E+05	4,45E+05	4,38E+05	4,19E+05	4,26E+05	4,23E+05	4,19E+05	4,10E+05	3,85E+05	3,87E+05	3,36E+05	3,10E+05	2,98E+05	2,89E+05	2,82E+05	2,60E+05	2,56E+05	2,35E+05
18	85	6,30E+05	6,43E+05	7,08E+05	7,50E+05	7,87E+05	8,63E+05	9,25E+05	9,68E+05	9,66E+05	9,81E+05	9,19E+05	9,24E+05	9,50E+05	9,10E+05	8,51E+05	8,60E+05	8,41E+05	8,50E+05
19	90	2,13E+05	1,90E+05	1,97E+05	2,19E+05	2,38E+05	2,74E+05	3,03E+05	3,31E+05	3,73E+05	4,36E+05	4,83E+05	5,69E+05	6,17E+05	6,76E+05	7,06E+05	7,30E+05	7,63E+05	7,56E+05
20	95	8,71E+04	5,87E+04	6,11E+04	6,67E+04	6,68E+04	8,31E+04	8,75E+04	1,01E+05	1,26E+05	1,48E+05	1,65E+05	1,80E+05	2,04E+05	2,41E+05	2,64E+05	3,06E+05	3,60E+05	3,98E+05
21	100	4,66E+04	3,66E+04	3,16E+04	2,78E+04	3,32E+04	3,51E+04	4,02E+04	4,66E+04	5,06E+04	6,32E+04	6,81E+04	8,18E+04	9,18E+04	1,12E+05	1,27E+05	1,43E+05	1,70E+05	1,92E+05
22	105	2,82E+04	1,83E+04	1,44E+04	1,80E+04	1,87E+04	1,90E+04	2,18E+04	2,72E+04	2,75E+04	3,35E+04	3,96E+04	4,21E+04	5,33E+04	6,89E+04	6,97E+04	8,07E+04	9,84E+04	1,09E+05
23	110	2,72E+04	1,50E+04	1,14E+04	1,16E+04	1,26E+04	1,29E+04	1,21E+04	1,81E+04	1,83E+04	2,26E+04	2,86E+04	2,81E+04	3,53E+04	4,49E+04	5,22E+04	5,98E+04	6,52E+04	7,75E+04
24	115	1,55E+04	8,33E+03	1,06E+04	9,67E+03	8,97E+03	1,02E+04	1,40E+04	9,64E+03	1,86E+04	1,83E+04	2,15E+04	2,24E+04	3,01E+04	3,48E+04	4,13E+04	4,85E+04	5,02E+04	6,04E+04
25	120	1,60E+04	1,19E+04	8,14E+03	8,17E+03	8,01E+03	7,68E+03	8,36E+03	9,80E+03	1,15E+04	1,05E+04	1,67E+04	1,62E+04	2,11E+04	2,72E+04	2,97E+04	3,08E+04	3,49E+04	4,36E+04
26	125	7,25E+03	7,14E+03	3,67E+03	4,71E+03	5,56E+03	8,04E+03	7,13E+03	9,57E+03	1,04E+04	1,21E+04	1,11E+04	1,32E+04	1,56E+04	2,00E+04	2,52E+04	2,46E+04	3,44E+04	3,73E+04
27	130	9,93E+03	5,45E+03	4,49E+03	5,32E+03	4,44E+03	3,69E+03	6,17E+03	7,43E+03	6,31E+03	1,10E+04	1,13E+04	1,02E+04	1,43E+04	1,54E+04	1,93E+04	2,25E+04	2,22E+04	2,96E+04
28	135	1,06E+04	5,42E+03	4,98E+03	5,87E+03	3,73E+03	5,12E+03	3,35E+03	8,12E+03	6,74E+03	7,44E+03	7,71E+03	1,16E+04	1,45E+04	1,37E+04	1,65E+04	2,10E+04	2,23E+04	2,55E+04
29	140	8,43E+03	4,40E+03	3,48E+03	3,02E+03	2,54E+03	5,27E+03	3,39E+03	4,36E+03	6,37E+03	7,15E+03	6,48E+03	9,45E+03	1,19E+04	1,25E+04	1,39E+04	1,61E+04	1,78E+04	2,22E+04

Particles Concentration (#/cm<sup>3</sup>)

'number concentration(# cm-3)' sheet



Εικόνα 72 - Παράδειγμα συμπλήρωσης φύλλου εργασίας "number concentration" του Input File για number concentration

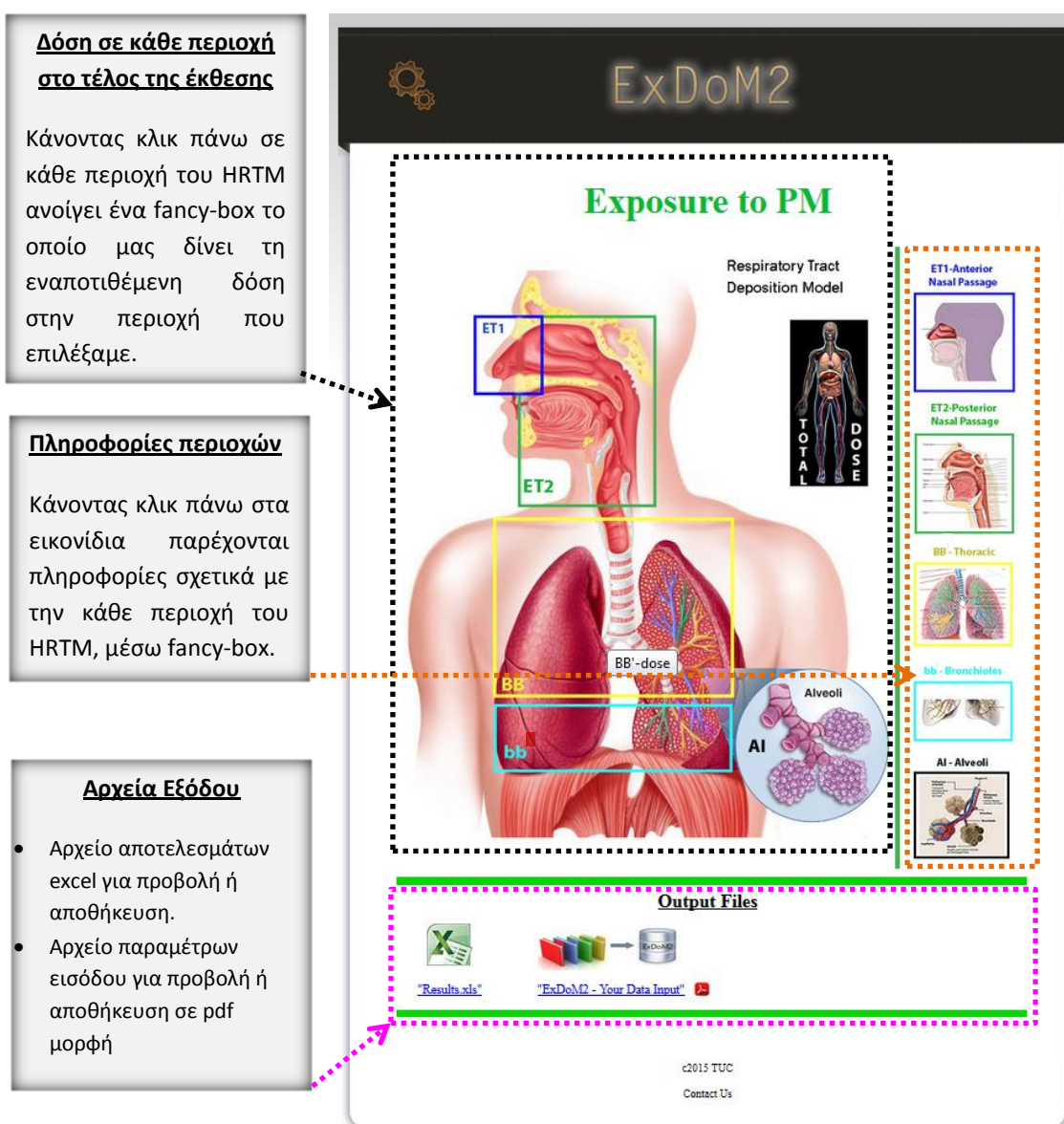
## 6.4 Διεπαφή εξόδου αποτελεσμάτων ExDoM2

Το γραφικό περιβάλλον εξόδου είναι σε περιβάλλον δυναμικής ιστοσελίδας (web-based), προσφέροντας έτσι μία διαδραστική παρουσίαση των αποτελεσμάτων του μοντέλου.

Ας δούμε όμως πιο αναλυτικά τους βασικούς τρόπους παρουσίασης των αποτελεσμάτων του μοντέλου, μέσω κάποιων συγκεκριμενοποιημένων παραδειγμάτων παραμετροποίησης του μοντέλου.

### 6.4.1 1<sup>η</sup> Διεπαφή εξόδου

Στο σχήμα της Εικόνας 73 έχουμε την έξοδο του μοντέλου για mass concentration PM σωματιδίων, χωρίς εφαρμογή καθαρισμού.



Εικόνα 73 - 1η Διεπαφή Εξόδου για PM mass concentration χωρίς καθαρισμό

## 2η Διεπαφή εξόδου

Στο σχήμα της Εικόνας 74 έχουμε την έξοδο του μοντέλου για mass concentration PM σωματιδίων με εφαρμογή διαδικασίας καθαρισμού.

### Δόση σε κάθε περιοχή στο τέλος της έκθεσης

Κάνοντας κλικ πάνω σε κάθε περιοχή του HRTM ανοίγει ένα fancy-box το οποίο μας δίνει της εναποτιθέμενης δόση στην περιοχή που επιλέξαμε.

### Πληροφορίες περιοχών

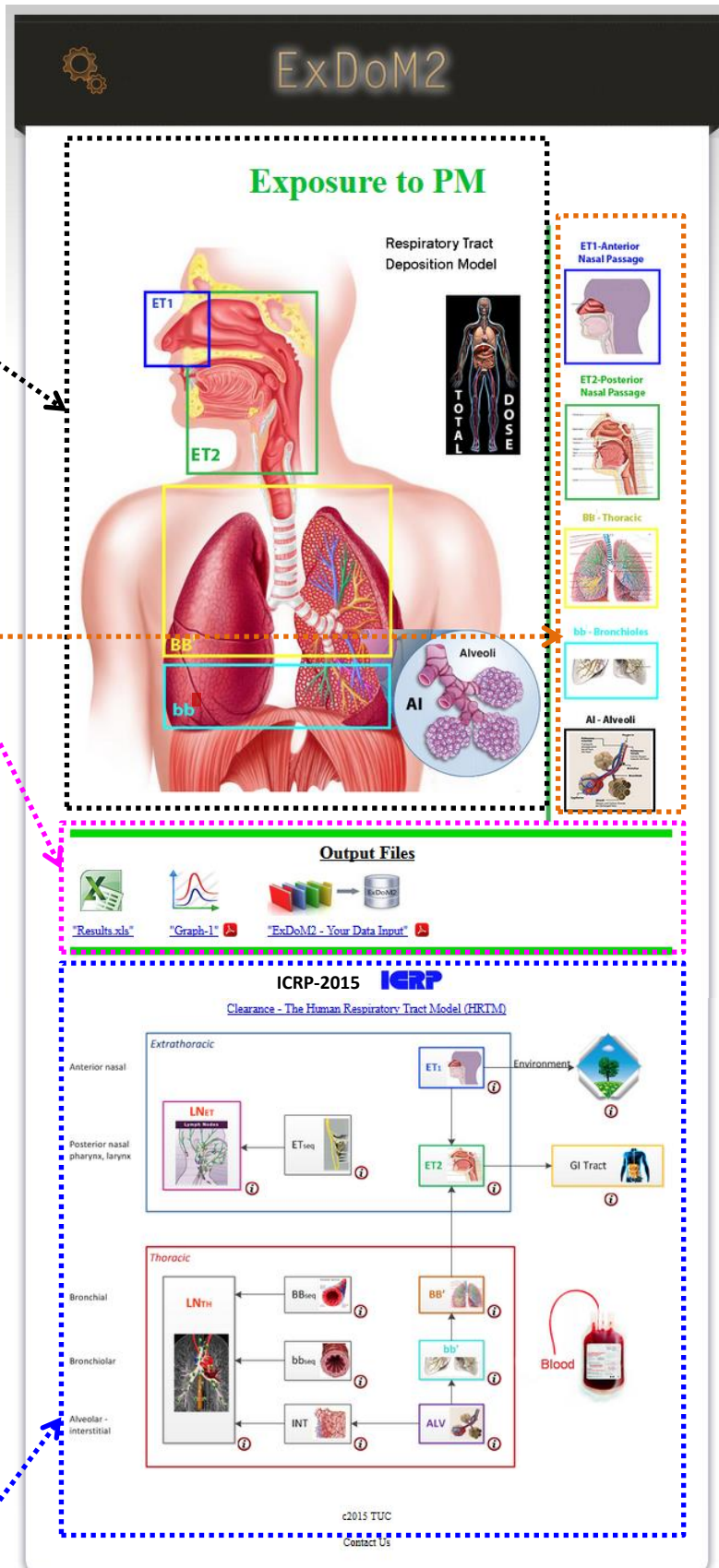
Κάνοντας κλικ πάνω στα εικονίδια παρέχονται πληροφορίες σχετικά με την κάθε περιοχή του HRTM, μέσω fancy-box.

### Αρχεία Εξόδου

- Αρχείο αποτελεσμάτων excel για προβολή ή αποθήκευση.
- Γραφικές παραστάσεις για προβολή μέσω fancy box ή σε μορφή pdf.
- Αρχείο παραμέτρων εισόδου για προβολή ή αποθήκευση σε pdf μορφή

### Κατακράτηση σε κάθε τμήμα μετά τον καθαρισμό – ICRP2015

Κάνοντας κλικ πάνω στα εικονίδια παρέχονται πληροφορίες σχετικά με την κατακράτηση σε κάθε περιοχή του HRTM, μέσω fancy-box.



Εικόνα 74 - 2η Διεπαφή Εξόδου για PM mass concentration με καθαρισμό



### 6.4.3 3η Διεπαφή εξόδου

Στο σχήμα της Εικόνας 75 έχουμε την έξοδο του μοντέλου για mass concentration PM Bound-metal (έστω μόλυβδο Pb) σωματιδίων με εφαρμογή καθαρισμού και PBPK .

#### Δόση σε κάθε όργανο σύμφωνα με το PBPK

Βάζοντας τον κέρσorra του ποντικιού πάνω σε κάθε όργανο ή τμήμα , εμφανίζεται το όνομα του και κάνοντας κλικ πάνω του ανοίγει ένα fancy-box το οποίο μας δίνει τη δόση στο επιλεγμένο όργανο, σύμφωνα με το PBPK μοντέλο (εικόνα-81).

#### Αρχεία Εξόδου

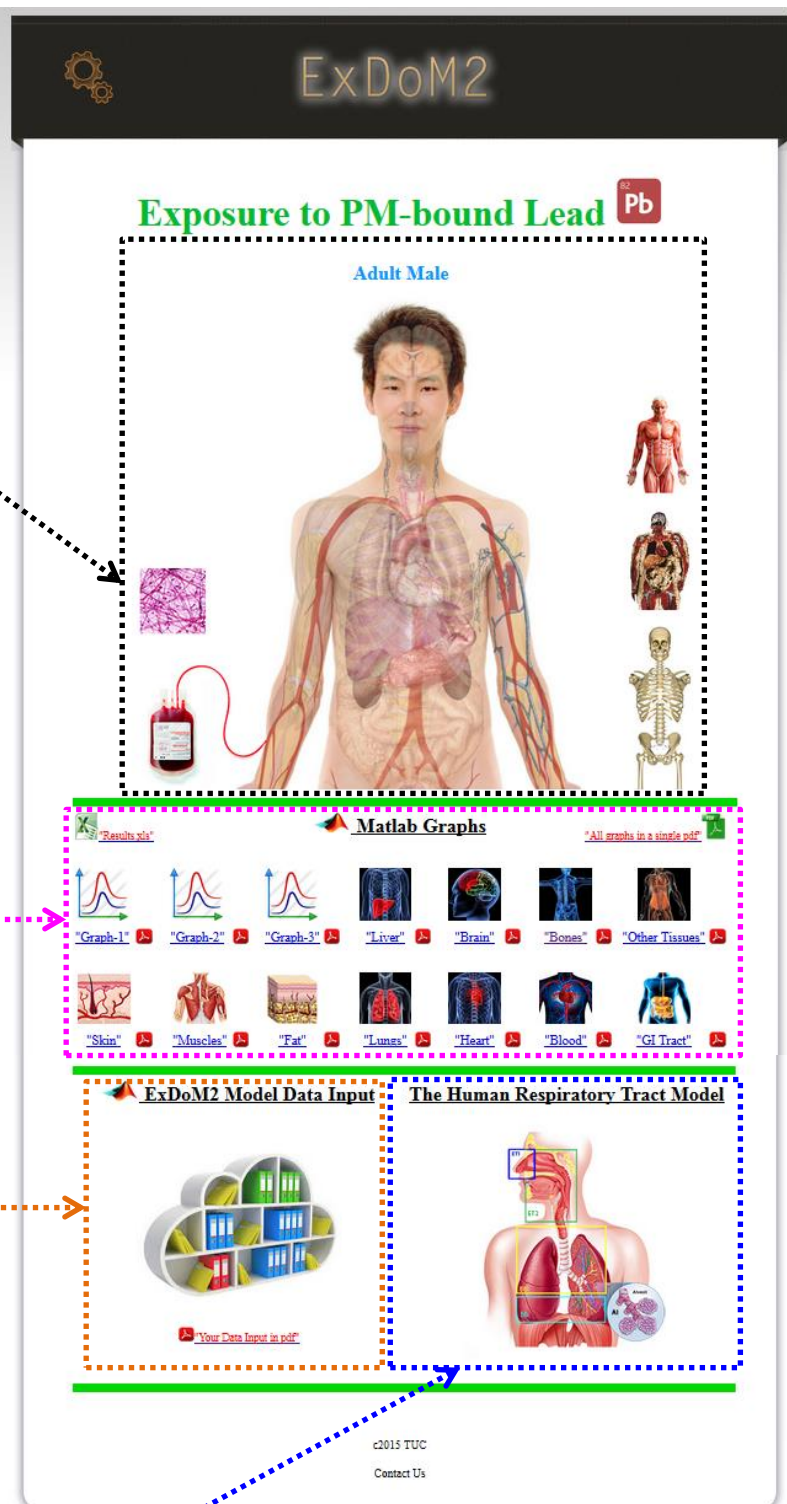
- Αρχείο αποτελεσμάτων excel για προβολή ή αποθήκευση.
- Γραφικές παραστάσεις ανά όργανο αλλά και συγκριτικές μεταξύ οργάνων για προβολή μέσω fancy box ή σε μορφή pdf (εικόνα 83).

#### Δεδομένα Εισόδου

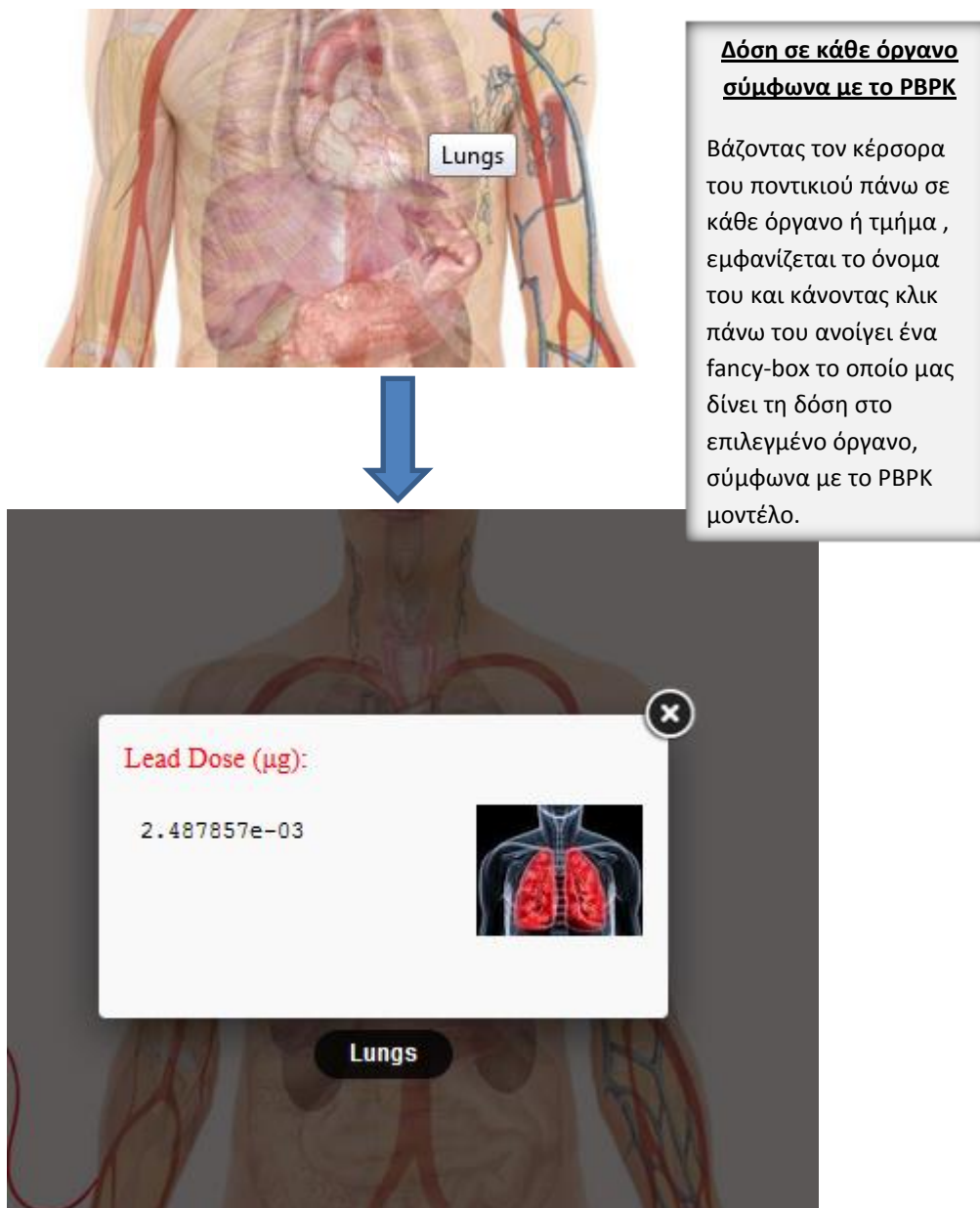
- Αρχείο παραμέτρων εισόδου για προβολή μέσω fancy box ή αποθήκευση σε pdf μορφή (εικόνα 82).

#### Καθαρισμός & Εναπόθεση

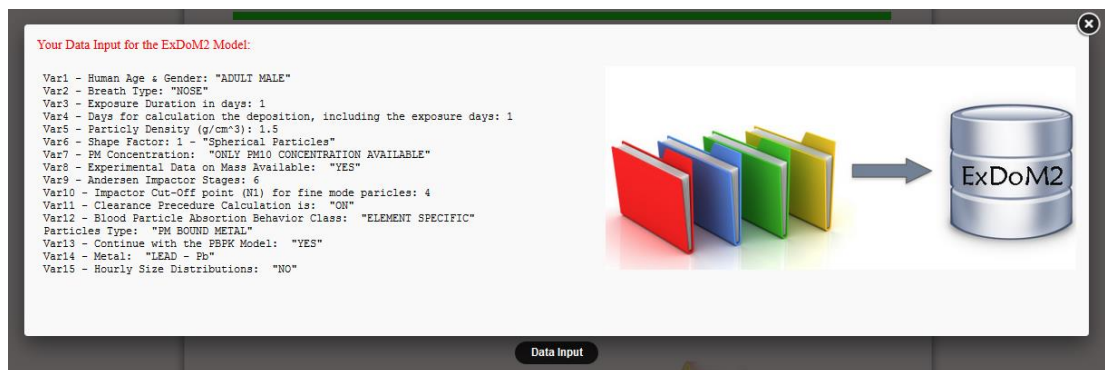
Κάνοντας κλικ εδώ οδηγούμαστε σε νέα καρτέλα όμοια της 2<sup>ης</sup> διεπαφής προσφέροντας τα δεδομένα της εικόνας 79.



Εικόνα 75 - 3η Διεπαφή εξόδου



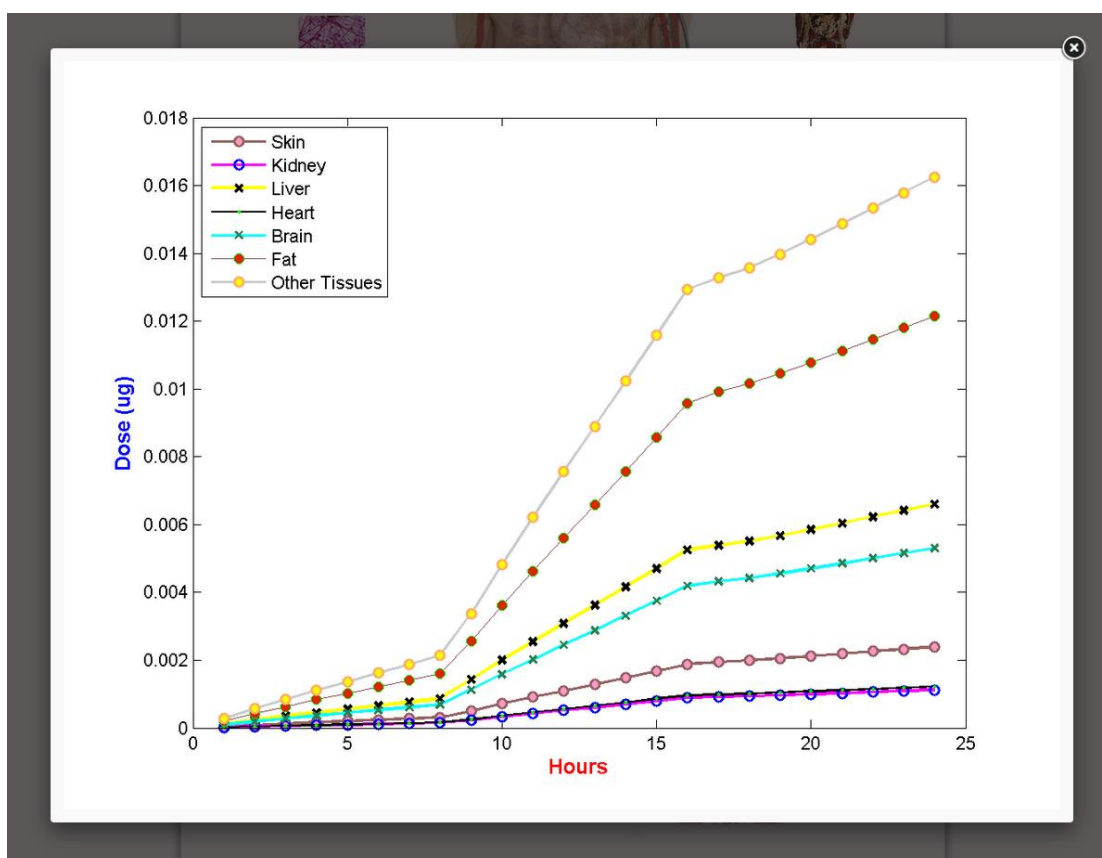
Εικόνα 76 - Διαδραστική προβολή με fancy-box των τιμών δόση στα ανθρώπινα όργανα



Εικόνα 77 - Προβολή δεδομένων εισόδου στο ExDoM2 μέσω fancy-box

Στα αρχεία εξόδου υπάρχουν διαθέσιμα για τον χρήστη :

- Το results.xls αρχείο που περιέχει όλη τη πληροφορία εξόδου συγκεντρωμένη. Είναι διαθέσιμο είτε για προβολή είτε για απευθείας αποθήκευση.
- Κάθε γραφική παράσταση είτε για προβολή μέσω της λειτουργίας fancy box ή σε νέα καρτέλα σε μορφή pdf (Εικόνα 78).
- Όλες οι γραφικές παραστάσεις μαζεμένες σε ένα και μοναδικό pdf, το οποίο περιλαμβάνει και τα δεδομένα εισόδου του χρήστη, στο ExDoM2.



Εικόνα 78 - Απεικόνιση γραφικής παράστασης με χρήση fancy box

## 7. Εφαρμογή του ExDoM2 στο μετρό της Αθήνας.

### 7.1 Γενικά

Τα συστήματα μετρό ή υπόγεια συστήματα όπως αναφέρονται στην βιβλιογραφία έχουν θεωρηθεί ως ένα σημαντικό μέσο μεταφοράς που βελτιώνει την ποιότητα της μεταφοράς και μετριάξει την κυκλοφοριακή συμφόρηση. Αποτελούν ένα μοναδικό μικροπεριβάλλον μέσα στο οποίο είναι δυνατόν να προωθείται η συγκέντρωση μολυσματικών/ρυπαντικών παραγόντων οι οποίοι προέρχονται είτε από εσωτερικές είτε από εξωτερικές πηγές.

Έρευνες που έχουν διεξαχθεί σε διάφορες χώρες παγκοσμίως έχουν αναγνωρίσει ότι το συγκοινωνιακό σύστημα του μετρό είναι μια σημαντική πηγή που επιδρά δυσμενώς στην δημόσια υγεία. Ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες με συμπτώματα στην ανθρώπινη υγεία συμφώνα με τις Επιδημιολογικές μελέτες είναι η έκθεση των χρηστών και των εργαζομένων στα αιωρούμενα σωματίδια.

Τα αποτελέσματα μελετών που έχουν διεξαχθεί διεθνώς σε διάφορα αστικά κέντρα έχουν αποκαλύψει υψηλά επίπεδα σωματιδιακής ύλης στα συστήματα του μετρό. Αντίστοιχα οι επιδημιολογικές μελέτες αναγνωρίζουν ότι η υπέρβαση των αιωρούμενων σωματιδίων  $PM_{10}$  στα συστήματα μετρό προκαλεί ασθένειες όπως οξειδωτικό στρες και φλεγμονή.

Το σύστημα του μετρό στην Αθήνα ξεκίνησε τη λειτουργία του τον Ιανουάριο του 2000 και αποτελείται από δύο γραμμές, την μπλε και την κόκκινη. Επειδή είναι σχετικά πρόσφατα κατασκευασμένο, δημοσιευμένες πληροφορίες για τα επίπεδα συγκέντρωσης σωματιδιακής ύλης σε αυτό είναι ελάχιστες.

Για την εφαρμογή του μοντέλου στο μετρό της Αθήνας, οι μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδος, πραγματοποιήθηκαν από την Μάμμη-Γαλάνη Ελένη.

### 7.2 Τα επίπεδα σωματιδιακής ύλης στα δίκτυα του Μετρό

Έρευνες πάνω στον τομέα της αποτίμησης των επιπέδων σωματιδιακής ύλης που συσσωρεύεται στα δίκτυα του μετρό έχουν λάβει χώρα από άκρο σε άκρο του κόσμου όπως: Νέα Υόρκη (Αμερική) (Chillrud κ.ά., 2004), Λονδίνο (Αγγλία) (Adams κ.ά., 2001), Βερολίνο (Γερμανία) (Fromme κ.ά., 1998), Στοκχόλμη (Σουηδία) (Johansson, 2003), Ελσίνκι (Φινλανδία) (Aarnio κ.ά., 2005), Τόκιο (Ιαπωνία) (Furuya κ.ά., 2001), Χονγκ Κονγκ (Chan κ.ά., 2002) κ.ά.

Οι Πίνακες 7 και 8 αντίστοιχα, περιλαμβάνουν, για λόγους οικονομίας χώρου, συγκεντρωμένα αποτελέσματα από έρευνες για  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$  αντίστοιχα, που έχουν διεξαχθεί σε διάφορα μέρη του κόσμου αναφορικά με τα επίπεδα σωματιδιακής ύλης στα συστήματα μετρό.



Πίνακας 7 - Επίπεδα PM<sub>10</sub> (μέση τιμή & εύρος) σε µg/m<sup>3</sup> για διαφορετικά συστήματα μετρό ανά τον κόσμο

Πόλη	Εύρος	Μέση τιμή	Περιβάλλον	Αναφορά
Πεκίνο	-	325	Μέσα σε συρμούς	Li κ.ά. (2007)
Βερολίνο	-	147	Μέσα σε συρμούς	Fromme κ.ά. (1998)
Λονδίνο	-	1000-1500	Αποβάθρα	Seaton κ.ά. (2005)
Βουδαπέστη	85-234	180	Αποβάθρα	Salma κ.ά. (2007)
Καντόνα	26-123	67	Μέσα σε συρμούς	Chan κ.ά. (2002b)
Χονγκ Κονγκ	23-85	44	Μέσα σε συρμούς	Chan κ.ά. (2002a)
Πράγα	10-210 / 24-218	103 / 114	Σταθμός / Συρμοί	Branis (2006)
Ρώμη	71-877	407	Αποβάθρα	Ripanucci κ.ά. (2006)
Τόκυο		30-120	Σταθμοί	Furuya κ.ά. (2001)
Σεούλ	238-480/289-356	359 - 312	Αποβάθρα/Συρμοί	Kim κ.ά. (2008)
Στοκχόλμη	212-722	469	Αποβάθρα	Johansson (2003)
Ταϊπέι	11-137 / 10-97		Αποβάθρα/Συρμοί	Yu-Hsiang Cheng κ.ά. (2008)
Αθήνα	25-132 23-224	57 68	Συρμοί – <b>Blue Line</b> Συρμοί – <b>Red Line</b>	

Πίνακας 8 - Επίπεδα PM<sub>2,5</sub> (μέση τιμή & εύρος) σε µg/m<sup>3</sup> για διαφορετικά συστήματα μετρό ανά τον κόσμο

Πόλη	Εύρος	Μέση τιμή	Περιβάλλον	Αναφορά
Πεκίνο	-	112	Μέσα σε συρμούς	Li κ.ά. (2007)
Βερολίνο	-	147	Μέσα σε συρμούς	Fromme κ.ά. (1998)
Λονδίνο	-	270-480	Σε 3 διαφ. αποβάθρες	Seaton κ.ά. (2005)
	-	130-200	Σε 3 διαφ. σταθμούς	Pfeifer κ.ά. (1999)
	-	246	Αποβάθρα	Adams κ.ά. (2001)
	12-371	228	Μέσα σε συρμούς	
Ελσίνκι	23-103/17-26	60 / 21	Σταθμός / Συρμοί	Aarnio κ.ά. (2005)
Καντόνα	-	44	Μέσα σε συρμούς	Chan κ.ά. (2002b)
Χονγκ Κονγκ	21-48	33	Μέσα σε συρμούς	Chan κ.ά. (2002a)

Μεξικό	8-68	-	Μέσα σε συρμούς	Gomez- Perales κ.ά. (2007)
Νέα Υόρκη	-	62	Μέσα σε συρμούς	Chillrud κ.ά. (2004)
Ταϊπέι	7-100 / 8-68	35 / 32	Αποβάθρα/Συρμοί	Yu-Hsiang Cheng κ.ά. (2008)
Σεούλ	82-176/115-136	129 / 126	Αποβάθρα/Συρμοί	Kim κ.ά. (2008)
Στοκχόλμη	105-388/24-344	258 / 185	Αποβάθρα Καθην / Αποβάθρα ΣΚ	Johansson (2003)

Στο παλαιότερο μετρό του κόσμου, στο Λονδίνο, έχει διεξαχθεί μια περιεκτική μελέτη έκθεσης σε επίπεδα  $PM_{2.5}$ , γι' αυτούς που ταξιδεύουν καθημερινά χρησιμοποιώντας ως μέσο μεταφοράς το μετρό κατά τη διάρκεια δύο εποχών, χειμώνα και καλοκαίρι (Adams κ.ά., 2001a). Η έρευνα έδειξε ότι οι επιβάτες που χρησιμοποιούσαν τις υπόγειες γραμμές του μετρό είχαν μέχρι και οκτώ φορές υψηλότερα επίπεδα έκθεσης σε σύγκριση με τα επίπεδα έκθεσης που διαπιστώθηκαν σε όσους χρησιμοποιούσαν τις υπέργειες γραμμές του μετρό. Επίσης, οι επιβάτες των υπέργειων συρμών του μετρό παρουσίασαν ελαφρώς χαμηλότερα επίπεδα έκθεσης σε σύγκριση με αυτά των ανθρώπων που ταξίδευαν καθημερινά χρησιμοποιώντας άλλα μέσα μεταφοράς.

Η καλοκαιρινή καμπάνια μετρήσεων έδειξε υψηλότερα επίπεδα έκθεσης ( $247 \mu g/m^3$ ) συγκρινόμενη με τη χειμερινή καμπάνια ( $157 \mu g/m^3$ ). Στη συνέχεια ο Seaton κ.ά. (2005) μέτρησε τα επίπεδα συγκέντρωσης των  $PM_{2.5}$  χρησιμοποιώντας φορητές συσκευές μέτρησης και τις συγκεντρώσεις του πλήθους των σωματιδίων (PNC) με στατικούς δειγματολήπτες σε τρεις κατηγορίες ατόμων / χώρων: 1) στους οδηγούς, 2) στο λοιπό προσωπικό και 3) στις αποβάθρες. Τα επίπεδα σε  $PM_{2.5}$  ήταν περίπου δύο και τρεις φορές υψηλότερα στις αποβάθρες συγκρινόμενα με αυτά των οδηγών και του λοιπού προσωπικού. Επιπλέον, μετρήσεις αναφορικά με τις συγκεντρώσεις του αριθμού σωματιδίων που έγιναν σε αποβάθρες στην επιφάνεια έδειξαν υψηλότερες κατά αριθμό συγκεντρώσεις σωματιδίων σε σύγκριση με τις υπόγειες' αντίθετα χαμηλότερα ήταν τα επίπεδα των  $PM_{2.5}$  στις υπόγειες αποβάθρες σε σύγκριση με αυτές στην επιφάνεια.

Στη Νέα Υόρκη, μετρήθηκε μια ομάδα μαθητών γυμνασίου, με στόχο την εκτίμηση των πηγών και των επιπέδων μαγνησίου, χρωμίου και σιδήρου μέσα σε περιόδους των 48 ωρών (Chillrud κ.ά., 2004). Βρέθηκε ότι ανάμεσα στην ομάδα των μαθητών οι χρήστες του μετρό είχαν τα υψηλότερα επίπεδα μέσης 48-ώρης έκθεσης και μάλιστα ότι οι συγκεντρώσεις αυτών των τριών στοιχείων στον περιβάλλοντα αέρα ήταν χαμηλότερες κατά δύο τάξεις μεγέθους σε σχέση με τις συγκεντρώσεις έκθεσης των αναβατών του μετρό.

Στην πόλη της Στοκχόλμης, (Σουηδία), ελήφθησαν μετρήσεις των  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$  με αυτόματους μετρητές, σε αποβάθρες μετρό. Έπειτα συγκρίθηκαν με μετρήσεις που ελήφθησαν σε δρόμο έντονης κυκλοφορίας (Johansson, 2003). Τα μέσα επίπεδα των  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$  υπολογίστηκαν ίσα με  $470$  και  $260 \mu g/m^3$ , αντίστοιχα, και ήταν πέντε και δέκα φορές υψηλότερα στις αποβάθρες σε σχέση με αυτά του δρόμου. Κατά τη διάρκεια της μελέτης, οι τοίχοι στις σήραγγες πλύθηκαν με νερό. Τα επίπεδα σε  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$  που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια μιας περιόδου 12 ημερών μετά το καθάρισμα είχαν μειωθεί κατά 13% και 10%, αντίστοιχα, συγκρινόμενα με τα επίπεδα πριν τον καθαρισμό με νερό. Διαπιστώθηκε συνεπώς ότι η σωματιδιακή ύλη από τους τοίχους των σιδηρόδρομων συνεπιδρά κατά ένα μικρό ποσοστό στα παρατηρούμενα επίπεδα.

### 7.3 Συσχέτιση της επίδρασης της λειτουργίας του μετρώ στη δημόσια υγεία

Έρευνες που έχουν διεξαχθεί σε διάφορες χώρες του κόσμου έχουν δείξει ότι το μετρώ συνεπιδρά σημαντικά στην ολική έκθεση που υφίσταται το άτομο. Όσοι ταξιδεύουν καθημερινά χρησιμοποιώντας ως μέσο μεταφοράς το μετρώ, παρόλο που ξοδεύουν ένα μικρό τμήμα της ημέρας τους μέσα σε αυτό, έχει αποδειχθεί ότι, αν τα επίπεδα σωματιδιακής ύλης είναι υψηλά, ακόμα και κατά τη διάρκεια μικρών χρονικά διαδρομών, μπορούν να επιδράσουν σημαντικά στην ολική έκθεση του ατόμου και να σχετίζονται με οποιοδήποτε μελλοντικό πρόβλημα υγείας. Ο Seaton κ.ά. (2005) υπολόγισε ότι για το μετρώ του Λονδίνου και συγκεκριμένα για την κατηγορία των ανθρώπων που ταξιδεύουν καθημερινά χρησιμοποιώντας ως μέσο μεταφοράς το μετρώ, ξοδεύοντας δύο ώρες την ημέρα σ' αυτό, επίκειται αύξηση της ημερήσιας έκθεσης τους κατά  $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Ο Aarnio κ.ά. (2005) παρείχε έναν πρόχειρο υπολογισμό για την πρόσθετη έκθεση που προκαλείται από τη μετακίνηση με μετρώ στο Ελσίνκι, υποθέτοντας 1) παραμονή 30 λεπτών/ημέρα στο βαγόνι του μετρώ, 2) 4 λεπτών στον υπόγειο σταθμό και 3) 5 λεπτών σε σταθμό που βρίσκεται στο επίπεδο του εδάφους (με βάση τα διαστήματα αναχώρησης των τρένων). Η συγκέντρωση έκθεσης για το υπόλοιπο της ημέρας υποτέθηκε ότι είναι ο ετήσιος μέσος όρος ενός σταθμού που βρίσκεται σε αστικό περιβάλλον. Τα αποτελέσματά του έδειξαν ότι η μετακίνηση με το μετρώ επιδρά κατά 3% σε ότι αφορά τα επίπεδα έκθεσης σε  $\text{PM}_{2.5}$ , και σε αρκετά μεγάλα ποσοστά σε ότι αφορά διάφορα μέταλλα.

Ο Chillrud κ.ά. (2004) στα πλαίσια έρευνας που έλαβε χώρα σε 38 μαθητές στη Νέα Υόρκη κατά τη διάρκεια της 24 ώρης παρακολούθησης τους αναγνώρισε το μετρώ σαν μια πηγή για αυξημένα επίπεδα έκθεσης σε διάφορα μέταλλα και υποστήριξε την άποψη ότι η κύρια αιτία έκθεσης για αυτά τα μέταλλα είναι το μετρώ.

Στις μελέτες που αναφέρθηκαν παραπάνω, παρατηρούμε ότι μερικές έχουν αναφέρει υψηλότερα επίπεδα σωματιδιακής ύλης στο σύστημα του μετρώ (π.χ Λονδίνο, Ελσίνκι, Στοκχόλμη) σε σχέση με άλλα μέσα μεταφοράς, ενώ άλλες μελέτες ανέφεραν χαμηλότερα επίπεδα στο σύστημα του μετρώ (π.χ Χονγκ Κονγκ, Πόλη Μεξικού). Γενικά, αυτά τα ευρήματα υποδεικνύουν ότι σε μερικές περιπτώσεις, το μετρώ μπορεί να ασκήσει σημαντική επίδραση στην ολική έκθεση των επιβατών, ακόμη και αν ο χρόνος που ξοδεύεται μέσα σε αυτό είναι σχετικά μικρός.

### 7.4 Γενικά χαρακτηριστικά του μετρώ στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα σήμερα και συγκεκριμένα στην Αθήνα λειτουργούν δύο Γραμμές του Μετρώ (Εικόνα 79).

- Η **Γραμμή 2** (Ανθούπολη - Ελληνικό) με είκοσι (20) σταθμούς .
- Η **Γραμμή 3** (Αγία Μαρίνα - Δουκίσσης Πλακεντίας) με δεκαεπτά (17) σταθμούς.

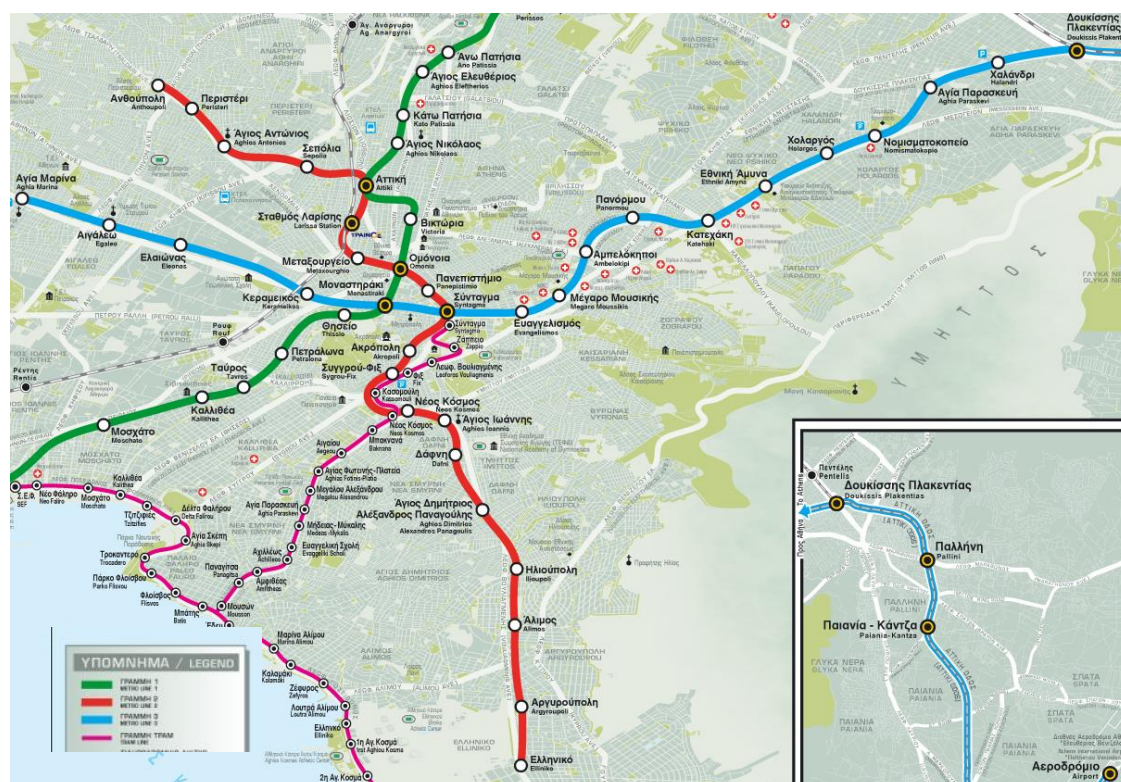
Συνέχεια της Γραμμής 3 αποτελεί διαδρομή μήκους 21,2 χιλιομέτρων στο δίκτυο του Προαστιακού σιδηροδρόμου, μέσω της οποίας ο Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών Ελευθέριος Βενιζέλος, καθώς και η περιοχή των Μεσογείων, εξυπηρετούνται για την απευθείας σύνδεσή τους με το κέντρο της πόλης με συρμούς του μετρώ, από τους τέσσερις (4) σταθμούς: Αεροδρόμιο, Κορωπί, Παιανία - Κάντζα και Παλλήνη.

Οι γραμμές του μετρό άρχισαν να κατασκευάζονται στα τέλη του 1992. Τον Ιανουάριο του 2000 τέθηκε σε λειτουργία το πρώτο τμήμα του έργου: η Γραμμή 2: «Σύνταγμα-Σεπόλια» και η Γραμμή 3: «Εθνική Άμυνα-Σύνταγμα», συνολικού μήκους 13 χλμ. με δεκατέσσερις (14) σταθμούς. Το Νοέμβριο του 2000 προστέθηκε στο δίκτυο το τμήμα της Γραμμής 2: « Σύνταγμα-Δάφνη, μήκους 5 χλμ. με πέντε (5) νέους σταθμούς. Τον Απρίλιο του 2003 προστέθηκε στο δίκτυο του Μετρό το τμήμα της γραμμής 3: «Σύνταγμα-Μοναστηράκι» μήκους 1,5 χλμ.

Επίσης, το καλοκαίρι του 2004 παραδόθηκαν οι πρώτες επεκτάσεις του δικτύου. Η Γραμμή 3: «Μοναστηράκι - Εθνική Άμυνα» επεκτάθηκε υπογείως προς τα βόρεια (κατά 5,9 χλμ.) έως τον σταθμό Δουκίσσης Πλακεντίας και από εκεί οι νέοι συρμοί του Μετρό αναδύθηκαν στην επιφάνεια και μέσω των γραμμών του Προαστιακού Σιδηροδρόμου έφθασαν στο σταθμό του Διεθνούς Αεροδρομίου Αθηνών "Ελευθέριος Βενιζέλος".

Η Γραμμή 2: «Σεπόλια -Δάφνη» επεκτάθηκε και στα δύο της άκρα και το μετρό πλέον έφτασε δυτικότερα στο σταθμό Άγιο Αντώνιο (Περιστερί) και νοτιότερα στο σταθμό Άγιο Δημήτριο/Αλέκο Παναγούλη.

Το Μάιο του 2007 εντάχθηκε στο δίκτυο του Μετρό η επέκταση της Γραμμής 3 από το Μοναστηράκι έως το Αιγάλεω, μήκους 4,2 χλμ. με τρεις (3) νέους σύγχρονους σταθμούς, βελτιώνοντας σημαντικά τη συγκοινωνιακή εξυπηρέτηση των κατοίκων των Δυτικών Προαστίων.



Εικόνα 79 - Δίκτυο Γραμμής-2 (κόκκινη) και Γραμμής-3 (μπλε) του μετρό της Αθήνας

Παράλληλα, ένας από τους μεγαλύτερους Δήμους της χώρας, ο Δήμος Περιστερίου, απέκτησε ακόμα δύο νέους Σταθμούς Μετρό τον Απρίλιο του 2013 (ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ – ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ). Τον Ιούλιο του 2013 προστέθηκε η επέκταση της Γραμμής 2 προς το Ελληνικό με 5,5 χλμ. υπόγειας Γραμμής και 4 νέους Σταθμούς (ΗΛΙΟΥΠΟΛΗ, ΑΛΙΜΟΣ, ΑΡΓΥΡΟΥΠΟΛΗ, ΕΛΛΗΝΙΚΟ). Συγκεκριμένα, με την προσθήκη της εν λόγω επέκτασης στο δίκτυο του Μετρό εκτιμάται ότι η ημερήσια επιβατική κίνηση του Μετρό αυξήθηκε κατά 83.000 επιβάτες.

## 7.5 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Στο μετρό έχουν τεθεί σε εφαρμογή δύο είδη συρμών. Οι συρμοί πρώτοι γενιάς και οι συρμοί δεύτερης γενιάς. Οι τελευταίοι λειτουργούν σήμερα, είναι υπερσύγχρονοι και μαζί με τους πρώτους εξυπηρετούν τις ανάγκες του επιβατικού κοινού. Στον Πίνακα 9 παρουσιάζονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των συρμών πρώτης και δεύτερης γενιάς αντίστοιχα.

Πίνακας 9 - Γενικές πληροφορίες & τεχνικά χαρακτηριστικά συρμών μετρό Αθήνας

Γενικές Πληροφορίες & Τεχνικά χαρακτηριστικά συρμών 1ής γενιάς	
Αριθμός Συρμών √	28 (Γραμμές 2 και 3)
Σύνθεση Συρμού	6 Οχήματα
Πόρτες ανά Όχημα	4 ανά πλευρά
Χωρητικότητα Συρμού	224 Καθίσματα 806 όρθιοι (5 Επιβάτες / τ.μ.) 1030 Επιβάτες / Συρμό
Διευκολύνσεις Επιβατών	Αερισμός με Αέρα Βεβιασμένης Κυκλοφορίας Σύστημα Αυτόματων Ανακοινώσεων Σταθμών
Εσωτερικό Ύψος Οροφής	2180χιλ.
Βάρος Συρμού	178 τόνοι κενός 245 τόνοι με πλήρες φορτίο
Μέγιστη Ταχύτητα	80χλμ. / ώρα
Κατασκευή Αμαξώματος	Ανοξείδωτος Χάλυβας
Γενικές Πληροφορίες & Τεχνικά χαρακτηριστικά συρμών 2ής γενιάς	
Αριθμός Συρμών √	21 (7 Συρμοί DC/AC και 14 Συρμοί DC)
Σύνθεση Συρμού	6 Οχήματα
Πόρτες ανά Όχημα	4 ολισθαίνουσες θύρες εφαρμοστού τύπου ανά πλευρά
Χωρητικότητα Συρμού DC	196 Καθίσματα 866 όρθιοι (5 Επιβάτες/τ.μ.) 1062 Επιβάτες/Συρμό
Χωρητικότητα Συρμών DC/AC	158 Καθίσματα 868 όρθιοι (5 Επιβάτες/τ.μ.) 1026 Επιβάτες/Συρμό
Διευκολύνσεις Επιβατών	Κλιματισμός στους Συρμούς. Χώροι αποκλειστικής χρήσης από άτομα με ειδικές ανάγκες. Γέφυρες επικοινωνίας μεγάλου εύρους που επιτρέπουν να κατανέμεται ισομερώς η φόρτιση των επιβατών
Εσωτερικό Ύψος Οροφής	2100χιλ. έως 2200χιλ.
Βάρος Συρμού DC/AC	202 τόνοι κενός 275 τόνοι (5 Επιβάτες/τ.μ.)
Βάρος Συρμού DC	182 τόνοι κενός 255 τόνοι (5 Επιβάτες/τ.μ.)
Μέγ.Ταχύτητα Συρμού DC/AC	120χλμ. / ώρα
Μέγ.Ταχύτητα Συρμού DC	80χλμ. / ώρα
Κατασκευή Αμαξώματος	Ανοξείδωτος Χάλυβας



## 7.6 Επιβατική κίνηση

Κατά τη διάρκεια του 2009 ο συνολικός αριθμός επιβιβάσεων στο μετρό ανήλθε σε 178.246.208 και η μέση ημερήσια επιβατική κίνηση έφτασε στις 571.532 επιβιβάσεις. Αντίθετα το έτος 2008 η μέση ημερήσια επιβατική κίνηση ανήλθε σε 631.092 επιβιβάσεις.

Σε ότι αφορά την κατάταξη των σταθμών ανάλογα με την κατανομή των επιβιβάσεων για το έτος 2009, στην πρώτη θέση βρίσκεται ο σταθμός του Συντάγματος, αφού εκεί επιβιβάζεται το 9,70% του συνόλου των επιβατών. Ακολουθούν οι σταθμοί «Πανεπιστήμιο» με 5,99%, «Ομόνοια» με 5,87%, «Άγιος Δημήτριος» με 5,43%, «Αμπελόκηποι» με 5,38% και «Άγιος Αντώνιος» με 4,95%.

Αντίστοιχα για το έτος 2008, στην πρώτη θέση βρισκόταν επίσης ο σταθμός του Συντάγματος με ποσοστό 9,58% του συνόλου των επιβατών. Ακολουθούσαν οι σταθμοί «Ομόνοια» με 7,42%, «Πανεπιστήμιο» με 5,76%, «Άγιος Δημήτριος» με 5,65%, «Αμπελόκηποι» με 5,28% και «Άγιος Αντώνιος» με 5,15%.

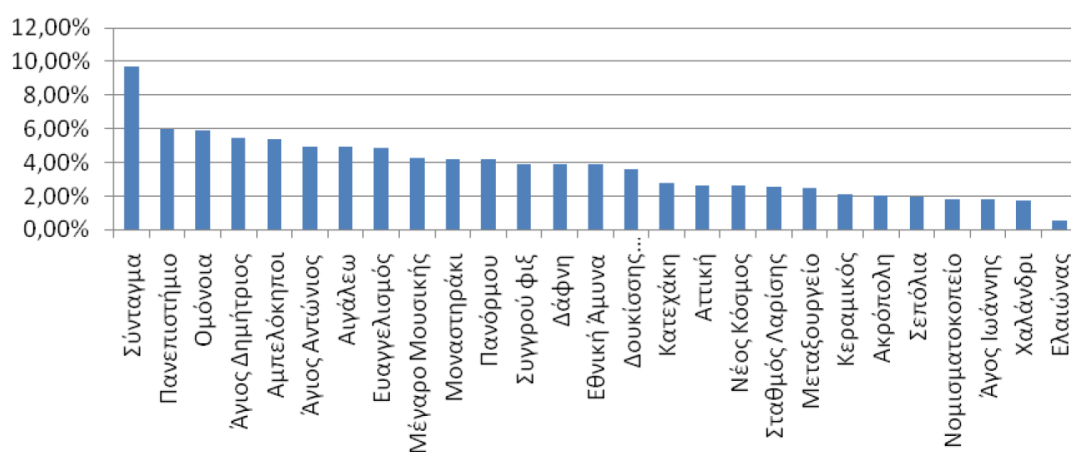
Στον Πίνακα 10 , παρουσιάζονται τα ποσοστά επιβιβάσεων ανά σταθμό και για τις δύο γραμμές του μετρό για το έτος 2009.

Πίνακας 10 - Ποσοστά επιβιβάσεων ανά σταθμό και για τις δύο γραμμές του μετρό για το έτος 2009  
([www.amel.gr](http://www.amel.gr))

Σύνταγμα	9,70%
Πανεπιστήμιο	5,99%
Ομόνοια	5,87%
Άγιος Δημήτριος	5,43%
Αμπελόκηποι	5,38%
Άγιος Αντώνιος	4,95%
Αιγάλεω	4,94%
Ευαγγελισμός	4,87%
Μέγαρο Μουσικής	4,24%
Μοναστηράκι	4,18%
Πανόρμου	4,16%
Συγγρού φιξ	3,92%
Δάφνη	3,91%
Εθνική Άμυνα	3,86%
Δουκίσσης Πλακεντίας	3,57%
Κατεχάκη	2,80%
Αττική	2,61%
Νέος Κόσμος	2,60%
Σταθμός Λαρίσης	2,55%

Μεταξουργείο	2,45%
Κεραμικός	2,09%
Ακρόπολη	2,06%
Σεπόλια	1,97%
Νομισματοκοπείο	1,81%
Άγος Ιωάννης	1,78%
Χαλάνδρι	1,75%
Ελαιώνας	0,53%

Η κατανομή της επιβατικής κίνησης φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 80, απ' όπου συμπεραίνεται ότι οι επιβιβάσεις κατανέμονται περίπου εξίσου στις 2 γραμμές (50%-50%).



Εικόνα 80 - Κατανομή επιβατικής κίνησης ανά σταθμό του μετρό Αθήνας

## 7.7 Εφαρμογή του μοντέλου ExDoM2 στο μετρό της Αθήνας.

Θα κάνουμε χρήση του μοντέλου ExDoM2, εισάγοντας μέσες τιμές συγκέντρωσης  $PM_{10}$ , από μετρήσεις που έγιναν στις 2 γραμμές (μπλε και κόκκινη), από την Μάμμη - Γαλάνη Έλενα, κατά το έτος 2014. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν από Δευτέρα έως Παρασκευή (καθημερινές), συνθήκες κανονικής λειτουργία του μετρό και χρησιμοποιήθηκαν τα όργανα Siderak και DustTrack-II. Στον πίνακα 11 φαίνονται οι μέσες τιμές συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων που προέκυψαν, για όλη την κόκκινη και την μπλε γραμμή εντός συρμού, σύμφωνα με τις μετρήσεις που έλαβαν χώρα από την Μάμμη-Γαλάνη Έλενα.



Πίνακας 11 - Μέση τιμή συγκέντρωσης PM10 σωματιδίων στην μπλε και κόκκινη γραμμή του μετρώ της Αθήνας, εντός συρμού, σύμφωνα με μετρήσεις που έγιναν από την Μάμμη-Γαλάνη Έλενα (2014).

Μετρό - Εντός συρμού	Μέση τιμή συγκέντρωσης PM <sub>10</sub> (μg/m <sup>3</sup> )
Μπλε Γραμμή	57,39
Κόκκινη Γραμμή	67,52

και η παραμετροποίηση του μοντέλου έγινε σύμφωνα με τον πίνακα 12

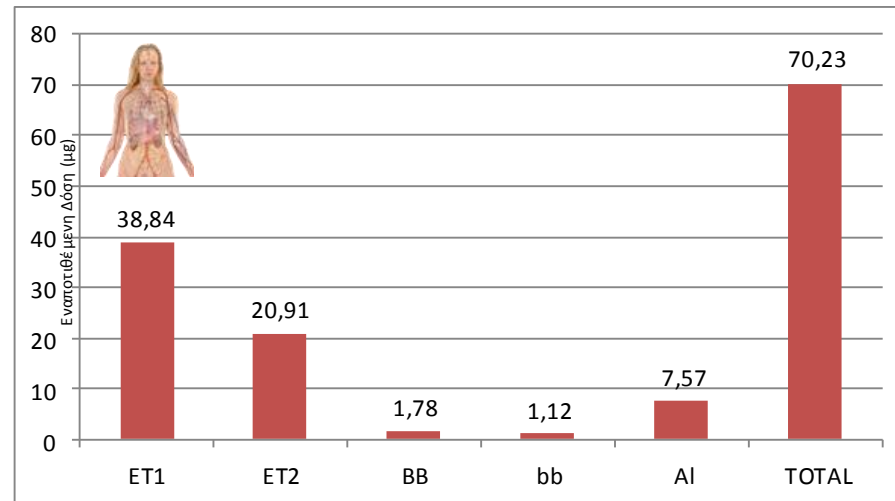
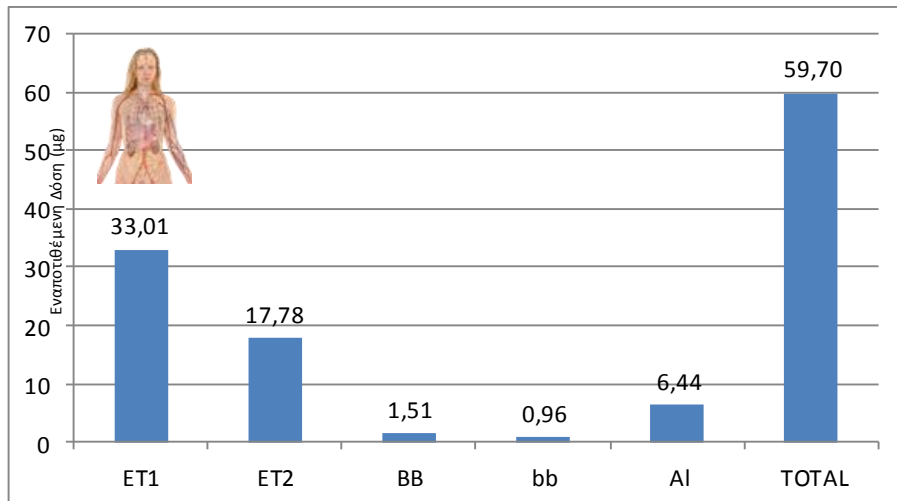
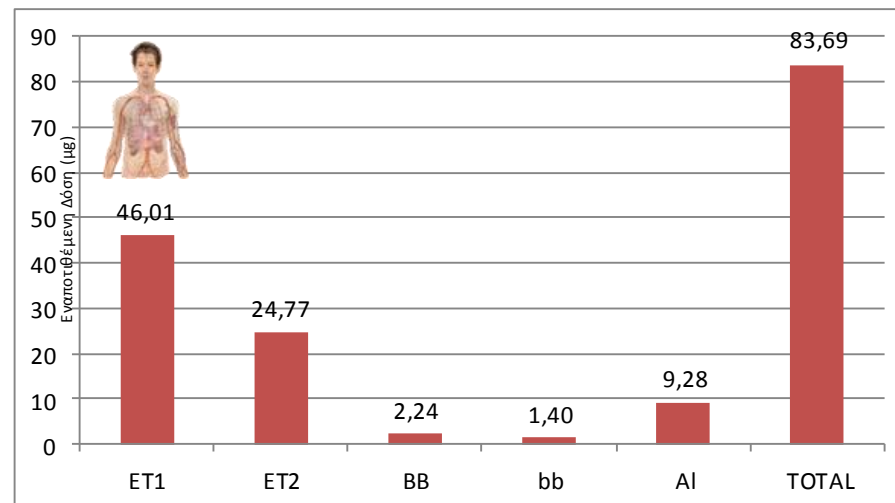
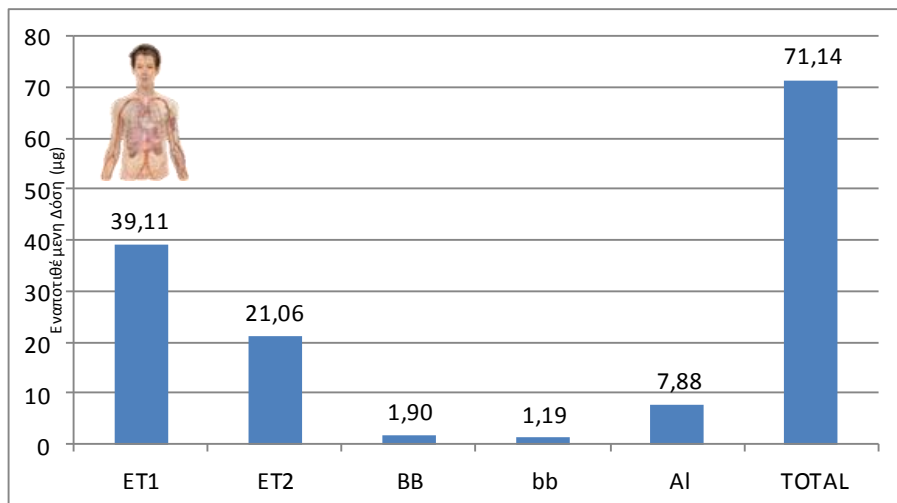
Πίνακας 12 - Παραμετροποίηση του ExDoM2 για το μετρό της Αθήνας

<b>Fine Particles</b>	
MMAD (Mass Median Aerodynamic Diameter)	2,1 (Vânia Martins, κ.ά, 2015)
sg (standard deviation)	1,7 (Vânia Martins, κ.ά, 2015)
<b>Coarse Particles</b>	
MMAD (Mass Median Aerodynamic Diameter)	5
sg (standard deviation)	2,5
Mass Fraction for fines	0,92 (92%)
Particles Density	2,2 g/cm <sup>3</sup> (Vânia Martins, κ.ά, 2015)

Το μοντέλο θα εφαρμοστεί για τα εξής σενάρια :

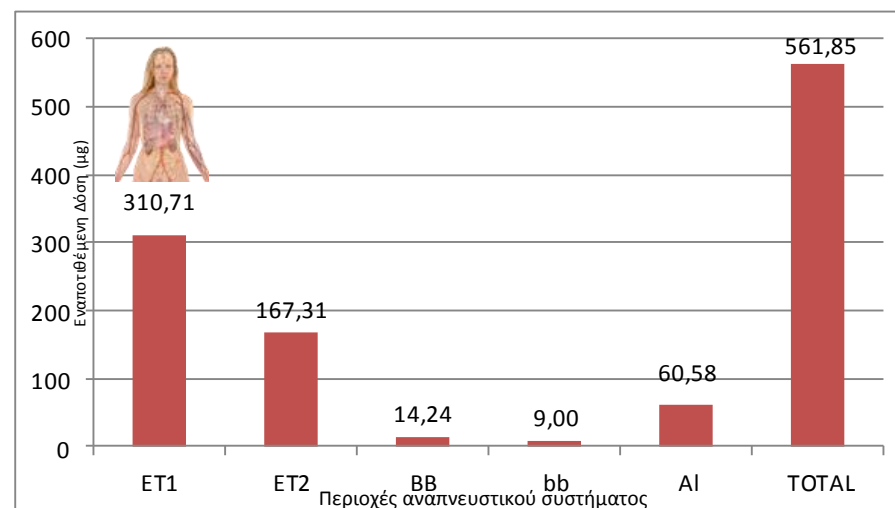
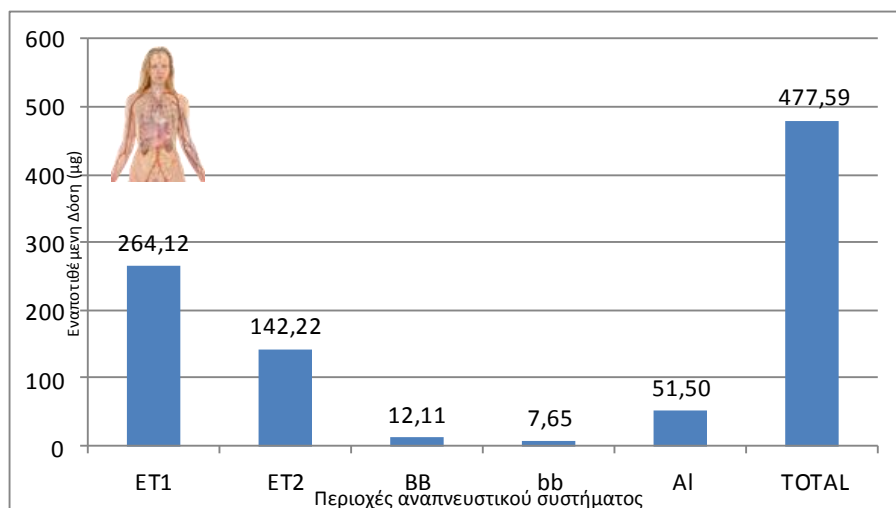
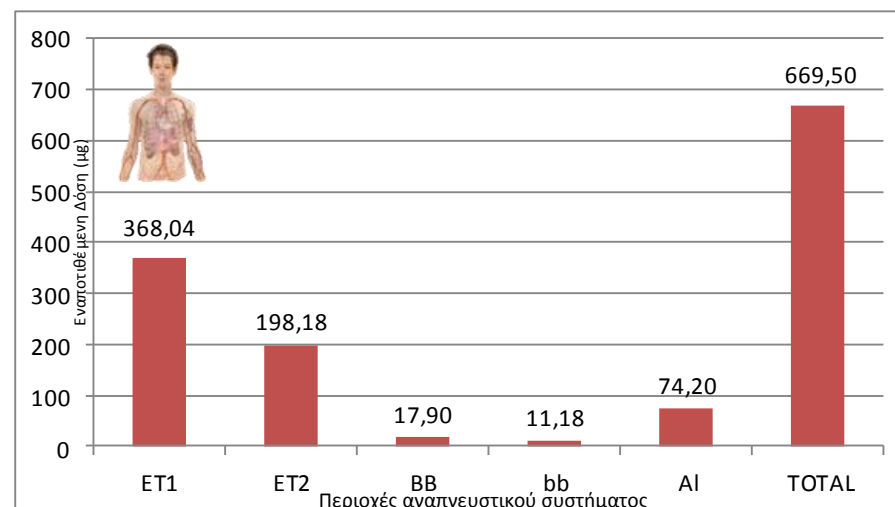
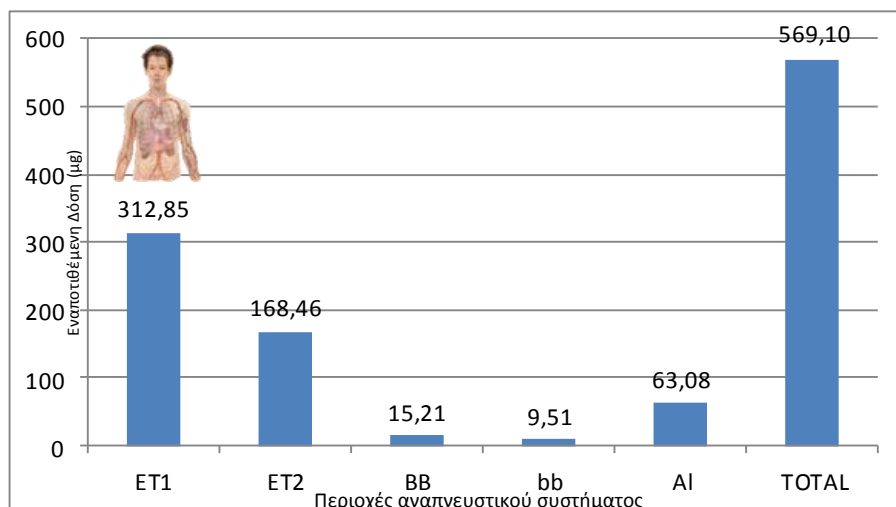
- Scenario-1: Ενήλικας ο οποίος χρησιμοποιεί το μετρό για 1 ώρα .
- Scenario-2: Ενήλικας εργαζόμενος στο μετρό (8ωρο), σε συνθήκες ήπιας εργασίας.

### 7.7.1 Scenario-1: Ενήλικος ο οποίος χρησιμοποιεί το μετρό (μπλε & κόκκινη γραμμή) για 1 ώρα.

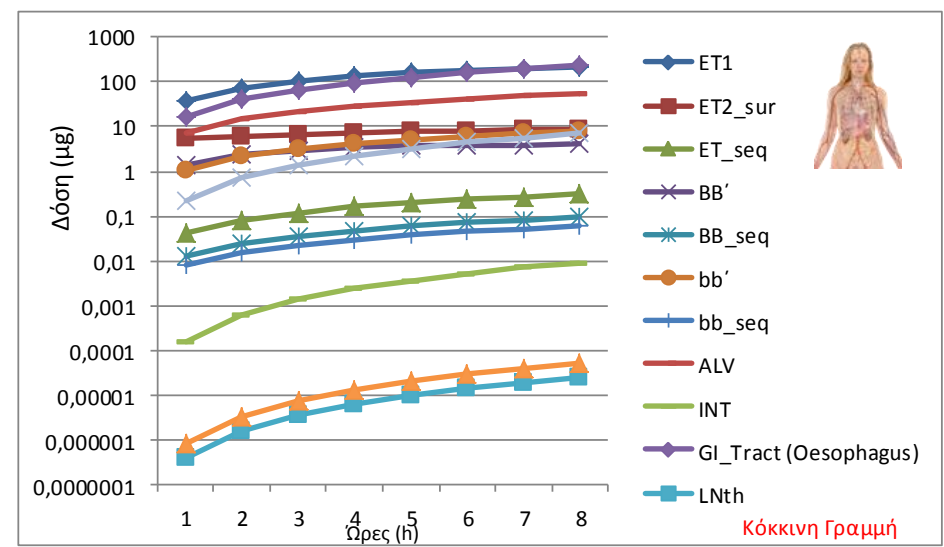
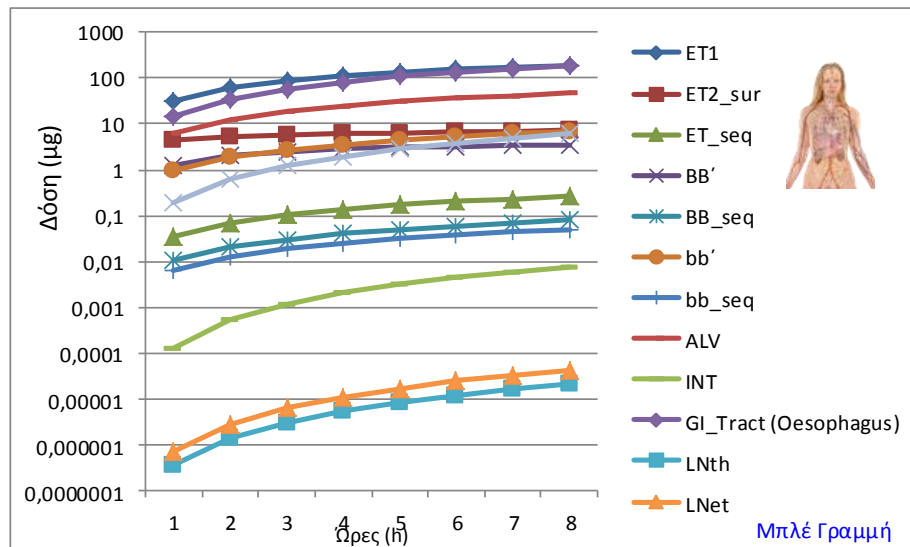
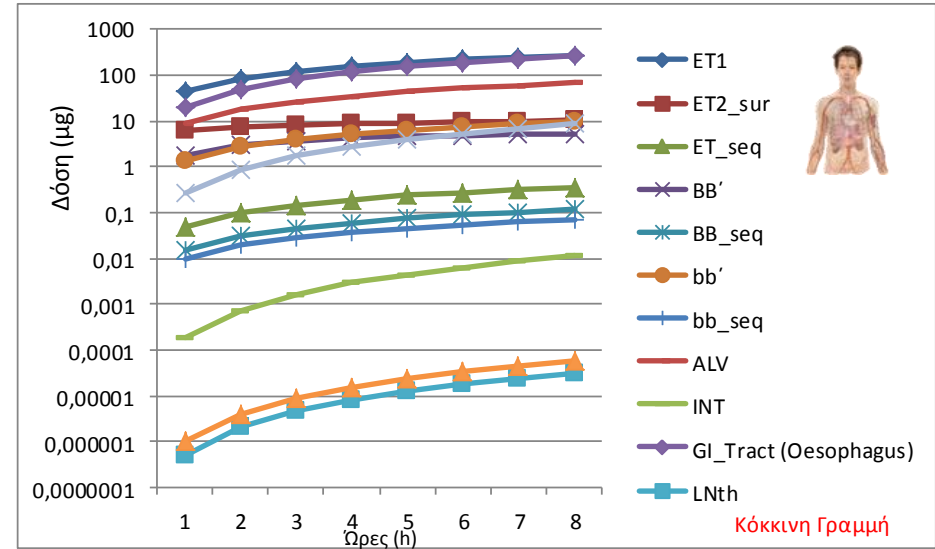
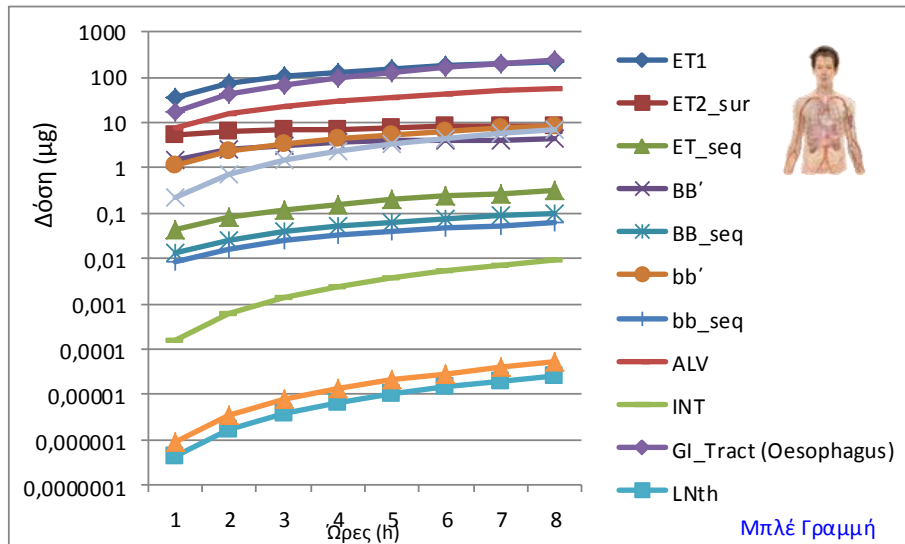


Εικόνα 81 - Εναπόθεση σωματιδίων στις περιοχές του HRTM, εντός του συρμού για 1 ώρα

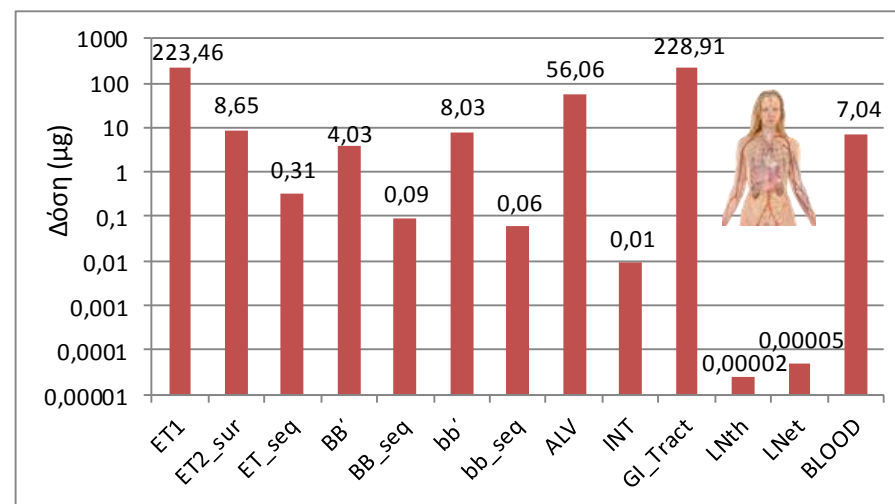
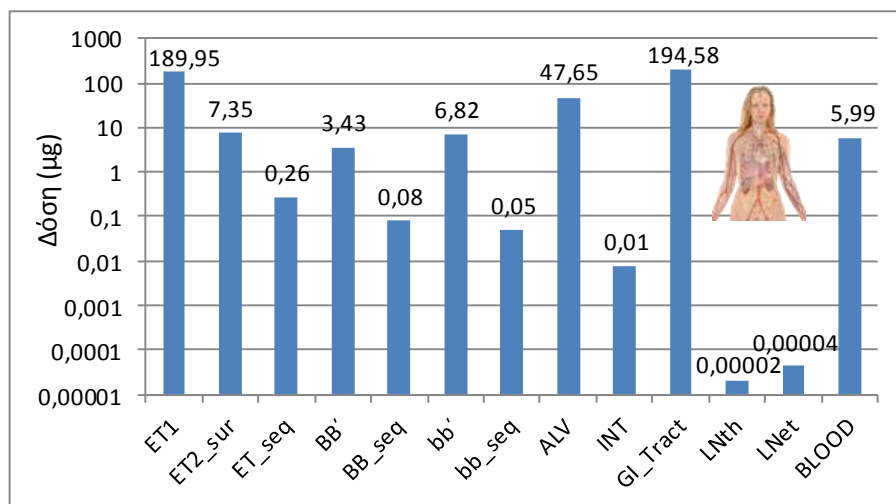
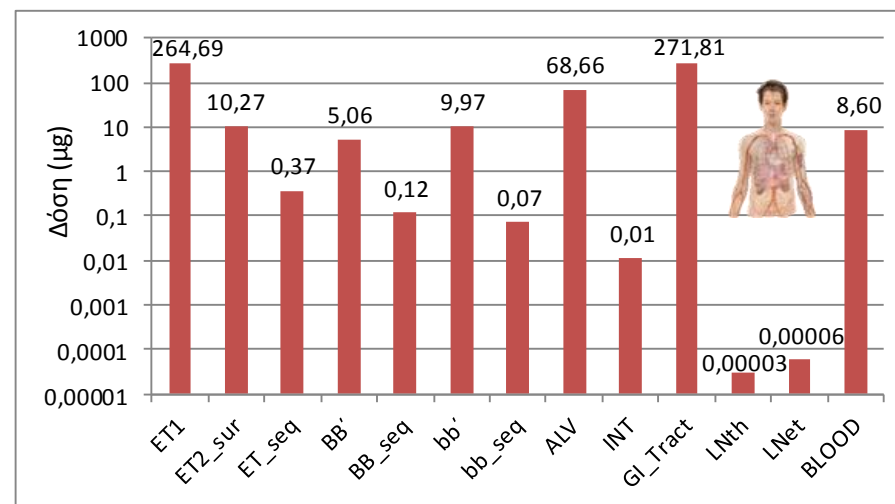
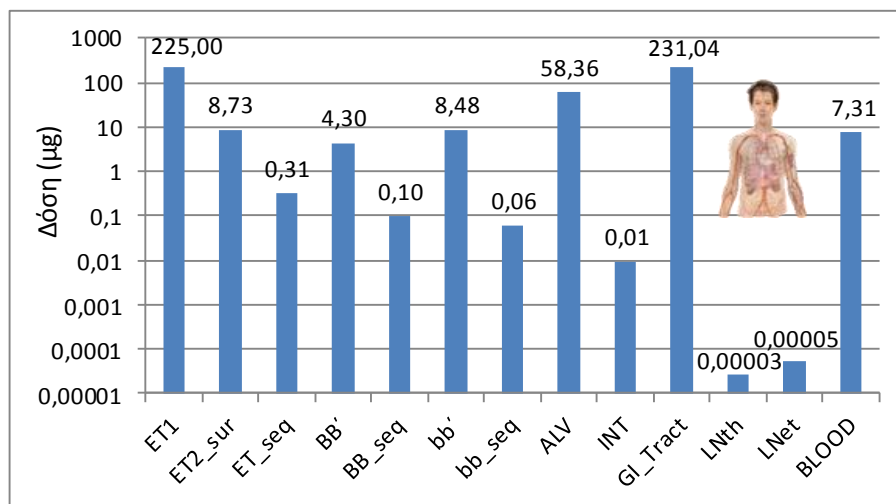
### 7.7.2 Scenario-2: Ενήλικος εργαζόμενος του μετρό (μπλε & κόκκινη γραμμή) για 8-ώρο.



Εικόνα 82 - Εναπόθεση σωματιδίων στις περιοχές του HRTM, εντός του συρμού για εργαζόμενο (8-ωρο)



Εικόνα 83 - Κατακράτηση σωματιδίων κατά τον καθαρισμό, στις διάφορες περιοχές του ICRP2015, 8ωρη ελαφριά εργασία εντός του συρμού



Εικόνα 84 - Ραβδόγραμμα : Κατακράτηση σωματιδίων κατά τον καθαρισμό, στις διάφορες περιοχές του ICRP2015, μετά από 8ώρες ελαφριά εργασία εντός του συρμού

### 7.7.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων ExDoM2 μοντέλου.

Από τα αποτελέσματα που φαίνονται στις γραφικές παραστάσεις της Εικόνας 81, παρατηρούμε ότι κατά την έκθεση μίας ώρας στην κόκκινη γραμμή (εντός συρμού) εναποτίθενται περισσότερα σωματίδια, από αυτήν σε έκθεση στην μπλε γραμμή, είτε πρόκειται για άνδρα είτε για γυναίκα. Βέβαια οι τιμές εναπόθεσης για τις 2 γραμμές κινούνται πολύ κοντά για έκθεση μίας ώρας. Συνοπτικά για το επιβατικό κοινό που χρησιμοποιεί τις 2 γραμμές για 1 ώρα ισχύει :

- Για εργαζόμενο άνδρα ή γυναίκα 8ωρο εντός συρμού, η εναπόθεση είναι περίπου 15% περισσότερη στην κόκκινη απ' ότι στην μπλε γραμμή.
- Η μεγαλύτερη εναπόθεση, τόσο σε άντρες όσο και σε γυναίκες, λαμβάνει χώρα στην περιοχή ET1 (πρόσθια ρινική κοιλότητα) με ποσοστό περίπου 55%, γεγονός που δικαιολογείται διότι αναφερόμαστε σε PM<sub>10</sub> σωματίδια.
- Όσον αφορά τον καθαρισμό μετά το πέρας της μίας ώρας, οι περιοχές με την μεγαλύτερη κατακράτηση σωματιδίων, τόσο σε άντρες και γυναίκες είναι η περιοχή της πρόσθιας ρινικής κοιλότητας (ET1) και το τμήμα του οισοφάγου (GI tract).
- Στους αντρικό επιβατικό κοινό, η εναπόθεση PM<sub>10</sub> σωματιδίων είναι περίπου 16% υψηλότερη σε σχέση με τις γυναίκες

Όσον αφορά τους εργαζόμενους οι οποίοι εκτελούν ελαφρά εργασία για 8ωρες εντός συρμού, από τα αποτελέσματα που φαίνονται στις γραφικές παραστάσεις των Εικόνων 82,83 και 84, παρατηρούμε ότι ισχύει ότι και για τους μεταφερόμενους. Δηλαδή :

- Η εναπόθεση σωματιδίων PM<sub>10</sub> στην κόκκινη γραμμή είναι υψηλότερη σε σχέση με την μπλε, χωρίς όμως να παρουσιάζονται πολύ μεγάλες διαφορές. Για εργαζόμενο άνδρα ή γυναίκα, 8ωρο εντός συρμού, η ολική εναπόθεση είναι 15% περισσότερη στην κόκκινη απ' ότι στην μπλε γραμμή.
- Η μεγαλύτερη εναπόθεση, τόσο σε άντρες όσο και σε γυναίκες, λαμβάνει χώρα στην περιοχή ET1 (πρόσθια ρινική κοιλότητα) με ποσοστό περίπου 55%, γεγονός που δικαιολογείται διότι αναφερόμαστε σε PM<sub>10</sub> σωματίδια. Τα αντίστοιχα ποσοστά για τις άλλες περιοχές είναι :
  - ET1 = 55%
  - ET2 = 30%
  - AI = 11%
  - BB = 2,7%
  - bb = 1.6%
- Όσον αφορά τον καθαρισμό μετά το πέρας του 8ωρου, οι περιοχές με την μεγαλύτερη κατακράτηση σωματιδίων, τόσο σε άντρες και γυναίκες είναι οι εξής :

➤ GI_Tract	(≈43%)
➤ ET1	(≈41%)
➤ ALV	(≈10%)
➤ bb'	(≈1,5%)
➤ Αίμα	(≈1,5%)

- Στους άντρες εργαζόμενους, η εναπόθεση PM10 σωματιδίων είναι περίπου 16% υψηλότερη σε σχέση με τις γυναίκες

#### 7.7.4 Το μετρό της Αθήνας σε σχέση με αυτό της Βαρκελώνης

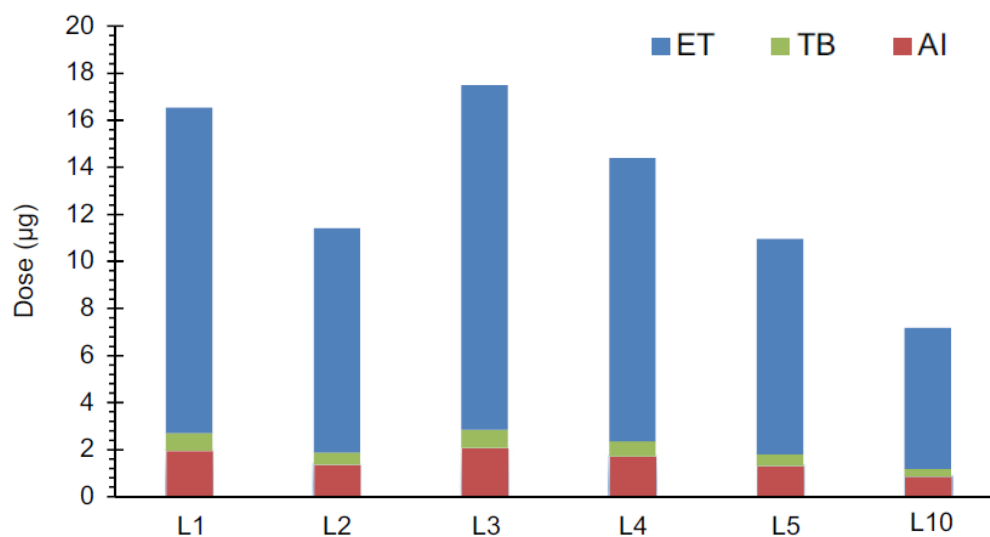
Σε αυτή την παράγραφο θα επιχειρήσουμε μία σύγκριση της εναπόθεσης αιρούμενων σωματιδίων που λαμβάνει χώρα στο μετρό της Αθήνας σε σχέση με αυτό της Βαρκελώνης (Vânia Martins, κ.ά., 2015). Οι μετρήσεις που έγιναν στο μετρό της Βαρκελώνης αφορούσαν PM<sub>2,5</sub> σωματίδια με μέση συγκέντρωση 51,2 μg/m<sup>3</sup>, εντός συρμού. Στην περίπτωση του μετρό της Αθήνας, οι μετρήσεις που έγιναν από την Μάμμη-Γαλάνη Έλενα, αφορούσαν PM<sub>10</sub> σωματίδια με μέση συγκέντρωση 57,4 μg/m<sup>3</sup> στην μπλε γραμμή και 67,5 μg/m<sup>3</sup> στην κόκκινη γραμμή, εντός συρμού. Γνωρίζουμε όμως, για τις μετρήσεις στο μετρό της Αθήνας ότι το 92% είναι λεπτά σωματίδια (Πίνακας 12). Επίσης το μοντέλο ExDoM2, στο excel εξόδου των αποτελεσμάτων φαίνεται ξεχωριστά η δόση για λεπτά (fine) και χοντρά (coarse) σωματίδια. Επομένως η σύγκριση για τις δύο πόλεις είναι εφικτή.

Το μοντέλο ExDoM2 χρησιμοποιήθηκε τόσο στο μετρό της Βαρκελώνης όσο και σ' αυτό της Αθήνας. Η εφαρμογή του ExDoM2 στην περίπτωση του μετρό της Βαρκελώνης έγινε για 15λεπτη παραμονή μέσα στο συρμό. Προχωρήσαμε λοιπόν, σε μία αναγωγή των δικών μας αποτελεσμάτων σε χρονικό διάστημα 15 λεπτών ώστε να έχουμε μία πιο καθαρή εικόνα σύγκρισης. Οι δόσεις των αιρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό για κάθε μία από τις γραμμές του μετρό των δύο πόλεων, φαίνονται στα διαγράμματα των εικόνων 85 και 86.

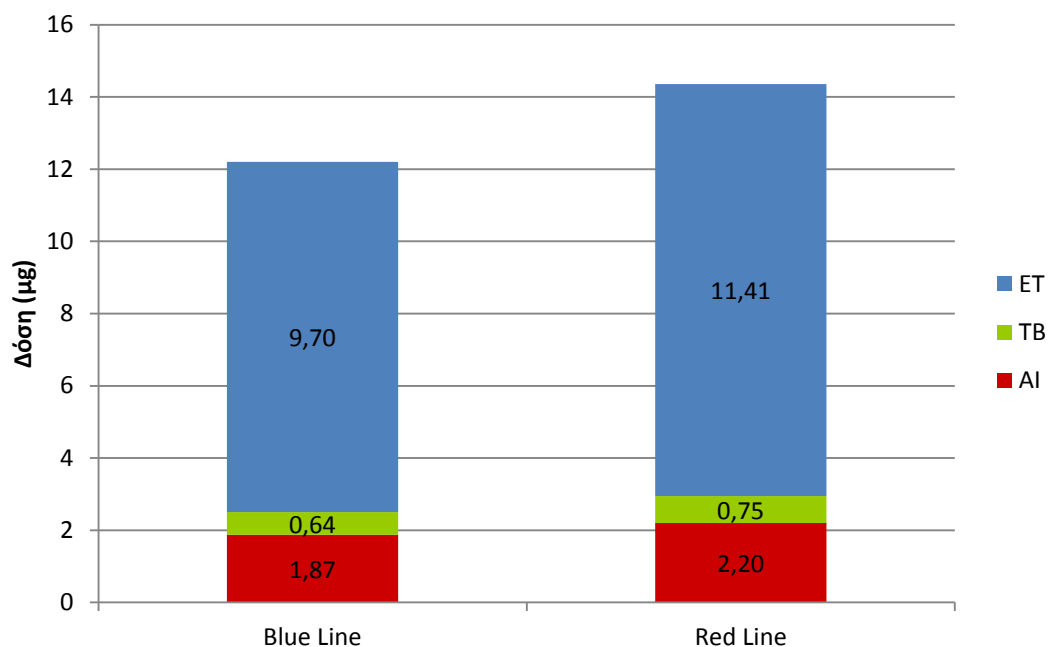
Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα για το μετρό των δύο πόλεων συγκλίνουν. Το εξωθωρακικό τμήμα, λαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό της μάζας των εισερχόμενων σωματιδίων (περίπου 65%). Το κλάσμα αυτό (65%), αντικατοπτρίζει το γεγονός ότι η εναπόθεση των σωματιδίων γίνεται κυρίως στην πάνω περιοχή του αναπνευστικού συστήματος αποτρέποντάς τα, να προχωρήσουν προς τους πνεύμονες με αποτέλεσμα να απομακρύνονται πολύ πιο γρήγορα σε σχέση με σωματίδια που εισέρχονται σε πιο βαθιά τμήματα του αναπνευστικού.

Αντίστοιχα, το μικρότερο ποσοστό εισπνεόμενων σωματιδίων, εναποτίθεται στην τραχειοβρογχική περιοχή TB (περίπου 4%) και η υπόλοιπη μάζα σωματιδίων στην AI περιοχή (περίπου 12%).





Εικόνα 85 –  $PM_{2,5}$  δόση στο HRTM, για 15λεπτη παραμονή εντός συρμού του μετρό της Βαρκελώνης (Vânia Martins, κ.ά, 2015). Περιοχές του HRT : ET- extrathoracic, TB – tracheobronchial and AI – alveolar–interstitial.



Εικόνα 86 –  $PM_{2,5}$  δόση στο HRTM, για 15λεπτη παραμονή εντός συρμού του μετρό της Αθήνας (Μετρήσεις - Μάμμη-Γαλάνη Έλενα). Περιοχές του HRT : ET- extrathoracic, TB – tracheobronchial and AI – alveolar–interstitial.

## 8. Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι η λειτουργία της GUI πλατφόρμας εφαρμογής του μοντέλου ExDoM2 που δημιουργήθηκε είναι εξαιρετικά ικανοποιητική. Αρχικά διότι δημιουργήθηκε για να χρησιμοποιηθεί τόσο από εξειδικευμένους μηχανικούς ή επιστήμονες όσο και από φοιτητές, σύμφωνα πάντα με τις ανάγκες τους. Για να πάρει την τελική μορφή της έγιναν πάρα πολλές αλλαγές, που σκοπό είχαν να την καταστήσουν ένα εύχρηστο εργαλείο στα χεριά των χρηστών της. Επίσης σχεδιάστηκε για να παρέχει μια ομαδοποιημένη πληροφορία των αποτελεσμάτων μέσω μίας διαδραστικής web πλατφόρμας κάνοντας τα αποτελέσματα να είναι εύκολα κατανοητά και χρησιμοποιήσιμα.

Όσον αφορά το επίπεδο δυσκολίας χειρισμού της πλατφόρμας, πρέπει να αναφέρουμε ότι όλη η εργασία στηρίχθηκε σε ένα και μόνο άξονα, να παρουσιάσει ένα user friendly περιβάλλον εργασίας. Ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα είναι ότι ο χρήστης μπορεί να εισάγει τα δεδομένα κάνοντας χρήση μόνο του ποντικιού του, χωρίς χρήση του πληκτρολογίου του, όπως και η τοποθέτηση πληροφοριών ορθής εισαγωγής των δεδομένων δίπλα από κάθε πεδίο, έτσι ώστε να γίνεται όσον το δυνατόν λιγότερη χρήση του manual.

Δυσκολίες συναντήθηκαν αρκετές. Αρχικά έπρεπε να ενοποιηθούν τα εργαλεία που επιλέχθηκαν για τον σχεδιασμό της πλατφόρμας. Το να πραγματοποιηθεί η ομαλή συνεργασία HTML και javascripts κάτω από το πρίσμα της Matlab ήταν πραγματικά μία πρόκληση.

Επίσης προβλήματα παρουσιάστηκαν αρκετά και στην δημιουργία μίας ολοκληρωτικής standalone εφαρμογής, η οποία θα μπορεί να εγκατασταθεί σε οποιοδήποτε προσωπικό υπολογιστή και θα μπορεί να τρέξει χωρίς την αναγκαία ύπαρξη της Matlab.

Αναφορικά με την ανθεκτικότητά της, οφείλουμε να αναγνωρίσουμε ότι είναι αρκετά μεγάλη καθώς το μοντέλο για το οποίο σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε (ExDoM2), βασίζεται στο πιο πρόσφατο μοντέλο, το ICRP-2015, το οποίο έχει ουσιαστικά να τροποποιηθεί από το 1994.

Όμως παρόλα αυτά, σε μία μεταγενέστερη εκδοχή αυτής της εργασίας θα ήταν προτιμότερο ίσως να εργαστούμε και να δημιουργήσουμε μία GUI πλατφόρμα, η οποία με τις κατάλληλες παραμετροποιήσεις, να είναι προσαρμόσιμη ώστε να μπορεί να εξυπηρετήσει οποιοδήποτε μοντέλο. Η όλη βέβαια μελλοντική εργασία θα πρέπει να εστιάζει στο scalable σχεδιασμό του GUI.

Όσον αφορά την εφαρμογή του ExDoM2 στο μετρό της Αθήνας, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι γενικά είναι μια σημαντική πηγή που αυξάνει σημαντικά την καθημερινή δόση στην οποία εκτίθενται τόσο οι χρήστες του, όσο και οι εργαζόμενοι σ' αυτό. Επίσης έδειξαν ότι η χρήση της κόκκινης γραμμής αυξάνει την έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια κατά 15% σε σχέση μ' αυτήν της μπλε. Η σχετικά, όμως πρόσφατη κατασκευή του μετρό, παρέχει ελάχιστες δημοσιευμένες πληροφορίες για τα επίπεδα συγκέντρωσης σωματιδιακής ύλης με αποτέλεσμα να χρειαστούν πολλές ακόμα πειραματικές μετρήσεις ώστε να αξιολογηθούν σωστά τα αποτελέσματα και να προσδιοριστούν οι σημαντικότερες πηγές εκπομπής.

## Βιβλιογραφία

### Ελληνική Βιβλιογραφία

Αλεξανδροπούλου Β. (2010). Ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος υποστήριξης αποφάσεων για την εκτίμηση της έκθεσης του ανθρώπου σε Ατμοσφαιρικά αιωρούμενα σωματίδια και των επιπτώσεων τους στην ανθρώπινη υγεία. Διδακτορική Διατριβή. Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά.

Βουλγαράκης Απόστολος (2014). Μελέτη τροποσφαιρικού όζοντος και αιωρούμενων σωματιδίων στην περιοχή του Ακρωτηρίου Χανίων. Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος.

Κονταξάκης Μιχαήλ (2009). Μελέτη ποιότητας αέρα στο εργοστάσιο μηχανικής ανακύκλωσης και κομποστοποίησης και της έκθεσης των εργαζομένων σε αέριους ρύπους και αιωρούμενα σωματίδια στο χώρο υγειονομικής ταφής του ΕΜΑΚ. Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος.

Λαζαρίδης Μιχάλης (2010), Ατμοσφαιρική Ρύπανση με Στοιχεία Μετεωρολογίας, Εκδόσεις Τζιόλα

Λαζαρίδης Μιχάλης (2008), Ποιότητα Αέρα σε Εσωτερικούς Χώρους, Εκδόσεις Τζιόλα

Νίκανδρος Μάρκος, Γεώργιος Μηνάς (2012). Μέτρηση αιωρούμενων σωματιδίων και προσδιορισμός της δόσης στη μονάδα χειροδιαλογής του ΧΥΤΑ Χανίων. Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος.

Σανιδά Αμαλία (2010). Έκθεση του πληθυσμού της Αθήνας σε αέρια σωματιδιακή ρύπανση κατά την μετακίνηση του με το μετρό της Αθήνας. ΕΜΠ, Σχολή Χημικών Μηχανικών - Πανεπιστήμιο Πειραιώς, Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας.

Σπυρωνίδης Αποστολος (2013). Προσδιορισμός εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων και ανθρώπινης δόσης στη μονάδα χειροδιαλογής του ΧΥΤΑ Χανίων. Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος.

Χατουτσίδου Σοφία-Ειρήνη (2010). Κατανομή Αιωρούμενων Σωματιδίων στην Ανατολική Μεσόγειο: Σχηματισμός Νέων Σωματιδίων και Δυναμική τους. Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος.

### Ξένη Βιβλιογραφία

Adams, H.S., Nieuwenhuijsen, M.J., Colville, R.N., McMullen, M.A.S., Khandelwal, P.(2001a). Fine particle (PM25) personal exposure levels in transport microenvironments, London, UK. The Science of the Total Environment 279, 29-44.

Adams H.S., M.J. Nieuwenhuijsen, R.N. Colville (2001). Determinants of fine particle personal exposure levels in transport microenvironments, London.

Branis", M. (2006). The contribution of ambient sources to particulate pollution in spaces and trains of the Prague underground transport system. Atmospheric Environment 40, 348-356.

- Chalvatzaki E. and Lazaridis M. (2015). Development and application of a dosimetry model (ExDoM2) for calculating internal dose of specific particle-bound metals in the human body. *Inhalation toxicology*.
- Chan, C.C., Spengler, J.D., Ozkaynak, H., Lefkopoulou, M. (1991). Commuter exposures to VOCs in Boston, Massachusetts. *Journal of the Air and Waste Management Association* 41 (12), 1594-1600.
- Chan, L.Y., Chan, C.Y., Qin, Y.(1999). The effect of commuting microenvironment on commuter exposures to vehicular emission in Hong Kong. *Atmospheric Environment* 33 (11), 1777-1787.
- Chan L.Y., W.L. Lau, S C. Lee, C.Y. Chan (2002a). Commuter exposure to particulate matter in public transportation modes in Hong Kong, *Atmos. Environ.* 36, 3363-3373.
- Chan L.Y., W.L. Lau, S C. Zou, Z.X. Cao, S C. Lai (2002b). Exposure level of carbon monoxide and respirable suspended particulate in public transportation modes while commuting in urban area of Guangzhou, China, *Atmos. Environ.* 36, 5831-5840.
- Chan, L.Y., Lau, W.L., Wang, X.M., Tang, J.H. (2003). Preliminary measurements of aromatic VOCs in public transportation modes in Guangzhou, China. *Environment International* 29 (4), 429-435.
- EPA, 2002, 'Air Quality Criteria for Particulate Matter', Report EPA/600/P-99/002aC, 2002.
- Furuya K., Y. Kudo, K. Okinaga, M. Yamuki, S. Takahashi, Y. Araki, Y. Hisamatsu (2001). Seasonal variation and their characterization of suspended particulate matter in the air of subway stations, *Soil Environ. Sci.* 19 469-485.
- Gomez-Perales, J.E. (2005). Commuters exposure to air pollution in Mexico City. PhD, Imperial College London, Department of Environmental Science and Technology, University of London.
- Gradon, L. and Prodgorski, A. (1999). 'Deposition and retention of fine and ultrafine particles in the pulmonary region of human lungs. Normal and Pathological cases', *J. Aerosol Sci.* 30, S801 - S802
- Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection – ICRP Publication 66 – Volume 24
- Johansson, P.A. Johansson (2003). Particulate matter in the underground in Stockholm, *Atmos. Environ.* 37, 3-9.
- Kim, K.Y., Kim, Y.S., Roh, Y.M., Lee, C.M., Kim, C.N. (2008). Spatial distribution of particulate matter (PM10 and PM25) in Seoul Metropolitan Subway stations. *Journal of Hazardous Materials* 154, 440-443
- Kuempel, E. D., O'Flaherty, E. J., Stayner, L.T., Smith, R. J., Green, F. H. Y. and Vallyathan, V. (2001). 'A biomathematical model of particle clearance and retention in the lungs of coal miners.
- Morawska L, Congrong H; in Morawska L, Salthammer T (1999): *Indoor Environment: Airborne particles and settled dust*

Morawska, L., He, Congrong, Hitchins, J., Mengersen, K. and Gilbert, D. (2003) Characteristics of particle number and mass concentrations in Brisbane, Australia, Atmospheric Environment, 37, 4195-4203.

Occupational Intakes of Radionuclides-Part1. ICRP ref 4828-2081-0510

Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1. ICRP Publication 130. Ann. ICRP 44(2)

Pfeifer, G.D., Harrison, R.M., Lynam, D.R. (1999). Personal exposure to airborne metals in London taxi drivers and office workers in 1995 and 1996. The Science of the Total Environment 235, 253-260

Ripanucci, G., Grana, M., Vicentini, L., Magrini, A., Bergamaschi, A. (2006). Dust in the underground railway tunnels of an Italian town. Journal of Occupational and Environmental Hygiene 3, 16-25.

Seaton, A., Cherrie, J., Dennekamp, M., Donaldson, K., Hurley, J.F., Tran, C.L., (2005). The London underground: dust and hazards to health. Occupational and Environmental Medicine 62, 355-362.

Schlesinger, R.B. (1995). Toxicological evidence for health effects from inhaled particulate pollution: Does it support the human experience?., Inhalation Toxicol. 7, 99 - 109.

Schlesinger, R. (1988). Biological Disposition of Airborne Particles: Basic Principles and Application to Vehicular Emissions., Air Pollution, the Automobile, and Public Health, National Academy Press, Washington DC, 704 pp.

Vânia Martins, María Cruz Minguillón, Teresa Moreno, Xavier Querol, Eladio de Miguel, Marta Capdevila, Sonia Centelles, Mihalis Lazaridis (2015). Deposition of aerosol particles from a subway microenvironment in the human respiratory tract. Barcelona Spain. Chania Greece.

Yu-Hsiang Cheng, Yi-Lun Lin, Chia-Chen Liu (2008). Levels of PM2.5 and PM10 in Taipei Rapid Transit System. Atmospheric Environment 42, 7242-7249.

Zhang Q, Canagaratna MR, Jayne JT, Worsnop DR, Jimenez JL (2005): Time and size-resolved chemical composition of submicron particles in Pittsburg-Implications for aerosol sources and processes: J Geophys Res Atmos 110: D07S09.

### Ηλεκτρονικές διευθύνσεις

- 1) [www.oasa.gr](http://www.oasa.gr) (Εκθεση Πεπραγμένων).
- 2) [www.amel.gr](http://www.amel.gr). (Αττικό Μετρό Εταιρία Λειτουργίας Α.Ε.)