

# **ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

## **ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**



### **ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

#### **«ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΑΝΑΠΝΕΥΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ»**

**ΒΙΚΤΩΡΙΑ Γ. ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΠΟΥΛΟΥ**

#### **ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

**ΜΙΧΑΗΛ ΛΑΖΑΡΙΔΗΣ (επιβλέπων)**  
**ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΚΑΛΟΓΕΡΑΚΗΣ**  
**ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΚΑΡΑΤΖΑΣ**

**Χανιά**

**Δεκέμβριος 2003**



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αναπνευστικό σύστημα 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 - συσσώρευση). Οι μελέτες αυτές έχουν οδηγήσει στη δημιουργία μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης των παραπάνω μηχανισμών.

Στόχος της εργασίας είναι η μελέτη των παραμέτρων που καθορίζουν την εναπόθεση και μεταφορά σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα. Στα πλαίσια της κατασκευάστηκε μοντέλο (AEROEXPDOSE) καθορισμού δόσης και συσσώρευσης των σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό και γαστρεντερικό σύστημα και στο αίμα. Το μοντέλο AEROEXPDOSE εφαρμόστηκε στην περίπτωση έκθεσης σε εξωτερικούς και εσωτερικούς χώρους στην αστική περιοχή του Όσλο στη Νορβηγία και στον υπαίθριο χώρο της παράκτιας περιοχής της Φοινοκαλιάς στην Κρήτη. Αναλυτικότερα:

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται μια εισαγωγή στις έννοιες της έκθεσης και δόσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα καθώς και μια μικρή ανασκόπηση των επιδημιολογικών και τοξικολογικών μελετών, όπως και των μοντέλων εναπόθεσης και καθορισμού δόσης που έχουν πραγματοποιηθεί.

Στο Κεφάλαιο 2 αναλύονται τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά των σωματιδίων που σχετίζονται με την δόση και τις επιπτώσεις τους στον ανθρώπινο οργανισμό.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται η ανατομία και φυσιολογία του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος στο βαθμό που σχετίζεται με την εναπόθεση και τον καθαρισμό των σωματιδίων και χρησιμοποιείται στα μοντέλα προσομοίωσης τους.

Στα Κεφάλαια 4 και 5 αναλύονται οι μηχανισμοί εναπόθεσης και καθαρισμού των σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα και μελετώνται οι παράμετροι που τους επηρεάζουν με τη βοήθεια του μοντέλου AEROEXPDOSE που αναλύεται στο κεφάλαιο 6.

Στο Κεφάλαιο 6 αναπτύσσεται η μεθοδολογία υπολογισμού της εναπόθεσης και καθαρισμού σωματιδίων από το ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα στο μοντέλο AEROEXPDOSE. Δίνεται ο αλγόριθμος υπολογισμού της δόσης και συσσώρευσης σωματιδίων στο αναπνευστικό και το μοντέλο συγκρίνεται με άλλα.

Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου AEROEXPDOSE σε αστική περιοχή και μελετάται η σχέση συγκέντρωσης και δόσης για έκθεση σε εξωτερικό χώρο και εντός οικίας στο Όσλο της Νορβηγίας. Ακόμα ελέγχεται η δυνατότητα εφαρμογής του μοντέλου για τον υπολογισμό της δόσης και συσσώρευσης με τη χρήση ωριαίων και μέσων ημερήσιων τιμών όπως και η ορθότητα των αποτελεσμάτων για τη δεύτερη περίπτωση.

Στο Κεφάλαιο 8 χρησιμοποιείται η ίδια μεθοδολογία για τον υπολογισμό της δόσης και συσσώρευσης σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα στην περίπτωση έκθεσης σε υπαίθριο χώρο στην Φοινοκαλιά Κρήτης, που διαθέτει τα τυπικά χαρακτηριστικά μιας μη αστικής παράκτιας περιοχής της Μεσογείου.

Τέλος στο Κεφάλαιο 9 γίνεται μια σύνοψη των αποτελεσμάτων και δίνονται τα συμπεράσματα από αυτή την εργασία.

Το μοντέλο AEROEXPDOSE (εκτελέσιμο αρχείο και πηγαίος κώδικας) μαζί με το εγχειρίδιο χρήσης του δίνονται στο Παράρτημα της εργασίας.



## —ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ—

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΕΚΘΕΣΗ ΚΑΙ ΤΙΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ.....	4
2.1. Γενικά .....	4
2.2. Φυσικές ιδιότητες των σωματιδίων .....	6
2.3. Χημικές ιδιότητες των σωματιδίων .....	12
2.4. Ταξινόμηση αιωρούμενων σωματιδίων σχετικά με την συμπεριφορά τους στο αναπνευστικό σύστημα.....	13
2.5. Επιπτώσεις των σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα .....	15
3. ΤΟ ΑΝΑΠΝΕΥΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	17
3.1. Ανατομία του αναπνευστικού συστήματος .....	17
3.1.1. Ανώτερο αναπνευστικό σύστημα .....	22
3.1.2. Τραχειοβρογχική περιοχή.....	23
3.1.3. Περιοχή κυψελίδων .....	25
3.2. Παράμετροι Φυσιολογίας.....	27
4. ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟ ΑΝΑΠΝΕΥΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	31
4.1. Γενικά .....	31
4.2. Μηχανισμοί εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα.....	31
4.3. Παράγοντες που επηρεάζουν την εναπόθεση σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα.....	33
5. ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΑΝΑΠΝΕΥΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	39
5.1. Γενικά .....	39
5.2. Μηχανισμοί απομάκρυνσης σωματιδίων από το ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα.....	40
5.3. Κινητική της απομάκρυνσης .....	43
5.4. Παράγοντες που επηρεάζουν την απομάκρυνση σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα.....	47
6. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΥ ΔΟΣΗΣ AEROEXPDOSE .....	52
6.1. Γενικά .....	52
6.2. Εναπόθεση σωματιδίων στο αναπνευστικό.....	53
6.3. Καθαρισμός σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα.....	61
6.4. Δόση και συσσώρευση σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα.....	66

6.5.	Σύγκριση του μοντέλου AEROEXPDOSE με άλλα μοντέλα .....	72
7.	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ AEROEXPDOSE ΣΤΟ ΟΣΛΟ .....	77
8.	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ AEROEXPDOSE ΣΤΗ ΦΟΙΝΟΚΑΛΙΑ.....	118
9.	ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	131
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	135
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	143

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ—

Εικόνα 1: Οι επιπτώσεις της αέριας ρύπανσης στην υγεία ως αποτέλεσμα της αλυσίδας γεγονότων που ξεκινούν από την εκπομπή των ρύπων.....	2
Εικόνα 2: Κατηγορίες αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας. ....	5
Εικόνα 3: Κατανομή της επιφάνειας των σωματιδίων συναρτήσει της διαμέτρου τους. ....	8
Εικόνα 4: (α) Κατανομή μάζας σωματιδίων συναρτήσει της ισοδύναμης αεροδυναμικής διαμέτρου τους (β) Η διάμετρος των σωματιδίων συναρτήσει του αθροιστικού ποσοστού μάζας σε λογαριθμική κλίμακα ή διαφορετικά λογαριθμικό διάγραμμα της καμπύλης πιθανότητας για την κατανομή μάζας των σωματιδίων. Η γκριζα καμπύλη αντιστοιχεί στα μικρά σωματίδια ενώ η πλήρης μαύρη γραμμή στα μεγάλα σωματίδια.....	9
Εικόνα 5: Λογαριθμική κανονική κατανομή μάζας σωματιδίων συναρτήσει της ισοδύναμης αεροδυναμικής διαμέτρου τους. ....	10
Εικόνα 6: Ταξινόμηση των αιωρούμενων σωματιδίων σε εσπνεύσιμα, θωρακικά και αναπνεύσιμα βάσει της διαμέτρου τους. Το ποσοστό αφορά την διείσδυση σε κάθε περιοχή.....	14
Εικόνα 7: Εισπνεύσιμο κλάσμα (εισπνευσσιμότητα) σωματιδίων σε μηδενική ταχύτητα ανέμου συναρτήσει της διαμέτρου τους. ....	15
Εικόνα 8: Ανατομία του αναπνευστικού συστήματος.....	18
Εικόνα 9: Απλό γεωμετρικό μοντέλο των πηγών και των στόχων που σχετίζονται με την δόση στους επιθηλιακούς ιστούς της βρογχικής και εκτός θώρακα περιοχής. ....	19
Εικόνα 10: Το ανώτερο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα. ....	22
Εικόνα 11: 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. ....	24
Εικόνα 12: Σχέδιο της κυψελιδικής (φατνιακής) περιοχής των πνευμόνων όπου 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 (λεπτές γραμμές πάνω στις κυψελίδες). ....	25

Εικόνα 13: Η κυψελιδική (φατνιακή) περιοχή των πνευμόνων, (α) κυψελίδες κοντά σε αρτηρία και (β) εγκάρσια τομή της κυψελιδικής περιοχής των πνευμόνων όπου φαίνονται τα αεροθυλάκια, οι κυψελίδες και οι αρτηρίες.....	26
Εικόνα 14: Διάγραμμα των κλασμάτων του όγκου αέρα που εισέρχεται στους πνεύμονες. TLC = ο μέγιστος όγκος του αέρα στους πνεύμονες στην εισπνοή (Total Lung Capacity), VC = (Vital Capacity), RV = (Residual Volume), FRC = ο όγκος αέρα που παραμένει στους πνεύμονες μετά από την εκπνοή (Functional Residual Capacity), IRV = (Inspiratory Reverse Volume), ERV = (Expiratory Reverse Volume), $V_T$ = ο όγκος αέρα κάθε εισπνοής (Tidal volume), IC = (Inspiratory Capacity).....	28
Εικόνα 15: Μηχανισμοί εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα. ....	32
Εικόνα 16: Ποσοστό εναπόθεσης σωματιδίων στις 5 περιοχές της αναπνευστικής οδού, όπως δίνεται στο 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.....	34
Εικόνα 17: Ποσοστό εναπόθεσης της εισπνεόμενης μάζας σωματιδίων διαμέτρου 1 $\mu\text{m}$ στις 5 περιοχές της αναπνευστικής οδού συναρτήσει της συμμετοχής της μύτης στην εισπνοή.....	35
Εικόνα 18: Ποσοστό μάζας που αποτίθεται στην εκτός θώρακα περιοχή του αναπνευστικού συστήματος άντρα, γυναίκας και βρέφους 3 μηνών, συναρτήσει της διαμέτρου των σωματιδίων (οι υπολογισμοί έγιναν με το μοντέλο AEROEXPDOSE).....	36
Εικόνα 19: Ποσοστό μάζας που αποτίθεται στην τραχειοβρογχική περιοχή του αναπνευστικού συστήματος άντρα, γυναίκας και βρέφους 3 μηνών, συναρτήσει της διαμέτρου των σωματιδίων (οι υπολογισμοί έγιναν με το μοντέλο AEROEXPDOSE).....	37
Εικόνα 20: Ποσοστό μάζας που αποτίθεται στην κυψελιδική περιοχή και στο σύνολο του αναπνευστικού συστήματος άντρα, γυναίκας και βρέφους 3 μηνών, συναρτήσει της διαμέτρου των σωματιδίων (οι υπολογισμοί έγιναν με το μοντέλο AEROEXPDOSE).....	37
Εικόνα 21: Διάγραμμα πιθανών τρόπων καθαρισμού των σωματιδίων από την περιοχή των κυψελίδων για αδιάλυτα σωματίδια. Αριστερά φαίνεται η ανέλκυση	

σωματιδίων από το στρώμα βλέννας προς τον φάρυγγα απ' όπου καταλήγουν στο γαστρεντερικό σύστημα. ....	42
Εικόνα 22: Απομάκρυνση-μεταφορά σωματιδίων διαστάσεων 2,5μm με συγκέντρωση 1μg/m <sup>3</sup> που απορροφούνται ταχέως στο αίμα από τις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος. Η διάρκεια της έκθεσης είναι 1 ώρα ενώ η μάζα που έχει συσσωρευτεί σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος υπολογίζεται και για 1 ώρα μετά το τέλος της έκθεσης. Οι υπολογισμοί έγιναν με το μοντέλο AEROEXPDOSE. ....	46
Εικόνα 23: Σχετική συγκράτηση σωματιδίων διαστάσεων 2,5μm, με συγκέντρωση 1μg/m <sup>3</sup> που απορροφούνται ταχέως στο αίμα. Η διάρκεια της έκθεσης είναι 1 ώρα ενώ η μάζα που έχει συσσωρευτεί σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος υπολογίζεται και για 1 ώρα μετά το τέλος της έκθεσης. Οι υπολογισμοί έγιναν με το μοντέλο AEROEXPDOSE. ....	47
Εικόνα 24: Μάζα σωματιδίων που βρίσκεται συσσωρευμένη στα τμήματα του αναπνευστικού συστήματος μετά από έκθεση 1 ημέρας σε συγκέντρωση 1μg/m <sup>3</sup> συναρτήσει της διαμέτρου τους (οι υπολογισμοί έγιναν με το μοντέλο AEROEXPDOSE). ....	48
Εικόνα 25: Σχετική συγκράτηση σωματιδίων (α) στην κυψελιδική περιοχή των πνευμόνων και (β) στο αργά κινούμενο στρώμα βλέννας των περιοχών BB και bb, συναρτήσει της διαμέτρου τους μετά από έκθεση 1 ώρας σε συγκέντρωση 1μg/m <sup>3</sup> . Οι υπολογισμοί έγιναν με το μοντέλο AEROEXPDOSE. ....	49
Εικόνα 26: Σχετική συγκράτηση σωματιδίων (α) στο γρήγορα κινούμενο στρώμα βλέννας των περιοχών BB και bb και (β) στην επιφάνεια της περιοχής ET <sub>2</sub> , συναρτήσει της διαμέτρου τους μετά από έκθεση 1 ώρας σε συγκέντρωση 1μg/m <sup>3</sup> . Οι υπολογισμοί έγιναν με το μοντέλο AEROEXPDOSE. ....	49
Εικόνα 27: Σχετική συγκράτηση σωματιδίων στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού των περιοχών (α) BB και bb και (β) ET, συναρτήσει της διαμέτρου τους μετά από έκθεση 1 ώρας σε συγκέντρωση 1μg/m <sup>3</sup> . Οι υπολογισμοί έγιναν με το μοντέλο AEROEXPDOSE. ....	50
Εικόνα 28: Σχετική συγκράτηση σωματιδίων (α) στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού της περιοχής ET <sub>2</sub> και (β) στο ταχέως κινούμενο στρώμα βλέννας των περιοχών BB και bb. Θεωρείται έκθεση σε συγκέντρωση 1μg/m <sup>3</sup> για ενήλικα καυκάσιο άντρα που εκτελεί ήπια εργασία. Οι υπολογισμοί έγιναν με το μοντέλο AEROEXPDOSE. ....	51

Εικόνα 29: Σχετική συγκράτηση σωματιδίων (α) στους λεμφαδένες της περιοχής ET και (β) στο γαστρεντερικό σύστημα (σχετική δόση). Θεωρείται έκθεση σε συγκέντρωση $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ για ενήλικα καυκάσιο άντρα που εκτελεί ήπια εργασία. Οι υπολογισμοί έγιναν με το μοντέλο AEROEXPDOSE. ....	51
Εικόνα 30: Εμπειρική αναπαράσταση της εναπόθεσης σωματιδίων στις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος κατά τη διάρκεια μιας αναπνοής με τον αέρα να μεταφέρεται διαμέσου μιας σειράς από φίλτρα . Η αναπνοή μπορεί να πραγματοποιείται από τη μύτη ( $F_n$ το κλάσμα εισπνοής από τη μύτη) ή από το στόμα ( $1 - F_n$ ) ή και από τα δύο σε συνδυασμό. Το κλάσμα των εισπνεύσιμων σωματιδίων ορίζεται ως εισπνευσιμότητα ενώ με $n_{in}$ και $n_{out}$ εκφράζεται η απόδοση των φίλτρων κατά την εισπνοή και εκπνοή αντίστοιχα. ....	54
Εικόνα 31: Λογαριθμο-κανονική κατανομή σωματιδίων και διάγραμμα συνάρτησης πυκνότητας-πιθανότητας της κατανομής ή αθροιστική καμπύλη κατανομής.....	60
Εικόνα 32: Μοντέλο μεταφοράς σωματιδίων από κάθε περιοχή του αναπνευστικού, όπου κάθε περιοχή αποτελείται από τμήματα έτσι ώστε να εκφράζεται καλύτερα ο χρονικά μεταβαλλόμενος ρυθμός μεταφοράς.....	63
Εικόνα 33: Μοντέλο που αναπαριστά τον χρονικά μεταβαλλόμενο ρυθμό απορρόφησης των σωματιδίων στο αίμα.....	64
Εικόνα 34: Το πλήρες ‘τμηματικό’ μοντέλο καθαρισμού σωματιδίων από την αναπνευστική οδό που περιλαμβάνει χρονικά μεταβαλλόμενο ρυθμό μεταφοράς και απορρόφησης στο αίμα. Κάθε αριθμοδείκτης αντιστοιχεί σε τμήμα του αναπνευστικού συστήματος όπως δίνεται στην εικόνα 32.....	65
Εικόνα 35: Η μάζα που κατακρατείται στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού στην περιοχή ET όπως υπολογίστηκε με το μοντέλο AEROEXPDOSE για τρία διαφορετικά χρονικά βήματα. ....	70
Εικόνα 36: Ποσοστό εναπόθεσης σωματιδίων στις 5 περιοχές της αναπνευστικής οδού, όπως υπολογίστηκε με το μοντέλο LungDep66. ....	73
Εικόνα 37: Ποσοστό εναπόθεσης σωματιδίων στις 5 περιοχές της αναπνευστικής οδού, όπως υπολογίστηκε με το μοντέλο LUDEP. ....	74
Εικόνα 38: Ποσοστό εναπόθεσης σωματιδίων στις 5 περιοχές της αναπνευστικής οδού, όπως υπολογίστηκε με το μοντέλο AEROEXPDOSE. ....	74
Εικόνα 39: Ολικό ποσοστό εναπόθεσης σωματιδίων και ποσοστό εναπόθεσης τους στις 3 περιοχές της αναπνευστικής οδού, όπως υπολογίστηκε με το μοντέλο MPPD..	76

Εικόνα 40: Διάταξη οργάνων μέτρησης εντός και εκτός της οικίας στο Όσλο το καλοκαίρι του 2002. ....	77
Εικόνα 41: Κατανομή μάζας των σωματιδίων στο Όσλο για την περίοδο μελέτης όπως προκύπτει από μετρήσεις με έναν προσκρουστή Berner, 8 σταδίων. ....	79
Εικόνα 42: Συγκέντρωση σωματιδίων εντός και εκτός της οικίας στο Όσλο και ο αντίστοιχος ωριαίος ρυθμός δόσης όπως εκτιμήθηκε με το μοντέλο AEROEXPDOSE. ....	80
Εικόνα 43: Συγκέντρωση αεροζόλ και δόση μικρών και μεγάλων σωματιδίων μετά από έκθεση σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους στις 03/06/02.....	82
Εικόνα 44: Συγκέντρωση αεροζόλ και δόση μικρών και μεγάλων σωματιδίων μετά από έκθεση σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους στις 04/06/02.....	82
Εικόνα 45: Συγκέντρωση αεροζόλ και δόση μικρών και μεγάλων σωματιδίων μετά από έκθεση σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους στις 08/06/02.....	82
Εικόνα 46: Συγκέντρωση αεροζόλ και δόση μικρών και μεγάλων σωματιδίων μετά από έκθεση σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους στις 10/06/02.....	83
Εικόνα 47: Συγκέντρωση αεροζόλ και δόση μικρών και μεγάλων σωματιδίων μετά από έκθεση σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους στις 11/06/02.....	83
Εικόνα 48: Διαφορά εκτιμώμενης ωριαίας δόσης ολικών σωματιδίων με τη χρήση των μοντέλων LUDEP και AEROEXPDOSE.....	86
Εικόνα 49: Ημερήσια δόση μικρών σωματιδίων όπως εκτιμήθηκε βάσει μέσων ημερήσιων και συνεχών τιμών με το μοντέλο AEROEXPDOSE.....	87
Εικόνα 50: Ημερήσια δόση μεγάλων σωματιδίων όπως εκτιμήθηκε βάσει μέσων ημερήσιων και συνεχών τιμών AEROEXPDOSE. ....	87
Εικόνα 51: Ημερήσια δόση ολικών σωματιδίων όπως εκτιμήθηκε βάσει μέσων ημερήσιων και συνεχών τιμών AEROEXPDOSE. ....	87
Εικόνα 52: Κατανομή μάζας σωματιδίων Mg και NO <sub>3</sub> στις 10/6/2002 και 3/6/2002 αντίστοιχα με την περισσότερη μάζα τους να βρίσκεται στο κλάσμα των μεγάλων σωματιδίων. ....	89
Εικόνα 53: Κατανομή μάζας σωματιδίων Na και K στις 8/6/2002. Τα στοιχεία παρουσιάζουν δύο κορυφές στη κατανομή μάζας.....	89
Εικόνα 54: Κατανομή μάζας σωματιδίων NH <sub>4</sub> και SO <sub>4</sub> στις 3/6/2002 και 10/6/2002 αντίστοιχα. Τα στοιχεία παρουσιάζουν κατανομή μιας κορυφής, με την περισσότερη μάζα τους να αποτελείται από σωματίδια μεγέθους συσσωματώματος. ....	90

Εικόνα 55: Κατανομή μάζας σωματιδίων στις 3/6/2002 και 4/6/2002. ....	91
Εικόνα 56: Κατανομή μάζας σωματιδίων στις 5/6/2002 και 6/6/2002. ....	91
Εικόνα 57: Κατανομή μάζας σωματιδίων στις 7/6/2002 και 8/6/2002. ....	91
Εικόνα 58: Κατανομή μάζας σωματιδίων στις 9/6/2002 και 10/6/2002. ....	92
Εικόνα 59: Χημική σύσταση ανόργανων αεροζόλ στο Όσλο την περίοδο μελέτης. ....	93
Εικόνα 60: Δόση μικρών και μεγάλων ανόργανων σωματιδίων σε εξωτερικούς χώρους όπως υπολογίστηκε από μέσες ημερήσιες τιμές των παραμέτρων καθορισμού δόσης, στις 3 και 4/6/2002 αντίστοιχα. ....	94
Εικόνα 61: Δόση μικρών και μεγάλων ανόργανων σωματιδίων σε εξωτερικούς χώρους όπως υπολογίστηκε από μέσες ημερήσιες τιμές των παραμέτρων καθορισμού δόσης, στις 8 και 10/6/2002 αντίστοιχα. ....	94
Εικόνα 62: Δόση μικρών και μεγάλων οργανικών σωματιδίων όπως υπολογίστηκε από μέσες ημερήσιες τιμές των παραμέτρων καθορισμού δόσης, στις 5 και 6/6/2002 αντίστοιχα. ....	95
Εικόνα 63: Δόση μικρών και μεγάλων οργανικών σωματιδίων όπως υπολογίστηκε από μέσες ημερήσιες τιμές των παραμέτρων καθορισμού δόσης, στις 7 και 9/6/2002 αντίστοιχα. ....	95
Εικόνα 64: Δόση μικρών και μεγάλων ανόργανων σωματιδίων σε εξωτερικούς χώρους όπως υπολογίστηκε από μέσες ημερήσιες τιμές των παραμέτρων καθορισμού δόσης, στις 3/6/2002. ....	96
Εικόνα 65: Δόση μικρών και μεγάλων ανόργανων σωματιδίων σε εξωτερικούς χώρους όπως υπολογίστηκε από μέσες ημερήσιες τιμές των παραμέτρων καθορισμού δόσης, στις 4/6/2002. ....	96
Εικόνα 66: Δόση μικρών και μεγάλων ανόργανων σωματιδίων σε εξωτερικούς χώρους όπως υπολογίστηκε από μέσες ημερήσιες τιμές των παραμέτρων καθορισμού δόσης, στις 8/6/2002. ....	96
Εικόνα 67: Δόση μικρών και μεγάλων ανόργανων σωματιδίων σε εξωτερικούς χώρους όπως υπολογίστηκε από μέσες ημερήσιες τιμές των παραμέτρων καθορισμού δόσης, στις 10/6/2002. ....	96
Εικόνα 68: Αθροιστική έκθεση και δόση σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα, σε εξωτερικούς χώρους για την περίοδο μελέτης (3/6/2002 - 11/6/2002) στο Όσλο. Παράλληλα δίνεται και η αθροιστική καμπύλη δόσης στις 4 περιοχές του πνεύμονα (ET <sub>2</sub> , BB, bb, AI) που λαμβάνονται υπόψη στον μηχανισμό απομάκρυνσης των σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα. ....	97



- Εικόνα 69: Αθροιστική δόση σωματιδίων στις 4 περιοχές του πνεύμονα και μάζα ταχέως απορροφώμενων στο αίμα σωματιδίων που μεταφέρεται στο γαστρεντερικό σύστημα ή παραμένει στην αναπνευστική οδό, σε εξωτερικούς χώρους κατά την περίοδο μελέτης (3/6/2002 - 11/6/2002) στο Όσλο. Η περιοχή μεταξύ των καμπυλών του αθροίσματος μάζας στην αναπνευστική οδό και το γαστρεντερικό σύστημα, και της αθροιστικής δόσης εκφράζει τη μάζα που απορροφάται στο αίμα..... 98
- Εικόνα 70: Συγκέντρωση σωματιδίων εντός και εκτός της οικίας στο Όσλο και ο αντίστοιχος ωριαίος ρυθμός δόσης όπως εκτιμήθηκε με το μοντέλο AEROEXPDOSE χρησιμοποιώντας παραδοχές για τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων για τις 5 – 7/6/2002 και 9/6/2002..... 99
- Εικόνα 71: Αθροιστική έκθεση και δόση (παραδοχές για τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων για τις 5-7/6/2002 και 9/6/2002) σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα, σε εξωτερικούς χώρους για την περίοδο μελέτης (3/6/2002 - 11/6/2002) στο Όσλο. Παράλληλα δίνεται και η αθροιστική καμπύλη δόσης στις 4 περιοχές του πνεύμονα (ET<sub>2</sub>, BB, bb, AI) που λαμβάνονται υπόψη στον μηχανισμό απομάκρυνσης των σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα..... 100
- Εικόνα 72: Αθροιστική δόση σωματιδίων στις 4 περιοχές του πνεύμονα και μάζα ταχέως απορροφώμενων στο αίμα σωματιδίων που μεταφέρεται στο γαστρεντερικό σύστημα ή παραμένει στην αναπνευστική οδό, σε εξωτερικούς χώρους κατά την περίοδο μελέτης (3/6/2002 - 11/6/2002) στο Όσλο όπως υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας παραδοχές για τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων για τις 5-7/6/2002 και 9/6/2002. Η απόσταση μεταξύ των καμπυλών του αθροίσματος μάζας στην αναπνευστική οδό και το γαστρεντερικό σύστημα, και της αθροιστικής δόσης εκφράζει τη μάζα που απορροφάται στο αίμα..... 100
- Εικόνα 73: Μάζα σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα κατά την περίοδο μελέτης (3/6/2002 - 11/6/2002) στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 101
- Εικόνα 74: Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στην επιφάνεια (στα υγρά) και (β) στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού στην περιοχή ET<sub>2</sub> κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 102

- Εικόνα 75: Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στο ταχέως κινούμενο στρώμα βλέννας και (β) στο αργά κινούμενο στρώμα βλέννας της περιοχής BB κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 102
- Εικόνα 76: Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού στην περιοχή BB και (β) στο ταχέως κινούμενο στρώμα βλέννας της περιοχής bb κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 102
- Εικόνα 77: Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στο αργά κινούμενο στρώμα βλέννας και (β) στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού στην περιοχή bb κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 103
- Εικόνα 78: Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων (α) που παραμένει στην κυψελιδική περιοχή των πνευμόνων και (β) που απομακρύνεται στο γαστρεντερικό σύστημα κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 103
- Εικόνα 79: Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει στους λεμφαδένες της (α) θωρακικής περιοχής και (β) εκτός θώρακα περιοχής κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 103
- Εικόνα 80: Αθροιστική δόση σωματιδίων στις 4 περιοχές του πνεύμονα και μάζα αργά απορροφώμενων στο αίμα σωματιδίων που μεταφέρεται στο γαστρεντερικό σύστημα ή παραμένει στην αναπνευστική οδό, σε εξωτερικούς χώρους κατά την περίοδο μελέτης (3/6/2002 - 11/6/2002) στο Όσλο όπως υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας παραδοχές για τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων για τις 5-7/6/2002 και 9/6/2002. Η απόσταση μεταξύ των καμπυλών του αθροίσματος μάζας στην αναπνευστική οδό και το γαστρεντερικό σύστημα, και της αθροιστικής δόσης εκφράζει τη μάζα που απορροφάται στο αίμα. .... 104
- Εικόνα 81: Μάζα σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα κατά την περίοδο μελέτης (3/6/2002 - 11/6/2002) στο Όσλο για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 105
- Εικόνα 82: Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στην επιφάνεια (στα υγρά) και (β) στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού στην περιοχή

- ET<sub>2</sub> κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 106
- Εικόνα 83: Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στο ταχέως κινούμενο στρώμα βλέννας και (β) στο αργά κινούμενο στρώμα βλέννας της περιοχής BB κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 106
- Εικόνα 84: Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού στην περιοχή BB και (β) στο ταχέως κινούμενο στρώμα βλέννας της περιοχής bb κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 106
- Εικόνα 85: Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στο αργά κινούμενο στρώμα βλέννας και (β) στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού στην περιοχή bb κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 107
- Εικόνα 86: Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων (α) που παραμένει στην κυψελιδική περιοχή των πνευμόνων και (β) που απομακρύνεται στο γαστρεντερικό σύστημα κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 107
- Εικόνα 87: Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει στους λεμφαδένες της (α) θωρακικής περιοχής και (β) εκτός θώρακα περιοχής κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 107
- Εικόνα 88: Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στην επιφάνεια της αναπνευστικής οδού στην περιοχή εκτός θώρακα και (β) στο ταχέως κινούμενο στρώμα βλέννας της περιοχής BB και της περιοχής bb κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, όπως υπολογίστηκε με τη χρήση μέσων ημερήσιων και συνεχών τιμών δόσης, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 109
- Εικόνα 89: Αθροιστική έκθεση και δόση σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα, σε εσωτερικούς χώρους για την περίοδο μελέτης (3/6/2002 - 11/6/2002) στο Όσλο. Παράλληλα δίνεται και η αθροιστική καμπύλη δόσης στις 4 περιοχές του πνεύμονα (ET<sub>2</sub>, BB, bb, AI) που λαμβάνονται υπόψη στον μηχανισμό απομάκρυνσης των σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα. .... 110

- Εικόνα 90: Αθροιστική δόση σωματιδίων στις 4 περιοχές του πνεύμονα και μάζα ταχέως απορροφόμενων στο αίμα σωματιδίων που μεταφέρεται στο γαστρεντερικό σύστημα ή παραμένει στην αναπνευστική οδό, σε εσωτερικούς χώρους κατά την περίοδο μελέτης (3/6/2002 - 11/6/2002) στο Όσλο όπως υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας παραδοχές για τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων για τις 5-7/6/2002 και 9/6/2002. Η απόσταση μεταξύ των καμπυλών του αθροίσματος μάζας στην αναπνευστική οδό και το γαστρεντερικό σύστημα, και της αθροιστικής δόσης εκφράζει τη μάζα που απορροφάται στο αίμα..... 111
- Εικόνα 91: Μάζα σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα κατά την περίοδο μελέτης (3/6/2002 - 11/6/2002) στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εσωτερικούς χώρους..... 111
- Εικόνα 92: Αθροιστική δόση σωματιδίων στις 4 περιοχές του πνεύμονα και μάζα αργά απορροφόμενων στο αίμα σωματιδίων που μεταφέρεται στο γαστρεντερικό σύστημα ή παραμένει στην αναπνευστική οδό, σε εσωτερικούς χώρους κατά την περίοδο μελέτης (3/6/2002 - 11/6/2002) στο Όσλο όπως υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας παραδοχές για τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων για τις 5-7/6/2002 και 9/6/2002. Η απόσταση μεταξύ των καμπυλών του αθροίσματος μάζας στην αναπνευστική οδό και το γαστρεντερικό σύστημα, και της αθροιστικής δόσης εκφράζει τη μάζα που απορροφάται στο αίμα. .... 112
- Εικόνα 93: Μάζα σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα κατά την περίοδο μελέτης (3/6/2002 - 11/6/2002) στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εσωτερικούς χώρους. .... 112
- Εικόνα 94: Μάζα ανόργανων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 115
- Εικόνα 95: Μάζα ανόργανων σωματιδίων που απομακρύνεται στο γαστρεντερικό σύστημα κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 115
- Εικόνα 96: Μάζα ανόργανων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 116
- Εικόνα 97: Μάζα ανόργανων σωματιδίων που απομακρύνεται στο γαστρεντερικό σύστημα κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 116

Εικόνα 98: Μάζα ανθρακούχων σωματιδίων στο αναπνευστικό και το γαστρεντερικό σύστημα κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο θεωρώντας πως απορροφώνται γρήγορα στο αίμα. ....	117
Εικόνα 99: Μάζα ανθρακούχων σωματιδίων στο αναπνευστικό και το γαστρεντερικό σύστημα κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο θεωρώντας πως απορροφώνται αργά στο αίμα. ....	117
Εικόνα 100: Συγκέντρωση σωματιδίων $PM_{10}$ , $PM_{2,5}$ και $PM_1$ κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά. ....	119
Εικόνα 101α: Κατανομές μάζας σωματιδίων κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά. ....	120
Εικόνα 102: Συγκέντρωση και δόση μικρών και μεγάλων σωματιδίων στην αναπνευστική οδό κατά την περίοδο μελέτης (10/7/2000 - 30/7/2000) στη Φοινοκαλιά όπως υπολογίστηκαν με το μοντέλο AEROEXPDOSE χρησιμοποιώντας μέσες ημερήσιες τιμές παραμέτρων. ....	122
Εικόνα 103: Αθροιστική έκθεση και δόση σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα για την περίοδο μελέτης (10/7/2000 - 30/7/2000) στη Φοινοκαλιά. Παράλληλα δίνεται και η αθροιστική καμπύλη δόσης στις 4 περιοχές του πνεύμονα ( $ET_2$ , BB, bb, AI) που λαμβάνονται υπόψη στον μηχανισμό απομάκρυνσης των σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα. ....	123
Εικόνα 104: Αθροιστική δόση μικρών σωματιδίων στις 4 περιοχές του πνεύμονα και μάζα ταχέως απορροφώμενων στο αίμα μικρών σωματιδίων που μεταφέρεται στο γαστρεντερικό σύστημα ή παραμένει στην αναπνευστική οδό, σε εσωτερικούς χώρους κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά. Η απόσταση μεταξύ των καμπυλών του αθροίσματος μάζας στην αναπνευστική οδό και το γαστρεντερικό σύστημα, και της αθροιστικής δόσης εκφράζει τη μάζα που απορροφάται στο αίμα. ....	124
Εικόνα 105: Αθροιστική δόση μεγάλων σωματιδίων στις 4 περιοχές του πνεύμονα και μάζα ταχέως απορροφώμενων στο αίμα μεγάλων σωματιδίων που μεταφέρεται στο γαστρεντερικό σύστημα ή παραμένει στην αναπνευστική οδό, σε εσωτερικούς χώρους κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά. Η απόσταση μεταξύ των καμπυλών του αθροίσματος μάζας στην αναπνευστική οδό και το γαστρεντερικό σύστημα, και της αθροιστικής δόσης εκφράζει τη μάζα που απορροφάται στο αίμα. ....	124

- Εικόνα 106: Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στην επιφάνεια (στα υγρά) και (β) στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού στην περιοχή ET<sub>2</sub> κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 125
- Εικόνα 107: Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στο ταχέως κινούμενο στρώμα βλέννας και (β) στο αργά κινούμενο στρώμα βλέννας της περιοχής BB κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 125
- Εικόνα 108: Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού στην περιοχή BB και (β) στο ταχέως κινούμενο στρώμα βλέννας της περιοχής bb κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 126
- Εικόνα 109: Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στο αργά κινούμενο στρώμα βλέννας και (β) στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού στην περιοχή bb κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 126
- Εικόνα 110: Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων (α) που παραμένει στην κυψελιδική περιοχή των πνευμόνων και (β) που απομακρύνεται στο γαστρεντερικό σύστημα κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 126
- Εικόνα 111: Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει στους λεμφαδένες της (α) θωρακικής περιοχής και (β) εκτός θώρακα περιοχής κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 127
- Εικόνα 112: Αθροιστική δόση μικρών σωματιδίων στις 4 περιοχές του πνεύμονα και μάζα αργά απορροφώμενων στο αίμα μικρών σωματιδίων που μεταφέρεται στο γαστρεντερικό σύστημα ή παραμένει στην αναπνευστική οδό, σε εσωτερικούς χώρους κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά. Η απόσταση μεταξύ των καμπυλών του αθροίσματος μάζας στην αναπνευστική οδό και το γαστρεντερικό σύστημα, και της αθροιστικής δόσης εκφράζει τη μάζα που απορροφάται στο αίμα. .... 127
- Εικόνα 113: : Αθροιστική δόση μεγάλων σωματιδίων στις 4 περιοχές του πνεύμονα και μάζα αργά απορροφώμενων στο αίμα μεγάλων σωματιδίων που μεταφέρεται στο

γαστρεντερικό σύστημα ή παραμένει στην αναπνευστική οδό, σε εσωτερικούς χώρους κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά. Η απόσταση μεταξύ των καμπυλών του αθροίσματος μάζας στην αναπνευστική οδό και το γαστρεντερικό σύστημα, και της αθροιστικής δόσης εκφράζει τη μάζα που απορροφάται στο αίμα.

..... 128

Εικόνα 114: Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στην επιφάνεια (στα υγρά) και (β) στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού στην περιοχή ET<sub>2</sub> κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 129

Εικόνα 115: Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στο ταχέως κινούμενο στρώμα βλέννας και (β) στο αργά κινούμενο στρώμα βλέννας της περιοχής BB κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 129

Εικόνα 116: Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού στην περιοχή BB και (β) στο ταχέως κινούμενο στρώμα βλέννας της περιοχής bb κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 129

Εικόνα 117: Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στο αργά κινούμενο στρώμα βλέννας και (β) στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού στην περιοχή bb κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 130

Εικόνα 118: Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων (α) που παραμένει στην κυψελιδική περιοχή των πνευμόνων και (β) που απομακρύνεται στο γαστρεντερικό σύστημα κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 130

Εικόνα 119: Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει στους λεμφαδένες της (α) θωρακικής περιοχής και (β) εκτός θώρακα περιοχής κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους. .... 130

## —ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ—

Πίνακας 1: Διαστάσεις του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος σύμφωνα με το μοντέλο Weibel A, για πνεύμονες ενηλίκων με όγκο 4800 mL και περίπου $\frac{3}{4}$ διάταση λόγω της αναπνοής.....	21
Πίνακας 2: Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων ανατομίας και φυσιολογίας που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα.....	30
Πίνακας 3: Ταχύτητα κίνησης του στρώματος βλέννας στην τραχειοβρογχική περιοχή του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος και αντίστοιχοι χρόνοι υποδιπλασιασμού.....	43
Πίνακας 4: Προτεινόμενες τιμές παραμέτρων του μοντέλου εναπόθεσης για το κλάσμα του αέρα που λαμβάνεται με αναπνοή από μύτη, για οποιοδήποτε εκτεθειμένο άτομο, ως συναρτήσεις των μεταβλητών που σχετίζονται με την αναπνοή και την ανατομία.....	57
Πίνακας 5: Προτεινόμενες τιμές παραμέτρων του μοντέλου εναπόθεσης για το κλάσμα του αέρα που λαμβάνεται με αναπνοή από το στόμα, για οποιοδήποτε εκτεθειμένο άτομο, ως συναρτήσεις των μεταβλητών που σχετίζονται με την αναπνοή και την ανατομία.....	58
Πίνακας 6: Κατανομή της εναπόθεσης μεταξύ τμημάτων κάθε περιοχής της αναπνευστικής οδού.....	62
Πίνακας 7: Ρυθμοί μεταφοράς σωματιδίων στα τμήματα του αναπνευστικού συστήματος.....	63
Πίνακας 8:Τυπικοί παράμετροι απορρόφησης για σωματίδια τύπου F (Fast), M (Moderate) και S (Slow).....	65
Πίνακας 9: Σενάρια ημερήσιας δραστηριότητας ατόμου σε υπαίθριους και εσωτερικούς χώρους που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο AEROEXPDOSE.....	67
Πίνακας 10: Ποσοστά εναπόθεσης μονοδιάσπορων σωματιδίων διαμέτρου 5μm στα τμήματα του αναπνευστικού συστήματος υπολογισμένα από διάφορα μοντέλα εναπόθεσης.....	76
Πίνακας 11: Ποσοστά εναπόθεσης πολυδιάσπορων ( $\sigma_g=2,5$ ) σωματιδίων διαμέτρου 5μm στα τμήματα του αναπνευστικού συστήματος υπολογισμένα από διάφορα μοντέλα εναπόθεσης.....	76



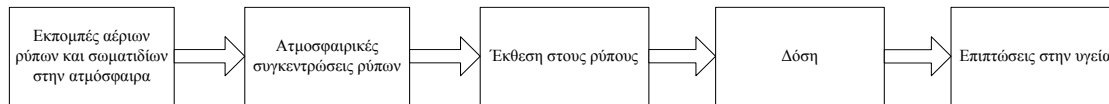
- Πίνακας 12: Συσσώρευση μάζας σωματιδίων στο αναπνευστικό και γαστρεντερικό σύστημα και στο αίμα μετά από έκθεση σε εξωτερικούς χώρους όπως υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την ωριαία ή τη μέση ημερήσια δόση για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως ή αργά στο αίμα. .... 109
- Πίνακας 13: Συσσώρευση μάζας σωματιδίων στο αναπνευστικό και γαστρεντερικό σύστημα και στο αίμα μετά από έκθεση σε εσωτερικούς χώρους όπως υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την ωριαία ή τη μέση ημερήσια δόση για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως ή αργά στο αίμα. .... 113
- Πίνακας 14: Συσσώρευση μάζας σωματιδίων στο αναπνευστικό και γαστρεντερικό σύστημα και στο αίμα μετά από έκθεση στη Φοινοκαλιά Κρήτης για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως ή αργά στο αίμα. .... 131

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το αναπνευστικό σύστημα αποτελεί την κύρια οδό μέσω της οποίας σωματίδια εισέρχονται στον ανθρώπινο οργανισμό. Τα σωματίδια, όπως έχει βρεθεί σε μελέτες της παγκόσμιας οργάνωσης υγείας (*WHO, 2000*) και άλλων ερευνητών (π.χ. *Hollander, 1999*), προκαλούν δυσμενείς επιπτώσεις στον οργανισμό. Ειδικότερα στην Ελλάδα, σύμφωνα με τις παραπάνω μελέτες, από το 1990 και μετά έχει αυξηθεί σημαντικά η νοσηρότητα και θνησιμότητα που οφείλεται στη ρύπανση της ατμόσφαιρας με αιωρούμενα σωματίδια. Τα αποτελέσματα αυτά προέκυψαν από συνδυασμό επιδημιολογικών (*Pope κ.α., 1999; Schwartz κ.α., 1999; Laden, 1999*) και τοξικολογικών (*Kim κ.α., 2000; Kennedy και Hinds, 2002*) μελετών των τελευταίων ετών.

Οι επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στην υγεία του ανθρώπου είναι σημαντικές και καθορίζονται τόσο από το μέγεθος όσο και από τη χημική τους σύσταση. Βασική αρχή στην εκτίμηση των επιπτώσεων των σωματιδίων στην υγεία είναι πως το άμεσο αίτιο κάθε βιολογικής απόκρισης είναι η δόση που φτάνει σε κάποιο σημείο του σώματος και όχι η έκθεση σε εξωτερικούς παράγοντες (συγκέντρωση). Ειδικότερα ως συγκέντρωση ενός ρύπου στην ατμόσφαιρα ορίζεται η ποσότητα (συνήθως μάζα ή πλήθος) του ανά μονάδα όγκου αέρα. Η έκθεση του ανθρώπου σε ατμοσφαιρικούς ρύπους αναφέρεται σε οποιαδήποτε επαφή του σώματος του – εξωτερικά (δέρμα) ή εσωτερικά (αναπνευστική οδός) – με τους ρύπους. Η έκθεση δηλαδή είναι το αποτέλεσμα του συνδυασμού συγκέντρωσης ενός ρύπου σε κάποιο χώρο και της παραμονής ενός ατόμου στον χώρο αυτό για κάποιο χρονικό διάστημα. Είναι λοιπόν ξεκάθαρο πως ενώ η συγκέντρωση κάποιου ρύπου αποτελεί χαρακτηριστικό του περιβάλλοντος σε μια συγκεκριμένη περιοχή και χρονική στιγμή η έκθεση περιγράφει την αλληλεπίδραση του περιβάλλοντος και του ατόμου. Ωστόσο η εκτίμηση αυτής της αλληλεπίδρασης δεν είναι αρκετή για να καθοριστούν οι επιπτώσεις ενός ρύπου στην υγεία ενός ατόμου. Η έκθεση αναφέρεται στην συγκέντρωση του ρύπου στο σημείο που έρχεται σε επαφή με το σώμα αλλά η ποσότητα που πραγματικά εισέρχεται στο σώμα και είναι υπεύθυνη για οποιαδήποτε απόκριση του οργανισμού είναι η δόση. Η δόση είναι η ποσότητα του ρύπου που εισέρχεται στον οργανισμό και αποτίθεται στους ιστούς ως αποτέλεσμα της έκθεσης

ενός ατόμου σε αυτόν, της δραστηριότητας που εκτελεί και της ανατομικής του ιδιαιτερότητας (Sexton και Ryan, 1988). Αναλυτικά, η αλυσίδα των γεγονότων που οδηγεί στην απόκριση του οργανισμού στα σωματίδια δίνεται στο σχήμα της εικόνας 1.



**Εικόνα 1:** Οι επιπτώσεις της αέριας ρύπανσης στην υγεία ως αποτέλεσμα της αλυσίδας γεγονότων που ξεκινούν από την εκπομπή των ρύπων (Hertel κ.α., 2001).

Η δόση των σωματιδίων που εναποτίθεται και παραμένει στην αναπνευστική οδό εξαρτάται από τη συγκέντρωση και το χρόνο έκθεσης, την ανατομία της αναπνευστικής οδού και παραμέτρους που σχετίζονται με τον τρόπο αναπνοής και από τις φυσικοχημικές ιδιότητες των σωματιδίων (μέγεθος, υγροσκοπικότητα, διαλυτότητα, κλπ- όπως παρουσιάζονται με λεπτομέρεια στο κεφάλαιο 2).

Η δόση που φτάνει στον υπό εξέταση ιστό εξαρτάται αρχικά από την εναπόθεση σωματιδίων στην αναπνευστική οδό. Ως εναπόθεση σωματιδίων αναφέρεται η απομάκρυνσή τους από την αέρια φάση εξαιτίας της αεροδυναμικής, θερμοδυναμικής ή και ηλεκτροστατικής συμπεριφοράς τους. Τα σωματίδια αφού καθιζάνουν σε επιφάνειες της αναπνευστικής οδού υπόκεινται σε απορροφητικές ή μη διαδικασίες απομάκρυνσης με αποτέλεσμα την αφαίρεση τους από αυτές ή τη μεταφορά τους σε άλλα σημεία του αναπνευστικού συστήματος (translocation). Η απομάκρυνση/καθαρισμός των σωματιδίων εξαρτάται από την αρχική τοποθεσία εναπόθεσης και από τις φυσικοχημικές ιδιότητες τους. Η τελική ποσότητα σωματιδίων που επιβαρύνει το αναπνευστικό σύστημα καθορίζεται δυναμικά από τη σχέση των ρυθμών εναπόθεσης – απομάκρυνσης.

Ο ακριβής υπολογισμός της έκθεσης του ανθρώπου σε ατμοσφαιρικούς ρύπους και ο καθορισμός της δόσης που λαμβάνει μέσω της αναπνοής είναι αναγκαία για την εκτίμηση της επικινδυνότητας και των επιπτώσεων τους στην υγεία. Αποτελούν βάση στον σχεδιασμό και την υλοποίηση στρατηγικών ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και καθορισμού των επιτρεπτών ορίων εκπομπών και συγκεντρώσεων (Sexton και Ryan, 1988). Ιδιαίτερα σημαντική είναι η εκτίμηση της δόσης αναπνεύσιμων σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους καθώς οι άνθρωποι περνούν το μεγαλύτερο

διάστημα της ημέρας σε εσωτερικούς παρά εξωτερικούς χώρους. Ακόμα οι συγκεντρώσεις των ρύπων σε εσωτερικούς χώρους είναι συχνά υψηλότερες απ' ότι εξωτερικά (*Mage, 2001*). Ακόμα, οι επιδημιολογικές μελέτες που έχουν γίνει δεν παρουσιάζουν συνοχή για την εξαγωγή συμπερασμάτων και αφορούν κυρίως επιπτώσεις από άμεση έκθεση και σπάνια χρόνια με αποτέλεσμα να επικρατεί μεγάλη ασάφεια σχετικά με τις επιδράσεις των αιωρούμενων σωματιδίων (PM) στην υγεία. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην μπορούν να εξαχθούν με ασφάλεια όρια ποιότητας αέρα για την πρόληψη της τοξικής επίδρασης τους σε ανθρώπους.

Με στόχο την μελέτη των επιπτώσεων των σωματιδίων στον ανθρώπινο οργανισμό, τις τελευταίες δεκαετίες έχει αναπτυχθεί ένα μεγάλο πλήθος μοντέλων υπολογισμού της δόσης και συσσώρευσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα. Τα μοντέλα αυτά διακρίνονται σε στατιστικά, ημιεμπειρικά και μηχανιστικά ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού του ποσοστού εναπόθεσης σωματιδίων σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος. Το πιο γνωστό ημιεμπειρικό μοντέλο είναι το Μοντέλο του Ανθρώπινου Αναπνευστικού Συστήματος (HRTM) της διεθνούς υπηρεσίας για τη προστασία από τη ραδιενέργεια (ICRP) (*ICRP, 1994*). Στο μοντέλο αυτό η εναπόθεση σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος υπολογίζεται θεωρώντας το αναπνευστικό σύστημα ως μια ακολουθία φίλτρων σε σειρά όπως θα περιγραφεί στο κεφάλαιο 4. Στη βιβλιογραφία απαντάται κι ένα μεγάλο πλήθος θεωρητικών μοντέλων (*Chang κ.α., 1991; Robinson και Yu, 2001 για το τσιγάρο; Hashish κ.α., 1998; Asgharian, Hofmann και Bergmann, 2001; Darquenne, 2001; Venkataraman και Kao, 1999; Moskal και Gradon, 2002, Gradon και Prodgorski, 1999, Bergmann κ.α., 1997*) που προσομοιώνουν κάθε μηχανισμό εναπόθεσης σωματιδίων χωριστά και επιλύουν εξισώσεις ροής σε αγωγούς. Ωστόσο θεωρείται πως αυτά τα μοντέλα δεν είναι το ίδιο αξιόπιστα με το μοντέλο της ICRP και δεν λαμβάνουν υπόψη μηχανισμούς που θα έπρεπε να προσομοιώσουν χωριστά ενώ στο HRTM της ICRP εμπεριέχονται λόγω της στατιστικής του φύσης (*Oldham κ.α., 2000*).

Παράλληλα έχει αναπτυχθεί μεγάλος αριθμός μοντέλων καθαρισμού και συσσώρευσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα. Στα μοντέλα ο καθαρισμός σωματιδίων περιγράφεται με την μεταφορά και μετεγκατάσταση τους στις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος με την βλέννα που τις καλύπτει και την απορρόφηση τους στο αίμα. Τα περισσότερα αναφέρονται σε μη τοξικά σωματίδια και δεν περιλαμβάνουν

τον καθαρισμό της περιοχής των κυψελίδων (κεφάλαιο 3) των πνευμόνων από τα μακροφάγα κύτταρα (κεφάλαιο 5). Πολλά από τα μοντέλα αυτά αφορούν τη συμπεριφορά των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα τρωκτικών (*Tran κ.α., 1999 (1); Gradon κ.α., 1996; Tran κ.α., (2) 1999*) και σκύλων (*Stradling κ.α., 2000*), ενώ κάποια έχουν αναχθεί για την περίπτωση ανθρώπων (*Hofmann και Asgharian, 2003; Hsieh και Yu, 1998*). Ειδικά για τον άνθρωπο έχουν αναπτυχθεί λίγα σχετικά μοντέλα εξαιτίας της έλλειψης πειραματικών δεδομένων (*Sturm και Hofmann, 2003, Lee κ.α., 1979; Phalen κ.α., 1991; ICRP, 1994; Asgharian, Hofmann και Miller., 2001; Kuempel κ.α., 2001*).

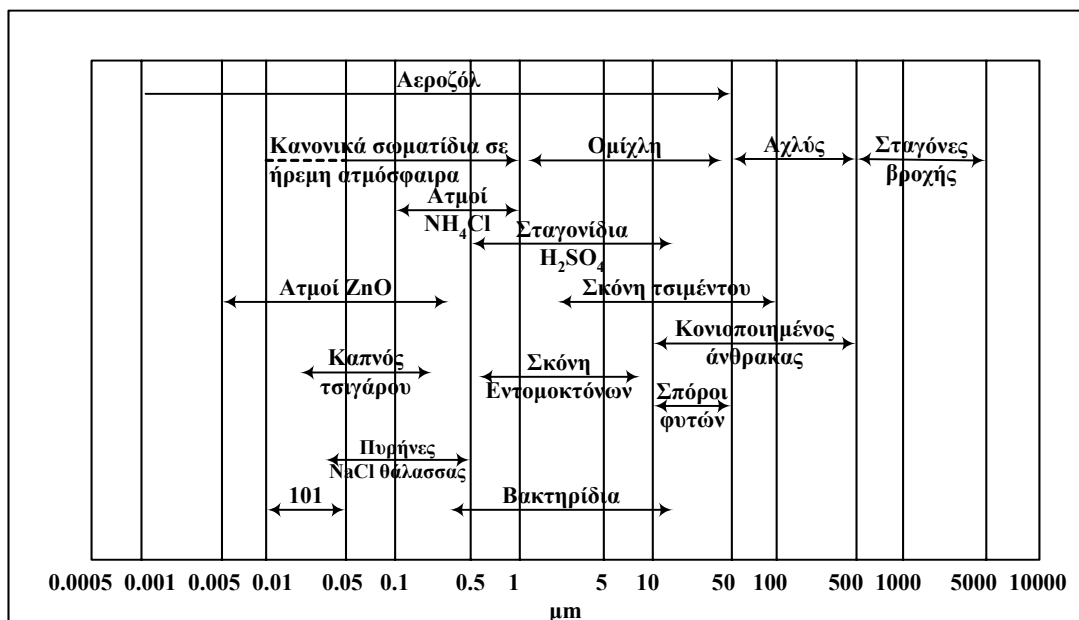
Στα πλαίσια της εργασίας, αναπτύχθηκε το μοντέλο καθορισμού της δόσης και συσσώρευσης σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα AEROEXPDOSE. Το μοντέλο AEROEXPDOSE είναι ημιεμπειρικό αφού χρησιμοποιεί τη θεωρία του μοντέλου HRTM της ICRP για τον υπολογισμό της εναπόθεσης και καθαρισμού των σωματιδίων. Με τη βοήθεια του μελετώνται οι παράγοντες που επηρεάζουν τους μηχανισμούς εναπόθεσης και καθαρισμού σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα. Το μοντέλο έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει άμεσα την δόση και τη συσσώρευση σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα, το γαστρεντερικό σύστημα και το αίμα για σταθερές αλλά και μεταβαλλόμενες συνθήκες έκθεσης του ατόμου σε αντίθεση άλλα μοντέλα. Ακόμα εφαρμόζεται για δύο περιπτώσεις έκθεσης στο Όσλο Νορβηγίας και τη Φοινοκαλιά Κρήτης σε θερινή περίοδο. Οι εφαρμογές πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας ρεαλιστικό σενάριο δραστηριότητας του ατόμου και πραγματικά δεδομένα έκθεσης. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δίνουν σημαντικά συμπεράσματα για την απλοποίηση της διαδικασίας υπολογισμού όλων των παραπάνω, όπως θα δούμε στα κεφάλαια που ακολουθούν.

## **2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΕΚΘΕΣΗ ΚΑΙ ΤΙΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ**

### **2.1. Γενικά**

Η σωματιδιακή 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 (Morawska κ.α. 1999; EPA, 2002; Κουϊμτζής κ.α., 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 2 δίνονται οι κατηγορίες των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα βάσει της προέλευσης και σύστασης τους αναφορικά προς το μέγεθος τους.



**Εικόνα 2:** Κατηγορίες αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας (Κουϊμτζή κ.α., 1998).

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.α., 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.α., 2002; EPA, 2002). Η

χημική σύσταση χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της πηγής από την οποία προέρχονται τα σωματίδια (Κουιμτζής, 1998).

Παρακάτω θα αναλυθούν τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά των σωματιδίων στο βαθμό που σχετίζονται με την εναπόθεση και μεταφορά τους στο αναπνευστικό σύστημα. Ακόμα τα σωματίδια θα διαχωριστούν ανάλογα με τη συμπεριφορά τους στο αναπνευστικό σύστημα και θα αναφερθούν συνοπτικά οι πιθανοί τρόποι με τους οποίους τα σωματίδια προσβάλλουν την ανθρώπινη υγεία.

## 2.2. Φυσικές ιδιότητες των σωματιδίων

Οι φυσικές ιδιότητες των σωματιδίων με την μεγαλύτερη επίδραση στην συμπεριφορά τους στο αναπνευστικό σύστημα είναι η μάζα και το πλήθος καθώς και οι κατανομές τους συναρτήσει του μεγέθους. Το μέγεθος ενός σωματιδίου εκφράζεται με την διάμετρο του, για την οποία υπάρχουν αρκετοί ορισμοί. Για σφαιρικό σωματίδιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί η φυσική διάμετρος του ενώ σωματίδια άλλων σχημάτων μπορούν να χαρακτηριστούν από την ισοδύναμη κατά όγκο διάμετρο ( $d_e$ ) που είναι η διάμετρος ενός σφαιρικού σωματιδίου που έχει τον ίδιο όγκο με αυτά. 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:

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

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 (Seinfeld και Pandis, 1998):

$$C(d_e) = 1 + (\lambda/d_e)\{2,514 + 0,8 \exp[-0,55(d_e/\lambda)]\} \quad (2)$$

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

Τα σωματίδια διαμέτρου μικρότερης των  $0,5 \mu\text{m}$  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:

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

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:

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

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.α., 2002*). Τα μικρά διακρίνονται σε σωματίδια διαμέτρου πυρήνα ή πολύ μικρά σωματίδια ( $<0,2 \mu\text{m}$ ) και σε συσσωματώματα ( $0,2-2,5 \mu\text{m}$ ) (εικόνα 3).

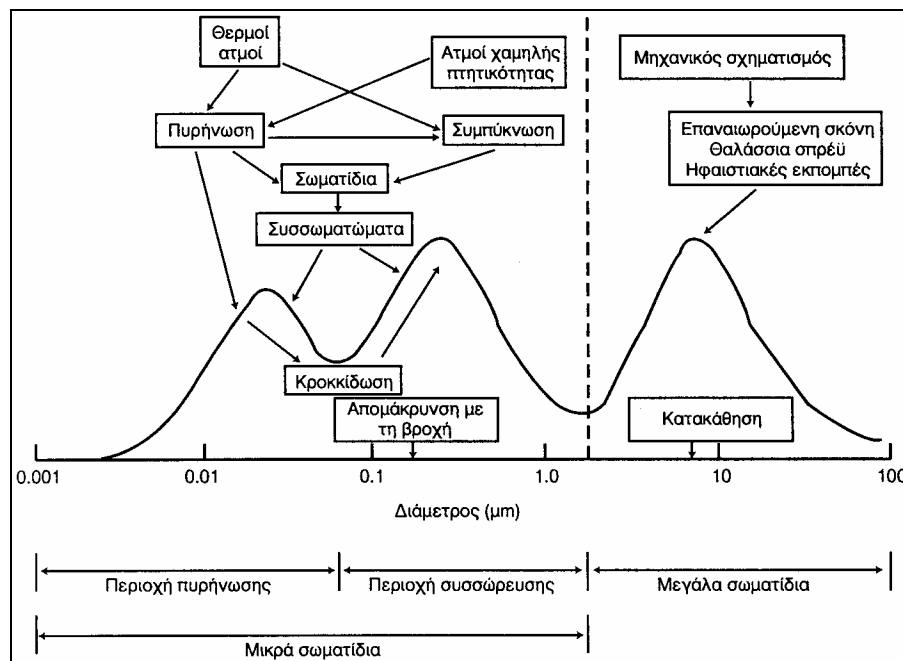
Η μάζα και το πλήθος των σωματιδίων εκφράζουν την συγκέντρωση τους στην ατμόσφαιρα και επομένως καθορίζουν την δόση τους στο αναπνευστικό. Τα περισσότερα αεροζόλ στη φύση και σε περιβάλλοντα εργασίας είναι πολυδιάσπορα δηλαδή τα σωματίδια που τα απαρτίζουν ποικίλουν σε διαστάσεις. Έτσι η μάζα και το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



κατανομές συναρτήσει του μεγέθους των σωματιδίων (εικόνα 3). Η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων πολυδιάσπορων αεροζόλ περιγράφεται μέσω συντελεστών που για την λογαριθμική κανονική κατανομή είναι η διάμεσος τιμή,  $\mu$ , των διαμέτρων και η γεωμετρική σταθερή απόκλιση  $\sigma_g$ . Η σχέση που εκφράζει τη λογαριθμική κανονική κατανομή των σωματιδίων δίνεται στην εξίσωση 5, όπου  $a$  είναι το ποσοστό των μικρών σωματιδίων.

$$f(d_{ae}) = \frac{a}{\sqrt{2\pi} \ln(\sigma_{g,F})} \exp\left(-\frac{(\ln d_{ae} - \ln \mu_F)^2}{2 \ln \sigma_{g,F}^2}\right) + \frac{1-a}{\sqrt{2\pi} \ln(\sigma_{g,C})} \exp\left(-\frac{(\ln d_{ae} - \ln \mu_C)^2}{2 \ln \sigma_{g,C}^2}\right) \quad (5)$$

Η διάμεσος τιμή των διαμέτρων μπορεί να αφορά τη μάζα ή το πλήθος τους (MMD-μάζα ή CMD-πλήθος) και ορίζεται ως η διάμετρος για την οποία το 50% της μάζας ή του πλήθους των σωματιδίων αποτελείται από σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη από αυτή και το υπόλοιπο 50% από σωματίδια μικρότερης διαμέτρου. Στα μοντέλα καθορισμού δόσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα χρησιμοποιείται κυρίως η μέση ισοδύναμη αεροδυναμική διάμετρος μάζας (MMAD).



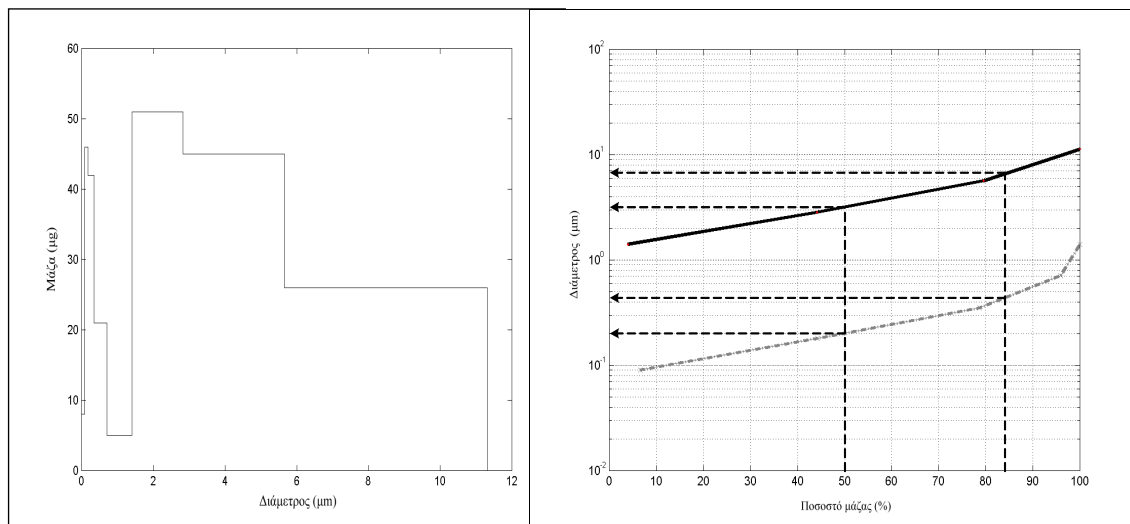
**Εικόνα 3:** Κατανομή της επιφάνειας των σωματιδίων συναρτήσει της διαμέτρου τους (Κουϊμτζή, 1998).

Η λογαριθμική κανονική κατανομή χρησιμοποιείται στην γραφική απόδοση της κατανομής μάζας των σωματιδίων στις μελέτες καθορισμού δόσης. Ωστόσο τα συνήθη όργανα μέτρησης των σωματιδίων για τον προσδιορισμό της κατανομής της μάζας

τους, συλλέγουν σωματίδια σε διακριτά μεγέθη ή περιοχές διαμέτρων (size bins), (McMurry, 2000). Η εξαγωγή των παραμέτρων της λογαριθμικής καμπύλης κατανομής πραγματοποιείται με την διαδικασία που περιγράφεται από τον Hinds (1999). Οι μετρήσεις του οργάνου συλλογής δίνουν μια καμπύλη που χωρίζεται σε διακριτά τμήματα (εικόνα 4α). Από την καμπύλη αυτή διαπιστώνεται εάν το αεροζόλ χαρακτηρίζεται από δύο ή μια περιοχές μεγέθους (μικρά και μεγάλα σωματίδια) και υπολογίζεται το ποσοστό της μάζας των σωματιδίων κάθε περιοχής. Στη συνέχεια κατασκευάζεται ένα διάγραμμα της διαμέτρου των σωματιδίων συναρτήσει του αθροιστικού ποσοστού μάζας (εικόνα 4β) από το οποίο προκύπτει εύκολα η μέση διάμετρος μάζας ( $d_{50\%}$ ) και η διάμετρος στην οποία αντιστοιχεί το 84% (αθροιστικό ποσοστό) της μάζας. Η τυπική απόκλιση υπολογίζεται από τη σχέση:

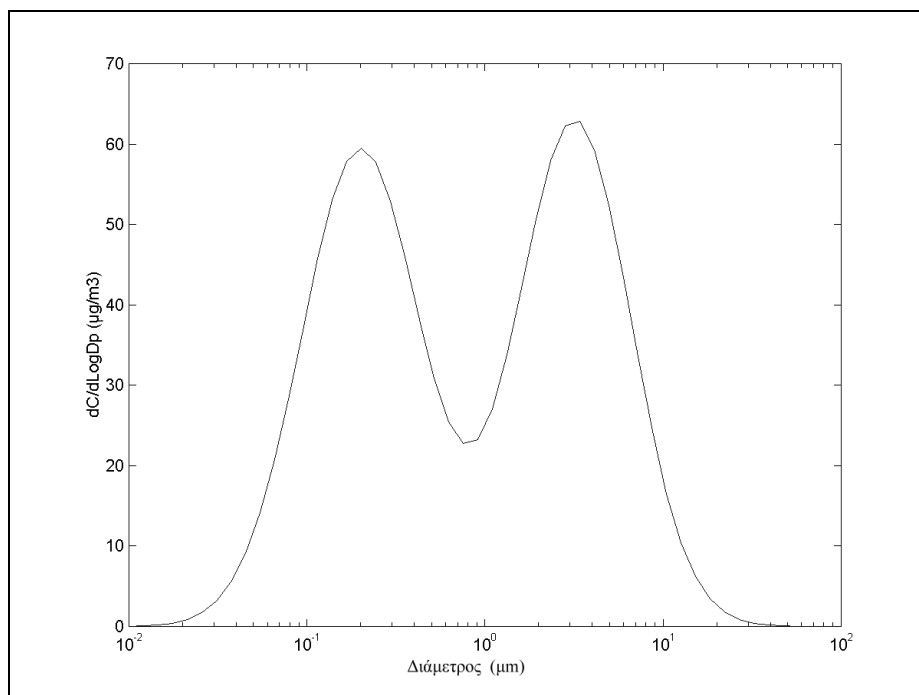
$$\sigma_g = \frac{d_{84\%}}{d_{50\%}} = \frac{d_{50\%}}{d_{16\%}} = \left( \frac{d_{84\%}}{d_{16\%}} \right)^{1/2} \quad (6)$$

Στα παρακάτω διαγράμματα δίνεται για παράδειγμα η κατανομή μάζας σωματιδίων συναρτήσει της ισοδύναμης αεροδυναμικής διαμέτρου τους με διάμεσο  $\mu$  ίση με 0,201  $\mu\text{m}$  για τα μικρά και 3,177  $\mu\text{m}$  για τα μεγάλα σωματίδια και σταθερή γεωμετρική απόκλιση  $\sigma_g$ , 2,165 και 2,073 αντίστοιχα.



**Εικόνα 4:** (α)Κατανομή μάζας σωματιδίων συναρτήσει της ισοδύναμης αεροδυναμικής διαμέτρου τους (β) Η διάμετρος των σωματιδίων συναρτήσει του αθροιστικού ποσοστού μάζας σε λογαριθμική κλίμακα ή διαφορετικά λογαριθμικό διάγραμμα της καμπύλης πιθανότητας για την κατανομή μάζας των σωματιδίων. Η γκρίζα καμπύλη αντιστοιχεί στα μικρά σωματίδια ενώ η πλήρης μαύρη γραμμή στα μεγάλα σωματίδια.

Η λογαριθμική καμπύλη κατανομής της μάζας των σωματιδίων προκύπτει με εφαρμογή της εξίσωσης 5 για διάφορες διαμέτρους και δίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 5. Παρόμοιες καμπύλες κατασκευάζονται συχνά και για το πλήθος των σωματιδίων. Ωστόσο τις περισσότερες φορές το πλήθος των μεγάλων σωματιδίων είναι τόσο μικρό σε σχέση με των μικρών που το κλάσμα τους δεν διακρίνεται εύκολα στα διαγράμματα. Έτσι το αεροζόλ θεωρείται εσφαλμένα πως αποτελείται μόνο από μικρά σωματίδια και στον καθορισμό δόσης δεν λαμβάνεται υπόψη μια πολύ μεγάλη ποσότητα μάζας (Schwela κ.α., 2002).



**Εικόνα 5:** Λογαριθμική κανονική κατανομή μάζας σωματιδίων συναρτήσει της ισοδύναμης αεροδυναμικής διαμέτρου τους.

Η επιφάνεια των σωματιδίων σχετίζεται κυρίως με ιδιότητες τους στην ατμόσφαιρα, όπως ο σκεδασμός του ηλιακού φωτός που προκαλεί μείωση της ορατότητας. Μπορεί να επηρεάσει το μέγεθος των σωματιδίων αφού η μεγάλη επιφάνεια ισοδυναμεί με ανάλογη διαθεσιμότητα για συμπύκνωση υδρατμών, χημικές αντιδράσεις ρόφησης συστατικών αλλά και εξάτμιση στον αέρα (Seinfeld και Pandis, 1998). Από τις παραπάνω διεργασίες σημαντικότερες για τη συμπεριφορά των σωματιδίων στο αναπνευστικό είναι η απορρόφηση υγρασίας και η εξάτμιση. Η ικανότητα απορρόφησης υγρασίας από τα σωματίδια είναι γνωστή ως υγροσκοπικότητα και είναι υπεύθυνη για την αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων καθώς κινούνται στο

αναπνευστικό σύστημα. Είναι χαρακτηριστική διεργασία για αεροζόλ που περιέχουν υγροσκοπικά γενικά σωματίδια όπως σωματίδια ανόργανων αλάτων (π.χ. θειικά) και/ή άφθονο οργανικό υλικό όπως ο καπνός του τσιγάρου και τα θαλάσσια αεροζόλ (NaCl) (Robinson και Yu, 2001; ICRP, 1994; Winter-Sorkina κ.α., 2002). Η μεταβολή αυτή λαμβάνει χώρα κυρίως στα πρώτα τμήματα του αναπνευστικού συστήματος όπου τα σωματίδια εισάγονται σε περιβάλλον με διαφορετική θερμοκρασία και υγρασία (μεγαλύτερη κατά 99%), (Winter-Sorkina κ.α., 2002) από την ατμόσφαιρα. Η αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων εξαρτάται από τον χρόνο παραμονής των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα (άρα από παραμέτρους ανατομίας και φυσιολογίας) και το μέγεθος τους μπορεί να γίνει αρκετές φορές πολλαπλάσιο του αρχικού μεγέθους. Για παράδειγμα η διάμετρος σωματιδίων NaCl αυξάνεται συναρτήσει του χρόνου παραμονής τους στο αναπνευστικό βάσει της εξίσωσης  $d_{ae}(t) = 6,288d_{ae}(0)^{1,347}$  όταν η αρχική τους διάμετρος δεν ξεπερνά τα 2μm ενώ για μεγαλύτερα μεγέθη ακολουθεί την εξίσωση  $d_{ae}(t) = d_{ae}(0) + 6,28t^{0,8} \log[1 + 4,13t^{-1}d_{ae}(0)^t] [1 - t^{-0,031} \exp[-t^{-0,3}d_{ae}(0)]]$ , όπου ο χρόνος μετράται σε δευτερόλεπτα (ICRP, 1994). Το αποτέλεσμα είναι η αυξημένη εναπόθεση σωματιδίων και ιδιαίτερα στα κεντρικά τμήματα του αναπνευστικού. Ωστόσο η υγροσκοπικότητα δεν λαμβάνεται συχνά υπόψη σε μοντέλα εκτίμησης της εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα εκτός από την περίπτωση μοντέλων για έκθεση σε καπνό τσιγάρου (Robinson και Yu, 2001).

Το σχήμα των σωματιδίων σχετίζεται με την αεροδυναμική τους διάμετρο και άρα επηρεάζει έμμεσα τόσο την εναπόθεση όσο και τον καθαρισμό τους από το αναπνευστικό (ICRP, 1994). Για παράδειγμα σωματίδια με σχήμα ίνας (π.χ. αμιάντος) έχουν χαμηλούς ρυθμούς απομάκρυνσης από το αναπνευστικό και έτσι προκαλούν σημαντικές επιπτώσεις στον οργανισμό. Επίσης το ηλεκτρικό φορτίο των σωματιδίων επιδρά στον τρόπο καθίζησης τους, όπως θα μελετηθεί παρακάτω στους μηχανισμούς εναπόθεσης, και τέλος η διαλυτότητα στα υγρά της αναπνευστικής οδού καθορίζει την ταχύτητα απομάκρυνσης των σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα (EPA, 2002).

### 2.3. Χημικές ιδιότητες των σωματιδίων

Οι χημικές ιδιότητες των σωματιδίων που σχετίζονται με τη δόση και απόκριση του οργανισμού είναι η σύσταση και η μορφή (π.χ. ιόντική) τους συναρτήσει του μεγέθους, οι οποίες εξαρτώνται από την προέλευση τους (EPA, 2002; Schwella κ.α., 2000). Αναλυτικότερα, τα μικρά σωματίδια πηγάζουν κυρίως από διεργασίες καύσης, πυρηνοποίηση και συμπύκνωση αερίων (EPA, 2002). Αποτελούνται από ενώσεις S, N, H, ιόντα αμμωνίου, στοιχειακό και οργανικό άνθρακα, ιχνοστοιχεία μετάλλων και νερό. Τα δευτερογενή ανόργανα ιόντα προέρχονται κυρίως από την οξείδωση των SO<sub>2</sub> και NO<sub>x</sub> και η μεγαλύτερη πηγή τους είναι οι εκπομπές SO<sub>2</sub> από τη χρήση ορυκτών καυσίμων που μετατρέπεται σε H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub> και (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> όταν υπάρχει αρκετή αμμωνία στην ατμόσφαιρα (EPA, 2002; Seinfeld και Pandis, 1998).

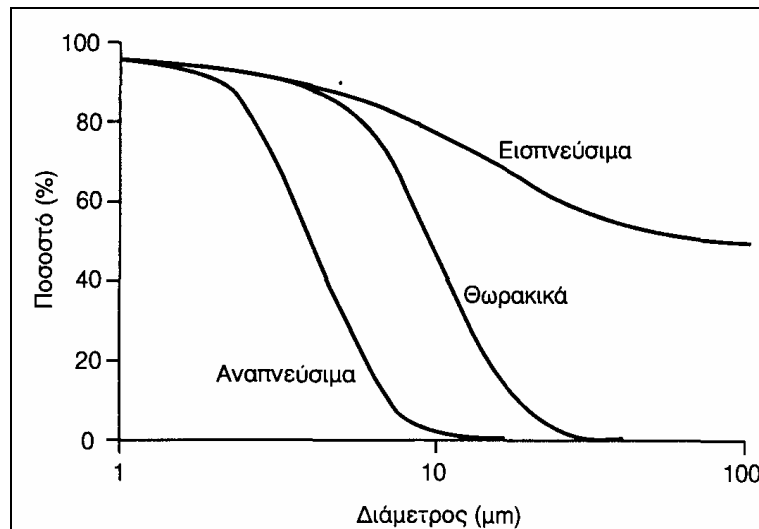
Ο διαχωρισμός μεταξύ οργανικού (OC) και στοιχειακού (EC) άνθρακα στα σωματίδια δεν είναι ιδιαίτερα σαφής (Schwella κ.α., 2000). Ωστόσο το κλάσμα στοιχειακού άνθρακα στα σωματίδια ορίζεται ως το ποσοστό του άνθρακα που μετατρέπεται σε CO<sub>2</sub> και διαφεύγει κατά την αναλυτική διαδικασία προσδιορισμού ή από τις οπτικές του ιδιότητες όταν χρησιμοποιούνται οπτικά όργανα μέτρησης (McMurry, 2000). Ο καθορισμός του είναι σημαντικός αφού αποτελεί δείκτη για τα πρωτογενή αεροζόλ που προέρχονται από καύσεις. Ο οργανικός άνθρακας στα αεροζόλ αποτελείται από προϊόντα καύσης και βιολογική ύλη (ιοί, βακτηρίδια, κύτταρα φυτών και ζώων) (EPA, 2002). Ένα κλάσμα οργανικού άνθρακα παράγεται δευτερογενώς με αντιδράσεις αρωματικών ενώσεων και υδρογονανθράκων με O<sub>3</sub> ή OH στην ατμόσφαιρα αλλά και μέσω οξείδωσης πτητικών οργανικών ενώσεων (VOC) που προέρχονται από φυσικές πηγές (π.χ. μονοτερπένιο) (EPA, 2002; Schwella κ.α., 2000). Οργανικός άνθρακας περιέχεται και στα μεγάλα σωματίδια ως σκόνη βιολογικής προέλευσης όπως βακτηρίδια, γύρη, σπόρια και τμήματα φυτών καθώς και ως στοιχειακός άνθρακας (τέφρα) από καύση γαιάνθρακα και πετρελαίου (EPA, 2002).

Τα σωματίδια περιέχουν ακόμα αρκετή ποσότητα νερού (υγροσκοπικότητα) και ένα μεγάλο αριθμό χημικών στοιχείων. Όταν τα χημικά στοιχεία πηγάζουν από καύσεις και βιομηχανικές διεργασίες εντοπίζονται στο κλάσμα των μικρών σωματιδίων σε χαμηλές συνήθως συγκεντρώσεις (EPA, 2002; Schwella κ.α., 2000). Συγκεκριμένα κατά την κίνηση οχημάτων εκπέμπονται Br, Pb, Ba, Mn, Cl, Zn, V, Ni, Se και As από την χρήση

καυσίμων, Fe και Al από την τριβή των μηχανικών εξαρτημάτων και Zn από την τριβή των ελαστικών. Ακόμα από τα οχήματα εκπέμπονται σπάνιες γαίες όπως Rh, Pd, Ir και Ru από τη χρήση καταλυτών ενώ από διάφορες βιομηχανικές διεργασίες (π.χ. καύση πετρελαίου και γαιάνθρακα για παραγωγή ενέργειας, μονάδες διυλιστηρίων και μεταλλουργικών βιομηχανιών) προέρχονται τα στοιχεία V, Ni, Se, As, Cr, Co, Cu, Al, S, P, Ga, Zn, Pb, Mn. Μεγάλη ποσότητα χημικών στοιχείων βρίσκεται σε μεγάλα σωματίδια που προέρχονται από αιώρηση εδαφικού υλικού που συμβαίνει είτε μηχανικά από εξόρυξη και άλεση ορυκτών (Mg, Al, K, Se, Fe και Mn) και κίνηση οχημάτων (EC, Al, Si, K, Ca, Ti, Fe, Zn) είτε φυσικά με την επίδραση του ανέμου στην ξηρά (Si, V, Cr, Ca, Ti, Sr) (*Schwella κ.α., 2000*). Τέλος σωματίδια παράγονται και με την επίδραση του ανέμου στην επιφάνεια της θάλασσας (θαλάσσια αεροζόλ - Na, Cl, S, K) και το μέγεθος τους εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου (*Smith κ.α., 1993*). Έτσι γνωρίζοντας τις πηγές σωματιδίων σε μια περιοχή μπορεί να εκτιμηθεί ποιοτικά η κατανομή μεγέθους και η χημική τους σύσταση (*Morawska κ.α., 1999*).

#### **2.4. Ταξινόμηση αιωρούμενων σωματιδίων σχετικά με την συμπεριφορά τους στο αναπνευστικό σύστημα**

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 αντιστοίχιση τους σε διαμέτρους σωματιδίων, όπως υιοθετήθηκε από τον διεθνή οργανισμό πιστοποίησης ISO (*EPA, 2002*), δίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 6. Η αντίστοιχη καμπύλη για τα PM<sub>10</sub> συμπίπτει σχεδόν με αυτή των θωρακικών ενώ για τα PM<sub>2,5</sub> βρίσκεται πιο αριστερά στο διάγραμμα από αυτή των αναπνεύσιμων (*EPA, 2002*).

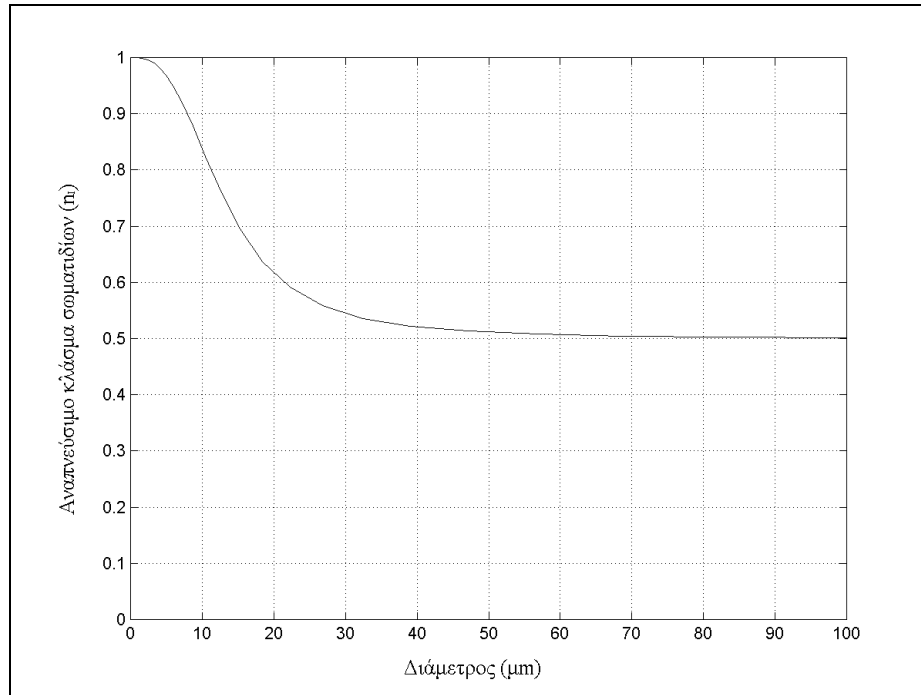


**Εικόνα 6:** Ταξινόμηση των αιωρούμενων σωματιδίων σε εispνεύσιμα, θωρακικά και αναπνεύσιμα βάσει της διαμέτρου τους. Το ποσοστό αφορά την διείσδυση σε κάθε περιοχή (Κουϊμτζή κ.α., 1998).

Σύμφωνα με τα παραπάνω ορίζεται ως «εispνευσιμότητα» 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, όπως θα δοθεί αργότερα στο κεφάλαιο 4. Η εispνευσιμότητα,  $n_I$ , έχει βρεθεί πως εξαρτάται πέρα από το μέγεθος των σωματιδίων και από την ταχύτητα του ανέμου ( $U$ ) και μπορεί να εκτιμηθεί με την εξίσωση 7 για σωματίδια έως 100μm και ταχύτητες ανέμου μεταξύ 1 και 9 m/s (Vincent και Mark, 1982):

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

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.α. 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.α., 1999). Εντούτοις η εξίσωση 7 χρησιμοποιείται και για έκθεση σε μηδενική ταχύτητα ανέμου για λόγους τυποποίησης (ICRP, 1994). Η «εispνευσιμότητα» σε αέρα μηδενικής ταχύτητας δίνεται συναρτήσει της διαμέτρου των σωματιδίων στο διάγραμμα της εικόνας 7. Τα PM<sub>10</sub> εισέρχονται σε μεγάλο ποσοστό στο αναπνευστικό σύστημα ενώ μεγαλύτερα σωματίδια φιλτράρονται σε ποσοστό έως και 50%.



**Εικόνα 7:** Εισπνεύσιμο κλάσμα (εισπνευσσιμότητα) σωματιδίων σε μηδενική ταχύτητα ανέμου συναρτήσει της διαμέτρου τους.

Ακόμα έχει βρεθεί πως η εισπνευσσιμότητα εξαρτάται από τον τρόπο αναπνοής, δηλαδή από την αναπνοή μέσω μύτης ή στόματος (*Hinds, 1999; Kennedy και Hinds, 2002*) και από την διεύθυνση του στόματος του ατόμου σε σχέση με αυτή του ανέμου (*Kennedy και Hinds, 2002*).

## 2.5. Επιπτώσεις των σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα

Τα σωματίδια προκαλούν άμεσες και χρόνιες επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό (*Schwella κ.α., 2000*). Σύμφωνα με επιδημιολογικές μελέτες τα σωματίδια σχετίζονται με αυξημένη νοσηρότητα και θνησιμότητα (π.χ. *Pope κ.α., 1999, Schwartz κ.α., 1999*). Συγκεκριμένα προκαλούν άμεσες επιπτώσεις στο αναπνευστικό σύστημα όπως βρογχίτιδα και πνευμονία, καρδιακά προβλήματα και επιδείνωση χρόνιων αποφρακτικών νόσων του αναπνευστικού (COPD) (*EPA, 2002; Schwella κ.α., 2000*). Τα συμπεράσματα αυτά προέρχονται από ανάλυση παρατηρήσεων σχετικών με εισαγωγές σε νοσοκομεία περιοχών σε περιόδους επεισοδίων ρύπανσης ενώ η εξακρίβωση των μηχανισμών επίδρασης γίνεται με τοξικολογικές μελέτες.



Οι μελέτες τοξικότητας πραγματοποιούνται εισάγοντας στο αναπνευστικό σύστημα ζώων (αναπνοή ή απευθείας είσοδο στην τραχεία) σωματίδια συγκεκριμένης κατανομής και σύστασης (EPA, 2002). Αφορούν συνήθως μόνο μια περιοχή μεγέθους σωματιδίων που παρέχεται σε πολύ μεγαλύτερες συγκεντρώσεις από τις πραγματικές στην ατμόσφαιρα στοχεύοντας στον εντοπισμό των άμεσων επιπτώσεων τους στην υγεία και στην παρατήρηση των μηχανισμών που τις προκαλούν (Schlesinger, 1988). Επομένως δεν είναι δυνατό να εξαχθούν συμπεράσματα που να αφορούν την τοξικότητα των σωματιδίων σε ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις για τον ανθρώπινο οργανισμό και να βρεθεί μια σχέση δόσης - απόκρισης. Υπάρχουν ωστόσο ενδείξεις πως η τοξικότητα σχετίζεται με την περιεκτικότητα των σωματιδίων σε διαλυτά συστατικά, ραδιενεργά μέταλλα και πιθανόν σε οργανικές ενώσεις (π.χ. PAHs). Ακόμα το μέγεθος επιδρά στο βαθμό που μεταβάλλει τη διεισδυτική τους ικανότητα στους πνεύμονες και τον χρόνο παραμονής τους σε μια περιοχή των πνευμόνων (Rombout κ.α., 2000; Gehr κ.α., 2000). Έτσι στις μελέτες τοξικότητας τα αεροζόλ διακρίνονται σε σωματίδια οξέων, μετάλλων, βιοαεροζόλ που είναι πολύ μικρών διαστάσεων και σε άλλα PM (σκόνη, τέφρα κ.α.). Για παράδειγμα, τα σωματίδια οξέων σε μικρές συγκεντρώσεις επηρεάζουν τον μηχανισμό απομάκρυνσης στη βλέννα ενώ τα πολύ μικρά προκαλούν βήχα, δύσπνοια, πνευμονικό οίδημα και φλεγμονές (EPA, 2002).

Από τις επιδημιολογικές κυρίως μελέτες και ελάχιστα πειράματα *in vivo* σε ζώα και *in vitro* σε κύτταρα ανθρώπων και ζώων έχουν εντοπιστεί κάποιοι πιθανοί μηχανισμοί με τους οποίους τα σωματίδια προκαλούν τοξικές αντιδράσεις στον οργανισμό. Ένας τρόπος είναι η εξασθένηση των φυσικών λειτουργιών του ατόμου με αποτέλεσμα δυσλειτουργίες στο νευρικό σύστημα, στην δεξιά κοιλία της καρδιάς και την κυκλοφορία του αίματος στους πνεύμονες. Ακόμα έχει βρεθεί πως προκαλούν oxidative stress, οίδημα, φλεγμονές στους πνεύμονες, ανοσοτοξικότητα, αύξηση της πυκνότητας του πλάσματος και θρόμβωση του αίματος καθώς και hypoxic stress λόγω της μικρής διάχυσης των αερίων (Rombout κ.α., 2000; Donaldson κ.α., 2000). Αν και δεν έχει βρεθεί ακριβώς ο τρόπος με τον οποίο προκαλούνται αυτές οι δυσλειτουργίες του οργανισμού θεωρείται πως σημαντικό ρόλο έχουν τα κύτταρα του επιθηλίου και οι μακροφάγοι. Τα κύτταρα αυτά ενεργοποιούνται κατά την επαφή τους με σωματίδια και πιθανόν απελευθερώνουν ουσίες (προ-πηκτικά και προ-φλεγμονικά μέσα, οξειδωτικές ουσίες) που επηρεάζουν τα άλλα κύτταρα (Salvi και Holgate, 1999). Για παράδειγμα τα μακροφάγα κύτταρα για να προστατεύσουν τον οργανισμό έχει βρεθεί πως παράγουν

διάφορες ελεύθερες ρίζες, πρωτεΐνες και ένζυμα που ενεργοποιούν τους μηχανισμούς ανάπλασης των φλεγμονωδών ιστών (Gehr κ.α., 2000). Με τον ίδιο τρόπο αντιδρά και το επιθήλιο ελευθερώνοντας ουσίες που προκαλούν χημειόταξη. Οι ίδιοι αυτοί μηχανισμοί άμυνας του οργανισμού εξαιτίας της διαρκής δράσης τους μπορεί να προκαλέσουν δομικές αλλαγές στους ιστούς του αναπνευστικού συστήματος, ίνωμα και νεοπλάσματα (Bree και Cassee, 2000).

### 3. ΤΟ ΑΝΑΠΝΕΥΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

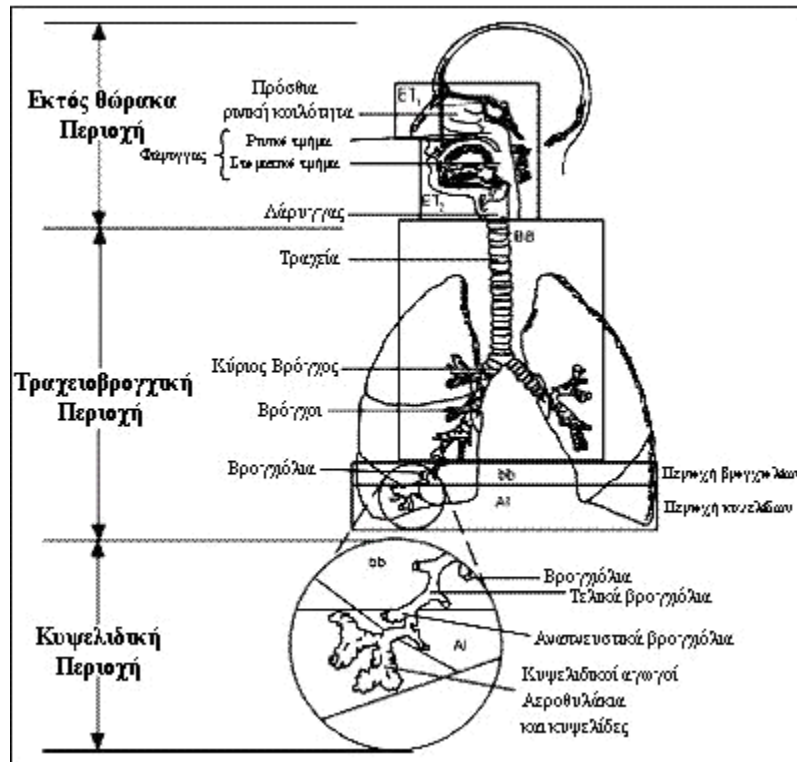
#### 3.1. Ανατομία του αναπνευστικού συστήματος

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 8), (EPA, 2002; ICRP, 1994; Schlesinger, 1988):

*Ανώτερο αναπνευστικό ή εκτός θώρακα περιοχή (ET):* αποτελείται από την πρόσθια ρινική κοιλότητα (ET<sub>1</sub>), την ύστερη ρινική κοιλότητα, τον λάρυγγα, τον φάρυγγα και το στόμα (ET<sub>2</sub>).

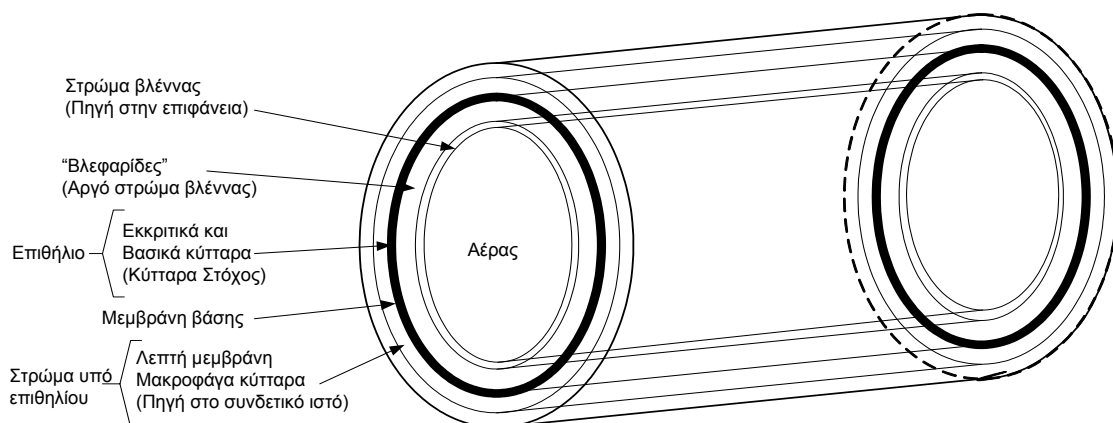
*Τραχειοβρογχική περιοχή (TB):* περιλαμβάνει την τραχεία και τους πρωτεύοντες βρόγχους (BB), τους δευτερεύοντες βρόγχους που ακολουθούν (διακλαδώσεις) και τους τελικούς βρόγχους (bb).

*Κυψελιδική περιοχή (Al):* αποτελείται από τους αναπνευστικούς βρόγχους, τις πνευμονικές κυψελίδες (κυψελιδικοί αεραγωγοί και αεροθυλάκια) και τον συνδετικό ιστό.



Εικόνα 8: Ανατομία του αναπνευστικού συστήματος (ICRP, 1994).

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 9 (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.



**Εικόνα 9:** Απλό γεωμετρικό μοντέλο των πηγών και των στόχων που σχετίζονται με την δόση στους επιθηλιακούς ιστούς της βρογχικής και εκτός θώρακα περιοχής (ICRP, 1994).

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 κυνελίδες αριθμείται με αύξοντα αριθμό (Weibel, 1963). Οι πρόγονοι κλάδοι διχοτομούνται σε παρακλάδια βάσει της εξίσωσης  $N_z = 2^z$  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 σύνθητες 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.

Εξαιτίας της πολυπλοκότητας του τρόπου διαίρεσης της αναπνευστικής οδού, η δομή των πνευμόνων περιγράφεται από μοντέλα που συχνά αποτελούν την περιγραφή ιδεατών περιπτώσεων. Τα περισσότερα προκύπτουν από πειραματικές μετρήσεις σε

καλούπια/πρότυπα που έχουν κατασκευαστεί από πραγματικούς πνεύμονες ή σε μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε ένα μόνο πνεύμονα. Το συμμετρικό μοντέλο A του Weibel χρησιμοποιείται πολύ συχνά στην περιγραφή της δομής του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος (Fung, 1990). Στο μοντέλο του Weibel θεωρείται πως το αναπνευστικό σύστημα αποτελείται από 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 (πίνακας 1). 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.α., 1997)

Ακόμα, οι διαστάσεις των αεραγωγών του αναπνευστικού συστήματος μεταβάλλονται με την ηλικία, το φύλλο, τη φυλή και την ολική μάζα του σώματος. Για παράδειγμα η διάμετρος των αεραγωγών ποικίλλει μεταξύ Καυκάσιου άντρα και γυναίκας της ίδιας ηλικίας, με τον άντρα να έχει κατά κανόνα τραχεία και βρόγχους μεγαλύτερης διαμέτρου. Ακόμα για ένα μωρό 3 μηνών έχει βρεθεί πως αν και το δέντρο αεραγωγών έχει σχηματιστεί πλήρως, διαθέτει μόνο το 40% των κυψελίδων ενώ σε ηλικία 1 έτους το ποσοστό έχει φθάσει το 80% αλλά οι κυψελίδες κατανέμονται ομοιόμορφα σε όλα τα αναπνευστικά βρογχιόλια σε αντίθεση απ' ότι σε έναν ενήλικα (ICRP, 1994). Τέλος η κυτταρική σύσταση των αεραγωγών θεωρείται ανεξάρτητη από τα παραπάνω αλλά μεταβάλλεται για άτομα που πάσχουν από χρόνιες πνευμονικές αποφρακτικές νόσους ή καπνίζουν (αύξηση μακροφάγων κυττάρων στο στρώμα υπό του επιθηλίου)

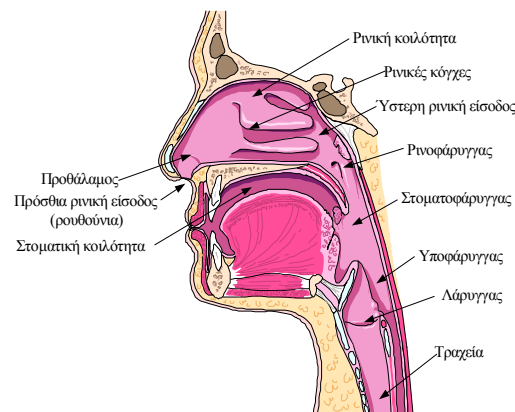
Στις παρακάτω παραγράφους περιγράφεται η λειτουργικότητα κάθε περιοχής του αναπνευστικού συστήματος και αναλύεται η κυτταρολογική τους σύσταση.

**Πίνακας 1:** Διαστάσεις του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος σύμφωνα με το μοντέλο Weibel A, για πνεύμονες ενηλίκων με όγκο 4800 mL και περίπου  $\frac{3}{4}$  διάταση λόγω της αναπνοής (*Fung, 1990; ICRP, 1994*).

	Γενιά z	Πλήθος ανά γενιά n(z)	Διάμετρος d(z) (cm)	Μήκος l(z) (cm)	Ολική επιφάνεια S(z) (cm2)	Ολικός όγκος V(z) (cm3)	Συνολικός όγκος (cm3)	Σε παροχή 1 l/sec		
								Ταχύτητα (cm/sec)	Αριθμός Reynolds	Χρόνος Παραμονής (ms)
BB	Τραχεία	0	1,8	12	2,54	30,5	30,5	393	4.350	30
	Κύριος Βρόγχος	1	1,22	4,76	2,33	11,25	41,8	427	3.210	11
	Λοβόειες Βρόγχι	2	0,83	1,9	2,13	3,97	45,8	462	2.390	4,1
		3	0,56	0,76	2	1,52	47,2	507	1.720	
	Τμηματικός βρόγχος	4	0,45	1,27	2,48	3,46	50,7	392	1.110	3,2
	Βρόγχοι με χόνδρους στα τοιχώματα	5	0,35	1,07	3,11	3,3	54	325	690	4,4
		6	0,28	0,9	3,96	3,53	57,5	254	434	
		7	0,23	0,76	5,1	3,85	61,4	188	277	
		8	0,186	0,64	6,95	4,45	65,8	144	164	
		9	0,154	0,54	9,65	5,17	71	105	99	
		10	0,13	0,46	13,4	6,31	77,2	73,6	60	
bb	Τελικοί βρόγχοι	11	0,109	0,39	19,6	7,56	84,8	52,3	34	7,4
	Βρογχόλια με μυς στα τοιχώματα	12	0,095	0,33	28,8	9,82	94,6	34,4	20	16
		13	0,082	0,27	44,5	12,45	106	23,1	11	
		14	0,074	0,23	69,4	16,4	123,4	14,1	6,5	
		15	0,066	0,2	113	21,7	145,1	8,92	3,6	
	Τελικά βρογχόλια	16	0,06	0,165	180	29,7	174,8	5,40	2,0	60
		17	0,054	0,141	300	41,8	216,6	3,33	1,1	
	Αναπνευστικά βρογχόλια	18	0,05	0,117	534	61,1	277,7	1,94	0,57	210
		19	0,047	0,099	944	93,2	370,9	1,10	0,31	
		20	0,045	0,083	1.600	139,5	510,4	0,60	0,17	
AI	Κυψελδοίκοι αεραγωγοί	21	0,043	0,07	3.220	224,3	734,7	0,32	0,08	550
		22	0,041	0,059	5.880	350	1.084,7	0,18	0,04	
	Αεροθλάκια	23	0,041	0,05	11.800	591	1675	0,09	-	550
	Κυψελίδες, 21 ανά αεραγωγό		0,028	0,023		3.200	4.800			

### 3.1.1.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 διασπορά<sup>1</sup> 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 (εικόνα 10) 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<sup>2</sup>. Το στρώμα αυτό μετακινεί τη βλέννα και το πάχος του μπορεί να φτάσει τα 15μm στην περιοχή ET<sub>2</sub>. 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 10:** Το ανώτερο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα (*Schlesinger, 1988*).

Μετά τον προθάλαμο η ροή του αέρα μεταβάλλεται απότομα καθώς κινείται οριζόντια στη ρινική κοιλότητα και μέσα από το διάφραγμα. Στη συνέχεια εξέρχεται

<sup>1</sup> Οι μηχανισμοί εναπόθεσης των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα θα αναλυθούν στο κεφάλαιο 5, ωστόσο θα αναφέρονται χωριστά στην ανάλυση κάθε περιοχής.

<sup>2</sup> Ινώδης προεκτάσεις των κυττάρων που χρησιμοποιούνται στην προώθηση του υποστρώματος κατά μήκος της κυτταρικής επιφάνειας (*Αιβαζίδης, 1999*)

από την ύστερη ρινική είσοδο και ρέει κάθετα στον φάρυγγα, τον λάρυγγα και την τραχεία. Οι μεταβολές αυτές στη ροή αυξάνουν την εναπόθεση σωματιδίων λόγω πρόσκρουσης στα τοιχώματα. Στο λάρυγγα βρίσκονται και οι φωνητικές χορδές που επιτρέπουν την δίοδο του αέρα στην τραχεία μέσω λεπτής σχισμής. Έτσι η ταχύτητα του αέρα αυξάνεται σημαντικά και μεγάλο ποσοστό των σωματιδίων αποθέτεται στην περιοχή αυτή.

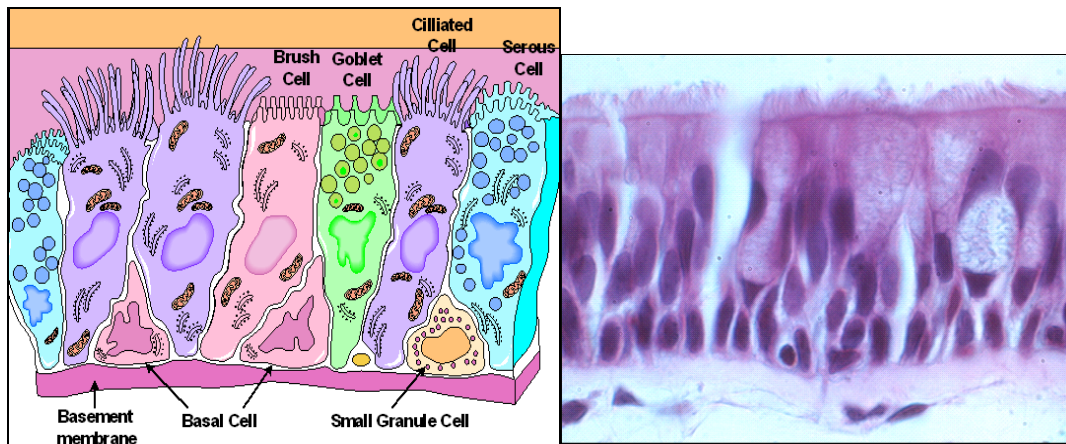
Εναλλακτικά, αν το άτομο αναπνέει από το στόμα μέρος της απόθεσης πραγματοποιείται εκεί. Οι περιοχές ET<sub>1</sub> και ET<sub>2</sub> διαφέρουν όσο αφορά τον ιστό στο επιθήλιο που για την πρώτη περιέχει κερατίνη ενώ για την δεύτερη βλεφαρίδες (ICRP, 1994). Ακόμα η εναπόθεση στο στόμα είναι μικρότερη απ' ό τι στη μύτη και είναι χαρακτηριστικό ότι οι διαστάσεις του στόματος ποικίλλουν σημαντικά μεταξύ ατόμων (Schlesinger, 1988).

### 3.1.2. 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 διασποράς.

Το δέντρο αεραγωγών της τραχειοβρογχικής περιοχής ξεκινά από την τραχεία. Η τραχεία διατηρείται μόνιμα ανοιχτή από χόνδρους και τα τοιχώματα της καλύπτονται από αναπνευστική βλέννα και αρκετούς αδένες. Το στρώμα βλέννας (~5μm) στην επιφάνεια του επιθηλίου (εικόνα 11) 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 11:** 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.

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%).

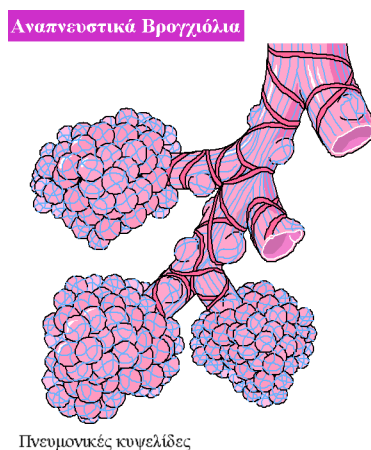
Τα βρογχιόλια που ακολουθούν δεν διαθέτουν χόνδρους και αδένες. Τα τοιχώματά τους έχουν ένα στρώμα από αναπνευστικό επιθήλιο που αποτελείται από κύτταρα κυβοειδή και κιονοειδή με βλεφαρίδες ή χωρίς (εκκριτικά κύτταρα και κύτταρα Clara – ευαίσθητος ιστός) ενώ σπάνια συναντώνται βασικά κύτταρα. Ο συνδετικός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

Η μεγαλύτερη διαφοροποίηση στο αναπνευστικό σύστημα μεταξύ ανθρώπου και άλλων θηλαστικών (σκύλος, πίθηκος, λαγός, ινδικό-χοιρίδιο, αρουραίος, χάμστερ και ποντίκι) αφορά τον τρόπο διαίρεσης των πρόγονων κλάδων σε διακλαδώσεις. Αυτό παρατηρείται κυρίως στο ανώτερο τμήμα της τραχειοβρογχικής περιοχής και ως τη γενιά 6 ενώ οι διαιρέσεις που ακολουθούν παρουσιάζουν μεγαλύτερη συμμετρία. Μια ακόμα διαφορά αφορά το πλήθος των διαιρέσεων από την τραχεία ως τα τελικά βρογχιόλια με αποτέλεσμα διαφορετικό μήκος διαδρομής για τα σωματίδια άρα και

διαφορές στην εναπόθεση και απομάκρυνση τους. Αυτή η διαφοροποίηση παρατηρείται ακόμα και μεταξύ ατόμων του ίδιου είδους. Για παράδειγμα στους ανθρώπους μεταξύ τραχείας και τελικών βρογχιολίων απαντώνται 16 γενιές σύμφωνα με το συμμετρικό μοντέλο του Weibel ή 14-17 βάσει του ασύμμετρου μοντέλου του Schum, ενώ στους αρουραίους 15-21 σύμφωνα ξανά με μοντέλο του Schum. Το μικρότερο εύρος τιμών στην περίπτωση των ανθρώπων οφείλεται στη μεγαλύτερη συμμετρία των πνευμόνων. Τέλος στην συγκεκριμένη περιοχή των πνευμόνων παρατηρείται διαφοροποίηση όσο αφορά και την κυτταρική σύσταση των τοιχωμάτων των αεραγωγών και ιδιαίτερα όσο αφορά τα εκκριτικά κύτταρα (*ICRP, 1994*).

### 3.1.3.Περιοχή κυψελίδων

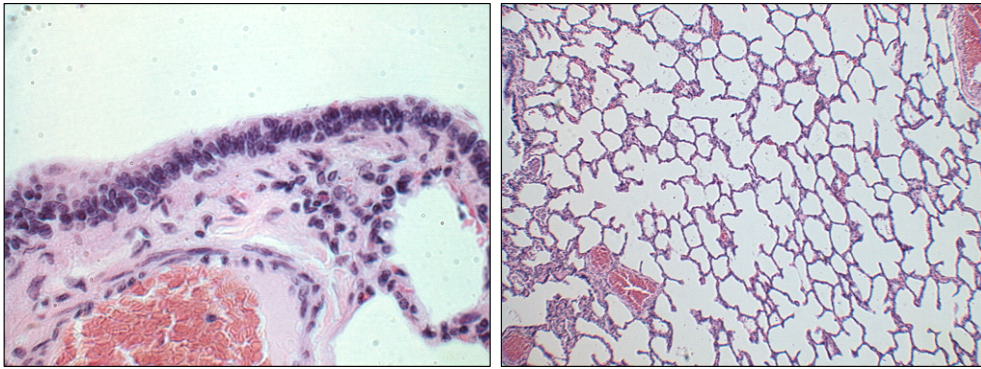
Η κυψελιδική περιοχή αποτελείται από τα αναπνευστικά βρογχιόλια (γενιές 16 – 18), τα αεροθυλάκια, τους κυψελιδικούς αεραγωγούς και τις κυψελίδες (εικόνα 12). Στόχος της περιοχής είναι η αναπνοή, αλλά και λειτουργίες που σχετίζονται με τους ενδοκρινείς αδένες και την άμυνα του οργανισμού. Τα σωματίδια που φθάνουν σε αυτή την περιοχή έχουν μικρό μέγεθος και αποθέτονται λόγω καθίζησης και διασποράς (*Fung, 1990*).



**Εικόνα 12:** Σχέδιο της κυψελιδικής (φατνιακής) περιοχής των πνευμόνων όπου 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 (λεπτές γραμμές πάνω στις κυψελίδες) (*ICRP, 1994*).

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 13). Τα τοιχώματα της περιοχής αποτελούνται από δύο τύπους κυττάρων επιθηλίου και εκκριτικά κύτταρα που παράγουν την αναπνευστική βλέννα.



**Εικόνα 13:** Η κυψελιδική (φατνιακή) περιοχή των πνευμόνων, (α) κυψελίδες κοντά σε αρτηρία και (β) εγκάρσια τομή της κυψελιδικής περιοχής των πνευμόνων όπου φαίνονται τα αεροθυλάκια, οι κυψελίδες και οι αρτηρίες.

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). Οι κυψελίδες υποστηρίζονται από ένα δίκτυο συνδετικού ιστού (ενδιάμεσοι ιστοί) μέσω του οποίου ενώνονται τα τριχοειδή ενδοθηλιακά κύτταρα με τα κυψελιδικά κύτταρα στο επιθήλιο σχηματίζοντας την τριχοειδή-κυψελιδική μεμβράνη. Η μεμβράνη αυτή έχει πάχος περίπου 2μm για τους ανθρώπινους πνεύμονες. Όλοι οι παραπάνω σχηματισμοί μαζί με τους λεμφαδένες είναι γνωστοί ως παρέγχυμα (συμπαγής ιστός των σπλάχνων) (Schlesinger, 1988).

Οι πνεύμονες περιλαμβάνουν δύο λεμφικά δίκτυα. Το επιφανειακό δίκτυο βρίσκεται στο στρώμα συνδετικού ιστού του ορογόνου υμένα (υπεζωκώς) που καλύπτει τα όργανα στην κοιλότητα του κορμού του ανθρώπου (Schlesinger, 1988). Το δεύτερο δίκτυο (περιβρογχοαγγειακό) βρίσκεται σε μεγαλύτερο βάθος και αποτελείται από συνδεδεμένα αγγεία μέσα στο συνδετικό ιστό που περιβάλλει το αναπνευστικό ως και τα αναπνευστικά βρογχιόλια και το αγγειακό σύστημα των πνευμόνων. Ένα πλέγμα από αγγεία (λεμφαγγεία) συνδέει τα δύο δίκτυα. Τα μεγαλύτερα από αυτά τα αγγεία καταλήγουν σε λεμφαδένες με πιο σημαντικούς αυτούς που βρίσκονται κατά μήκος της τραχείας και των κύριων βρόγχων και στις διακλαδώσεις των βρόγχων και

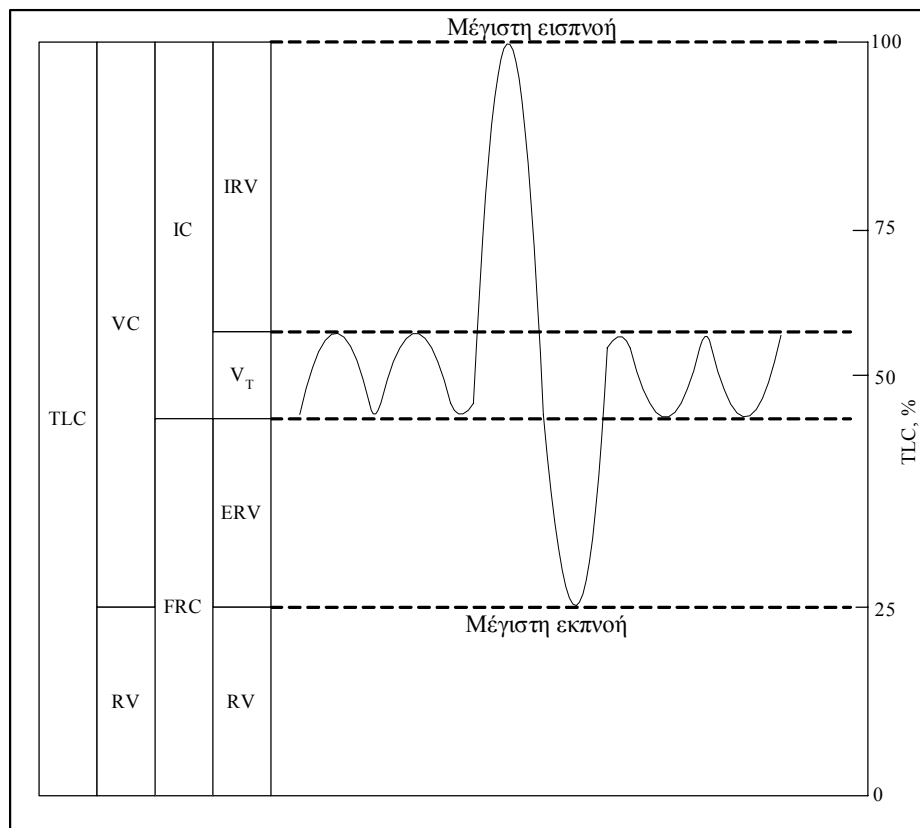
βρογχιολίων (*ICRP, 1994*). Στην κυψελιδική περιοχή περιλαμβάνονται λεμφικός ιστός, λεμφαγγεία αλλά και βρογχικοί λεμφαδένες. Το συνολικό δίκτυο λεμφαγγείων απορρέει τελικά στην γενική κυκλοφορία του αίματος.

### 3.2. Παράμετροι Φυσιολογίας

Η φυσιολογία του αναπνευστικού συστήματος σχετίζεται με την ροή του αέρα κατά την είσοδο και έξοδό του από τη μύτη και το στόμα αλλά και κατά την κίνηση του στους αεραγωγούς του. Οι παράμετροι που αφορούν τον τρόπο και τον ρυθμό παροχής του αέρα χρησιμοποιούνται στον καθορισμό της πρόσληψης σωματιδίων μετά από έκθεση σε δεδομένη ατμοσφαιρική συγκέντρωση (π.χ. *ICRP, 1994; EPA, 2002; Schlesinger, 1988 κ.α.*). Παράλληλα είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό του ποσοστού της εισπνεόμενης σωματιδιακής ύλης που θα εναποτεθεί στις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος.

Οι παράμετροι φυσιολογίας διακρίνονται σε δύο κατηγορίες (*ICRP, 2002*). Η πρώτη κατηγορία αφορά τον όγκο του αέρα στους πνεύμονες κατά τη διάρκεια ενός κύκλου αναπνοής. Σχετίζεται άμεσα με την ηλικία, το ύψος, βάρος, φύλο, την φυλή και την κατάσταση υγείας του ατόμου. Ο όγκος του αέρα που βρίσκεται στους πνεύμονες τη στιγμή της μέγιστης εισπνοής (εικόνα 14) είναι γνωστός ως «ολική χωρητικότητα των πνευμόνων» (total lung capacity). «Εισπνευστικός όγκος αέρα» (IRV) είναι το κλάσμα της ολικής χωρητικότητας των πνευμόνων που καταλαμβάνεται κατά την εισπνοή. Το αντίστοιχο κλάσμα που καταλαμβάνεται κατά την εκπνοή ονομάζεται «εκπνευστικός όγκος αέρα» (ERV). «Υπόλοιπη χωρητικότητα» των πνευμόνων είναι το υπόλοιπο της ολικής χωρητικότητας εάν αφαιρέσουμε τον εισπνευστικό και εκπνευστικό όγκο αέρα καθώς και τον όγκο που λαμβάνεται σε κάθε εισπνοή ( $V_T$ ) ( $RV = TLC - IRV - ERV - V_T$ ). Ο συνολικός όγκος των πνευμόνων που καταλαμβάνεται κατά την εισπνοή και απελευθερώνεται κατά την εκπνοή είναι η εισπνευστική χωρητικότητα (IC) ενώ ως «υπόλοιπη λειτουργική χωρητικότητα» (functional residual capacity) καλείται ο όγκος του αέρα που παραμένει στους πνεύμονες μετά την εκπνοή. Τέλος «ζωτική χωρητικότητα» των πνευμόνων καλείται το άθροισμα των IRV,  $V_T$  και ERV.

Πέρα από τις παραπάνω παραμέτρους χρησιμοποιούνται και οι όροι των ανατομικά ή φυσιολογικά νεκρών όγκων αέρα και περιοχών των πνευμόνων. Ειδικότερα, «ανατομικά νεκρός όγκος» είναι από μορφολογική άποψη ο όγκος των πνευμόνων που δεν καλύπτεται από αναπνευστικό επιθήλιο ή από φυσιολογική άποψη ο όγκος του αέρα που λαμβάνεται ανά εισπνοή αλλά δεν συμμετέχει στην αναπνοή που πραγματοποιείται στις κυψελίδες (ICRP, 1994; Schlesinger, 1988).



**Εικόνα 14:** Διάγραμμα των κλασμάτων του όγκου αέρα που εισέρχεται στους πνεύμονες. TLC = ο μέγιστος όγκος του αέρα στους πνεύμονες στην εισπνοή (Total Lung Capacity), VC = (Vital Capacity), RV = (Residual Volume), FRC = ο όγκος αέρα που παραμένει στους πνεύμονες μετά από την εκπνοή (Functional Residual Capacity), IRV = (Inspiratory Reserve Volume), ERV = (Expiratory Reserve Volume),  $V_T$  = ο όγκος αέρα κάθε εισπνοής (Tidal volume), IC = (Inspiratory Capacity) (Schlesinger, 1988).

Η ηλικία επηρεάζει ιδιαίτερα τα κλάσματα του όγκου του αέρα στους πνεύμονες. Έτσι σε ένα άτομο μεγάλης ηλικίας η υπόλοιπη λειτουργική χωρητικότητα και η υπόλοιπη χωρητικότητα αυξάνουν ενώ η ζωτική και εισπνευστική χωρητικότητα και ο εκπνευστικός όγκος αέρα μειώνονται. Ακόμα επηρεάζονται σημαντικά οι νεκροί όγκοι κάθε περιοχής του αναπνευστικού καθώς οι πνεύμονες χάνουν την ελαστικότητα τους ενώ ταυτόχρονα ο αέρας δεν αναμειγνύεται και μοιράζεται ομοιόμορφα σε όλους τους αεραγωγούς (Schlesinger, 1988). Έτσι κάποιες κυψελίδες

δεν δέχονται συνεχώς αέρα με αποτέλεσμα την αύξηση του όγκου του αέρα που δεν συμμετέχει στην αναπνοή.

Η δεύτερη κατηγορία παραμέτρων φυσιολογίας αφορά τον τρόπο και τον ρυθμό με τον οποίο επαναλαμβάνεται ένας κύκλος αναπνοής. Ειδικότερα, ως «τρόπος αναπνοής» ορίζεται η κατανομή του αέρα κατά την εισπνοή μεταξύ μύτης και στόματος. Με βάση τον τρόπο αναπνοής οι άνθρωποι χαρακτηρίζονται, για τους σκοπούς της εκτίμησης της δόσης, ως άτομα που αναπνέουν μόνο από τη μύτη (nose breathers) ή και από τις δύο εισόδους (nasal augmenters) όταν εκτελούν ήπια δραστηριότητα (ICRP, 2002). Βέβαια υπάρχει και ένα ποσοστό ατόμων που αναπνέουν μερικώς από το στόμα, αλλά αυτό οφείλεται κυρίως σε ανατομικούς λόγους ή λόγους υγείας. Η «συχνότητα αναπνοής» είναι το πλήθος των εισπνοών ανά λεπτό ( $f$ ) και το γινόμενο της με τον όγκο αέρα που λαμβάνεται ανά εισπνοή ( $V_T$ ) αποτελεί τον «ρυθμό αναπνοής» (ventilation rate) που είναι ο εισπνεόμενος όγκος αέρα στη μονάδα του χρόνου. Τέλος, ως ογκομετρική παροχή αέρα (volumetric flow rate) ονομάζεται ο εισπνεόμενος όγκος αέρα στη μονάδα του χρόνου που ορίζεται ως ο λόγος του διπλάσιου του αέρα που λαμβάνεται ανά εισπνοή ( $2V_T$ ) προς το χρόνο που διαρκεί ένας κύκλος αναπνοής ( $1/f$ ).

Οι παράμετροι της δεύτερης κατηγορίας επηρεάζονται σημαντικά από τη δραστηριότητα του ατόμου και συχνά αναφέρονται ως παράμετροι δραστηριότητας (ICRP, 1994). Όπως αναφέρθηκε παραπάνω οι περισσότεροι άνθρωποι όταν εκτελούν ήπια εργασία αναπνέουν από τη μύτη. Εάν δεν συντρέχουν λόγοι υγείας ή ανατομίας ο τρόπος αναπνοής μεταβάλλεται, και το στόμα συμμετέχει σε αυτή, μόνο όταν απαιτείται μεγάλη παροχή αέρα. Η αναγκαία ζωτική παροχή αέρα σχετίζεται άμεσα με τη δραστηριότητα και το άτομο έχει τις μεγαλύτερες απαιτήσεις όταν εκτελεί βαριά εργασία ή αθλείται με αποτέλεσμα την αύξηση της συχνότητας αναπνοής. Η συμμετοχή ωστόσο του στόματος στην εισπνοή ακόμα και σε αυτές τις περιπτώσεις δεν ξεπερνά το 60% (Schlesinger, 1988). Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να σημειωθεί πως όταν η συχνότητα 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.α., 2002; Bergmann και Hofmann, 1999; Venkataraman και Kao, 1999). Ένα ενήλικο άτομο εισπνέει περισσότερο όγκο αέρα ανά αναπνοή απ' ότι ένα παιδί και λιγότερο απ' ότι ένας μεσήλικας. Το αντίθετο ισχύει για την συχνότητα αναπνοής που ελαττώνεται με την ηλικία. Στον πίνακα 2 δίνονται ενδεικτικές τιμές των παραμέτρων φυσιολογίας για Καυκάσια άτομα κάτω από διάφορες δραστηριότητες. Παράλληλα δίνονται οι βασικοί παράμετροι ανατομίας (διάμετροι αεραγωγών) που χρησιμοποιούνται ως συντελεστές συσχέτισης της απόθεσης των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα του Καυκάσιου άντρα (άτομο αναφοράς) και των άλλων ατόμων. Οι παράμετροι για τον Καυκάσιο άντρα που εκτελεί ήπια δραστηριότητα χρησιμοποιούνται παρακάτω (κεφάλαιο 7) στην σύγκριση των μοντέλων εναπόθεσης.

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

Παράμετρος	Εκτεθειμένο Άτομο		
	Άντρας	Γυναίκα	Βρέφος (3 μηνών)
<b>FRC</b> : Υπόλοιπη λειτουργική χωρητικότητα (mL)	3301	2681	148
<b><math>V_D(ET)</math></b> : Εξωθωρακική “νεκρή” περιοχή (mL)	50	40	2,6
<b><math>V_D(BB)</math></b> : Ανατομικά “νεκρή” περιοχή της τραχείας και των βρόγχων(mL)	49	40	4,5
<b><math>V_D(bb)</math></b> : “Νεκρή” περιοχή βρογχιολίων (mL)	47	44	6,8
<b><math>d_0</math></b> :διάμετρος τραχείας (cm)	1,65	1,53	0,616
<b><math>d_9</math></b> :διάμετρος του πρώτου βρογχιόλιου (cm)	0,165	0,159	0,099
<b><math>d_{16}</math></b> : διάμετρος του πρώτου αναπνευστικού βρογχιόλιου (cm)	0,051	0,048	0,020
<b>Κατά τη διάρκεια του ύπνου</b>			
<b><math>B</math></b> : Ογκομετρικός ρυθμός αναπνοής ( $m^3/h$ )	0,45	0,32	0,99
<b><math>V_T</math></b> : Όγκος που λαμβάνεται ανά εισπνοή (mL)	625	444	39
<b><math>V</math></b> : Ογκομετρική παροχή αέρα (mL/sec)	250	178	50
<b><math>f</math></b> : Ρυθμός αναπνοής (αναπνοές/min)	12	12	38
<b>Ενώ κάθεται</b>			
<b><math>B</math></b> : Ογκομετρικός ρυθμός αναπνοής ( $m^3/h$ )	0,54	0,39	-
<b><math>V_T</math></b> : Όγκος που λαμβάνεται ανά εισπνοή (mL)	750	464	-
<b><math>V</math></b> : Ογκομετρική παροχή αέρα (mL/sec)	300	217	-
<b><math>f</math></b> : Ρυθμός αναπνοής (αναπνοές/min)	12	14	-
<b>Καθώς εκτελεί ήπια εργασία</b>			
<b><math>B</math></b> : Ογκομετρικός ρυθμός αναπνοής ( $m^3/h$ )	1,5	1,25	0,19
<b><math>V_T</math></b> : Όγκος που λαμβάνεται ανά εισπνοή (mL)	1250	992	66
<b><math>V</math></b> : Ογκομετρική παροχή αέρα (mL/sec)	833	694	106
<b><math>f</math></b> : Ρυθμός αναπνοής (αναπνοές/min)	20	21	48
<b>Καθώς εκτελεί βαριές εργασίες</b>			
<b><math>B</math></b> : Ογκομετρικός ρυθμός αναπνοής ( $m^3/h$ )	3	2,7	-
<b><math>V_T</math></b> : Όγκος που λαμβάνεται ανά εισπνοή (mL)	1920	1364	-
<b><math>V</math></b> : Ογκομετρική παροχή αέρα (mL/sec)	1670	1500	-
<b><math>f</math></b> : Ρυθμός αναπνοής (αναπνοές/min)	26	33	-

## 4. ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟ ΑΝΑΠΝΕΥΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

### 4.1. 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.

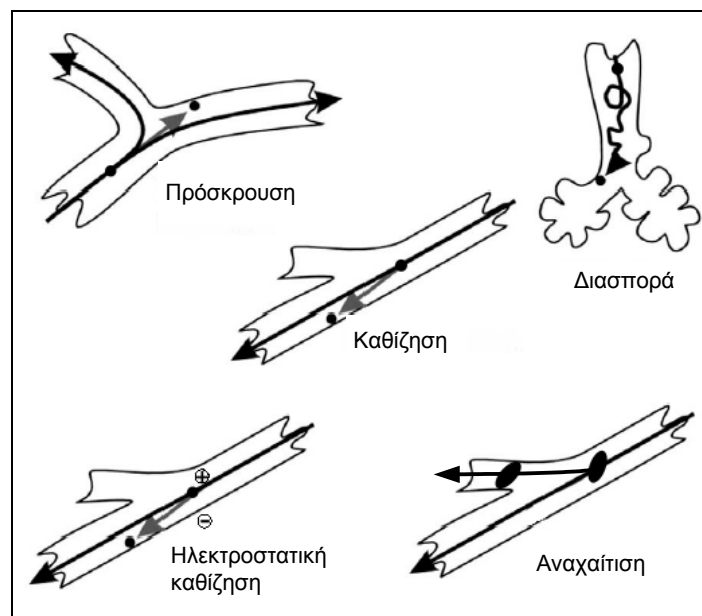
### 4.2. Μηχανισμοί εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα

Οι κύριοι μηχανισμοί εναπόθεσης των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα είναι η πρόσκρουση, καθίζηση, διασπορά (κίνηση Brown), αναχαίτιση-ενσφήνωση και η ηλεκτροστατική καθίζηση όπως δίνονται στα σχήματα της εικόνας 15 (*EPA, 2002*). Αναλυτικότερα η πρόσκρουση οφείλεται στην ανικανότητα των σωματιδίων να ακολουθήσουν τις γραμμές ροής όταν αυτές αλλάζουν απότομα κατεύθυνση ή ταχύτητα. Είναι ο σημαντικότερος μηχανισμός εναπόθεσης για σωματίδια ισοδύναμης αεροδυναμικής διαμέτρου μεγαλύτερης του 0,5μm στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα (*ICRP, 2002*). Η πιθανότητα εναπόθεσης ενός σωματιδίου λόγω πρόσκρουσης είναι ανάλογη της ταχύτητας του αέρα, του ρυθμού αναπνοής, του μεγέθους και της πυκνότητας του σωματιδίου (*Schlesinger, 1988*).

Η καθίζηση είναι η εναπόθεση σωματιδίων στο αναπνευστικό εξαιτίας της βαρύτητας. Όταν η επίδραση της βαρύτητας γίνει μεγαλύτερη της άνωσης και της αντίστασης του αέρα τα σωματίδια εγκαταλείπουν τις γραμμές ροής και καθιζάνουν με σταθερή ταχύτητα στις επιφάνειες της αναπνευστικής οδού (*EPA, 2002*). Αποτελεί



όπως και η πρόσκρουση σημαντικό μηχανισμό για σωματίδια ισοδύναμης αεροδυναμικής διαμέτρου μεγαλύτερης των  $0,5\mu\text{m}$  όταν αυτά κινούνται στους μικρότερους αεραγωγούς του αναπνευστικού συστήματος (*Schlesinger, 1988*). Η πιθανότητα εναπόθεσης ενός σωματιδίου λόγω καθίζησης είναι ανάλογη του χρόνου παραμονής στους αεραγωγούς, του μεγέθους και της πυκνότητας του σωματιδίου και αντιστρόφως ανάλογη του ρυθμού αναπνοής. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η εναπόθεση σωματιδίων αποτελεί βασικό μηχανισμό εναπόθεσης σωματιδίων στην περιοχή εκτός θώρακα και στους αναπνευστικούς αεραγωγούς της κυψελιδικής περιοχής (Βλέπε πίνακα 1 για χρόνους παραμονής). Η σχετική συνεισφορά της πρόσκρουσης και της καθίζησης στην απόθεση σωματιδίων σε μια διακλάδωση στις αρχικές γενιές των πνευμόνων έχει βρεθεί πως είναι περίπου ίση. Διαφέρουν όμως στη θέση απόθεσης των σωματιδίων αφού τα περισσότερα σωματίδια επικάθονται λόγω πρόσκρουσης στη διακλάδωση ενώ λόγω καθίζησης σε όλο το μήκος των αεραγωγών (*Balashazy κ.α., 1999*).



**Εικόνα 15:** Μηχανισμοί εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα.

Σωματίδια διαμέτρου μικρότερης των  $0,2\mu\text{m}$  κινούνται ακολουθώντας τυχαίες κατευθύνσεις καθώς βομβαρδίζονται από μόρια αέρα (*Schlesinger, 1988*). Εξαιτίας αυτής της κίνησης είναι πιθανό να έρθουν σε επαφή με τα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού και να αποτεθούν στα σημεία σύγκρουσης. Η διασπορά αποτελεί βασικό μηχανισμό απόθεσης των σωματιδίων στα βρογχιόλια και την κυψελιδική

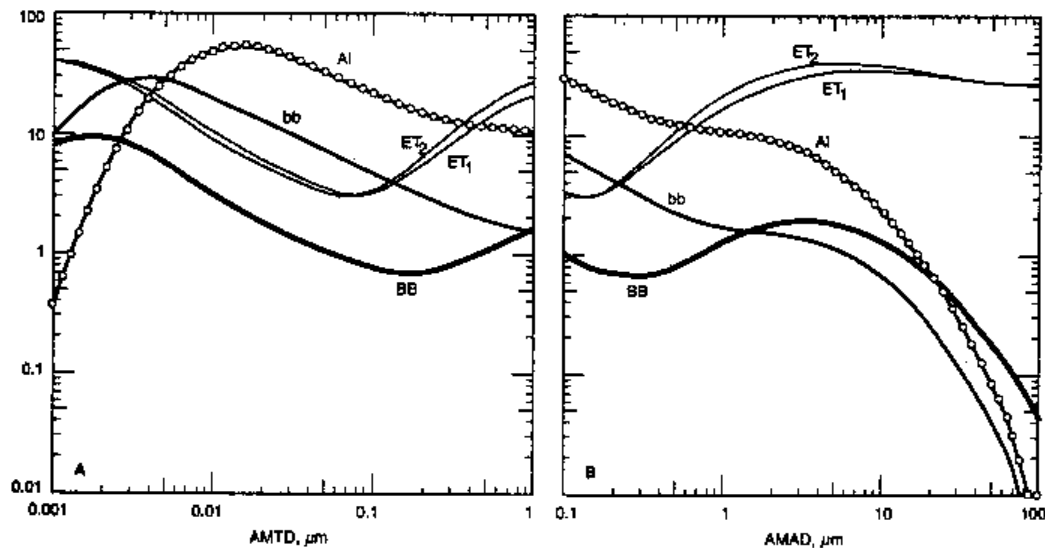
περιοχή όπου η ταχύτητα ροής είναι ιδιαίτερα χαμηλή αλλά και στην περιοχή εκτός θώρακα όπου η ροή του αέρα είναι τυρβώδης (*ICRP, 2002*).

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

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

#### **4.3. Παράγοντες που επηρεάζουν την εναπόθεση σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα**

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 16 δίνεται το ποσοστό της μάζας σωματιδίων που αποθέτεται σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος συναρτήσει της διαμέτρου τους.

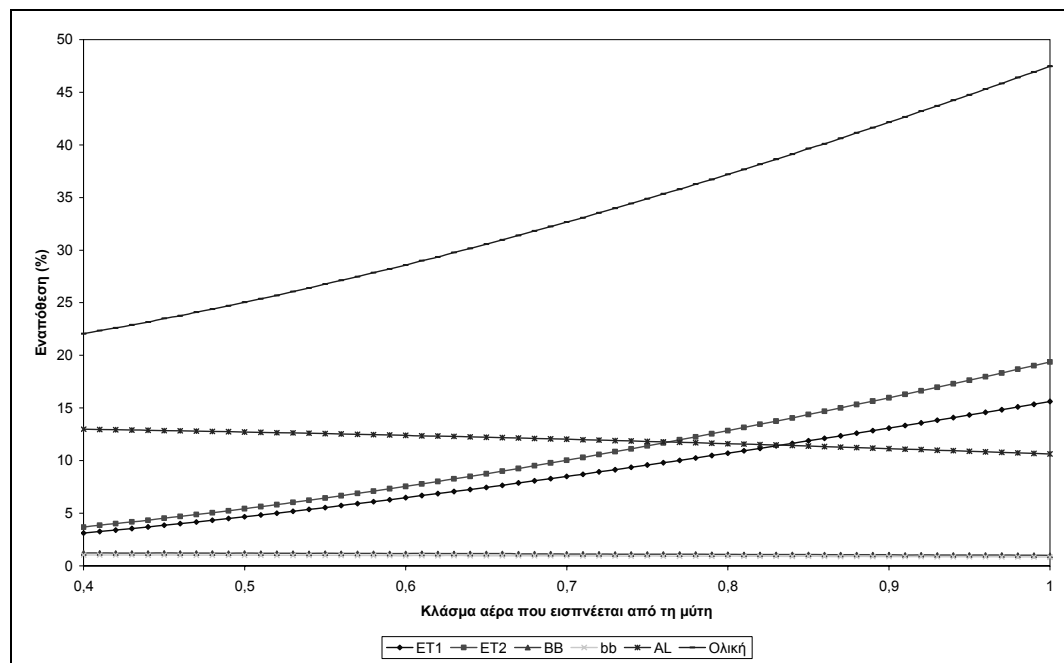


**Εικόνα 16:** Ποσοστό εναπόθεσης σωματιδίων στις 5 περιοχές της αναπνευστικής οδού, όπως δίνεται στο ICRP 66. Το κλάσμα της μάζας που παραμένει στις περιοχές της αναπνευστικής οδού μετά από έναν πλήρη κύκλο αναπνοής παρουσιάζεται ως συνάρτηση της διαμέτρου των σωματιδίων που διακρίνεται σε αεροδυναμική (AMAD) και θερμοδυναμική (AMTD) βάσει του κυρίαρχου μηχανισμού εναπόθεσης των σωματιδίων.

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. 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 εισπνευσσιμότητα τους. Όσο αφορά τον τρόπο αναπνοής, δηλαδή την εισπνοή από τη μύτη ή το στόμα, πέρα από την διαφορετική εισπνευσσιμότητα, αυτή καθορίζει και την ποσότητα των διαθέσιμων σωματιδίων στους πνεύμονες. Στο διάγραμμα της εικόνας 17 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 διασποράς. 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 ET 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.

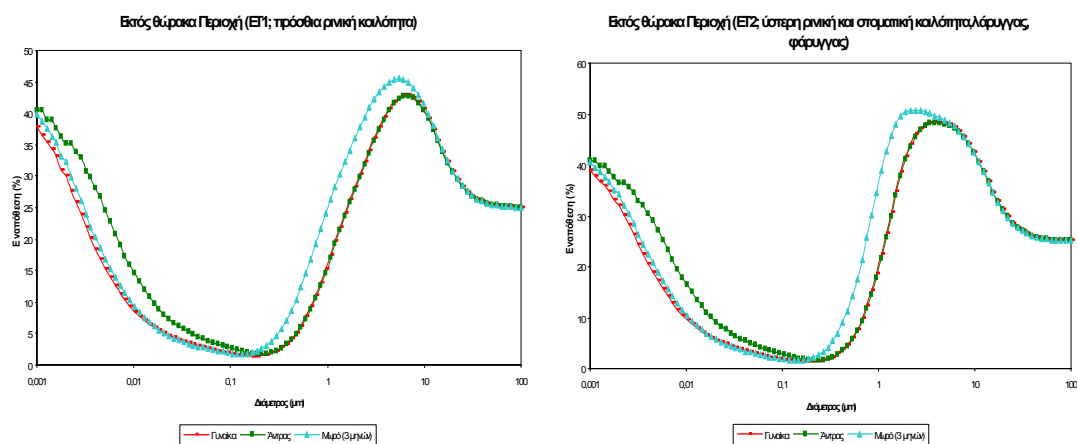


**Εικόνα 17:** Ποσοστό εναπόθεσης της εισπνεόμενης μάζας σωματιδίων διαμέτρου 1  $\mu\text{m}$  στις 5 περιοχές της αναπνευστικής οδού συναρτήσει της συμμετοχής της μύτης στην εισπνοή.

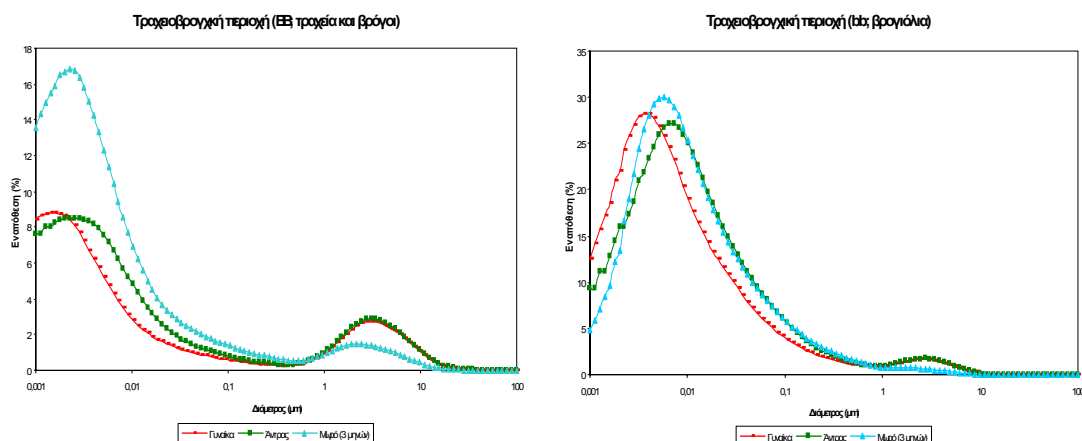
Η εναπόθεση εξαρτάται και από βιολογικούς παράγοντες που σχετίζονται με το φύλο, την ηλικία, ασθένειες, το είδος και όσο αφορά τους ανθρώπους την εθνικότητα. Όπως αναφέρθηκε και στην περιγραφή του αναπνευστικού συστήματος, οι παραπάνω παράγοντες καθορίζουν την ανατομία του αναπνευστικού συστήματος και 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 (πίνακας 2). 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.

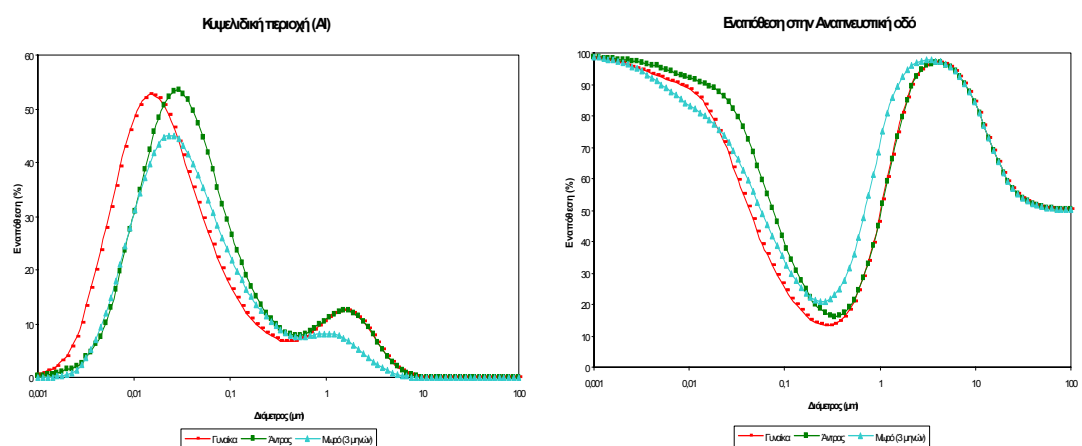
Στα διαγράμματα των εικόνων 18-20 δίνεται η εναπόθεση σωματιδίων σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος συναρτήσει της διαμέτρου τους για ενήλικες άντρες και γυναίκες και μωρά ηλικίας 3 μηνών, όπως υπολογίστηκε με το μοντέλο AEROEXPDOSE. Στην περιοχή εκτός θώρακα παρατηρείται πως η εναπόθεση σωματιδίων με διάμετρο ως περίπου 0,2  $\mu\text{m}$  είναι μεγαλύτερη για τους άντρες απ' ότι τις γυναίκες κάτι που πιθανόν οφείλεται στην υψηλότερη ογκομετρική παροχή αέρα (εικόνα 18). Για σωματίδια μεγαλύτερης διαμέτρου τα ποσοστά απόθεσης είναι σχεδόν ίσα. Στην θωρακική περιοχή τα παραπάνω συμπεράσματα διαφοροποιούνται (εικόνα 19). Στους βρόγχους σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 0,0023  $\mu\text{m}$  αποθέτονται με μεγαλύτερη απόδοση στις γυναίκες ενώ τα μεγαλύτερα ως τη διάμετρο των 0,2  $\mu\text{m}$  στους άντρες. Για μεγαλύτερες διαμέτρους τα ποσοστά είναι κι εδώ σχεδόν ίσα. Στα βρογχιόλια και τις κυψελίδες παρατηρείται το ίδιο μοτίβο με τις παραπάνω διαμέτρους να μεταβάλλονται σε 0,0057  $\mu\text{m}$  και 0,85  $\mu\text{m}$  και 0,021  $\mu\text{m}$  και 0,7  $\mu\text{m}$  αντίστοιχα. Όσο τα σωματίδια διέρχονται σε μεγαλύτερο βάθος των πνευμόνων τόσο περισσότερα πολύ μικρά από αυτά αποθέτονται στις επιφάνειες του γυναικείου αναπνευστικού συστήματος. Η συμπεριφορά αυτή πιθανό οφείλεται στην μεγαλύτερη διαθεσιμότητα τους αλλά και την ανατομική διαφοροποίηση του αναπνευστικού μεταξύ άντρα και γυναίκας. Τελικά η ολική εναπόθεση στο αναπνευστικό σύστημα είναι μεγαλύτερη για τον άντρα στα μικρά σωματίδια και σχεδόν ίση και για τα δύο φύλα για μεγαλύτερα.



**Εικόνα 18:** Ποσοστό μάζας που αποτίθεται στην εκτός θώρακα περιοχή του αναπνευστικού συστήματος άντρα, γυναίκας και βρέφους 3 μηνών, συναρτήσει της διαμέτρου των σωματιδίων (οι υπολογισμοί έγιναν με το μοντέλο AEROEXPDOSE).



**Εικόνα 19:** Ποσοστό μάζας που αποτίθεται στην τραχειοβρογχική περιοχή του αναπνευστικού συστήματος άντρα, γυναίκας και βρέφους 3 μηνών, συναρτήσει της διαμέτρου των σωματιδίων (οι υπολογισμοί έγιναν με το μοντέλο AEROEXPDOSE).



**Εικόνα 20:** Ποσοστό μάζας που αποτίθεται στην κυψελιδική περιοχή και στο σύνολο του αναπνευστικού συστήματος άντρα, γυναίκας και βρέφους 3 μηνών, συναρτήσει της διαμέτρου των σωματιδίων (οι υπολογισμοί έγιναν με το μοντέλο AEROEXPDOSE).

Ένα μωρό 3 μηνών παρουσιάζει λόγω των διαστάσεων του αναπνευστικού του συστήματος μεγαλύτερη εναπόθεση στην εκτός θώρακα περιοχή για μεγάλα σωματίδια απ' ότι ένας ενήλικας και για μικρά περίπου ίση με της γυναίκας. Στους βρόγχους η εναπόθεση μικρών σωματιδίων είναι ιδιαίτερα υψηλή σε σχέση με τα ενήλικα άτομα ενώ στα βρογχιόλια αν εξαιρεθεί το διάστημα διαμέτρων από 0,004μm ως 0,01μm κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα με τους ενήλικες. Μικρότερο ποσοστό σωματιδίων φτάνει στην κυψελιδική περιοχή αλλά καθώς οι διαστάσεις των πνευμόνων ενός μωρού είναι μικρότερες σε σχέση με τους ενήλικες η εναπόθεση ανά μονάδα επιφάνειας της αναπνευστικής οδού είναι υψηλή. Τελικά η ολική εναπόθεση στο αναπνευστικό σύστημα ενός μωρού 3 μηνών είναι μικρότερη για τα μικρά

σωματίδια και μεγαλύτερη για τα μεγάλα σε σχέση με αυτή ενός ενήλικα άντρα. Επιπλέον εξαιτίας της έντονης δραστηριότητας των παιδιών κατά τη διάρκεια της ημέρας παρουσιάζουν μεγαλύτερους ρυθμούς αναπνοής σε σχέση με τους ενήλικες και τελικά η δόση για αυτά είναι μεγαλύτερη.

Στα διαγράμματα 18-20 φαίνεται και η επίδραση των διαφόρων μηχανισμών στην εναπόθεση των σωματιδίων στις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος. Τα μικρά σωματίδια αποθέτονται λόγω διασποράς, τα μεγάλα με πρόσκρουση, καθίζηση και πιθανόν αναχαίτιση ενώ τα ενδιάμεσα δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από κάποιο μηχανισμό.

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

Ανατομική διαφοροποίηση παρατηρείται και μεταξύ ατόμων ίδιου γένους, ηλικίας και κατάστασης υγείας του αναπνευστικού συστήματος. Η γεωμετρία της αναπνευστικής οδού, το μέγεθος και σχήμα κάθε τμήματος της επηρεάζουν το ποσοστό εναπόθεσης (*Hofmann κ.α., 2002*). Ειδικότερα για την ET περιοχή έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες οι οποίες ανέδειξαν ότι ανάλογα τις διαστάσεις της μύτης και το σχήμα των ρουθουνιών τα ποσοστά εναπόθεσης μπορεί να διαφέρουν σημαντικά μεταξύ ατόμων και τα εντονότερα παρατηρούνται σε άτομα με πιο περίπλοκο σχήμα ρινικού συστήματος (*EPA, 2002*). Ακόμα έχει βρεθεί πως ο ανατομικά νεκρός χώρος επηρεάζει την κατανομή της εναπόθεσης στο αναπνευστικό καθώς και ο όγκος των πνευμόνων δίνει ασύμμετρη κατανομή μεταξύ αριστερού και

δεξιού πνεύμονα με τον λόγο τους να αυξάνει ανάλογα της συνολικής χωρητικότητας των πνευμόνων (TLC) (Για TLC 70% ο λόγος είναι 1,6) (*ICRP, 1994*).

Τέλος η διαφορά εναπόθεσης μεταξύ ειδών ενδιαφέρει στο βαθμό που αποτελέσματα πειραμάτων σε ζώα (κυρίως ποντίκια) ανάγονται στους ανθρώπους καθώς διαφέρουν οι ρυθμοί εναπόθεσης και καθαρισμού, η ευαισθησία σε κάποιο συστατικό, η σχέση δόσης-απόκρισης καθώς και η παράμετρος που καθορίζει την κρίσιμη δόση (π.χ. αριθμός σωματιδίων ανά επιφάνεια, μάζα σωματιδίων ανά επιφάνεια κ.λ.π.) (*EPA, 2002*).

## 5. ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΑΝΑΠΝΕΥΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

### 5.1. 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.α., 1996*). Η γνώση του χρόνου παραμονής των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα μετά την πάροδο της έκθεσης είναι καθοριστική για την απόκριση του. Η απομάκρυνση των σωματιδίων από τις περιοχές που έχουν 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.α., 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.α., 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.



## 5.2. Μηχανισμοί απομάκρυνσης σωματιδίων από το ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα

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

### 1. 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.α., 1991).

### 2. 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 απόπτυση. Τέλος στο λάρυγγα η ροή της βλέννας από την τραχεία κατευθύνεται στο φάρυγγα απ' όπου τα σωματίδια καταπίνονται (*ICRP, 1994*).

– *Τραχειοβρογχική περιοχή*

Η περιοχή αυτή καλύπτεται από επιθήλιο που καλύπτεται από στρώμα βλέννας και αποτελεί το βασικό μέσο με το οποίο τα σωματίδια μεταφέρονται στον φάρυγγα και το γαστρεντερικό σύστημα (*Schlesinger, 1988*). Αυτό ισχύει για τα αδιάλυτα σωματίδια που μπορούν να απομακρυνθούν και με ενδοκύτωση<sup>3</sup> στα κύτταρα του επιθηλίου και από μακροφάγους ενώ τα διαλυτά μεταφέρονται στο αίμα (*EPA, 2002*).

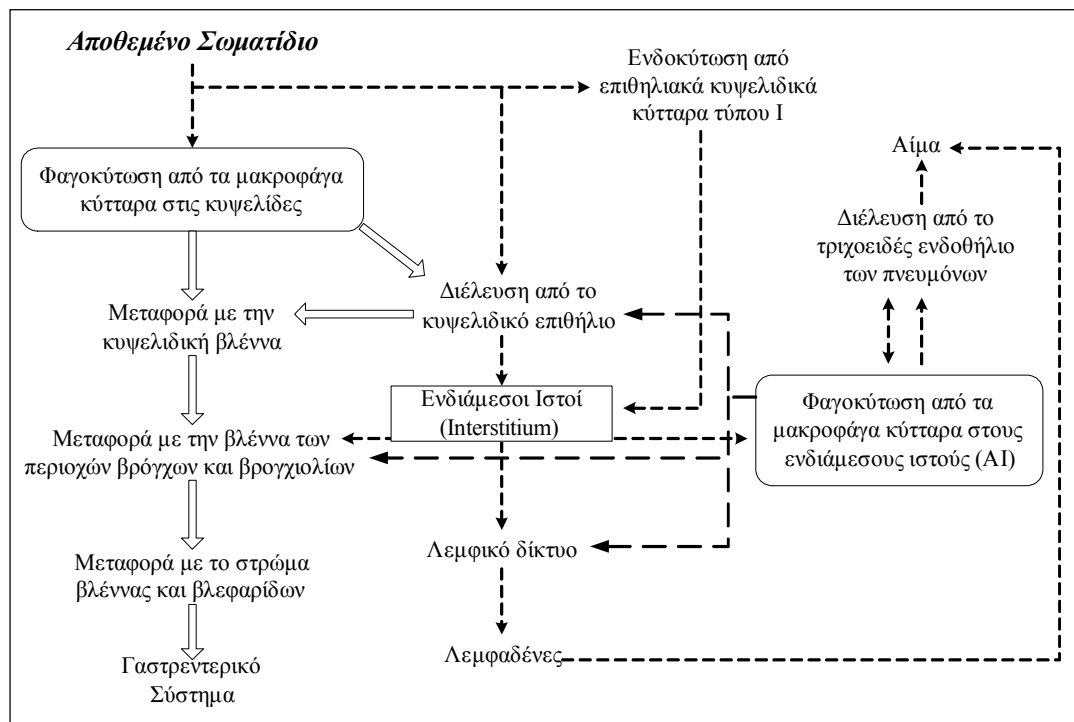
– *Περιοχή κυψελίδων*

Στην περιοχή των κυψελίδων τα σωματίδια υπόκεινται σε απορροφητικούς και μη μηχανισμούς απομάκρυνσης. Αναλυτικά οι μηχανισμοί απομάκρυνσης των σωματιδίων δίνονται στην εικόνα 21. 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, όπως δίνεται στο αριστερό τμήμα του σχήματος 21.

Η μετακίνηση των μακροφάγων στην περιοχή που αρχίζει το στρώμα της βλέννας γίνεται είτε απευθείας είτε με μεταφορά στο επιθήλιο των κυψελίδων και μέσω αυτού στους ενδιάμεσους ιστούς όπου έρχονται σε επαφή με περιοχές που έχουν βλεφαρίδες και εντοπίζονται κυρίως κοντά σε λεμφαγγεία. Τα σωματίδια στους ενδιάμεσους ιστούς μπορούν να φαγοκυτωθούν και να μεταφερθούν στο αίμα με τα τριχοειδή αγγεία της περιοχής ή να μεταφερθούν στο λεμφικό σύστημα και τελικά πάλι στο αίμα. Τέλος ένα μέρος των σωματιδίων που αρχικά αποθέτεται στους ενδιάμεσους ιστούς μπορεί να μεταφερθεί στο κυψελιδικό επιθήλιο και να απομακρυνθεί με τη

<sup>3</sup> Πρόσληψη συστατικού εντός του κυττάρου με εισβολή στην πλασματική μεμβράνη και εσωτερίκευση του σε ενδοκυτταρική κύστη (*Hertel κ.α., 2001*)

βλέννα, στο λεμφικό σύστημα και να απομακρυνθεί στο αίμα ή να φαγοκυτωθεί και να απορροφηθεί μαζί με τα μακροφάγα κύτταρα στο αίμα (EPA, 2002). Τα ελεύθερα από τους μακροφάγους αδιάλυτα σωματίδια μπορούν και να ενδοκυτωθούν στο επιθήλιο ακολουθώντας στη συνέχεια την πορεία που προαναφέρθηκε. Τέλος τα διαλυτά σωματίδια διαχέονται στα υγρά των κυψελιδικών αεραγωγών και απορροφώνται τελικά στο αίμα.



**Εικόνα 21:** Διάγραμμα πιθανών τρόπων καθαρισμού των σωματιδίων από την περιοχή των κυψελίδων για αδιάλυτα σωματίδια. Αριστερά φαίνεται η ανέλκυση σωματιδίων από το στρώμα βλέννας προς τον φάρυγγα απ' όπου καταλήγουν στο γαστρεντερικό σύστημα (Schlesinger, 1988; EPA, 2002).

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

### 5.3. 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 ET 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 TB 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*). 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*).

**Πίνακας 3:** Ταχύτητα κίνησης του στρώματος βλέννας στην τραχειοβρογχική περιοχή του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος και αντίστοιχοι χρόνοι υποδιπλασιασμού (*Lee κ.α., 1979*).

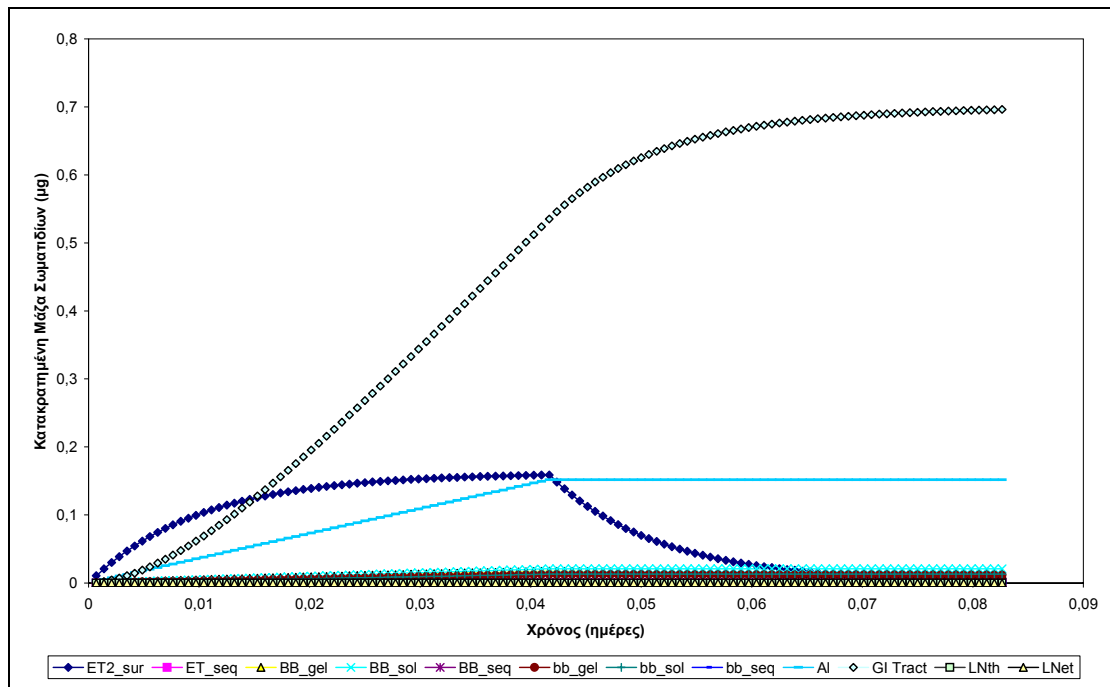
Γενιά	Ταχύτητα βλέννας (mm/min)	Χρόνος υποδιπλασιασμού (min)
0	5,5	15,1
1	4,1	8,1
2	3,0	4,4
3	2,2	2,4
4	1,4	6,4
5	0,88	8,4
6	0,55	11,3
7	0,34	15,7
8	0,21	21,3
9	0,13	29,7
10	0,074	42,8
11	0,044	60,8
12	0,025	97,6
13	0,015	126,9
14	0,0082	195,2
15	0,0046	302,6

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. Ο καθαρισμός της περιοχής μέσω της βλέννας εξαρτάται από το αρχικό σημείο εναπόθεσης και το μέγεθος των σωματιδίων. Η πρόσληψη των σωματιδίων από τους μακροφάγους είναι ταχεία εκτός και αν είναι κυτοτοξικά όπως τα σωματίδια χαλαζία και αμιάντου (Schlesinger, 1988). Σε αυτή την περίπτωση δημιουργείται φλεγμονή στα κύτταρα του επιθηλίου και τους μακροφάγους κάτι που επιδρά στο ρυθμό μετακίνησης τους (Donaldson κ.α, 2000) αλλά και στον θάνατο τους με συνέπεια την απελευθέρωση των κυττάρων που είχαν ήδη προσλάβει (Tran κ.α., 1999b). Ακόμα όσο αυξάνεται το φορτίο στην περιοχή και στα μακροφάγα κύτταρα επέρχεται κορεσμός τόσο περισσότερα σωματίδια είναι ελεύθερα να διεισδύσουν σε μεγαλύτερο βάθος στο επιθήλιο και να ακολουθήσουν κυρίως πορείες με μικρότερο ρυθμό καθαρισμού αλλά και να προκαλέσουν φλεγμονή (Schlesinger, 1988). Η φόρτωση των μακροφάγων με σωματίδια ελαττώνει το ρυθμό μεταφοράς τους ενώ η υπερφόρτωση οδηγεί στο θάνατο τους με τις συνέπειες που αναφέρθηκαν πριν (Tran κ.α., 1999α). Η μετεγκατάσταση των σωματιδίων στις λέμφους είναι ιδιαίτερα αργή και ο καθαρισμός τους από αυτές ακόμα πιο αργός με χρόνους ημίσειας ζωής δεκάδων ετών (ICRP, 1994). Η απομάκρυνση από την κυψελιδική περιοχή ακολουθεί εκθετική μείωση και διακρίνεται σε 3 στάδια ρυθμού, το γρήγορο με μετακίνηση με τους μακροφάγους στη βλέννα, το μέσης ταχύτητας με μεταφορά των μακροφάγων μέσω των ενδιάμεσων ιστών και τέλος την αργή απομάκρυνση με διάλυση (Schlesinger, 1988).

Ο καθαρισμός των σωματιδίων εξαρτάται από το αρχικό σημείο απόθεσης αλλά και τις διαδρομές που θα ακολουθήσουν. Έτσι είναι σκόπιμο κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος να διακριθεί σε τμήματα που παρουσιάζουν παρόμοιο ρυθμό καθαρισμού (ICRP, 1994; Sturm και Hofmann, 2003; Tran κ.α., 1999α). Η περιοχή εκτός θώρακα διακρίνεται σε (α) το στρώμα βλέννας που καλύπτει το επιθήλιο (υγρά του αεραγωγού - sur) με βάθος 15μm (β) τα τοιχώματα του

αεραγωγού όπου σωματίδια παραμένουν δεσμευμένα (seq) στους μακροφάγους, πρόκειται για το στρώμα υπό του επιθηλίου, πάχους  $10\mu\text{m}$  ( $\gamma$ ) το επιθήλιο του αεραγωγού όπου σωματίδια μπορεί να έχουν δεσμευτεί λόγω χημικών δεσμών (b). Η τραχειοβρογχική περιοχή διακρίνεται σε παρόμοια στρώματα που συμβολικά δίνονται ως seq και b τόσο στους βρόγχους όσο και στα βρογχιόλια και τα στρώματα gel και sol (ICRP, 1994). Το στρώμα gel είναι το στρώμα βλέννας που επικαλύπτει τις βλεφαρίδες του επιθηλίου ενώ το sol εκεί όπου οι βλεφαρίδες βυθίζονται στην αναπνευστική βλέννα, δηλαδή κάτω από το στρώμα gel. Το πάχος τους είναι  $5\mu\text{m}$  και  $2\mu\text{m}$  για το gel και  $6\mu\text{m}$  και  $4\mu\text{m}$  για το sol, στους βρόγχους και τα βρογχιόλια αντίστοιχα. Τέλος η περιοχή των κυψελίδων και των λέμφων θεωρούνται ενιαίες αφού τα τοιχώματα είναι τόσο λεπτά ώστε να μην επιτρέπουν ένα διαχωρισμό σε στρώματα ομογενούς συγκέντρωσης σωματιδίων. Τα στρώματα gel και sur καθαρίζουν επιφανειακά τους αεραγωγούς με ταχύ ρυθμό ενώ το sol έχει πιο μικρό ρυθμό καθαρισμού. Από τα τοιχώματα των αεραγωγών (seq) τα σωματίδια απομακρύνονται κυρίως πολύ αργά ενώ στο επιθήλιο συχνά θεωρείται πως δεν δεσμεύονται σωματίδια (ICRP, 1994).

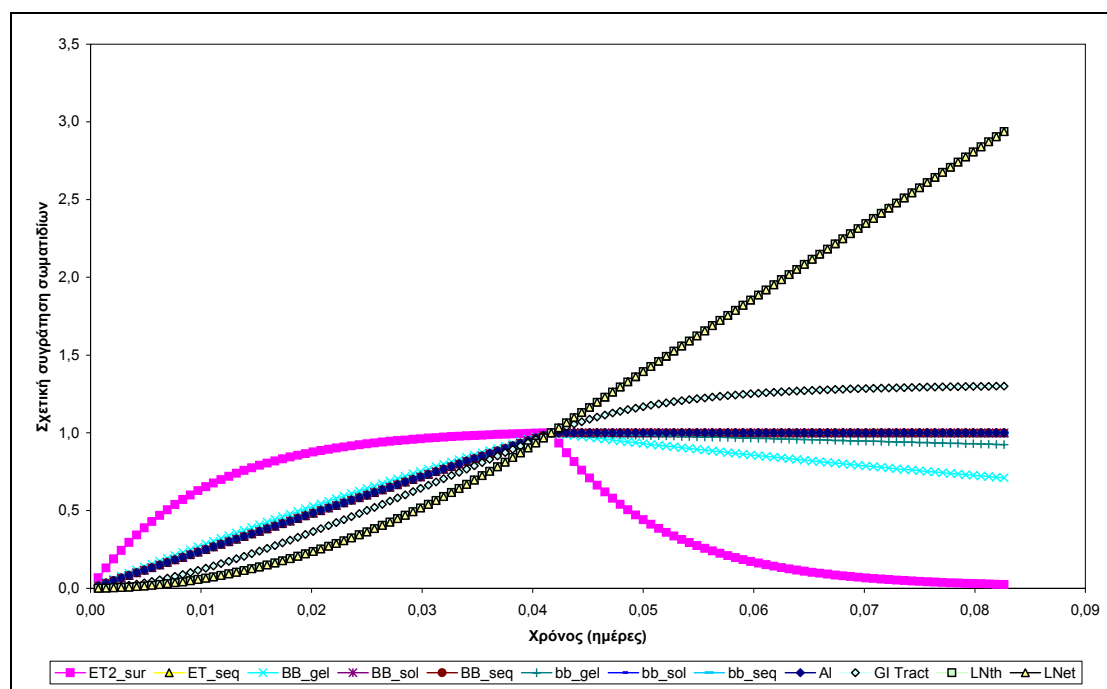
Στο διάγραμμα της εικόνας 22 δίνονται ενδεικτικά οι καμπύλες συσσώρευσης σωματιδίων  $2,5\mu\text{m}$  στα τμήματα του αναπνευστικού συστήματος (οι υπολογισμοί έγιναν με το μοντέλο AEROEXPDOSE). Η δόση αφορά ενήλικα Καυκάσιο άντρα που εκτελεί ήπια εργασία και εκτίθεται για μια ώρα σε συγκέντρωση  $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η συσσωρευμένη-κατακρατημένη μάζα υπολογίζεται και για μια ώρα ακόμα μετά το τέλος της έκθεσης ώστε να διακριθεί ο ρυθμός απομάκρυνσης κάθε περιοχής. Παρατηρούμε ότι η επιφάνεια των αεραγωγών στην περιοχή ET<sub>2</sub> και η περιοχή AI δέχονται το μεγαλύτερο μέρος της μάζας των σωματιδίων. Ειδικά για την περιοχή ET<sub>2</sub>\_sur ο ρυθμός εναπόθεσης είναι τόσο υψηλός ώστε τα σωματίδια να συσσωρεύονται ως το τέλος της έκθεσης παρά τον υψηλό ρυθμό απομάκρυνσης τους. Η κυψελιδική περιοχή από την άλλη καθαρίζεται πολύ αργά όπως φαίνεται μετά το τέλος της έκθεσης στο διάγραμμα. Ακόμα φαίνεται η αθροιστική καμπύλη μάζας που μεταφέρεται στο γαστρεντερικό σύστημα μέσω κατάποσης.



**Εικόνα 22:** Απομάκρυνση-μεταφορά σωματιδίων διαστάσεων  $2,5\mu\text{m}$  με συγκέντρωση  $1\mu\text{g}/\text{m}^3$  που απορροφούνται ταχέως στο αίμα από τις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος. Η διάρκεια της έκθεσης είναι 1 ώρα ενώ η μάζα που έχει συσσωρευτεί σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος υπολογίζεται και για 1 ώρα μετά το τέλος της έκθεσης. Οι υπολογισμοί έγιναν με το μοντέλο AEROEXPDOSE.

Οι καμπύλες για τα υπόλοιπα τμήματα του αναπνευστικού βρίσκονται στο κάτω μέρος του διαγράμματος και ακολουθούν την μορφή της καμπύλης για την κυψελιδική περιοχή με διαφορετικές απλά κλίσεις πριν και μετά την πάροδο του χρόνου έκθεσης. Μόνο στους λεμφαδένες η μάζα των σωματιδίων που συσσωρεύεται αυξάνει όλη την περίοδο καθώς σωματίδια μεταφέρονται σε αυτές μέσω των τοιχωμάτων των αγωγών (seq) και από την κυψελιδική περιοχή. Η κινητική της απομάκρυνσης κάθε τμήματος είναι πιο εύκολο να φανεί στο διάγραμμα της εικόνας 23 όπου δίνεται η σχετική συγκράτηση σωματιδίων σε κάθε τμήμα, δηλαδή ο λόγος της μάζας που βρίσκεται στο τμήμα κάθε στιγμή προς τη μάζα που υπάρχει σε αυτό τη στιγμή που παύει η έκθεση (οι υπολογισμοί έγιναν με το μοντέλο AEROEXPDOSE). Έτσι οι ρυθμοί απομάκρυνσης των περιοχών συγκρίνονται άμεσα όλη την περίοδο λαμβάνοντας υπόψη τους ρυθμούς απόθεσης και καθαρισμού και όχι την μάζα που φθάνει σε κάθε τμήμα. Διαπιστώνεται παρόμοια συμπεριφορά όλων των τμημάτων εκτός από την επιφάνεια της περιοχής εκτός θώρακα που καθαρίζεται ταχύτατα στο αίμα, το γαστρεντερικό σύστημα και με εξωτερικούς μηχανισμούς. Ακόμα τα σωματίδια που αποθέτονται στο ταχύ στρώμα βλέννας της βρογχικής περιοχής απομακρύνονται γρηγορότερα. Στο γαστρεντερικό σύστημα, αν και από το

διάγραμμα της εικόνας 22 φαίνεται να είναι σημαντικός αποδέκτης των σωματιδίων που καθαρίζονται από άλλα τμήματα, ο ρυθμός δόσης ελαττώνεται και σταθεροποιείται εφόσον τα περισσότερα σωματίδια στην επιφάνεια της εκτός θώρακα περιοχής απομακρυνθούν. Τέλος οι λεμφαδένες φαίνεται πως επιβαρύνονται περισσότερο από τα υπόλοιπα τμήματα κατά τον καθαρισμό των σωματιδίων αφού λαμβάνουν ένα μεγάλο μέρος αυτών που βρίσκονται στην κυψελιδική περιοχή.



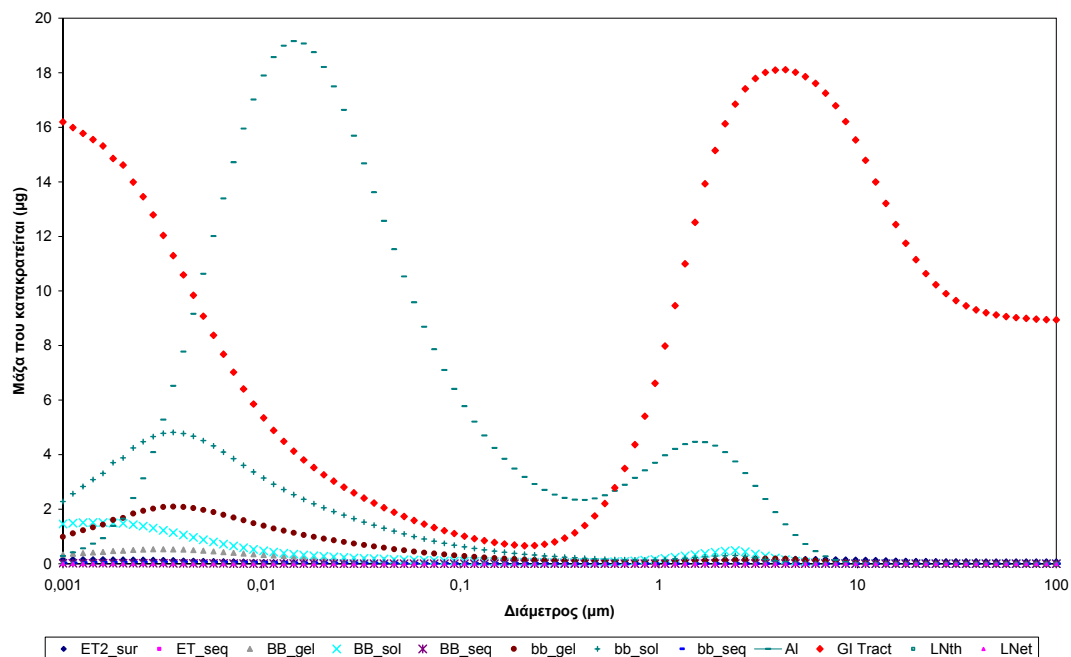
**Εικόνα 23:** Σχετική συγκράτηση σωματιδίων διαστάσεων  $2,5\mu\text{m}$ , με συγκέντρωση  $1\mu\text{g}/\text{m}^3$  που απορροφούνται ταχέως στο αίμα. Η διάρκεια της έκθεσης είναι 1 ώρα ενώ η μάζα που έχει συσσωρευτεί σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος υπολογίζεται και για 1 ώρα μετά το τέλος της έκθεσης. Οι υπολογισμοί έγιναν με το μοντέλο AEROEXPDOSE.

#### 5.4. Παράγοντες που επηρεάζουν την απομάκρυνση σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα

Το μέγεθος των σωματιδίων σχετίζεται κυρίως με τις θέσεις που θα αποτεθούν αρχικά και την ποσότητα τους σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού οπότε επηρεάζει εμμέσως τον καθαρισμό τους (*Tran κ.α., 1999b*). Ο ρυθμός απορρόφησης των σωματιδίων στο αίμα και ο ρυθμός διήθησης τους στις επιφάνειες του αναπνευστικού είναι αντιστρόφως ανάλογος του μεγέθους των σωματιδίων και εξαρτάται από την επιφάνεια τους και τις φυσικοχημικές ιδιότητες τους. Έτσι, τα μικρότερα σωματίδια εισχωρούν ευκολότερα στο ταχέως κινούμενο στρώμα της βλέννας (gel) και καταλήγουν τελικά στο στρώμα sol που κινείται με αργότερο ρυθμό. Σε περίπτωση



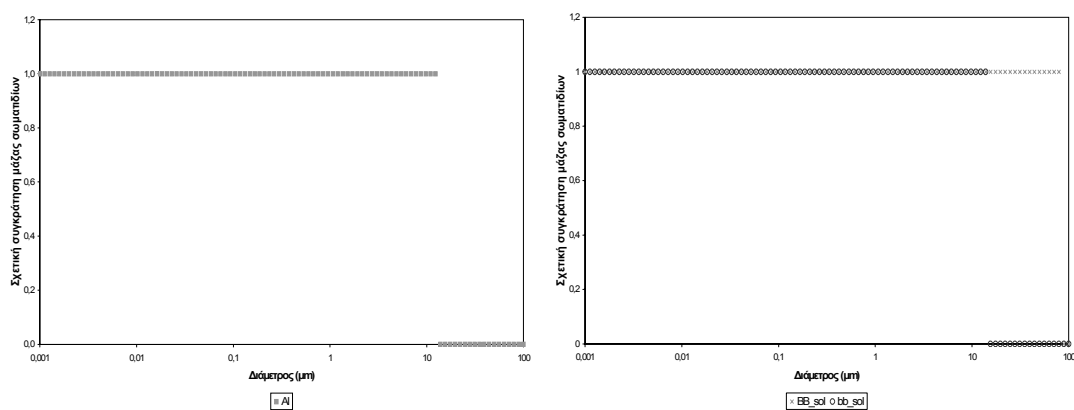
ωστόσο ασυνέχειας στο στρώμα της βλέννας τα μικρά σωματίδια μεταφέρονται στην περιοχή όπου κινούνται με τις βλεφαρίδες ενώ τα μεγάλα συσσωρεύονται στα σημεία ασυνέχειας (Asgharian, Hofmann και Miller, 2001). Η συνολική επίδραση του μεγέθους στον καθαρισμό σωματιδίων δίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 24 όπου δίνεται η συσσώρευση μάζας σωματιδίων μετά από έκθεση μιας ημέρας σε συγκέντρωση  $1\mu\text{g}/\text{m}^3$  συναρτήσει της διαμέτρου τους, για κάθε τμήμα του αναπνευστικού συστήματος.



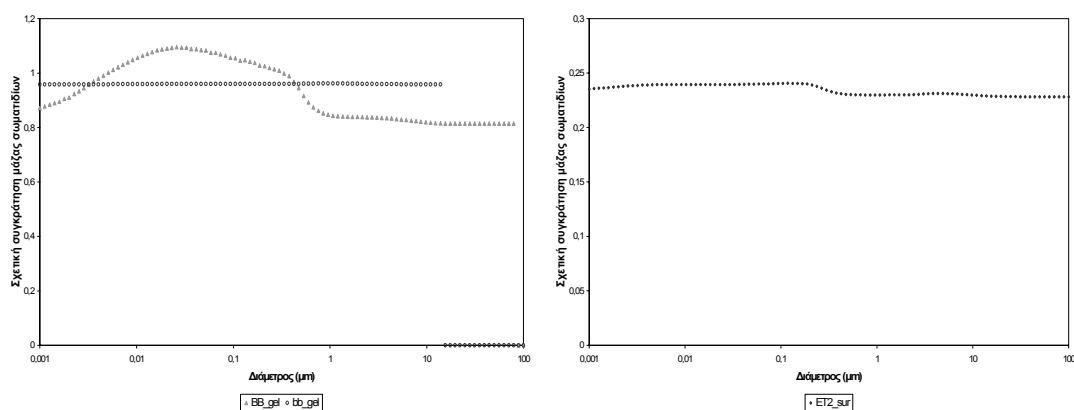
**Εικόνα 24:** Μάζα σωματιδίων που βρίσκεται συσσωρευμένη στα τμήματα του αναπνευστικού συστήματος μετά από έκθεση 1 ημέρας σε συγκέντρωση  $1\mu\text{g}/\text{m}^3$  συναρτήσει της διαμέτρου τους (οι υπολογισμοί έγιναν με το μοντέλο AEROEXPDOSE).

Η μάζα μικρών σωματιδίων που βρίσκεται στο αναπνευστικό στο τέλος της περιόδου είναι σημαντική για τα περισσότερα τμήματα του αναπνευστικού συστήματος σε αντίθεση με τα μεγάλα που με αρχικό σταθμό την επιφάνεια της εκτός θώρακα περιοχής μεταφέρονται στο γαστρεντερικό σύστημα. Η κατακρατημένη μάζα παρουσιάζει ελάχιστο για σωματίδια διαμέτρου συσσωματώματος. Ωστόσο αυτό δεν οφείλεται στο ρυθμό απομάκρυνσης τους αλλά στον μικρό ρυθμό δόσης τους. Ειδικότερα, αν εξετάσουμε την σχετική συγκράτηση (ως ο λόγος της συσσώρευσης στο τέλος της περιόδου με τη συνολική δόση) των σωματιδίων στα τμήματα του αναπνευστικού που αποθέτονται αρχικά τα σωματίδια, όπως δίνεται στα διαγράμματα των εικόνων 25-27 θα παρατηρήσουμε πως τα σωματίδια αυτού του μεγέθους

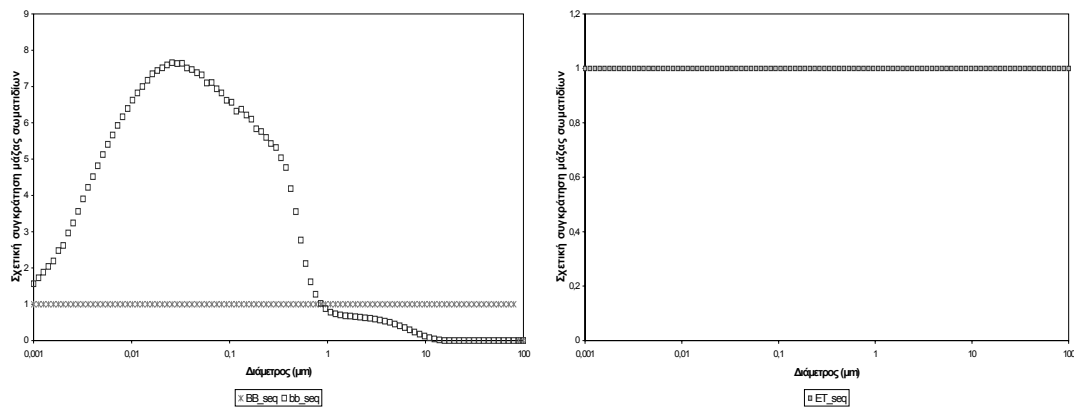
παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά με τους πυρήνες εκτός από τα τμήματα bb\_gel και bb\_seq. Σε αυτά τα τμήματα το μέγεθος των σωματιδίων φαίνεται πως επηρεάζει την απομάκρυνση περισσότερο απ' ό,τι στα υπόλοιπα τμήματα του αναπνευστικού. Στα περισσότερα από τα άλλα τμήματα η σχετική συγκράτηση είναι ίση με τη μονάδα για κάθε διάμετρο και σε κάποια πλησιάζει το μηδέν για σωματίδια όμως πολύ μεγαλύτερα από PM<sub>10</sub>. Μόνο στην επιφάνεια της περιοχής εκτός θώρακα η σχετική συγκράτηση για όλες τις διαμέτρους είναι θετική και μικρότερη της μονάδας και άρα ο ρυθμός καθαρισμού είναι μεγαλύτερος του ρυθμού δόσης. Επομένως, βραχυχρόνια έκθεση με σταθερό μικρό ρυθμό δόσης μπορεί να επιφέρει υψηλό φόρτο στους πνεύμονες ειδικά για μικρά σωματίδια.



**Εικόνα 25:** Σχετική συγκράτηση σωματιδίων (α) στην κυψελιδική περιοχή των πνευμόνων και (β) στο αργά κινούμενο στρώμα βλέννας των περιοχών BB και bb, συναρτήσει της διαμέτρου τους μετά από έκθεση 1 ώρας σε συγκέντρωση 1 μg/m<sup>3</sup>. Οι υπολογισμοί έγιναν με το μοντέλο AEROEXPDOSE.



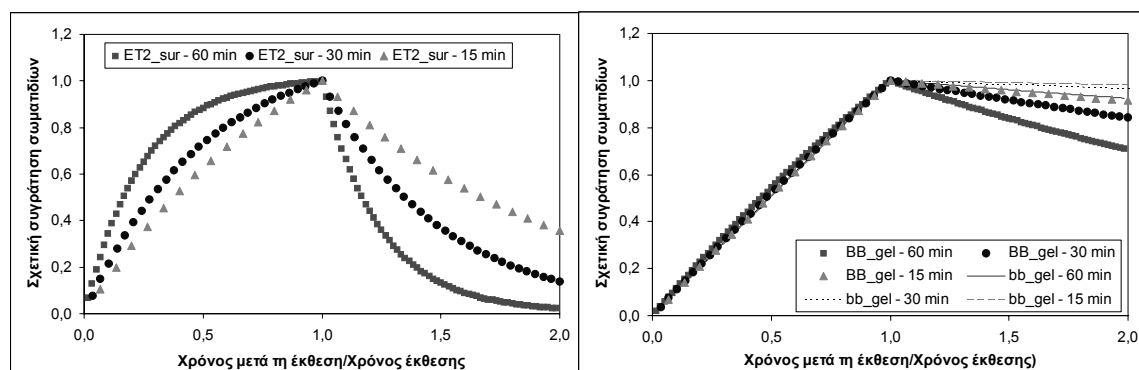
**Εικόνα 26:** Σχετική συγκράτηση σωματιδίων (α) στο γρήγορα κινούμενο στρώμα βλέννας των περιοχών BB και bb και (β) στην επιφάνεια της περιοχής ET<sub>2</sub>, συναρτήσει της διαμέτρου τους μετά από έκθεση 1 ώρας σε συγκέντρωση 1 μg/m<sup>3</sup>. Οι υπολογισμοί έγιναν με το μοντέλο AEROEXPDOSE.



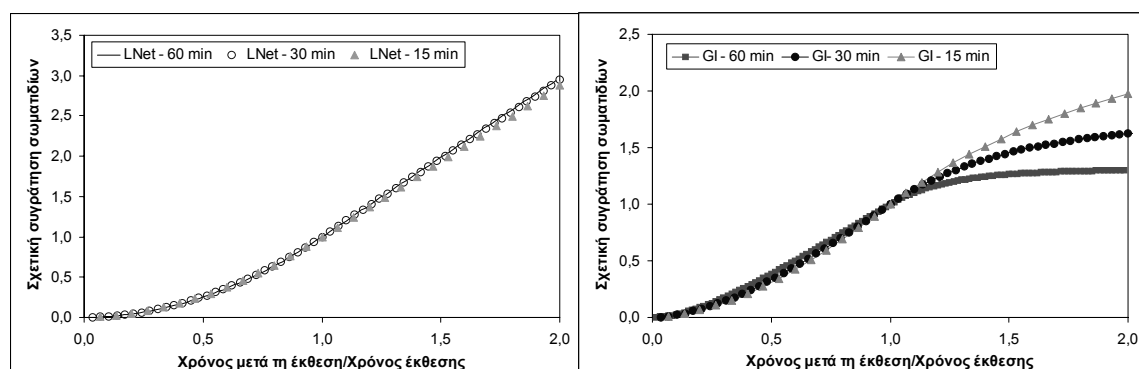
**Εικόνα 27:** Σχετική συγκράτηση σωματιδίων στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού των περιοχών (α) BB και bb και (β) ET, συναρτήσει της διαμέτρου τους μετά από έκθεση 1 ώρας σε συγκέντρωση  $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Οι υπολογισμοί έγιναν με το μοντέλο AEROEXPDOSE.

Ένας ακόμα παράγοντας διαφοροποίησης του ρυθμού καθαρισμού έχει βρεθεί πως αποτελεί η διάρκεια έκθεσης (*Gradon κ.α., 1996*). Στα διαγράμματα των εικόνων 28 και 29 δίνεται η σχετική συγκράτηση σωματιδίων διαμέτρου  $2,5\mu\text{m}$  στην επιφάνεια της εκτός θώρακα περιοχής, το ταχύ στρώμα βλέννας στους βρόγχους και τα βρογχιόλια, τους λεμφαδένες που αποστραγγίζουν την ET περιοχή και το γαστρεντερικό σύστημα. Στα υπόλοιπα τμήματα του αναπνευστικού τα αποτελέσματα δεν εξαρτώνται από τη διάρκεια της έκθεσης ενώ τα ίδια προφίλ παρατηρούνται και για διαφορετικές διαμέτρους σωματιδίων. Μεγαλύτερος ρυθμός απομάκρυνσης παρατηρείται στην περίπτωση υψηλότερης διάρκειας έκθεσης που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη δόση προς το γαστρεντερικό σύστημα και τους λεμφαδένες. Υποδιπλασιασμός του χρόνου έκθεσης από 60min σε 30min προκαλεί αύξηση της τελικής μάζας στην επιφάνεια της ET περιοχής κατά 5,65 φορές ενώ αν η διάρκεια έκθεσης μειωθεί στα 15min η αύξηση είναι κατά 2,53 φορές μεγαλύτερη. Στο στρώμα βλέννας και των δυο περιοχών, BB και bb, η επίδραση είναι αρκετά μικρότερη (1,18 για υποδιπλασιασμό στην BB). Η επίδραση της διάρκειας έκθεσης στο ρυθμό καθαρισμού των σωματιδίων σχετίζεται με την δόση που έχει λάβει ο οργανισμός στο τέλος της περιόδου έκθεσης.

Η απομάκρυνση ακόμα εξαρτάται από την πυκνότητα, την επιφανειακή σύσταση και από την διαλυτότητα των σωματιδίων ειδικά για την AI περιοχή καθώς η βασική μη απορροφητική διεργασία καθαρισμού είναι η απομάκρυνση από μακροφάγους (*EPA, 2002*).



**Εικόνα 28:** Σχετική συγκράτηση σωματιδίων (α) στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού της περιοχής ET<sub>2</sub> και (β) στο ταχέως κινούμενο στρώμα βλέννας των περιοχών BB και bb. Θεωρείται έκθεση σε συγκέντρωση 1μg/m<sup>3</sup> για ενήλικα καυκάσιο άντρα που εκτελεί ήπια εργασία. Οι υπολογισμοί έγιναν με το μοντέλο AEROEXPDOSE.



**Εικόνα 29:** Σχετική συγκράτηση σωματιδίων (α) στους λεμφαδένες της περιοχής ET και (β) στο γαστρεντερικό σύστημα (σχετική δόση). Θεωρείται έκθεση σε συγκέντρωση 1μg/m<sup>3</sup> για ενήλικα καυκάσιο άντρα που εκτελεί ήπια εργασία. Οι υπολογισμοί έγιναν με το μοντέλο AEROEXPDOSE.

Οι βιολογικοί παράγοντες τροποποίησης του ρυθμού καθαρισμού διακρίνονται σε παροδικούς (π.χ. άσκηση) που επιδρούν μόνο κατά την διάρκεια της έκθεσης και σχετίζονται με στιγμιαία έκθεση και σε μόνιμους όπως το φύλο και οι χρόνιες ασθένειες που σχετίζονται με χρόνια έκθεση. Το φύλο και η ηλικία του ατόμου επηρεάζουν τον καθαρισμό σωματιδίων έμμεσα επιδρώντας στην εναπόθεση τους, δηλαδή της αρχικές θέσεις τους στο αναπνευστικό σύστημα. Όσο αφορά τη δραστηριότητα έχει βρεθεί πως αναπνέοντας με μεγάλο όγκο ροής ο ρυθμός καθαρισμού από την AI περιοχή αυξάνεται (EPA, 2002). Ωστόσο, ο κύριος βιολογικός παράγοντας διαφοροποίησης του ρυθμού καθαρισμού είναι οι ασθένειες του αναπνευστικού συστήματος. Έτσι σε άτομα με χρόνια ιγμορίτιδα, ρινίτιδα ή κυστική ινωμάτωση ο ρυθμός καθαρισμού μέσω της ρινικής βλέννας είναι πιο αργός σε σχέση με υγιή άτομα όπως και αυτός μέσω της βρογχικής βλέννας για άτομα με βρογχικό καρκίνωμα, χρόνια βρογχίτιδα, άσθμα και διάφορες μολύνσεις του

αναπνευστικού. Ο βήχας βέβαια για άτομα με παθήσεις του αναπνευστικού είναι ένας μηχανισμός καθαρισμού της TB περιοχής αλλά συχνά προκαλεί ερεθισμό. Ακόμα σε άτομα με χρόνια βρογχίτιδα αν και βρέθηκε πως ο καθαρισμός είναι υψηλότερος σε σχέση με υγιή άτομα μετά από 72 ώρες από την έκθεση αυτό σχετίζεται με την διαφοροποίηση στην εναπόθεση λόγω της έμφραξης τμημάτων του αναπνευστικού και όχι στο βήχα που σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να δυσχεραίνει την κατάσταση (EPA, 2002). Επιπλέον λόγος διαφοροποίησης είναι η ακεραιότητα του επιθηλίου των πνευμόνων που εξαρτάται από τις ασθένειες ή τον ερεθισμό λόγω εισπνοής χημικών και επηρεάζει τον ρυθμό μετεγκατάστασης των σωματιδίων (αυξάνεται αν υπάρχει βλάβη του επιθηλίου) (ICRP, 1994).

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

## 6. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΥ ΔΟΣΗΣ AEROEXPDOSE

### 6.1. Γενικά

Το μοντέλο AEROEXPDOSE αναπτύχθηκε για τον καθορισμό της δόσης σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα και της συσσώρευση-κατακράτησης τους σε αυτό μετά από συγκεκριμένο χρόνο. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιεί βασίζεται στο μοντέλο του αναπνευστικού συστήματος (HRTM) της διεθνής υπηρεσίας για τη προστασία από τη ραδιενέργεια (ICRP). Το μοντέλο υπολογίζει την εναπόθεση των σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα χρησιμοποιώντας τις ημειμπειρικές εξισώσεις που περιγράφονται στην έκδοση 66 της ICRP. Ο καθαρισμός σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα εκτιμάται έμμεσα με τον υπολογισμό της συσσώρευσης σωματιδίων ενώ ταυτόχρονα υπολογίζεται η ποσότητα των σωματιδίων που μεταφέρεται στο γαστρεντερικό σύστημα και το αίμα. Μπορεί να εφαρμοστεί για σωματίδια μονοδιάσπορα και πολυδιάσπορα με διαμέτρους που κυμαίνονται από 0,001μm έως 100μm. Δε λαμβάνει υπόψη την υγροσκοπικότητα των σωματιδίων και

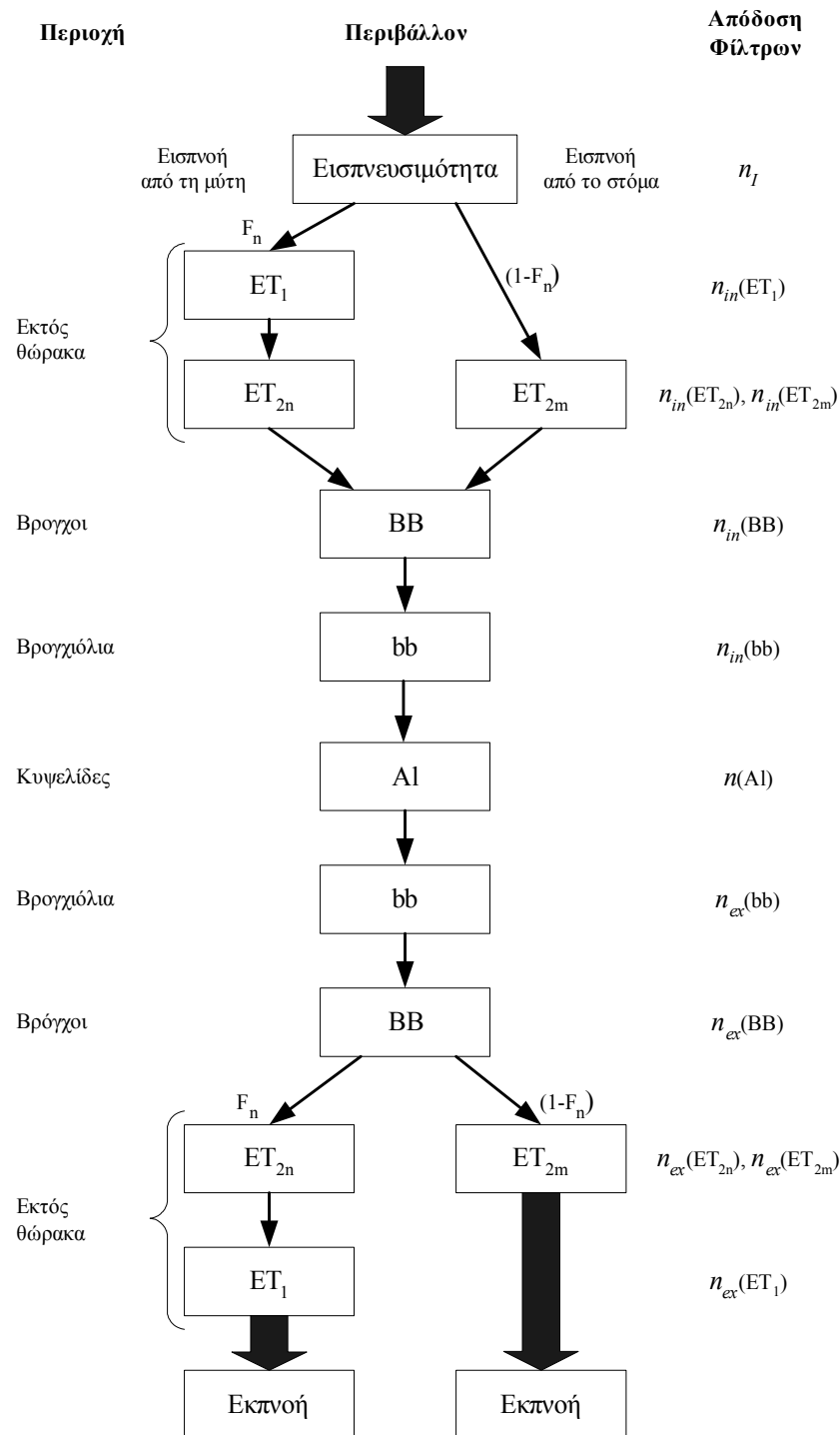
δεν έχει σχεδιαστεί για έκθεση σε ινώδη σωματίδια ή χαλαζία που οι φυσικοχημικές τους ιδιότητες μπορεί να επιδρούν στην κινητική της απομάκρυνσης (ICRP, 1994). Παρακάτω δίνεται ο τρόπος υπολογισμού της δόσης και συσσώρευσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα με το μοντέλο AEROEXPDOSE. Περιγράφεται η θεωρία που χρησιμοποιείται και η υπολογιστική διαδικασία, με ελάχιστες τεχνικές λεπτομέρειες για τις οποίες ο αναγνώστης παραπέμπεται στο παράρτημα. Ακόμα, δίνονται οι περιορισμοί του μοντέλου και τέλος συγκρίνεται με άλλα ημιεμπειρικά και μη μοντέλα ως προς τα αποτελέσματα και τις δυνατότητες του.

## 6.2. Εναπόθεση σωματιδίων στο αναπνευστικό

Η μεθοδολογία υπολογισμού της εναπόθεσης σωματιδίων βασίζεται στις ημιεμπειρικές εξισώσεις που προτείνονται στο μοντέλο HRTM της ICRP. Το αναπνευστικό σύστημα διακρίνεται σε 5 περιοχές, εκτός του θώρακα στις ET<sub>1</sub> και ET<sub>2</sub>, στο θώρακα στις BB και bb και στην περιοχή των κυψελίδων AI, όπως περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 2.

Σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος η έκθεση περιορίζεται αρχικά με την εισπνευσσιμότητα και η εναπόθεση υπολογίζεται με τη βοήθεια των ημιεμπειρικών εξισώσεων που δίνονται στους πίνακες 4 και 5. Οι εξισώσεις αυτές έχουν προκύψει από πειραματικές μετρήσεις που έγιναν σε ενήλικες εθελοντές καθώς και σε ομοιώματα του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος. Καθορίζουν την απόθεση σωματιδίων λόγω καθίζησης, πρόσκρουσης και διασποράς σχετίζοντας τη με τις φυσικές ιδιότητες των σωματιδίων και την ροή του αέρα, δηλαδή τις παραμέτρους της φυσιολογίας.

Αναλυτικότερα, το ποσοστό εναπόθεσης σωματιδίων σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος κατά την εισπνοή και εκπνοή υπολογίζεται θεωρώντας το αναπνευστικό σύστημα ως μια σειρά από φίλτρα μέσα από τα οποία περνά  $\phi$  ποσοστό του όγκου αέρα και κατακρατούνται σωματίδια με απόδοση  $\eta$  (εικόνα 30). Η αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων λόγω υγροσκοπικότητας δεν λαμβάνεται υπόψη κι έτσι η εναπόθεση υπολογίζεται βάσει του μεγέθους με το οποίο τα σωματίδια εισέρχονται στο αναπνευστικό σύστημα.



**Εικόνα 30:** Εμπειρική αναπαράσταση της εναπόθεσης σωματιδίων στις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος κατά τη διάρκεια μιας αναπνοής με τον αέρα να μεταφέρεται διαμέσου μιας σειράς από φίλτρα. Η αναπνοή μπορεί να πραγματοποιείται από τη μύτη ( $F_n$  το κλάσμα εισπνοής από τη μύτη) ή από το στόμα ( $1 - F_n$ ) ή και από τα δύο σε συνδυασμό. Το κλάσμα των εισπνευσμένων σωματιδίων ορίζεται ως εισπνευστικότητα ενώ με  $n_{in}$  και  $n_{out}$  εκφράζεται η απόδοση των φίλτρων κατά την εισπνοή και εκπνοή αντίστοιχα (ICRP, 1994).

Το ποσοστό του όγκου του αέρα  $\phi$  που περνά από κάθε φίλτρο δίνεται από τις εξισώσεις 8 και 9 για την εισπνοή και εκπνοή. Το πλήθος  $N$  των φίλτρων είναι 9 όταν εισπνέουμε και εκπνέουμε από τη μύτη και 7 όταν συμμετέχει μόνο το στόμα.

$$\phi_j = 1, \text{ για } j=0$$

$$\text{Εισπνοή: } \phi_j = 1 - \frac{1}{V_T} \sum_{jj=0}^{j-1} v_{jj}, \text{ για } 1 \leq j \leq (N+1)/2 \quad (8)$$

$$\text{Εκπνοή: } \phi_j = \phi_{N-j+1}, \text{ για } j = (N+3)/2, N \quad (9)$$

Η εναπόθεση  $DE$  σε κάθε φίλτρο  $j$  δίνεται από την σχέση 10. Το ποσοστό της μάζας σωματιδίων που αποθέεται σε κάθε περιοχή εκφράζεται με το  $n_j$ . Πριν εισέλθει ο αέρας στο πρώτο φίλτρο η συγκέντρωση σωματιδίων που μεταφέρει και η οποία θα αποτελέσει την πιθανή δόση στις περιοχές του αναπνευστικού ελαττώνεται με προ-φιλτράρισμα που επιτρέπει την είσοδο στο αναπνευστικό σύστημα μόνο του εσπνεύσιμου κλάσματος των σωματιδίων. Η εισπνευσσιμότητα συμβολίζεται με  $n_I$  και υπολογίζεται με τη σχέση 7.

$$DE_j = n_j \phi_j \prod_{jj=0}^{j-1} (1 - n_{jj}) \text{ με } n_0 = 1 - n_I \quad (10)$$

Το ποσοστό που αποθέεται σε κάθε περιοχή αν δεν λάβουμε υπόψη το φιλτράρισμα από τους προγενέστερους αεραγωγούς υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση 11 ως άθροισμα του ποσοστού απόθεσης εξαιτίας της πρόσκρουσης,  $n_{ae}$ , και διασποράς,  $n_{th}$ . Με  $ae$  συμβολίζεται το αεροδυναμικό και με  $th$  το θερμοδυναμικό ισοδύναμο μέγεθος.

$$n_i = (n_{ae}^2 + n_{th}^2)^{1/2} \quad (11)$$

Τα ποσοστά  $n_{ae}$  και  $n_{th}$  υπολογίζονται με τις εξισώσεις που δίνονται στους πίνακες 4 και 5. Όπως φαίνεται η γενική εξίσωση υπολογισμού είναι η  $n = 1 - \exp(-aR^p)$  όπου  $R$  είναι η παράμετρος από την οποία εξαρτάται η απόθεση, π.χ το γινόμενο  $d_{ae}^2 \dot{V}_n$  για την απόθεση στη μύτη λόγω πρόσκρουσης. Η παράμετρος  $R$  διαφοροποιείται ανάλογα το άτομο χρησιμοποιώντας τον όρο SF που αναφέρεται στην ανατομική ποικιλότητα. Ειδικότερα, ως  $SF_t$ ,  $SF_b$  και  $SF_A$  ορίζονται ο λόγος του χαρακτηριστικού μεγέθους των αεραγωγών στον ενήλικα Καυκάσιο άντρα (πρότυπο) προς το μέγεθος



τους στο αντικείμενο της μελέτης. Οι παράμετροι ανατομίας και φυσιολογίας ενός ενήλικα Καυκάσιου άντρα που εκτελεί ήπια εργασία, και δίνονται στον πίνακα 2, χρησιμοποιούνται ως τιμές αναφοράς. Ως χαρακτηριστικά μεγέθη των αεραγωγών σε σχέση με τις παραπάνω παραμέτρους ορίζονται η διάμετρος της τραχείας, του πρώτου βρογχιολίου (γενιά 9) και του πρώτου αναπνευστικού βρογχιολίου (γενιά 16). Οι όροι  $\alpha$  και  $p$  είναι συντελεστές που προέρχονται από προσέγγιση πραγματικών πειραματικών καμπυλών με τις θεωρητικές καμπύλες. Ειδικά ο όρος  $\alpha$  σε συνδυασμό με την τυπική απόκλιση εκφράζει το 95% όριο εμπιστοσύνης των αποτελεσμάτων.

Στους μικρότερους αεραγωγούς του αναπνευστικού συστήματος η απόθεση εξαρτάται από τον χρόνο παραμονής του αέρα σε αυτές. Οι χρόνοι μετάβασης του αέρα στις περιοχές BB, bb και AI δίνονται στις εξισώσεις 12-14.

$$t_B = \frac{V_D(BB)}{\dot{V}} \left( 1 + \frac{0.5V_T}{FRC} \right) \quad (12)$$

$$t_b = \frac{V_D(bb)}{\dot{V}} \left( 1 + \frac{0.5V_T}{FRC} \right) \quad (13)$$

$$t_A = \frac{V_T - V_D(ET) - [V_D(BB) + V_D(bb)] \left( 1 + \frac{V_T}{FRC} \right)}{\dot{V}} \quad (14)$$

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

**Πίνακας 4:** Προτεινόμενες τιμές παραμέτρων του μοντέλου εναπόθεσης για το κλάσμα του αέρα που λαμβάνεται με αναπνοή από μύτη, για οποιοδήποτε εκτεθειμένο άτομο, ως συναρτήσεις των μεταβλητών που σχετίζονται με την αναπνοή και την ανατομία (*ICRP, 1994*).

Φ	Α	Σ	Η	Φίλτρο $j$	Περιοχή	Τοπική Απόδοση Εναπόθεσης, $\eta_i$						Κλάσμα Όγκου $\varphi_j^a$			
						Αεροδυναμικά			Θερμοδυναμικά						
						$n_{ae} = 1 - \exp(-aR^p)$									
						$\alpha$	$R$	$p$	$\alpha$	$R$	$p$				
Ε	Ι	Σ	Π	Ν	Ο	Η	1	$ET_1^b$	$3,0 \times 10^{-4}$	$d_{ae}^2 \dot{V}_n SF_t^3$	1	18	$D(\dot{V}_n SF_t)^{-1/4}$	1/2	1
							2	$ET_2^c$	$5,5 \times 10^{-5}$	$d_{ae}^2 \dot{V}_n SF_t^3$	1,17	15,1	$D(\dot{V}_n SF_t)^{-1/4}$	0,538	1
							3	BB	$4,08 \times 10^{-6}$	$d_{ae}^2 \dot{V}_n SF_t^{2,3}$	1,152	$22,02 SF_t^{1,24} \psi_{th}^d$	$D_{tB}$	0,6391	$1 - \frac{V_d(ET)}{V_T}$
							4	bb	0,1147	$(0,056 + t_b^{1,5}) \times d_{ae}^{t_b^{-0,25}}$	1,173	-76,8+167 $SF_b^{0,65}$	$D_{tB}$	0,5676	$1 - \frac{[V_d(ET) + V'_d(BB)]}{V_T}$
							5	Al	$0,146 \cdot SF_A^{0,98}$	$d_{ae}^2 t_A$	0,6495	$1710 + 103 SF_A^{2,13}$	$D_{tA}$	0,6101	$1 - \frac{[V_d(ET) + V'_d(BB) + V'_d(bb)]}{V_T}$
Ε	Κ	Π	Ν	Ο	Η	6	bb	0,1147	$(0,056 + t_b^{1,5}) \times d_{ae}^{t_b^{-0,25}}$	1,173	-76,8+167 $SF_b^{0,65}$	$D_{tB}$	0,5676	$1 - \frac{[V_d(ET) + V'_d(BB)]}{V_T}$	
						7	BB	$2,04 \times 10^{-6}$	$d_{ae}^2 \dot{V}_n SF_t^{2,3}$	1,152	$22,02 SF_t^{1,24} \psi_{th}^d$	$D_{tB}$	0,6391	$1 - \frac{V_d(ET)}{V_T}$	
						8	$ET_2^d$	$5,5 \times 10^{-5}$	$d_{ae}^2 \dot{V}_n SF_t^3$	1,17	15,1	$D(\dot{V}_n SF_t)^{-1/4}$	0,538	1	
						9	$ET_1^e$	$3,0 \times 10^{-4}$	$d_{ae}^2 \dot{V}_n SF_t^3$	1	18	$D(\dot{V}_n SF_t)^{-1/4}$	1/2	1	

**Πίνακας 5:** Προτεινόμενες τιμές παραμέτρων του μοντέλου εναπόθεσης για το κλάσμα του αέρα που λαμβάνεται με αναπνοή από το στόμα, για οποιοδήποτε εκτεθειμένο άτομο, ως συναρτήσεις των μεταβλητών που σχετίζονται με την αναπνοή και την ανατομία (*ICRP, 1994*).

Φ	Α	Σ	Η	Φύλτρο $j$	Περιοχή	Τοπική Απόδοση Εναπόθεσης, $n_i$						Κλάσμα Όγκου $\varphi_j^a$
						Αεροδυναμικά			Θερμοδυναμικά			
						$n_{ae} = 1 - \exp(-aR^p)$						
						$\alpha$	$R$	$p$	$\alpha$	$R$	$p$	
E	I	Σ	Π	N	O	H						1
				1	ET <sub>2</sub> <sup>c</sup>	$1,1 \times 10^{-4}$	$d_{ae}^2 (\dot{V}SF_t^3)^{0,6} (V_T SF_t^2)^{-0,2}$	1,4	9	$D(\dot{V}_n SF_t)^{-1/4}$	1/2	
				2	BB	$4,08 \times 10^{-6}$	$d_{ae}^2 \dot{V}SF_t^{2,3}$	1,152	$22,02 SF_t^{1,24} \psi_{th}^d$	Dt <sub>B</sub>	0,6391	$1 - \frac{V_b(ET)}{V_T}$
				3	bb	0,1147	$(0,056 + t_b^{1,5}) \times d_{ae}^{t_b^{-0,25}}$	1,173	-76,8+167 SF <sub>b</sub> <sup>0,65</sup>	Dt <sub>b</sub>	0,5676	$1 - \frac{[V_b(ET) + V'_b(BB) + V'_b(BB)]}{V_T}$
				4	AI	$0,146 \cdot SF_A^{0,98}$	$d_{ae}^2 t_A$	0,6495	$1710 + 103 SF_A^{2,13}$	Dt <sub>A</sub>	0,6101	$1 - \frac{[V_b(ET) + V'_b(BB) + V'_b(bb)]}{V_T}$
				5	bb	0,1147	$(0,056 + t_b^{1,5}) \times d_{ae}^{t_b^{-0,25}}$	1,173	-76,8+167 SF <sub>b</sub> <sup>0,65</sup>	Dt <sub>b</sub>	0,5676	$1 - \frac{[V_b(ET) + V'_b(BB)]}{V_T}$
				6	BB	$2,04 \times 10^{-6}$	$d_{ae}^2 \dot{V}SF_t^{2,3}$	1,152	$22,02 SF_t^{1,24} \psi_{th}^d$	Dt <sub>B</sub>	0,6391	$1 - \frac{V_b(ET)}{V_T}$
				7	ET <sub>2</sub> <sup>c</sup>	$1,1 \times 10^{-4}$	$d_{ae}^2 (\dot{V}SF_t^3)^{0,6} (V_T SF_t^2)^{-0,2}$	1,4	9	$D(\dot{V}_n SF_t)^{-1/4}$	1/2	1

<sup>a</sup>: όπου  $V'_d(BB) = V_d(BB) \left(1 + \frac{V_T}{FRC}\right)$  και  $V'_d(bb) = V_d(bb) \left(1 + \frac{V_T}{FRC}\right)$

<sup>b</sup>:  $n_{ae} = 0,5[1 - 1/(aR^p + 1)]$  και  $n_{th} = 0,5[1 - \exp(-aR^p)]$

<sup>c</sup>:  $n_{ae} = 1 - 1/(aR^p + 1)$  και  $n_{th} = 1 - \exp(-aR^p)$

<sup>d</sup>:  $\psi_{th}$  είναι ένας εμπειρικός συντελεστής για την προσομοίωση της εναπόθεσης μικρών σωματιδίων στους βρόγχους λόγω τυρβώδους ροής και υπολογίζεται με τη σχέση  $\psi_{th} = 1 + 100 \exp[-\log(100 + 10/d_{th}^{0,9})^2]$  (15)

Η σημαντικότερη ωστόσο παράμετρος στον καθορισμό της εναπόθεσης είναι το μέγεθος του σωματιδίου το οποίο συχνά είναι γνωστό ως ισοδύναμη αεροδυναμική διάμετρος (λόγω των οργάνων συλλογής) ή ισοδύναμη κατ' όγκο διάμετρο. Για να υπολογιστεί η εναπόθεση του σωματιδίου λόγω διασποράς θα πρέπει να υπολογιστεί το ισοδύναμο θερμοδυναμικό μέγεθος του. Ο υπολογισμός πραγματοποιείται με μια διαδικασία δοκιμής και σφάλματος. Γνωρίζοντας ότι η αεροδυναμική με την θερμοδυναμική διάμετρο σχετίζονται με την εξίσωση 4, θεωρούμε μια αρχική τιμή της θερμοδυναμικής διαμέτρου που ορίζεται ως:

$$d_e(1) = d_{ae} \sqrt{\frac{\chi}{\rho}} \quad (16)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται ως συντελεστής Cunningham για το σωματίδια διαμέτρου  $d_e$  με την βοήθεια της εξίσωσης 2. Το αποτέλεσμα αντικαθιστάται στην εξίσωση 3 και προκύπτει μια νέα ισοδύναμη θερμοδυναμική διάμετρος. Εάν είναι ίση με την  $d_e(1)$  ή η διαφορά τους δεν ξεπερνά το καθορισμένο σφάλμα  $dCd = |d_e(1) - d_e(2)|$  τότε η διάμετρος αυτή αποτελεί το ισοδύναμο θερμοδυναμικό μέγεθος  $d_{th}$  και υπολογίζονται ο συντελεστής διάχυσης  $D$  (εξίσωση 17) και η παράμετρος  $\psi_{th}$  (εξίσωση 15), διαφορετικά μεταβάλλουμε την αρχική τιμή του  $d_e$  κατά  $dCd$  και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία.

$$D = \frac{k \cdot C(d_{th}) \cdot T \cdot 1,0132 \times 10^{13}}{3\pi\mu \cdot d_{th}} \quad (17)$$

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

$$d_{th} = d_e \left[ 1 + 3 \exp(-2,20 \times 10^3 d_e) \right] \quad (18)$$

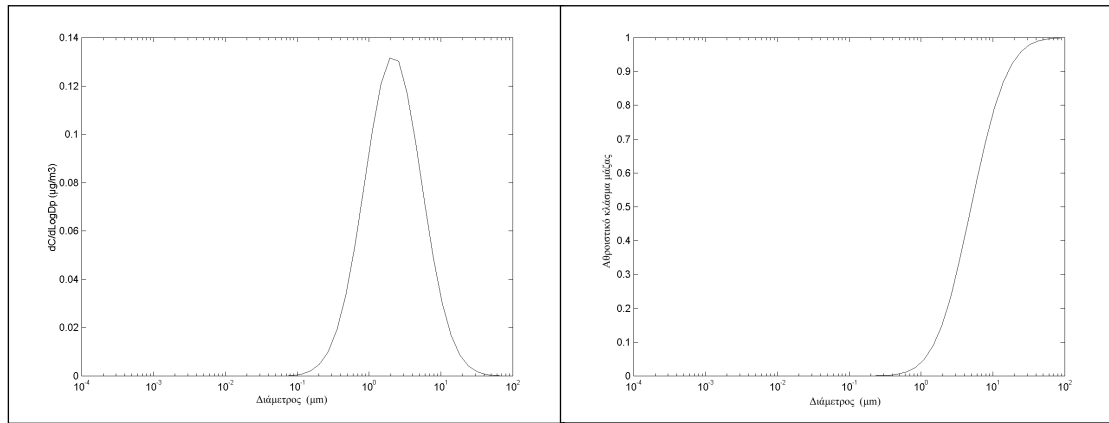
Στο μοντέλο το όριο που δεν πρέπει να ξεπερνά ο όρος  $dCd$  ώστε η διαδικασία επανάληψης και σφάλματος να σταματά έχει οριστεί ανάλογα την αεροδυναμική διάμετρο των σωματιδίων σε  $10^{-4}\mu\text{m}$  για  $d_{ae} \geq 1\mu\text{m}$ , σε  $10^{-5}\mu\text{m}$  για  $1\mu\text{m} > d_{ae} \geq 0,1\mu\text{m}$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

Η σωματιδιακή ύλη βρίσκεται στη φύση υπό τη μορφή αερολυμάτων που απαρτίζονται από πλήθος σωματιδίων με διαφορετικές διαμέτρους. Η απόθεση των

σωματιδίων αυτών στο αναπνευστικό σύστημα υπολογίζεται με την εξίσωση 19, όπου  $p$  είναι το ποσοστό των σωματιδίων με διαμέτρους στην περιοχή  $\Delta d_{ae}$  και  $DE$  η εναπόθεση τους.

$$DE_A(MMAD, \sigma_g) = \sum_0^{\infty} DE(d_{ae}) p_A(d_{ae}) \Delta d_{ae} \quad (19)$$

Αναλυτικότερα, η υπολογιστική διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο περιλαμβάνει τον υπολογισμό του ποσοστού εναπόθεσης σε 500 σημεία μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής διαμέτρου. Η ελάχιστη τιμή λαμβάνεται ως  $d_{ae}-4\sigma_g$  και η μέγιστη είναι τα  $100\mu m$ . Για παράδειγμα, η λογαριθμική κανονική κατανομή σωματιδίων της εικόνας 31α μοιράζεται σε τμήματα (περιοχές μεγέθους-size bins).



**Εικόνα 31:** Λογαριθμο-κανονική κατανομή σωματιδίων και διάγραμμα συνάρτησης πυκνότητας-πιθανότητας της κατανομής ή αθροιστική καμπύλη κατανομής.

Για κάθε τμήμα το ποσοστό της ολικής μάζας που αντιστοιχεί σε αυτό βρίσκεται από την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής (εικόνα 31β). Το ποσοστό μάζας που αποτελείται από σωματίδια διαμέτρου έως  $d_{ae}$  δίνεται ως το ολοκλήρωμα της καμπύλης σε αυτό το σημείο (εξίσωση 20):

$$F(d_{ae}) = \int_0^{d_{ae}} f(d_{ae}) d(d_{ae}) = 0,5 + 0,5 \operatorname{erf} \left( \frac{\ln \left( \frac{d_{ae}}{\mu} \right)}{\sqrt{2 \ln \sigma_g}} \right) \quad (20)$$

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

$$p(d_{ae}) = F(d_{ae}) - F(d_{ae} - \Delta d_{ae}) \quad (21)$$

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

$$DE_A(MMAD, \sigma_g) = \sum_{\min}^{\max} DE(d_{ae}) [F(d_{ae}) - F(d_{ae} - \Delta d_{ae})] \quad (22)$$

Για τον υπολογισμό του ποσοστού εναπόθεσης των σωματιδίων ο χρήστης πρέπει να παρέχει στο πρόγραμμα τις παραμέτρους ανατομίας και φυσιολογίας, το μέγεθος των σωματιδίων, το σχήμα και την κατανομή τους (τυπική απόκλιση  $\sigma_g$ ). Αναλυτικότερα τα αποτελέσματα που μπορεί να δώσει το μοντέλο δίνονται μέσω παραδειγμάτων στο παράρτημα. Είναι σημαντικό ωστόσο να σημειωθεί ότι το μοντέλο έχει σχεδιαστεί για να δίνει αποτελέσματα εναπόθεσης για το αντικείμενο αναφοράς όπως ορίζεται στο μοντέλο *HRTM* που είναι ο ενήλικας Καυκάσιος άντρας. Περιλαμβάνει όμως τις εξισώσεις υπολογισμού των παραμέτρων αναγωγής (*SF*) των αποτελεσμάτων σε άτομα με διαφορετικές ανατομικές και παραμέτρους φυσιολογίας.

### 6.3. Καθαρισμός σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα

Ο καθαρισμός σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα υπολογίζεται για διαλυτά και αδιάλυτα σωματίδια, που απορροφώνται ταχέως ή αργά στο αίμα και είναι μη τοξικά ή ινώδους μορφής. Τα σωματίδια απομακρύνονται είτε στο αίμα με απορρόφηση, είτε στο γαστρεντερικό σύστημα με κατάποση και τέλος στους λεμφαδένες μέσω των λεμφαγγείων.

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

$$\frac{dR_i(t)}{dt} = -\lambda_i(t)R_i(t) \quad (23)$$

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

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

$$\lambda_i(t) = m_i(t) + s_i(t) \quad (24)$$

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. Τα τμήματα με δείκτη 1 και 2 αντιπροσωπεύουν το ποσοστό των σωματιδίων που απομακρύνονται με γρήγορο και αργό ρυθμό αντίστοιχα ενώ αυτά με δείκτη seq ένα μικρό ποσοστό σωματιδίων που παραμένει στις επιφάνειες του αναπνευστικού. Το ποσοστό του υλικού που αντιστοιχεί σε κάθε τμήμα δίνεται στον πίνακα 6.

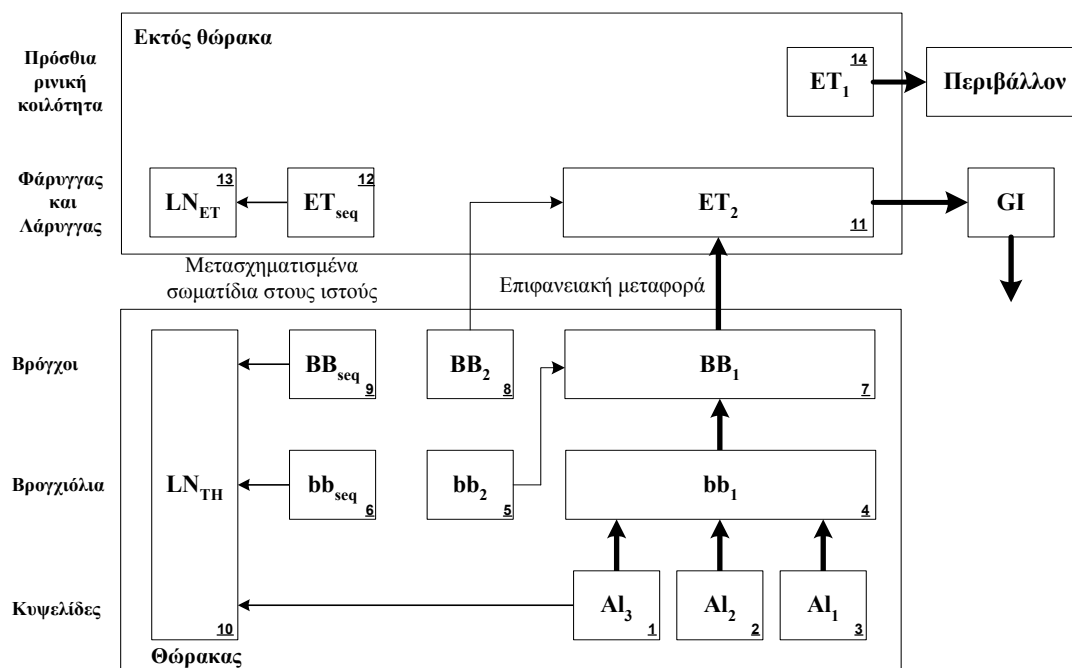
**Πίνακας 6:** Κατανομή της εναπόθεσης μεταξύ τμημάτων κάθε περιοχής της αναπνευστικής οδού (ICRP, 1994).

Περιοχή εναπόθεσης	Τμήμα	Ποσοστό σωματιδίων που καθιζάνουν ανά τμήμα
ET <sub>2</sub>	ET <sub>2</sub>	0,9995
	ET <sub>seq</sub>	0,0005
BB	BB <sub>1</sub>	0,993- $f_s$
	BB <sub>2</sub>	$f_s$
	BB <sub>seq</sub>	0,007
bb	bb <sub>1</sub>	0,993- $f_s$
	bb <sub>2</sub>	$f_s$
	bb <sub>seq</sub>	0,007
Al	Al <sub>1</sub>	0,3
	Al <sub>2</sub>	0,6
	Al <sub>3</sub>	0,1

όπου  $f_s = 0,5$ , για  $d_{ae} \leq 2,5\sqrt{\rho/\chi}$   $\mu\text{m}$ , και

$$f_s = 0,5 \exp\left(-0,63\left(d_{ae}\sqrt{\chi/\rho} - 2,5\right)\right), \text{ για } d_{ae} > 2,5\sqrt{\rho/\chi} \text{ } \mu\text{m} \quad (25)$$

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 32.



**Εικόνα 32:** Μοντέλο μεταφοράς σωματιδίων από κάθε περιοχή του αναπνευστικού, όπου κάθε περιοχή αποτελείται από τμήματα έτσι ώστε να εκφράζεται καλύτερα ο χρονικά μεταβαλλόμενος ρυθμός μεταφοράς (ICRP, 1994). Οι υπογραμμισμένοι αριθμοί αποτελούν το δείκτη κάθε τμήματος του αναπνευστικού συστήματος και χρησιμοποιούνται παρακάτω.

Ο ρυθμός μεταφοράς σε κάθε τμήμα της πορείας που ακολουθεί το σωματίδιο δίνεται στον πίνακα 7 μαζί με τον χρόνο ημιζωής του σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού.

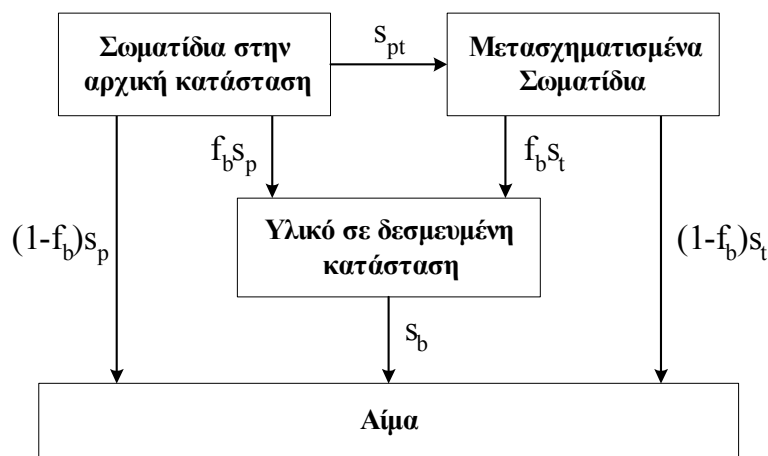
**Πίνακας 7:** Ρυθμοί μεταφοράς σωματιδίων στα τμήματα του αναπνευστικού συστήματος (ICRP, 1994).

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



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

Η απορρόφηση σωματιδίων στο αίμα διακρίνεται σε δύο στάδια, την διάλυση στα συστατικά τους που μπορούν να απορροφηθούν στο αίμα και την λήψη των συστατικών αυτών αλλά και απευθείας την απορρόφηση σωματιδίων στο αίμα. Η κινητική της απορρόφησης δίνεται στο παρακάτω σχήμα:



**Εικόνα 33:** Μοντέλο που αναπαριστά τον χρονικά μεταβαλλόμενο ρυθμό απορρόφησης των σωματιδίων στο αίμα (*ICRP, 1994*).

$$\text{όπου } s_p = s_s + f_r(s_r - s_s),$$

$$s_{pt} = (1 - f_r)(s_r - s_s) \text{ και} \quad (26)$$

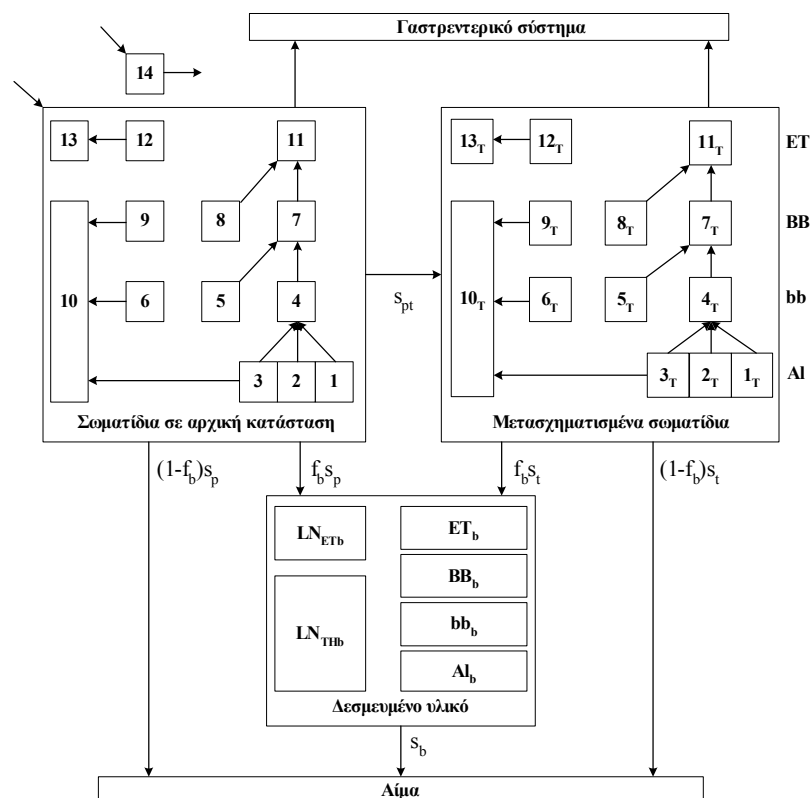
$$s_t = s_s$$

Σημαντικοί παράγοντες καθορισμού του ρυθμού απορρόφησης είναι ο ρυθμός διάλυσης των σωματιδίων στα υγρά του πνεύμονα, στις εκκρίσεις και τους μακροφάγους καθώς και ο ρυθμός βιοχημικών αντιδράσεων του. Τιμές για τις παραμέτρους απορρόφησης για συστατικά ταξινομημένα βάσει της συμπεριφοράς υλικού σε απορρόφηση στον πίνακα 8 που ακολουθεί.

**Πίνακας 8:** Τυπικοί παράμετροι απορρόφησης για σωματίδια τύπου F (Fast), M (Moderate) και S (Slow) (ICRP, 1994).

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

Τελικά το ολοκληρωμένο μοντέλο απομάκρυνσης των σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα δίνεται στο παρακάτω σχήμα (εικόνα 34), όπου ρυθμοί μεταφοράς των σωματιδίων που έχουν μετατραπεί (T) είναι ίδιοι με αυτούς των σωματιδίων στην αρχική τους κατάσταση.



**Εικόνα 34:** Το πλήρες 'τμηματικό' μοντέλο καθαρισμού σωματιδίων από την αναπνευστική οδό που περιλαμβάνει χρονικά μεταβαλλόμενο ρυθμό μεταφοράς και απορρόφησης στο αίμα (ICRP, 1994). Κάθε δείκτης αντιστοιχεί στο τμήμα του αναπνευστικού συστήματος όπως δίνεται στην εικόνα 32.

Στο μοντέλο AEROEXPDOSE ο καθαρισμός σωματιδίων υπολογίζεται μόνο για σωματίδια που απορροφώνται γρήγορα ή αργά στο αίμα και όχι για σωματίδια με μέσο ρυθμό απορρόφησης. Ακόμα, στην περίπτωση σωματιδίων που απορροφώνται αργά στο αίμα θεωρείται ότι όλη η ποσότητα των σωματιδίων διαλύεται αργά δηλαδή το  $f_r$  είναι μηδέν. Έτσι στο πλήρες τμηματικό μοντέλο της εικόνας 34 δεν πραγματοποιείται ποτέ ταυτόχρονος καθαρισμός σωματιδίων στην αρχική κατάσταση και διαλυμένων. Επιπλέον όπως φαίνεται στον πίνακα 8 θεωρείται πως δεν δεσμεύεται υλικό σε καμία περιοχή του αναπνευστικού συστήματος. Τέλος, όπως και για την εναπόθεση έτσι και ο καθαρισμός πολυδιάσπορων αεροζόλ υπολογίζεται σε 10 βήματα για διαμέτρους που κυμαίνονται από  $d_{ae}-4\sigma_g$  ως  $d_{ae}+4\sigma_g$ .

#### 6.4. Δόση και συσσώρευση σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα

Οι αλγόριθμοι υπολογισμού της εναπόθεσης και καθαρισμού των σωματιδίων συνδυάζονται στον υπολογισμό της δόσης και της τελικής ποσότητας σωματιδίων που παραμένει στο αναπνευστικό σύστημα. Η δόση ανά ώρα υπολογίζεται για έκθεση σε οποιεσδήποτε συνθήκες με τη βοήθεια της γενικής εξίσωσης 27:

$$H = n_0 c_A B \left( a \sum_i n_{fine,i} + (1-a) \sum_i n_{coarse,i} \right) \quad (27)$$

όπου:

$H$  = ρυθμός δόσης ( $\mu\text{g}/\text{h}$ ),

$n_0$  = κλάσμα αναπνεύσιμων σωματιδίων (εισπνευσσιμότητα),

$c_A$  = συγκέντρωση αεροζόλ στην ατμόσφαιρα ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ),

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

$a$  = μαζικό κλάσμα μικρών σωματιδίων,

$n_{fine,i}$  = συγκράτηση λεπτών σωματιδίων στην περιοχή  $i$  των πνευμόνων,

$n_{coarse,i}$  = συγκράτηση λεπτών σωματιδίων στην περιοχή  $i$  των πνευμόνων.

Όπως φαίνεται τα σωματίδια διακρίνονται σε δυο μεγέθη, τα μικρά και τα μεγάλα. Για κάθε ένα από αυτά τα μεγέθη υπολογίζεται η απόδοση της εναπόθεσης που περιλαμβάνει την εισπνευσσιμότητα στο μοντέλο AEROEXPDOSE και η οποία μπορεί έτσι να παραληφθεί. Η συγκέντρωση  $c_A$  είναι διαφορετική για τα μικρά και τα μεγάλα σωματίδια. Ωστόσο δίνεται ως κοινός παράγοντας γιατί συχνά μετράται μόνο η ολική συγκέντρωση σωματιδίων στην ατμόσφαιρα.

Στο μοντέλο πέρα από τον διαχωρισμό των αεροζόλ σε πολυδιάσπορα και μονοδιάσπορα διακρίνονται δύο περιπτώσεις όσο αφορά την κατανομή τους. Το μοντέλο είναι δυνατό να υπολογίσει τις παραμέτρους της λογαριθμικής κανονικής κατανομής των σωματιδίων αν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα μάζας για περιοχές διαμέτρων, δηλαδή πειραματικά αποτελέσματα από κρουστικό δειγματολήπτη. Ο καθορισμός της μέσης διαμέτρου, της τυπικής απόκλισης και του μαζικού κλάσματος α κάθε περιοχής μεγέθους γίνεται χρησιμοποιώντας την διαδικασία που δόθηκε στο κεφάλαιο 2. Από την άλλη αν οι παράμετροι αυτοί είναι γνωστοί μπορούν να δοθούν απ' ευθείας ως είσοδο στο μοντέλο.

Το σενάριο έκθεσης μπορεί να περιλαμβάνει σταθερές ή μεταβαλλόμενες τιμές συγκεντρώσεων και δραστηριοτήτων. Το μοντέλο μπορεί να υπολογίσει την δόση στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα για μια περίοδο μεταβαλλόμενης έκθεσης αρκεί να του παρέχονται τα δεδομένα συγκέντρωσης και κατανομής των σωματιδίων. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να δίνονται ταυτόχρονα οι διαφορετικές παράμετροι φυσιολογίας ανάλογα την δραστηριότητα ως ωριαίες ή μέσες ημερήσιες τιμές. Στο AEROEXPDOSE υποστηρίζονται 2 διαφορετικά προφίλ δραστηριότητας για ενήλικο Καυκάσιο άντρα που αντιστοιχούν σε έκθεση σε υπαίθριους-εξωτερικούς και σε εσωτερικούς χώρους. Το σενάριο δραστηριότητας σε εξωτερικό και εσωτερικό χώρο δίνεται στον πίνακα 9 που ακολουθεί. Οι παράμετροι φυσιολογίας που αντιστοιχούν σε κάθε δραστηριότητα δίνονται στον πίνακα 2.

**Πίνακας 9:** Σενάρια ημερήσιας δραστηριότητας ατόμου σε υπαίθριους και εσωτερικούς χώρους που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο AEROEXPDOSE.

<b>Έκθεση σε</b> <b>Ωρα</b>	<b>Εξωτερικό χώρο</b>		<b>Εσωτερικό χώρο</b>	
	<i>Δραστηριότητα</i>	<i>Διάρκεια</i>	<i>Δραστηριότητα</i>	<i>Διάρκεια</i>
7π.μ. - 5μ.μ.	Ήπια εργασία	24 h	Ήπια εργασία	10 h
5μ.μ. - 11μ.μ.			Ανάπαυση	6 h
11μ.μ. - 7π.μ.			Ύπνος	8 h

Στην πραγματικότητα το μοντέλο για έκθεση σε εξωτερικό χώρο θεωρεί την δραστηριότητα του ατόμου ίδια με αυτή που του δίνεται αρχικά ως δεδομένο εισόδου και όχι απαραίτητα την «ήπια εργασία» όπως δίνεται στον πίνακα 9. Ακόμα πρέπει να σημειωθεί ότι το μοντέλο πραγματοποιεί ταυτόχρονα υπολογισμό για έκθεση σε εξωτερικό και εσωτερικό χώρο βάσει των συγκεντρώσεων που του δίνονται ως δεδομένα εισόδου. Ωστόσο στον υπολογισμό της δόσης σε εσωτερικό χώρο τα δεδομένα εισόδου πρέπει να δοθούν με ώρα έναρξης την 0:00, για να χρησιμοποιηθεί

σωστά το σενάριο δραστηριότητας, αφού το μοντέλο δεν αναγνωρίζει τις ώρες στις οποίες αντιστοιχούν τα δεδομένα εισόδου που του δίνονται. Τέλος, όταν στο μοντέλο παρέχονται ωριαίες τιμές τότε αυτό υπολογίζει και τη δόση που αντιστοιχεί στις μέσες τιμές αυτών των παραμέτρων.

Η προσομοίωση δίνει ως αποτέλεσμα αρχεία εξόδου με την δόση των σωματιδίων σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος συναρτήσει της ώρας. Όσο αφορά τον καθαρισμό των σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα, αυτός υπολογίζεται εμμέσως στο μοντέλο με τον καθορισμό της μάζας που έχει συσσωρευτεί κάθε στιγμή στα διάφορα τμήματα του αναπνευστικού συστήματος καθώς και με την ποσότητα που έχει μεταφερθεί στο γαστρεντερικό σύστημα και το αίμα.

Η συσσώρευση,  $R$ , μάζας σωματιδίων σε κάθε τμήμα  $i$  του αναπνευστικού συστήματος υπολογίζεται με την γενική εξίσωση:

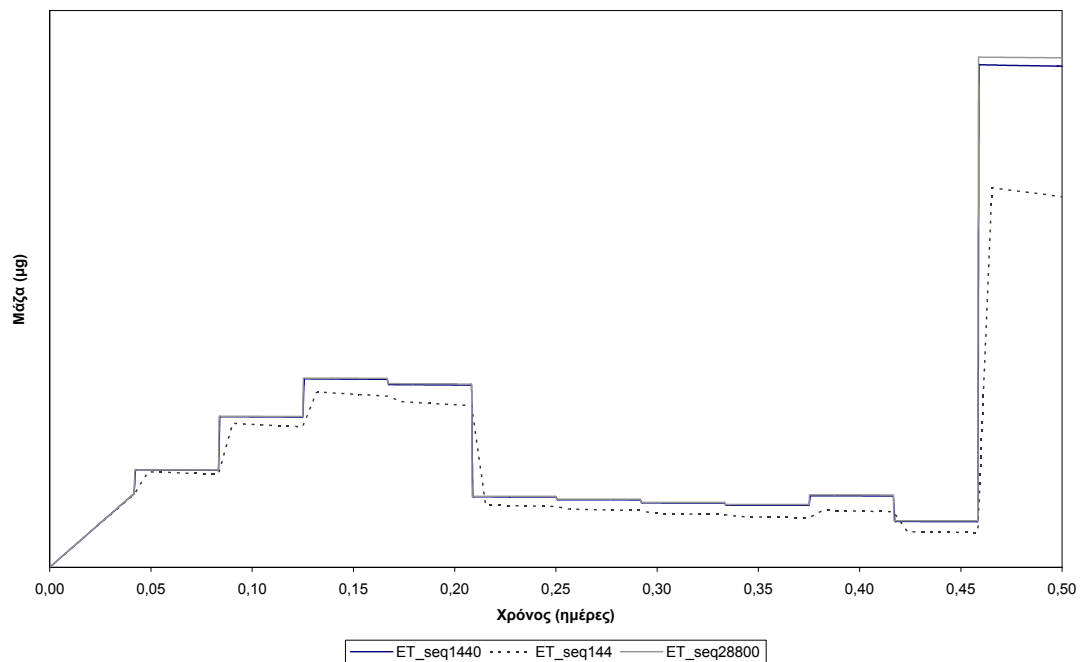
$$\frac{dR_i}{dt} = \sum_{j=1}^{15} [m_{j,i} R_j - (m_{i,j} + s) R_i] + Dose_i \quad (28)$$

όπου  $m$  είναι ο ρυθμός μεταφοράς σωματιδίων με τη βλέννα (χρονικό βήμα<sup>-1</sup>),  $s$  είναι ο ρυθμός απορρόφησης σωματιδίων στο αίμα (χρονικό βήμα<sup>-1</sup>) και τέλος ως δόση ( $Dose$ ) ορίζεται η δόση που δέχεται το τμήμα του αναπνευστικού συστήματος στη μονάδα του χρόνου ( $\mu\text{g} \times \text{χρονικό βήμα}^{-1}$ ). Τα τμήματα 14 και 15 δεν είναι αυτά που δίνονται στον πίνακα 7 αλλά με 14 συμβολίζεται το γαστρεντερικό σύστημα και με 15 το αίμα. Η δόση σε κάθε τμήμα του αναπνευστικού είναι μηδενική για χρόνο μεγαλύτερο του χρόνου έκθεσης.

Αναλυτικά το σύστημα διαφορικών εξισώσεων που επιλύεται με τη μέθοδο της εκθετικής αντικατάστασης δίνεται στις εξισώσεις 29 με ρυθμούς μεταφοράς στη βλέννα αυτούς που δίνονται στον πίνακα 7 (Τραχανάς, 1995). Η επιλογή του χρονικού βήματος πραγματοποιήθηκε με προσομοίωση για ενήλικα Καυκάσιο άντρα που εκτελεί ήπια εργασία. Ως πραγματικό χρονικό βήμα θεωρούνται τα 3sec που είναι η διάρκεια ενός κύκλου αναπνοής με αποτέλεσμα το σύστημα να πρέπει να επιλυθεί σε 28800 βήματα την ημέρα, κάτι που κοστίζει σε υπολογιστικό χρόνο και ισχύ. Έτσι δοκιμάστηκαν και τα χρονικά βήματα 1 min και 10 min για ελάττωση του πλήθους των βημάτων κατά 20 και 200 φορές αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τη συσσώρευση μάζας σωματιδίων στα τοιχώματα της ΕΤ περιοχής δίνονται στο διάγραμμα της εικόνας 35.

$$\begin{bmatrix} \frac{dR(1)}{dt} \\ \frac{dR(2)}{dt} \\ \frac{dR(3)}{dt} \\ \frac{dR(4)}{dt} \\ \frac{dR(5)}{dt} \\ \frac{dR(6)}{dt} \\ \frac{dR(7)}{dt} \\ \frac{dR(8)}{dt} \\ \frac{dR(9)}{dt} \\ \frac{dR(10)}{dt} \\ \frac{dR(11)}{dt} \\ \frac{dR(12)}{dt} \\ \frac{dR(13)}{dt} \\ \frac{dR(14)}{dt} \\ \frac{dR(15)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,02-s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,001-s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,00012-s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,02 & 0,001 & 0,00012 & -2-s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,03-s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,01-s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0,03 & 0 & -10-s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,03-s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,03-s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,01-s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,00002 & 0 & 0 & 0,01 & 0 & 0 & 0,01 & -s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0,03 & 0 & 0 & -100-s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,001-s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,001 & -s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 100 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ s & s & s & s & s & s & s & s & s & s & s & s & s & s & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R(1) \\ R(2) \\ R(3) \\ R(4) \\ R(5) \\ R(6) \\ R(7) \\ R(8) \\ R(9) \\ R(10) \\ R(11) \\ R(12) \\ R(13) \\ R(14) \\ R(15) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B(1) \\ B(2) \\ B(3) \\ B(4) \\ B(5) \\ B(6) \\ B(7) \\ B(8) \\ B(9) \\ B(10) \\ B(11) \\ B(12) \\ B(13) \\ B(14) \\ B(15) \end{bmatrix} \quad (29)$$

Η διαφορά των αποτελεσμάτων για τη συσσώρευση μεταξύ των προσομοιώσεων με χρονικό βήμα 3 sec και 1 min είναι αρκετά μικρή ενώ διαφέρει σημαντικά από τα αποτελέσματα για χρονικό βήμα 10 min. Έτσι η επιλογή του 1 min ως χρονικού βήματος είναι ικανοποιητική για τη μείωση του υπολογιστικού φόρτου και χρόνου ενώ είναι κατάλληλη και για διαφορετική δραστηριότητα ατόμου αφού η συχνότητα αναπνοής που διαφοροποιείται ανάλογα την δραστηριότητα παρέχεται ανά λεπτό.



**Εικόνα 35:** Η μάζα που κατακρατείται στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού στην περιοχή ET όπως υπολογίστηκε με το μοντέλο *AEROEXPDOSE* για τρία διαφορετικά χρονικά βήματα.

Τελικά οι ρυθμοί απορρόφησης και μεταφοράς (πίνακες 7 και 8) στο σύστημα διαφορικών εξισώσεων μετατρέπονται από το μοντέλο σε μεταφορά ανά λεπτό και η λύση του ομογενούς συστήματος (μετά την έκθεση) για ταχέως απορροφώμενα στο αίμα σωματίδια δίνεται από την παρακάτω σχέση, όπου ο χρόνος  $t$  εκφράζεται σε λεπτά:

$$\begin{matrix} R(1) \\ R(2) \\ R(3) \\ R(4) \\ R(5) \\ R(6) \\ R(7) \\ R(8) \\ R(9) \\ R(10) \\ R(11) \\ R(12) \\ R(13) \\ R(14) \\ R(15) \end{matrix} = \begin{matrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ c_6 \\ c_7 \\ c_8 \\ c_9 \\ c_{10} \\ c_{11} \\ c_{12} \\ c_{13} \\ c_{14} \\ c_{15} \end{matrix}^T \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,7028 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,7069 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,7628 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,6169 & 0 & 0 & -0,0071 & 0 & 0 & -0,0004 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,7060 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,7071 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,6997 & -0,1542 & 0 & -0,0021 & -0,0014 & 0 & 0 & -0,0001 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,7071 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,7071 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,7071 & 0,7071 & 0 & 0 & -0,1293 & 0,7071 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,0777 & -0,0157 & -0,0002 & -0,0002 & -0,0001 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,7063 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,7079 & 0 & 0 & 0,7071 & 0 & 0 \\ -0,4082 & 0,0707 & 0,0154 & 0,0002 & 0,0002 & 0,0001 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -0,4082 & 0,7067 & 0,7715 & 0,7071 & 0,7082 & 0,7113 & -0,0001 & -0,0001 & 0,7073 & -0,0016 & -0,6336 & -0,7071 & -0,7071 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \exp(-0,1389t) \\ \exp(-7,6389t) \\ \exp(-7,0833t) \\ \exp(-6,9465t) \\ \exp(-6,9465t) \\ \exp(-6,9458t) \\ \exp(-6,9451t) \\ \exp(-6,9451t) \\ \exp(-6,9445t) \\ \exp(-6,9445t) \\ \exp(-6,9445t) \\ \exp(-6,9444t) \\ \exp(-6,9444t) \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Ο πίνακας σταθερών C, μεταβάλλεται ανάλογα με την αρχική δόση που δέχονται οι περιοχές του αναπνευστικού, επομένως ανάλογα με τη συγκέντρωση και το μέγεθος των εισπνεόμενων σωματιδίων. Τα αποτελέσματα της συσσώρευσης για το πλήρες σύστημα που αντιστοιχούν στην περίοδο έκθεσης προκύπτουν αθροιστικά.

Τα αποτελέσματα συσσώρευσης δίνονται και ως σχετική συγκράτηση σωματιδίων σε κάθε τμήμα κατά την διάρκεια και μετά την έκθεση. Το μοντέλο AEROEXPDOSE περιλαμβάνει υπολογισμό της συσσώρευσης για σταθερή και μεταβαλλόμενη έκθεση. Ωστόσο στην περίπτωση μεταβαλλόμενης έκθεσης υποστηρίζονται μόνο τα δύο προφίλ δραστηριότητας για ενήλικο Καυκάσιο άντρα που δόθηκαν στον πίνακα 9. Ακόμα το μοντέλο έχει ως περιορισμό τις 14<sup>4</sup> ημέρες για την εκτύπωση συνεχών τιμών συσσώρευσης σε αρχεία κειμένου αλλά μπορεί να υπολογίσει την τελική συσσώρευση σε κάθε τμήμα και την δόση στο γαστρεντερικό σύστημα, το αίμα και τους λεμφαδένες για οποιοδήποτε χρονικό διάστημα.

<sup>4</sup> Οφείλεται σε περιορισμό του όγκου δεδομένων που μπορεί να περιέχει ο δισδιάστατος πίνακας τιμών που κατασκευάζεται κατά την εκτέλεση του προγράμματος



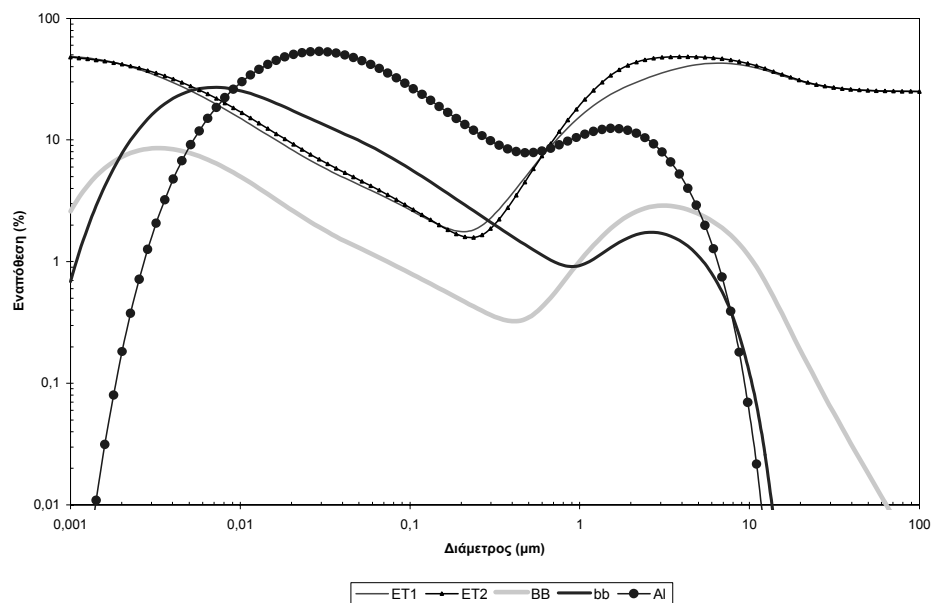
### 6.5. Σύγκριση του μοντέλου AEROEXPDOSE με άλλα μοντέλα

Οι δυνατότητες του μοντέλου AEROEXPDOSE να προσομοιώνει τους μηχανισμούς εναπόθεσης και καθαρισμού σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα σχετίζονται με την ορθότητα και εγκυρότητα του θεωρητικού μοντέλου της ICRP που υλοποιείται. Το μοντέλο αυτό έχει ελεγχθεί με πειραματικές μετρήσεις και προσομοιώσεις ετών και η ορθότητα του δεν εξετάζεται (ICRP, 1994; Reeks κ.α., 2002). Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί πως όσο αφορά την εναπόθεση έχει βρεθεί ότι το μοντέλο θεωρεί τους αεραγωγούς του αναπνευστικού συστήματος ως ευθείες και δεν υπολογίζει με ακρίβεια την απόθεση στις διακλαδώσεις ως αποτέλεσμα της καμπυλότητας των αγωγών (Reeks κ.α., 2002).

Η ακρίβεια του μοντέλου σχετίζεται με τις ημιεμπειρικές εξισώσεις και τις υπολογιστικές διαδικασίες που χρησιμοποιεί στην επίλυση τους. Έτσι το μοντέλο AEROEXPDOSE συγκρίνεται ως προς τις δυνατότητες και την ακρίβεια με άλλα ημιεμπειρικά μοντέλα όπως το LungDep66 και LUDEP που υλοποιούν την ίδια θεωρία. Τα ημιεμπειρικά μοντέλα LungDep66 και LUDEP αποτελούν υλοποιήσεις του μοντέλου HRTM της ICRP. Αναλυτικότερα, το μοντέλο LungDep66 υπολογίζει το ποσοστό εναπόθεσης σωματιδίων συγκεκριμένης διαμέτρου και σχήματος σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος (Bone, 2000) και δεν περιλαμβάνει καμία άλλη δυνατότητα. Για σωματίδια μικρότερα των 2nm δεν χρησιμοποιεί την διόρθωση του θερμοδυναμικού μεγέθους σύμφωνα με την εξίσωση 4 ενώ υλοποιεί την εναπόθεση για πολυδιάσπορα αεροζόλ όπως και το μοντέλο AEROEXPDOSE με τη διαφορά πως αυτή υπολογίζεται για τη μέση διάμετρο του διαστήματος  $[d_{ae} + \Delta d_{ae}/2, d_{ae} - \Delta d_{ae}/2]^5$ . Με επέμβαση στον πηγαίο κώδικα του μοντέλου LungDep66 (Lung Deposition) κατασκευάστηκε η καμπύλη εναπόθεσης σε κάθε περιοχή συναρτήσει της διαμέτρου των σωματιδίων που δίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 36.

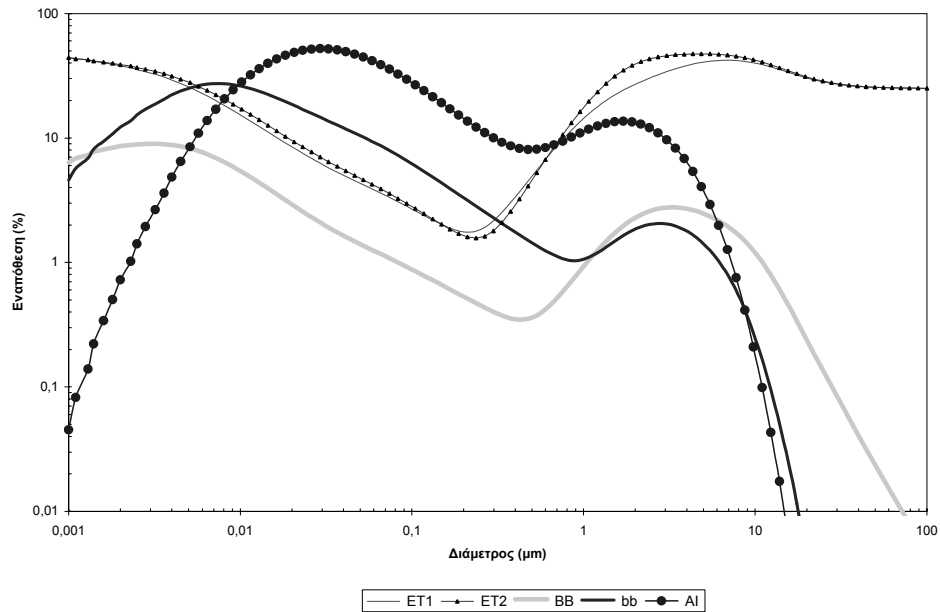
---

<sup>5</sup> Δηλαδή  $DE_A(MMAD, \sigma_g) = \sum_{\min}^{\max} DE(d_{ae}) \left[ F\left(d_{ae} - \frac{\Delta d_{ae}}{2}\right) - F\left(d_{ae} + \frac{\Delta d_{ae}}{2}\right) \right]$



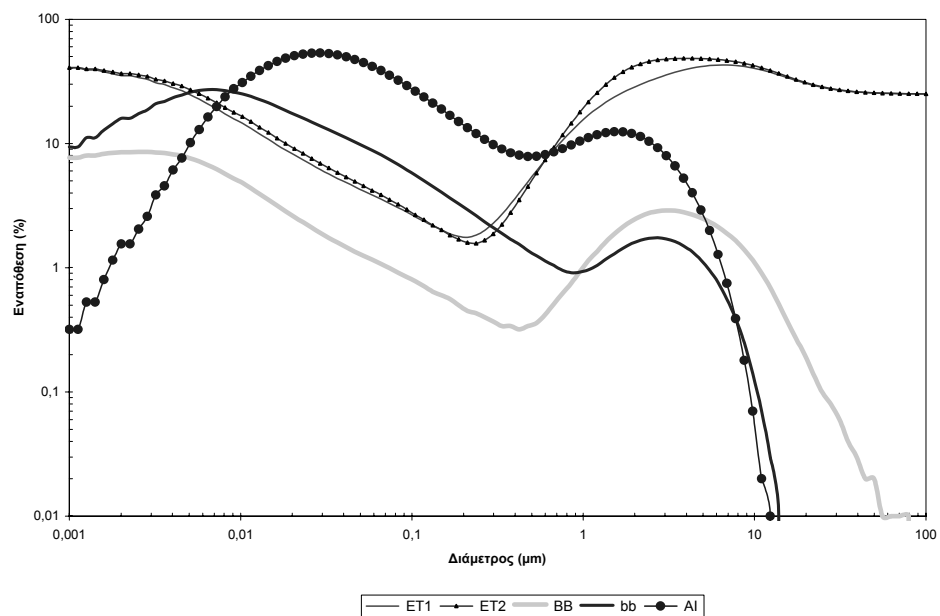
**Εικόνα 36:** Ποσοστό εναπόθεσης σωματιδίων στις 5 περιοχές της αναπνευστικής οδού, όπως υπολογίστηκε με το μοντέλο *LungDep66*.

Το μοντέλο LUDEP (LUnG Dose Evaluation Program) αποτελεί εμπορική εφαρμογή του μοντέλου HRTM και περιλαμβάνει τον υπολογισμό δόσης σωματιδίων και τον καθαρισμό και μεταφορά στο αίμα και σε άλλα όργανα του ανθρώπινου σώματος ραδιενεργών σωματιδίων (*Jarvis κ.α., 1996*). Στην πραγματικότητα υπολογίζει τη δόση ραδιενεργού ακτινοβολίας  $\alpha$ ,  $\beta$  και  $\gamma$  στο ανθρώπινο σώμα βάσει της μεταφοράς και απομάκρυνσης των σωματιδίων λαμβάνοντας υπόψη τη σταδιακή μείωση της ακτινοβολίας τους. Αν και αποτελεί ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα καθορισμού δόσης αφορά ραδιενεργά στοιχεία και δεν παρέχει την δυνατότητα στο χρήστη να υπολογίσει τον καθαρισμό για μη ραδιενεργά σωματίδια. Ακόμα υπολογίζει την εισπνευσιμότητα θεωρώντας μηδενική ταχύτητα ανέμου και αν και δεν περιλαμβάνει επιλογή για μεταβαλλόμενη έκθεση ο χρήστης μπορεί να καθορίσει διάφορα σενάρια δραστηριοτήτων. Οι παράμετροι φυσιολογίας και ανατομίας έχουν τις τιμές αναφοράς για ενήλικα Καυκάσιο άντρα και ο υπολογισμός της δόσης για άτομο άλλου φύλλου, ηλικίας και εθνικότητας μπορεί να γίνει μόνο με απ' ευθείας μεταβολή των παραμέτρων. Η υπολογιστική διαδικασία καθορισμού της εναπόθεσης πολυδιάσπορων αεροζόλ δεν είναι γνωστή και το διάγραμμα εναπόθεσης σε κάθε περιοχή συναρτήσει της διαμέτρου των σωματιδίων που δίνεται στην εικόνα 37.



**Εικόνα 37:** Ποσοστό εναπόθεσης σωματιδίων στις 5 περιοχές της αναπνευστικής οδού, όπως υπολογίστηκε με το μοντέλο *LUDEP*.

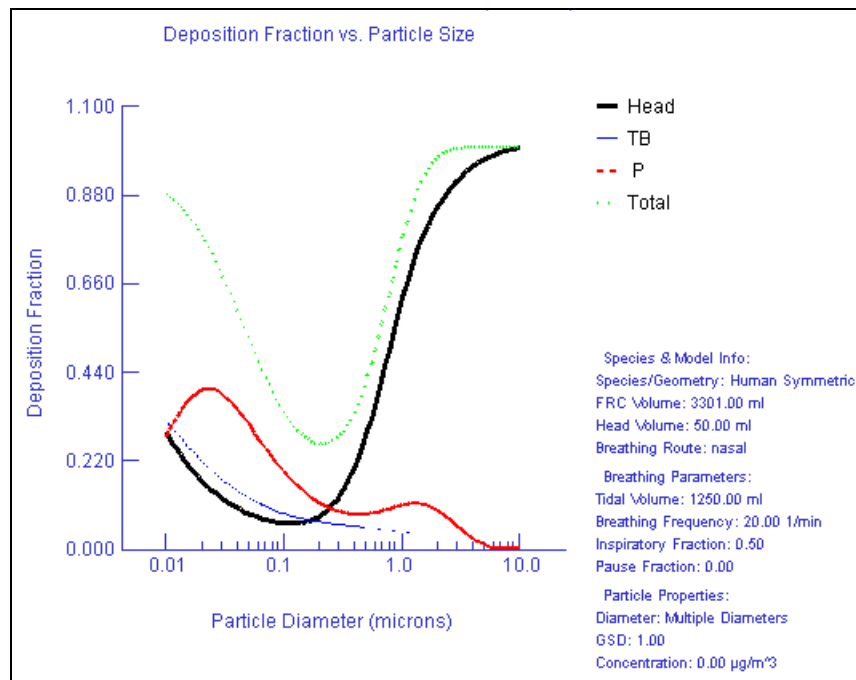
Το διάγραμμα εναπόθεσης σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος συναρτήσει της διαμέτρου των σωματιδίων που προκύπτει με το μοντέλο *AEROEXPDOSE* δίνεται στην εικόνα 38. Παρατηρείται διαφοροποίηση σε σχέση με τα άλλα δύο μοντέλα στην εναπόθεση για πολύ μικρά και πολύ μεγάλα σωματίδια.



**Εικόνα 38:** Ποσοστό εναπόθεσης σωματιδίων στις 5 περιοχές της αναπνευστικής οδού, όπως υπολογίστηκε με το μοντέλο *AEROEXPDOSE*.

Για σωματίδια μικρότερα των 2nm φαίνεται πως το μοντέλο LUDEP δεν χρησιμοποιεί την διόρθωση του θερμοδυναμικού μεγέθους σύμφωνα με την εξίσωση 17. Η διαφορά εναπόθεσης για τα μεγάλα σωματίδια είναι υψηλή αλλά δεν είναι γνωστός ο τρόπος υπολογισμού της στο LUDEP. Ωστόσο για διαμέτρους ως 10 $\mu$ m τα ποσοστά εναπόθεσης είναι σχεδόν ίσα και έτσι ακόμα κι αν θεωρήσουμε το μοντέλο LUDEP ως μοντέλο αναφοράς το μοντέλο AEROEXPDOSE μπορεί να εφαρμοστεί για έκθεση σε μη ραδιενεργά αιωρούμενα σωματίδια στην ατμόσφαιρα που ανήκουν στην κλίμακα μεγέθους των PM<sub>10</sub>.

Από την άλλη εξετάζεται η διαφορά μεταξύ του ημιεμπειρικού μοντέλου AEROEXPDOSE με το θεωρητικό μοντέλο προσομοίωσης MPPD (Multiple Path Particle Model). Το μοντέλο MPPD μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της εναπόθεσης και καθαρισμού σωματιδίων διαστάσεων από 0,01 $\mu$ m - 20  $\mu$ m στο αναπνευστικό σύστημα των ανθρώπων και των ποντικών. Σε κάθε αεραγωγό και τις διακλαδώσεις τους η εναπόθεση υπολογίζεται με θεωρητικές εξισώσεις για την διασπορά, καθίζηση και πρόσκρουση των σωματιδίων (*Asgharian, Hofmann και Bergmann, 2001*). Ο καθαρισμός των σωματιδίων από την τραχειοβρογχική περιοχή γίνεται με τη βλέννα ενώ στην κυψελιδική περιοχή χρησιμοποιείται το μοντέλο της ICRP (*Asgharian Hofmann και Miller, 2001*). Η δομή του αναπνευστικού συστήματος περιγράφεται με το μοντέλο των Yeh and Schum (1980). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της εναπόθεσης μονοδιάσπορων και πολυδιάσπορων αεροζόλ για σταθερή και μεταβαλλόμενη έκθεση. Ωστόσο ο καθορισμός της συσσώρευσης σωματιδίων δεν μπορεί να υπολογιστεί για μεταβαλλόμενη έκθεση. Το διάγραμμα εναπόθεσης σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος συναρτήσει της διαμέτρου των σωματιδίων που προκύπτει με το μοντέλο MPPD δίνεται στην εικόνα 39.



**Εικόνα 39:** Ολικό ποσοστό εναπόθεσης σωματιδίων και ποσοστό εναπόθεσης τους στις 3 περιοχές της αναπνευστικής οδού, όπως υπολογίστηκε με το μοντέλο *MPPD*.

Συνοπτικά η διαφορά εναπόθεσης όπως υπολογίζεται από τα παραπάνω μοντέλα για σωματίδια διαμέτρου 5µm δίνεται στους πίνακες 10 και 11.

**Πίνακας 10:** Ποσοστά εναπόθεσης μονοδιάσπορων σωματιδίων διαμέτρου 5µm στα τμήματα του αναπνευστικού συστήματος υπολογισμένα από διάφορα μοντέλα εναπόθεσης.

	AEROEXPDOSE	LUDEP	LUDEP (άθροισμα)	ICRP 66	MPPD
ET1	41,76	41,76		-	
ET2	48,02	48,02	89,78	-	91,0
BB	2,48	2,48		-	
bb	1,11	1,11	3,59	-	2,6
AI	2,68	2,68	2,68	-	5,8
Ολική	96,05	96,05	96,05	-	99,4

**Πίνακας 11:** Ποσοστά εναπόθεσης πολυδιάσπορων ( $\sigma_g=2,5$ ) σωματιδίων διαμέτρου 5µm στα τμήματα του αναπνευστικού συστήματος υπολογισμένα από διάφορα μοντέλα εναπόθεσης.

	AEROEXPDOSE	LUDEP	LUDEP (άθροισμα)	ICRP 66	MPPD
ET1	35,03	34,8		33,39	
ET2	41,22	40,94	75,74	39,9	84,1
BB	1,81	1,8		1,8	
bb	0,9	0,89	2,69	1,1	2,8
AI	4,53	4,49	4,49	5,3	5,6
Ολική	83,50	82,92	82,92	82	92,5

Το μοντέλο δεν μπορεί να συγκριθεί με τα υπόλοιπα ως προς τον καθαρισμό σωματιδίων αλλά η σύγκριση του με το μοντέλο MPPD που χρησιμοποιεί κατά μέρος την ίδια μεθοδολογία έδωσε σχεδόν τον ίδιο ρυθμό απομάκρυνσης. Η ευαισθησία του μοντέλου AEROEXPDOSE στις παραμέτρους που επηρεάζουν τους μηχανισμούς εναπόθεσης και καθαρισμού έχει δοθεί στα κεφάλαια 4 και 5 στα πλαίσια της μελέτης παραγόντων που τους επηρεάζουν.

## 7. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ AEROEXPDOSE ΣΤΟ ΟΣΛΟ

Το μοντέλο AEROEXPDOSE χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της δόσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα για άτομο εκτεθειμένο στις ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις  $PM_{10}$  στο Όσλο της Νορβηγίας. Οι μετρήσεις στο Όσλο πραγματοποιήθηκαν το 2002 σε δύο περιόδους, καλοκαίρι και χειμώνα, στα πλαίσια του προγράμματος Urban Aerosol και αφορούν συγκεντρώσεις σωματιδίων τόσο σε υπαίθριο (εξωτερικό) χώρο όσο και στο εσωτερικό μιας οικίας (Lazaridis κ.α., 2001). Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στην εφαρμογή του μοντέλου AEROEXPDOSE αφορούν την θερινή περίοδο και συγκεκριμένα το διάστημα 3-11 Ιουνίου 2002.



**Εικόνα 40:** Διάταξη οργάνων μέτρησης εντός και εκτός της οικίας στο Όσλο το καλοκαίρι του 2002.

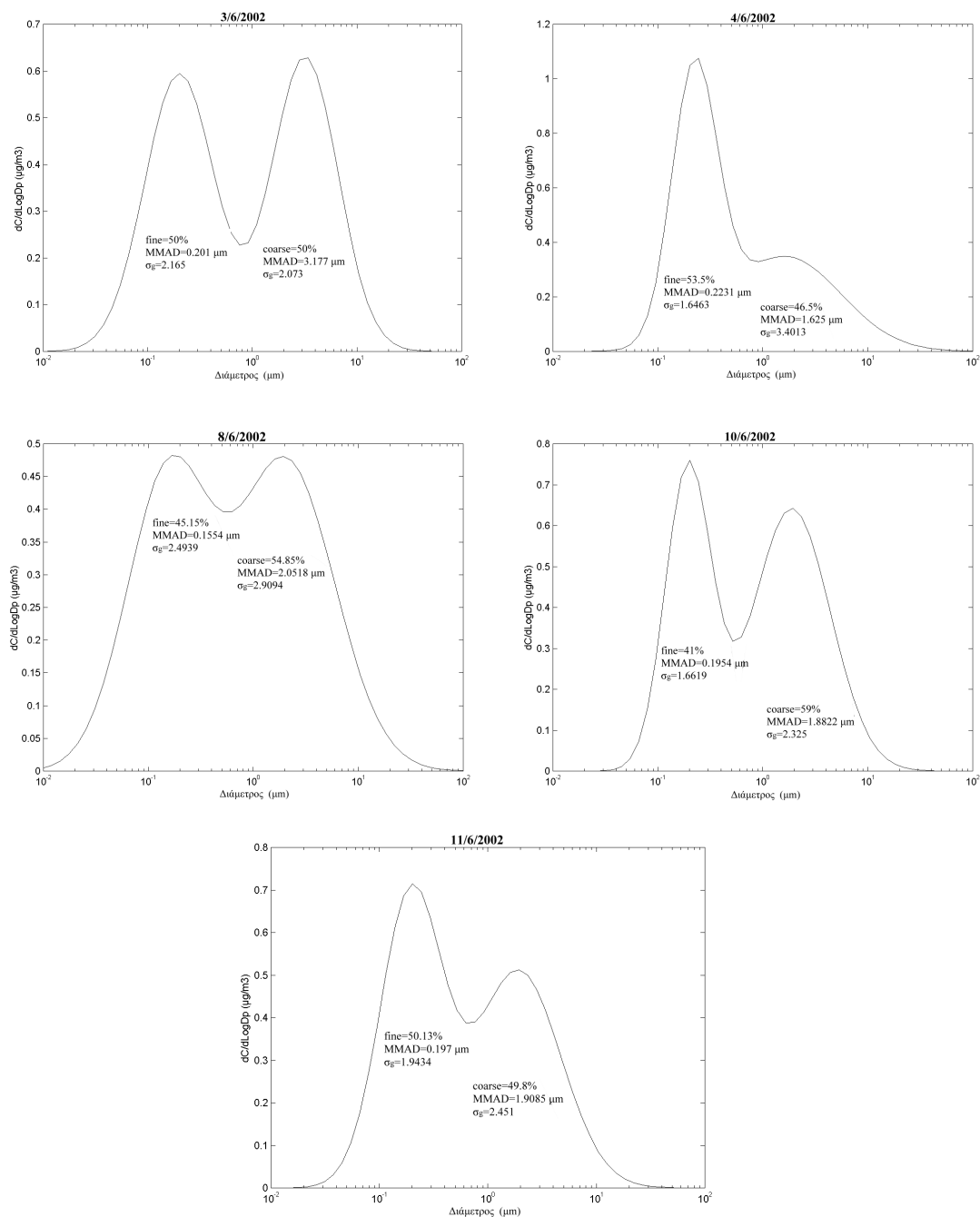
Αναλυτικότερα, στο εσωτερικό του κτιρίου τα δείγματα  $PM_{10}$  και  $PM_{2,5}$  συλλέχθηκαν σε φίλτρα Teflon ή χαλαζία με τη βοήθεια οργάνου KleinfILTERGERAT. Τα φίλτρα Teflon αναλύθηκαν με χρωματογραφία ιονανταλλαγής και φασματοσκοπία ατομικής

απορρόφησης για την ανίχνευση ιόντων Cl, NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>, Na, K, Ca και Mg<sup>6</sup> ενώ τα φίλτρα χαλαζία χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό οργανικού και ανόργανου άνθρακα. Για τις μετρήσεις εξωτερικά του σπιτιού χρησιμοποιήθηκε διχοτομικός δειγματολήπτης που διακρίνει τα σωματίδια σε μεγάλα (2,5-10μm) και μικρά (<2,5μm). Παράλληλα χρησιμοποιήθηκε η διάταξη με φίλτρα Teflon και χαλαζία όπως και στο εσωτερικό του κτιρίου για την ανάλυση ανόργανων ιόντων στα σωματίδια. Η κατανομή μάζας των σωματιδίων εξωτερικά του κτιρίου μετρήθηκε για 5 ημέρες με τη βοήθεια ενός κρουστικού δειγματολήπτη (Berner impactor) που διακρίνει τα σωματίδια σε 8 περιοχές μεγέθους. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τον προσκρουστή Berner δίνονται ως λογαριθμο-κανονικές κατανομές μάζας (κεφάλαιο 2) στα διαγράμματα της εικόνας 41.

Η αναλογία μάζας μικρών/μεγάλων σωματιδίων μεταβάλλεται για τις 5 ημέρες των μετρήσεων με τη μάζα των μικρών σωματιδίων να φτάνει το 53,5% της συνολικής στις 4/6/2002 και την μάζα των μεγάλων σωματιδίων το 59% στις 10/6/2002. Πρέπει να τονιστεί ότι αυτές οι αναλογίες αφορούν την μαζική κατανομή μεγέθους γιατί αριθμητικά τα μικρά σωματίδια είναι σαφώς περισσότερα από τα μεγάλα για κάθε ημέρα. Τα αποτελέσματα για την κατανομή μάζας κάθε ημέρας προκύπτουν μετά από 24ωρη δειγματοληψία. Η μεγαλύτερη ποσότητα μάζας συλλέχθηκε στις 8/6/2002 (474 μg) και η μικρότερη στις 4/6/2002 (185 μg) όπως μπορεί να διαπιστωθεί εύκολα από τη σύγκριση των εμβαδών κάτω από τις καμπύλες κατανομής αλλά και στη συνέχεια με τη σύγκριση των ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων των σωματιδίων.

---

<sup>6</sup> Ο προσδιορισμός της μάζας των θεικών, νιτρικών και ιόντων αμμωνίου είναι ιδιαίτερα σημαντικός για τον καθορισμό της ταχύτητας καθίζησης των ρύπων στην ατμόσφαιρα και την κατανομή της ρύπανσης στις διάφορες πηγές. Παράλληλα πρέπει να γίνεται ποσοτικοποίηση των υδατοδιαλυτών ιόντων Na, Cl και Mg, που αποτελούν συστατικά των σωματιδίων θαλασσινού άλατος, καθώς επιβαρύνουν την ατμόσφαιρα στις παράκτιες περιοχές. Έτσι βρίσκεται και το κλάσμα των θεικών ιόντων που προέρχονται από θαλάσσια αεροζόλ. Τέλος ο καθορισμός των κατιόντων Ca, K και Mg είναι επιθυμητός για τον προσδιορισμό της καθίζησης βάσεων στην ατμόσφαιρα (EMEP, 2001).



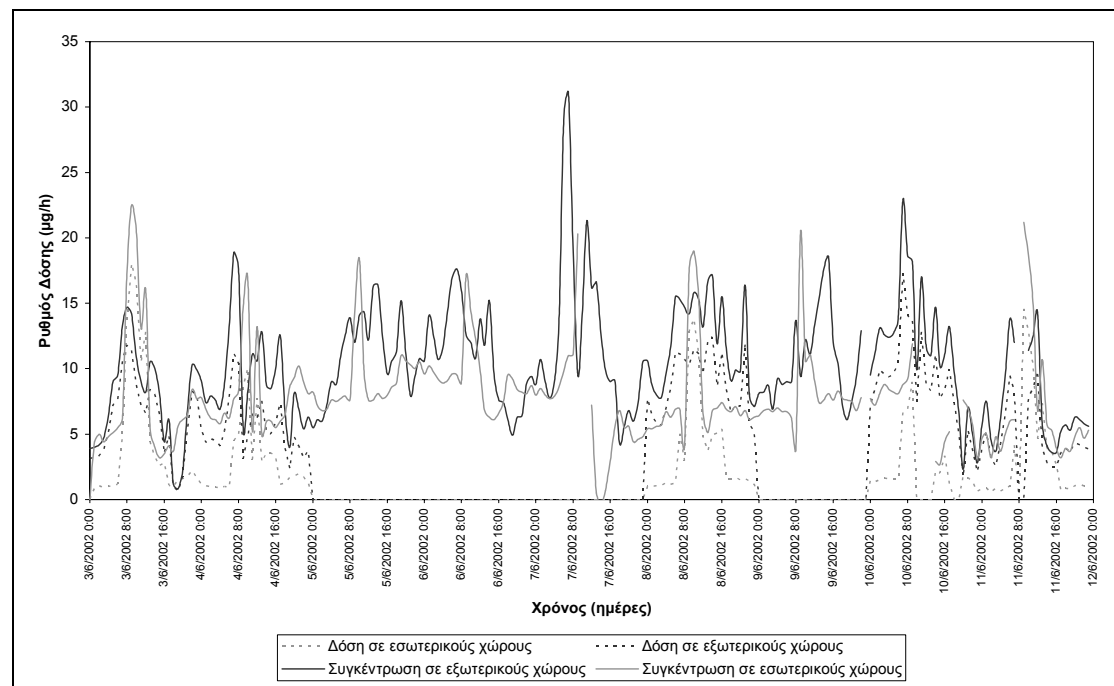
**Εικόνα 41:** Κατανομή μάζας των σωματιδίων στο Όσλο για την περίοδο μελέτης όπως προκύπτει από μετρήσεις με έναν προσκρουστή Berner, 8 σταδίων.

Τα παραπάνω δείγματα αναλύθηκαν και ως προς τη συγκέντρωση και αναλογία ανόργανου και οργανικού άνθρακα. Τέλος την περίοδο 3-17 Ιουνίου 2002 μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις  $PM_{10}$  εξωτερικά του κτιρίου με τη βοήθεια οργάνου TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance). Χρησιμοποιώντας τα προαναφερθέντα διαθέσιμα δεδομένα υπολογίστηκε ο ωριαίος ρυθμός δόσης για άτομο εκτεθειμένο στις συγκεντρώσεις σωματιδίων τόσο σε εξωτερικούς όσο και σε



εσωτερικούς χώρους. Η ταχύτητα του ανέμου θεωρείται μηδενική σε εσωτερικούς χώρους ενώ για τον υπολογισμό του αναπνεύσιμου κλάσματος των σωματιδίων σε υπαίθρια έκθεση χρησιμοποιούνται μέσες ωριαίες τιμές ταχύτητας.

Στο διάγραμμα της εικόνας 42 δίνεται η συγκέντρωση των σωματιδίων στο εσωτερικό και εξωτερικά του σπιτιού στο Όσλο κατά το διάστημα των μετρήσεων και ο αντίστοιχος ωριαίος ρυθμός δόσης όπως εκτιμήθηκε από το μοντέλο AEROEXPDOSE. Ο ρυθμός δόσης υπολογίστηκε θεωρώντας πως τα σωματίδια είναι σφαιρικά με πυκνότητα  $1\mu\text{g}/\text{m}^3$  ενώ το άτομο εισπνέει και εκπνέει από τη μύτη ενώ όσο αφορά τις δραστηριότητες και τις αντίστοιχες παραμέτρους φυσιολογίας χρησιμοποιήθηκε το τυπικό σενάριο που δίνεται στον πίνακα 9. Οι συγκεντρώσεις των σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους είναι κυρίως μικρότερες σε σχέση με τις εξωτερικές. Ωστόσο κατά διαστήματα παρουσιάζονται υψηλότερες κάτι που ειδικά για περιπτώσεις όπου η καμπύλη εμφανίζει τοπικά μέγιστο οφείλεται στην ύπαρξη πηγής στο εσωτερικό του κτιρίου.



**Εικόνα 42:** Συγκέντρωση σωματιδίων εντός και εκτός της οικίας στο Όσλο και ο αντίστοιχος ωριαίος ρυθμός δόσης όπως εκτιμήθηκε με το μοντέλο AEROEXPDOSE.

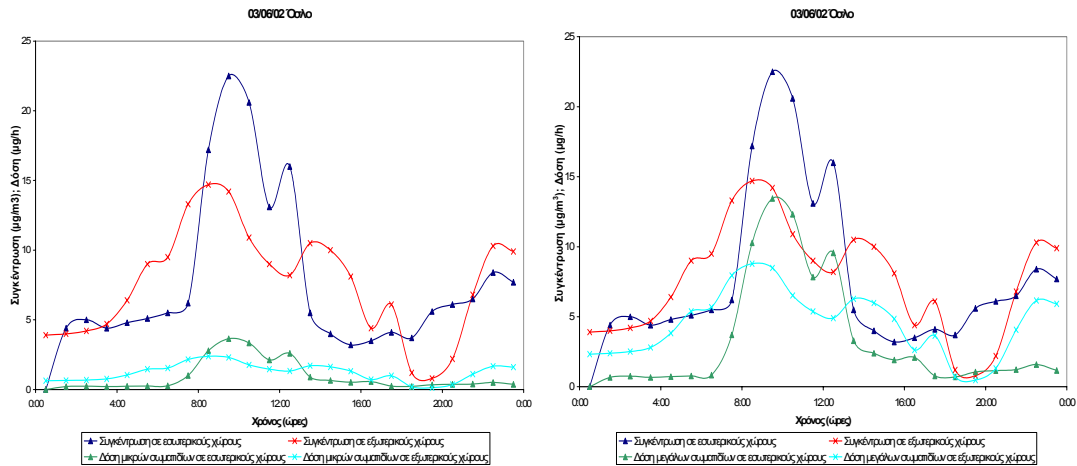
Οι πηγές σωματιδίων στο εσωτερικό της οικίας στο Όσλο καθώς και η συσχέτιση μεταξύ των συγκεντρώσεων θα αναλυθούν παρακάτω για κάθε ημέρα. Πρέπει να

σημειωθεί ότι τις ημέρες 5/6/2002 με 7/6/2002 και στις 9/10/2002 η δόση παρουσιάζεται μηδενική στο διάγραμμα αφού δεν εκτιμήθηκε λόγω έλλειψης δεδομένων για την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων. Ακόμα, η ασυνέχεια που παρουσιάζουν οι καμπύλες σε κάποια σημεία οφείλεται σε σφάλμα του οργάνου μέτρησης εκτός από την περίπτωση στις 7/6/2002 στην καμπύλη των εσωτερικών συγκεντρώσεων που οι τιμές παραλήφθηκαν στο σχεδιασμό του διαγράμματος καθώς ήταν μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερες από αυτές της υπόλοιπης περιόδου για λόγους που θα αναλυθούν παρακάτω.

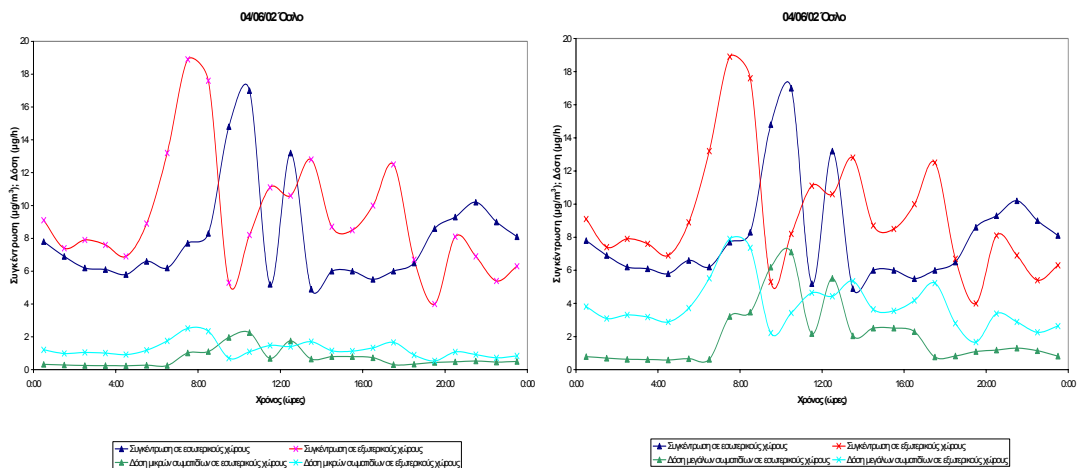
Ο ρυθμός δόσης εξαρτάται από την συγκέντρωση και τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων στην περίπτωση έκθεσης σε εξωτερικούς χώρους καθώς θεωρείται ότι το άτομο διαρκώς εκτελεί ήπια εργασία. Έτσι η καμπύλη ρυθμού δόσης ακολουθεί αυτή των εξωτερικών συγκεντρώσεων χωρίς ωστόσο τα δύο μεγέθη να σχετίζονται γραμμικά (συντελεστής συσχέτισης<sup>7</sup> 0,96). Αντίθετα στην περίπτωση έκθεσης στο εσωτερικό της οικίας, η δραστηριότητα του ατόμου μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας και η καμπύλη του ρυθμού δόσης διαφοροποιείται αρκετά από αυτή των εσωτερικών συγκεντρώσεων (συντελεστής συσχέτισης 0,83). Αναλυτικότερα, στις εικόνες 43 - 47 δίνεται ο ρυθμός δόσης σε εξωτερικούς και εσωτερικούς χώρους, όπως υπολογίστηκε με το μοντέλο AEROEXPDOSE, χωριστά για το κλάσμα των μικρών και μεγάλων σωματιδίων καθώς και οι εξωτερικές και εσωτερικές συγκεντρώσεις αεροζόλ για την περίοδο μελέτης. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα η μεγαλύτερη ποσότητα μάζας συλλέχθηκε από τον κρουστικό δειγματολήπτη Berner στις 8/6/2002 και η μικρότερη στις 4/6/2002. Πράγματι, όπως διαπιστώνεται και από τα παρακάτω διαγράμματα αν και οι εξωτερικές συγκεντρώσεις παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές τους στις 4, 8 και 10 Ιουνίου μόνο στις 8/6/2002 διατηρούνται σε υψηλό επίπεδο καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας.

---

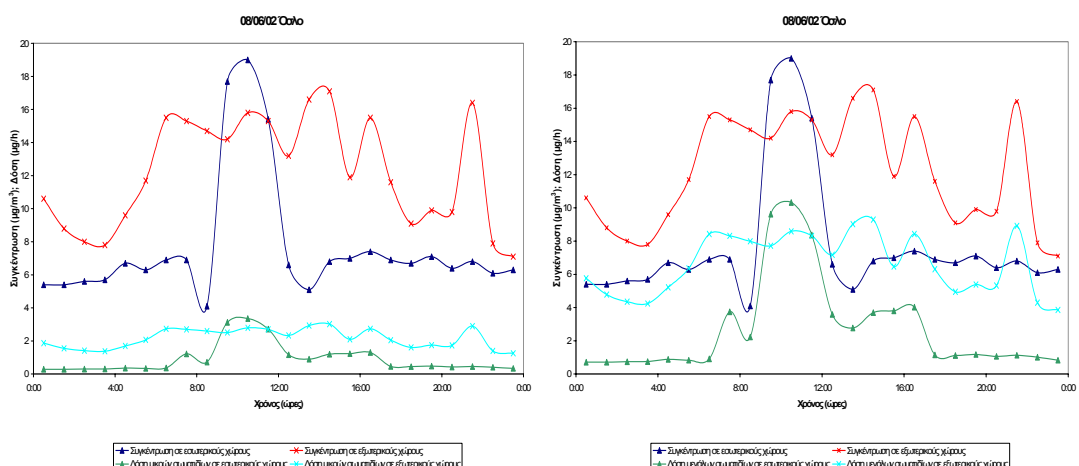
<sup>7</sup> Ο συντελεστής συσχέτισης υπολογίζεται με την εξίσωση 
$$\rho_{x,y} = \frac{1}{n\sigma_x\sigma_y} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y).$$



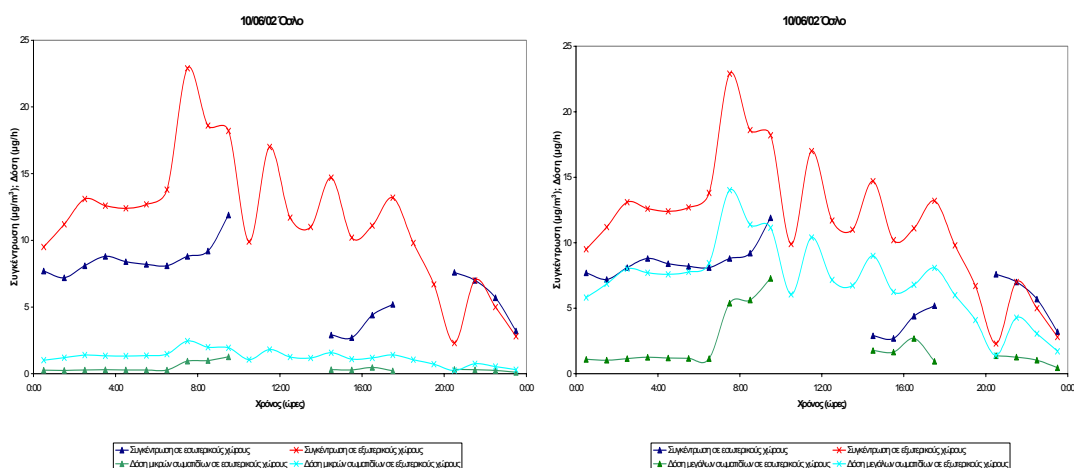
**Εικόνα 43:** Συγκέντρωση αεροζόλ και δόση μικρών και μεγάλων σωματιδίων μετά από έκθεση σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους στις 03/06/02.



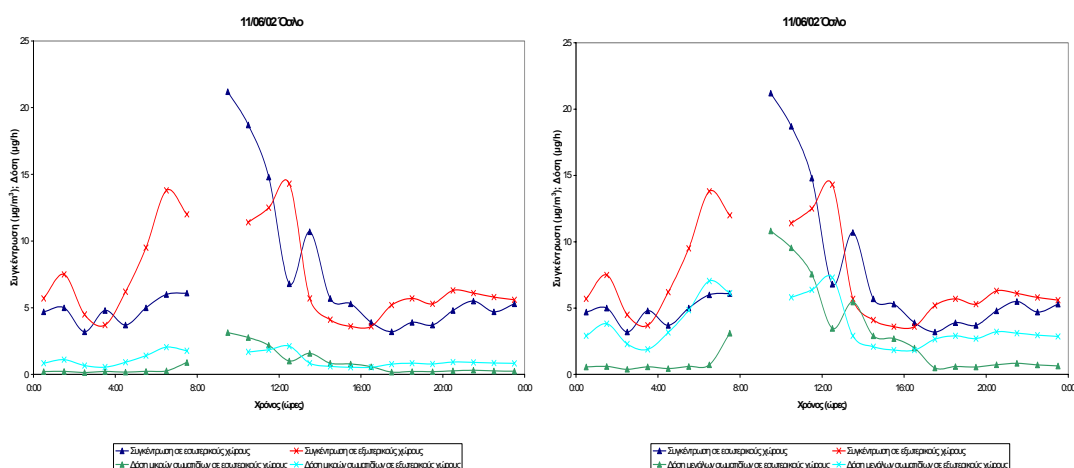
**Εικόνα 44:** Συγκέντρωση αεροζόλ και δόση μικρών και μεγάλων σωματιδίων μετά από έκθεση σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους στις 04/06/02.



**Εικόνα 45:** Συγκέντρωση αεροζόλ και δόση μικρών και μεγάλων σωματιδίων μετά από έκθεση σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους στις 08/06/02.



**Εικόνα 46:** Συγκέντρωση αεροζόλ και δόση μικρών και μεγάλων σωματιδίων μετά από έκθεση σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους στις 10/06/02.



**Εικόνα 47:** Συγκέντρωση αεροζόλ και δόση μικρών και μεγάλων σωματιδίων μετά από έκθεση σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους στις 11/06/02.

Οι εξωτερικές συγκεντρώσεις  $PM_{10}$  παρουσιάζουν αυξημένες τιμές κατά τη διάρκεια της ημέρας (6:00 π.μ. – 6:00 μ.μ.) και ιδιαίτερα τις πρώτες πρωινές ώρες. Κατά το ίδιο χρονικό διάστημα ο ρυθμός δόσης είναι μεγαλύτερος για τα μεγάλα σωματίδια και ιδιαίτερα τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες (7:00 π.μ. – 3:00 μ.μ.) όταν το άτομο θεωρείται πως εργάζεται.

Πιο συγκεκριμένα, όσο αφορά τις συγκεντρώσεις σωματιδίων, στις 3/6/2002 οι υψηλότερες εξωτερικές συγκεντρώσεις παρατηρούνται κατά τις πρώτες πρωινές ώρες και αργότερα το διάστημα 1:00 μ.μ. – 3:00 μ.μ.. Οι εσωτερικές συγκεντρώσεις μεταβάλλονται ανάλογα με τις εξωτερικές όπως εύκολα φαίνεται στην εικόνα 43, ακολουθώντας την καμπύλη εξωτερικών συγκεντρώσεων με κάποια χρονική

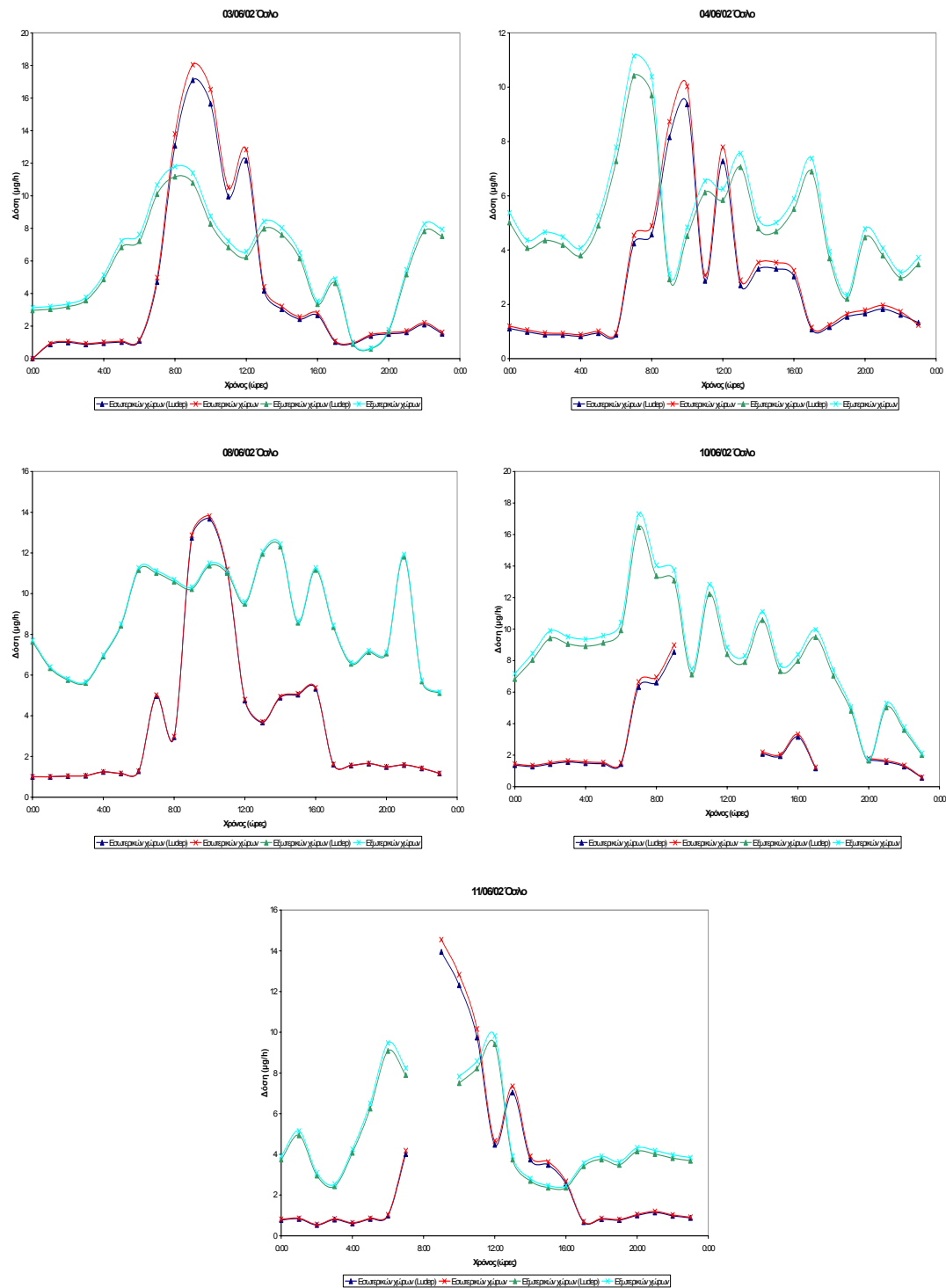
υστέρηση (απαιτούμενος χρόνος για τη διάχυση των ρύπων στο εσωτερικό του κτιρίου) (Abt κ.α., 2000). Η κατακόρυφη σχεδόν άνοδος των εσωτερικών συγκεντρώσεων μεταξύ 8:00 π.μ. και 10:00 π.μ. οφείλεται τόσο στην αύξηση των εξωτερικών συγκεντρώσεων όσο και στον αερισμό του κτιρίου και την δραστηριότητα 4 ατόμων (ομάδα που διενεργεί τις μετρήσεις) στο σπίτι κατά αυτό το διάστημα. Μετά τις 6 μ.μ. οι τιμές των συγκεντρώσεων εσωτερικά είναι ξανά υψηλότερες των εξωτερικών αφού τα σωματίδια που έχουν εισέλθει στο χώρο από εξωτερικά ή έχουν παραχθεί στο εσωτερικό του κτιρίου από συσσωμάτωση μικρότερων σωματιδίων, αντιδράσεις και εκπομπή από τα δομικά υλικά του βρίσκονται σε αιώρηση. Η αύξηση της εσωτερικής συγκέντρωσης μετά το μεσημέρι θα ήταν αναμενόμενη και στην πραγματικότητα λόγω της επιστροφής των ενοίκων στο σπίτι μετά από της καθημερινές τους δραστηριότητες (Liao κ.α., 2003).

Στις 4/6/2002 το σπίτι αερίστηκε κατά τα διαστήματα 9:40π.μ. – 11:00π.μ. και 12:40 μ.μ. – 1:00 μ.μ. από το παράθυρο του καθιστικού και για 10 λεπτά μετά τις 1:10 μ.μ. με άνοιγμα της πόρτας της βεράντας. Ακόμα μεταξύ 9:40 π.μ. – 12:40 μ.μ. βρέθηκαν 4 άτομα στο σπίτι και 6 άτομα το διάστημα 12:40 μ.μ. – 1:25 μ.μ. Οι δραστηριότητες αυτές οφείλονται για τις συνεχείς διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων στο εσωτερικό του κτιρίου όπως φαίνονται στην εικόνα 44. Ο αερισμός του σπιτιού με άνοιγμα του παραθύρου σε σύγκριση με άνοιγμα της μπαλκονόπορτας αντιστοιχεί σε μικρότερη παροχή αέρα αλλά ο όγκος που ανταλλάχθηκε για το διάστημα 20 λεπτών (12:40 μ.μ. – 1:00 μ.μ. παράθυρο) και 10 λεπτών (1:10 μ.μ. – 1:20 μ.μ. πόρτα βεράντας) μπορεί να θεωρηθεί ίσος. Ωστόσο, στην πρώτη περίπτωση η συγκέντρωση στο εσωτερικό του κτιρίου αυξήθηκε από  $5,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (μέση συγκέντρωση 11:00 π.μ. – 12:00 μ.μ.) σε  $13,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ενώ για το διάστημα 1:00 μ.μ. – 2:00 μ.μ. που η πόρτα της βεράντας ήταν ανοιχτή για 10 λεπτά η μέση συγκέντρωση είναι  $4,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Αυτή η ελάττωση της συγκέντρωσης οφείλεται τόσο στην διάχυση των ρύπων από το εσωτερικό στο εξωτερικό του κτιρίου, αφού την στιγμή που άνοιξε η μπαλκονόπορτα η συγκέντρωση εσωτερικά ήταν υψηλότερη, όσο και στην αυξημένη συσσωμάτωση και καθίζηση σωματιδίων που ακολούθησε μετά το κλείσιμο της. Τέλος, οι γείτονες έψηναν στα κάρβουνα στον κήπο μεταξύ των δύο σπιτιών στις 6 το απόγευμα με αποτέλεσμα την παρατηρούμενη αύξηση των εξωτερικών συγκεντρώσεων.

Αν και στόχος της εργασίας δεν είναι η συσχέτιση των επιπέδων ρύπανσης σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους και η μελέτη των παραγόντων που επηρεάζουν τα επίπεδα των εσωτερικών συγκεντρώσεων δίνονται κατ' αναλογία με τα παραπάνω οι δραστηριότητες εντός και εκτός του κτιρίου την περίοδο των μετρήσεων για την κατανόηση των διαγραμμάτων 45 – 47 και της συσχέτισης περιβαλλοντικής και μη δόσης. Έτσι για τις υπόλοιπες ημέρες οι δραστηριότητες εντός και εκτός του σπιτιού ήταν:

- 8/6/2002: (1) αερισμός από το παράθυρο του καθιστικού (9:40 π.μ. – 11:30 π.μ.), (2) δραστηριότητα 3 ατόμων στο καθιστικό (9:40 π.μ. – 12:35 μ.μ.), (3) δραστηριότητα 1 ατόμου στο καθιστικό (3:25 μ.μ. – 3:30 μ.μ.), (4) τηγάνισμα ψαριών και χρήση του απορροφητήρα της κουζίνας (11:30 π.μ. – 11:50 π.μ.), (5) χρήση της ηλεκτρικής σκούπας στο καθιστικό (11:35 π.μ. – 11:45 π.μ.), (6) αναμμένα κεριά στο καθιστικό (11:30 π.μ. – 12:30 μ.μ.), (7) στο γειτονικό σπίτι οι κάτοικοι έβαφαν κατά τη διάρκεια της ημέρας και έψηναν στα κάρβουνα (4:00 μ.μ. – 4:15 μ.μ.).
- 10/6/2002: (1) αερισμός από το παράθυρο του καθιστικού (9:30 π.μ. – 11:00 π.μ.), (2) δραστηριότητα 3 ατόμων στο καθιστικό (9:30 π.μ. – 12:00 μ.μ.), (3) δραστηριότητα 2 ατόμων στο καθιστικό (10:00 μ.μ. – 1:30 μ.μ.), (4) κίνηση οχήματος μπροστά από το σπίτι (9:15 π.μ. – 9:30 μ.μ.).
- 11/6/2002: (1) αερισμός από το παράθυρο του καθιστικού (9:20 π.μ. – 11:00 π.μ.), (2) δραστηριότητα 3 ατόμων στο καθιστικό (9:20 π.μ. – 12:30 μ.μ.).

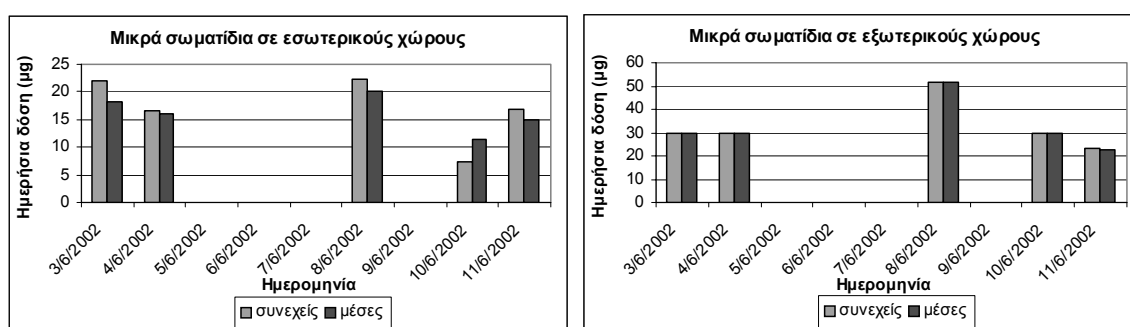
Στα διαγράμματα της εικόνας 48 δίνονται συγκριτικά οι ρυθμοί δόσης ολικών σωματιδίων όπως υπολογίστηκαν με τα μοντέλα LUDEP και AEROEXPDOSE. Μικρή διαφορά παρατηρείται καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου προσομοίωσης. Η διαφορά οφείλεται στη στρογγυλοποίηση αριθμών στο τέταρτο δεκαδικό ψηφίο που κάνει το LUDEP σε όλα τα στάδια υπολογισμού και στη διαφορά της εκτιμώμενης τιμής εναπόθεσης για πολύ μεγάλα και πολύ μικρά σωματίδια μεταξύ των δύο μοντέλων.



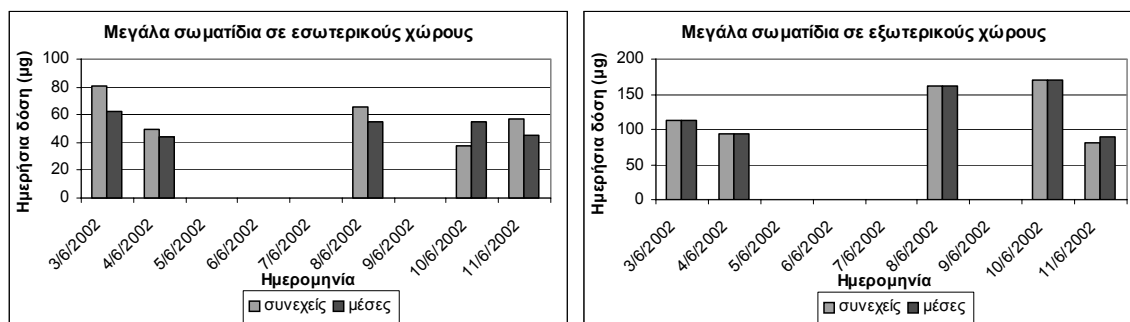
**Εικόνα 48:** Διαφορά εκτιμούμενης ωριαίας δόσης ολικών σωματιδίων με τη χρήση των μοντέλων LUDEP και AEROEXPDOSE.

Η δόση υπολογίζεται με την σχέση της εξίσωσης 27 τόσο με τη χρήση συνεχών τιμών όσο και με τη χρήση μέσων ημερήσιων τιμών για τη συγκέντρωση των σωματιδίων, την ταχύτητα του ανέμου και τις παραμέτρους φυσιολογίας και αναπνοής. Στα διαγράμματα των εικόνων 49-51 δίνονται τα αποτελέσματα των δύο υπολογισμών για

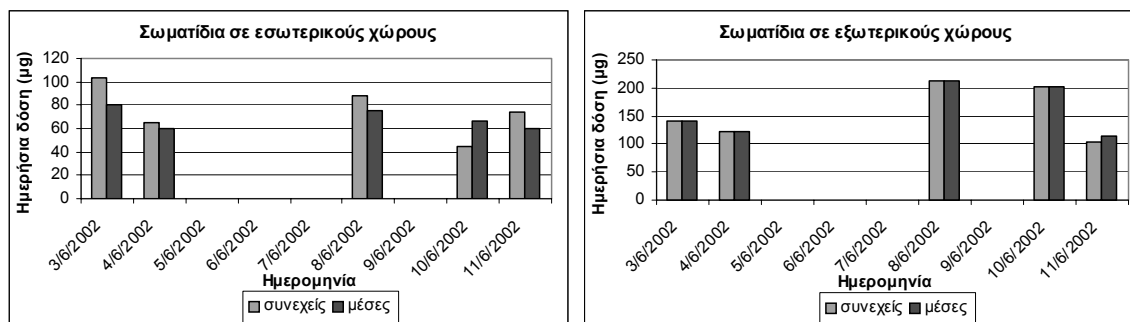
τη δόση σε έκθεση σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους. Η δόση των σωματιδίων σε εξωτερικούς χώρους προκύπτει σχεδόν ίση και με τις δύο προσεγγίσεις κάτι που δεν ισχύει για τη δόση εντός του κτιρίου στο Όσλο. Όπως φαίνεται στα διαγράμματα η διαφορά της δόσης στο εσωτερικό του κτιρίου μπορεί να φτάσει ως και τα 22,45 $\mu\text{g}$  (27,9%) για τα ολικά σωματίδια στις 3/6/2002. Η διαφορά στη δόση των μεγάλων σωματιδίων κυμαίνεται για όλη την περίοδο από 11,9% (4/6/2002) ως 31,16% (10/6/2002) και των μικρών από 3,7% ως 34,87% για τις ίδιες ημέρες. Αντίθετα οι υπολογισμένες δόσεις σε εξωτερικό χώρο είναι καθημερινά ίσες εκτός από τις 11/6/2002 που διαφέρουν κατά 8,3% για τα ολικά σωματίδια και οφείλεται στην έλλειψη τιμών για το διάστημα 8:00 π.μ. – 10:00 π.μ..



**Εικόνα 49:** Ημερήσια δόση μικρών σωματιδίων όπως εκτιμήθηκε βάσει μέσων ημερήσιων και συνεχών τιμών με το μοντέλο AEROEXPDSE.



**Εικόνα 50:** Ημερήσια δόση μεγάλων σωματιδίων όπως εκτιμήθηκε βάσει μέσων ημερήσιων και συνεχών τιμών AEROEXPDSE.



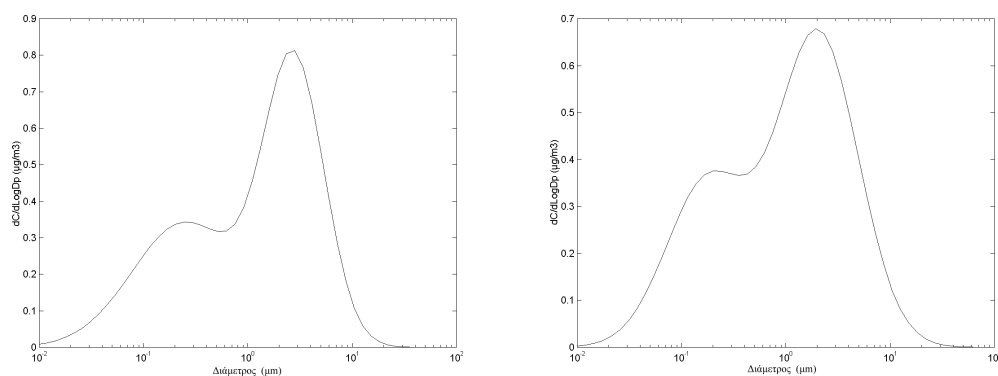
**Εικόνα 51:** Ημερήσια δόση ολικών σωματιδίων όπως εκτιμήθηκε βάσει μέσων ημερήσιων και συνεχών τιμών AEROEXPDSE.



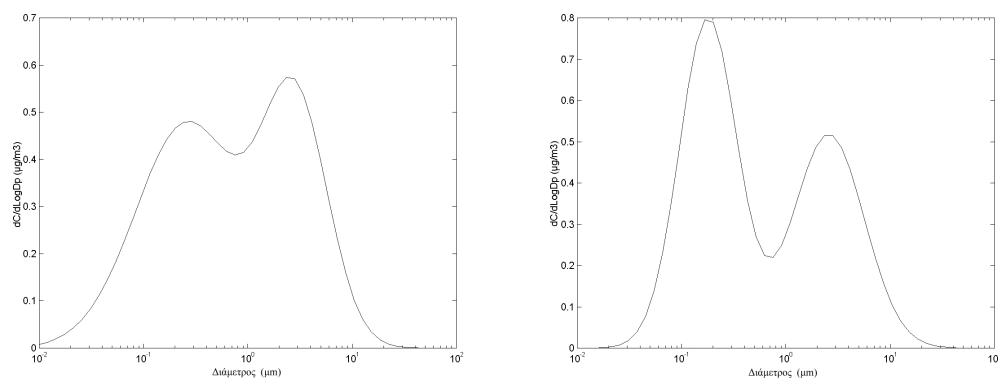
Η εκτιμώμενη δόση διαφέρει ειδικά για την περίπτωση έκθεσης στο εσωτερικό του κτιρίου εξαιτίας κυρίως της χρήσης μέσων τιμών δραστηριότητας, φυσιολογίας και παραμέτρων αναπνοής. Ένα άτομο σε εξωτερικό χώρο θεωρείται πως εκτελεί ήπια εργασία όλη τη διάρκεια της ημέρας και έτσι οι μέσες τιμές των παραμέτρων δραστηριότητας, φυσιολογίας και αναπνοής δε διαφέρουν από τις πραγματικές ωριαίες τιμές τους. Αντίθετα ένα άτομο σε εσωτερικό χώρο μεταβάλλει τη δραστηριότητα του ανάλογα την ώρα της ημέρας. Ο ρυθμός αναπνοής και ο λαμβανόμενος όγκος αέρα για ένα άτομο που κοιμάται είναι πολύ μικρότερος από αυτόν για άτομο που κάθεται ή εργάζεται (πίνακας 2, κεφάλαιο 3). Οι μέσες ημερήσιες τιμές για τον ογκομετρικό ρυθμό αναπνοής, τον όγκο που λαμβάνεται ανά εισπνοή, την ογκομετρική παροχή αέρα και τον ρυθμό αναπνοής είναι  $0,91\text{m}^3/\text{h}$ ,  $916,67\text{ mL}$ ,  $505,417\text{ mL/sec}$  και  $15,33\text{ αναπνοές/min}$  αντίστοιχα. Έτσι αν παραλείψουμε τις 11/6/2002 που η δόση βγαίνει μεγαλύτερη όταν υπολογίζεται από μέσες τιμές, για τις υπόλοιπες ημέρες υπολογίζεται μικρότερη αφού το διάστημα 7:00 π.μ. – 5:00 μ.μ. που παρατηρούνται οι υψηλότερες συγκεντρώσεις της ημέρας το άτομο θεωρείται πως αναπνέει μικρότερο όγκο από τον πραγματικό.

Τέλος, η διαφορά στις εκτιμώμενες δόσεις στον εξωτερικό χώρο οφείλεται λιγότερο από 0,02% στον υπολογισμό του αναπνεύσιμου κλάσματος σωματιδίων βάσει τιμών μέσης ημερήσιας ταχύτητας (οι τιμές ταχύτητας κυμαίνονται από 0,1-2,8 m/sec για τις 5 ημέρες). Έτσι η δόση εισπνεόμενων σωματιδίων που δέχεται ένα άτομο που εκτίθεται σε εξωτερικό χώρο ή που εκτελεί την ίδια δραστηριότητα κατά την διάρκεια της περιόδου μελέτης μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια από μέσες ημερήσιες τιμές. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό γιατί τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα όργανα μέτρησης σε σταθμούς παρακολούθησης της ποιότητας της ατμόσφαιρας παρέχουν μέσες ημερήσιες τιμές συγκεντρώσεων (Impactors, Cyclones, Nuclepore filters) (McMurry, 2000). Τα όργανα αντλούν ατμοσφαιρικό αέρα με γνωστή σταθερή παροχή και τα σωματίδια συλλέγονται σε διάστημα 24 ωρών σε φίλτρα τα οποία στη συνέχεια ζυγίζονται για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης και πιθανόν αναλύονται για την εύρεση της χημικής σύστασης των σωματιδίων (EMEP, 2001). Η προσέγγιση αυτή θα χρησιμοποιηθεί και παρακάτω στην εφαρμογή του μοντέλου AEROEXPDOSE στις συνθήκες της Φοινοκαλιάς όπου βρίσκεται ένας μόνιμος σταθμός μέτρησης μετεωρολογικών συνθηκών και ατμοσφαιρικών ρύπων.

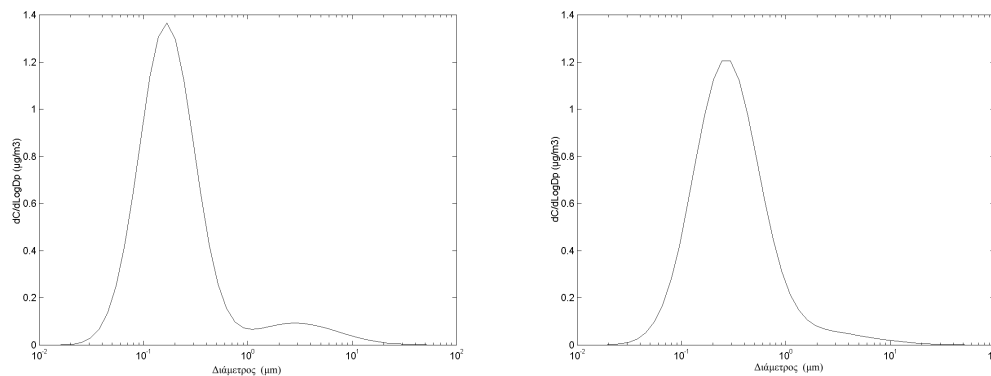
Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου, κατανομές μάζας έχουν μετρηθεί για 8 διαφορετικά στοιχεία και για τον άνθρακα (οργανικό και μη) από τα δείγματα αεροζόλ που συλλέχθηκαν στον εξωτερικό χώρο του κτιρίου με τον κρουστικό δειγματολήπτη Berner. Διαθέσιμα δεδομένα κατανομής μάζας του ανόργανου κλάσματος των σωματιδίων υπάρχουν για τις 3/6/2002, 4/6/2002, 8/6/2002 και 10/6/2002 ενώ για τον άνθρακα στις 5/6/2002, 6/6/2002, 7/6/2002 και 9/6/2002. Ο άνθρακας παρουσιάζει κατανομή μεγέθους με δύο κορυφές ενώ για τα ανόργανα σωματίδια η μορφή των κατανομών ποικίλλει ανάλογα το στοιχείο αλλά και την ημέρα. Τα σωματίδια Mg για παράδειγμα, που προέρχονται κυρίως από αιώρηση εδαφικού υλικού, παρουσιάζουν κατανομές μάζας με μια κορυφή και η μάζα τους αποτελείται κυρίως από μεγάλα σωματίδια (εικόνα 52) ενώ τα σωματίδια καλίου (K) και νατρίου (Na) παρουσιάζουν κατανομές μάζας με δύο κορυφές (εικόνα 53) (Salma κ.α., 2002). Από την άλλη πλευρά σωματίδια  $\text{SO}_4$  και  $\text{NH}_4$ , που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια διεργασιών καύσης, παρουσιάζουν διαμέτρους συσσωματώματος (accumulation mode, εικόνα 54).



**Εικόνα 52:** Κατανομή μάζας σωματιδίων Mg και  $\text{NO}_3$  στις 10/6/2002 και 3/6/2002 αντίστοιχα με την περισσότερη μάζα τους να βρίσκεται στο κλάσμα των μεγάλων σωματιδίων.

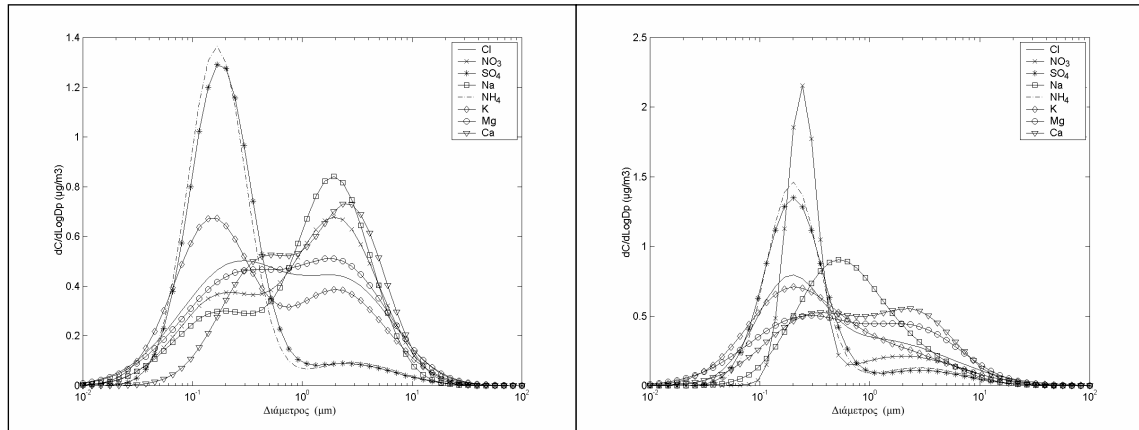


**Εικόνα 53:** Κατανομή μάζας σωματιδίων Na και K στις 8/6/2002. Τα στοιχεία παρουσιάζουν δύο κορυφές στη κατανομή μάζας.

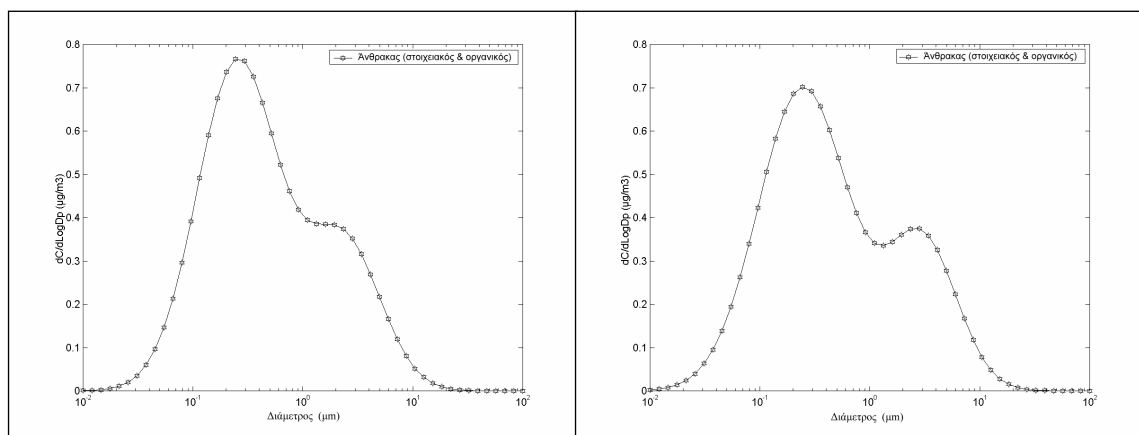


**Εικόνα 54:** Κατανομή μάζας σωματιδίων  $\text{NH}_4$  και  $\text{SO}_4$  στις 3/6/2002 και 10/6/2002 αντίστοιχα. Τα στοιχεία παρουσιάζουν κατανομή μιας κορυφής, με την περισσότερη μάζα τους να αποτελείται από σωματίδια μεγέθους συσσωματώματος.

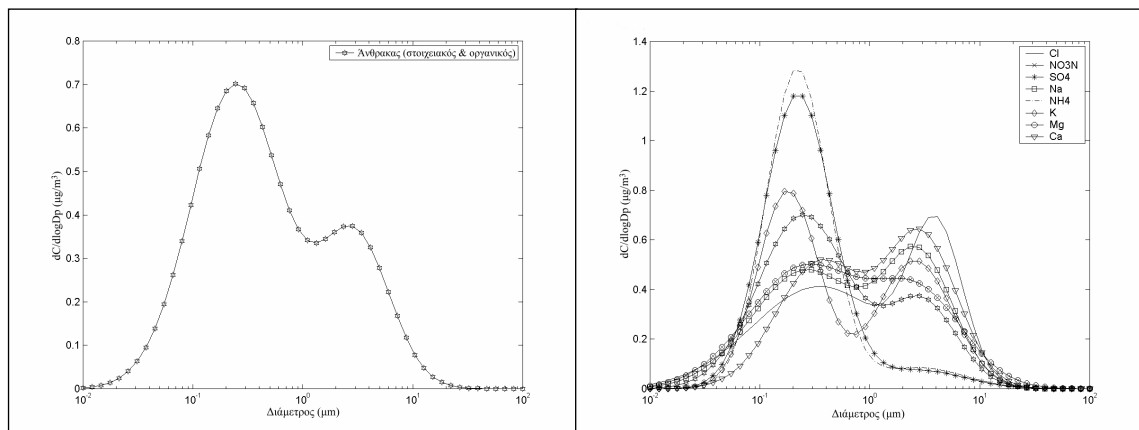
Στις εικόνες 55-58 που ακολουθούν, δίνονται οι κατανομές μάζας για κάθε στοιχείο χωριστά καθημερινά. Πρόκειται για διαγράμματα που παρουσιάζουν την σύσταση της σωματιδιακής ύλης κατά διαστήματα διαμέτρου. Αναλυτικότερα δίνεται η μάζα διαφόρων ιόντων στα σωματίδια κάθε διαμέτρου όπως προκύπτει με την εξαγωγή λογαριθμο-κανονικών κατανομών από τα πειραματικά δεδομένα των κρουστικών δειγματοληπτών. Για παράδειγμα στις 3/6/2002 τα σωματίδια διαμέτρου  $0,1\mu\text{m}$  αποτελούνται, όσο αφορά τα ανόργανα συστατικά τους, από  $\text{NH}_4$ ,  $\text{SO}_4$ , K, Cl, Mg,  $\text{NO}_3$ , Na και Ca κατά σειρά φθίνουσας συγκέντρωσης. Την ίδια ημέρα για τα σωματίδια διαμέτρου  $2\mu\text{m}$  ακολουθείται η παραπάνω σειρά αλλά ως αύξουσας συγκέντρωσης (με εξαίρεση το Na που είναι περισσότερο του Ca). Στις 5/6/2002 – 7/6/2002 και στις 9/6/2002 μετρήθηκε η κατανομή μάζας μόνο για το κλάσμα της σωματιδιακής ύλης που αποτελείται από στοιχειακό και οργανικό άνθρακα (εικόνες 56, 57α και 58α). Τα σωματίδια έχουν διαμέτρους συσσωματώματος και προέρχονται από καύσεις. Η αναλογία οργανικού προς στοιχειακού άνθρακα σε εξωτερικούς χώρους την περίοδο των μετρήσεων κυμαίνεται από 4,24 έως 7,14 που αντιστοιχούν στις 6/6/2002 και 5/6/2002. Ο στοιχειακός άνθρακας εντοπίζεται κυρίως στα μικρά σωματίδια και η μέση τιμή της παραπάνω αναλογίας για όλη την περίοδο μελέτης είναι 4,56 για τα μικρά και 8,26 για τα μεγάλα σωματίδια.



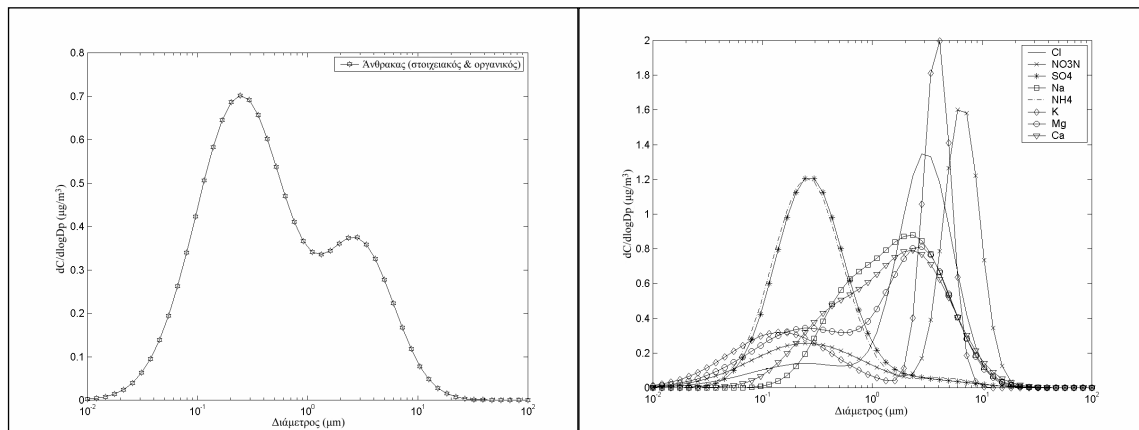
**Εικόνα 55:** Κατανομή μάζας σωματιδίων στις 3/6/2002 και 4/6/2002.



**Εικόνα 56:** Κατανομή μάζας σωματιδίων στις 5/6/2002 και 6/6/2002.

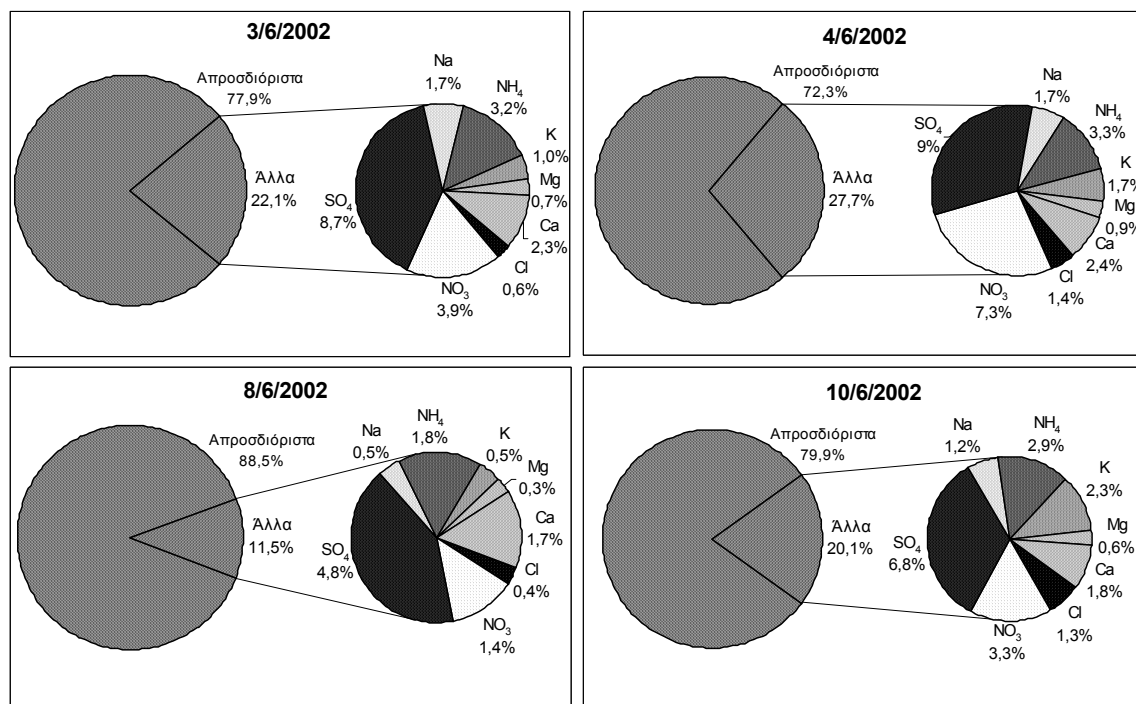


**Εικόνα 57:** Κατανομή μάζας σωματιδίων στις 7/6/2002 και 8/6/2002.



**Εικόνα 58:** Κατανομή μάζας σωματιδίων στις 9/6/2002 και 10/6/2002.

Τα περισσότερα ιόντα εντοπίζονται τόσο σε μικρά όσο και σε μεγάλα σωματίδια. Τα ιόντα  $\text{NH}_4$  και  $\text{SO}_4$  ωστόσο εντοπίζονται κυρίως στα μικρά σωματίδια και για το παραπάνω διάστημα απαρτίζουν, μαζί με το  $\text{Ca}$ , το μεγαλύτερο μέρος της σωματιδιακής μάζας που αναλύθηκε (εικόνα 59). Ταυτόχρονα αποτελούν καθημερινά μαζί με τα ιόντα  $\text{NO}_3$  περίπου το 50% της προσδιορισμένης μάζας σωματιδίων, κάτι που ισχύει γενικά στα ατμοσφαιρικά αεροζόλ (*Seinfeld and Pandis, 1998*). Η μάζα των ιόντων εδαφικής και θαλάσσιας (εκτός του  $\text{SO}_4$ ) προέλευσης που απαρτίζουν το κλάσμα των μεγάλων σωματιδίων είναι σχετικά μικρή για όλες τις ημέρες εκτός από τις 10/6/2002 που παρατηρείται μεγάλη αύξηση τους και συγκεκριμένα η μάζα του  $\text{Cl}$  είναι περίπου 9 φορές περισσότερη από ότι τις υπόλοιπες ημέρες της περιόδου μελέτης. Τα υλικά αυτά παρατηρούνται σε υψηλές συγκεντρώσεις τις ημέρες με υψηλή ταχύτητα ανέμου (*Schwartz, 1999*). Την ίδια ημέρα ο διπλασιασμός της μάζας  $\text{SO}_4$  που συλλέχθηκε οφείλεται στα θαλάσσια αεροζόλ. Ωστόσο την συγκεκριμένη ημέρα η ταχύτητα ανέμου εξωτερικά του κτιρίου κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα με των προηγούμενων ημερών και είναι στην πραγματικότητα λίγο μικρότερη από αυτή στις 4/6/2002. Έτσι συμπεραίνουμε ότι η αύξηση της συγκέντρωσης τους στα μεγάλα σωματίδια οφείλεται στην αιώρηση εδαφικού υλικού (όπου έχουν καθιζάνει τα θαλάσσια αεροζόλ) εξαιτίας της κίνησης του οχήματος μπροστά από το σπίτι. Στις 4/6/2002 και 10/6/2002 παρατηρούνται μέγιστα στη συγκέντρωση των  $\text{NO}_3$  για μικρά και μεγάλα σωματίδια αντίστοιχα. Τα ιόντα  $\text{NO}_3$  εντοπίζονται συνήθως στα μικρά σωματίδια που προέρχονται από διεργασίες καύσης. Ωστόσο όταν τα μεγάλα σωματίδια στην ατμόσφαιρα είναι πολλά, τα ιόντα μπορούν να συμπυκνωθούν σ' αυτά και έτσι να ανιχνεύονται στο κλάσμα των μεγάλων σωματιδίων.

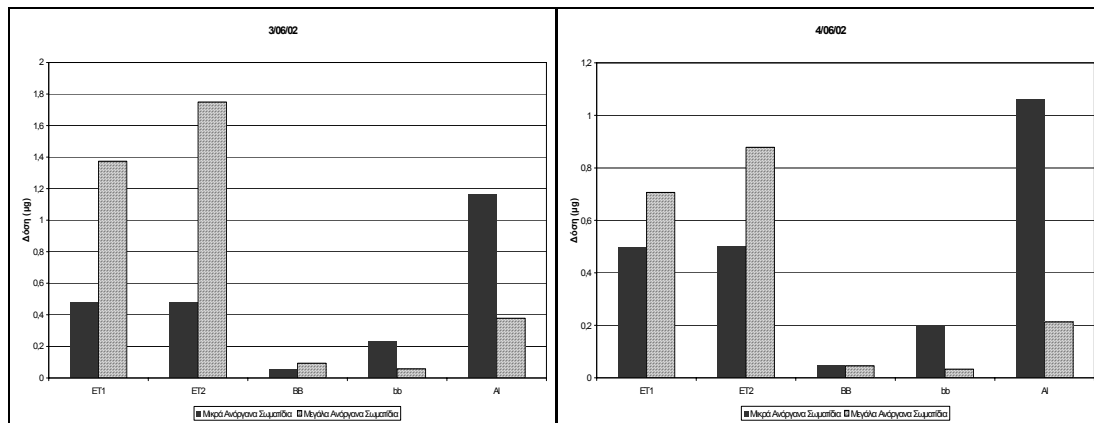


**Εικόνα 59:** Χημική σύσταση ανόργανων αεροζόλ στο Όσλο την περίοδο μελέτης.

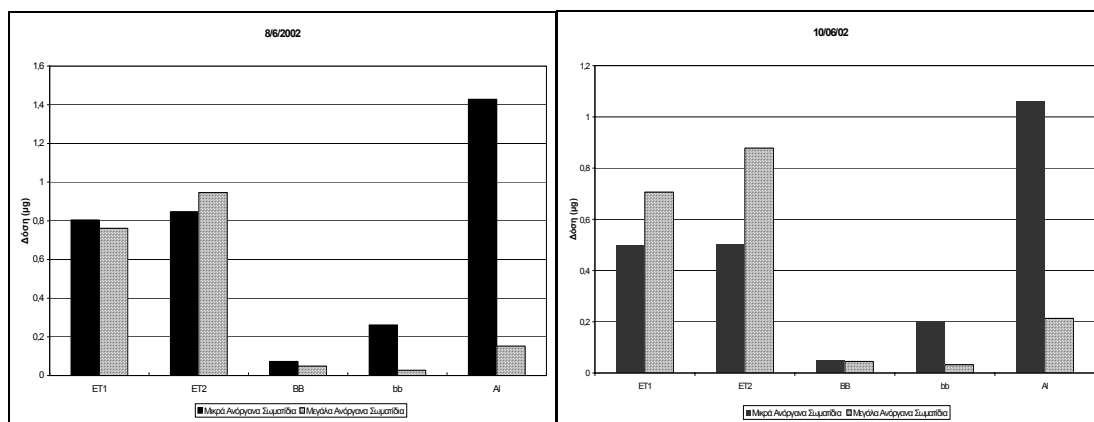
Η χημική σύσταση των σωματιδίων παραμένει άγνωστη για μεγάλο μέρος της μάζας τους όπως φαίνεται στην εικόνα 59. Στη μάζα σωματιδίων απροσδιόριστης σύστασης περιλαμβάνονται στοιχειακός άνθρακας, οργανικές ενώσεις, ανόργανες ενώσεις και άλλα χημικά στοιχεία των οποίων η ύπαρξη στα δείγματα δεν εξετάστηκε.

Η δόση μικρών και μεγάλων σωματιδίων για τις 5 περιοχές του αναπνευστικού συστήματος όπως υπολογίστηκε με το μοντέλο AEROEXPDOSE δίνεται στις εικόνες 60 με 63. Τα σωματίδια διακρίνονται σε αυτά που αποτελούνται από στοιχειακό και οργανικό άνθρακα και στα ανόργανα. Αναλυτικότερα, τα διαγράμματα των εικόνων 60 και 61 δίνουν την δόση των ανόργανων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα μετά από έκθεση στον εξωτερικό χώρο του κτιρίου. Η δόση των μικρών σωματιδίων είναι σημαντικότερη στην κυψελιδική περιοχή ενώ η δόση των μεγάλων σωματιδίων κυριαρχεί στην περιοχή εκτός θώρακα. Παρακάτω θα δοθεί και αναλυτικά η σύσταση των ανόργανων σωματιδίων που αποθέτονται σε κάθε περιοχή. Στα διαγράμματα 62 και 63 δίνεται η δόση των σωματιδίων στοιχειακού και οργανικού άνθρακα για έκθεση τόσο στον εξωτερικό χώρο όσο και στο εσωτερικό του κτιρίου. Η κατανομή μάζας των σωματιδίων εντός του κτιρίου θεωρήθηκε ίδια με την εξωτερική και υπολογίστηκε η δόση τους στις περιοχές του αναπνευστικού για συγκεντρώσεις που

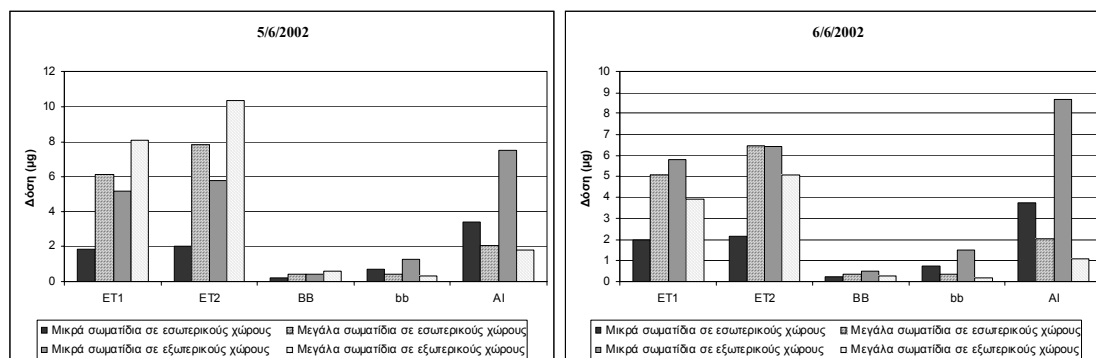
μετρήθηκαν εντός. Ένα μεγάλο μέρος του φόρτου που δέχονται οι πνεύμονες αποτελείται από αυτά τα σωματίδια. Για παράδειγμα η δόση των μικρών σωματιδίων οργανικού και στοιχειακού άνθρακα στις 7/6/2002 εκτός του κτιρίου εντοπίζεται στην κυψελιδική περιοχή και είναι περίπου 6 φορές μεγαλύτερη των αντίστοιχων ανόργανων σωματιδίων. Το ίδιο προφίλ ακολουθείται και τις υπόλοιπες ημέρες. Η διαφοροποίηση των δόσεων εντός και εκτός του κτιρίου οφείλεται μόνο στην διαφορά των συγκεντρώσεων τους. Οι συγκεντρώσεις των οργανικών ενώσεων και του στοιχειακού άνθρακα εντός του κτιρίου είναι υψηλότερες στα μεγάλα σωματίδια ενώ εξωτερικά αυτού στα μικρά. Αυτό οφείλεται τόσο στις πηγές όσο και στις διεργασίες που ευθύνονται για την καθίζηση των σωματιδίων στα διάφορα σημεία εντός του κτιρίου. Στην πραγματικότητα θα διαφέρουν και οι κατανομές μάζας για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω και άρα και η δόση.



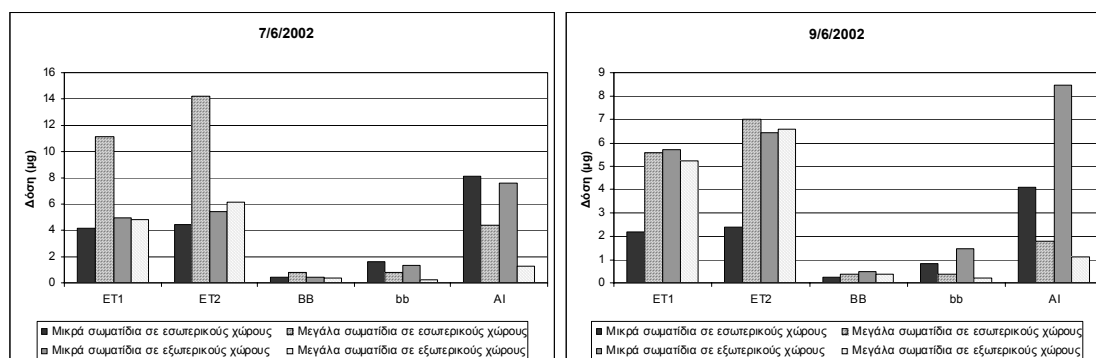
**Εικόνα 60:** Δόση μικρών και μεγάλων ανόργανων σωματιδίων σε εξωτερικούς χώρους όπως υπολογίστηκε από μέσες ημερήσιες τιμές των παραμέτρων καθορισμού δόσης, στις 3 και 4/6/2002 αντίστοιχα.



**Εικόνα 61:** Δόση μικρών και μεγάλων ανόργανων σωματιδίων σε εξωτερικούς χώρους όπως υπολογίστηκε από μέσες ημερήσιες τιμές των παραμέτρων καθορισμού δόσης, στις 8 και 10/6/2002 αντίστοιχα.



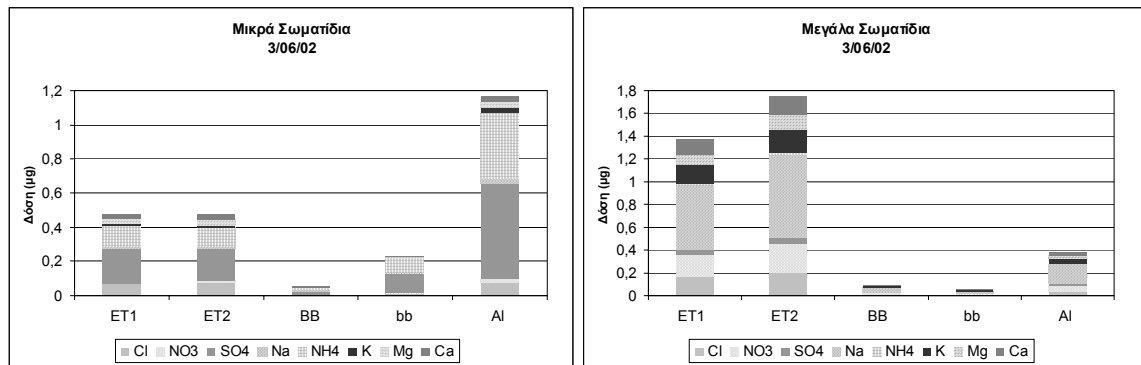
**Εικόνα 62:** Δόση μικρών και μεγάλων οργανικών σωματιδίων όπως υπολογίστηκε από μέσες ημερήσιες τιμές των παραμέτρων καθορισμού δόσης, στις 5 και 6/6/2002 αντίστοιχα.



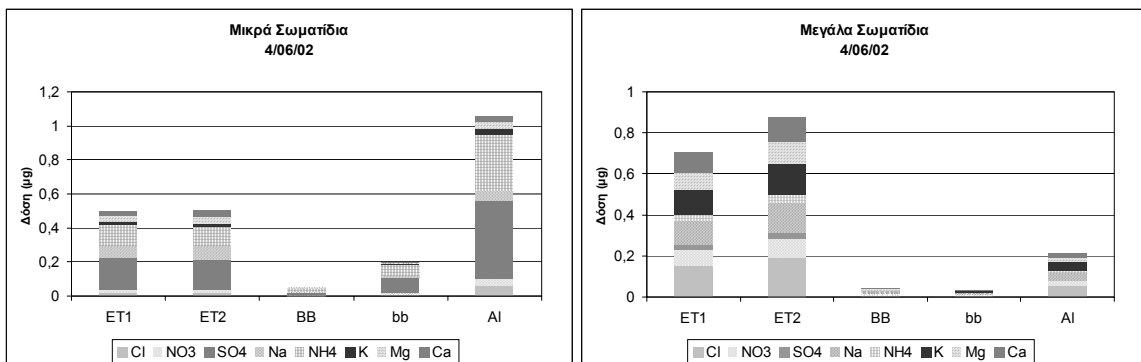
**Εικόνα 63:** Δόση μικρών και μεγάλων οργανικών σωματιδίων όπως υπολογίστηκε από μέσες ημερήσιες τιμές των παραμέτρων καθορισμού δόσης, στις 7 και 9/6/2002 αντίστοιχα.

Στις εικόνες 64 – 67 δίνεται η δόση των ανόργανων σωματιδίων για την περίοδο μελέτης. Το μεγαλύτερο ποσοστό εναπόθεσης σωματιδίων παρατηρείται στην εκτός θώρακα περιοχή για τα περισσότερα στοιχεία. Η δόση μεγάλων σωματιδίων, που αποτελούνται για παράδειγμα από ιόντα Cl, NO<sub>3</sub>, Mg και Ca είναι μεγαλύτερη στην περιοχή εκτός θώρακα μαζί με τη δόση ιόντων K και Na που βρίσκονται τόσο στα μικρά όσο και στα μεγάλα σωματίδια. Το φορτίο ιόντων NH<sub>4</sub> και SO<sub>4</sub> στην κυψελιδική περιοχή είναι περίπου ίσο με αυτό στην περιοχή εκτός θώρακα. Ιδιαίτερα υψηλή είναι η δόση μεγάλων σωματιδίων στις περιοχές εκτός θώρακα στις 10/6/2002 και ιδιαίτερα για τα ιόντα Cl, NO<sub>3</sub> και Na που όπως αναφέρθηκε νωρίτερα παρουσιάζουν πολύ υψηλή συγκέντρωση αυτή την ημέρα.

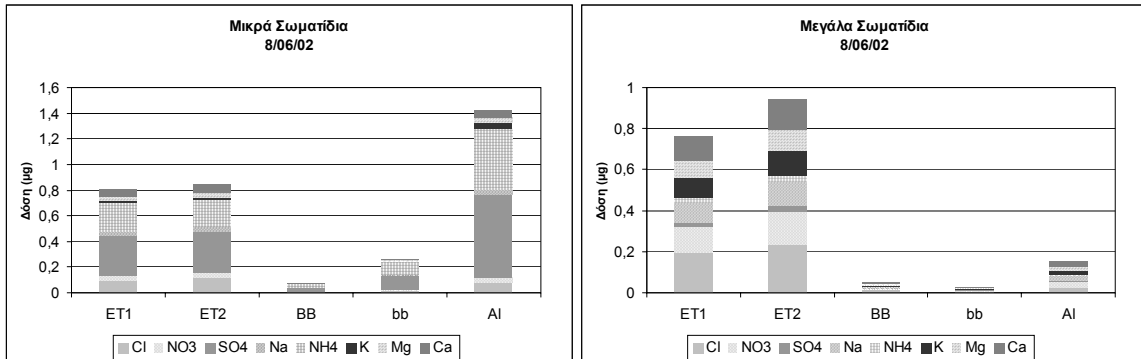




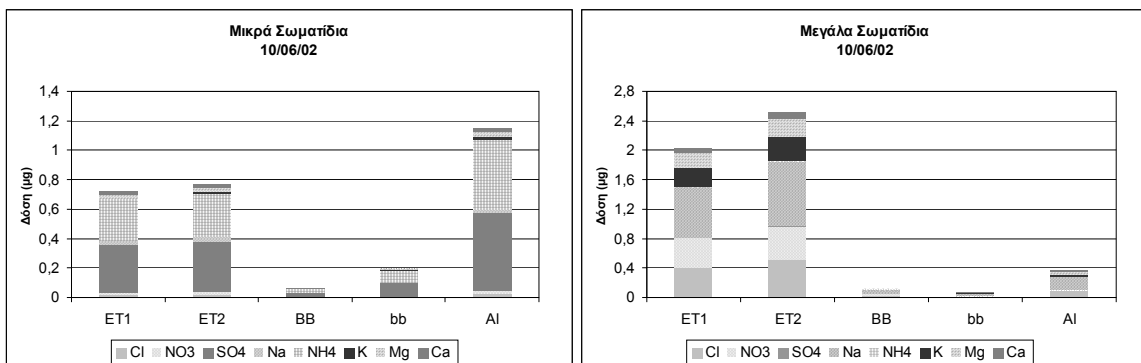
**Εικόνα 64:** Δόση μικρών και μεγάλων ανόργανων σωματιδίων σε εξωτερικούς χώρους όπως υπολογίστηκε από μέσες ημερήσιες τιμές των παραμέτρων καθορισμού δόσης, στις 3/6/2002.



**Εικόνα 65:** Δόση μικρών και μεγάλων ανόργανων σωματιδίων σε εξωτερικούς χώρους όπως υπολογίστηκε από μέσες ημερήσιες τιμές των παραμέτρων καθορισμού δόσης, στις 4/6/2002.

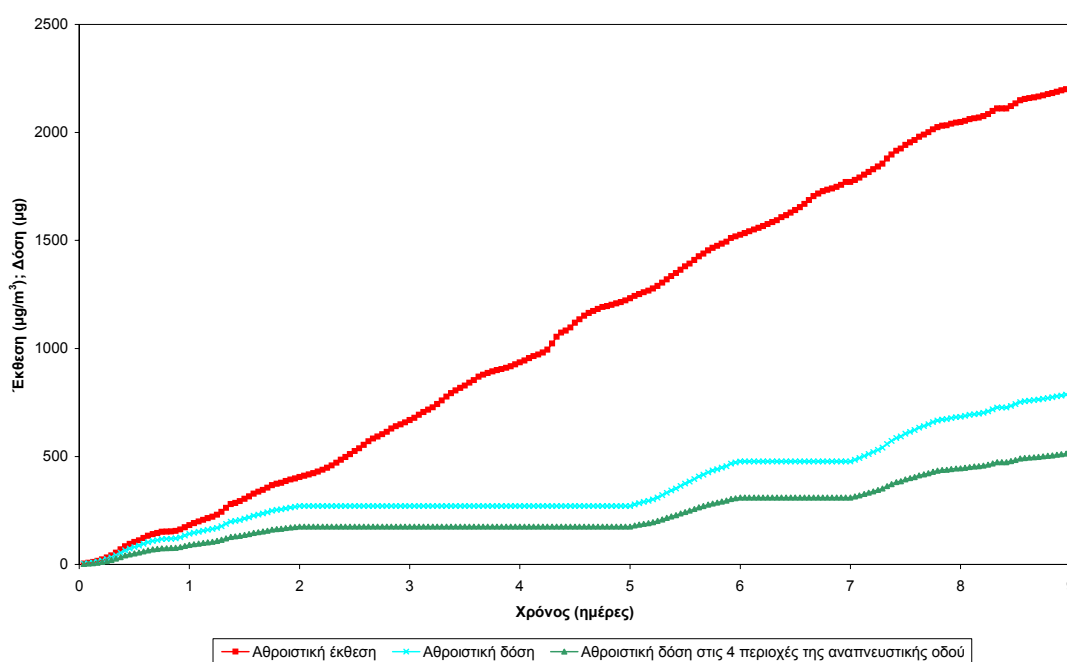


**Εικόνα 66:** Δόση μικρών και μεγάλων ανόργανων σωματιδίων σε εξωτερικούς χώρους όπως υπολογίστηκε από μέσες ημερήσιες τιμές των παραμέτρων καθορισμού δόσης, στις 8/6/2002.



**Εικόνα 67:** Δόση μικρών και μεγάλων ανόργανων σωματιδίων σε εξωτερικούς χώρους όπως υπολογίστηκε από μέσες ημερήσιες τιμές των παραμέτρων καθορισμού δόσης, στις 10/6/2002.

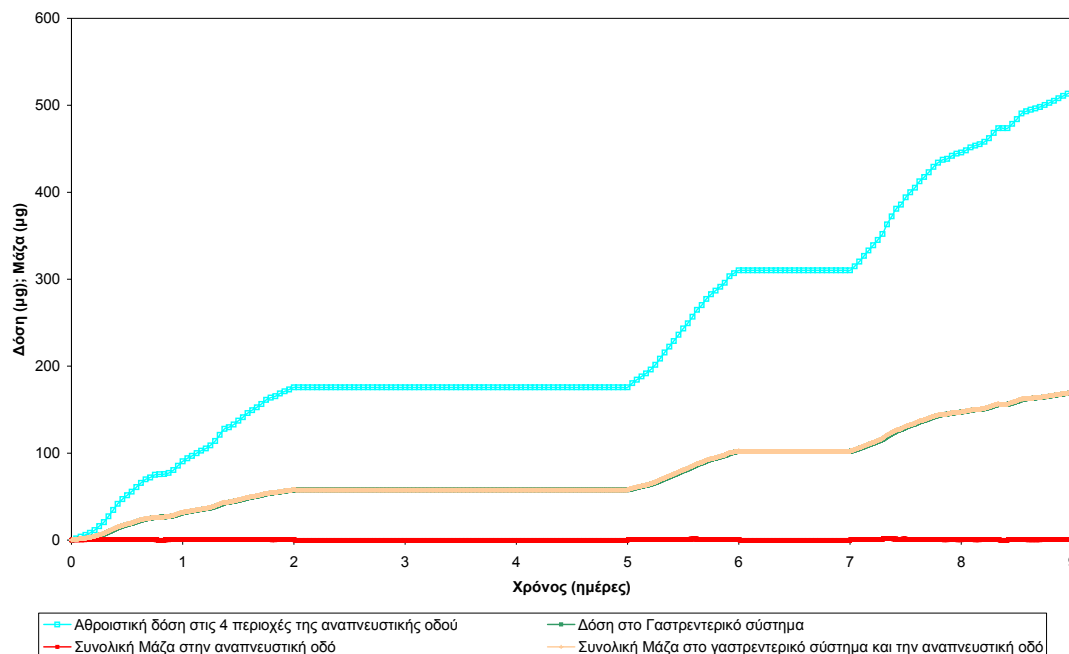
Η μελέτη των μεταβολών της συγκέντρωσης και ο καθορισμός της δόσης στο αναπνευστικό σύστημα, όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, είναι ιδιαίτερα σημαντικός αλλά δεν παρέχει μια πλήρη εικόνα της επιβάρυνσης του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος στο σπίτι στο Όσλο για την περίοδο μελέτης. Είναι σκόπιμο λοιπόν να κατασκευαστούν διαγράμματα που παρουσιάζουν την συνολική έκθεση του ατόμου και τη δόση στο αναπνευστικό σύστημα κατά την περίοδο μελέτης, όπως αυτό της εικόνας 68 για έκθεση στον εξωτερικό χώρο του κτιρίου στο Όσλο. Με τα διαγράμματα αυτά είναι πιο εύκολα κατανοητή η σχέση μεταξύ περιβαλλοντικών συγκεντρώσεων, έκθεσης και δόσης που λαμβάνει το άτομο. Βέβαια η τελική μάζα σωματιδίων που βρίσκεται σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος, στο αίμα και το γαστρεντερικό σύστημα κατά τη διάρκεια και στο τέλος της περιόδου μελέτης (3/6/2002 - 11/6/2002) εξαρτάται από το ρυθμό απομάκρυνσης των σωματιδίων από τις αρχικές θέσεις απόθεσης τους. Με το μοντέλο AEROEXPDOSE προσομοιώνεται η παραμονή - συσσώρευση σωματιδίων στις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος εκτός από την ET<sub>1</sub>. Έτσι στο διάγραμμα της εικόνας 68 δίνεται χωριστά η αθροιστική καμπύλη δόσης στις 4 περιοχές του αναπνευστικού.



**Εικόνα 68:** Αθροιστική έκθεση και δόση σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα, σε εξωτερικούς χώρους για την περίοδο μελέτης (3/6/2002 - 11/6/2002) στο Όσλο. Παράλληλα δίνεται και η αθροιστική καμπύλη δόσης στις 4 περιοχές του πνεύμονα (ET<sub>2</sub>, BB, bb, AI) που λαμβάνονται υπόψη στον μηχανισμό απομάκρυνσης των σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα.

Η μάζα που παραμένει στις 4 περιοχές του αναπνευστικού συστήματος και αυτή που απομακρύνεται στο αίμα και το γαστρεντερικό σύστημα για ταχέως απορροφώμενα

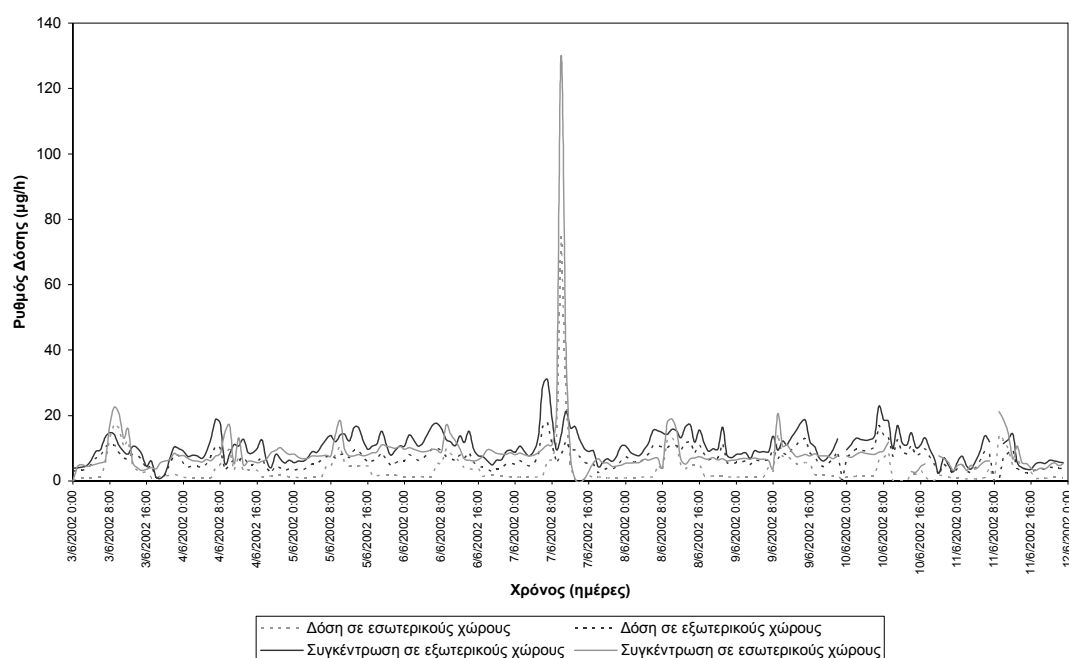
σωματίδια δίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 69. Το μοντέλο AEROEXPDOSE δεν εξάγει ως αποτέλεσμα την ποσότητα των σωματιδίων που απομακρύνεται στο αίμα κάθε ώρα. Έτσι στο διάγραμμα σχεδιάζεται και η καμπύλη της συσσωρευμένης μάζας στο γαστρεντερικό σύστημα και την αναπνευστική οδό μαζί. Στην περίπτωση σωματιδίων που απορροφώνται ταχέως στο αίμα η καμπύλη αυτή σχεδόν συμπίπτει με την καμπύλη δόσης στο γαστρεντερικό σύστημα (εικόνα 69). Η μάζα που έχει μεταφερθεί στο αίμα μια δεδομένη χρονική υπολογίζεται ως το υπόλοιπο της δόσης μείον την συσσωρευμένη μάζα στα γαστρεντερικό και το αναπνευστικό σύστημα.



**Εικόνα 69:** Αθροιστική δόση σωματιδίων στις 4 περιοχές του πνεύμονα και μάζα ταχέως απορροφώμενων στο αίμα σωματιδίων που μεταφέρεται στο γαστρεντερικό σύστημα ή παραμένει στην αναπνευστική οδό, σε εξωτερικούς χώρους κατά την περίοδο μελέτης (3/6/2002 - 11/6/2002) στο Όσλο. Η περιοχή μεταξύ των καμπυλών του αθροίσματος μάζας στην αναπνευστική οδό και το γαστρεντερικό σύστημα, και της αθροιστικής δόσης εκφράζει τη μάζα που απορροφάται στο αίμα.

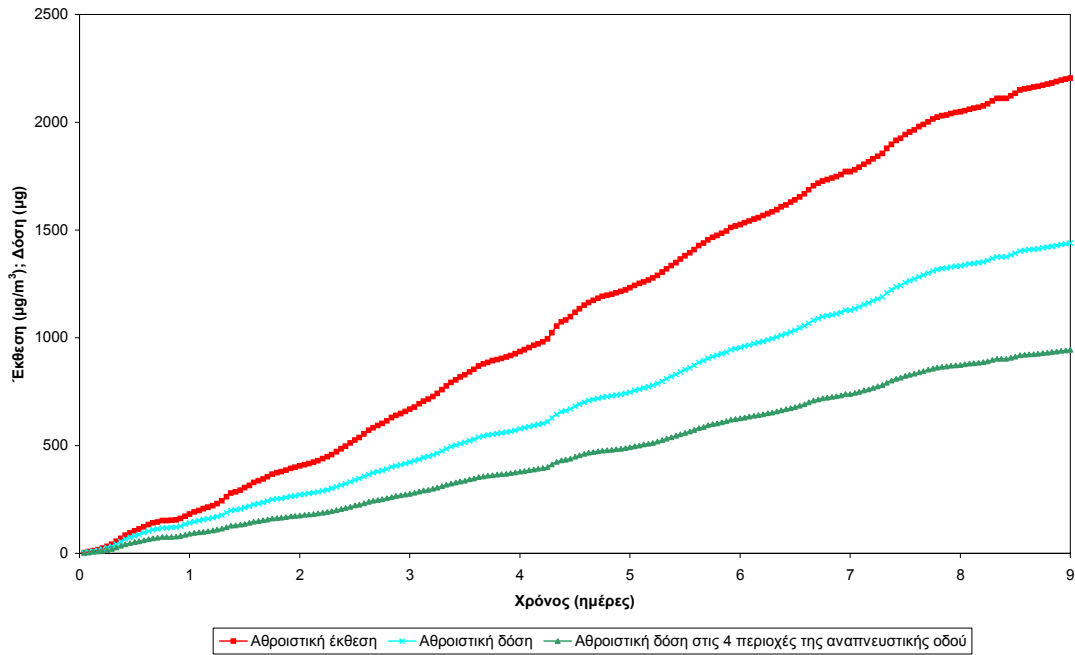
Ωστόσο, τα παραπάνω αποτελέσματα δεν είναι ρεαλιστικά αφού για τις ημέρες που δεν διαθέτουμε τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων σε συνδυασμό με τις ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις θεωρούμε ότι η έκθεση είναι μηδενική. Με αυτόν τον τρόπο η ποσότητα των σωματιδίων που έχει αποτεθεί στις επιφάνειες του αναπνευστικού συστήματος μεταφέρεται και απομακρύνεται με αποτέλεσμα η μάζα που παραμένει στην αναπνευστική οδό να παρουσιάζεται μηδενική όπως και ο ρυθμός μεταφοράς των σωματιδίων στο γαστρεντερικό σύστημα στο αίμα (τοπικά πλατό στις καμπύλες αθροιστικής δόσης). Η εξαγωγή ρεαλιστικών αποτελεσμάτων για την ποσότητα μάζας που βρίσκεται στο σώμα ενός ατόμου εκτεθειμένου στο

Όσο την περίοδο μελέτης απαιτεί την υιοθέτηση παραδοχών. Στην πραγματικότητα τα διαθέσιμα δεδομένα συγκέντρωσης των σωματιδίων και ταχύτητας αέρα συνδυάστηκαν με τις κατανομές μάζας των σωματιδίων για τις ημέρες που υπήρχαν διαθέσιμες και για τις υπόλοιπες ημέρες θεωρήθηκαν ίδιες με της πιο πρόσφατης ημερομηνίας με γνωστά στοιχεία. Έτσι υπολογίστηκε η δόση για έκθεση τόσο σε εξωτερικούς όσο και σε εσωτερικούς χώρους όπως δίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 70. Στις 7/6/2002 η πολύ υψηλή τιμή συγκέντρωσης στο εσωτερικό του σπιτιού οφείλεται στην δραστηριότητα 3 ατόμων στο καθιστικό και ταυτόχρονα στο τηγάνισμα βόφλων για 20 λεπτά. Στην αρχή της περιόδου η δόση είναι μεγαλύτερη από την έκθεση λόγω του υψηλού ρυθμού αναπνοής ( $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ).

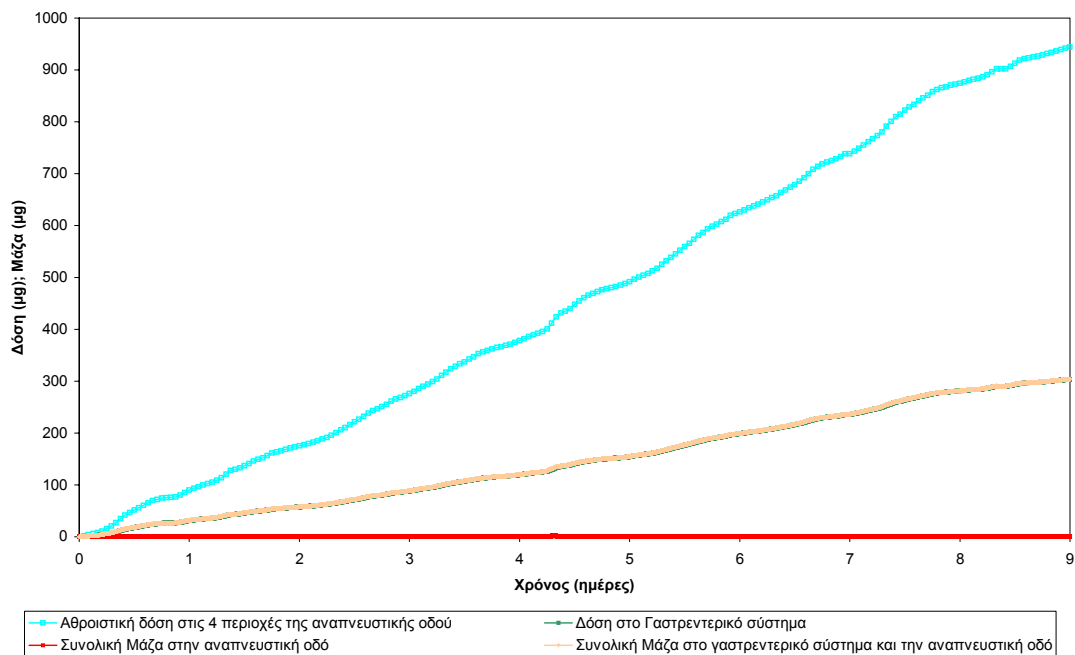


**Εικόνα 70:** Συγκέντρωση σωματιδίων εντός και εκτός της οικίας στο Όσλο και ο αντίστοιχος ωριαίος ρυθμός δόσης όπως εκτιμήθηκε με το μοντέλο AEROEXPDOSE χρησιμοποιώντας παραδοχές για τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων για τις 5 – 7/6/2002 και 9/6/2002.

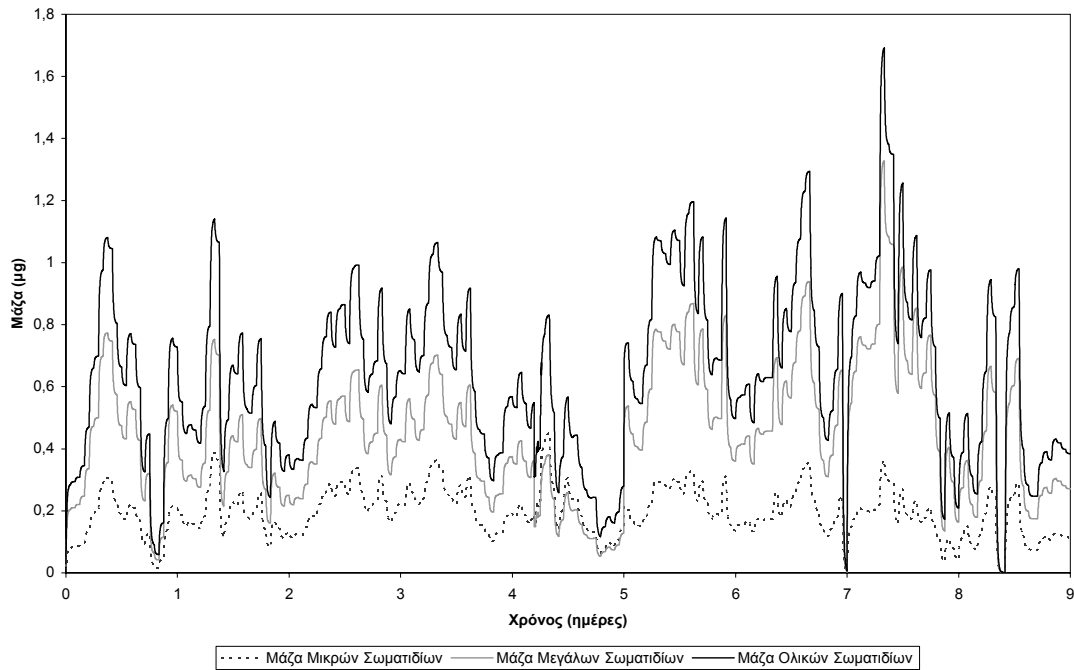
Τελικά το διάγραμμα έκθεσης-δόσης σε εξωτερικούς χώρους είναι αυτό της εικόνας 71. Στο διάγραμμα φαίνεται εύκολα ότι η τελική δόση που λαμβάνει ένα άτομο (ενήλικας καυκάσιος άντρας) είναι αρκετά μικρό σε σχέση με την έκθεση του στις περιβαλλοντικές συγκεντρώσεις των σωματιδίων. Συνολικά μόνο το 65% των σωματιδίων στα οποία εκτίθεται το άτομο αποθέτονται στο αναπνευστικό του σύστημα. Ακόμα ένα μεγάλο μέρος της δόσης (35%) βρίσκεται στην περιοχή ET<sub>1</sub> (εικόνα 71) απ' όπου καθαρίζεται γρήγορα.



**Εικόνα 71:** Αθροιστική έκθεση και δόση (παραδοχές για τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων για τις 5-7/6/2002 και 9/6/2002) σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα, σε εξωτερικούς χώρους για την περίοδο μελέτης (3/6/2002 - 11/6/2002) στο Όσλο. Παράλληλα δίνεται και η αθροιστική καμπύλη δόσης στις 4 περιοχές του πνεύμονα (ET<sub>2</sub>, BB, bb, AI) που λαμβάνονται υπόψη στον μηχανισμό απομάκρυνσης των σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα.



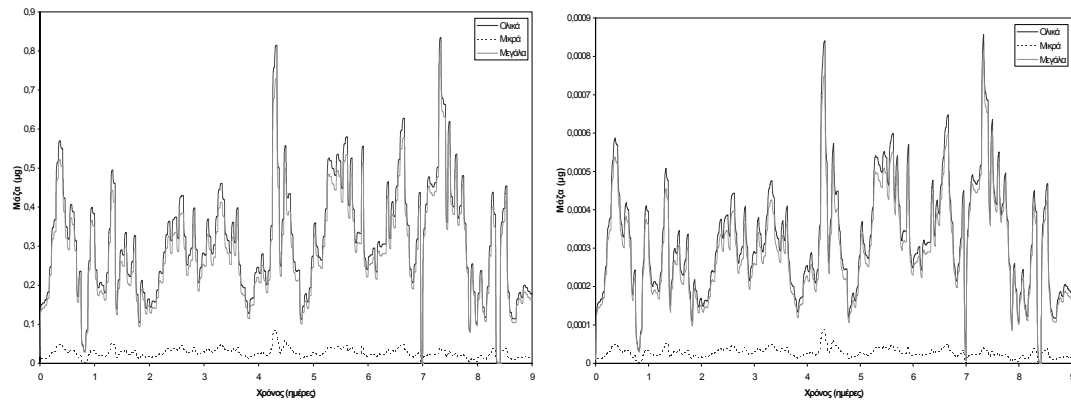
**Εικόνα 72:** Αθροιστική δόση σωματιδίων στις 4 περιοχές του πνεύμονα και μάζα ταχέως απορροφώμενων στο αίμα σωματιδίων που μεταφέρεται στο γαστρεντερικό σύστημα ή παραμένει στην αναπνευστική οδό, σε εξωτερικούς χώρους κατά την περίοδο μελέτης (3/6/2002 - 11/6/2002) στο Όσλο όπως υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας παραδοχές για τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων για τις 5-7/6/2002 και 9/6/2002. Η απόσταση μεταξύ των καμπυλών του αθροίσματος μάζας στην αναπνευστική οδό και το γαστρεντερικό σύστημα, και της αθροιστικής δόσης εκφράζει τη μάζα που απορροφάται στο αίμα.



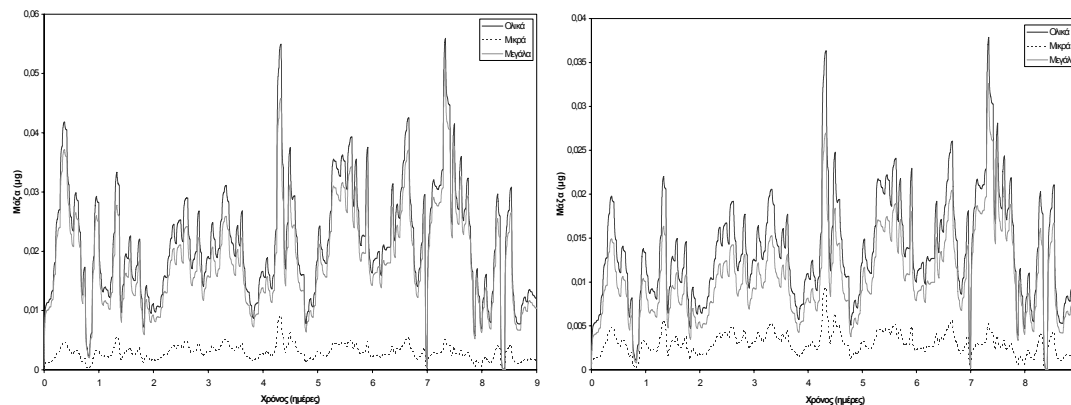
**Εικόνα 73:** Μάζα σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα κατά την περίοδο μελέτης (3/6/2002 - 11/6/2002) στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους.

Τα σωματίδια απορροφώνται ταχέως στο αίμα με αποτέλεσμα σχεδόν το 68% της ποσότητας τους που αποθέτεται στις διάφορες περιοχές του αναπνευστικού συστήματος να έχει μεταφερθεί στο αίμα στο τέλος της περιόδου (εικόνα 72). Στο αναπνευστικό η ποσότητα που παραμένει είναι ελάχιστη με το 76% αυτής να αποτελείται από μεγάλα σωματίδια (εικόνα 73). Η καμπύλη συσσωρευμένης μάζας στο αναπνευστικό σύστημα ακολουθεί την καμπύλη του ρυθμού δόσης. Αναλυτικότερα δίνονται παρακάτω στις εικόνες 74-79 οι καμπύλες συσσώρευσης μάζας σε κάθε τμήμα του αναπνευστικού συστήματος. Εξαιτίας της ταχείας απορρόφησης των σωματιδίων στο αίμα δεν είναι δυνατό να φανεί η διαφοροποίηση του ρυθμού καθαρισμού κάθε περιοχής λόγω μη απορροφητικών διεργασιών. Ωστόσο φαίνεται πως η μεγαλύτερη ποσότητα σωματιδίων αποθέτεται στην κυψελιδική περιοχή και την επιφάνεια της περιοχής ET<sub>2</sub> (διαγράμματα 78α και 74α αντίστοιχα). Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί πως στα τμήματα bb gel και seq, AI και LN<sub>TH</sub> η μάζα των μικρών και των μεγάλων σωματιδίων κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα για όλη την περίοδο. Ακόμα στα τμήματα της bb περιοχής η μάζα των μικρών σωματιδίων είναι μεγαλύτερη ή σχεδόν ίση αυτής των μεγάλων. Σε όλες τις υπόλοιπες περιοχές τα

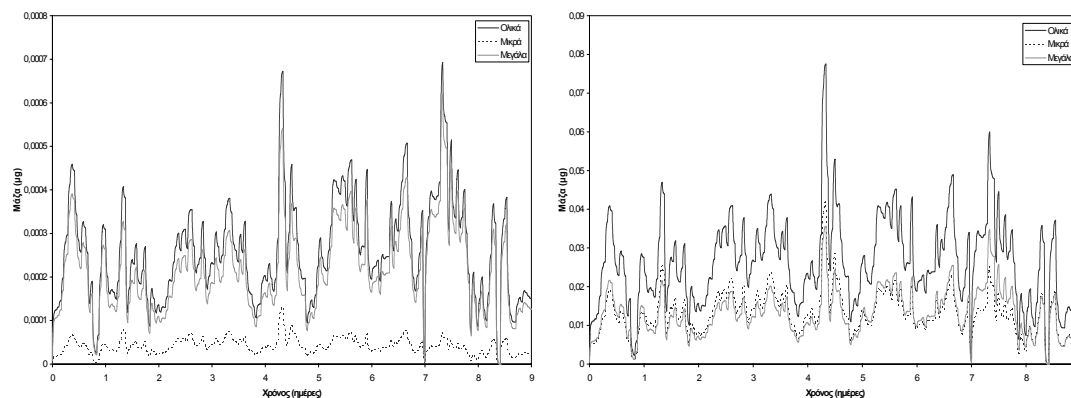
μεγάλα σωματίδια κυριαρχούν με μάζα που ξεπερνά το 91% της ολικής (GI, LN<sub>ET</sub>, ET<sub>2</sub> sur και seq).



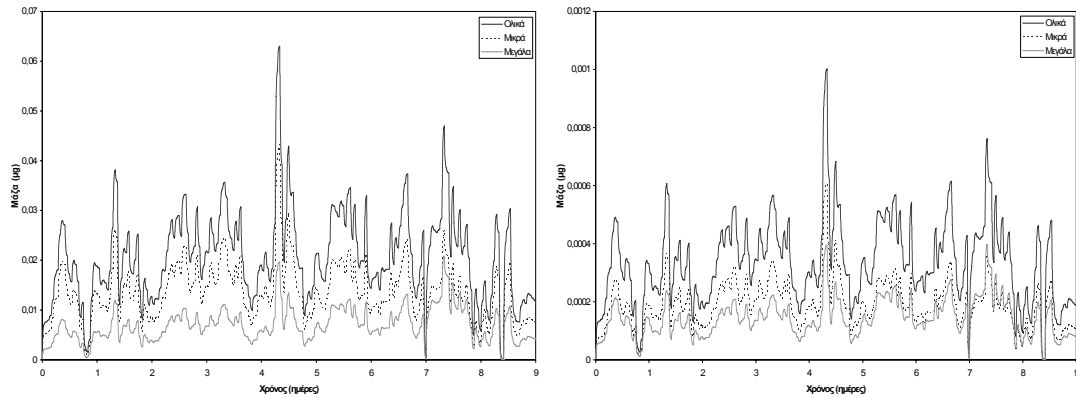
**Εικόνα 74:** Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στην επιφάνεια (στα υγρά) και (β) στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού στην περιοχή ET<sub>2</sub> κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους.



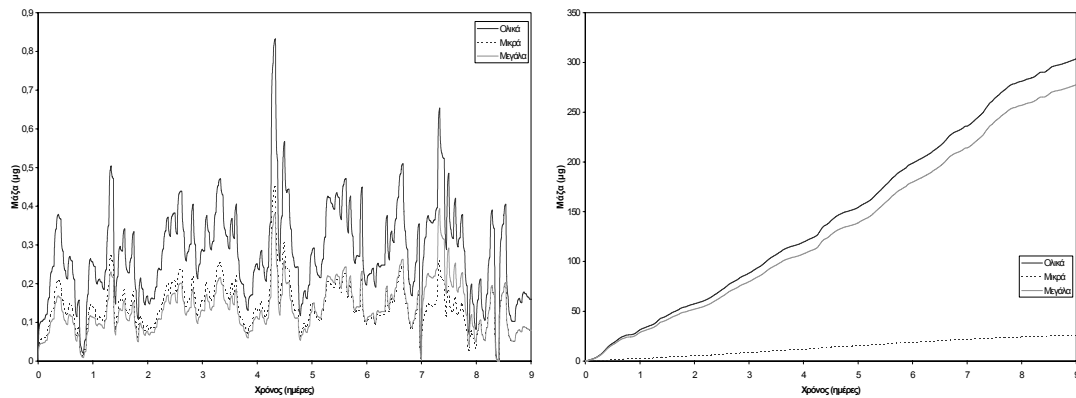
**Εικόνα 75:** Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στο ταχέως κινούμενο στρώμα βλέννας και (β) στο αργά κινούμενο στρώμα βλέννας της περιοχής BB κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους.



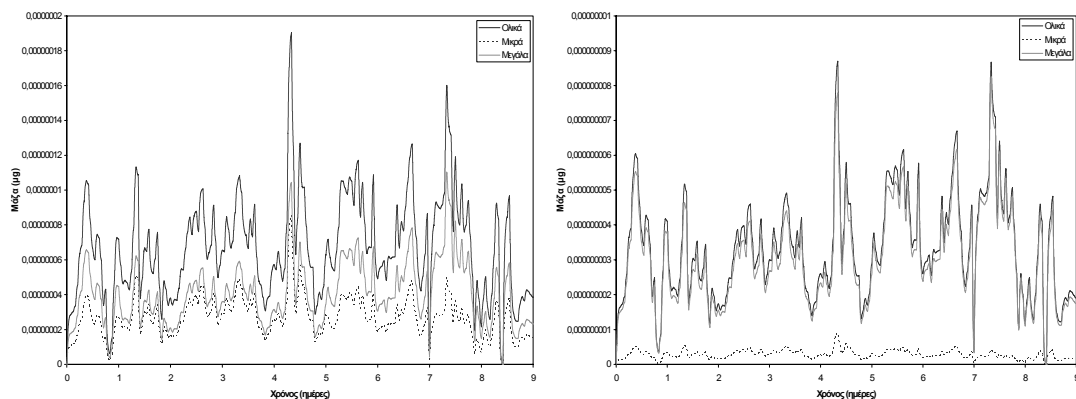
**Εικόνα 76:** Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού στην περιοχή BB και (β) στο ταχέως κινούμενο στρώμα βλέννας της περιοχής bb κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους.



**Εικόνα 77:** Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στο αργά κινούμενο στρώμα βλέννας και (β) στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού στην περιοχή bb κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους.



**Εικόνα 78:** Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων (α) που παραμένει στην κυψελιδική περιοχή των πνευμόνων και (β) που απομακρύνεται στο γαστρεντερικό σύστημα κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους.

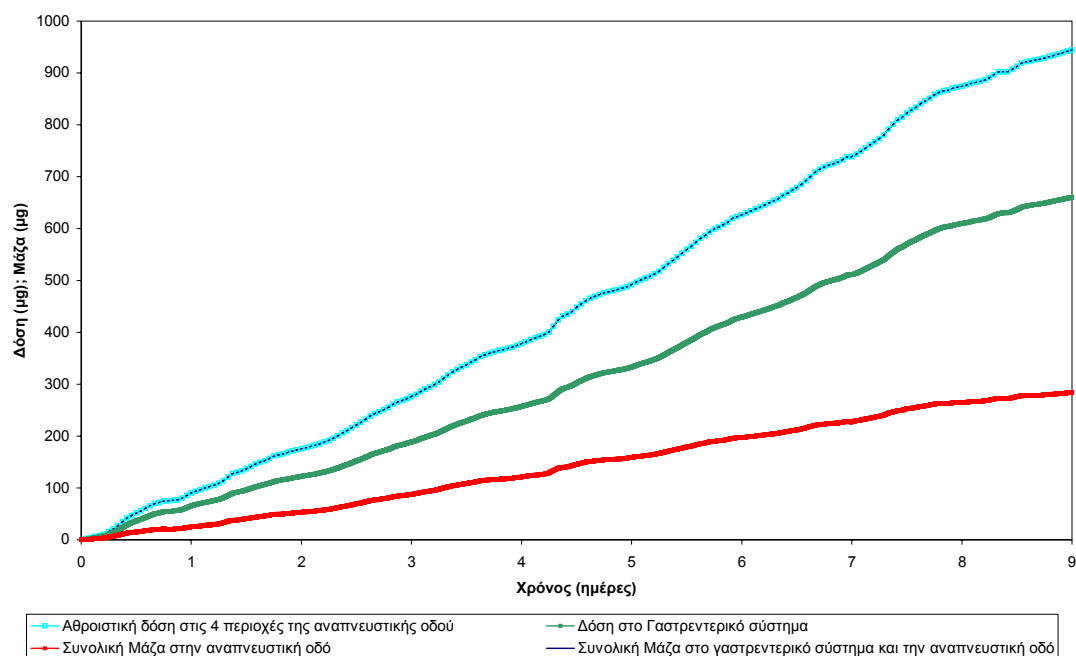


**Εικόνα 79:** Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει στους λεμφαδένες της (α) θωρακικής περιοχής και (β) εκτός θώρακα περιοχής κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους.

Η ταχύτητα με την οποία θα απορροφηθούν τα σωματίδια στο αίμα είναι άγνωστη. Ωστόσο, βάσει της μάζας τους που έχει προσδιοριστεί χημικά πολλά από τα ιόντα που



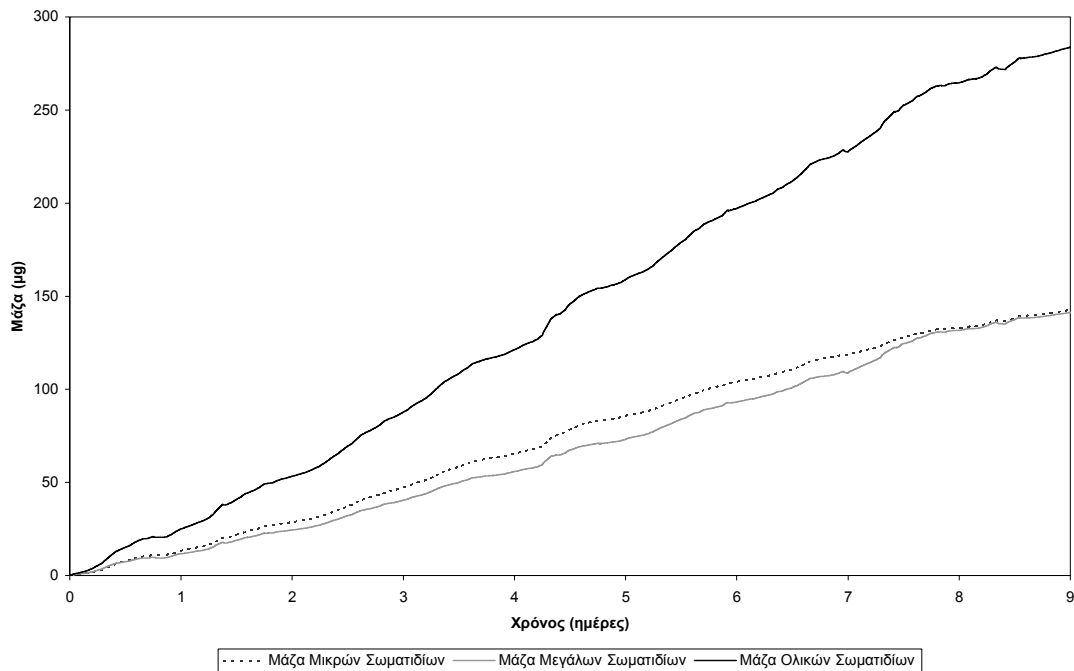
ανιχνεύθηκαν θεωρούνται πως απορροφώνται στο αίμα με μέσο ρυθμό (M, πίνακας 8) (ICRP, 2002). Η μάζα τους όμως αποτελείται από ένα σύνολο στοιχείων και ενώσεων μη προσδιορισμένων. Έτσι η μάζα που βρίσκεται συσσωρευμένη στα τμήματα του αναπνευστικού συστήματος κάθε στιγμή υπολογίστηκε και με την παραδοχή πως αυτά απορροφώνται στο αίμα με αργό ρυθμό. Η περίπτωση αυτή αποτελεί το χειρότερο σενάριο τουλάχιστο όσο αφορά την πρόκληση τοξικότητας στους ιστούς του αναπνευστικού συστήματος καθώς τα σωματίδια παραμένουν για μεγαλύτερο διάστημα σε κάθε περιοχή. Η καμπύλη δόσης-συσσώρευσης μάζας στο αναπνευστικό σύστημα για σωματίδια που απορροφώνται με αργό ρυθμό στο αίμα δίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 80.



**Εικόνα 80:** Αθροιστική δόση σωματιδίων στις 4 περιοχές του πνεύμονα και μάζα αργά απορροφώμενων στο αίμα σωματιδίων που μεταφέρεται στο γαστρεντερικό σύστημα ή παραμένει στην αναπνευστική οδό, σε εξωτερικούς χώρους κατά την περίοδο μελέτης (3/6/2002 - 11/6/2002) στο Όσλο όπως υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας παραδοχές για τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων για τις 5-7/6/2002 και 9/6/2002. Η απόσταση μεταξύ των καμπυλών του αθροίσματος μάζας στην αναπνευστική οδό και το γαστρεντερικό σύστημα, και της αθροιστικής δόσης εκφράζει τη μάζα που απορροφάται στο αίμα.

Η μάζα που παραμένει στο αναπνευστικό σύστημα στο τέλος της περιόδου είναι το 30% της δόσης ενώ το υπόλοιπο σχεδόν 70% μεταφέρεται στο γαστρεντερικό σύστημα. Η μάζα που παραμένει στο αναπνευστικό κάθε στιγμή δίνεται και στο διάγραμμα της εικόνας 81 που ακολουθεί. Η μάζα των μικρών σωματιδίων είναι ίση με αυτή των μεγάλων στο τέλος της περιόδου. Ωστόσο από την 2<sup>η</sup> έως και την 8<sup>η</sup> ημέρα η μάζα των μικρών σωματιδίων είναι λίγο μεγαλύτερη αυτής των μεγάλων

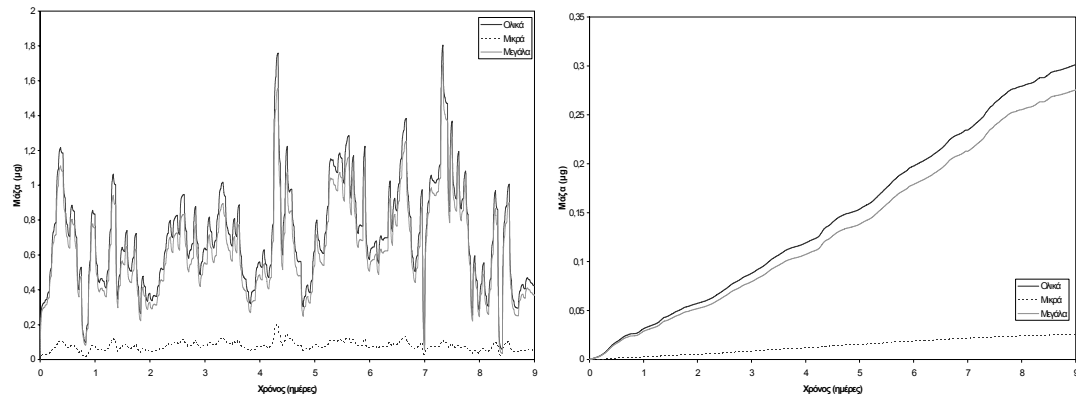
αφού τα μεγαλύτερα σωματίδια αποθέτονται στα ανώτερα τμήματα του αναπνευστικού συστήματος και απομακρύνονται γρήγορα στο γαστρεντερικό σύστημα.



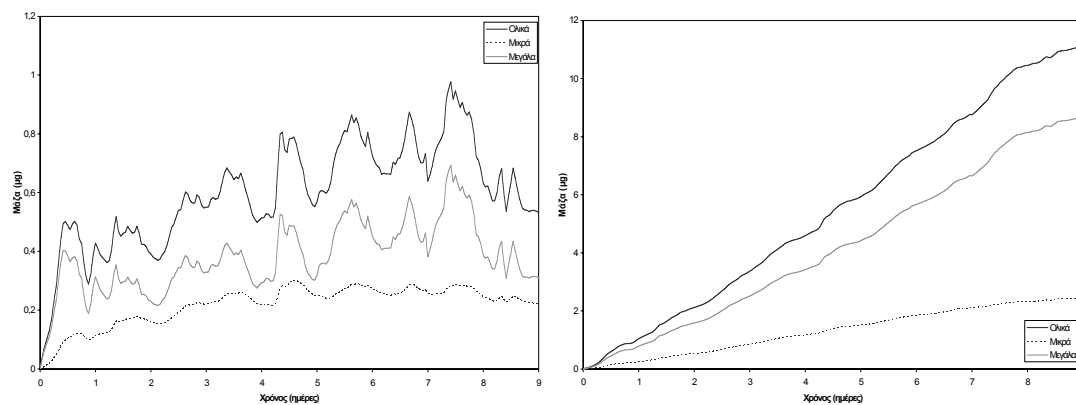
**Εικόνα 81:** Μάζα σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα κατά την περίοδο μελέτης (3/6/2002 - 11/6/2002) στο Όσλο για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους.

Στα διαγράμματα των εικόνων 82-87 δίνεται η μάζα που βρίσκεται σε κάθε τμήμα του αναπνευστικού συστήματος κάθε στιγμή. Ο ρυθμός απορρόφησης σωματιδίων στο αίμα είναι μικρός έτσι ώστε να φαίνεται η ταχύτητα απομάκρυνσης με μη απορροφητικές διεργασίες σε κάθε τμήμα του αναπνευστικού. Στην περιοχή ET<sub>2</sub> sur για παράδειγμα (εικόνα 82α), οι καμπύλες δεν διαφέρουν στη μορφή από αυτές της περίπτωσης που τα σωματίδια απορροφώνται ταχέως στο αίμα αφού ο ρυθμός απομάκρυνσης τους με τη βλέννα είναι πολύ υψηλός. Διαφοροποιούνται ωστόσο στη συνολική ποσότητα που βρίσκεται κάθε στιγμή στην περιοχή που είναι σχεδόν διπλάσια. Ακόμα είναι εμφανές πως στις περιοχές gel ο ρυθμός απομάκρυνσης με τη βλέννα είναι μεγάλος αφού η μάζα παρουσιάζει αυξομειώσεις. Σε όλες τις υπόλοιπες περιοχές η μάζα σωματιδίων συσσωρεύεται όλη την περίοδο μελέτης και η τελική ποσότητα τους είναι τουλάχιστο διπλάσια σε σχέση με την περίπτωση που απομακρύνονται ταχέως στο αίμα (εικόνες 74 - 79). Ωστόσο, η αναλογία μικρών προς μεγάλων σωματιδίων σε κάθε τμήμα δεν διαφέρει εκτός από τα τμήματα gel και sol

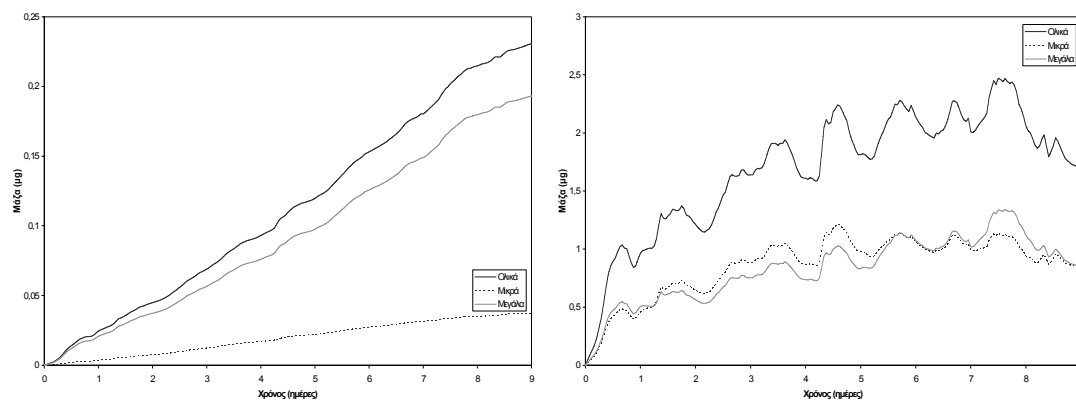
της περιοχής των βρόγχων BB, όπου πλέον τα μεγάλα σωματίδια απαρτίζουν το 58% και 78% της συνολικής μάζας, αντίστοιχα. Αυτό οφείλεται στην βραδεία απομάκρυνση των μικρών σωματιδίων με τη βλέννα σε σχέση με αυτή των μεγάλων.



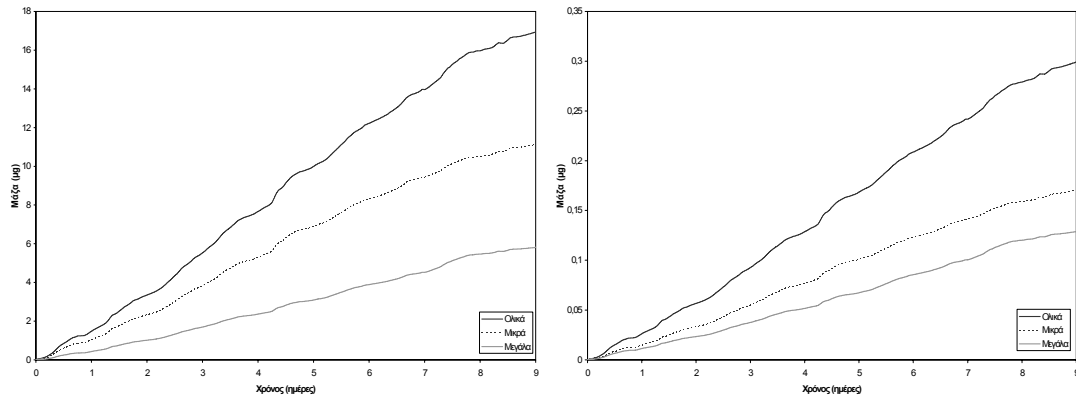
**Εικόνα 82:** Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στην επιφάνεια (στα υγρά) και (β) στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού στην περιοχή ET<sub>2</sub> κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους.



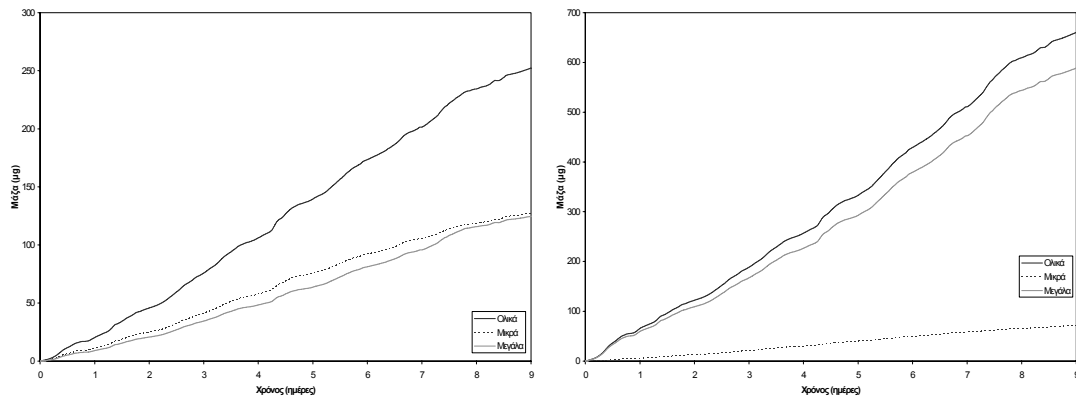
**Εικόνα 83:** Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στο ταχέως κινούμενο στρώμα βλέννας και (β) στο αργά κινούμενο στρώμα βλέννας της περιοχής BB κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους.



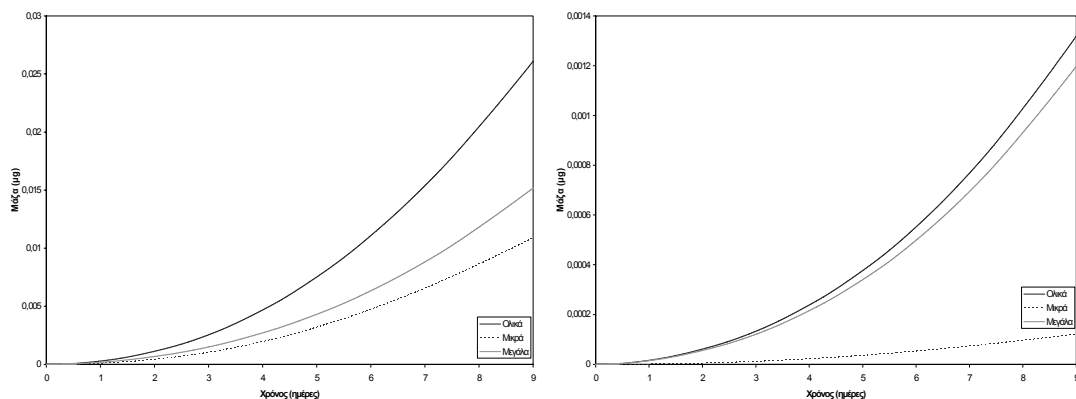
**Εικόνα 84:** Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού στην περιοχή BB και (β) στο ταχέως κινούμενο στρώμα βλέννας της περιοχής bb κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους.



**Εικόνα 85:** Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στο αργά κινούμενο στρώμα βλέννας και (β) στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού στην περιοχή bb κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους.



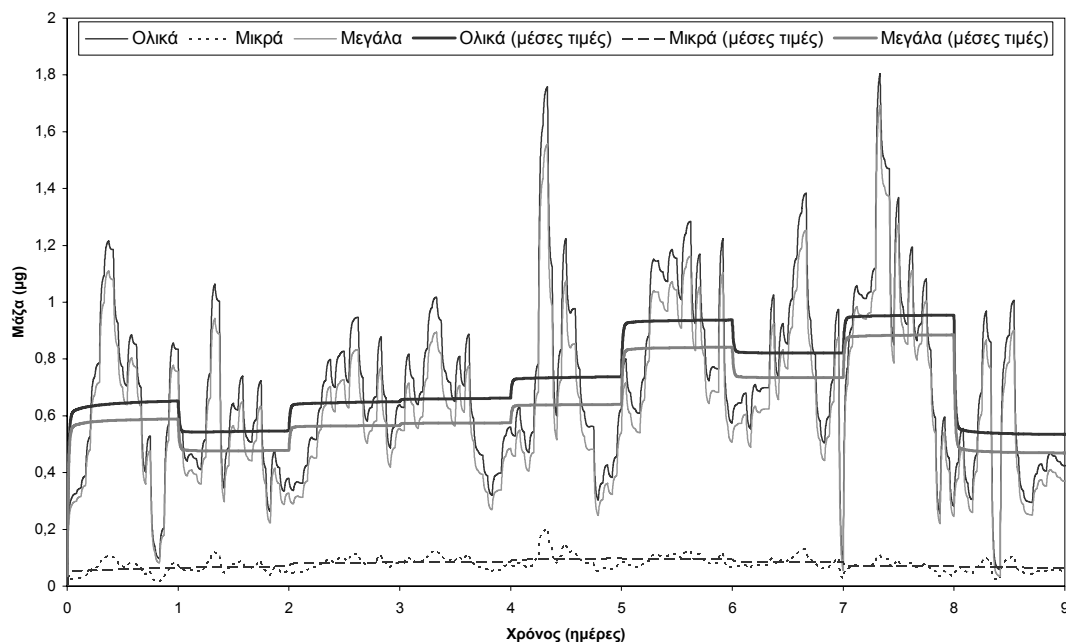
**Εικόνα 86:** Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων (α) που παραμένει στην κυψελιδική περιοχή των πνευμόνων και (β) που απομακρύνεται στο γαστρεντερικό σύστημα κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους.

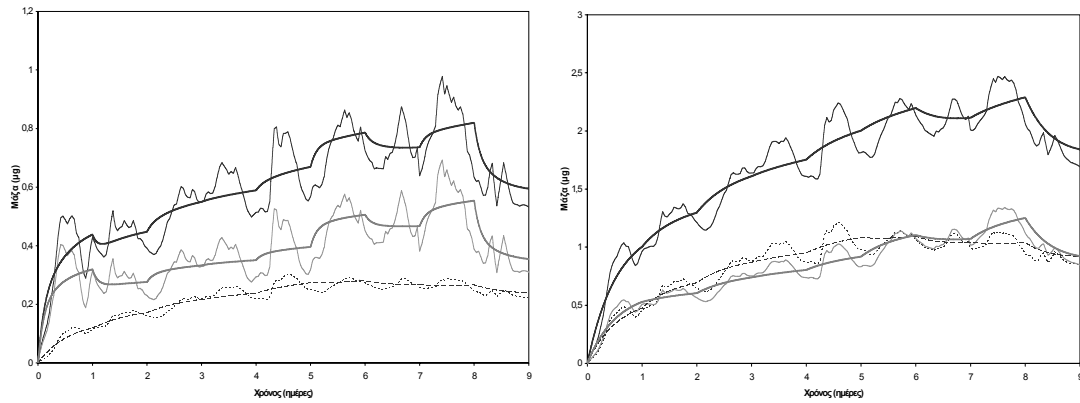


**Εικόνα 87:** Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει στους λεμφαδένες της (α) θωρακικής περιοχής και (β) εκτός θώρακα περιοχής κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους.

Όπως και στην περίπτωση της δόσης που δέχεται κάθε περιοχή του αναπνευστικού έτσι και για την συσσώρευση σωματιδίων είναι ενδιαφέρον να δούμε αν τα

αποτελέσματα που δόθηκαν στα παραπάνω διαγράμματα αναπαράγονται στην περίπτωση που χρησιμοποιήσουμε μέσες τιμές για τη συγκέντρωση των σωματιδίων, την ταχύτητα του αέρα και τις παραμέτρους φυσιολογίας δηλαδή τη δραστηριότητα του ατόμου. Βέβαια αναμένεται να υπάρξει διαφορά στα τελικά αποτελέσματα αφού και η δόση που δέχονται καθημερινά οι περιοχές του αναπνευστικού συστήματος όπως υπολογίζεται με μέσες τιμές διαφοροποιείται λίγο από την δόση βάσει συνεχών τιμών. Πράγματι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την περίπτωση που τα σωματίδια απορροφώνται αργά στο αίμα έδωσαν μια διαφορά 1% στην τελική ποσότητα σωματιδίων που βρίσκεται σε κάθε περιοχή που ερμηνεύεται λόγω της διαφοράς στην δόση. Μόνο για τις περιοχές ET<sub>2</sub> sur, BB gel και bb gel η διαφορά είναι μεγαλύτερη και φθάνει το 26%,13% και 2% αντίστοιχα. Στις περιοχές αυτές ο ρυθμός καθαρισμού λόγω μετακίνησης της βλέννας και κατάποσης στο γαστρεντερικό σύστημα είναι ιδιαίτερα υψηλός σε σχέση με τα υπόλοιπα τμήματα του αναπνευστικού συστήματος και άρα ο υπολογισμός της συσσώρευσης σωματιδίων σε αυτές είναι πιο ευαίσθητος στην ποσότητα δόσης που δέχονται. Εξαιτίας αυτής της ευαισθησίας η μάζα που βρίσκεται κάθε στιγμή σε κάθε ένα από αυτά τα τμήματα διαφοροποιείται σημαντικά από την αντίστοιχη που υπολογίζεται με συνεχείς τιμές (εικόνα 88). Για τις υπόλοιπες περιοχές το προφίλ της συσσώρευσης συναρτήσει του χρόνου δεν διαφέρει από αυτό των εικόνων 82-87.





**Εικόνα 88:** Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στην επιφάνεια της αναπνευστικής οδού στην περιοχή εκτός θώρακα και (β) στο ταχέως κινούμενο στρώμα βλέννας της περιοχής BB και της περιοχής bb κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, όπως υπολογίστηκε με τη χρήση μέσων ημερήσιων και συνεχών τιμών δόσης, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους

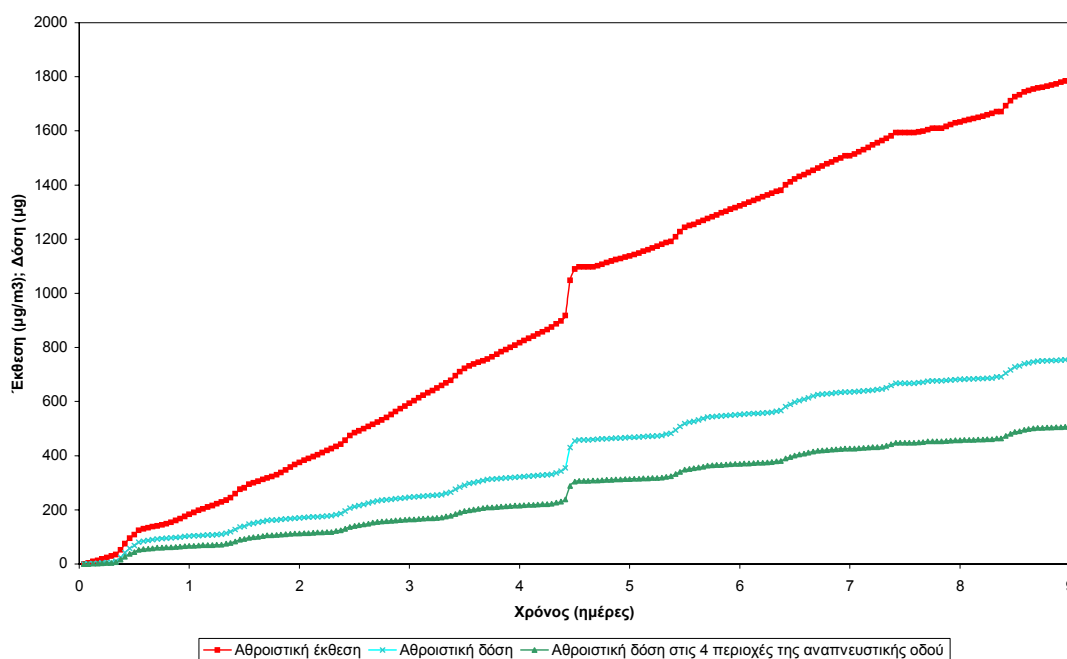
Αναλυτικότερα τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τον υπολογισμό της συσσώρευσης μάζας μετά από έκθεση σε εξωτερικούς χώρους δίνονται στον πίνακα 12 που ακολουθεί.

**Πίνακας 12:** Συσσώρευση μάζας σωματιδίων στο αναπνευστικό και γαστρεντερικό σύστημα και στο αίμα μετά από έκθεση σε εξωτερικούς χώρους όπως υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την ωριαία ή τη μέση ημερήσια δόση για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως ή αργά στο αίμα.

Τύπος συμπεριφοράς υλικού σε απορρόφηση:	Συνεχείς Τιμές		Μέσες Τιμές	
	Μάζα σωματιδίων (μg)			
	<i>F</i> (ταχεία)	<i>S</i> (αργή)	<i>F</i> (ταχεία)	<i>S</i> (αργή)
ET <sub>2</sub> sur	0,18	0,42	0,23	0,53
ET seq	0,00018	0,30	0,00024	0,30
LN <sub>ET</sub>	1,91E-09	0,0013	2,43E-09	0,0013
BB gel	0,012	0,53	0,016	0,60
BB sol	0,008	11,14	0,011	11,29
BB seq	0,00015	0,23	0,00019	0,23
bb gel	0,015	1,69	0,019	1,84
bb sol	0,012	16,93	0,015	17,16
bb seq	0,00019	0,30	0,00024	0,30
ΑΙ	0,16	252	0,20	255,26
LN <sub>TH</sub>	3,85E-08	0,03	4,93E-08	0,03
Γαστρεντερικό σύστημα (GI Tract)	303,5	660	307	668
Αίμα	640	0,13	648	0,13
Ολικά	944	944	955,5	955,5

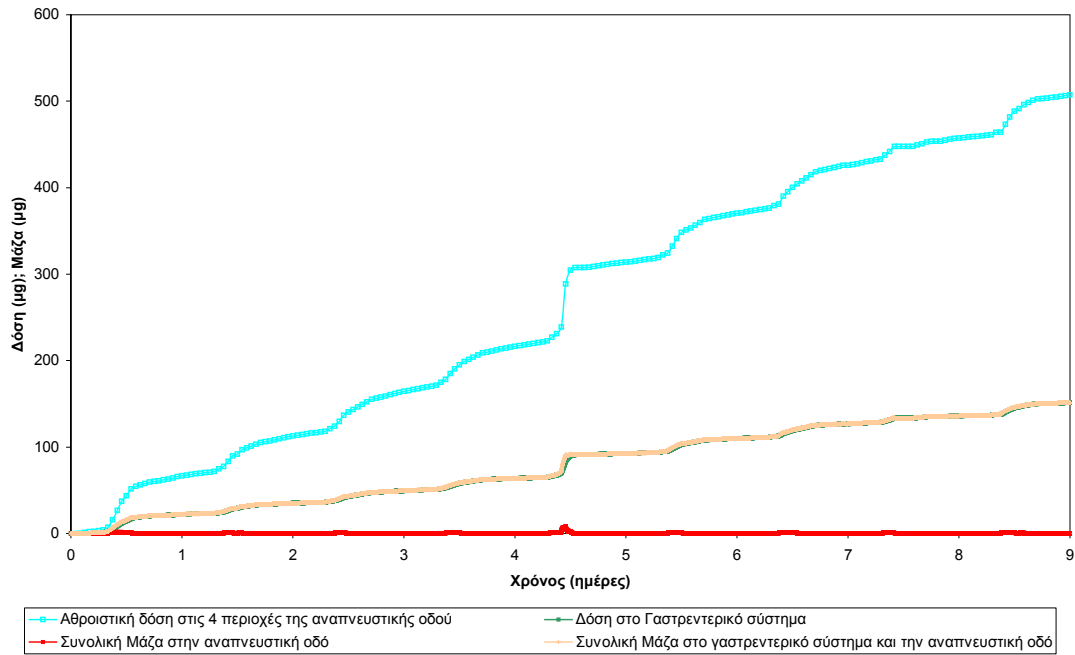
Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα ο υπολογισμός της δόσης σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους είναι ιδιαίτερα σημαντικός αφού ένα άτομο περνά συνήθως το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου του εντός κτιρίων. Το ίδιο σημαντικό είναι να

καθοριστεί το μέρος της δόσης αυτής που συσσωρεύεται τελικά στον οργανισμό και καθορίζει την απόκριση του. Το αθροιστικό διάγραμμα έκθεσης δόσης για αυτή την περίπτωση δίνεται στην εικόνα 89 όπου φαίνεται ότι μόλις το 42% της ποσότητας σωματιδίων στην οποία εκτίθεται το άτομο αποθέεται τελικά στο αναπνευστικό του σύστημα. Η αντίστοιχη ποσότητα για έκθεση σε εξωτερικούς χώρους ήταν 65% και η διαφορά σε αυτή την περίπτωση οφείλεται στην διαφορετική δραστηριότητα του ατόμου εντός του κτιρίου. Το ποσοστό που αποθέεται στην περιοχή ET<sub>1</sub> παραμένει κοινό και για τις δύο περιπτώσεις αφού χρησιμοποιούνται οι ίδιες κατανομές μάζας των σωματιδίων.

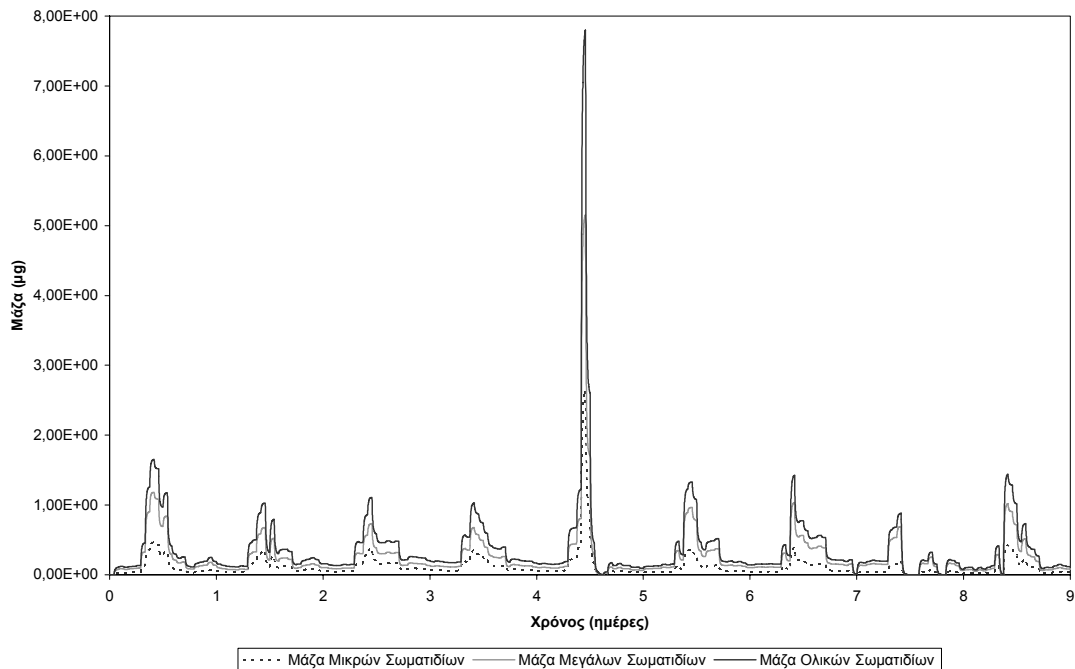


**Εικόνα 89:** Αθροιστική έκθεση και δόση σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα, σε εσωτερικούς χώρους για την περίοδο μελέτης (3/6/2002 - 11/6/2002) στο Όσλο. Παράλληλα δίνεται και η αθροιστική καμπύλη δόσης στις 4 περιοχές του πνεύμονα (ET<sub>2</sub>, BB, bb, AI) που λαμβάνονται υπόψη στον μηχανισμό απομάκρυνσης των σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα.

Η απότομη αύξηση της αθροιστικής δόσης την 5<sup>η</sup> ημέρα της προσομοίωσης οφείλεται σε σωματίδια που προκύπτουν με το τηγάνισμα βαφλών όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα. Οι καμπύλες συσσώρευσης σωματιδίων στην αναπνευστική οδό και το γαστρεντερικό σύστημα δίνονται στις εικόνες 90 και 91 για ταχέως απορροφώμενα στο αίμα σωματίδια και τις εικόνες 92 και 93 για αυτά που απορροφώνται αργά.

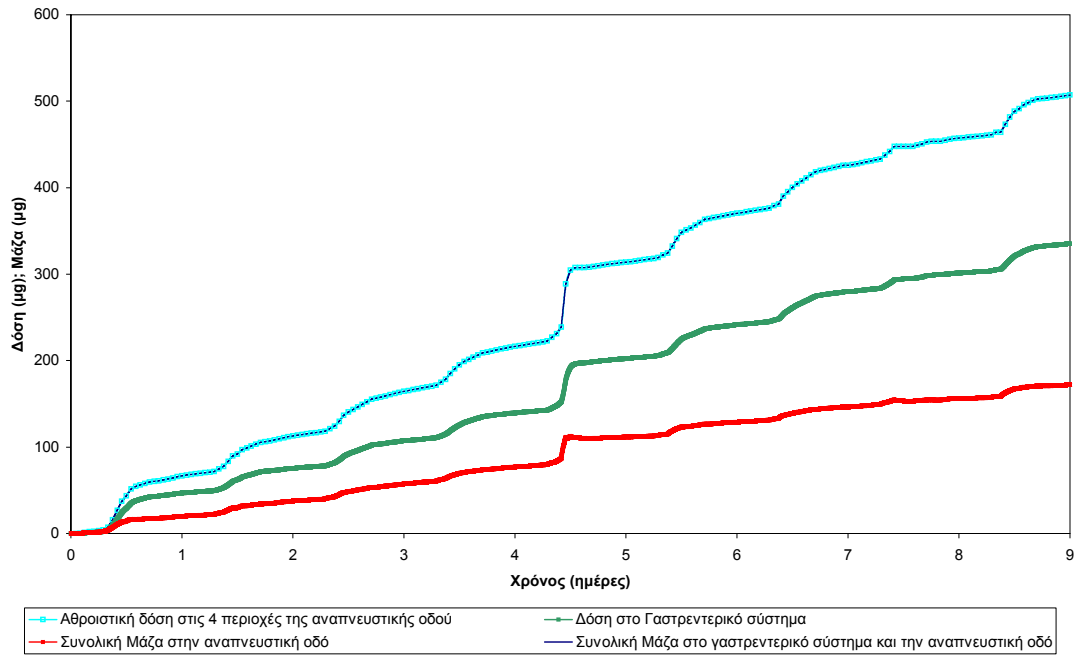


**Εικόνα 90:** Αθροιστική δόση σωματιδίων στις 4 περιοχές του πνεύμονα και μάζα ταχέως απορροφώμενων στο αίμα σωματιδίων που μεταφέρεται στο γαστρεντερικό σύστημα ή παραμένει στην αναπνευστική οδό, σε εσωτερικούς χώρους κατά την περίοδο μελέτης (3/6/2002 - 11/6/2002) στο Όσλο όπως υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας παραδοχές για τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων για τις 5-7/6/2002 και 9/6/2002. Η απόσταση μεταξύ των καμπυλών του αθροίσματος μάζας στην αναπνευστική οδό και το γαστρεντερικό σύστημα, και της αθροιστικής δόσης εκφράζει τη μάζα που απορροφάται στο αίμα.

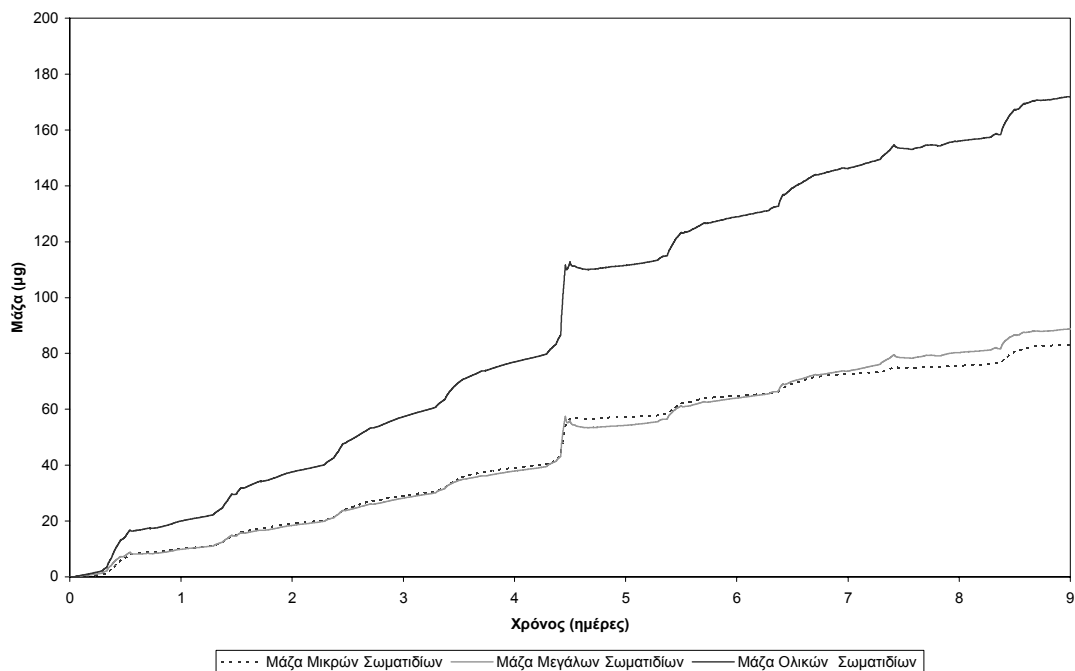


**Εικόνα 91:** Μάζα σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα κατά την περίοδο μελέτης (3/6/2002 - 11/6/2002) στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εσωτερικούς χώρους.





**Εικόνα 92:** Αθροιστική δόση σωματιδίων στις 4 περιοχές του πνεύμονα και μάζα αργά απορροφώμενων στο αίμα σωματιδίων που μεταφέρεται στο γαστρεντερικό σύστημα ή παραμένει στην αναπνευστική οδό, σε εσωτερικούς χώρους κατά την περίοδο μελέτης (3/6/2002 - 11/6/2002) στο Όσλο όπως υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας παραδοχές για τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων για τις 5-7/6/2002 και 9/6/2002. Η απόσταση μεταξύ των καμπυλών του αθροίσματος μάζας στην αναπνευστική οδό και το γαστρεντερικό σύστημα, και της αθροιστικής δόσης εκφράζει τη μάζα που απορροφάται στο αίμα.



**Εικόνα 93:** Μάζα σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα κατά την περίοδο μελέτης (3/6/2002 - 11/6/2002) στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εσωτερικούς χώρους.

Ενδιαφέρον είναι πως η αναλογία μάζας που έχει μεταφερθεί στο γαστρεντερικό σύστημα ή το αίμα στο τέλος της περιόδου μετά από έκθεση σε εξωτερικό και εσωτερικό χώρο παραμένει σχεδόν ίση. Για παράδειγμα, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα η αναλογία δόσης στο γαστρεντερικό σύστημα προς την δόση στις 4 περιοχές του αναπνευστικού είναι 0,32 για έκθεση σε εξωτερικούς χώρους και 0,3 για έκθεση σε εσωτερικούς. Έτσι γνωρίζοντας την δόση που μεταφέρεται στο γαστρεντερικό σύστημα και το αίμα για ταχέως απορροφώμενα σωματίδια σε εξωτερικό χώρο μπορούμε να υπολογίσουμε προσεγγιστικά την αντίστοιχη δόση στο εσωτερικό του κτιρίου. Αυτό βέβαια ισχύει στην συγκεκριμένη περίπτωση που χρησιμοποιούνται οι ίδιες κατανομές μάζας εντός και εκτός του κτιρίου.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τη συσσώρευση μάζας σωματιδίων μετά από έκθεση σε εσωτερικούς χώρους δίνονται στον πίνακα 13 που ακολουθεί. Μαζί δίνονται και τα αποτελέσματα συσσώρευσης αν χρησιμοποιήσουμε μέσες τιμές δόσης και οι διαφορές οφείλονται όπως και πριν στη διαφορά των δόσεων. Πράγματι η αθροιστική δόση σωματιδίων στις 4 περιοχές του αναπνευστικού συστήματος είναι μικρότερη κατά περίπου 8% στην περίπτωση που υπολογίζεται από μέσες τιμές και η διαφορά αυτή μεταφέρεται στον υπολογισμό της συσσώρευσης κάθε τμήματος του αναπνευστικού.

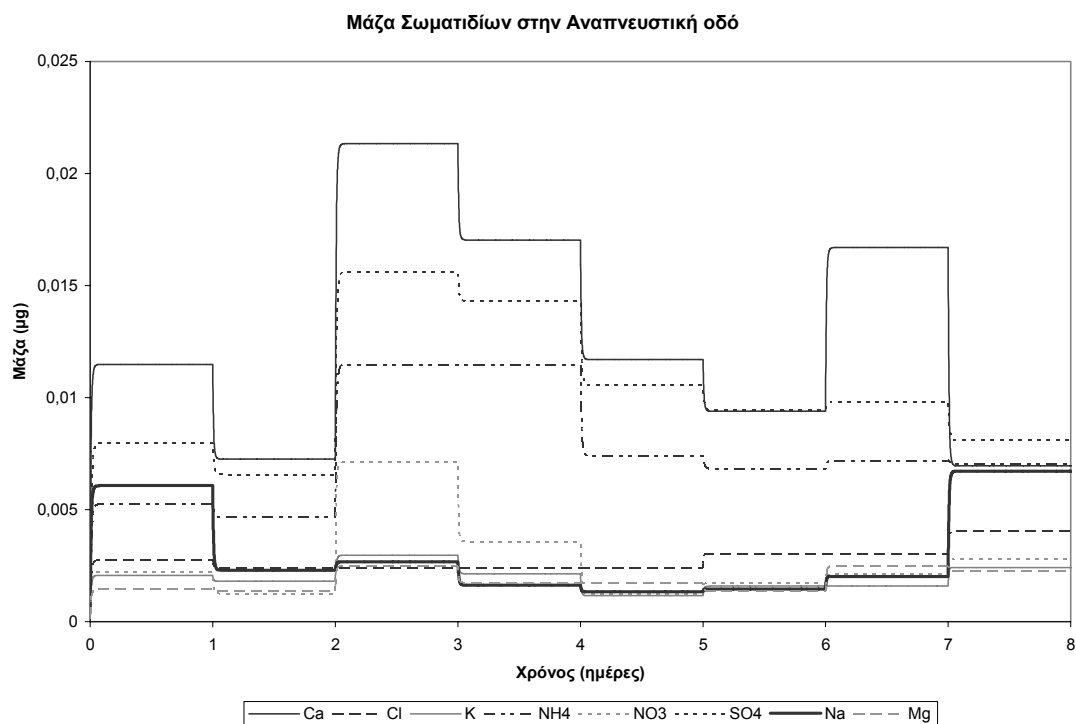
**Πίνακας 13:** Συσσώρευση μάζας σωματιδίων στο αναπνευστικό και γαστρεντερικό σύστημα και στο αίμα μετά από έκθεση σε εσωτερικούς χώρους όπως υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την ωριαία ή τη μέση ημερήσια δόση για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως ή αργά στο αίμα.

Τύπος συμπεριφοράς υλικού σε απορρόφηση:	Συνεχείς Τιμές		Μέσες Τιμές	
	Μάζα σωματιδίων (μg)			
	<i>F</i> (ταχεία)	<i>S</i> (αργή)	<i>F</i> (ταχεία)	<i>S</i> (αργή)
ET2_sur	0,03	0,09	0,04	0,11
ET_seq	3,09E-05	0,15	3,97E-05	0,13
LN <sub>ET</sub>	3,23E-10	0,0007	4,21E-10	0,0006
BB_gel	0,003	0,31	0,003	0,32
BB_sol	0,002	5,76	0,002	5,32
BB_seq	3,28E-05	0,12	4,22E-05	0,11
bb_gel	0,009	1,15	0,012	1,20
bb_sol	0,007	11,24	0,009	11,10
bb_seq	0,00011	0,20	0,00015	0,20

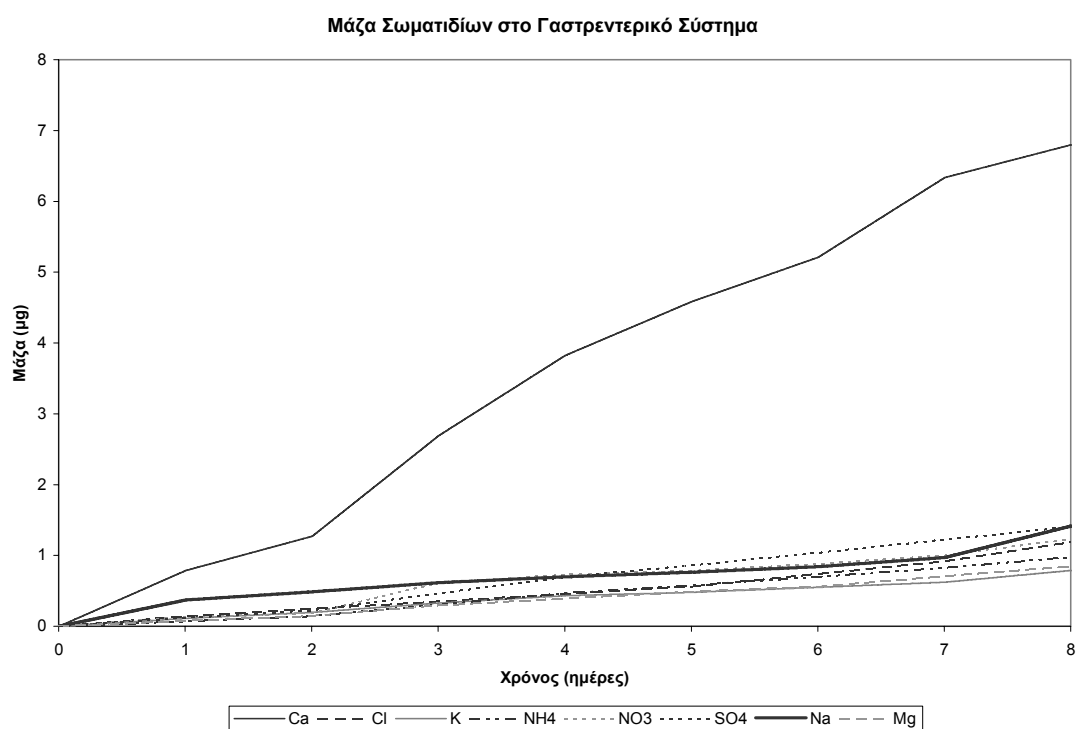
AI	0,07	153	0,085	146
LN <sub>TH</sub>	1,66E-08	0,02	2,15E-08	0,016
Γαστρεντερικό σύστημα (GI Tract)	151	335	135	301
Αίμα	356	0,08	331	0,077
Ολικά	507	507	466	466

Τέλος στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα συσσώρευσης για κάθε στοιχείο που προσδιορίστηκε αναλυτικά στα σωματίδια. Η συσσώρευση ανόργανων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα και η δόση τους στο γαστρεντερικό σύστημα αν θεωρήσουμε πως μεταφέρονται ταχέως στο αίμα δίνονται στις εικόνες 94 και 95 και για αργή απορρόφηση στο αίμα στις εικόνες 96 και 97. Η μορφή των καμπυλών στην εικόνα 94 είναι χαρακτηριστική στην περίπτωση χρήσης μέσων τιμών δόσης και δίνει τιμές συσσώρευσης λίγο υψηλότερες από τις πραγματικές όπως δείχθηκε παραπάνω για τα ολικά σωματίδια. Αντίστοιχα η δόση στο γαστρεντερικό σύστημα θα είναι στην πραγματικότητα μεγαλύτερη. Τα σωματίδια Ca, Na και SO<sub>4</sub> αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος της δόσης που δέχεται το γαστρεντερικό σύστημα αφού βρίσκονται κυρίως σε μεγάλα σωματίδια. Το ίδιο ισχύει και για την περίπτωση που τα σωματίδια απορροφώνται αργά στο αίμα. Ακόμα τα ιόντα SO<sub>4</sub> και NH<sub>4</sub> αποτελούν την κύρια μάζα που παραμένει στο αναπνευστικό σύστημα και ειδικά για την περίπτωση που θεωρείται ότι απορροφώνται αργά στο αίμα ενώ τα ιόντα Ca και SO<sub>4</sub> μεταφέρονται σε μεγαλύτερη ποσότητα από τα υπόλοιπα στο αίμα.

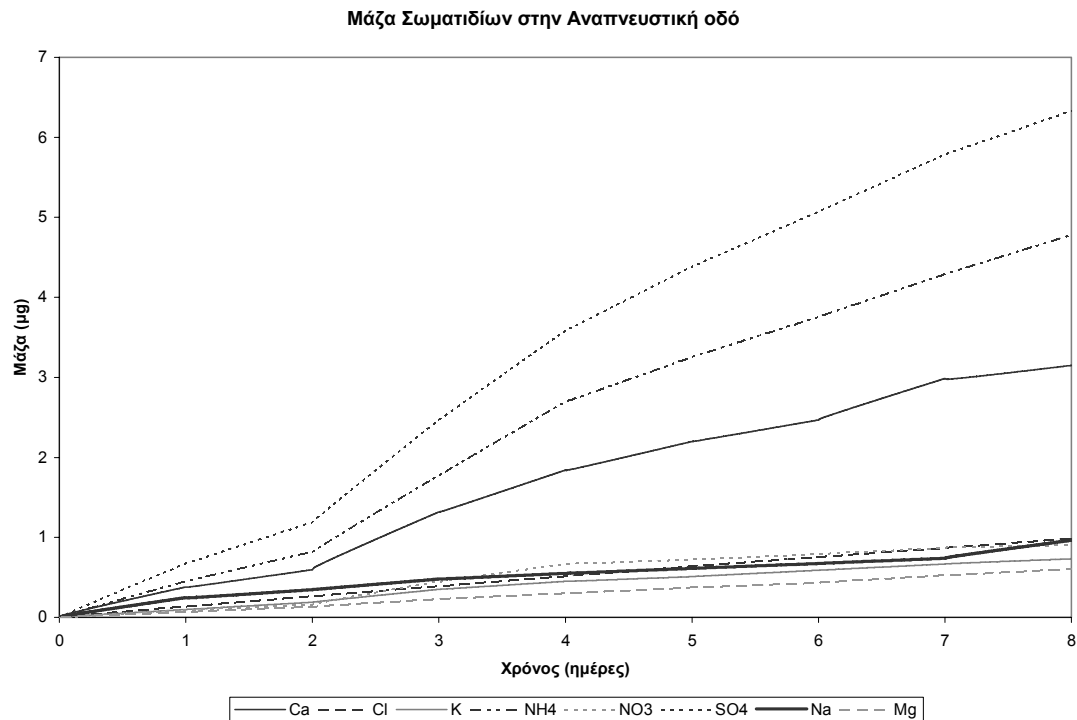
Στην πραγματικότητα τα σωματίδια Na και SO<sub>4</sub> απορροφώνται γρήγορα στο αίμα ενώ τα σωματίδια Ca παρουσιάζουν μέσο ρυθμό απορρόφησης (ICRP, 2002). Ακόμα τα Mg, Cl και το στοιχειακό S απορροφώνται εν μέρει ταχέως και εν μέρει με μέσο ρυθμό στο αίμα με αποτέλεσμα οι καμπύλες στα διαγράμματα 94 - 97 να δίνουν την ανώτερη και κατώτερη τιμή μάζας ενός στοιχείου κάθε στιγμή σε κάθε περιοχή για τα περισσότερα χημικά στοιχεία.



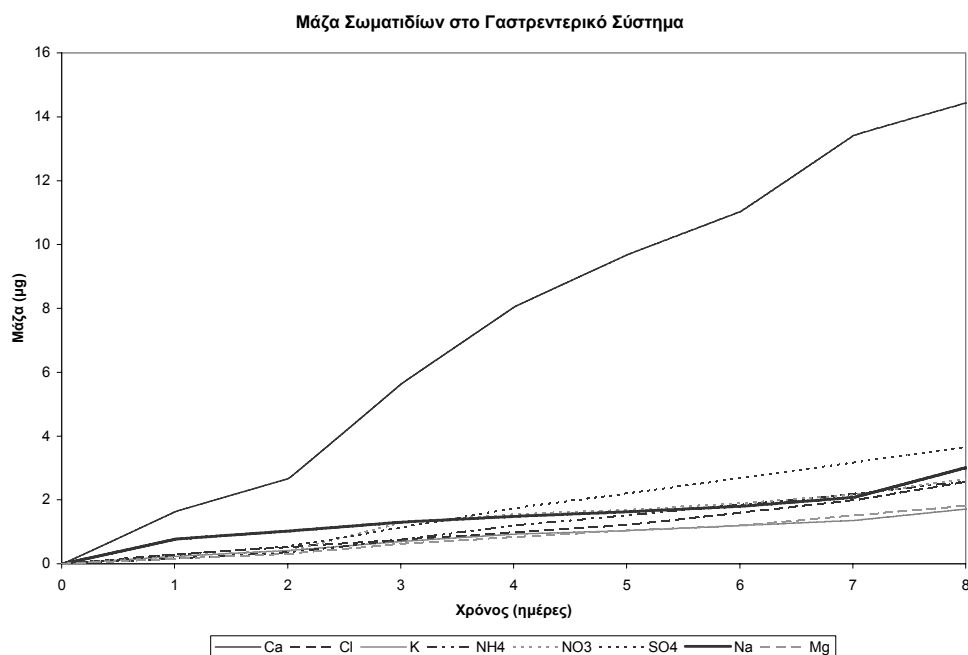
**Εικόνα 94:** Μάζα ανόργανων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους.



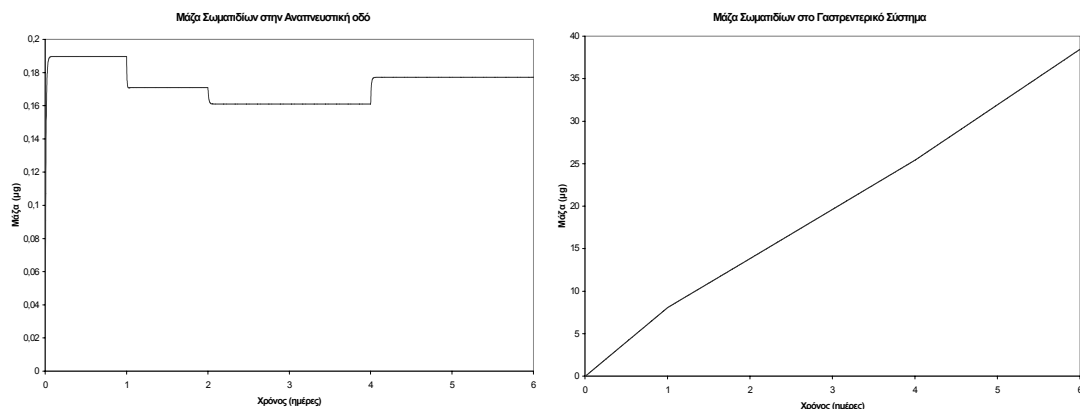
**Εικόνα 95:** Μάζα ανόργανων σωματιδίων που απομακρύνεται στο γαστρεντερικό σύστημα κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους.



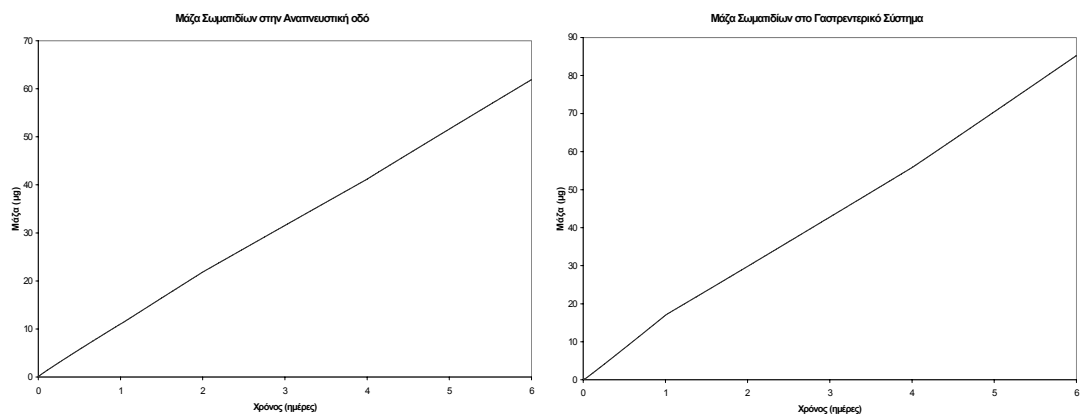
**Εικόνα 96:** Μάζα ανόργανων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους.



**Εικόνα 97:** Μάζα ανόργανων σωματιδίων που απομακρύνεται στο γαστρεντερικό σύστημα κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους.



**Εικόνα 98:** Μάζα ανθρακούχων σωματιδίων στο αναπνευστικό και το γαστρεντερικό σύστημα κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο θεωρώντας πως απορροφώνται γρήγορα στο αίμα.



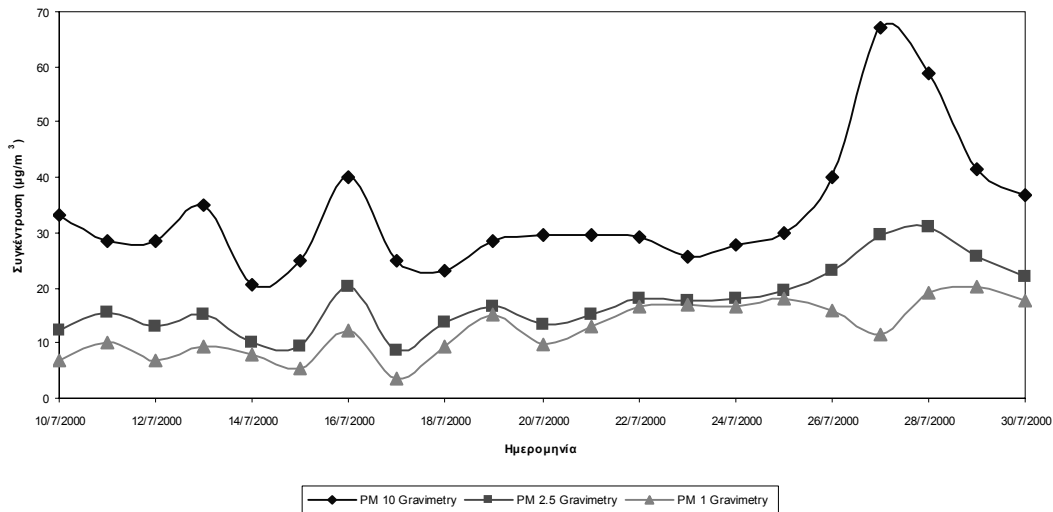
**Εικόνα 99:** Μάζα ανθρακούχων σωματιδίων στο αναπνευστικό και το γαστρεντερικό σύστημα κατά την περίοδο μελέτης στο Όσλο θεωρώντας πως απορροφώνται αργά στο αίμα.

Οι αντίστοιχες καμπύλες για το συνολικό άνθρακα που περιέχεται στα σωματίδια είναι αυτές που δίνονται στα διαγράμματα των εικόνων 98 και 99. Η μάζα στοιχειακού και οργανικού άνθρακα που μεταφέρεται στο γαστρεντερικό σύστημα αλλά και αυτή που παραμένει στο αναπνευστικό είναι ιδιαίτερα υψηλή ειδικά στην περίπτωση που απορροφώνται αργά στο αίμα. Ωστόσο οι καμπύλες της εικόνας 98 θεωρείται πως αποτελούν καλύτερη αναπαράσταση της πραγματικής συμπεριφοράς των σωματιδίων άνθρακα που απορροφώνται κυρίως γρήγορα στο αίμα (ICRP, 2002).

## 8. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ AEROEXPDOSE ΣΤΗ ΦΟΙΝΟΚΑΛΙΑ

Το μοντέλο AEROEXPDOSE χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της δόσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα για άτομο εκτεθειμένο στις ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις  $PM_{10}$  στη Φοινοκαλιά Κρήτης. Η Φοινοκαλιά ( $35^{\circ}19'N$ ,  $25^{\circ}40'E$ ) είναι μια παράκτια περιοχή ανατολικά του Ηρακλείου Κρήτης με υψόμετρο 150m (*Mihalopoulos κ.α., 1997*). Δέχεται αέριες μάζες από τις βιομηχανικές και αστικές περιοχές του βορρά, την Αφρική και συγκεκριμένα σκόνη από την έρημο Σαχάρα, καθώς και NaCl από την Μεσόγειο Θάλασσα. Έτσι η σωματιδιακή ύλη στην περιοχή αποτελείται από ένα μείγμα εδαφικού υλικού, θαλάσσιων αεροζόλ, πρωτογενών σωματιδίων που πηγάζουν από τη φύση και ανθρώπινες δραστηριότητες και κυρίως δευτερογενή σωματίδια από αντιδράσεις των παραπάνω στην ατμόσφαιρα. Οι μετρήσεις στη Φοινοκαλιά πραγματοποιήθηκαν τον Ιούλιο του 2000 και συγκεκριμένα την περίοδο 10 - 30 Ιουλίου σε ανοιχτή περιοχή και ύψος 3m πάνω από το έδαφος χρησιμοποιώντας κρουστικό δειγματολήπτη (*Smolik κ.α., 2003*). Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για σωματίδια ταξινομημένα ως  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  και  $PM_1$  δίνονται στο διάγραμμα της εικόνας 100.

Η συγκέντρωση των σωματιδίων  $PM_{10}$  κυμαίνεται από  $20,7\mu g/m^3$  έως  $67,2\mu g/m^3$ . Αναλυτικότερα, η συγκέντρωση μεταβάλλεται από  $20,7\mu g/m^3$  έως  $40\mu g/m^3$  για την περίοδο 10/7/2000 - 18/7/2000, σταθερή και περίπου ίση με  $29\mu g/m^3$  για την περίοδο 19/7/2000 - 25/7/2000, στη συνέχεια αυξάνεται ως και τα  $67,2\mu g/m^3$  (27/7/2000) και τελικά ελαττώνεται ως την τιμή των  $37\mu g/m^3$  στις 30/7/2000. Ανάλογη διαφοροποίηση παρατηρείται και στις συγκεντρώσεις των  $PM_{2,5}$  και  $PM_1$  με τα  $PM_{2,5}$  να ακολουθούν την καμπύλη των  $PM_{10}$  ενώ τα  $PM_1$  που μετρώνται με οπτικό τρόπο να παρουσιάζουν λίγο διαφορετικό προφίλ.

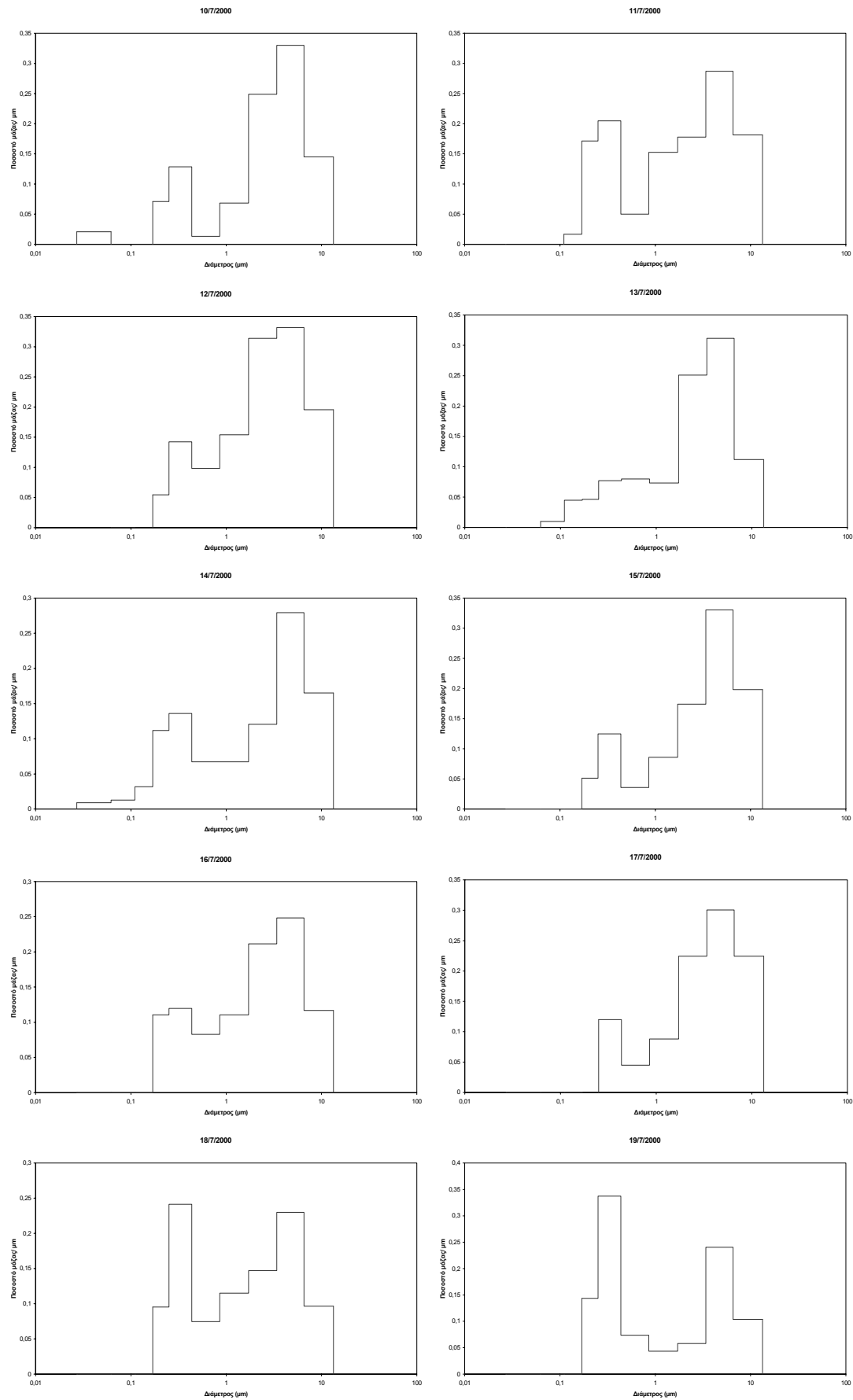


**Εικόνα 100:** Συγκέντρωση σωματιδίων  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  και  $PM_1$  κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά.

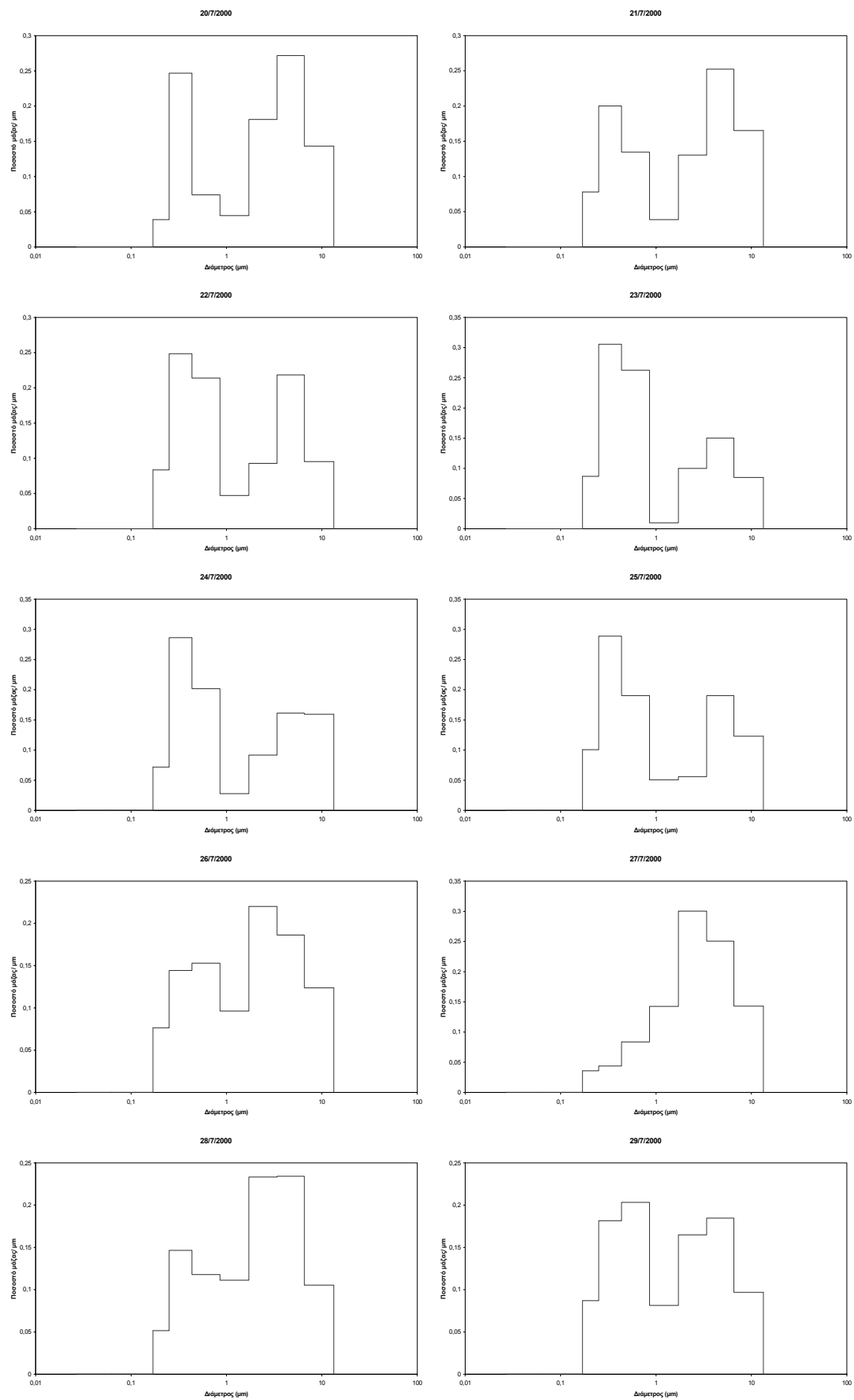
Η διαφοροποίηση στις συγκεντρώσεις των σωματιδίων κάθε ημέρα είναι χαρακτηριστική της περιοχής της Μεσογείου, αφού ένα μεγάλο μέρος τους αποτελείται από εδαφικό υλικό και θαλάσσια αεροζόλ που η παραγωγή τους εξαρτάται καθαρά από τις μετεωρολογικές συνθήκες. Ειδικά για τη Φοινοκαλιά η συγκέντρωση σωματιδίων καθημερινά εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από την ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου που μεταφέρει τις διάφορες αέριες μάζες σε αυτή.

Τα σωματίδια  $PM_{10}$  διακρίθηκαν σε 10 μεγέθη και έδωσαν τις κατανομές μάζας σωματιδίων που δίνονται στα διαγράμματα της εικόνας 101. Η μάζα τους αποτελείται τόσο από μεγάλα όσο και μικρά σωματίδια εκτός από τις 12/7/2000, 14/7/2000 - 19/7/2000 και 22/7/2000 και 29/7/2000 που συλλέχθηκαν κυρίως μεγάλα σωματίδια. Οι κατανομές παρουσιάζουν δύο κορυφές για όλη την περίοδο με μέσες διαμέτρους 0,4  $\mu m$  και 5  $\mu m$  και ελάχιστη μάζα για σωματίδια με διάμετρο κοντά στο 1  $\mu m$ .

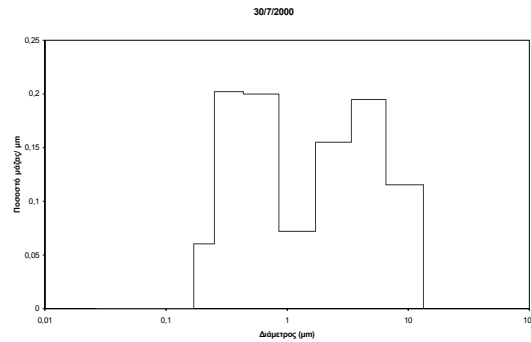




**Εικόνα 101α:** Κατανομές μάζας σωματιδίων κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινokaλιά.

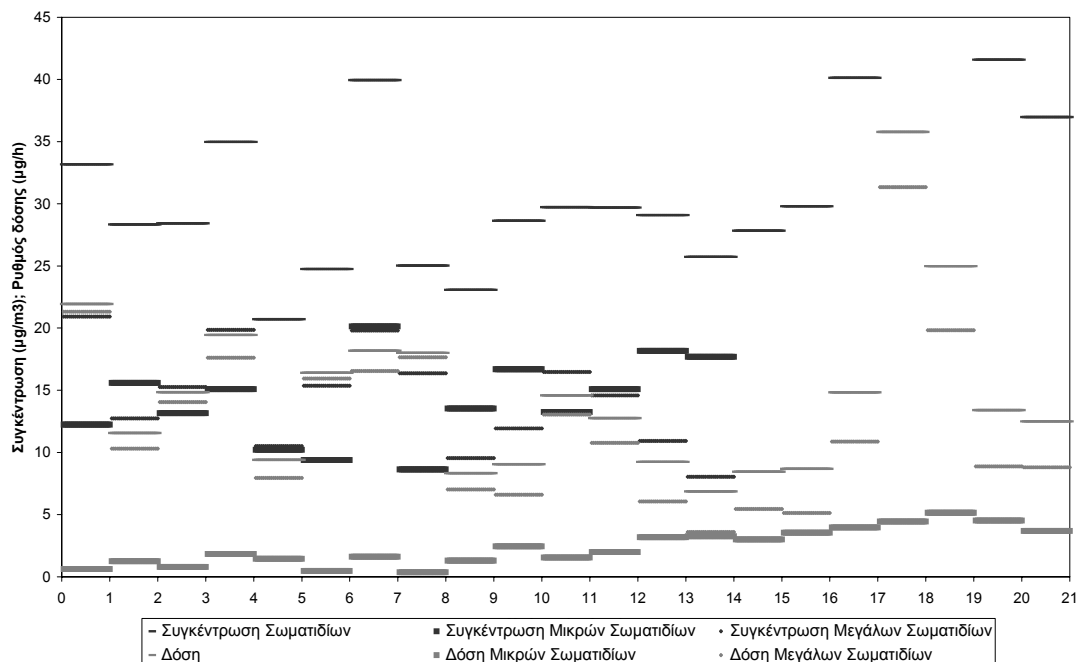


**Εικόνα 101 β:** Κατανομές μάζας σωματιδίων κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά.



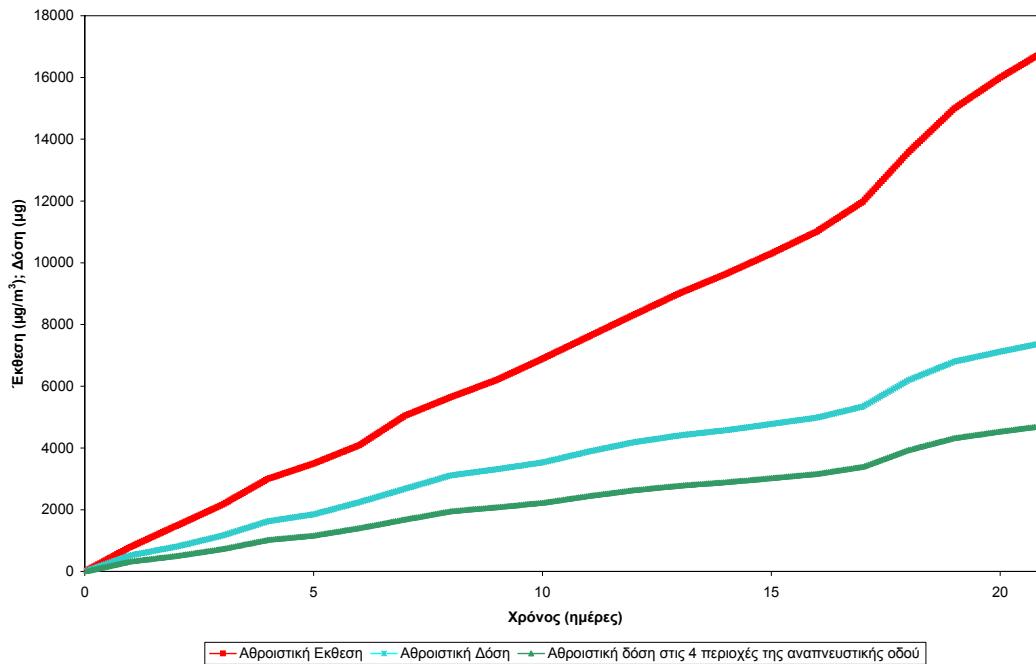
**Εικόνα 101 γ:** Κατανομές μάζας σωματιδίων κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά.

Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω δεδομένα υπολογίστηκε η δόση στο αναπνευστικό σύστημα ενός ενήλικα καυκάσιου άντρα που εκτελεί ήπια εργασία, εισπνέει και εκπνέει από τη μύτη. Τα σωματίδια θεωρείται πως έχουν πυκνότητα  $1\mu\text{g}/\text{m}^3$  και είναι σφαιρικά. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι μέσες ημερήσιες τιμές και όπως αποδείχθηκε παραπάνω στην εφαρμογή του μοντέλου στο Όσλο δίνουν ορθά αποτελέσματα για τη δόση. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών δίνονται στο διάγραμμα της εικόνας 102 χωριστά για τα μικρά και τα μεγάλα σωματίδια όπου οι μεταβολές της συγκέντρωσης μεταφράζονται σε μεταβολές της δόσης του αναπνευστικού συστήματος. Η αναλογία δόσης μικρών και μεγάλων σωματιδίων εξαρτάται από την αναλογία των συγκεντρώσεών τους.



**Εικόνα 102:** Συγκέντρωση και δόση μικρών και μεγάλων σωματιδίων στην αναπνευστική οδό κατά την περίοδο μελέτης (10/7/2000 - 30/7/2000) στη Φοινοκαλιά όπως υπολογίστηκαν με το μοντέλο AEROEXPDOSE χρησιμοποιώντας μέσες ημερήσιες τιμές παραμέτρων.

Το διάγραμμα αθροιστικής έκθεσης και δόσης δίνεται στην εικόνα 103. Η μάζα σωματιδίων που αποθέεται στο αναπνευστικό σύστημα αποτελεί σχεδόν το 50% της μάζας στην οποία εκτίθεται το άτομο. Η δόση στη Φοινοκαλιά είναι πολύ υψηλότερη συγκριτικά με τη δόση που λαμβάνει ένα άτομο στο Όσλο για τις περιόδους μελέτης αφού οι συγκεντρώσεις είναι πολύ υψηλότερες.

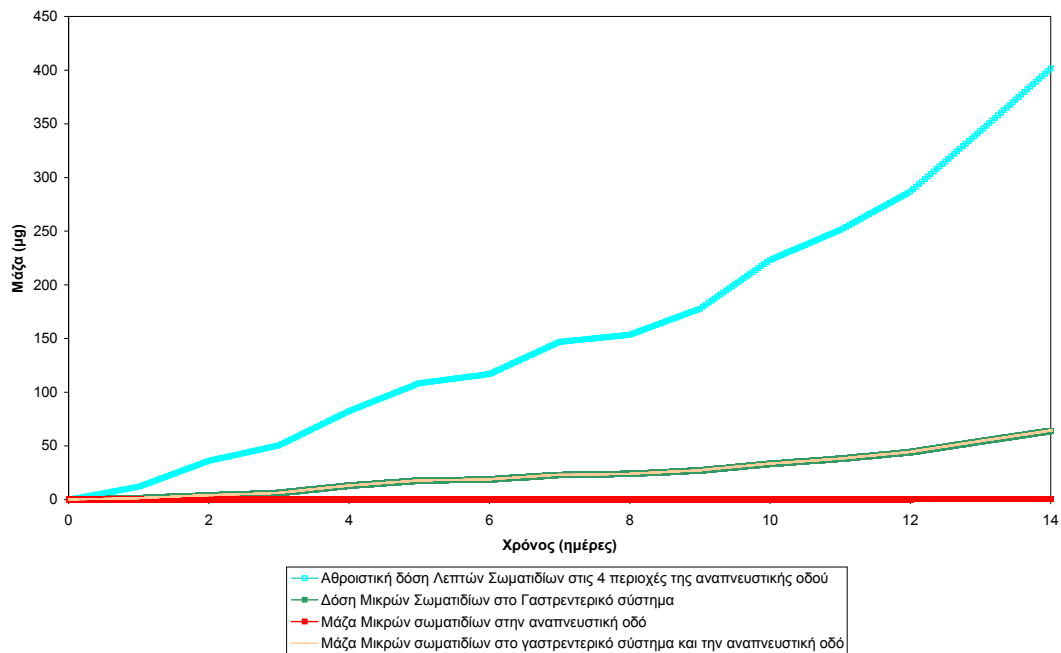


**Εικόνα 103:** Αθροιστική έκθεση και δόση σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα για την περίοδο μελέτης (10/7/2000 - 30/7/2000) στη Φοινοκαλιά. Παράλληλα δίνεται και η αθροιστική καμπύλη δόσης στις 4 περιοχές του πνεύμονα (ET<sub>2</sub>, BB, bb, AI) που λαμβάνονται υπόψη στον μηχανισμό απομάκρυνσης των σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα.

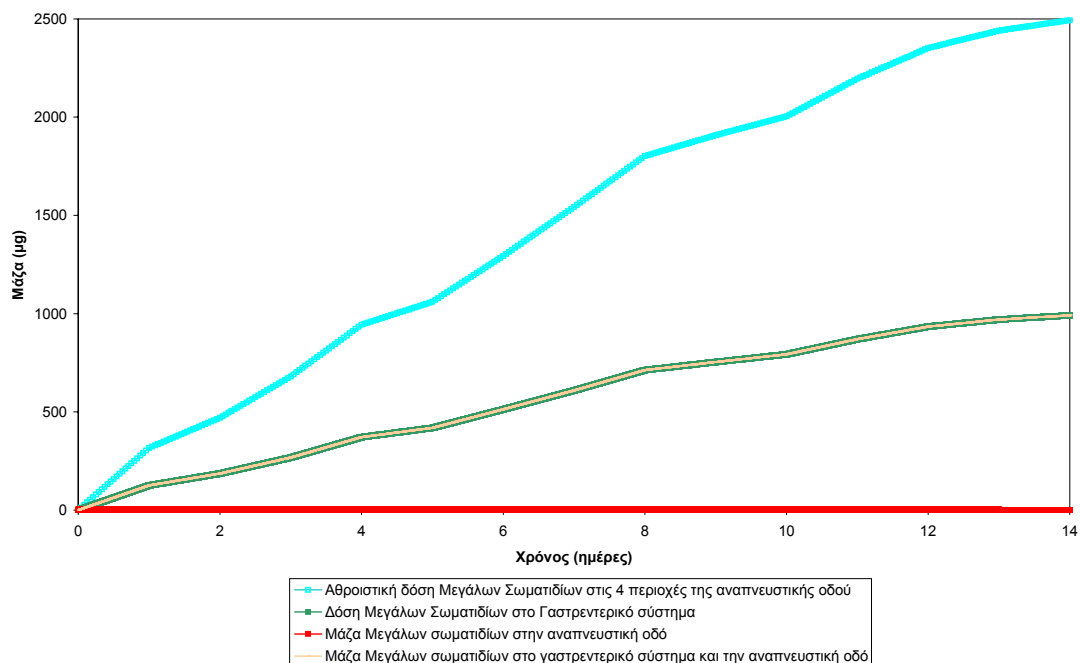
Παράλληλα υπολογίστηκε και η συσσώρευση μάζας σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα για την περίοδο μελέτης. Το μοντέλο AEROEXPDOSE παράγει συνεχείς τιμές συσσώρευσης για 14 ημέρες και έτσι δεν γνωρίζουμε το προφίλ της συγκέντρωσης μάζας σε κάθε τμήμα του αναπνευστικού την περίοδο 24/7/2000 - 30/7/2002 όπου παρατηρείται η αύξηση των συγκεντρώσεων. Ωστόσο το μοντέλο παρέχει την μάζα που βρίσκεται σε κάθε τμήμα του αναπνευστικού συστήματος στο τέλος της περιόδου μελέτης, όπως και αυτή που έχει μεταφερθεί στο γαστρεντερικό σύστημα και το αίμα.

Αναλυτικότερα, στα διαγράμματα των εικόνων 104 και 105 δίνεται το προφίλ της συγκέντρωσης μάζας σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα για 14 ημέρες, χωριστά για τα μικρά και τα μεγάλα σωματίδια. Τα σωματίδια θεωρείται πως απορροφώνται

ταχέως στο αίμα. Τα μικρά σωματίδια καταλήγουν κυρίως στο αίμα ενώ τα μεγάλα απομακρύνονται σε μεγαλύτερο ποσοστό στο γαστρεντερικό σύστημα.

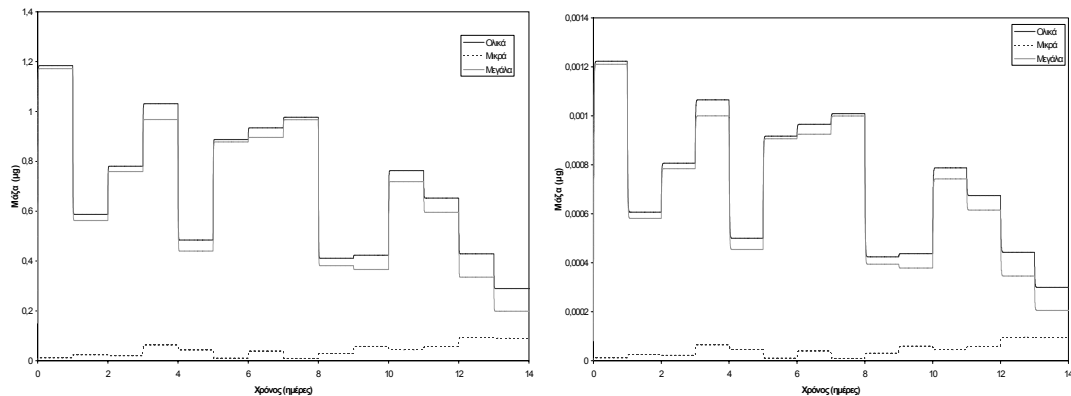


**Εικόνα 104:** Αθροιστική δόση μικρών σωματιδίων στις 4 περιοχές του πνεύμονα και μάζα ταχέως απορροφώμενων στο αίμα μικρών σωματιδίων που μεταφέρεται στο γαστρεντερικό σύστημα ή παραμένει στην αναπνευστική οδό, σε εσωτερικούς χώρους κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά. Η απόσταση μεταξύ των καμπυλών του αθροίσματος μάζας στην αναπνευστική οδό και το γαστρεντερικό σύστημα, και της αθροιστικής δόσης εκφράζει τη μάζα που απορροφάται στο αίμα.

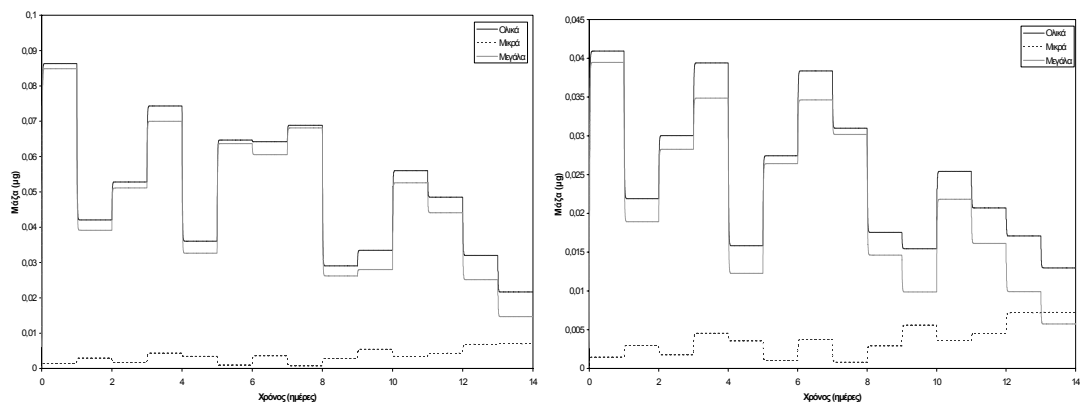


**Εικόνα 105:** Αθροιστική δόση μεγάλων σωματιδίων στις 4 περιοχές του πνεύμονα και μάζα ταχέως απορροφώμενων στο αίμα μεγάλων σωματιδίων που μεταφέρεται στο γαστρεντερικό σύστημα ή παραμένει στην αναπνευστική οδό, σε εσωτερικούς χώρους κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά. Η απόσταση μεταξύ των καμπυλών του αθροίσματος μάζας στην αναπνευστική οδό και το γαστρεντερικό σύστημα, και της αθροιστικής δόσης εκφράζει τη μάζα που απορροφάται στο αίμα.

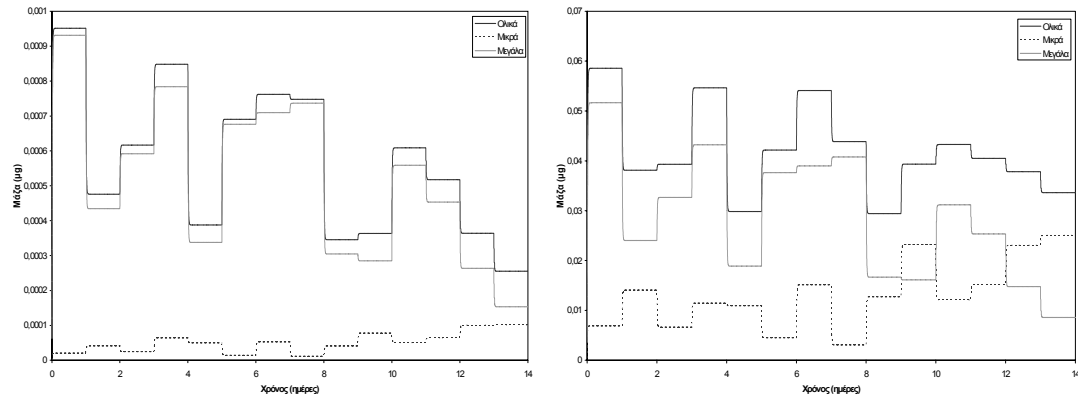
Αναλυτικά η συσσώρευση σωματιδίων σε κάθε περιοχή δίνεται στα διαγράμματα των εικόνων 106 - 111. Στα διαγράμματα οι καμπύλες συσσώρευσης ακολουθούν τις καμπύλες δόσης ενώ ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεταβολή της αναλογίας μικρών και μεγάλων σωματιδίων και ειδικά στις περιοχές bb gel, sol και seq και AI σε σχέση με την κατανομή μάζας κάθε ημέρας.



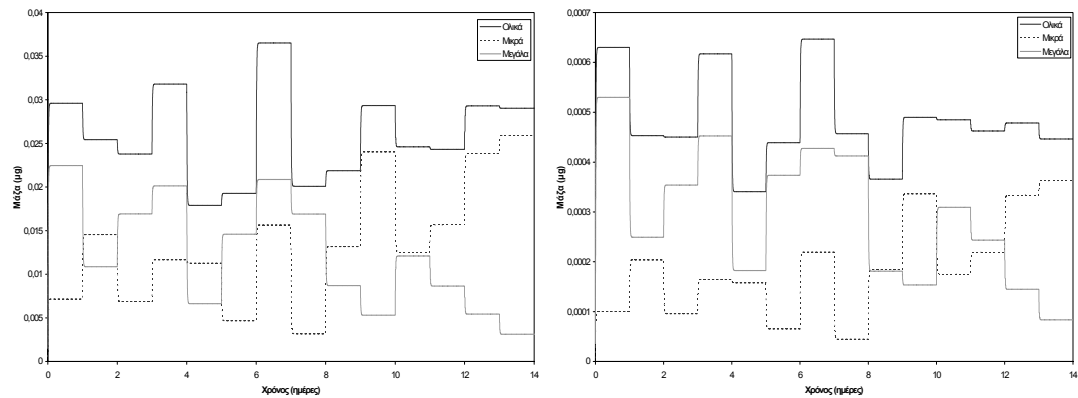
**Εικόνα 106:** Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στην επιφάνεια (στα υγρά) και (β) στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού στην περιοχή ET<sub>2</sub> κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους.



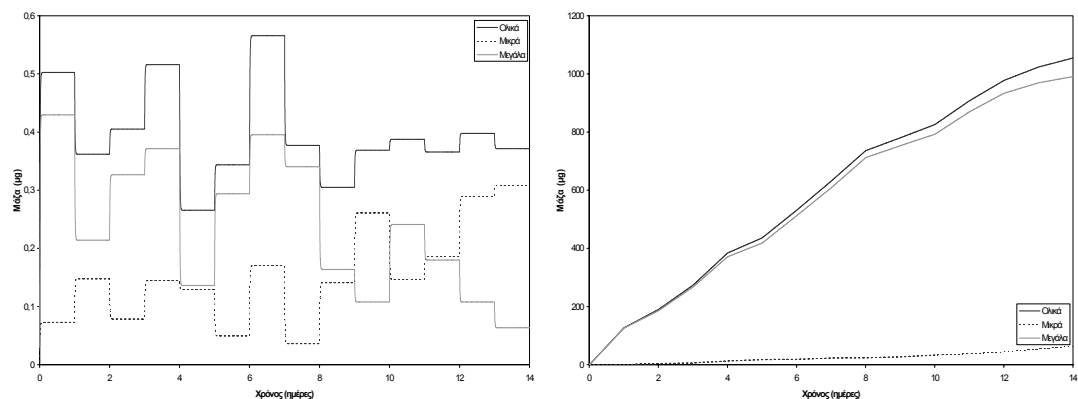
**Εικόνα 107:** Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στο ταχέως κινούμενο στρώμα βλέννας και (β) στο αργά κινούμενο στρώμα βλέννας της περιοχής BB κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους.



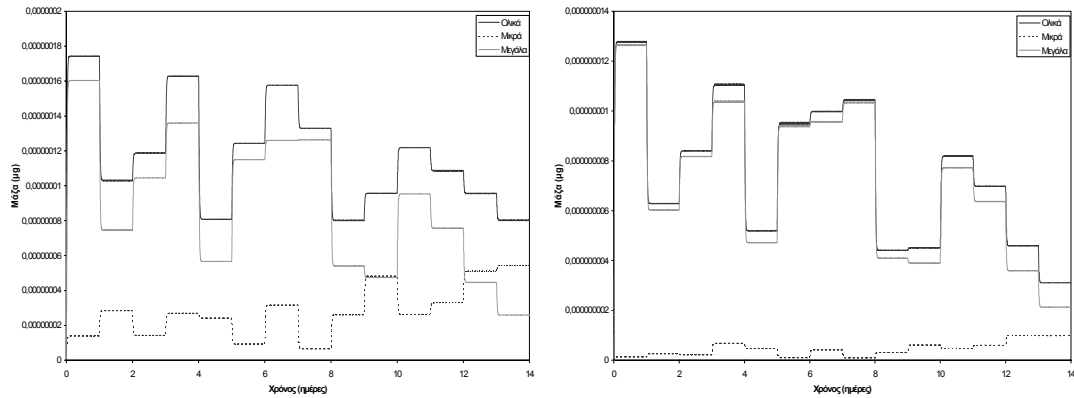
**Εικόνα 108:** Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού στην περιοχή BB και (β) στο ταχέως κινούμενο στρώμα βλέννας της περιοχής bb κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους.



**Εικόνα 109:** Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στο αργά κινούμενο στρώμα βλέννας και (β) στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού στην περιοχή bb κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους.

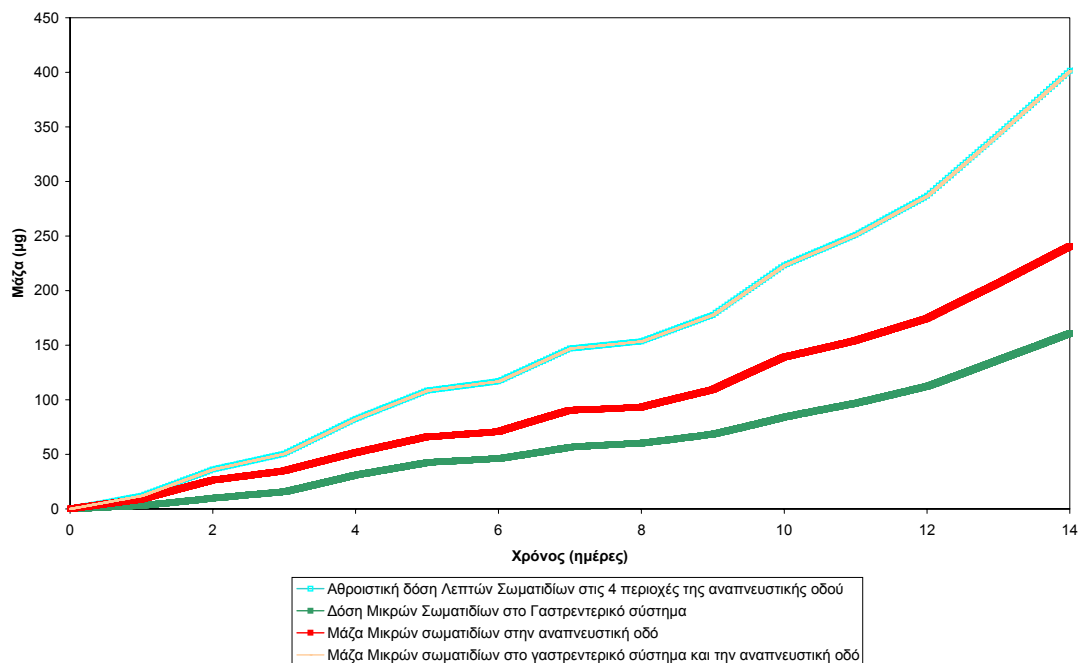


**Εικόνα 110:** Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων (α) που παραμένει στην κυψελιδική περιοχή των πνευμόνων και (β) που απομακρύνεται στο γαστρεντερικό σύστημα κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους.



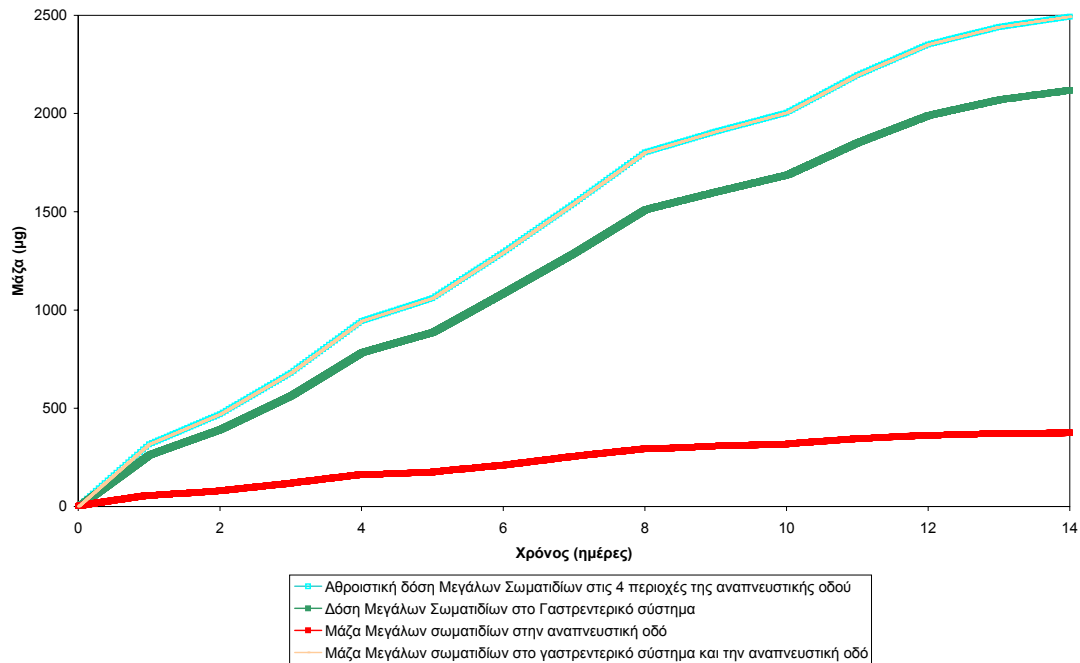
**Εικόνα 111:** Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει στους λεμφαδένες της (α) θωρακικής περιοχής και (β) εκτός θώρακα περιοχής κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά, για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους.

Η συσσώρευση σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα υπολογίστηκε και για το χειρότερο σενάριο, δηλαδή για αργή απορρόφηση των σωματιδίων στο αίμα. Η καμπύλες έκθεσης - δόσης - συσσώρευσης για το διάστημα των 14 ημερών δίνονται στις εικόνες 112 και 113 χωριστά για τα μικρά και μεγάλα σωματίδια αντίστοιχα. Η μάζα μικρών σωματιδίων που παραμένει στο αναπνευστικό σύστημα είναι υψηλή σε σχέση με την δόση τους αλλά παραμένει αρκετά μικρότερη από την συσσώρευση των μεγάλων σωματιδίων.



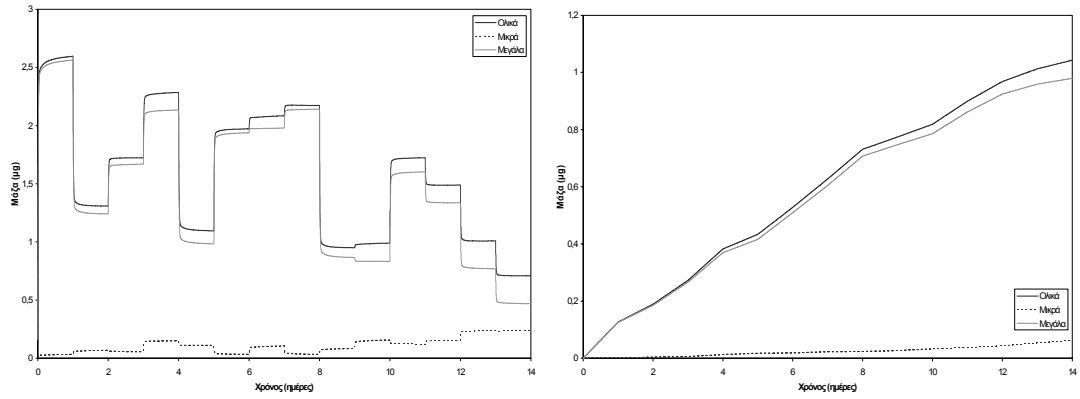
**Εικόνα 112:** Αθροιστική δόση μικρών σωματιδίων στις 4 περιοχές του πνεύμονα και μάζα αργά απορροφώμενων στο αίμα μικρών σωματιδίων που μεταφέρεται στο γαστρεντερικό σύστημα ή παραμένει στην αναπνευστική οδό, σε εσωτερικούς χώρους κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά. Η απόσταση μεταξύ των καμπυλών του αθροίσματος μάζας στην αναπνευστική οδό και το γαστρεντερικό σύστημα, και της αθροιστικής δόσης εκφράζει τη μάζα που απορροφάται στο αίμα.



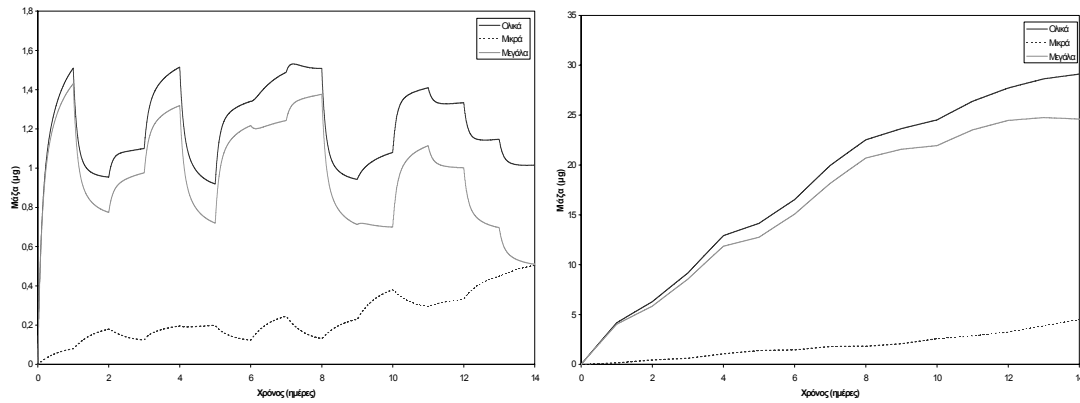


**Εικόνα 113:** : Αθροιστική δόση μεγάλων σωματιδίων στις 4 περιοχές του πνεύμονα και μάζα αργά απορροφώμενων στο αίμα μεγάλων σωματιδίων που μεταφέρεται στο γαστρεντερικό σύστημα ή παραμένει στην αναπνευστική οδό, σε εσωτερικούς χώρους κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά. Η απόσταση μεταξύ των καμπυλών του αθροίσματος μάζας στην αναπνευστική οδό και το γαστρεντερικό σύστημα, και της αθροιστικής δόσης εκφράζει τη μάζα που απορροφάται στο αίμα.

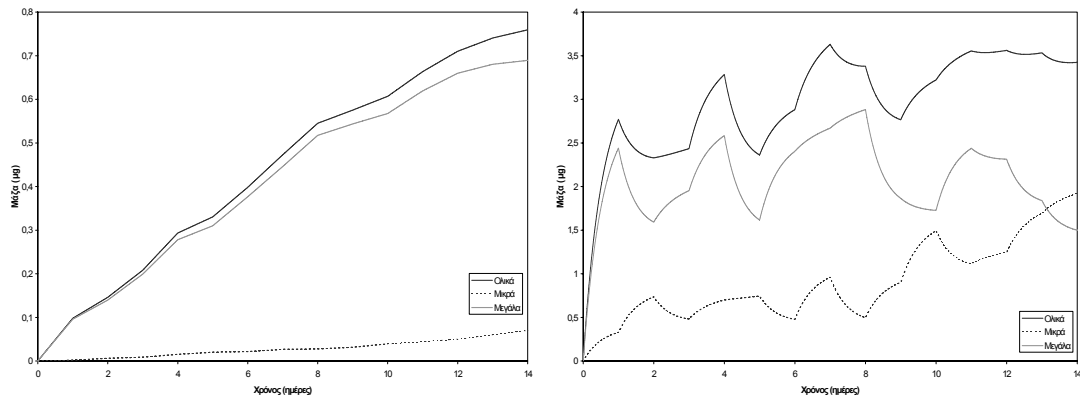
Η συσσώρευση σε κάθε τμήμα του αναπνευστικού συστήματος και η δόση στο γαστρεντερικό σύστημα δίνεται στις εικόνες 114 - 119. Στις καμπύλες αυτές φαίνεται ο ρυθμός μεταφοράς σωματιδίων με τη βλέννα αφού η δόση δεν ισοδυναμεί με την ποσότητα μάζας που απομακρύνεται κάθε στιγμή, όπως σχεδόν συμβαίνει στην περίπτωση που τα σωματίδια απορροφώνται ταχέως στο αίμα. Σε αυτήν την περίπτωση τα μικρά σωματίδια βρίσκονται σε μεγαλύτερη ποσότητα στα τμήματα της περιοχής bb την 14<sup>η</sup> ημέρα που η μάζα τους αποτελεί το 69% αυτής που συλλέχθηκε. Η αναλογία βέβαια μικρών και μεγάλων σωματιδίων σε κάθε τμήμα εξακολουθεί να μεταβάλλεται ανάλογα του λόγου της συγκέντρωσής τους στην ατμόσφαιρα.



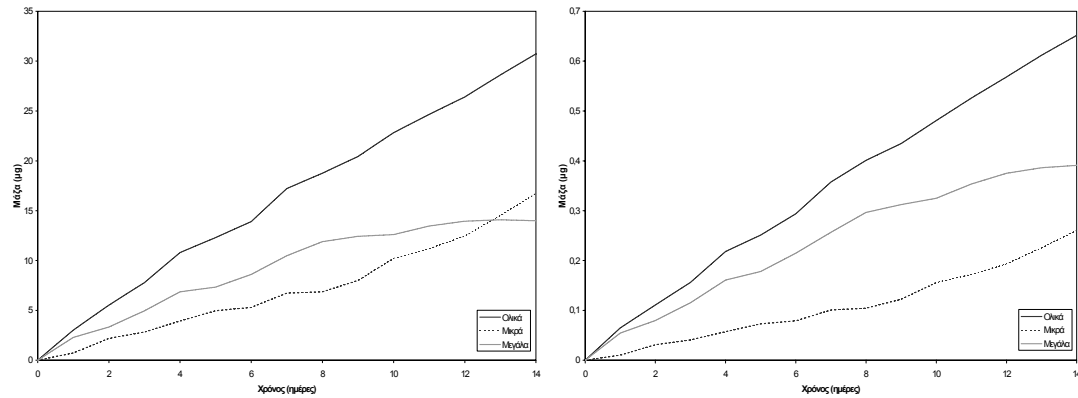
**Εικόνα 114:** Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στην επιφάνεια (στα υγρά) και (β) στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού στην περιοχή ET<sub>2</sub> κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινικαλιά, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους.



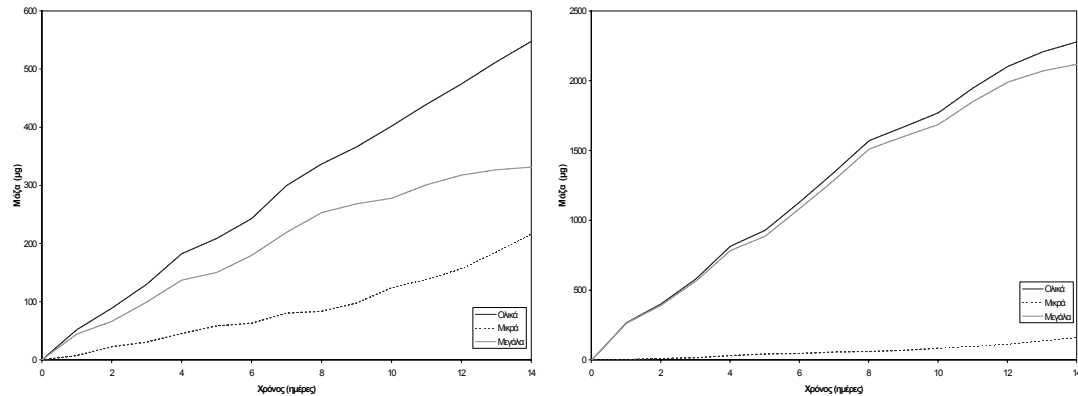
**Εικόνα 115:** Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στο ταχέως κινούμενο στρώμα βλέννας και (β) στο αργά κινούμενο στρώμα βλέννας της περιοχής BB κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινικαλιά, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους.



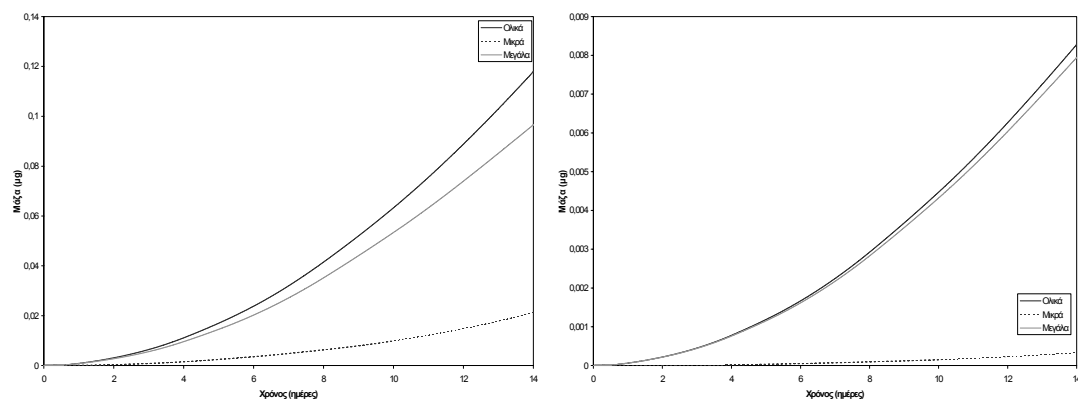
**Εικόνα 116:** Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού στην περιοχή BB και (β) στο ταχέως κινούμενο στρώμα βλέννας της περιοχής bb κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινικαλιά, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους.



**Εικόνα 117:** Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει (α) στο αργά κινούμενο στρώμα βλέννας και (β) στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού στην περιοχή bb κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους.



**Εικόνα 118:** Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων (α) που παραμένει στην κυψελιδική περιοχή των πνευμόνων και (β) που απομακρύνεται στο γαστρεντερικό σύστημα κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους.



**Εικόνα 119:** Μάζα μικρών, μεγάλων και ολικών σωματιδίων που παραμένει στους λεμφαδένες της (α) θωρακικής περιοχής και (β) εκτός θώρακα περιοχής κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά, για σωματίδια που απορροφώνται αργά στο αίμα και έκθεση σε εξωτερικούς χώρους.

Τελικά η μάζα που βρίσκεται συσσωρευμένη σε κάθε τμήμα του αναπνευστικού συστήματος στο τέλος της περιόδου μελέτης δίνεται στον πίνακα 14.

**Πίνακας 14:** Συσσώρευση μάζας σωματιδίων στο αναπνευστικό και γαστρεντερικό σύστημα και στο αίμα μετά από έκθεση στη Φοινοκαλιά Κρήτης για σωματίδια που απορροφώνται ταχέως ή αργά στο αίμα.

<i><b>Τύπος συμπεριφοράς υλικού σε απορρόφηση:</b></i>	<i><b>Μάζα σωματιδίων (μg)</b></i>	
	<i><b>F (ταχεία)</b></i>	<i><b>S (αργή)</b></i>
ET2_sur	0,6	1,42
ET_seq	0,0006	1,66
LN <sub>ET</sub>	6,40E-09	0,018
BB_gel	0,04	1,66
BB_sol	0,02	46,18
BB_seq	0,0005	1,2
bb_gel	0,04	5,2
bb_sol	0,03	50,9
bb_seq	0,0006	1,1
AI	0,5	957
LN <sub>TH</sub>	1,19E-07	0,255
Γαστρεντερικό σύστημα (GI Tract)	1684	3664
Αίμα	3045	1,04
Ολικά	4731	4731

Η εφαρμογή του μοντέλου AEROEXPDOSE στην Φοινοκαλιά είναι ενδεικτική για παράκτια μη αστική περιοχή της Μεσογείου σε περίοδο ξηρασίας και υψηλών ανέμων.

## 9. ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας παρουσιάστηκαν οι μηχανισμοί απόθεσης και καθαρισμού σωματιδίων από το ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα όπως καθορίζονται από τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων και την ανατομική διαφοροποίηση κάθε ατόμου. Ακόμα, παρουσιάστηκε η μεθοδολογία υπολογισμού των ποσοστών απόθεσης και καθαρισμού σύμφωνα με το μοντέλο HRTM της ICRP που χρησιμοποιείται στην ανάπτυξη του μοντέλου AEROEXPDOSE.

Το μοντέλο AEROEXPDOSE αναπτύχθηκε με στόχο τον άμεσο υπολογισμό της δόσης και συσσώρευσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα για σταθερές και μεταβαλλόμενες συνθήκες έκθεσης. Με τη βοήθεια του μελετήθηκαν οι παράγοντες

που επηρεάζουν την εναπόθεση και τον καθαρισμό σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα. Ο υπολογισμός της δόσης πολυδιάσπορων αεροζόλ βρέθηκε πως επηρεάζεται από την υπολογιστική διαδικασία που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της εναπόθεσης τους. Ακόμα, το ημιεμπειρικό μοντέλο λόγω της στατιστικής του φύσης περιλαμβάνει μηχανισμούς καθαρισμού των σωματιδίων από το αναπνευστικό σύστημα που στα θεωρητικά μοντέλα θα έπρεπε να προσομοιωθούν χωριστά με κατάλληλη μαθηματική εξίσωση. Έτσι καταφέρνει, για παράδειγμα, να προβλέψει ικανοποιητικά την ενίσχυση των μηχανισμών άμυνας του οργανισμού στην περίπτωση υψηλού ρυθμού δόσης.

Το μοντέλο εφαρμόστηκε για τον υπολογισμό της δόσης και συσσώρευσης μάζας σωματιδίων μετά από έκθεση στο Όσλο της Νορβηγίας. Η έκθεση υπολογίστηκε βάσει πραγματικών πειραματικών δεδομένων για την συγκέντρωση και τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά των σωματιδίων και για 2 σενάρια δραστηριότητας του ατόμου. Το χρονικό διάστημα που παρατηρούνται οι υψηλότερες συγκεντρώσεις ρύπων σε μια αστική περιοχή εξαρτάται από την περίοδο που λαμβάνουν χώρα οι ανθρώπινες δραστηριότητες. Ο συνδυασμός της δραστηριότητας και της υψηλής συγκέντρωσης ρύπων οδηγεί σε υψηλή έκθεση του ατόμου σε αυτό το διάστημα της ημέρας.

Η πρόβλεψη πραγματοποιήθηκε για έκθεση εντός και εκτός οικίας και έδωσε σημαντικά αποτελέσματα για την συσχέτιση περιβαλλοντικής και μη συγκέντρωσης σωματιδίων και της αντίστοιχης δόσης. Βρέθηκε ότι ελλείπει ιδιαίτερα ρυπογόνων δραστηριοτήτων εντός του κτιρίου η συγκέντρωση σωματιδίων σε αυτό καθορίζεται από το ρυθμό ανταλλαγής αέρα μεταξύ αυτού και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Ακόμα αναγνωρίστηκε ως σημαντική ρυπογόνα δραστηριότητα εντός του κτιρίου το μαγείρεμα, ενώ ακόμα και η ύπαρξη ατόμων εντός του κτιρίου είναι ικανή να μεταβάλλει τις εσωτερικές συγκεντρώσεις σωματιδίων λόγω επαναιώρησης τους από επιφάνειες όπου έχουν καθιζάνει ως σκόνη.

Ο ρυθμός δόσης εντός και εκτός του κτιρίου βρέθηκε πως ακολουθεί τις καμπύλες των αντίστοιχων συγκεντρώσεων (συντελεστής συσχέτισης 0,96 στον εξωτερικό χώρο και 0,83 στον εσωτερικό). Όμοια, οι καμπύλες συσσώρευσης ακολουθούν αυτές της δόσης όταν η απορρόφηση στο αίμα είναι ταχεία αφού ο ρυθμός δόσης σε κάθε

τμήμα εξισορροπείται σχεδόν με το ρυθμό καθαρισμού. Ακόμα η συσσώρευση σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα μετά από έκθεση σε εσωτερικούς χώρους είναι ιδιαίτερα υψηλή λόγω του μεγέθους τους και της δραστηριότητας του ατόμου.

Επιπλέον βρέθηκε πως αν και οι δραστηριότητες εντός του κτιρίου μεταβάλλουν στιγμιαία τη συγκέντρωση σωματιδίων λόγω των μηχανισμών που επιδρούν μετέπειτα σ' αυτά η διαφοροποίηση αυτή δεν φαίνεται στις ωριαίες ή ημερήσιες πειραματικές μετρήσεις και τον υπολογιζόμενο ρυθμό δόσης. Ωστόσο, η δόση μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια ακόμα και με τη χρήση μέσων τιμών όπως και η συσσώρευση. Ειδικότερα, για έκθεση σε εξωτερικό χώρο η δόση είναι ίση είτε υπολογιστεί με συνεχείς ωριαίες ή με μέσες ημερήσιες τιμές. Για εσωτερικό χώρο όμως οι δόσεις διαφέρουν σε ποσοστό που μπορεί να φτάσει ως και το 32% για τα μεγάλα και το 35% για τα μικρά σωματίδια στην περίοδο μελέτης στο Όσλο. Επιπλέον, όταν η συσσώρευση υπολογίζεται με μέσες τιμές παρατηρείται διαφορά μόνο για τις περιοχές που έχουν υψηλό ρυθμό καθαρισμού αλλά η τελική συσσώρευση στο αναπνευστικό σύστημα δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα.

Έτσι η δόση και η συσσώρευση σωματιδίων που δέχεται ένα άτομο που εκτίθεται σε εξωτερικό χώρο ή εκτελεί την ίδια δραστηριότητα κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια από μέσες ημερήσιες τιμές. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό γιατί τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα όργανα μέτρησης σε σταθμούς παρακολούθησης της ποιότητας της ατμόσφαιρας παρέχουν μέσες ημερήσιες τιμές συγκεντρώσεων. Με τον τρόπο αυτό απλοποιείται η διαδικασία υπολογισμού δόσεων, μειώνεται το πλήθος των απαιτούμενων πειραματικών μετρήσεων και άρα το κόστος μιας ανάλογης μελέτης.

Η εφαρμογή του μοντέλου στο Όσλο έδειξε πως τα θεϊκά και αμμωνιακά ιόντα που αποτελούν την κύρια μάζα του ανόργανου κλάσματος των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα αστικών περιοχών λόγω του μεγέθους τους παραμένουν στο αναπνευστικό σύστημα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα απ' ότι για παράδειγμα τα ιόντα ασβεστίου που μεταφέρονται ταχύτερα στο αίμα. Τα σωματίδια ενώσεων άνθρακα καθιζάνουν κυρίως στην κυψελιδική περιοχή των πνευμόνων και παραμένουν σε μεγάλο ποσοστό στο αναπνευστικό σύστημα για μεγάλες χρονικές περιόδους μετά την έκθεση. Ένα μεγάλο μέρος τους απομακρύνεται στο αίμα και στη

συνέχεια στα υπόλοιπα όργανα του σώματος ενώ ένα άλλο τμήμα μεταφέρεται στο γαστρεντερικό σύστημα.

Σε μια υπαίθρια περιοχή η συγκέντρωση των σωματιδίων εξαρτάται από τις μετεωρολογικές συνθήκες που έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση των εκπομπών σωματιδίων από τη φύση και την άφιξη ρυπαντικών ανέμων στην περιοχή. Τα σωματίδια αποτελούνται κυρίως από εδαφικό υλικό και είναι μεγάλα σε μέγεθος. Κατά την περίοδο μελέτης στη Φοινοκαλιά επικρατούσαν ισχυροί άνεμοι και έτσι η συγκέντρωση πρωτογενών σωματιδίων ήταν υψηλή. Σε πιο ήπιες μετεωρολογικές συνθήκες η συγκέντρωση πρωτογενών σωματιδίων θα είναι μικρότερη και άρα και η δόση τους. Βέβαια το ποσοστό της μάζας αυτών των σωματιδίων που συγκεντρώνεται στην εκτός θώρακα περιοχή και μεταφέρεται γρήγορα εκτός του αναπνευστικού συστήματος και του σώματος είναι πολύ υψηλό άρα τα σωματίδια αυτά δεν θεωρούνται το ίδιο επικίνδυνα με τα σωματίδια αντίστοιχης σύστασης σε μια αστική περιοχή .

Συνοψίζοντας, στην εργασία εξετάστηκαν τα 4 από τα 5 αλυσιδωτά γεγονότα που οδηγούν στις επιπτώσεις της σωματιδιακής ρύπανσης στην υγεία (εικόνα 1). Βέβαια η εκπομπή των ρύπων και οι ατμοσφαιρικές τους συγκεντρώσεις εξετάστηκαν μόνο από την άποψη της ποσότητας και της σύστασης των σωματιδίων. Αναλύθηκε ωστόσο ο τρόπος καθορισμού δόσης και οι παράγοντες που την επηρεάζουν όπως και η συσσώρευση σωματιδίων σε 3 συστήματα του ανθρώπινου οργανισμού, αναπνευστικό, γαστρεντερικό και κυκλοφοριακό. Φυσικά, η τύχη των σωματιδίων αφού περάσουν στο γαστρεντερικό σύστημα και μεταφερθούν στο αίμα δεν αποτελεί αντικείμενο της εργασίας. Ωστόσο, τα αποτελέσματα της εργασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση για την κατανόηση των παραπάνω μηχανισμών και την προέκταση της με στόχο την ολοκλήρωση των βημάτων μιας μελέτης προσωπικής έκθεσης-δόσης-απόκρισης.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Abt, E., Suh, H., Catalano, P. and Koutrakis, P.: 2000, 'Relative Contribution of Outdoor and Indoor Particle Sources to Indoor Concentrations', *Environ. Sci. Technol.* **34**, 3579 - 3587.

Aitken, P., Baldwin, P., Beaumont, G., Kenny, L., Maynard, A. : 1999, 'Aerosol inhalability in low air movement environments', *J. Aerosol Sci.* **Vol. 30, No. 5**, 613 - 626.

Asgharian, B., Hofmann, W. and Bergmann, R.: 2001, 'Particle deposition in a multiple-path model of the human lung', *Aerosol Sci. and Technol.* **34**, 332 – 339.

Asgharian, B., Hofmann, W. and Miller, F. J.: 2001, 'Mucociliary clearance of insoluble particles from the tracheobronchial airways of the human lung', *J. Aerosol Sci.* **32**, 817 – 832.

Balashazy, I., Hofmann, W. and Lorine, M.: 1999, 'Relative contributions of individual deposition mechanisms to total aerosol deposition in human airways', *J. Aerosol Sci.* **30**, S729 – S730.

Bergmann, R. and Hofmann, W.: 1999, 'Incorporation of intrasubject variability in particle deposition into ICRP lung model predictions', *J. Aerosol Sci.* **30**, S715 – S716.

Bergmann, R., Hofmann, W. and Koblinger, L.: 1997, 'Particle deposition modelling in the human lung: Comparison between Monte Carlo and ICRP model predictions', *J. Aerosol Sci.* **28**, S433 – S434.

Bone, T., 'The New ICRP Respiratory Tract And Systemic Models' Westinghouse Savannah River Company Report WSRC-MM-2000-00097, August 2000.



Bree, L., Cassee, F., 'Toxicity of Ambient Air PM<sub>10</sub>' RIVM Report no. 650010 015, 2000.

Chang, I., Griffith, W., Shyr, L., Yeh, H., Cuddihy, G., Seiler, A. : 1991, 'Software for the draft NCRP respiratory tract dosimetry model', *Radiation Protection Dosimetry*, **Vol 38, No. 1/3**, 193 - 199.

Darquenne, C.: 2001, 'A realistic two-dimensional model of aerosol transport and deposition in the alveolar zone of the human lung', *J. Aerosol Sci.* **32**, 1161 – 1174.

Donaldson, K., Stone, V., Gilmour, P. S., Brown, D. M. and Macnee, W.: 2000, 'Ultrafine particles: mechanisms of lung injury', *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* **358**, 2741 – 2749.

EMEP: 2001, *EMEP manual for sampling and chemical analysis*, EMEP/CCC-Report 1/95.

EPA, 2002, 'Air Quality Criteria for Particulate Matter', Report EPA/600/P-99/002aC, 2002.

Fung, Y. C.: 1990, *Biomechanisms. Motion, Flow, Stress, and Growth*, Springer-Verlag Inc., New York, 569 pp.

Gehr, P., Geiser, M., Im Hof, V. and Schurch, S.: 2000, 'Surfactant-ultrafine particle interactions: what we can learn from PM<sub>10</sub> studies', *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* **358**, 2707 – 2718.

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.

Gradon, L., Pratsinis, E., Prodgorski, A., Scott, S. and Panda, S. : 1996, 'Modeling retention of inhaled particles in rat lungs including toxic and overloading effects', *J. Aerosol Sci.* **Vol. 27, No. 3**, 487 – 503.

Hashish, A. H., Fleming, J. S., Conway, J., Halson, P., Moore, E., Williams, T. J., Bailey, A. G., Nassim, M. and Holgate, S. T.: 1998, 'Lung deposition of particles by airway generation in healthy subjects: three-dimensional radionuclide imaging and numerical model predictions', *J. Aerosol Sci.* **Vol. 29**, **No. 1/2**, 205 – 215.

Hertel, O., De Leeuw, F., Raaschou-Nielsen, O., Jensen, S., Gee, D., Herbarth, O., Pryor, S., Palmgren, F., Olsen, E. : 2001. , 'Human exposure to outdoor air pollution', *Pure Appl. Chem.* **Vol 73**, **No. 6**, 933 - 958.

Hinds, W. C.: 1999, *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*, John Wiley & Sons, New York.

Hofmann, W., Asgharian, B. and Winkler-Heil, R.: 2002, 'Modeling intersubject variability of particle deposition in human lungs', *J. Aerosol Sci.* **33**, 219 – 235.

Hofmann, W. and Asgharian, B.: 2003, 'The effect of lung structure on mucosilliary clearance and particle retention in human and rat lungs', *Toxicological Sciences* **73**, 448 – 456.

Hollander AEM de, Melse JM, Lebret E, Kramers PGN.: 1999, 'An aggregate public health indicator to represent the impact of multiple environmental exposures', *Epidemiology* **10**, 606 - 17.

Hsieh, T., Yu, C.: 1998, 'Two-phase pulmonary clearance of insoluble particles in mammalian species', *Inhalation Toxicology*, 121 - 130.

International Commission on Radiological Protection (ICRP): 1994, 'Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection', ICRP Publication 66, *Annals of the ICRP* **24 (4)**, Pergamon, Oxford, 482 pp.

International Commission on Radiological Protection (ICRP): 2002, 'Guide for the Practical Application of the ICRP Human Respiratory Tract Model', *Annals of the ICRP* **32 (1-2)**, Pergamon, Oxford, 1 - 312.

Jarvis, N. S., Birchall, A., James, A. C., Bailey, M. R. and Dorrian, M-D.: 1996, *LUDEP 2.0: Personal Computer Program for Calculating Internal Doses Using the ICRP Publication 66 Respiratory Tract Model*, Chilton, UK. National Radiological Protection Board NRPB-SR287.

Kennedy, N. and Hinds, W.: 2002, 'Inhalability of large solid particles', *J. Aerosol Sci.* **33**, 237 – 255.

Kim, S. C. and Jaques, P. A.: 2000, 'Respiratory dose of inhaled ultrafine particles in healthy adults', *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* **358**, 2693 – 2705.

Kuempel, E. D., O'Flaherty, E. J., Stayner, L.T., Smith, R. J., Green, F. H. Y. and Vallyathan, V.: 2001, 'A biomathematical model of particle clearance and retention in the lungs of coal miners. I. Model development', *Regulatory Toxicology and Pharmacology* **34**, 69 – 87.

Laden, F., Neas, L., Schwartz, J. : 1999, 'The association of crystal particles in the fine particulate fraction with daily mortality in six cities', *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* **159**.

Lazaridis, M., Asimakopoulos, D., Branis, M., Colbeck, I., Drossinos, I., Dye, C., Eleftheriadis, K., Flocas, H., Helmis, C., Hollander, W., Housiadas, Hovorka, J., Kalogerakis N., Smolik, J., Stordal, F., Svendby, T., Zdimal, V.: 2001, 'Characterization of urban air quality indoor/outdoor particulate matter chemical characteristics and source-to-inhaled dose relationships (Urban-Aerosol)', *Abstracts of the European Aerosol Conference*.

Lee, P. S., Gerrity, T. R., Hass, F. J. and Lourenco, R. V.: 1979, 'A model for tracheobronchial clearance of inhaled particles in man and a comparison with data', *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* **Vol. 26, No. 11**, 624 – 630.

Liao, C., Ghen, J. and Huang, S.: 2003, 'Size-dependent PM<sub>10</sub> indoor/outdoor/personal relationships for a wind-induced naturally ventilated airspace', *Atmos. Envir.* **37**, 3065 – 3075.

M. Abd El Hady, Hofmann, W. and Bergmann, R.: 1997, 'The effect of intersubject variability in lung morphometry on particle deposition', *J. Aerosol Sci.* **28**, S623 – S624.

Mage, T.: 2001, 'A procedure for use in estimating human exposure to particulate matter of ambient origin', *J. Air & Waste Manage. Assoc.* **51**, 7 – 10.

McMurry, P. : 2000, 'A review of atmospheric aerosol measurements', *Atmospheric Environment* **34**, 1959 - 1999.

Mihalopoulos, N., Stephanou, E., Kanakidou, M., Pilitsidis, S., Bosquet, P. : 1997, 'Tropospheric aerosol ionic composition in the Eastern Mediterranean region', *Tellus* **49B**, 314 - 326.

Morawska, L., Thomas, S., Jamriska, M. and Johnson, G.: 1999, 'The modality of particle size distributions of environmental aerosols', *Atmos. Envir.* **33**, 4401 – 4411.

Moskal, A. and Gradon, L.: 2002, 'Temporary and spatial deposition of aerosol particles in the upper human airways during breathing cycle', *J. Aerosol Sci.* **33**, 1525 – 1539.

Oldham, M. J., Phalen, R. F. and Heistracher, T.: 2000, 'Computational fluid dynamic predictions and experimental results for particle deposition in an airway model', *Aerosol Sci. and Technol.* **32**, 61 – 71.

Phalen, R., Cuddihy, R., Fisher, G., Moss, O., Schelinger, R., Swift, D., Yeh, H. : 1991, 'Main features of the proposed NCRP respiratory tract model', *Radiation Protection Dosimetry* **38**, 179 - 184.

Pope, C., Hill, R., Villegas, G. : 1999, 'Particulate air pollution and daily mortality on Utah's Wasatch Front', *Environ. Health Perspect.* **107**, 567 – 573.

Reeks, M. W., Jones, A. and Drossinos, Y.: 2002, 'The ICRP model of the human respiratory tract: a brief summary relating to lung deposition', *Technical Note No.I.02.77*, European Commission, Joint Research Centre.

Robinson, R. J. and Yu, C. P.: 2001, 'Deposition of cigarette smoke particles in the human respiratory tract', *Aerosol Sci. and Technol.* **34**, 202 – 215.

Rombout, P., Bloemen, H., Bree, L., Buringh, E., Cassee, F., Fischer, P., Freijer, J., Kruize, H., Marra M., Opperhuizen, A., 'Health risks in relation to air quality, especially particulate matter', RIVM Report No 650010 020, 2000.

Salma, I., Balashazy, I., Winkler-Heil, R., Hofmann, W. and Zaray, G.: 2002, 'Effect of particle mass size distribution on the deposition of aerosols in the human respiratory tract', *J. Aerosol Sci.* **33**, 119 – 132.

Salvi, S., Holgate, T.: 1999, 'Mechanisms of particulate matter toxicity', *Clinical and Experimental Allergy* **29**, 1187 - 1194.

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.

Schwartz, J., Norris, G., Larson, T., Sheppard, L., Claiborne, C., Koenig, J. : 1999, 'Episodes of high coarse particle concentrations are not associated with increased mortality', *Environ. Health Perspect.* **107**, 339 - 342.

Schwela, D., Morawska, L., Kotzias, D.: 2002, 'Guidelines for concentration and exposure-response measurement of fine and ultra fine particulate matter for use in epidemiological studies', European Communities, World Health Organization (<http://whqlibdoc.who.int/hq/2002/a76621.pdf>).

Seinfeld, J.H. and Pandis, S.N.: 1998, *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, Wiley-Interscience, New York, 1326 pp.

Sexton, K. and Ryan, P. B.: 1988, 'Assessment of human exposure to air pollution: methods, measurements, and models', *Air Pollution, the Automobile, and Public Health*, National Academy Press, Washington DC, 704 pp.

Smith, M.H., Park, P.M. and Consterdine, I.E.: 1993, 'Marine aerosol concentration and estimated fluxes over seas', *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 809-824.

Smolik, J., Zdimal, V., Schwarz, J., Lazaridis, M., Havranek, V., Eleftheriadis, K., Mihalopoulos, N., Bryant, C. and Colbeck, I.: 2003, 'Size resolved mass concentration and elemental composition of atmospheric aerosols over the eastern Mediterranean area', *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* **3**, 2547 – 2573.

Stradling, N., Bailey, M. Birchall, A., Etherington, G., Hodgson, A., Fritsch, P., Poncy, J.-L., Newton, D., Kreyling, W., Ansoborlo, E., Guilmette, R. : 2000, 'Clearance of radioactivity deposited in the respiratory tract to blood: Progress in a multinational interspecies comparison project', *J. Rad. Nuc. Chem.*, **243**, 323 - 337.

Sturm, R. and Hofmann, W.: 2003, 'A multi-compartment model for bronchial clearance of insoluble particles in human lung', Abstracts of the European Aerosol Conference 2003, S389 – S390.

Tran, C., Jones, A., Cullen, R.: 1999 $\alpha$ , 'Mathematical modelling of the retention and clearance of low-toxicity particles in the lung', *Inhalation Toxicology* **11**, 1059 - 1076.

Tran, C., Jones, A., Cullen, R. : 1999 $\beta$ , 'Exploration of the mechanisms of retention and clearance of low-toxicity particles in the rat lung using a mathematical model' , *Inhalation Toxicology* **11**, 1077 - 1108.

Venkataraman, C. and Kao, A.: 1999, 'Comparison of particle lung doses from the fine and coarse fractions of urban PM-10 aerosols', *Inhalation Toxicology* **11**, 151 – 169.

Vincent, J. and Mark, D.: 1982, 'Application of Blunt sampler theory for the definition and measurement of inhalable dust', *Inhaled Particles V.*, Pergamon Press.

Weibel, E.:1963, *Morphometry of the human lung*, Academic Press.

Winter-Sorkina, R., Cassee, F., 'From concentration to dose: factors influencing airborne particulate matter deposition in humans and rats' RIVM Report no. 650010 031, 2002.

World Health Organization. The World Health Report 1999. Making a difference. Geneva: WHO, 2000.

Αϊβαζίδης, Α.: 1999, *Περιβαλλοντική Μικροβιολογία*, Πανεπιστημιακό σύγγραμμα, Ξάνθη.

Κουϊμτζή, Θ., Φυτιάνου, Κ. και Σαμαρά – Κωνσταντίνου, Κ.: 1998, *Χημεία Περιβάλλοντος*, University Studio Press, Θεσσαλονίκη, 376 pp.

Τραχανάς, Σ: 1995, *Διαφορικές εξισώσεις, Τόμος I: Συνήθεις διαφορικές εξισώσεις*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο, 533 pp.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στο πρώτο μέρος του παραρτήματος δίνεται το εγχειρίδιο χρήσης του μοντέλου AEROEXPDOSE και στη συνέχεια ηλεκτρονικά το εκτελέσιμο αρχείο και ενδεικτικά αρχεία εισόδου



# AEROEXPDOSE

**Computer Program for Calculating Lung Doses of  
Aerosol Particles in the Respiratory Tract**

**ABSTRACT**

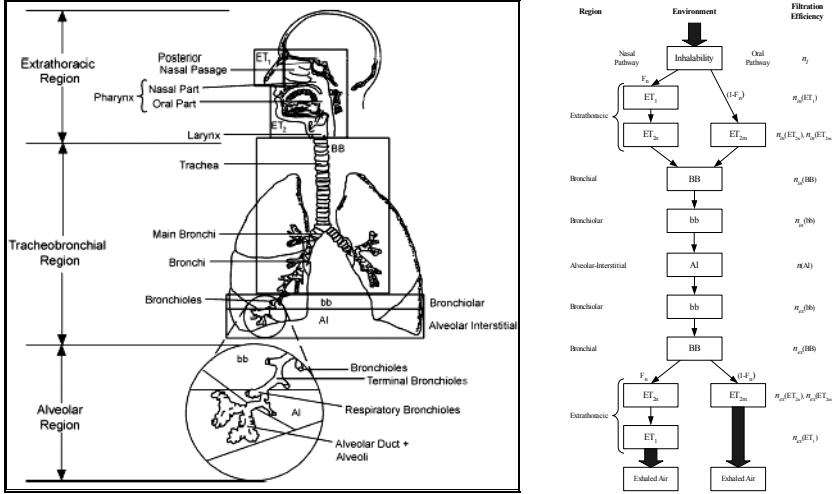
AEROEXPDOSE is a computer program for PCs to calculate respiratory tract doses of aerosol particles. The program estimates deposition, clearance and finally retention of particles in the respiratory tract at specific times after exposure. It is based on the human respiratory tract model of the International Commission on Radiological protection (ICRP Publication 66). For the time, the model has been tested on a computer running Microsoft Windows XP, with a 2.60 GHz processor and 512MB RAM. Dose calculations require few seconds but retention results for 9 days take about half an hour to be completed. Though a fast computer is recommended is not necessarily required for running the program but it should be noted that a simulation might take a long time. The available hard disk space must be enough to store the output files. A retention results output file for 14 days (maximum duration to print continuous retention results) is about 4MB.

**TABLE OF CONTENTS**

1. Overview .....	4
2. How to use AEROEXPDOSE .....	8
3. Example Calculations .....	16
3.1.Example 1: Calculate dose and retention in the respiratory tract for variable exposure (data on hourly basis) .....	16
3.2.Example 2: Calculate initial dose and retention in the respiratory tract for variable exposure (data on daily basis).....	18
3.3.Example 3: Calculate deposition and retention in the respiratory tract for constant exposure for a monodisperse or polydisperse aerosol .....	19
3.4.Example 4: Calculate deposition fractions and retention of particles for multiple AMADs (to create plots of deposition or retention vs. particle diameter).....	20

## 1. OVERVIEW

This software calculates the deposition and clearance of monodisperse and polydisperse aerosols in the respiratory tract of human adults for particles with diameters ranging from 0.001 microns to 100 microns. The methodology is based upon the empirical equations proposed in the ICRP human respiratory tract model (ICRP Publication 66). The respiratory tract is divided in five regions  $i$ , the extrathoracic airways  $ET_1$  (anterior nose) and  $ET_2$  (posterior nasal passages), the thoracic BB (bronchial) and bb (bronchiolar) and the alveolar-interstitial, AI.



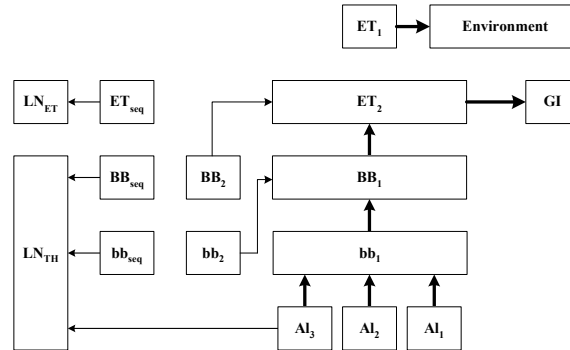
Within each region of the lung exposure is adjusted by the inhalability ratio and deposition is calculated using empirical functions. Deposition fractions for each region are calculated after accounting for the filtering effect of the preceding airways. Particle's size increase for hygroscopic material due to exposure to near-saturated surfaces is not accounted and deposition fraction is calculated with respect to the size entering the respiratory tract.

The user provides as input particle characteristics, the breathing scenario and breathing parameters and the geometry of the lung. The geometry of the human lung is considered only for the deposition fraction calculations.

Calculations may be done for monodisperse or polydisperse aerosols. For polydisperse aerosols the deposition results are calculated for a 500 diameter range from  $d_{ac}-4\sigma_g$  to  $100\mu m$  and for retention results in 10 steps with diameters ranging from  $d_{ac}-4\sigma_g$  to  $d_{ac}+4\sigma_g$ . Furthermore, the calculations may also be carried out for monodisperse aerosols lognormally or linear distributed with diameter sizes ranging from 0.001 to  $100\mu m$ , so that plots of deposition and retention vs. particle size may be obtained.

Doses are calculated for indoor and outdoor exposures which apply to different activity patterns. Ventilation rates for each activity are given as input. Simulation results for total and regional deposition are provided in textual formats and on screen. Dose results are given as a function of time, or as a function of particle diameter.

This version of the software includes calculations of particle clearance in the lung following deposition for soluble, readily absorbed into blood, and relatively insoluble and nontoxic solid particles. Particles deposited in the respiratory tract are cleared by three main routes; by absorption into blood, to the gastrointestinal tract via the pharynx and to lymph nodes via lymphatic channels. The material travels in the respiratory tract following the course in the picture below.



Each region of the respiratory tract is divided in a combination of compartments cleared with a different constant rate so that the overall clearance approximates the time-dependent clearance behaviour of the region. Clearance from ET<sub>1</sub> to Environment is not considered in the model because the material deposited there is removed by extrinsic means (nose blowing, wiping); a reference value for residence time is 1 d<sup>-1</sup> as proposed in the ICRP model. Particle residence times and clearance rates for mechanical transport are given for each compartment in the ICRP Publication 66 and are presented in the following table.

Clearance Rates				
Pathway	From	To	Rate (d <sup>-1</sup> )	Half-time
m <sub>1,4</sub>	Al <sub>1</sub>	bb <sub>1</sub>	0.02	35 d
m <sub>2,4</sub>	Al <sub>2</sub>	bb <sub>1</sub>	0.001	700 d
m <sub>3,4</sub>	Al <sub>3</sub>	bb <sub>1</sub>	0.0001	7000 d
m <sub>3,10</sub>	Al <sub>3</sub>	LN <sub>TH</sub>	0.00002	-
m <sub>4,7</sub>	bb <sub>1</sub>	BB <sub>1</sub>	2	8 h
m <sub>5,7</sub>	bb <sub>2</sub>	BB <sub>1</sub>	0.03	23 d
m <sub>6,10</sub>	bb <sub>seq</sub>	LN <sub>TH</sub>	0.01	70 d
m <sub>7,11</sub>	BB <sub>1</sub>	ET <sub>2</sub>	10	100 min
m <sub>8,11</sub>	BB <sub>2</sub>	ET <sub>2</sub>	0.03	23 d
m <sub>9,10</sub>	BB <sub>seq</sub>	LN <sub>TH</sub>	0.01	70 d
m <sub>11,14</sub>	ET <sub>2</sub>	GI tract	100	10 min
m <sub>12,13</sub>	ET <sub>seq</sub>	LN <sub>ET</sub>	0.001	700 d

The fraction of the initial deposit assigned to each compartment is given in the table below where  $f_s = 0.5$ , for  $d_{ae} \leq 2.5\sqrt{\rho/\chi}$  μm, and  $f_s = 0.5 \exp(-0.63(d_{ae}\sqrt{\chi/\rho} - 2.5))$ , for  $d_{ae} > 2.5\sqrt{\rho/\chi}$  μm.

Deposition site	Compartment	Fraction of deposit in region assigned to compartment
ET <sub>2</sub>	ET <sub>2</sub>	0.9995
	ET <sub>seq</sub>	0.0005
BB	BB <sub>1</sub>	0.993- $f_s$
	BB <sub>2</sub>	$f_s$
	BB <sub>seq</sub>	0.007
bb	bb <sub>1</sub>	0.993- $f_s$
	bb <sub>2</sub>	$f_s$
	bb <sub>seq</sub>	0.007
Al	Al <sub>1</sub>	0.3
	Al <sub>2</sub>	0.6
	Al <sub>3</sub>	0.1

Absorption into blood is assumed to occur at the same rate in the regions considered. Dissolution of particles and uptake into blood following deposition can occur with variable rates dependent on the aerosol physical and chemical characteristics. Though, absorption behavior of particles has been classified in three main categories; fast, moderate and slow for particles that take days, weeks or years to dissociate and enter the veins. Particles dissolution rates used in the model are according to the ICRP classification for fast and slow cleared particles and are presented in the following table.

ICRP Publication 30 Classification:	D(days)	Y (years)
Type of absorption behavior:	<i>F (fast)</i>	<i>S (slow)</i>
Fraction dissolved rapidly, $f_r$	1	0.001
Approximate dissolution rate:		
Rapid ( $d^{-1}$ ), $s_r$	100	100
Slow ( $d^{-1}$ ), $s_s$	-	0.0001

The model, as mentioned before, does not estimate clearance for particles exhibiting moderate absorption behavior. In addition retention for slow cleared particles is estimated with the assumption that all particles dissolve slowly and that the fraction of material readily absorbed is zero.

Retention in each region is given by the mass balance equation  $\frac{dR_i(t)}{dt} = -\lambda_i(t)R_i(t)$  where  $\lambda_i(t)$  is the instantaneous clearance rate of the deposit in compartment  $i$  and  $R_i(t)$  the retained mass after time  $t$ . The rate is the sum of mechanical movement and absorption into blood rates  $\lambda_i(t) = m_i(t) + s_i(t)$ . Transport equations for particles are solved numerically per minute<sup>1</sup> (matrix method) to determine retention.

The relationship between target tissues and clearance components is given in the following table. Retention results are assigned to the source components.

Target	Source component	Equivalent clearance components
ET <sub>1</sub>	Surface deposit	14
ET <sub>2</sub>	Surface fluid (ET <sub>2_sur</sub> )	11 + 11 <sub>T</sub>
	Particles in airway wall (ET <sub>seq</sub> )	12 + 12 <sub>T</sub>
	Bound material	ET <sub>b</sub>
LN <sub>ET</sub>	All transformations	13 + 13 <sub>T</sub> + LN <sub>ETb</sub>
BB	Mucous gel (BB <sub>gel</sub> )	7 + 7 <sub>T</sub>
	Mucous sol (BB <sub>sol</sub> )	8 + 8 <sub>T</sub>
	Particles in airway wall (BB <sub>seq</sub> )	9 + 9 <sub>T</sub>
	Bound material	BB <sub>b</sub>
	Alveolar interstitium	1 + 2 + 3 + 1 <sub>T</sub> + 2 <sub>T</sub> + 3 <sub>T</sub> + AI <sub>b</sub>
bb	Mucous gel (bb <sub>seq</sub> )	4 + 4 <sub>T</sub>
	Mucous sol (bb <sub>sol</sub> )	5 + 5 <sub>T</sub>
	Particles in airway wall (bb <sub>seq</sub> )	6 + 6 <sub>T</sub>
	Bound material	bb <sub>b</sub>
	Alveolar interstitium	1 + 2 + 3 + 1 <sub>T</sub> + 2 <sub>T</sub> + 3 <sub>T</sub> + AI <sub>b</sub>
AI	All transformations (in AI and LN <sub>TH</sub> as Total_AI)	1 + 2 + 3 + 1 <sub>T</sub> + 2 <sub>T</sub> + 3 <sub>T</sub> + AI <sub>b</sub> + 10 + 10 <sub>T</sub> + LN <sub>THb</sub>
LN <sub>TH</sub>	All transformations	10 + 10 <sub>T</sub> + LN <sub>THb</sub>

<sup>1</sup> Calculations with another timestep have been also tested. Solving the system for every breath gives almost the same results for retention but expends more time and computer resources. Results variation for timesteps greater than 1 min (checked for 5 and 10 minutes) is relatively large.

The results stand for retention and are available in two types: the retained mass in the tracheobronchial, alveolar-interstitial regions, lymph nodes and mass to the gastrointestinal system during exposure and post-exposure times, and the relative retention in the above regions for exposure and post-exposure times. Though final retention can be estimated for any duration, note that continuous retention results can be stored in output files only for 14 days for the nonce.

The exposure scenario may be constant or variable. For the variable scenario, the user may specify different breathing patterns either on an hourly basis during the day or activity patterns on daily basis. Two different activity patterns are employed in each simulation for variable exposure with available data on hourly basis; in case of outdoor exposure the subject is supposed to be always under “light exercise” – the ventilation rate equals to  $1.5\text{m}^3/\text{h}$  or breathing with the ventilation rate provided in *depdat.txt* and in case of indoor exposure the following schedule is assumed: “light exercise” from 7 am to 5 pm, “sitting” from 5 pm to 11 pm and “sleep” from 11 pm to 7 am – ventilation rates equals to  $1.5\text{m}^3/\text{h}$ ,  $0.54\text{m}^3/\text{h}$  and  $0.45\text{m}^3/\text{h}$  respectively.

The four examples provided with this help manual enable the user to begin to successfully interact with the software. Though the reader is referred to ICRP (1994) for a detailed description of the model and various parameters used therein a brief description of the model is given below.

## 2. HOW TO USE AEROEXPDOSE

The model AEROEXPDOSE has been designed to be interactive. That means that the user is prompted to enter the required data for a simulation. In the following table all the possible questions to the user are presented along with the allowed answers.

– **CALCULATE DOSE FOR VARIABLE EXPOSURE, (DATA ON HOURLY BASIS eg.OSLO)? (Y/N)**

Answer by hitting 'Y' or 'y' if you agree or 'N' or 'n' if not. If you type anything else by mistake the program will prompt you to answer the question again.

– **EXPOSURE DURATION (HOW MANY DAYS OF AVAILABLE DATA IN INPUT FILE)? or GIVE EXPOSURE DURATION (IN DAYS):**

Give exposure duration in days to calculate the dose and retention in each region as a number of type real (eg. for 8 hours type 0.3 or for 29 hours type 1.20833). Be careful to type a number here, a character will cause the program to terminate unexpectedly.

– **GIVE TIME AFTER INITIAL INTAKE TO CALCULATE THE RETENTION IN EACH REGION(IN DAYS):**

Give the time after initial intake in days to calculate the retention in each region as a number of type real (eg. for 8 hours type 0.3 or for 29 hours type 1.20833). Time after initial intake contains the exposure time, so it can be greater or equal to it. Be careful to type a number here, a character will cause the program to terminate unexpectedly.

– **EXPERIMENTAL DATA ON MASS (BERNER DATA)? (Y/N)**

Answer by hitting 'Y' or 'y' if you agree or 'N' or 'n' if not. If you type anything else by mistake the program will prompt you to answer the question again.

– **GIVE CONCENTRATION OF FINE PARTICLES:**

Give concentration of fine particles in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  as a number of types real. Be careful to type a number here, a character will cause the program to terminate unexpectedly.

– **GIVE CONCENTRATION OF COARSE PARTICLES:**

Give concentration of coarse particles in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  as a number of type real. Be careful to type a number here, a character will cause the program to terminate unexpectedly.

– **CONTINUE WITH CLEARANCE? (Y/N)**

Answer by hitting 'Y' or 'y' if you want to continue with estimate and storing continuous retention results in the output files agree or 'N' or 'n' if not. If you type anything else by mistake the program will prompt you to answer the question again.



– **GIVE PARTICLE ABSORPTION BEHAVIOR CLASS(F/S):**

Answer by hitting 'F' or 'f' for particles that are readily absorbed into blood or 'S' or 's' for insoluble particles. If you type anything else by mistake the program will prompt you to answer the question again.

– **MULTIPLE MMADs?(Y/N)**

Answer by hitting 'Y' or 'y' if you want to calculate the fractional deposition and retention in each region of the respiratory tract for a range of particle sizes or 'N' or 'n' if not. If you type anything else by mistake the program will prompt you to answer the question again.

– **GIVE DIAMETER OF PARTICLES IN  $\mu\text{m}$**

Particle diameters can range from 0.0001 to 100 $\mu\text{m}$ . For values out of this range you are prompt to answer the question again. Be careful to type a number here, a character will cause the program to terminate unexpectedly.

– **GIVE 1 FOR MONODISPERSE AND 2 FOR POLYDISPERSE AEROSOLS:**

Answer by hitting 1 or 2. If you type another number by mistake the program will prompt you to answer the question again but be careful to type only numbers here; a character will cause the program to terminate unexpectedly.

– **GIVE CONCENTRATION ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ): (OPTIONAL: ELSE WRITE 0.0)**

Concentration in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  is a real type number and can be given optionally, if available, in case of calculating the lung dose per breath of a monodisperse or polydisperse aerosol. By typing 0.0 or any literal character the program converts deposition fractions in each region to dose, assuming unit aerosol concentration (values are multiplied by 100), for later use in retention calculations.

– **GIVE MIN DIAMETER:**

The minimum particle diameter for calculations for a range of particle sizes can range from 0.0001 to 100 $\mu\text{m}$ . For values out of this range you are prompt to answer the question again. Be careful to type a number here, a character will cause the program to terminate unexpectedly.

– **GIVE MAX DIAMETER:**

The maximum particle diameter for calculations for a range of particle sizes can range from 0.0001 to 100 $\mu\text{m}$ . For values out of this range you are prompt to answer the question again. Be careful to type a number with a value greater than the min diameter, a character or a smaller value will cause the program to terminate unexpectedly.

– **GIVE NUMBER OF MMADs:**

Give the number of steps to calculate the intermediate diameters in calculations for a range of diameter values. The value must be integer and greater than 0 and less than 1,000. For real values or

out of this range you are prompt to answer the question again. Though be careful to type a number here, a character will cause the program to terminate unexpectedly.

– **LOGARITHMIC (1) OR LINEAR (2) SPACED?**

Specify whether the intermediate diameters are calculated using a series of logarithmic or linear steps.

– **GIVE FRACTION BREATHED THROUGH NOSE:**

Fraction breathed through nose can range from 0 to 1. If you press enter without typing anything the program will wait until you type a number in the accepted range. Be careful to type a number here, a character will cause the program to terminate unexpectedly.

– **GIVE PARTICLE DENSITY:**

Particle density is a real type number. If you press enter without typing anything the program will wait until you type a number in the accepted range. Be careful to type a number here, a character will cause the program to terminate unexpectedly.

– **GIVE PARTICLE SHAPE FACTOR:**

Shape factor is a real type number and can range from 0 to 2. If you press enter without typing anything the program will wait until you type a number in the accepted range. Be careful to type a number here, a character will cause the program to terminate unexpectedly.

– **GIVE AIR VELOCITY:**

Air velocity is a real type number. If you press enter without typing anything the program will wait until you type a number in the accepted range. Be careful to type a number here, a character will cause the program to terminate unexpectedly.

– **GIVE INFILE NAME (BERNER DATA):**

The infiles are described in section 3.1. Just be careful to type the name of a valid file with a filename of accepted length.

– **GIVE INPUT FILE (EXPOSURE DATA):**

The infiles are described in section 3.1. Just be careful to type the name of a valid file with a filename of accepted length.

– **PLEASE CHECK IF N1 IS ACCEPTED. ACCEPT N1? (Y/N), and GIVE NEW N1:**

The program will prompt you to accept the estimated cutoff point (N1) for fine mode particles by drawing an ASCII character graph. The proposed N1 may be wrong so check the available data and press 'Y' or 'y' or 'N' or 'n' (if you type anything else by mistake the program will understand no as the answer). Be careful to type a number here, a character will cause the program to terminate unexpectedly.

## 2.1. Input Files

### 1. Physiological parameters

The file *depdat.txt* contains the parameters considering physiology and breathing pattern with the following order: FRC, VET, VBB, VBP, D0, D9, B, VT, V, D16, RF.

Sample input file:

```
3.301E+03 5.000E+01 4.875E+01 4.706E+01 1.650E+00 1.651E-01 1.500E+00 1.250E+03 8.333E+02 5.100E-02 20
```

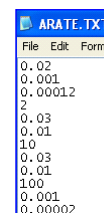
where:

- FRC = Functional residual capacity ( $\text{cm}^3$ )
- VET = Extrathoracic dead space ( $\text{cm}^3$ )
- VBB = Anatomical dead space of the trachea and bronchi ( $\text{cm}^3$ )
- VBP = Bronchiolar dead space ( $\text{cm}^3$ )
- D0 = Diameter of the trachea (mm)
- D9 = Diameter of the first bronchiolar airways (mm)
- B = Ventilation rate ( $\text{m}^3/\text{h}$ )
- VT = Tidal volume of exposed subject ( $\text{cm}^3$ )
- V = Volumetric flow rate of inspired air ( $\text{cm}^3/\text{sec}$ )
- D16 = Diameter of the first respiratory bronchiole (mm)
- RF = Respiratory frequency (breaths/min)

The input file is read as a free format file, but values must be in one line. The values read must be greater than zero but if such errors during typing occur the program returns the name of the parameter which value has been set wrong.

### 2. Clearance rates

Clearance rates (units  $\text{day}^{-1}$ ) for each pathway are provided to the model in an input file named '*Arate.txt*'. In the picture on the right side, this file containing the default parameters mentioned above (section Overview) is presented.



### 3. Mass distribution

When experimental data on mass distribution of the aerosol are available (in simulation of realistic exposure scenarios), two different types of input files are generally used to define the distribution. Aerosol mass is considered to be divided into 8 size bins. The boundary diameters of each bin are set according to the cut-off sizes of the collection instrument (e.g. Berner impactor used in Oslo measurement campaign). The first of the two files contains the boundary diameters for the size bins and must be named *Meancutoffs.txt*. A sample of this file is the following, containing the cut-off sizes for the impactor used in Oslo:

```
0.09 0.18 0.35 0.71 1.41 2.83 5.66 11.31
```

The input file is read as a free format file, but values must be in one line.

The second type of files is that containing the mass in each size bin. To avoid confusion it is recommended to be called with a name containing the word mass, for example *Kmass.txt* that contains the mass of potassium in each size bins and is the following:

KMass.txt							
0.01	0.011	0.01	0.005	0.006	0.008	0.007	0.005
0.005	0.017	0.011	0.010	0.015	0.006	0.005	0.005
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.005	0.012	0.012	0.005	0.005	0.007	0.01	0.005
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.005	0.057	0.01	0.012	0.006	0.012	0.129	0.007
0.011	0.006	0.011	0.009	0.018	0.023	0.014	0.016

In addition the length of the filename must be 12 characters at the most. Each line in the above file contains the mass for a different day; 9 in the example. The input file is read as a free format file, but values for each day must be in one line.

#### 4. Exposure file

The exposure file contains the data necessary to estimate the lung dose. Values for start date, start hour, end date and end hour of measurement are followed by concentration of fine particles indoors, concentration of coarse particles indoors, the analogue concentrations outdoors, wind velocity and ventilation rate. The preceding values are in units of  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  for the concentration, m/sec and  $\text{m}^3/\text{h}$  for the velocity and ventilation rate respectively. It is read in format (A9, A10, A10, A11, F11.2, 3F13.2, F10.2, F12.2)<sup>2</sup> and has the following form:

3/6/2002	0:00:00	3/6/2002	1:00:00	0.00	0.00	3.90	3.90	1.10	0.45
3/6/2002	1:00:00	3/6/2002	2:00:00	4.40	4.40	4.00	4.00	0.90	0.45
3/6/2002	2:00:00	3/6/2002	3:00:00	5.00	5.00	4.20	4.20	0.70	0.45
3/6/2002	3:00:00	3/6/2002	4:00:00	4.40	4.40	4.70	4.70	0.60	0.45
3/6/2002	4:00:00	3/6/2002	5:00:00	4.80	4.80	6.40	6.40	0.80	0.45
3/6/2002	5:00:00	3/6/2002	6:00:00	5.10	5.10	9.00	9.00	0.80	0.45
3/6/2002	6:00:00	3/6/2002	7:00:00	5.50	5.50	9.50	9.50	1.10	0.45
3/6/2002	7:00:00	3/6/2002	8:00:00	6.20	6.20	13.30	13.30	0.90	1.50

The length of the filename must be 16 characters at the most. It can contain data for more than 1 day. If an hourly value is missing then give it as 9999.99.

When average daily rather than hourly data on exposure conditions are available, as in the above example, such a file is created by writing the average value in the place of the hourly repeatedly. The parameters of exposure are presented to the model in a file which contains average daily conditions. The program reads data, in the units mentioned before, with the following order: date, concentration of fine particles indoors, concentration of fine particles outdoors, concentration of coarse particles indoors and outdoors and mean wind velocity, in format (A8, 5F8.4). A sample input file called *avK.txt* that contains data for potassium has the following form:

<sup>2</sup> Ax : word of x characters, xFy.z: x real values (floating point numbers) with field of length y and z the number of places after the demical point

AVK.TXT						
03/06/02	0.0	0.0	0.015	0.042	1.3417	
04/06/02	0.0	0.0	0.015	0.038	1.4875	
05/06/02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
06/05/02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
07/06/02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
08/06/02	0.0	0.0	0.034	0.015	1.1625	
09/06/02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
10/06/02	0.0	0.0	0.021	0.025	1.3125	

The length of the filename must be 15 characters at the most.

## 2.2. Output files

### 1. Deposition fraction files

The file given below is an output file (*Results.txt*) with deposition results for multiple AMADs with diameters ranging from 0.001 to 100  $\mu\text{m}$ . Diameter increase is linear and calculated for 10 steps.

Results.txt						
dac	ET1(%)	ET2(%)	BB(%)	bb(%)	AL(%)	Total(%)
0.1000E-02	0.3766E+02	0.3863E+02	0.8230E+01	0.1287E+02	0.8000E+00	0.9819E+02
0.3594E-02	0.1989E+02	0.2219E+02	0.6430E+01	0.2714E+02	0.1817E+02	0.9382E+02
0.1292E-01	0.6950E+01	0.7820E+01	0.2190E+01	0.1533E+02	0.5293E+02	0.8522E+02
0.4642E-01	0.3030E+01	0.3210E+01	0.9100E+00	0.6720E+01	0.3214E+02	0.4601E+02
0.1668E+00	0.1380E+01	0.1270E+01	0.3900E+00	0.2380E+01	0.1072E+02	0.1614E+02
0.5995E+00	0.7370E+01	0.7410E+01	0.4100E+00	0.8700E+00	0.7460E+01	0.2352E+02
0.2154E+01	0.2982E+02	0.4368E+02	0.2590E+01	0.1670E+01	0.1139E+02	0.8915E+02
0.7743E+01	0.4242E+02	0.4547E+02	0.1660E+01	0.3900E+00	0.3900E+00	0.9033E+02
0.2783E+02	0.2751E+02	0.2772E+02	0.8000E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.5531E+02
0.1000E+03	0.2507E+02	0.2509E+02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.5016E+02

A part of an output file with deposition fractions in each size bin (the default value is 500 bins) of a polydisperse aerosol (*polydisp.txt*) is given in the following picture. DP is the mean diameter and P the fraction of particles in each size bin.

polydisp.txt								
DP	P	ET1	ET2	BB	bb1	AL	DTOT	
0.1011	0.0062	1.7800	1.7800	0.5500	3.5900	16.6200	24.3200	
0.3015	0.0341	2.2300	1.7800	0.2800	1.4700	7.0300	12.7900	
0.5019	0.0556	5.4400	5.1000	0.3200	0.9900	6.8100	18.6600	
0.7023	0.0649	9.5100	10.2000	0.5300	0.7900	8.3100	29.3400	
0.9027	0.0667	13.6900	16.3000	0.8400	0.8000	9.9400	41.5700	
1.1031	0.0645	17.5200	22.6200	1.1900	0.9200	11.2400	53.4900	
1.3035	0.0605	20.8000	28.5200	1.5300	1.1000	12.0700	64.0200	
1.5039	0.0557	23.5200	33.6000	1.8600	1.2700	12.4400	72.6900	
1.7043	0.0508	25.7900	37.7100	2.1300	1.4400	12.4200	79.4900	
1.9047	0.0461	27.7300	40.8700	2.3700	1.5600	12.0900	84.6200	
2.1051	0.0417	29.4300	43.2100	2.5500	1.6500	11.5500	88.3900	
2.3055	0.0377	30.9600	44.8900	2.7000	1.7100	10.8700	91.1300	

### 2. Dose Results Files

#### a. Continuous daily dose files

The picture given below is a part of the output file *ResultsDose.txt* containing hourly dose rate data in  $\mu\text{g/h}$ .

ResultsDose.txt					
STARTDATE	STARTHOUR	ENDDATE	ENDHOUR	ET1_DOSEFI	ET2_DOSEFI
3/6/2002	0:00:00	3/6/2002	1:00:00	0.0000E+00	0.0000E+00
3/6/2002	1:00:00	3/6/2002	2:00:00	0.1930E-01	0.1844E-01
3/6/2002	2:00:00	3/6/2002	3:00:00	0.2194E-01	0.2096E-01
3/6/2002	3:00:00	3/6/2002	4:00:00	0.1930E-01	0.1844E-01
3/6/2002	4:00:00	3/6/2002	5:00:00	0.2106E-01	0.2012E-01
3/6/2002	5:00:00	3/6/2002	6:00:00	0.2238E-01	0.2138E-01
3/6/2002	6:00:00	3/6/2002	7:00:00	0.2413E-01	0.2306E-01
3/6/2002	7:00:00	3/6/2002	8:00:00	0.1503E+00	0.1523E+00
3/6/2002	8:00:00	3/6/2002	9:00:00	0.4171E+00	0.4226E+00

Values are stored in that file in the following order: STARTDATE, STARTHOUR, ENDDATE, ENDHOUR, ET1\_DOSEFI, ET2\_DOSEFI, BB\_DOSEFI, BBI\_DOSEFI, AL\_DOSEFI, TOTAL\_DOSEFI, ET1\_DOSECI, ET2\_DOSECI, BB\_DOSECI, BBI\_DOSECI, AL\_DOSECI, TOTAL\_DOSECI, ET1\_DOSEI, ET2\_DOSEI, BB\_DOSEI, BBI\_DOSEI, AL\_DOSEI, TOTAL\_DOSEI, ET1\_DOSEFO, ET2\_DOSEFO, BB\_DOSEFO, BBI\_DOSEFO, AL\_DOSEFO, TOTAL\_DOSEFO, ET1\_DOSECO, ET2\_DOSECO, BB\_DOSECO, BBI\_DOSECO, AL\_DOSECO, TOTAL\_DOSECO, ET1\_DOSEO, ET2\_DOSEO, BB\_DOSEO, BBI\_DOSEO, AL\_DOSEO, TOTAL\_DOSEO.

ET1\_DOSEFI corresponds to the dose rate of *Fine* particles in region *ET1* for *Indoor* exposure. C and O mean coarse particles dose rate and outdoor exposure respectively. When only I or O follow region name, the total particles dose rate is given in the column under the title for indoor and outdoor exposure respectively.

### b. Average daily dose file

The picture given below is a part of the output file *AverageResultsDose.txt* containing average daily dose data in  $\mu\text{g}$ .

STARTDATE	ENDDATE	ET1_DOSEFI	ET2_DOSEFI	BB_DOSEFI	BB1_DOSEFI	AL_DOSEFI	TOTAL_DOSEFI	ET1_DOSECI
3/6/2002	4/6/2002	0.2089E+01	0.2062E+01	0.5137E+00	0.2793E+01	0.1058E+02	0.1804E+02	0.2317E+02
4/6/2002	5/6/2002	0.1895E+01	0.1747E+01	0.5347E+00	0.2958E+01	0.1095E+02	0.1806E+02	0.1333E+02
5/6/2002	6/6/2002	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
6/6/2002	7/6/2002	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
7/6/2002	8/6/2002	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
8/6/2002	9/6/2002	0.1875E+01	0.1887E+01	0.5035E+00	0.2791E+01	0.1043E+02	0.1748E+02	0.1976E+02
9/6/2002	10/6/2002	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
10/6/2002	11/6/2002	0.9080E+00	0.8478E+00	0.2875E+00	0.1627E+01	0.5921E+01	0.9592E+01	0.1394E+02
11/6/2002	12/6/2002	0.1586E+01	0.1518E+01	0.4387E+00	0.2439E+01	0.9067E+01	0.1505E+02	0.1486E+02

Values are stored in the order mentioned above but titles include the word mean (e.g. MEANET1\_DOSEI) for total particles dose.

### c. Sum continuous dose file

The picture given below is a part of the output *DailySumDose.txt* containing the cumulative daily dose in  $\mu\text{g}$ .

STARTDATE	ENDDATE	DAILYET1_DOSEFI	DAILYET2_DOSEFI	DAILYBB_DOSEFI	DAILYBB1_DOSEFI	DAILYAL_DOSEFI	DAILYTOTAL_DOSEFI	DAILYET1_DOSECI
3/6/2002	4/6/2002	0.3063E+01	0.3083E+01	0.5178E+00	0.2750E+01	0.1245E+02	0.2187E+02	0.5227E+02
4/6/2002	5/6/2002	0.2275E+01	0.2091E+01	0.4765E+00	0.2668E+01	0.1125E+02	0.1876E+02	0.1818E+02
5/6/2002	6/6/2002	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
6/6/2002	7/6/2002	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
7/6/2002	8/6/2002	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
8/6/2002	9/6/2002	0.2394E+01	0.2450E+01	0.4755E+00	0.2610E+01	0.1133E+02	0.1926E+02	0.2516E+02
9/6/2002	10/6/2002	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
10/6/2002	11/6/2002	0.8500E+00	0.7898E+00	0.2314E+00	0.1323E+01	0.5142E+01	0.8336E+01	0.1328E+02
11/6/2002	12/6/2002	0.2231E+01	0.2151E+01	0.4262E+00	0.2378E+01	0.1052E+02	0.1770E+02	0.2096E+02

Values are stored in the order mentioned above but titles include the word daily (e.g. DAILYET1\_DOSEI).

## 3. Retention Results files

### a. Retention files

The retention results for indoor and outdoor exposure are stored separately for fine and coarse mode particles. Two files containing the retained mass of total particles for the two different exposure scenarios are created as well. A sample file is given in the picture below where column's titles are the target tissues in the clearance model (see table in section 1.2).

DAY	ET1_rur	ET1_req	BB_gsl	BB_col	BB_req	bb_gsl	bb_col	bb_req	Al	Total_Al	L9b	L9c
0.694E-03	0.8039E+00	0.4309E-03	0.6058E-01	0.6141E-01	0.8590E-03	0.3167E+00	0.3117E+00	0.4502E-02	0.2172E+01	0.2172E+01	0.2005E-07	0.2140E-09
0.1393E-02	0.1554E+01	0.1617E-03	0.1211E+00	0.1211E+00	0.1713E-02	0.6370E+00	0.6493E+00	0.9802E-02	0.6345E+01	0.6345E+01	0.1177E-06	0.9171E-09
0.1001E-02	0.2155E+01	0.1191E-02	0.1342E+00	0.1342E+00	0.2579E-02	0.9405E+00	0.9640E+00	0.1391E-01	0.9512E+01	0.9512E+01	0.3751E-06	0.2140E-08
0.1771E-02	0.2909E+01	0.1712E-02	0.2484E+00	0.2484E+00	0.3409E-02	0.1166E+01	0.1166E+01	0.1001E-01	0.1169E+02	0.1169E+02	0.4010E-06	0.2051E-08
0.2471E-02	0.3519E+01	0.2154E-02	0.3031E+00	0.3070E+00	0.4290E-02	0.1579E+01	0.1600E+01	0.2251E-01	0.1566E+02	0.1566E+02	0.6067E-06	0.4561E-08
0.4167E-02	0.4089E+01	0.2505E-02	0.3638E+00	0.3684E+00	0.5150E-02	0.1694E+01	0.1690E+01	0.2701E-01	0.1590E+02	0.1590E+02	0.8519E-06	0.6371E-08
0.4061E-02	0.4611E+01	0.3016E-02	0.4245E+00	0.4290E+00	0.6017E-02	0.2100E+01	0.2151E+01	0.3151E-01	0.2210E+02	0.2210E+02	0.1141E-05	0.9400E-08
0.5551E-02	0.5117E+01	0.3446E-02	0.4851E+00	0.4932E+00	0.6977E-02	0.2512E+01	0.2571E+01	0.3601E-01	0.2550E+02	0.2550E+02	0.1470E-05	0.2003E-07
0.6250E-02	0.5511E+01	0.3877E-02	0.5460E+00	0.5552E+00	0.7729E-02	0.2895E+01	0.2994E+01	0.4051E-01	0.2855E+02	0.2855E+02	0.1041E-05	0.1354E-07
0.6944E-02	0.6044E+01	0.4300E-02	0.6067E+00	0.6139E+00	0.8595E-02	0.3140E+01	0.3116E+01	0.4501E-01	0.3172E+02	0.3172E+02	0.2254E-05	0.1660E-07
0.7639E-02	0.6483E+01	0.4730E-02	0.6675E+00	0.6755E+00	0.9455E-02	0.3460E+01	0.3529E+01	0.4951E-01	0.3489E+02	0.3489E+02	0.2700E-05	0.1990E-07
0.8323E-02	0.6788E+01	0.5169E-02	0.7283E+00	0.7362E+00	0.1031E-01	0.3771E+01	0.3850E+01	0.5401E-01	0.3806E+02	0.3806E+02	0.3204E-05	0.2351E-07
0.9021E-02	0.7140E+01	0.5600E-02	0.7891E+00	0.7980E+00	0.1117E-01	0.4003E+01	0.4103E+01	0.5951E-01	0.4123E+02	0.4123E+02	0.3762E-05	0.2742E-07

### b. Relative retention results file

Relative retention is estimated only in simulation of a scenario with constant exposure to a monodisperse or polydisperse single mode aerosol. The form of the file is exactly like the above.

#### 4. Other output files

##### a. TestFn.txt

Simulation of exposure to a monodisperse aerosol returns another output file called ‘*testfn.txt*’ where results for deposition fractions under different breathing scenarios (fraction breathed through nose) are stored. A sample of this file is given in the following picture.

testfn.txt							
f <sub>n</sub>	ET1	ET2	BB	bbi	AL	DTOT	
0.0000	0.0000	0.7600	1.2700	1.0700	13.4500	16.5500	
0.0100	0.0000	0.9800	1.2700	1.0700	13.4300	16.7500	
0.0200	0.0200	0.9500	1.2800	1.0700	13.4400	16.7600	
0.0300	0.0200	0.9300	1.2700	1.0600	13.4400	16.7200	
0.0400	0.0400	0.9200	1.2700	1.0700	13.4300	16.7300	
0.0500	0.0600	0.9200	1.2700	1.0600	13.4400	16.7500	
0.0600	0.0900	0.9200	1.2700	1.0700	13.4400	16.7900	
0.0700	0.1100	0.9300	1.2800	1.0600	13.4300	16.8100	
0.0800	0.1400	0.9300	1.2700	1.0800	13.4300	16.8500	
0.0900	0.1800	0.9500	1.2700	1.0600	13.4200	16.8800	
0.1000	0.2200	0.9800	1.2800	1.0700	13.4200	16.9700	

##### b. Checkdaeforclear.txt

This file stores results on retained mass for multiple AMADs after a specified exposure time.

DAR	ET1_req	ET2_req	BB_req1	BB_req1	BB_req2	bb_req1	bb_req1	bb_req2	Al	Total_Al	LMch	LMch
0.1000E-02	0.6752E+04	0.2704E+03	0.1366E+05	0.5630E+05	0.8215E+03	0.3949E+05	0.3112E+05	0.1131E+04	0.1144E+05	0.1144E+05	0.1061E+02	0.1351E+00
0.1112E-02	0.6714E+04	0.2704E+03	0.1476E+05	0.5944E+05	0.8405E+03	0.4447E+05	0.1028E+06	0.1453E+04	0.1651E+05	0.1651E+05	0.1151E+02	0.1351E+00
0.1224E-02	0.6671E+04	0.2690E+03	0.1579E+05	0.6015E+05	0.8505E+03	0.4911E+05	0.1139E+06	0.1605E+04	0.2139E+05	0.2139E+05	0.1232E+02	0.1316E+00
0.1341E-02	0.6621E+04	0.2659E+03	0.1663E+05	0.6040E+05	0.8545E+03	0.5341E+05	0.1234E+06	0.1745E+04	0.2594E+05	0.2594E+05	0.1306E+02	0.1241E+00
0.1593E-02	0.6567E+04	0.2401E+03	0.1741E+05	0.6040E+05	0.8545E+03	0.5736E+05	0.1325E+06	0.1874E+04	0.2732E+05	0.2732E+05	0.1371E+02	0.1246E+00
0.1705E-02	0.6447E+04	0.2351E+03	0.1871E+05	0.5979E+05	0.8455E+03	0.6411E+05	0.1461E+06	0.2056E+04	0.5540E+05	0.5540E+05	0.1460E+02	0.1191E+00
0.2005E-02	0.6370E+04	0.2184E+03	0.1916E+05	0.5911E+05	0.8375E+03	0.6766E+05	0.1553E+06	0.2186E+04	0.6602E+05	0.6602E+05	0.1527E+02	0.1150E+00
0.2257E-02	0.6145E+04	0.2140E+03	0.2033E+05	0.5731E+05	0.8104E+03	0.7364E+05	0.1699E+06	0.2401E+04	0.9631E+05	0.9631E+05	0.1620E+02	0.1073E+00
0.2535E-02	0.6009E+04	0.2022E+03	0.2091E+05	0.5515E+05	0.7813E+03	0.7761E+05	0.1790E+06	0.2531E+04	0.1215E+06	0.1215E+06	0.1672E+02	0.1011E+00
0.2844E-02	0.5796E+04	0.1882E+03	0.2130E+05	0.5146E+05	0.7411E+03	0.8087E+05	0.1865E+06	0.2638E+04	0.1636E+06	0.1636E+06	0.1710E+02	0.9400E-01
0.3195E-02	0.5494E+04	0.1773E+03	0.2130E+05	0.4901E+05	0.6921E+03	0.8311E+05	0.1913E+06	0.2705E+04	0.2113E+06	0.2113E+06	0.1744E+02	0.8671E-01
0.3594E-02	0.5200E+04	0.1659E+03	0.2113E+05	0.4561E+05	0.6445E+03	0.8373E+05	0.1925E+06	0.2712E+04	0.2600E+06	0.2600E+06	0.1714E+02	0.7991E-01

Sample runs are given in the tutorial examples below along with graphical representation of the results.

### 3. EXAMPLE CALCULATIONS

#### 3.1. Example 1: Calculate dose and retention in the respiratory tract for variable exposure (data on hourly basis)

The example calculates the individual's dose and clearance for the exposure conditions measured in Oslo for total particles.

```

THE PROGRAM CALCULATES THE DEPOSITION AND CLEARANCE
OF AEROSOL PARTICLES IN THE HUMAN RESPIRATORY TRACT.

CALCULATE DEPOSITION FOR VARIABLE EXPOSURE
<CONTINUOUS DAILY DATA eg.OSLO>? <Y/N>
Y

EXPOSURE DURATION <HOW MANY DAYS OF AVAILABLE DATA IN
INPUT FILE>?
9

GIVE TIME AFTER INITIAL INTAKE TO CALCULATE THE
RETENTION IN EACH REGION<IN DAYS>:
9

GIVE FRACTION BREATHED THROUGH NOSE:
1.0

GIVE PARTICLE DENSITY:
1.5

GIVE PARTICLE SHAPE FACTOR:
1.5

GIVE INPUT FILE <EXPOSURE DATA>:
INPUTOSLO2.TXT

GIVE INFILE <BERNER DATA>:
MASS1.TXT

-----
DAY: 1

Mass distribution:

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

N1: 5
N2: 8

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

DAY: 2

Mass distribution:

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

N1: 7
N2: 8

PLEASE CHECK IF N1 IS ACCEPTED
ACCEPT N1? <Y/N>
N
GIVE NEW N1:
4
N1: 4

```

1. Create the necessary input files and run the program (*depdat.txt*, *Meancutoffs.txt*, *Mass1.txt*, *Inputoslo2.txt*).

2. Answer yes to the question 'Calculate dose for variable exposure (Data on hourly basis eg.Oslo)?'

3. Give 9 days for exposure duration and time after initial intake to calculate the retention in each region.

4. Type 1 for fraction breathed through nose. Particle density and shape factor (for spherical particles) are 1.5.

5. Give *inputoslo2.txt* as exposure data file and *mass1.txt* for mass distribution file. The files contain the results from Oslo measurement campaign.

6. The program will prompt you to accept the estimated cut-off point (N1) for fine mode particles by drawing the character graph. Answer yes for the first day and the program will continue to the next day. For day 2 as it can be seen at the bottom of the picture on the left N1 value is wrong so you are prompt for the right N1 which is 4. The N1 values are estimated right for this example.

7. Then the program will ask if you want to continue with clearance. If you answer no the simulation will stop with only dose results calculated. In this example you answer positively.

```

CONTINUE WITH CLEARANCE? <Y/N>
Y
GIVE PARTICLE ABSORPTION BEHAVIOR CLASS<F/S>:
F
DAY HOUR
1 1
1 2
1 3
1 4
1 5

```

8. When asked to choose the absorption behaviour of the aerosol particles type F.

9. The progress of the simulation can be seen by the day and hour, for which calculations are made, printed onscreen.

10. Retention results are printed onscreen and simulation ends as seen in the picture below:



```

*****
| MATERIAL RETAINED IN EACH REGION (ug) |
*****

FOR OUTDOOR EXPOSURE
-----
ET2_sur  0.177833306051212
ET_seq   1.837694902186250E-004
LNnet    1.905016593570953E-009
BB_gel   1.207874958887511E-002
BB_sol   8.272296664709682E-003
BB_seq   1.501582426293160E-004
BBI_gel  1.459193039419477E-002
BBI_sol  1.191814836830635E-002
BBI_seq  1.889440596943796E-004
AI        0.159246506072606
LNth     3.846973609667048E-008
GI Tract  169.593686402067
Blood    345.683367019348
Sum      515.661517270712
DOSE     515.661504657813

FOR INDOOR EXPOSURE
-----
ET2_sur  2.984246796441078E-002
ET_seq   3.086447054931650E-005
LNnet    3.225687335809505E-010
BB_gel   2.65561121953543E-003
BB_sol   1.907622942576178E-003
BB_seq   3.278391735186270E-005
BBI_gel  9.066438632186927E-003
BBI_sol  6.970383979710242E-003
BBI_seq  1.143399202789293E-004
AI        6.632732466333902E-002
LNth     1.661076678023469E-008
GI Tract  76.6542071922262
Blood    174.042168575097
Sum      250.813323561969
DOSE     250.813315994814

Hourly Daily Dose printed on RESULTSDOSE.txt
Continuous Daily Dose printed on DAILYSUMDOSE.txt
Average Daily Dose printed on AVERAGERESULTSDOSE.txt
Retention results for indoor and outdoor exposure
printed on RetentionMODE EXPOSURE.txt files

```

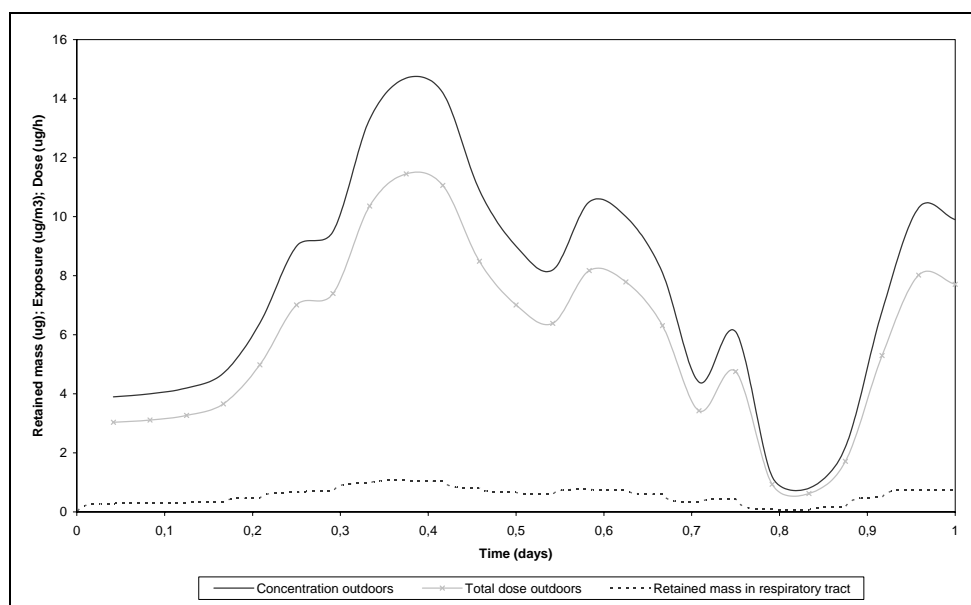
11. The estimated continuous, average daily and cumulative daily dose and retention for the exposure period are stored in the output files and simulation ends.

Samples of the output files for continuous dose (*RESULTSDOSE.txt*), average dose (*AVERAGERESULTSDOSE.txt*) and cumulative dose (*DAILYSUMDOSE.txt*) daily lung dose during the simulation period are the ones given in output files description (section 2.2). The 6 retention files created contain the continuous retention results for each mode and exposure and a sample for fine exposure outdoors is also given in section 2.2.

A comparison of continuous and average dose results for indoor and outdoor exposure is given in the following table.

Date	Continuous daily dose (µg)		Average daily dose (µg)	
	Indoors	Outdoors	Indoors	Outdoors
3/6/2002	106.4	146.2	83.92	146.2
4/6/2002	70.0	131.3	63.94	131.3
8/6/2002	88.15	213.3	75.19	213.3
10/6/2002	47.3	209.4	52.08	209.4
11/6/2002	76.12	108.5	59.88	108.5

The output files can be easily opened in a spreadsheet to create plots as the one in the picture below for 1 day results (3/6/2002 Oslo). The outdoor concentration and total particles dose rate are plotted as a function of time, and retention in ET<sub>2</sub>\_sur compartment of the respiratory tract. Retention corresponds to cumulative retained mass.



### 3.2. Example 2: Calculate initial dose and retention in the respiratory tract for variable exposure (data on daily basis)

```

THE PROGRAM CALCULATES THE DEPOSITION AND CLEARANCE
OF AEROSOL PARTICLES IN THE HUMAN RESPIRATORY TRACT.

CALCULATE DOSE FOR VARIABLE EXPOSURE (DATA ON HOURLY BASIS eg.OSLO)? (Y/N)
N
EXPERIMENTAL DATA ON MASS (BERNER DATA)? (Y/N)
Y
  CALCULATES AVERAGE DAILY DOSE
  ~~~~~
EXPOSURE DURATION (HOW MANY DAYS OF AVAILABLE DATA IN
INPUT FILE)?
2
GIVE TIME AFTER INITIAL INTAKE TO CALCULATE THE
RETENTION IN EACH REGION (IN DAYS):
2
GIVE INFILE NAME WITH AVERAGE DAILY DATA:
AVK.TXT
****THE EXPOSURE DATA INPUT FILE IS AV_INPUT.TXT****
GIVE FRACTION BREATHED THROUGH NOSE:
1
GIVE PARTICLE DENSITY:
1.5
GIVE PARTICLE SHAPE FACTOR:
1.5
GIVE INPUT FILE (EXPOSURE DATA):
AV_INPUT.TXT
GIVE INFILE (BERNER DATA):
KMASS.TXT
-----
DAY: 1
Mass distribution:

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

N1: 4
N2: 8

PLEASE CHECK IF N1 IS ACCEPTED
ACCEPT N1? (Y/N)
Y
-----
CONTINUE WITH CLEARANCE? (Y/N)
Y
GIVE PARTICLE ABSORPTION BEHAVIOR CLASS (F/S):
F
DAY HOUR
1 1
. .
. .
2 24
*-----*
| MATERIAL RETAINED IN EACH REGION (ug) |
*-----*

FOR OUTDOOR EXPOSURE
-----
ET2_sur 7.931053713505291E-004
ET_seq 8.192295299030981E-007
INet 8.498158788063041E-012
BB_gel 5.189343288608078E-005
BB_sol 3.708288723806849E-005
BB_seq 6.544370959920034E-007
BBI_gel 7.282179566330384E-005
BBI_sol 5.810065863656811E-005
BBI_seq 9.331990215025354E-007
AI 7.955188817855593E-004
LNth 1.806239161737958E-010
GI Tract 0.195569509835151
Blood 0.407106007234629
Sum 0.604486447152109
DOSE 0.604486446017638

FOR INDOOR EXPOSURE
-----
ET2_sur 0.000000000000000E+000
ET_seq 0.000000000000000E+000
INet 0.000000000000000E+000
BB_gel 0.000000000000000E+000
BB_sol 0.000000000000000E+000
BB_seq 0.000000000000000E+000
BBI_gel 0.000000000000000E+000
BBI_sol 0.000000000000000E+000
BBI_seq 0.000000000000000E+000
AI 0.000000000000000E+000
LNth 0.000000000000000E+000
GI Tract 0.000000000000000E+000
Blood 0.000000000000000E+000
Sum 0.000000000000000E+000
DOSE 0.000000000000000E+000

Hourly Daily Dose printed on RESULTSDOSE.txt
Continuous Daily Dose printed on DAILYSUMDOSE.txt
Average Daily Dose printed on AVERAGERESULTSDOSE.txt
Retention results for indoor and outdoor exposure printed on
RetentionMODE_EXPO

```

### 3.3. Example 3: Calculate deposition and retention in the respiratory tract for constant exposure for a monodisperse or polydisperse aerosol

```

THE PROGRAM CALCULATES THE DEPOSITION AND CLEARANCE
OF AEROSOL PARTICLES IN THE HUMAN RESPIRATORY TRACT.

CALCULATE DOSE FOR VARIABLE EXPOSURE (DATA ON HOURLY BASIS eg.OSLO)? (Y/N)
N

EXPERIMENTAL DATA ON MASS (BERNER DATA)? (Y/N)
N

Multiple MMADs?(Y/N)
N

GIVE FRACTION BREATHED THROUGH NOSE:
1

GIVE PARTICLE DENSITY:
1.5

GIVE PARTICLE SHAPE FACTOR:
1.5

GIVE AIR VELOCITY:
0.0

GIVE DIAMETER OF PARTICLES IN Hm
2

GIVE 1 FOR MONODISPERSE AND 2 FOR POLYDISPERSE AEROSOLS:
2

Give Sg
2.5

PERCENT DEPOSITED IN EACH REGION:
ET1: 27.53%
ET2: 35.03%
BB : 1.86%
bb : 1.18%
Al : 8.00%
TOTAL DEPOSITION: 73.61%

GIVE CONCENTRATION (ug/m3): (OPTIONAL:ELSE WRITE 0.0)
1

DOSE PER BREATH:
ET1 dose: 0.3442E-03 ug
ET2 dose: 0.4378E-03 ug
BB dose: 0.2330E-04 ug
bb dose: 0.1476E-04 ug
Al dose: 0.1000E-03 ug
TOTAL DOSE: 0.9201E-03 ug

CONTINUE WITH CLEARANCE? (Y/N)
Y

GIVE EXPOSURE DURATION (IN DAYS):
1

GIVE TIME AFTER INITIAL INTAKE TO CALCULATE THE
RETENTION IN EACH REGION (IN DAYS):
1

GIVE PARTICLE ABSORPTION BEHAVIOR CLASS (F/S):
F

MATERIAL IN SOURCE COMPONENTS AFTER 1.0 DAYS:

ET2 surface fluid: 0.1284E+00
Particles in airway wall: 0.6302E-02

LNet All Transformations: 0.3154E-05

BB Mucous gel: 0.6638E-01
Mucous sol: 0.2355E+00
Particles in airway wall: 0.4674E-02

bb Mucous gel: 0.1223E+00
Mucous sol: 0.1491E+00
Particles in airway wall: 0.2960E-02

Alveolar Interstitium: 0.2871E+01
LNth All Transformations: 0.4114E-04

GI Tract: 12.9993656797447
BLOOD : 0.000000000000000E+000

SUM: 16.5796126929548

Deposition Results for each bin print on polydisp.txt
Retention results print on RETENTION.txt
Relative Retention results print on RELATIVE_RETENTION.txt

```

### 3.4. Example 4: Calculate deposition fractions and retention of particles for multiple AMADs (to create plots of deposition or retention vs. particle diameter)

```

THE PROGRAM CALCULATES THE DEPOSITION AND CLEARANCE
OF AEROSOL PARTICLES IN THE HUMAN RESPIRATORY TRACT.

CALCULATE DOSE FOR VARIABLE EXPOSURE<DATA ON HOURLY BASIS eg.OSLO>? <Y/N>
N
EXPERIMENTAL DATA ON MASS <BERNER DATA>? <Y/N>
N
Multiple MMADs?<Y/N>
Y
GIVE FRACTION BREATHED THROUGH NOSE:
1
GIVE PARTICLE DENSITY:
1.5
GIVE PARTICLE SHAPE FACTOR:
1.5
GIVE AIR VELOCITY:
0.0
CONTINUE WITH CLEARANCE? <Y/N>
Y
GIVE EXPOSURE DURATION <IN DAYS>:
1
GIVE TIME AFTER INITIAL INTAKE TO CALCULATE THE
RETENTION IN EACH REGION<IN DAYS>:
1
GIVE PARTICLE ABSORPTION BEHAVIOR CLASS<F/S>:
F
GIVE MIN DIAMETER:
0.001
GIVE MAX DIAMETER:
100
GIVE NUMBER OF MMADs:
100
LOGARITHMIC <1> OR LINEAR <2> SPACED?
1
Deposition Results printed on RESULTS.txt
Final retention results for each diameter printed on CHECKCLEARFORDAE.txt

```

1. Create the necessary input files and run the program (*depdat.txt*)

2. Answer no to the question ‘Calculate dose for variable exposure (Data on hourly basis eg.Oslo)?’

3. Answer yes to the question ‘Multiple AMADs? (Y/N)’.

4. Type 1 for fraction breathed through nose. Particle density and shape factor (for spherical particles) are 1.5 and air velocity is 0.0 m/sec.

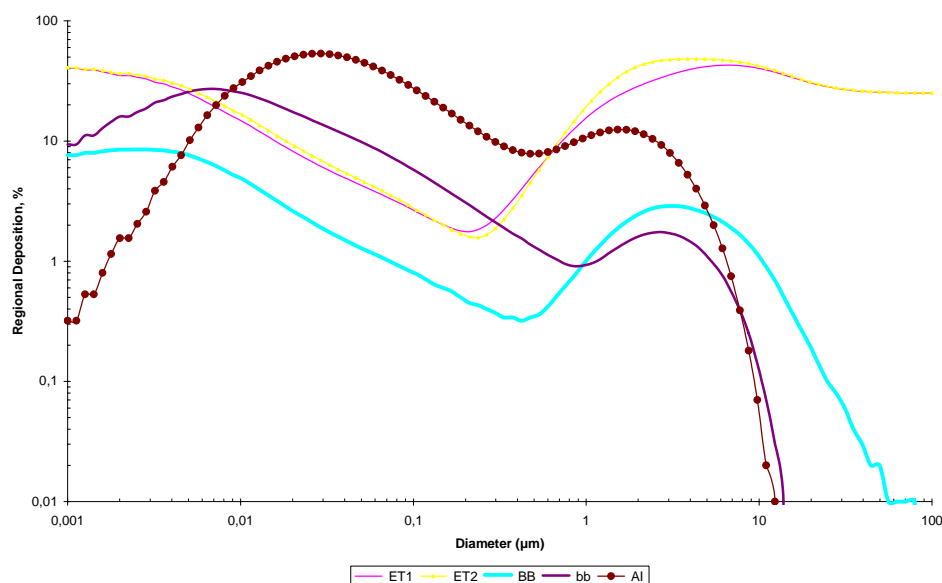
5. Answer yes to continue with clearance and

give F as particle absorption behaviour.

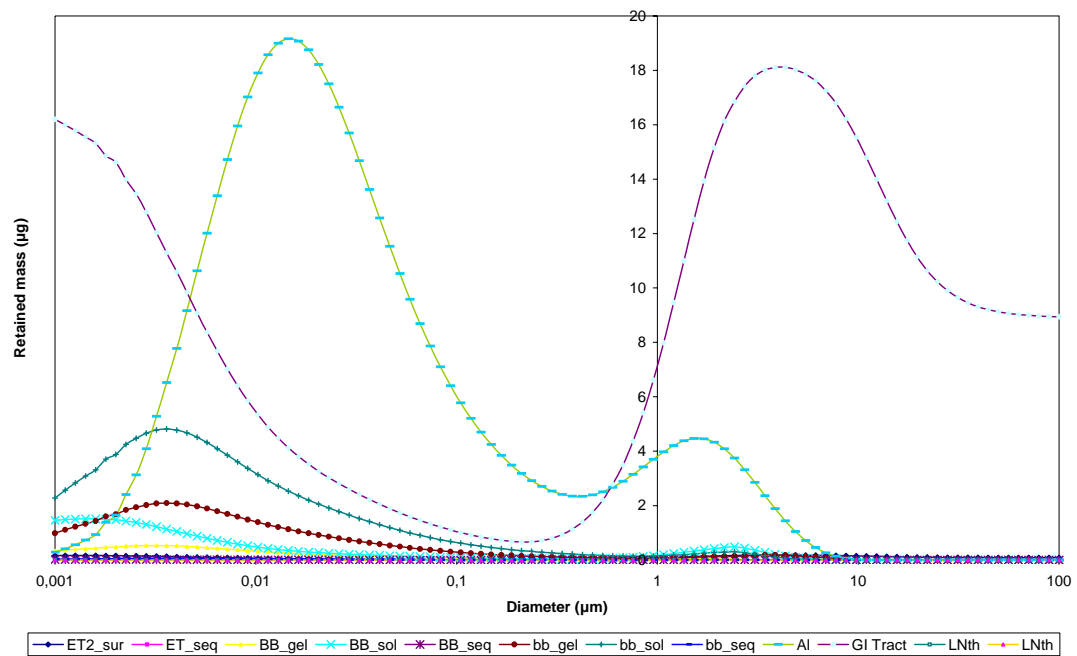
6. Give min and max diameters and number of intermediate steps as in the picture above and choose logarithmic increase by hitting 1.

7. The simulation will end in few seconds and the message for output files will be printed on screen.

Deposition and retention results for this example are shown in the pictures below.

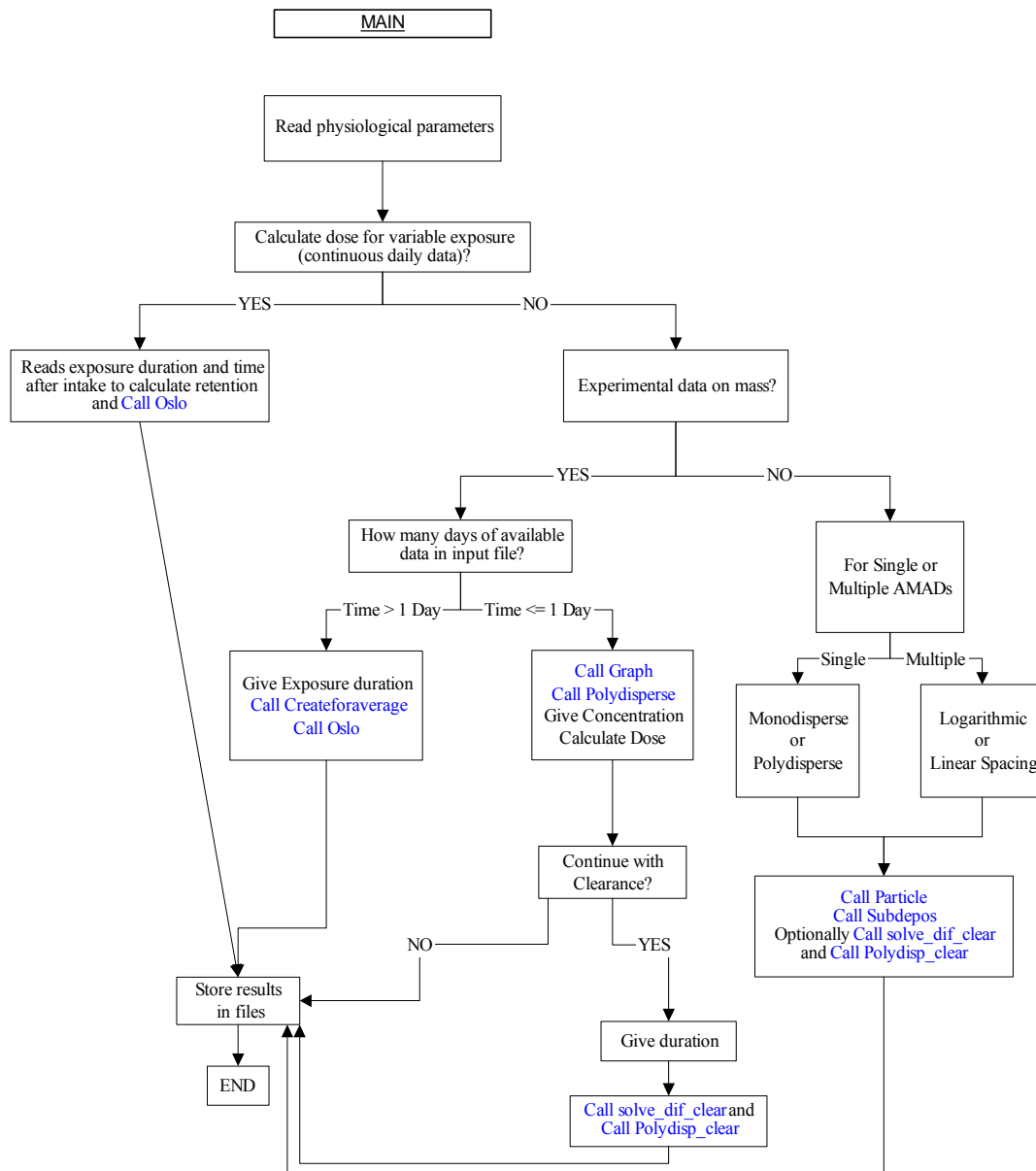


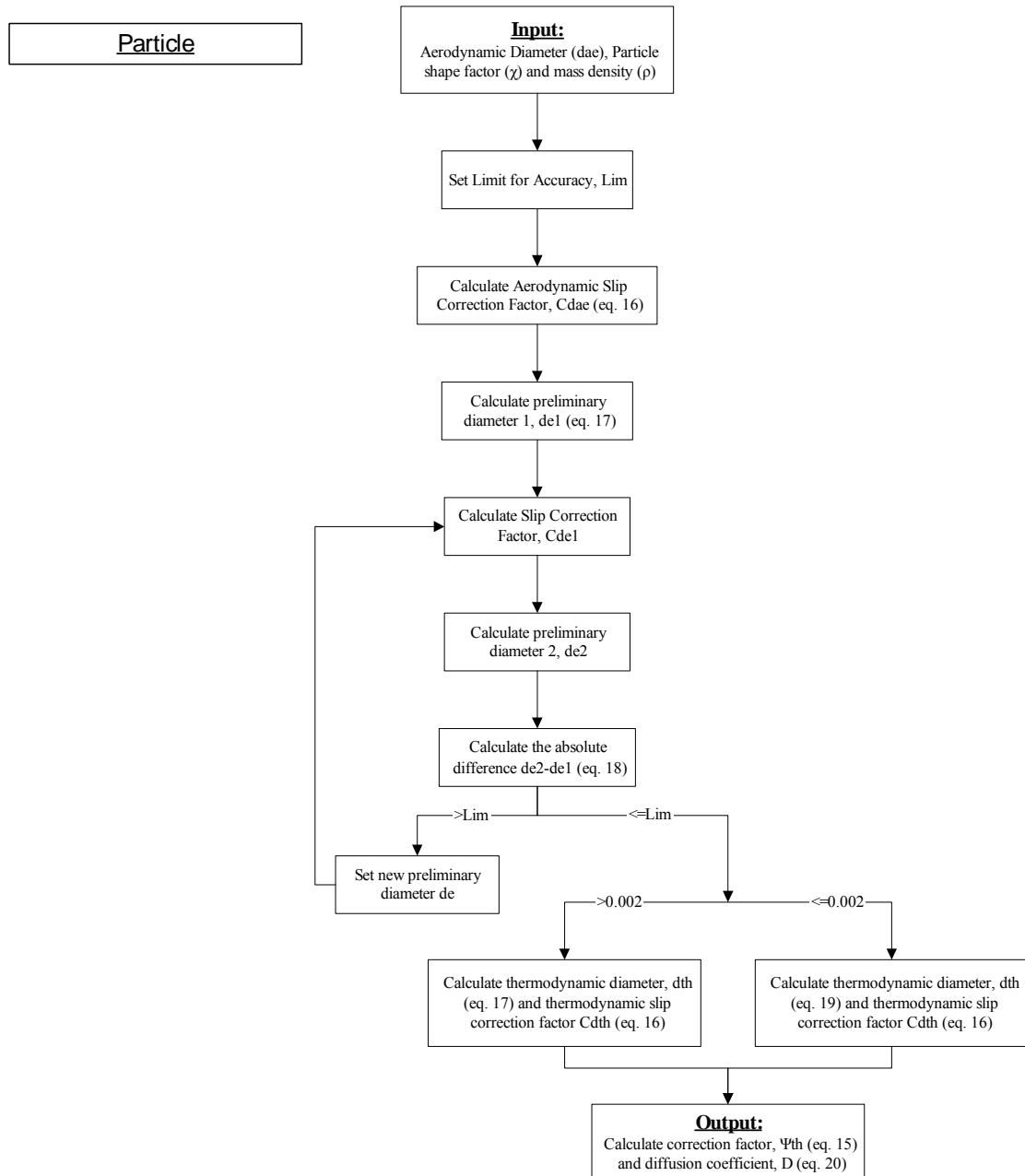
Retention in the following picture results from an individual's constant exposure to  $1\mu\text{g}/\text{m}^3$  of monodisperse aerosol particles with diameters ranging from 0.001 to  $100\mu\text{m}$ .



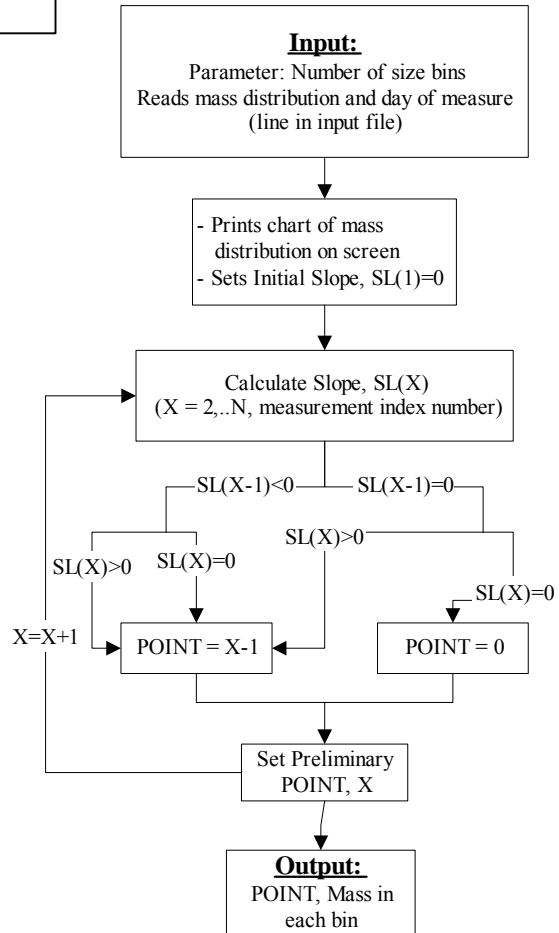
## APPENDIX

### Flow diagrams for model routines

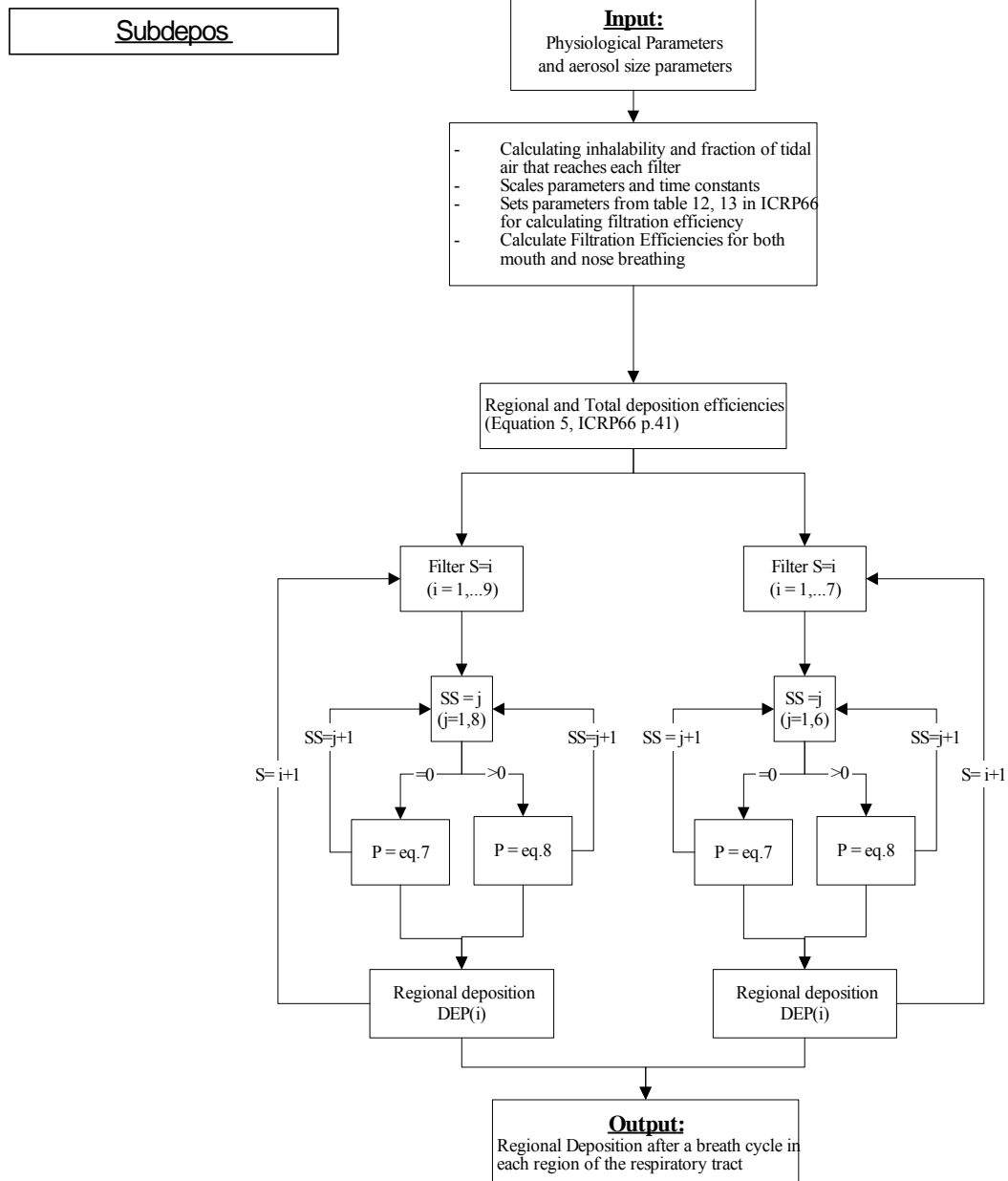




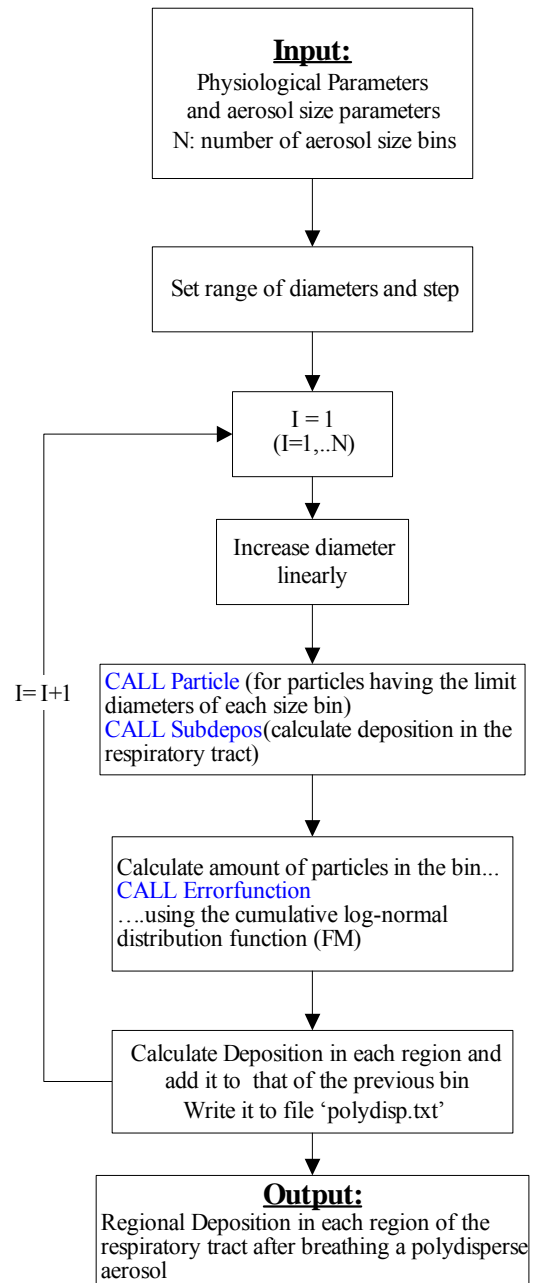
## Graph

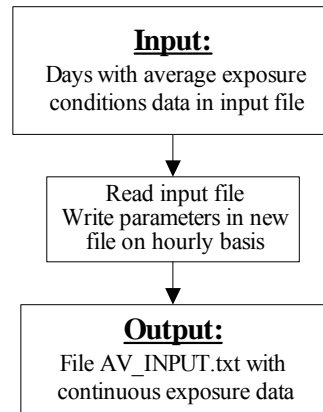
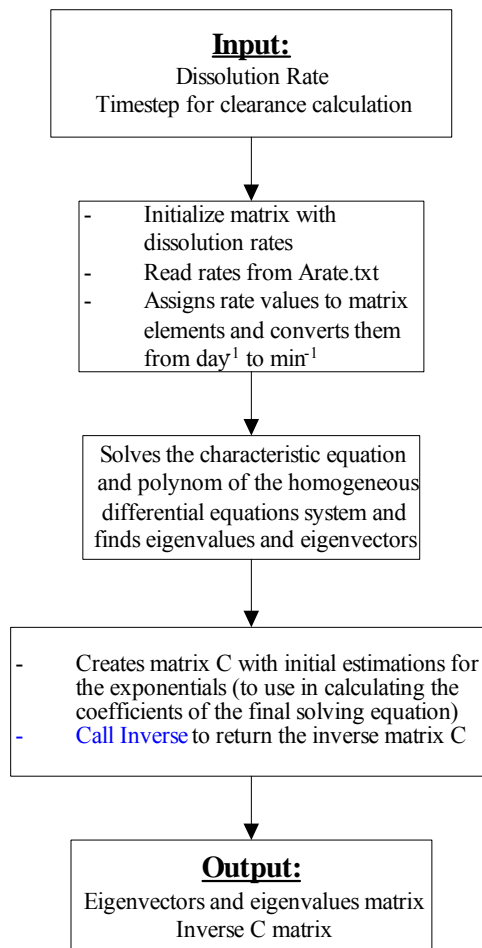


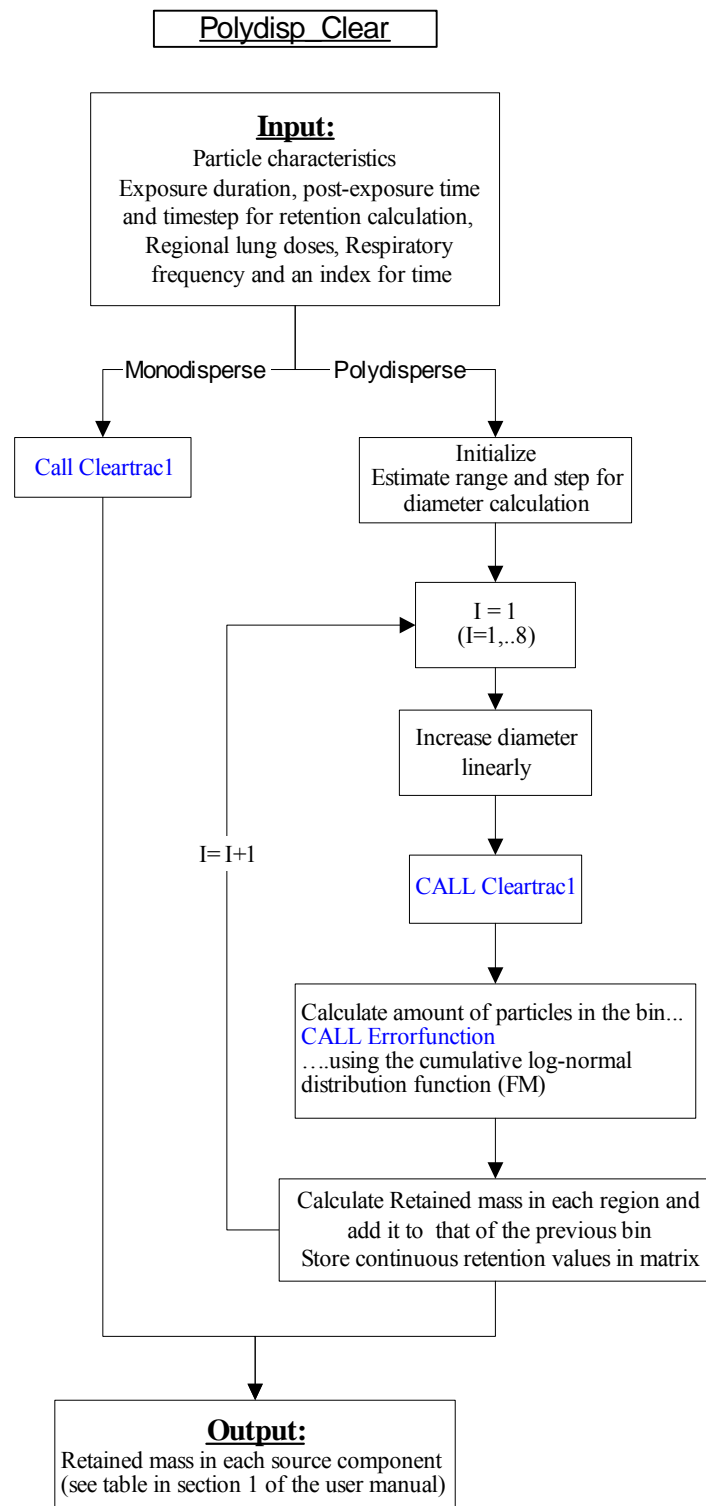


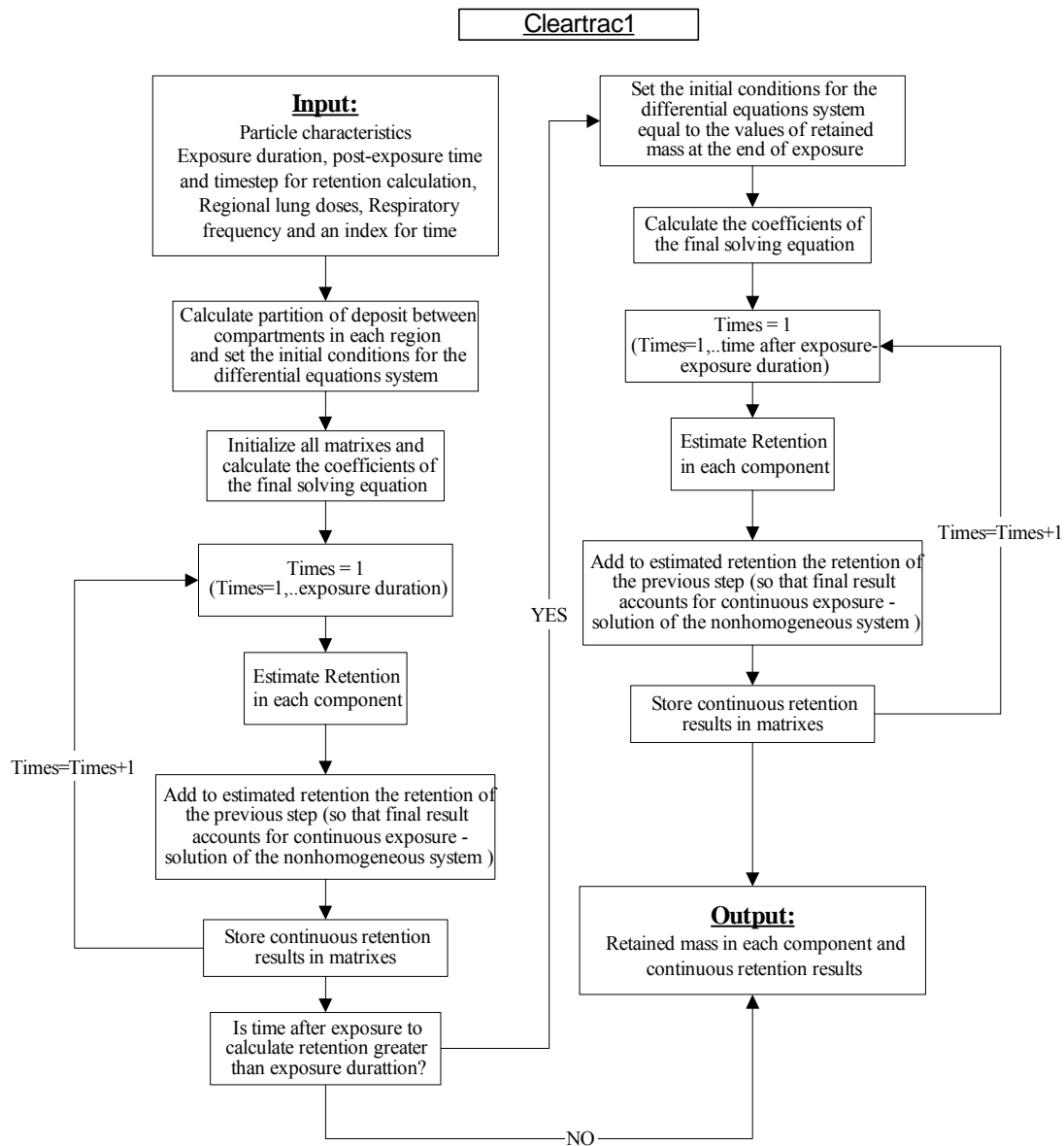


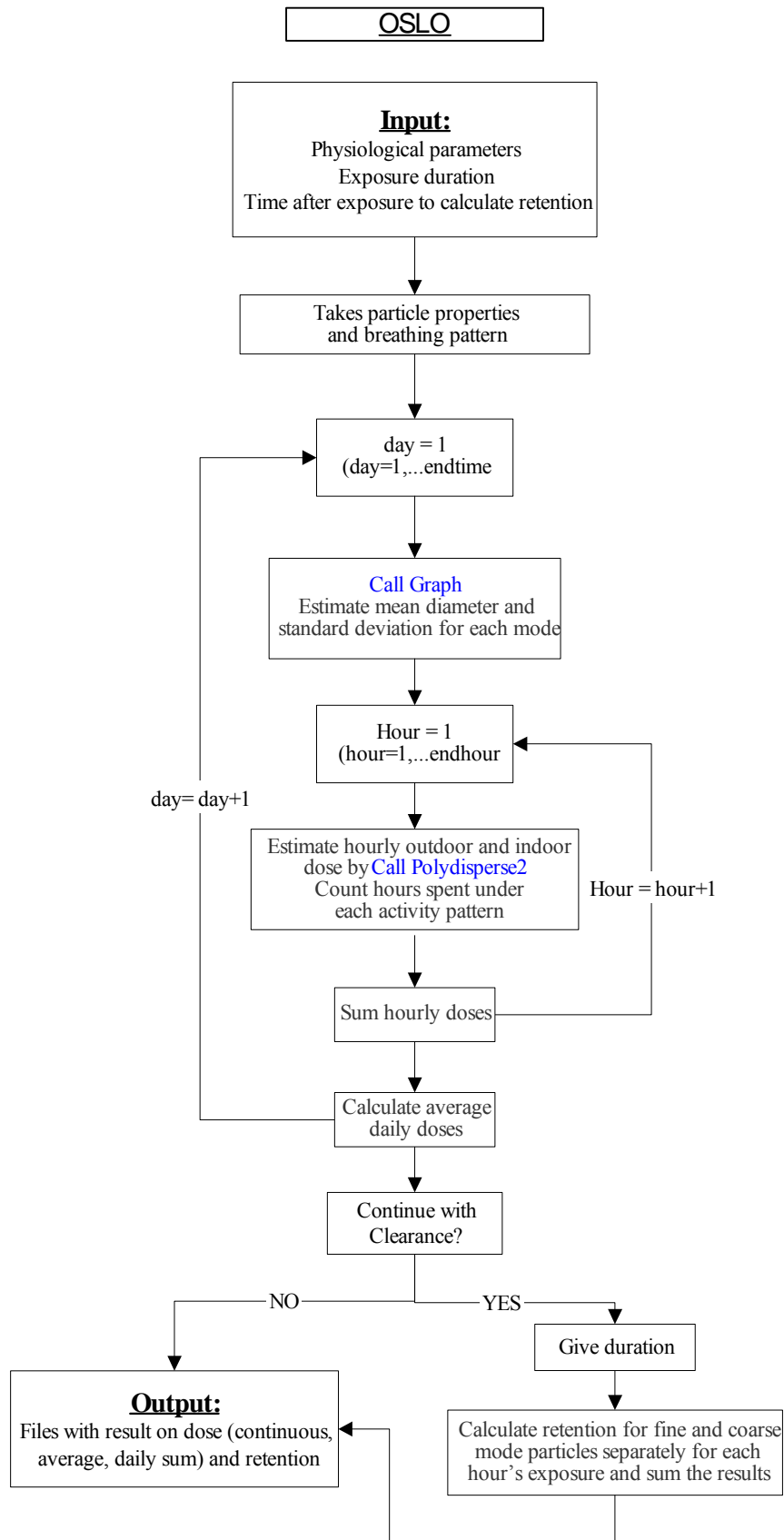
## Polydisperse



**CREATEFORAVERAGE****Solve\_dif\_clear**







**SOURCE CODE**

```

PROGRAM AEROEXPDOSE

C      MAIN

C      Computer program for calculating lung doses of aerosol particles in the
respiratory tract(RT)
C      This program calculates deposition, dose and retention of aerosol particles
C      in the human respiratory tract by region using the model recommended
C      in ICRP Publication 66
C
C      Input files:
C      ../depdat.txt  (physiological and morphological parameters of RT)
C
C      Optional
C      ../Arate.txt      (clearance rates in each region of RT)
C      ../mass.txt       (mass of particles in each size bin with diameters
C      defined by the cut-off sizes of the collecting instrument given in....
C      ../meancutoffs.txt (boundary diameter values of each size bin)
C      ../*.txt          (exposure file)
C
C      Output files:
C      -Deposition fraction files: ../Results.txt, ../polydisp.txt
C      -Dose results files: ../ResultsDose.txt, ../AverageResultsDose.txt,
C      ../DailySumDose.txt
C      -Retention Results files: ../Retention(mode)_(exposure).txt,
C      ../RelativeRetention.txt
C      -Other output files: ../TestFn.txt, ../CheckdaeforClear.txt
C
C      Created by:
C      Victoria Aleksandropoulou, Technical University of Crete, Department of
Environmental Engineering, 2003
C
C
C-----
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)

      INTEGER Disperse,Multi,space,known1,N1,N2,i,CLEAR,j,
$timeAA,ENDTIMEAA,CHOOSE,nofile,CLASS,RF,STEPPERDAY,HDAY,
$INDAYS,fj
      REAL*8 DTot,DAE,mind,maxd,ET1,ET2,BB,bbI,Al,dens,shape,u,dael,FN,
$FRC, VET, VBB, VBP, D0, D9, B, VT, V, D16,din,dax,Sg,TOTAL_DOSE,
$ET11,ET22,BBB,bbII,All,DTOTT,fifty1,fifty2,sigma1,AL_DOSE,Fli,
$sigma2,fraction,Conc1,Conc2,ET1_DOSE,ET2_DOSE,BB_DOSE,BBI_DOSE,
$VAR(11),ET1_DOSE1,ET2_DOSE1,BB_DOSE1,BBI_DOSE1,ET1_DOSE2,Sg1,
$ET2_DOSE2,BB_DOSE2,BBI_DOSE2,ET2_surF,ET_seqF,LNetF,
$BB_gelF,BB_solF,BB_seqF,BBI_gelF,BBI_solF,BBI_seqF,ALF,AL_TF,
$LNthF,ET2_surC,ET_seqC,LNetC,BB_gelC,BB_solC,BB_seqC,
$BBI_gelC,BBI_solC,BBI_seqC,ALC,AL_TC,LNthC,TIME,MTMAS(8),
$SUMTMAS,ENDTIME,EIGENVEC(15,15),EIGENVAL(15),INVC(15,15),
$S,RET(12,10080),RET1(12,10080),days,ENDDAY,laday,Al_dose1,Al_dose2
$,et2_seqc,et2_seqf,RETFINAL(12),RESTIME,BLOODF,BLOODC
      CHARACTER(1) X1,X2,IVAR(11),X3,X4,ACCEPTIT,X
      character infile*12

C-----Morphology
C      ET1:Extrathoracic Region 1 (Anterior nose)
C      ET2:Extrathoracic Region 2 (Posterior nasal passages,larynx and mouth)
C      BB:Bronchial Region (Trachea and bronchi, generations 0-8)
C      bb:Bronchiolar Region (Bronchioles and terminal bronchioles, generations 9-15)
C      Al:Alveolar-Interstitial Region (Respiratory bronchioles,alveolar ducts and
sacs
C      with their alveoli, and the interstitial connective tissue, generations 16 and
beyond
C
C-----Physiological Parameters
C      V:Volumetric flow rate of inspired air (mL/sec)
C      VN:Component of V inspired through nose
C      VT:Tidal volume of exposed subject (L)
C      FN:Fraction of total ventilatory airflow passing through the nose
C      B:Ventilation rate (m3/h)
C      FRC:Functional residual capacity (L)

```

```

C      VBB:Anatomical dead space of the trachea and bronchi (L)
C      VET:Extrathoracic dead space (L)
C      VBP:Bronchiolar dead space(L)
C      TB:Time constant for conduction of air through the trachea and bronchi(sec)
C      TP:Time constant for conduction of air through the bronchioles(sec)
C      TA:Time constant for residence of air in the alveolar-interstitial airways(sec)
C      D0:Diameter of the trachea
C      D9:Diameter of the first bronchiolar airways
C      D16:Diameter of the first respiratory bronchiole
C
C-----Inhalability and Regional Deposition
C      U:windspeed (if particle velocity?) in m/sec
C      I:Inhalability
C      N:number of filters
C      N0:Fraction of particles present in ambient air that is not inspired
C      F:Fraction of tidal air that reaches jth filter
C
C      Parameters below are from Tables 12,13 in ICRP66 p.45-46
C      PAE.:p for aerodynamic deposition
C      PTH.:p for thermodynamic deposition
C      AAE.:a for aerodynamic deposition
C      ATH.:a for thermodynamic deposition
C      RAE.:R for aerodynamic deposition
C      RTH.:R for thermodynamic deposition
C      NAE.:Deposition efficiency, n, for aerodynamic deposition
C      NTH.:Deposition efficiency, n, for thermodynamic deposition
C      ...N:Breathing through nose (Table 12)
C      ...M:Breathing through mouth (Table 13)
C      PSTH:Empirical correction factor to allow for enhancement of thermodynamic
C      deposition caused by nonlaminar flow ( $\psi_{th}$ )
C
C      NN:Filtration efficiency
C      DEP:Deposition efficiency in jth filter (%)
C      Dtot:Total deposition efficiency (%)
C
C-----Aerosol Parameters
C      DE:equivalent volume diameter ( $\mu m$ )
C      DAE:aerodynamic diameter ( $\mu m$ )
C      DTH:thermodynamic diameter ( $\mu m$ )
C      Shape:the dynamic shape factor ( $\chi$ )
C      Dens:Particle's density
C      m:dynamic viscosity of air (Poise)
C      Cd...:Slip corection factor
C      D:Diffusion coefficient (cm2/sec)
C
C-----Scaling Parameters for Different Subjects
C      SFT:The ratio of the diameter of the trachea (D0) in the reference adult
C      male to that in the subject
C      SFB:The ratio of the diameter of the first bronchiolar airways (D9) in the
C      reference adult male to that in the subject
C      SFA:The ratio of the diameter of first respiratory bronchiole (D16) in the
C      reference adult male to that in the subject
C-----
C-----)

      PRINT *
      PRINT *, 'THE PROGRAM CALCULATES THE DEPOSITION AND CLEARANCE'
      PRINT *, 'OF AEROSOL PARTICLES IN THE HUMAN RESPIRATORY TRACT.'
      PRINT *
      PRINT *

      DATA IVAR/'FRC', 'VET', 'VBB', 'VBP', 'D0', 'D9', 'B', 'VT', 'V',
      $'D16', 'RF'/
C      Input parameters

c      Reading physiological parameters
      open(unit=10,file='depdat.txt',status='old')
      READ(10,*) (VAR(I),I=1,11)

      FRC=VAR(1)
      VET=VAR(2)
      VBB=VAR(3)
      VBP=VAR(4)
      D0=VAR(5)
      D9=VAR(6)
      B=VAR(7)

```



```

VT=VAR(8)
V=VAR(9)
D16=VAR(10)
RF=VAR(11)

DO I=1,11
  IF (VAR(I).LE.0.0D0) THEN
    PRINT*, '***ERROR IN INPUT FILE DEPDAT.TXT***'
    WRITE(*,*) '***VARIABLE',IVAR(I),' IS ZERO OR NEGATIVE***'
    STOP
  END IF
END DO

c

X4=' '
DO WHILE ((X4.NE.'Y') .AND. (X4.NE.'N') .AND. (X4.NE.'y') .AND. (X
$4.NE.'n'))
  WRITE(*,*) 'CALCULATE DOSE FOR VARIABLE EXPOSURE','(DATA ON HO
$URLY BASIS eg.OSLO)? (Y/N)'
  read(*,'(A1)') X4
  CHOOSE=IACHAR(X4)
END DO

PRINT*

IF(CHOOSE.EQ.89 .OR. CHOOSE.EQ.121) THEN
  PRINT*, 'EXPOSURE DURATION (HOW MANY DAYS OF AVAILABLE DATA IN'
  PRINT*, 'INPUT FILE)?'
  READ(*,*) DAYS
  PRINT*
  PRINT*, 'GIVE TIME AFTER INITIAL INTAKE TO CALCULATE THE'
  PRINT*, 'RETENTION IN EACH REGION(IN DAYS):'
  READ(*,*) ENDDAY
  PRINT*
c
  OPEN(UNIT=600,FILE='FINALR.TXT')
c
  open(unit=15,file='outR.txt')

  CALL OSLO(ENDDAY,DAYS,FRC,VET,VBB,VBP,D0,D9,B,VT,V,D16)
  print*
  print*
  PRINT*, 'Hourly Daily Dose printed on RESULTSDOSE.txt'
  PRINT*, 'Continuous Daily Dose printed on DAILYSUMDOSE.txt'
  PRINT*, 'Average Daily Dose printed on AVERAGERESULTSDOSE.txt'
  print*, 'Retention results for indoor and outddor exposure'
  PRINT*, 'printed on RetentionMODE_EXPOSURE.txt files'

ELSE

X1=' '
DO WHILE ((X1.NE.'Y') .AND. (X1.NE.'N') .AND. (X1.NE.'y') .AND. (X
$1.NE.'n'))
  WRITE(*,*) 'EXPERIMENTAL DATA ON MASS (BERNER DATA)? (Y/N)'
  read(*,'(A1)') X1
  KNOW=IACHAR(X1)
END DO

IF(know.EQ.89 .OR. know.EQ.121) THEN
  print*
  PRINT*, ' CALCULATES AVERAGE DAILY DOSE'
  PRINT*, '~~~~~'
  print*
  INDDAYS=-1
  DO WHILE (INDDAYS.LT.0)
    PRINT*, 'EXPOSURE DURATION (HOW MANY DAYS OF AVAILABLE DATA
$ IN'
    PRINT*, 'INPUT FILE)?'
    READ(*,*) INDDAYS
  END DO

  IF(INDDAYS.LE.1) THEN

    PRINT*

    FN=-1

```

```

DO WHILE (FN.LT.0.4d0 .OR. FN.GT.1)
    WRITE(*,1)
    READ(*,*) FN
END DO

PRINT*
dens=0
DO WHILE(dens.LE.0)
    WRITE(*,2)
    read(*,*) dens
END DO

PRINT*
shape=-1
DO WHILE(shape.LT.1. OR. shape.GT.2)
    WRITE(*,3)
    read(*,*) shape
END DO

PRINT*
u=-1
DO WHILE(u.LT.0)
    WRITE(*,4)
    read(*,*) u
END DO

print*

infile=''
DO WHILE(infile.eq.'')
    WRITE(*,5)
    read(*,*) infile
END DO

SUMMTMAS=0.0D0
nofile=0
CALL GRAPH(N1,infile,nofile,MTMAS)
write(*,'(A3,I2)') 'N1:',N1
N2=8

!!!!

write(*,'(A3,I2)') 'N2:',N2
print*

PRINT*, 'PLEASE CHECK IF N1 IS ACCEPTED'
PRINT*, 'ACCEPT N1? (Y/N) '
READ(*,'(A1)') ACCEPTIT
IF (ACCEPTIT.NE.'Y'.AND.ACCEPTIT.NE.'y') THEN
    PRINT*, 'GIVE NEW N1:'
    READ(*,'(I1)') N1
    write(*,'(A3,I2)') 'N1:',N1
ELSE
    CONTINUE
ENDIF

DO I=1,N2
    PRINT*,MTMAS(I)
    SUMMTMAS=SUMMTMAS+MTMAS(I)
ENDDO

IF (N1.EQ.0) THEN
    IF (SUMMTMAS.EQ.0) THEN
        STOP
    ELSE
        N1=4
    ENDIF
ENDIF

c      Calculate distribution parameters
      call masses(N1,N2,MTMAS,fifty1,fifty2,sigma1,sigma2,fracti
$on)

c      Calculate deposition of fine mode
      dae=round(fifty1,4)
      Sg=round(sigma1,4)
      PRINT*, '-----'

```

```

PRINT*
print*, '***FINE MODE:'
print*, '   Dae   Sg'
write(*, ' (2F7.4) ') dae, Sg
print*

CALL POLYDISPERSE2(FRC, VET, VBB, VBP, D0, D9, B, VT, V, D
$16, FN, dens, shape, u, dae, ET1, ET2, BB, bbI, Al, DTOT, Sg)
write(*, 180) 'ET1:', ET1, '%'
write(*, 180) 'ET2:', ET2, '%'
write(*, 180) 'BB:', BB, '%'
write(*, 180) 'bb:', bbI, '%'
write(*, 180) 'Al:', Al, '%'
WRITE(*, 190) 'TOTAL DEPOSITION:', Dtott, '%'

c      Calculate deposition of Coarse mode
dael=round(fifty2, 4)
Sg1=round(sigma2, 4)
PRINT*
PRINT*, '-----'
PRINT*
print*, '***COARSE MODE:'
print*, '   Dae   Sg'
write(*, ' (2F7.4) ') dael, Sg1
print*

CALL POLYDISPERSE2(FRC, VET, VBB, VBP, D0, D9, B, VT, V, D
$16, FN, dens, shape, u, dael, ET11, ET22, BBB, bbII, All, DTOTT, Sg1)

write(*, 180) 'ET1:', ET11, '%'
write(*, 180) 'ET2:', ET22, '%'
write(*, 180) 'BB:', BBB, '%'
write(*, 180) 'bb:', bbII, '%'
write(*, 180) 'Al:', All, '%'
WRITE(*, 190) 'TOTAL DEPOSITION:', Dtott, '%'
print*
PRINT*

c      Get Concentrations
Conc1=-1
DO WHILE(Conc1.LT.0)
    print*, 'GIVE CONCENTRATION OF FINE PARTICLES:'
    read(*, *) Conc1
END DO
PRINT*

Conc2=-1
DO WHILE(Conc2.LT.0)
    print*, 'GIVE CONCENTRATION OF COARSE PARTICLES:'
    read(*, *) Conc2
END DO
PRINT*

C      FINE DOSE
ET1_DOSE1=B*0.24*Conc1*fraction*ET1
ET2_DOSE1=B*0.24*Conc1*fraction*ET2
BB_DOSE1=B*0.24*Conc1*fraction*BB
bbI_DOSE1=B*0.24*Conc1*fraction*bbI
AL_DOSE1=B*0.24*Conc1*fraction*Al

C      COARSE DOSE
ET1_DOSE2=B*0.24*Conc2*(1-fraction)*ET11
ET2_DOSE2=B*0.24*Conc2*(1-fraction)*ET22
BB_DOSE2=B*0.24*Conc2*(1-fraction)*BBB
bbII_DOSE2=B*0.24*Conc2*(1-fraction)*bbII
AL_DOSE2=B*0.24*Conc2*(1-fraction)*All

C      TOTAL PARTICLES DOSE
ET1_DOSE=ET1_DOSE1+ET1_DOSE2
ET2_DOSE=ET2_DOSE1+ET2_DOSE2
BB_DOSE=BB_DOSE1+BB_DOSE2
bbI_DOSE=bbI_DOSE1+bbI_DOSE2
AL_DOSE=AL_DOSE1+AL_DOSE2
TOTAL_DOSE=B*24*(Conc1*fraction*Dtot+Conc2*(1-fraction)*
$Dtott)

PRINT*
PRINT*, 'DAILY DOSES:'
PRINT*, '~~~~~'

```

```

write(*,'(A9,E13.4,A3)') 'ET1 dose:',ET1_DOSE,'ug'
write(*,'(A9,E13.4,A3)') 'ET2 dose:',ET2_DOSE,'ug'
write(*,'(A8,E14.4,A3)') 'BB dose:',BB_DOSE,'ug'
write(*,'(A8,E14.4,A3)') 'bb dose:',BBI_DOSE,'ug'
write(*,'(A8,E14.4,A3)') 'Al dose:',AL_DOSE,'ug'
WRITE(*,'(A11,E11.4,A3)') 'TOTAL DOSE:',TOTAL_DOSE,'ug'
print*
print*

X3=' '
DO WHILE ((X3.NE.'Y') .AND. (X3.NE.'N') .AND. (X3.NE.'y')
$.AND. (X3.NE.'n'))
    WRITE(*,*) 'CONTINUE WITH CLEARANCE? (Y/N)'
    read(*,'(A1)') X3
    clear=IACHAR(X3)
END DO
print*

IF(CLEAR.EQ.89 .OR. CLEAR.EQ.121) THEN
    TIME=0
    DO WHILE (TIME.LE.0)
        PRINT*, 'GIVE EXPOSURE DURATION (IN DAYS):'
        READ(*,*) TIME
    END DO

    print*, 'stepperday?'
    read(*,'(I4)') stepperday
    stepperday=1440 !/min

    TIMEAA=DINT(time*stepperday)
    PRINT*
    ENDTIME=0
    DO WHILE (ENDTIME.LE.0)
        PRINT*, 'GIVE TIME AFTER INITIAL INTAKE TO

CALCULAT
$E'

        PRINT*, 'THE RETENTION IN EACH REGION (IN DAYS):'
        READ(*,*) ENDTIME
    END DO
    ENDTIMEAA=DINT (ENDtime*stepperday)
    print*

    X=' '
    DO WHILE (X.NE.'F'.AND.X.NE.'f'.AND.X.NE.'S'.AND.X.NE.'

    $s')

        PRINT*, 'GIVE PARTICLE ABSORPTION BEHAVIOR

CLASS (F/
$S):'

        READ(*,'(A1)') X
    END DO
    CLASS=IACHAR(X)

C    ABSORPTION PARAMETERS FOR TYPE F, M, S PARTICLES
    IF (CLASS.EQ.70 .OR. CLASS.EQ.102) THEN

        !RAPID
        S=100.0D0 !/stepperday
    ELSE
        !SLOW
        S=0.0001D0 !/stepperday
    END IF

    hday=0
    RESTIME=1.0D0/S

    CALL solve_dif_clear(INVC,EIGENVEC,EIGENVAL,S,stepperd

$ay)

C    DOSE PER BREATH
    ET1_DOSE1=ET1_DOSE1/(24.0D0*60.0D0*RF)
    ET2_DOSE1=ET2_DOSE1/(24.0D0*60.0D0*RF)
    BB_DOSE1=BB_DOSE1/(24.0D0*60.0D0*RF)
    BBI_DOSE1=BBI_DOSE1/(24.0D0*60.0D0*RF)
    AL_DOSE1=AL_DOSE1/(24.0D0*60.0D0*RF)

    ET1_DOSE2=ET1_DOSE2/(24.0D0*60.0D0*RF)
    ET2_DOSE2=ET2_DOSE2/(24.0D0*60.0D0*RF)

```

```

BB_DOSE2=BB_DOSE2/(24.0D0*60.0D0*RF)
BBI_DOSE2=BBI_DOSE2/(24.0D0*60.0D0*RF)
AL_DOSE2=AL_DOSE2/(24.0D0*60.0D0*RF)

c      FINE
      CALL POLYDISP_CLEAR(DAE,SHAPE,DENS,TIMEAA,ENDTIMEAA,AL
$ _DOSE1,BBI_DOSE1,BB_DOSE1,ET2_DOSE1,ET2_surF,ET_seqF,LNetF,BB_gelF
$,BB_solF,BB_seqF,BBI_gelF,BBI_solF,BBI_seqF,ALF,AL_TF,LNthF,INVC,E
$IIGENVEC,EIGENVAL,RF,stepperday,Sg,hday,RET,RET1,RESTIME,BLOODF)

      OPEN(UNIT=534,FILE='RETENTION_FINE.TXT')
      WRITE(534,171)
      DO I=1,ENDTIMEAA
        fj=i-10080.0d0
        if(i.le.10080) then
          WRITE(534,'(13E16.4)')

I/1440.0D0,(RET(J,I),J=1
$,12)

          else if(fj.le.10080) then
            WRITE(534,'(13E16.4)')

I/1440.0D0,(RET1(J,fj),J
$,1,12)

          endif
        ENDDO

c      COARSE
      CALL POLYDISP_CLEAR(DAE1,SHAPE,DENS,TIMEAA,ENDTIMEAA,A
$L_DOSE2,BBI_DOSE2,BB_DOSE2,ET2_DOSE2,ET2_surC,ET_seqC,LNetC,BB_gel
$,C,BB_solC,BB_seqC,BBI_gelC,BBI_solC,BBI_seqC,ALC,AL_TC,LNthC,INVC,
$,EIGENVEC,EIGENVAL,RF,stepperday,Sg1,hday,RET,RET1,RESTIME,BLOODC)

      OPEN(UNIT=535,FILE='RETENTION_COARSE.TXT')

      WRITE(535,171)
      DO I=1,ENDTIMEAA
        fj=i-10080.0d0
        if(i.le.10080) then
          WRITE(535,'(13E16.4)')

I/1440.0D0,(RET(J,I),J=1
$,12)

          else if(fj.le.10080) then
            WRITE(535,'(13E16.4)')

I/1440.0D0,(RET1(J,fj),J
$,1,12)

          endif
        ENDDO
      PRINT*

      write(*,'(A36,f7.1,A6)'),'MATERIAL IN SOURCE COMPONENT
$S AFTER ',ENDTIME,' DAYS:'
      print*
      write(*,'(A3,A17,E26.4)')'ET2','surface fluid:',(ET2
$_surF+ET2_surC)
      write(*,'(A31,E15.4)')'Particles in airway wall:',(E
$T_seqF+ET_seqC)
      PRINT*
      write(*,'(A4,A22,E20.4)')'LNet','All Transformations:'
$, (LNetF+LNetC)
      PRINT*
      write(*,'(A2,A15,E29.4)')'BB','Mucous gel:',(BB_gelF
$+BB_gelC)
      write(*,'(A17,E29.4)')'Mucous sol:',(BB_solF
$+BB_solC)
      write(*,'(A31,E15.4)')'Particles in airway wall:',
$(BB_seqF+BB_seqC)
      PRINT*
      write(*,'(A2,A15,E29.4)')'bb','Mucous gel:',(BBI_gel
$F+BBI_gelC)
      write(*,'(A17,E29.4)')'Mucous sol:',(BBI_solF+BBI_
$solC)
      write(*,'(A31,E15.4)')'Particles in airway wall:',
$(BBI_seqF+BBI_seqC)
      PRINT*
      write(*,'(A2,A24,E20.4)')'AL','All Transformations:',
C
C      $(AL_TF+AL_TC)
      write(*,'(A28,E18.4)')'Alveolar Interstitium:',(ALF+

```

```

$ALC)
write(*,' (A4,A22,E20.4)') 'LNth','All Transformations:'
$, (LNthF+LNthC)

PRINT*
write(*,*) 'GI Tract:', (AL_TF+AL_TC)
write(*,*) 'BLOOD :', (BLOODF+BLOODC)
PRINT*
WRITE(*,*) 'SUM:', (ET2_surF+ET2_seqF+LNetF+BB
$_gelF+BB_solF+BB_seqF+BBI_gelF+BBI_solF+BBI_seqF+ALF+AL_TF+LNthF+
$ET2_surC+ET2_seqC+LNetC+BB_gelC+BB_solC+BB_seqC+BBI_gelC+BBI_solC+
$BBI_seqC+ALC+AL_TC+LNthC+BLOODF+BLOODC)

print*
print*
print*, 'Continuous retention results printed on RETENTION_
$MODE.txt'

ELSE
STOP
END IF

ELSE !DAYS>1

PRINT*
PRINT*, 'GIVE TIME AFTER INITIAL INTAKE TO CALCULATE THE', '
$RETENTION IN EACH REGION(IN DAYS):'
READ(*,*) ENDDAY
PRINT*

CALL CREATEFORAVERAGE(INDAYS)
laday=real(indays)
*****
*****

CALL OSLO(ENDDAY,laday,FRC,VET,VBB,VBP,D0,D9,B,VT,V
$,D16)

print*
print*
PRINT*, 'Hourly Daily Dose printed on RESULTSDOSE.txt'
PRINT*, 'Continuous Daily Dose printed on DAILYSUMDOSE.txt'
PRINT*, 'Average Daily Dose printed on AVERAGERESULTSDOSE.t
$xt'

print*, 'Retention results for indoor and outddor exposure
$printed on RetentionMODE_EXPOSURE.txt files'
ENDIF

else
PRINT*
X2=' '
DO WHILE ((X2.NE.'Y') .AND. (X2.NE.'N') .AND. (X2.NE.'y') .AND
$. (X2.NE.'n'))
WRITE(*,*) 'Multiple MMADs?(Y/N)'
read(*,*) X2
print*,x2
Multi=IACHAR(X2)
END DO

PRINT*

FN=-5
DO WHILE (FN.LT.0 .OR. FN.GT.1)
WRITE(*,1)
read(*,*) FN
END DO
PRINT*

dens=0
DO WHILE (dens.LE.0)
WRITE(*,2)
read(*,*) dens
END DO
PRINT*

shape=0
DO WHILE (shape.LT.1 .OR. shape.GT.2)
WRITE(*,3)
read(*,*) shape

```

```

END DO
PRINT*

u=-1
DO WHILE (u.LT.0)
    WRITE(*,4)
    read(*,*) u
END DO

print*

c      *****For single particles or
aerosols*****
    If (Multi.EQ.78 .OR. Multi.EQ.110) then
        Fli=1

        open(19,file='polydisp.txt')

        DAE=-1
        DO WHILE (dae.LT.0.001d0 .OR. dae.GT.100.0d0)
            print*, 'GIVE DIAMETER OF PARTICLES IN μm'
            read(*,*) dae
        END DO
        PRINT*
        DISPERSE=0
        DO WHILE (disperse.NE.1 .AND. disperse.NE.2)
            print*, 'GIVE 1 FOR MONODISPERSE AND 2 FOR POLYDISPERSE

$AEROSOLS: '

            read(*,*) disperse
        END DO

        IF (DISPERSE.EQ.1) THEN
            Sg=1.0D0
            open(28,file='testfn.txt')
            write(28,173) !
            do i=40,100

!
                fn=i/100.0d0

!
                CALL POLYDISPERSE2(FRC, VET, VBB, VBP, D0, D9, B, VT,
$ V, D16, FN,dens,shape,u,dae,ET1,ET2,BB,bbI,Al,DTOT,Sg)
                write(28,'(7(f7.4,1x))')

fn,ET1,ET2,BB,bbI,AL,DTOT !
            enddo

            PRINT*

        ELSE

            print*
            Sg=0
            DO WHILE (Sg.LE.0)
                print*, 'Give Sg'
                read(*,*) Sg
            END DO
            WRITE(*,*) Sg
            CALL POLYDISPERSE2(FRC, VET, VBB, VBP, D0, D9, B, VT,
$V,D16,FN,dens,shape,u,DAE,ET1,ET2,BB,bbI,Al,DTOT,Sg)
        ENDIF
        WRITE(*,*) 'PERCENT DEPOSITED IN EACH REGION:'
        write(*,180) 'ET1:',ET1,'% '
        write(*,180) 'ET2:',ET2,'% '
        write(*,180) 'BB :',BB,'% '
        write(*,180) 'bb :',bbI,'% '
        write(*,180) 'Al :',Al,'% '
        WRITE(*,190) 'TOTAL DEPOSITION:',Dtot,'% '

        PRINT*
        WRITE(*,*) 'GIVE CONCENTRATION (ug/m3): (OPTIONAL:ELSE WRI

$TE 0.0)'

        READ(*,*) CONC1

        IF (CONC1.NE.0.0) THEN
            ET1_DOSE=(1.0d0*B/(60.0d0*RF))*CONC1*ET1*0.01d0
            ET2_DOSE=(1.0d0*B/(60.0d0*RF))*CONC1*ET2*0.01d0
            BB_DOSE=(1.0d0*B/(60.0d0*RF))*CONC1*BB*0.01d0
            BB_I_DOSE=(1.0d0*B/(60.0d0*RF))*CONC1*bbI*0.01d0
            AL_DOSE=(1.0d0*B/(60.0d0*RF))*CONC1*Al*0.01d0
            TOTAL_DOSE=(1.0d0*B/(60.0d0*RF))*CONC1*Dtot*0.01d0

```

```

        PRINT*
WRITE(*,'(A16)') 'DOSE PER BREATH:'
    write(*,'(A9,E13.4,A3)') 'ET1 dose:',ET1_DOSE,'ug'
    write(*,'(A9,E13.4,A3)') 'ET2 dose:',ET2_DOSE,'ug'
    write(*,'(A8,E14.4,A3)') 'BB dose:',BB_DOSE,'ug'
    write(*,'(A8,E14.4,A3)') 'bb dose:',BBI_DOSE,'ug'
    write(*,'(A8,E14.4,A3)') 'Al dose:',AL_DOSE,'ug'
    WRITE(*,'(A11,E11.4,A3)') 'TOTAL DOSE:',TOTAL_DOSE,'ug'
ELSE !assumes concentration is 1 ug/m3
    ET1_DOSE=(1.0d0*B/(60.0d0*RF))*1.0d0*ET1*0.01d0
    ET2_DOSE=(1.0d0*B/(60.0d0*RF))*1.0d0*ET2*0.01d0
    BB_DOSE=(1.0d0*B/(60.0d0*RF))*1.0d0*BB*0.01d0
    BBI_DOSE=(1.0d0*B/(60.0d0*RF))*1.0d0*bbi*0.01d0
    AL_DOSE=(1.0d0*B/(60.0d0*RF))*1.0d0*Al*0.01d0
    TOTAL_DOSE=(1.0d0*B/(60.0d0*RF))*1.0d0*Dtot*0.01d0
ENDIF

PRINT*
X3=' '
DO WHILE ((X3.NE.'Y') .AND. (X3.NE.'N') .AND. (X3.NE.'y')
$.AND. (X3.NE.'n'))
    WRITE(*,*) 'CONTINUE WITH CLEARANCE? (Y/N)'
    read(*,'(A1)') X3
c
print*,x1
    clear=IACHAR(X3)
END DO

PRINT*
IF(CLEAR.EQ.89 .OR. CLEAR.EQ.121) THEN
    TIME=0
    DO WHILE (TIME.LE.0)
        PRINT*,'GIVE EXPOSURE DURATION (IN DAYS):'
        READ(*,*) TIME
    END DO

    open(unit=15,file='outR.txt')

    PRINT*
    ENDTIME=0
    DO WHILE (ENDTIME.LE.0)
        PRINT*,'GIVE TIME AFTER INITIAL INTAKE TO
CALCULAT
    $E THE','RETENTION IN EACH REGION(IN DAYS):'
        READ(*,*) ENDTIME
    END DO

c
print*,'stepperday?'
c
read(*,'(I4)') stepperday
stepperday=1440 !/min

TIMEAA=DINT(time*stepperday)
ENDTIMEAA=DINT(ENDtime*stepperday)
PRINT*

X=' '
DO WHILE (X.NE.'F'.AND.X.NE.'f'.AND.X.NE.'S'.AND. X.NE.
    $'s')
        PRINT*,'GIVE PARTICLE ABSORPTION BEHAVIOR

CLASS (F/
    $S):'

        READ(*,'(A1)') X
    END DO
    CLASS=IACHAR(X)

C
    ABSORPTION PARAMETERS FOR TYPE F, S PARTICLES
    IF(CLASS.EQ.70 .OR. CLASS.EQ.102) THEN
        S=100.0D0 !/stepperday
    ELSE
        S=0.0001D0 !/stepperday
    END IF
    RESTIME=1.0D0/S

    hday=0

```



```

OPEN(UNIT=601,FILE='RELATIVE_RETENTION.TXT')
OPEN(UNIT=534,FILE='RETENTION.TXT')
write(15,*) 'time ET2_sur ET_seq BB_gel BB_sol BB_seq
$BBI_gel BBI_sol BBI_seq AL AL_T LNth LNet'

CALL solve_dif_clear(INVC,EIGENVEC,EIGENVAL,SPT,
$stepperday)

CALL POLYDISP_CLEAR(DAE,SHAPE,DENS,TIMEAA,ENDTIMEAA,AL
$DOSE,BBI_DOSE,BB_DOSE,ET2_DOSE,ET2_surF,ET_seqF,LNetF,BB_gelF,BB_
$solF,BB_seqF,BBI_gelF,BBI_solF,BBI_seqF,ALF,AL_TF,LNthF,INVC,EIGEN
$VEC,EIGENVAL,RF,stepperday,Sg,hday,RET,RET1,RESTIME,BLOODF)

WRITE(534,171)
WRITE(601,171)

DO J=1,12
    RETFINAL(J)=RET(J,TIMEAA)
ENDDO

DO I=1,ENDTIMEAA
    fj=i-10080.0d0
    if(i.le.10080) then
        WRITE(534,'(13E16.4)')

I/1440.0D0,(RET(J,I),J=1
    $,12)

        WRITE(601,'(13E16.4)')

I/1440.0D0,((RET(J,I)*1.
    $0d0/RETFINAL(J)),J=1,12)

        else IF(FJ.LE.10080) THEN
            WRITE(534,'(13E16.4)')

I/1440.0D0,(RET1(J,fj),J
    $=1,12)

            WRITE(601,'(13E16.4)')

I/1440.0D0,((RET1(J,fj)*
    $1.0d0/RETFINAL(J)),J=1,12)

        endif

    ENDDO
    PRINT*

C    PRINT*, ET2_surF,ET_seqF,LNetF,BB_gelF,BB_solF,BB_seqF,BBI_gelF,
C    $BBI_solF,BBI_seqF,ALF,AL_TF,LNthF

    PRINT*
    write(*,'(A36,f7.1,A6)'),'MATERIAL IN SOURCE COMPONENTS AF
$TER ',endTIME,' DAYS:'
    print*
    write(*,'(A3,A17,E26.4)')'ET2','surface fluid:',ET2_surF
    write(*,'(A31,E15.4)')'Particles in airway wall:',ET_seqF
    PRINT*
    write(*,'(A4,A22,E20.4)')'LNet','All Transformations:',(LN
$etF)

    PRINT*
    write(*,'(A2,A15,E29.4)')'BB','Mucous gel:',BB_gelF
    write(*,'(A17,E29.4)')'Mucous sol:',BB_solF
    write(*,'(A31,E15.4)')'Particles in airway wall:',BB_seqF
    PRINT*
    write(*,'(A2,A15,E29.4)')'bb','Mucous gel:',BBI_gelF
    write(*,'(A17,E29.4)')'Mucous sol:',BBI_solF
    write(*,'(A31,E15.4)')'Particles in airway wall:',BBI_seqF
    PRINT*
c    write(*,'(A2,A24,E20.4)')'AL','All Transformations:',AL_TF
    write(*,'(A28,E18.4)')'Alveolar Interstitium:',ALF

    write(*,'(A4,A22,E20.4)')'LNth','All Transformations:',LNT
$hF

    PRINT*
    write(*,*)'GI Tract:',AL_TF
    write(*,*)'BLOOD :',BLOODF

```

```

PRINT*
WRITE(*,*) 'SUM:', (ET2_surF+ET2_seqF+LNetF+BB_gelF+BB_solF
$+BB_seqF+BBI_gelF+BBI_solF+BBI_seqF+ALF+AL_TF+LNthF+BLOODF)

print*
print*
IF(DISPERSE.EQ.2) THEN
    print*, 'Deposition Results for each bin print on polyd
$isp.txt'

endif
print*, 'Retention results print on RETENTION.txt'
print*, 'Relative Retention results print on RELATIVE_RETEN
$TION.txt'

ELSE
    STOP
END IF

else
c      *****For multiple MMADs*****
    open(unit=20, file='Results.txt')

    Sg=1.0D0

c      start check
    open(unit=532, file='checkclearfordae.txt')
    write(532,174)

PRINT*
X3=' '
DO WHILE ((X3.NE.'Y') .AND. (X3.NE.'N') .AND. (X3.NE.'y')
$.AND. (X3.NE.'n'))
    WRITE(*,*) 'CONTINUE WITH CLEARANCE? (Y/N)'
    read(*, '(A1)') X3
    clear=IACHAR(X3)
END DO

PRINT*

IF(CLEAR.EQ.89 .OR. CLEAR.EQ.121) THEN
    TIME=0
    DO WHILE (TIME.LE.0)
        PRINT*, 'GIVE EXPOSURE DURATION (IN DAYS):'
        READ(*,*) TIME
    END DO
    PRINT*

    ENDTIME=0
    DO WHILE (ENDTIME.LE.0)
        PRINT*, 'GIVE TIME AFTER INITIAL INTAKE TO
CALCULAT
        $E THE', 'RETENTION IN EACH REGION(IN DAYS):'
        READ(*,*) ENDTIME
    END DO

c      print*, 'stepperday?'
c      read(*, '(I4)') stepperday
c      stepperday=1440      !/min

    TIMEAA=DINT(time*stepperday)
    ENDTIMEAA=DINT(ENDtime*stepperday)
    PRINT*
    X=' '
    DO WHILE (X.NE.'F' .AND. X.NE.'f' .AND. X.NE.'S' .AND.
        $ X.NE.'s')

        PRINT*, 'GIVE PARTICLE ABSORPTION BEHAVIOR

CLASS (F/
    $$):'

        READ(*, '(A1)') X
    END DO
    CLASS=IACHAR(X)

C      ABSORPTION PARAMETERS FOR TYPE F, S PARTICLES
    IF(CLASS.EQ.70 .OR. CLASS.EQ.102) THEN
        S=100.0D0      !/stepperday

```

```

ELSE
    S=0.0001D0  !/stepperday
END IF
RESTIME=1.0D0/S

hday=0

CALL solve_dif_clear(INVC,EIGENVEC,EIGENVAL,SPT,
$stepperday)
endif
c      end check

PRINT*
mind=0
DO WHILE(mind.LT.0.001d0.OR. mind.GT.100.0d0)
    print*, 'GIVE MIN DIAMETER:'
    read(*,*) mind
END DO

PRINT*
maxd=0
DO WHILE(maxd.LT.0.001d0.OR.maxd.GT.100.0d0.OR.maxd.LE.min
$d)
    print*, 'GIVE MAX DIAMETER:'
    read(*,*) maxd
END DO

PRINT*

Fli=-1
DO WHILE(Fli.LE.0 .OR. Fli.GT.1E+4 .OR. (Fli-round(Fli,0))
$.GT.0)
    print*, 'GIVE NUMBER OF MMADs:'
    read(*,*) Fli
END DO

write(20,172)

PRINT*
space=0
DO WHILE(space.NE.1 .AND. space.NE.2)
    print*, 'LOGARITHMIC (1) OR LINEAR (2) SPACED?'
    read(*,*) space
END DO

if(space.eq.2) then
    DO i=1, (Fli+1)
        dae=mind+(i-1)*((maxd-mind)/Fli)
        CALL POLYDISPERSE2(FRC, VET, VBB, VBP, D0, D9, B,
$VT, V, D16, FN,dens,shape,u,dae,ET1,ET2,BB,bbI,AL,DTOT,Sg)
        write(20,100) dae, ET1, ET2, BB, bbI, AL, Dtot

        ET2_DOSE=((1.0d0*B)/(60.0d0*RF))*1.0d0*ET2*0.01d0
        BB_DOSE=((1.0d0*B)/(60.0d0*RF))*1.0d0*BB*0.01d0
        BB_I_DOSE=((1.0d0*B)/(60.0d0*RF))*1.0d0*bbI*0.01d0
        AL_DOSE=((1.0d0*B)/(60.0d0*RF))*1.0d0*AL*0.01d0
        TOTAL_DOSE=((1.0d0*B)/(60.0d0*RF))*1.0d0*Dtot*0.01d0
c      continuse check
        CALL POLYDISP_CLEAR(DAE,SHAPE,DENS,TIMEAA,ENDTIMEAA,AL
$_dose,BBI_dose,BB_dose,ET2_dose,ET2_surF,ET_seqF,LNetF,BB_gelf,BB_
$_solF,BB_seqF,BBI_gelf,BBI_solF,BBI_seqF,ALF,AL_TF,LNthF,INVC,EIGEN
$VEC,EIGENVAL,RF,stepperday,Sg,hday,RET,RET1,RESTIME,BLOODF)
        write(532,'(13E16.4)') dae,ET2_surF,ET_seqf,BB_gelf,BB
$_solF,BB_seqf,BBI_gelf,BBI_solF,BBI_seqf,ALF,AL_Tf,LNthf,LNetf,BLO
$ODF
c      end check
    ENDDO
else
    din=Dlog10(mind)
    dax=Dlog10(maxd)
    do i=1,fli
        dae=10**(din+(i-1)*((dax-din)/(fli-1)))
        CALL POLYDISPERSE2(FRC, VET, VBB, VBP, D0, D9, B,
$VT, V, D16, FN,dens,shape,u,dae,ET1,ET2,BB,bbI,AL,DTOT,Sg)
        write(20,100) dae, ET1, ET2, BB, bbI, AL, Dtot

        ET2_DOSE=((1.0d0*B)/(60.0d0*RF))*1.0d0*ET2*0.01d0

```

```

BB_DOSE=((1.0d0*B)/(60.0d0*RF))*1.0d0*BB*0.01d0
BBI_DOSE=((1.0d0*B)/(60.0d0*RF))*1.0d0*bbI*0.01d0
AL_DOSE=((1.0d0*B)/(60.0d0*RF))*1.0d0*Al*0.01d0
TOTAL_DOSE=((1.0d0*B)/(60.0d0*RF))*1.0d0*Dtot*0.01d0
c      continuase check
      CALL POLYDISP_CLEAR(DAE,SHAPE,DENS,TIMEAA,ENDTIMEAA,AL
      $_dose,BBI_dose,BB_dose,ET2_dose,ET2_surF,ET_seqF,LNetF,BB_gelF,BB_
      $_solF,BB_seqF,BBI_gelF,BBI_solF,BBI_seqF,ALF,AL_TF,LNthF,INVC,EIGEN
      $VEC,EIGENVAL,RF,stepperday,Sg,hday,RET,RET1,RESTIME,BLOODF)
      write(532,'(13E16.4)') dae,ET2_surF,ET_seqf,BB_gelf,BB
      $_solF,BB_seqf,BBI_gelf,BBI_solF,BBI_seqf,ALf,AL_Tf,LNthf,LNetf,BLO
      $ODF
c      end check
      enddo
      endif
      print*
      print*,'Deposition Results printed on RESULTS.txt'
      print*
      IF(CLEAR.EQ.89 .OR. CLEAR.EQ.121) THEN
        print*,'Final retention results for each diameter prin
      $tedon CHECKCLEARFORDAE.txt'
        ENDIF
        print*
        END IF
      END IF      !KNOWN MASS
      ENDIF      !OSLO
1      FORMAT(' GIVE FRACTION BREATHED THROUGH NOSE:')
2      FORMAT(' GIVE PARTICLE DENSITY:')
3      FORMAT(' GIVE PARTICLE SHAPE FACTOR:')
4      FORMAT(' GIVE AIR VELOCITY:')
5      format(' GIVE INFILE NAME (BERNER DATA):')
100     format(10E16.4)
180     format(a4,f6.2,a1)
190     format(a17,f6.2,a1)
170     format(a11,f10.2,a2)
171     FORMAT('          DAY          ET2_sur          ET_seq          BB_gel
      BB_sol
      $          BB_seq          bb_gel          bb_sol          bb_seq          Al
      $          GI Tract          LNth          LNet')
172     FORMAT('          dae          ET1(%)          ET2(%)          BB
      $(%)          bb(%)          Al(%)          Total(%)')
173     FORMAT(' fn          ET1          ET2          BB          bb          AL          DTOT')
174     format(' DAE          ET2_sur          ET_seq          BB_gel          BB_sol
      $          BB_seq          bb_gel          bb_sol          bb_seq          Al
      $          GI Tract          LNth          LNet')
      print*
      print*
      PAUSE
      stop
      END
C~~~~~
C~~~~~
C~~~~~
      function round(x,y)
      REAL*8 round,x,k,factor
      integer y
c      Returns the round number
      factor=10**y
      k=x*factor-nint(x*factor)
      if(k.ge.0.5D0)then
        round=(nint(x*factor)+1)/factor
      else
        round=nint(x*factor)/factor
      endif
      return
      END
C~~~~~
C~~~~~

```

```

C~~~~~

      FUNCTION SEXP(X)
      REAL*8 X,X1
      IF(X.GT.709.0D0) THEN
        print*, '***possible EXP error***'
        X1=X/709.0D0
        SEXP=(EXP(709.0D0))*X1
      ELSE
        SEXP=DEXP(X)
      ENDIF
      RETURN
      END

C~~~~~
C~~~~~
C~~~~~

      FUNCTION SLOG(X)
      REAL*8 X
      IF(X.LT.1E-307) THEN
        print*, '***LOG error***'
        STOP
      ELSE
        SLOG=DLOG(X)
      ENDIF
      RETURN
      END

C~~~~~
C~~~~~
C~~~~~

      FUNCTION SLOG10(X)
      REAL*8 X
      IF(X.LT.1E-307) THEN
        print*, '***LOG10 error***'
        STOP
      ELSE
        SLOG10=DLOG10(X)
      ENDIF
      RETURN
      END

C~~~~~
C~~~~~
C~~~~~

      FUNCTION SSQRT(X)
      REAL*8 X
      IF(X.LT.0) THEN
        print*, '***SQRT error***'
        STOP
      ELSE
        SSQRT=DSQRT(X)
      ENDIF
      RETURN
      END

C~~~~~
C~~~~~
C~~~~~

      SUBROUTINE GRAPH(POINT,infile,nofile,Y)

      INTEGER, PARAMETER :: N=8
      INTEGER X,I,POINT,nofile,j,K(N),ILINE
      REAL*8 Y(N),SL(N),SET,DIA,KA,SUM
      character infile*12,A(N)

      DO I=1,N
        Y(I)=0.0D0
      ENDDO
      open(50,file=infile,status='old')
      if(nofile.eq.0) then
        read(50,*) (Y(i),i=1,N)

```

```

ELSE
    do j=1,NOFILE
        read(50,*) (Y(i),i=1,N)
    enddo
ENDIF
CLOSE(50)

KA=MAXVAL(Y)
SET=KA/N
SUM=0.0D0

DO I=1,N
    SUM=SUM+Y(I)
ENDDO

IF(SUM.NE.0.0D0) THEN
    print*
    print*
    print*,'Mass distribution:'
    print*
    DO ILINE=1,N
        DO I=1,N
            DIA=Y(I)/SET
            K(I)=(N+1-ILINE)-ROUND(DIA,0)
            IF(K(I).LE.0) THEN
                A(I)='**'
            ELSE
                A(I)=' '
            ENDIF
        ENDDO
        WRITE(*,'(8a2)') (A(I), I=1,N)
    ENDDO
    WRITE(*,'(8I2)') (I, I=1,N)
    print*

    SL(1)=0.0
    DO X=2,N
        SL(X)=Y(X)-Y(X-1)
        IF(SL(X-1).LT.0.0D0.AND.SL(X).GT.0.0D0) POINT=X-1
        IF(SL(X-1).EQ.0.0D0.AND.SL(X).GT.0.0D0) POINT=X-1
        IF(SL(X-1).LT.0.0D0.AND.SL(X).EQ.0.0D0) POINT=X-1
        IF(SL(X-1).EQ.0.0D0.AND.SL(X).EQ.0.0D0) POINT=0
    END DO
ELSE
    POINT=0
ENDIF

RETURN
END

```

```

C~~~~~
C~~~~~
C~~~~~

```

```

SUBROUTINE PARTICLE(DAE,SHAPE,DENS,PSTH,D)

```

```

c    Returns the thermodynamic diameter of particles and the
c    diffusion coefficient
c
c    ae:aerodynamic
c    th:thermodynamic
c    Calculates paricle's parameters:
c    Slip correction factor cd..
c    Thermodynamic diameter dth
c    Standar deviation Sg
c    k:Boltzmann's constant

```

```

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)

```

```

PARAMETER(pi=3.141592654D0)
integer test
REAL*8 CDAE,DE1(10),CDE1(10),DE2(10),CDVAR(10),M,K,PSTH,D,LIM,cde,
$cdth,de,dth

```

[illegible]

```

C~~~~~
C~~~~~
C~~~~~

      SUBROUTINE CLEARtrac1 (DAE,SHAPE,DENS,TIME,ENDTIME,AL_DOSE,BBI_DOSE
      $,BB_DOSE, ET2_DOSE,ET2_sur,ET_seq,LNet,BB_gel,BB_sol,BB_seq,
      $BBI_gel,BBI_sol,BBI_seq,AL,AL_T,LNth,INVC,EIGENVEC,EIGENVAL,RF,
      $stepperday,hday,RET,RET1,RESTIME,BLOOD)

C      Calculates retention in each region of the respiratory tract
C
C
C      REGIONS OF COMPARTMENTS
C-----|
C-----INITIAL STATE-----|
C      1:Al1                      |
C      2:Al2                      |
C      3:Al3                      |
C      4:bb1                      |
C      5:bb2                      |
C      6:bbseq                   |
C      7:BB1                     |
C      8:BB2                     |
C      9:BBseq                   |
C      10:LNth                   |
C      11:ET2                    |
C      12:ETseq                  |
C      13:LNet                   |
C      14:GI Tract               |
C      15:Blood                  |
C-----|

      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (D-K,O-Z)
      PARAMETER (N=15)

      INTEGER I,J,TIMES,ENDTIME,ka,TIME,RF,stepperday,hday,katal
      $,kata2,CHA
      REAL X(N)
      REAL*8 EIGENVEC(N,N),EIGENVAL(N),INVC(N,N),B1(N),FRAC(11),DAE,
      $CHECK,DENS,SHAPE,FsBB,AL_DOSE,BBI_DOSE,BBI_gel,BB_DOSE,ET2_DOSE,
      $R(N),R1(N),BBI_sol,BBI_seq,AL,AL_T,LNth,B(N),ET2_sur,ET_seq
      $,LNet,BB_gel,BB_sol,BB_seq,printtime,RET(12,10080),RET1(12,10080),
      $Al1,Al_T1,BB_gel1,BB_sol1,bbi_gel1,bbi_sol1,bbi_seq1,BB_seq1,
      $et2_sur1,et_seq1,lnet1,lnth1,CHACHA,RESTIME,BLOOD1,BLOOD

      DATA FRAC/0.3D0, 0.6D0, 0.1D0, 0.0D0, 0.0D0, 0.007D0, 0.0D0, 0.0D0
      $, 0.007D0, 0.9995D0, 0.0005D0/

C      CALCULATION OF PARTITION OF DEPOSIT IN EACH REGION BETWEEN COMPARTMENTS
CHECK=2.5*DSQRT((1.0D0/SHAPE)*DENS)
IF(DAE.LE.CHECK) THEN
      FsBB=0.5D0
ELSE
      FsBB=0.5D0*DEXP(-0.63D0*(DAE*DSQRT((1.0D0/DENS)*SHAPE)-2.5D0))
ENDIF

FRAC(4)=0.993D0-1.0D0*FsBB
FRAC(5)=1.0D0*FsBB
FRAC(7)=0.993D0-1.0D0*FsBB
FRAC(8)=1.0D0*FsBB

C      INITIALIZE
B1(1)=1.0D0*FRAC(1)*AL_DOSE
B1(2)=1.0D0*FRAC(2)*AL_DOSE
B1(3)=1.0D0*FRAC(3)*AL_DOSE
B1(4)=1.0D0*FRAC(4)*BBI_DOSE
B1(5)=1.0D0*FRAC(5)*BBI_DOSE
B1(6)=1.0D0*FRAC(6)*BBI_DOSE
B1(7)=1.0D0*FRAC(7)*BB_DOSE
B1(8)=1.0D0*FRAC(8)*BB_DOSE
B1(9)=1.0D0*FRAC(9)*BB_DOSE
B1(10)=0.0D0

```



```

B1(11)=1.0D0*FRAC(10)*ET2_DOSE
B1(12)=1.0D0*FRAC(11)*ET2_DOSE
B1(13)=0.0D0
B1(14)=0.0D0
B1(15)=0.0D0

if(hday.ne.0) then
  do i=1,12
    do j=1,10080
      ret(i,j)=0.0d0
      RET1(I,J)=0.0D0
    enddo
  enddo
endif

do i=1,n
  R(I)=0.0D0
  R1(I)=0.0D0
  b(i)=0.0D0
  X(I)=0.0D0
enddo

DO I=1,n
  B(I)=rf*B1(I)*(1440.0/stepperday)
END DO

CHACHA=MAX(B(1),B(2),B(3),B(4),B(5),B(6),B(7),B(8),B(9),B(10),B(11),
B(12),B(13),B(14))
CHA=INT(CHACHA*RESTIME)+1

DO I=1,N
  DO J=1,N
    X(I)=X(I)+INVC(I,J)*B(J)
  ENDDO
ENDDO

300  FORMAT(5F10.4)

ka=time
C  LOOP TIME*****

do times=1,ka !-----
  DO I=1,n
    R(I)=0.0d0
    DO J=1,n
      R(I)=R(I)+X(J)*(EIGENVEC(I,J)*
$(DEXP(EIGENVAL(J))*TIMES))
    END DO
  END DO

  if(times.eq.1) then
    DO I=1,N
      R1(I)=R(I)
    ENDDO
  else
    DO I=1,N
      R1(I)=R1(I)+R(I)
    ENDDO
  endif

  katal=TIMES+HDAY
  IF(katal.LE.10080) THEN
    RET(1,katal)=R1(11)
    RET(2,katal)=R1(12)
    RET(3,katal)=R1(7)
    RET(4,katal)=R1(8)
    RET(5,katal)=R1(9)
    RET(6,katal)=R1(4)
    RET(7,katal)=R1(5)
    RET(8,katal)=R1(6)
    RET(9,katal)=R1(1)+R1(2)+R1(3)
    RET(10,katal)=R1(14)
    RET(11,katal)=R1(10)
    RET(12,katal)=R1(13)
  ELSE

```

```

        kata2=times+hday-10080
        IF(kata2.LE.10080) THEN
            RET1(1,kata2)=R1(11)
            RET1(2,kata2)=R1(12)
            RET1(3,kata2)=R1(7)
            RET1(4,kata2)=R1(8)
            RET1(5,kata2)=R1(9)
            RET1(6,kata2)=R1(4)
            RET1(7,kata2)=R1(5)
            RET1(8,kata2)=R1(6)
            RET1(9,kata2)=R1(1)+R1(2)+R1(3)
            RET1(10,kata2)=R1(14)
            RET1(11,kata2)=R1(10)
            RET1(12,kata2)=R1(13)
        ENDIF
    ENDIF

    printtime=real((1.0D0*TIMES/stepperday))
    if(printtime.EQ.0) then
        pause
    endif

    write(15,'(13E18.9)') printtime,R(11),R(12),R(7),R(8),R(9),R1(
$4),R(5),R(6),R(14),R1(10),R1(13),R1(15)
    ENDDO    !time

    ET2_surl=R1(11)
    ET_seq1=R1(12)
    LNet1=R1(13)
    BB_gell=R1(7)
    BB_soll=R1(8)
    BB_seq1=R1(9)
    BBI_gell=R1(4)
    BBI_soll=R1(5)
    BBI_seq1=R1(6)
    AL1=R1(1)+R1(2)+R1(3)
    AL_T1=R1(14) !GI tract
    LNth1=R1(10)
    BLOOD1=R1(15)

    if(endtime.gt.time) then
        DO I=1,n
            B(I)=R1(I)
        END DO

        CHACHA=MAX(B(1),B(2),B(3),B(4),B(5),B(6),B(7),B(8),B(9),B(10),B(11
$),B(12),B(13),B(14))
        CHA=INT(CHACHA*RESTIME)+1

        do i=1,n
            X(I)=0.0D0
            R(I)=0.0D0
            R1(I)=0.0D0
        enddo

        DO I=1,N
            DO J=1,N
                X(I)=X(I)+INVC(I,J)*B(J)
            ENDDO
        ENDDO

        ka=endtime
C    LOOP TIME*****
        do times=1,ka-time !-----
            DO I=1,n
                R(I)=0.0d0
                DO J=1,n
                    R(I)=R(I)+X(J)*(EIGENVEC(I,J)*
$ (DEXP(EIGENVAL(J)**TIMES))
                END DO
            END DO
            DO I=1,N
                R1(I)=R(I)
            ENDDO

```

```

      kata1=TIME+TIMES+hday
      IF(kata1.LE.10080) THEN
        RET(1,kata1)=R1(11)
        RET(2,kata1)=R1(12)
        RET(3,kata1)=R1(7)
        RET(4,kata1)=R1(8)
        RET(5,kata1)=R1(9)
        RET(6,kata1)=R1(4)
        RET(7,kata1)=R1(5)
        RET(8,kata1)=R1(6)
        RET(9,kata1)=R1(1)+R1(2)+R1(3)
        RET(10,kata1)=R1(14)
        RET(11,kata1)=R1(10)
        RET(12,kata1)=R1(13)
      ELSE
        kata2=TIME+times+hday-10080
        IF(kata2.LE.10080) THEN
          RET1(1,kata2)=R1(11)
          RET1(2,kata2)=R1(12)
          RET1(3,kata2)=R1(7)
          RET1(4,kata2)=R1(8)
          RET1(5,kata2)=R1(9)
          RET1(6,kata2)=R1(4)
          RET1(7,kata2)=R1(5)
          RET1(8,kata2)=R1(6)
          RET1(9,kata2)=R1(1)+R1(2)+R1(3)
          RET1(10,kata2)=R1(14)
          RET1(11,kata2)=R1(10)
          RET1(12,kata2)=R1(13)
        ENDIF
      ENDIF

      printtime=real((1.0D0*TIMES/stepperday))
      if(printtime.EQ.0) then
        pause
      endif

c      write(15,'(15E18.9)') printtime,R1(11),R1(12),R1(7),R1(8),R1(9)
c      $,R1(4),R1(5),R1(6),R1(1)+R1(2)+R1(3),R1(14),R1(10),R1(13),R1(15)

      ENDDO      !time
    endif

    ET2_sur=R1(11)
    ET_seq=R1(12)
    LNet=R1(13)
    BB_gel=R1(7)
    BB_sol=R1(8)
    BB_seq=R1(9)
    BBI_gel=R1(4)
    BBI_sol=R1(5)
    BBI_seq=R1(6)
    AL=R1(1)+R1(2)+R1(3)
    AL_T=R1(14)      !GI Tract
    LNth=R1(10)
    BLOOD=R1(15)

    RETURN
  END

C~~~~~
C~~~~~
C~~~~~

      SUBROUTINE Subdepos(FRC, VET, VBB, VBP, D0, D9, B, VT, V, D16,FN,u
      $,DAE,ET1,ET2,BB,bbI,AL,DTOT,PSTH,D)

C      Calculates deposition in each region of the respiratory tract

      parameter(N=9)
      INTEGER Y,S,J,SS
      REAL*8 PAEN(9), PTHN(9), AAEN(9),ATHN(9),DTot,
      $      I, NAEN(9), NTHN(9), NN(10),DEP(9),D0,

```

```

$      FRC, VET, VBB, VBP, D9, B, VT, V, D16,
$      P, RTHN(9), RAEN(9), N0, PSTH,D,u,FN,VM,
$      F(9),TA,TB,TP,VN, PAEM(7), PTHM(7),NM(7),
$      AAEM(7),ATHM(7), NAEM(7), NTHM(7), RAEM(7), RTHM(7),
$      DEP1(9), DEP2(7),ET1,ET2,BB,bbI,Al, DAE, SFA,SFB,SFT

C      Calculating efficiency of filter 0
      I=1.0D0-0.5D0*(1.0D0-1.0D0/(0.00076D0*(dae**2.8D0)+1.0D0))+
$0.00001D0*(u**2.75D0)*dexp(0.055D0*dae)
      N0=round(1.0D0-I,4)

C      Fraction of tidal air that reaches each filter
      F(1)=1.0D0
      F(2)=1.0D0
      F(3)=1.0D0-(1.0D0/VT)*VET
      F(4)=F(3)-(VBB*(1.0D0+VT/FRC))/VT
      F(5)=F(4)-(VBP*(1.0D0+VT/FRC))/VT
      DO J=6,9
          F(J)=F(N-J+1)
      END DO

      VN=FN*V
      VM=(1-FN)*V

C      Scaling parameters and time constants
c      reference worker, adult male
      SFT=1.65D0/D0
      SFB=0.165D0/D9
      SFA=0.051D0/D16

c      Adult female
c      SFT=1.08D0
c      SFB=1.04D0
c      SFA=1.07D0

c      Baby 3 months
c      SFT=2.68D0
c      SFB=1.67D0
c      SFA=2.58D0
cccccccccccccccccccccccccccccccc

      TB=VBB*(1.0D0+0.5D0*VT/FRC)/V
      TP=VBP*(1.0D0+0.5D0*VT/FRC)/V
      TA=(VT-VET-(VBB+VBP)*(1+VT/FRC))/V

C      Parameters from table 12,13 in ICRP66 for calculating filtration efficiency
      DATA PAEN/ 1.0D0, 1.17D0, 1.152D0, 1.173D0, 0.6495D0, 1.173D0,
$ 1.152D0, 1.17D0, 1.0D0/
      DATA PTHN/ 0.5D0, 0.538D0, 0.6391D0, 0.5676D0, 0.6101D0,
$ 0.5676D0, 0.6391D0, 0.538D0, 0.5D0/
      DATA AAEN/0.0003D0, 0.000055D0, 0.00000408D0, 0.1147D0, 0.0D0,
$ 0.1147D0, 0.00000204D0, 0.000055D0, 0.0003D0/
      DATA ATHN/18.0D0, 15.1D0, 0.0D0, 0.0D0, 0.0D0, 0.0D0,
$ 0.0D0, 15.1D0, 18.0D0/
      DATA RAEN/0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0/
      DATA RTHN/0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0/

      DATA PAEM/1.4D0, 0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0, 1.4D0/
      DATA PTHM/0.5D0, 0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0, 0.5D0/
      DATA AAEM/0.00011D0, 0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0, 0.00011D0/
      DATA ATHM/9.0D0, 0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0, 9.0D0/
      DATA RAEM/0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0/
      DATA RTHM/0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0/
      DATA NAEM/0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0/
      DATA NTHM/0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0,0.0D0/

      AAEN(5)=0.146D0*(SFA**0.98D0)

      ATHN(3)=22.02D0*(SFT**1.24D0)*PSTH
      ATHN(7)=22.02D0*(SFT**1.24D0)*PSTH
      ATHN(4)=-76.8D0+167.0D0*(SFB**0.65D0)
      ATHN(6)=-76.8D0+167.0D0*(SFB**0.65D0)
      ATHN(5)=170.0D0+103.0D0*(SFA**2.13D0)

      RAEN(1)=DAE*DAE*VN*(SFT**3.0D0)

```

```

    RAEN(2)=DAE*DAE*VN*(SFT**3.0D0)
    RAEN(8)=DAE*DAE*VN*(SFT**3.0D0)
    RAEN(9)=DAE*DAE*VN*(SFT**3.0D0)
    RAEN(3)=DAE*DAE*V*(SFT**2.3D0)
    RAEN(7)=DAE*DAE*V*(SFT**2.3D0)
    RAEN(4)=(0.056D0+(TP**1.5D0))*(DAE**(TP**(-0.25D0)))
    RAEN(6)=(0.056D0+(TP**1.5D0))*(DAE**(TP**(-0.25D0)))
    RAEN(5)=DAE*DAE*TA

    IF(VN.NE.0) THEN
    RTHN(1)=D*((VN*SFT)**(-0.25D0))
    RTHN(2)=D*((VN*SFT)**(-0.25D0))
    RTHN(8)=D*((VN*SFT)**(-0.25D0))
    RTHN(9)=D*((VN*SFT)**(-0.25D0))
    END IF

    RTHN(3)=D*TB
    RTHN(7)=D*TB
    RTHN(4)=D*TP
    RTHN(6)=D*TP
    RTHN(5)=D*TA

    RAEM(1)=DAE*DAE*((V*(SFT**3.0D0))**0.6D0)*((VT*SFT*SFT)**(-0.2D0))
    RAEM(7)=DAE*DAE*((V*(SFT**3.0D0))**0.6D0)*((VT*SFT*SFT)**(-0.2D0))

    NAEN(1)=0.5D0*(1.0D0-1.0D0/(AAEN(1)*(RAEN(1)**PAEN(1))+1.0D0))
    NAEN(9)=0.5D0*(1.0D0-1.0D0/(AAEN(1)*(RAEN(1)**PAEN(1))+1.0D0))
    NAEN(2)=1.0D0-1.0D0/(AAEN(2)*(RAEN(2)**PAEN(2))+1.0D0)
    NAEN(8)=1.0D0-1.0D0/(AAEN(2)*(RAEN(2)**PAEN(2))+1.0D0)
    NTHN(1)=0.5D0*(1.0D0-DEXP(-ATHN(1)*(RTHN(1)**PTHN(1))))
    NTHN(9)=0.5D0*(1.0D0-DEXP(-ATHN(1)*(RTHN(1)**PTHN(1))))
    NTHN(2)=1.0D0-DEXP(-ATHN(2)*(RTHN(2)**PTHN(2)))
    NTHN(8)=1.0D0-DEXP(-ATHN(2)*(RTHN(2)**PTHN(2)))
    DO I=3,7
        NAEN(I)=1.0D0-DEXP(-AAEN(I)*(RAEN(I)**PAEN(I)))
        NTHN(I)=1.0D0-DEXP(-ATHN(I)*(RTHN(I)**PTHN(I)))
    END DO

    NAEM(1)=1.0D0-1.0D0/(AAEM(1)*(RAEM(1)**PAEM(1))+1.0D0)
    NAEM(7)=1.0D0-1.0D0/(AAEM(7)*(RAEM(7)**PAEM(7))+1.0D0)

    DO I=2,6
        NAEM(I)=NAEN(I+1)
        AAEM(I)=AAEN(I+1)
        ATHM(I)=ATHN(I+1)
        PAEM(I)=PAEN(I+1)
        PTHM(I)=PTHN(I+1)
        RAEM(I)=RAEN(I+1)
    END DO

    DO I=1,7
        RTHM(I)=RTHN(I+1)
        NTHM(I)=NTHN(I+1)
    END DO

C      Filtration Efficiencies
DO Y=1,9
    NN(Y)=ssqrt(NAEN(Y)**2+NTHN(Y)**2)
END DO

DO Y=1,7
    NM(Y)=ssqrt(NAEM(Y)**2+NTHM(Y)**2)
END DO

C      Regional and Total deposition efficiencies (Equation 5, ICRP66 p.41)
DO S=1,9
    P=1
    DO SS=0,S-1
        IF(SS.EQ.0) THEN
            P=(FN)*(1-N0)
        ELSE
            P=P*(1-NN(SS))
        ENDIF
    END DO
    DEPl(S)=round(NN(S)*F(S)*P,4)

```

```

END DO

C      Regional and Total deposition efficiencies (Equation 5, ICRP66 p.41)
DO S=1,7
  P=1
  DO SS=0,S-1
    IF(SS.EQ.0) THEN
      P=(1-FN)*(1-N0)
    ELSE
      P= P * (1 - NM(SS))
    ENDIF
  END DO
  DEP2(S)=round(NM(S)*F(S+1)*P,4)
END DO

DEP(1)=DEP1(1)
DO I=2,8
  DEP(I)=DEP1(I)+DEP2(I-1)
END DO
DEP(9)=DEP1(9)

DTOT=0.0D0
DO S=1,9
  DTOT=DTOT+DEP(S)*100.0D0
END DO

ET1=(dep(1)+dep(9))*100.0D0
ET2=(dep(2)+dep(8))*100.0D0
BB=(dep(3)+dep(7))*100.0D0
bbI=(dep(4)+dep(6))*100.0D0
Al=dep(5)*100.0D0

return
end

C~~~~~
C~~~~~
C~~~~~

      Subroutine POLYDISPERSE2(FRC, VET, VBB, VBP, D0, D9, B, VT, V, D16,
      $FN,dens,shape,u,DAE,ET11,ET21,BB1,bbI1,Al1,DTOT1,Sg)

C
C      Returns the deposition of polydisperse aerosol
C      particles in each region of the respiratory tract
C
C      INTEGER, parameter :: num=500
      REAL*8 ET11,ET21,BB1,bbI1,Al1,DTOT1,Sg,FRC, VET, VBB, VBP,DTOT,D0,
      $D9,B,VT,V,D16,dens,shape,u,DAE,ET1,ET2,BB,bbI,Al,TOT(num),fm(num),
      $DP,EKTH,psth,D,p(num),T1(num),T2(num),BA(num),bI(num),l(num),SUMP,
      $FN

      real x,y,max,min
      INTEGER i,pra

      IF(Sg.EQ.1.0D0) THEN
        CALL PARTICLE(dae,SHAPE,DENS,PSTH,D)
        CALL SUBDEPOS(FRC, VET, VBB, VBP, D0, D9, B, VT, V, D16,FN,u,
      $DAE,ET1,ET2,BB,bbI,AL,DTOT,PSTH,D)
        ET11=ET1
        ET21=ET2
        BB1=BB
        BB11=BB1
        AL1=AL
        DTOT1=DTOT
      ELSE

        pra=NUM
        max=100.0D0
        min=dae-4*Sg
        if(min.lt.1E-4) THEN
          min=0.0001D0
        END IF

```

```

      ET11=0.0D0
      ET21=0.0D0
      BB1=0.0D0
      bbI1=0.0D0
      AL1=0.0D0
      DTOT1=0.0D0
      SUMP=0.0D0

      do I=1,NUM
c Linear diameter's increase (100 size bins)
          EKTH=min+(i-1)*(max-min)/pra
          DP=ekth
c      Calculate particle's parameters (for particles having the limit diameters of
each size bin)...
          CALL PARTICLE(dp,SHAPE,DENS,PSTH,D)
c      ....and deposition in the respiratory tract
          call Subdepos(FRC, VET, VBB, VBP, D0, D9, B, VT, V, D16,
$fn,u,Dp,ET1,ET2,BB,bbI,AL,DTOT,PSTH,D)
c      Calculate amount of particles with diameters less than DP...
          x=(Slog(dp/dae))/(2*0.5)/Slog(Sg)
          call errorfunction(x,y)
c      ...using the cumulative log-normal distribution function (FM)
          FM(i)=0.5+0.5*y

          T1(i)=ET1
          T2(i)=ET2
          BA(i)=BB
          bI(i)=bbI
          L(i)=AL
          TOT(i)=DTOT
      write(19,'(8F10.4)') DP,FM(i), ET1, ET2, BB, bbI, AL, 100*DTOT
      enddo

      p(1)=FM(1)
      SUMP=P(1)
      do i=2,num
          p(i)=FM(i)-FM(i-1)
          SUMP=SUMP+P(I)
      enddo

      DO I=1,num
          ET11=ET11+T1(I)*p(i)
          ET21=ET21+T2(I)*p(i)
          BB1=BB1+BA(I)*p(i)
          bbI1=bbI1+bI(I)*p(i)
          AL1=AL1+l(I)*p(i)
          DTOT1=DTOT1+TOT(I)*p(i)
      ENDDO
      write(2890,*) sump
      ENDIF

      RETURN
      END

C~~~~~
C~~~~~
C~~~~~

      subroutine masses(n1,n2,MTMAS,fifty1,fifty2,sigma1,sigma2,
$fraction)

c
c      Returns the parameters for the longnormal mass distribution of
c      the particles
c

      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)
      integer n1,n2,i
      real*8 sumass1,sumass2,p1,p2,fifty1,fifty2,efour1,efour2,sigma1,
$sigma2,fraction,p11,p21,la, cumass1(n1),cumass2(n2-n1+1),
$meancutoffs(n2), mass(n2),meancutoffs1(n1),percent2(n2-n1+1),
$meancutoffs2(n2-n1+1),mean1(n1),mean2(n2-n1+1),percent1(n1),

```

```

$MTMAS (N2)

DO I=1,N2
    MASS (I) =MTMAS (I)
ENDDO

open (11,file='meancutoffs.txt',status='old')
read(11,*) (meancutoffs(i), I=1,n2)
close(11)

cumass1(1)=mass(1)
do i=2,n1
    cumass1(i)=cumass1(i-1)+mass(i)
enddo

sumass1=cumass1(n1)

do i=1,n1
    la=0.0
    percent1(i)=100*cumass1(i)/sumass1
    meancutoffs1(i)=meancutoffs(i)
    la=meancutoffs1(i)
    mean1(i)=dlog10(la)
enddo

cumass2(1)=mass(n1)
do i=2,(n2-n1+1)
    cumass2(i)=cumass2(i-1)+mass(n1+i-1)
enddo

sumass2=cumass2(n2-n1+1) !-mass(n1)

do i=1,(n2-n1+1)
    la=0.0
    percent2(i)=100*cumass2(i)/sumass2
    meancutoffs2(i)=meancutoffs(n1-1+i)
    la=meancutoffs2(i)
    mean2(i)=dlog10(la)
enddo

fifty1=0.0
efour1=0.0
do i=1,n1-1
    p1=percent1(i)
    p2=percent1(i+1)
    if(p1.le.50.0.and.p2.ge.50.0D0) then
        fifty1=10**(mean1(i)+(mean1(i+1)-mean1(i))*(50.0D0-p1)/(p2-
$pl))
    else
        fifty1=fifty1
    endif

    if(p1.le.84.0.and.p2.ge.84.0) then
        efour1=10**(mean1(i)+(mean1(i+1)-mean1(i))*(84.0D0-p1)/(p2-
$pl))
    else
        efour1=efour1
    endif
enddo

fifty2=0.0
efour2=0.0
do i=1,n2-n1
    p11=percent2(i)
    p21=percent2(i+1)
    if(p11.le.50.0.and.p21.ge.50.0) then
        fifty2=10**(mean2(i)+(mean2(i+1)-mean2(i))*(50.0D0-p11)/(p2
$1-p11))
    else
        fifty2=fifty2
    endif

    if(p11.le.84.0.and.p21.ge.84.0) then
        efour2=10**(mean2(i)+(mean2(i+1)-mean2(i))*(84.0D0-p11)/(p2
$1-p11))
    else

```



```

                efour2=efour2
            endif
        enddo

        sigma1=efour1/fifty1
        sigma2=efour2/fifty2
        fraction=round((sumass1/(sumass1+sumass2-mass(n1))),4)

        RETURN
    END

C~~~~~
C~~~~~
C~~~~~

        Subroutine POLYDISP_CLEAR(DAE,SHAPE,DENS,TIMEAA,ENDTIMEAA,AL,
        $BBI,BB,ET2,ET2_sur,ET_seq,LNet,BB_gel,BB_sol,BB_seq,BBI_
        $gel,BBI_sol,BBI_seq,AL_,AL_T,LNth,INVC,EIGENVEC,EIGENVAL,RF,
        $stepperday,Sg,hday,RET,RET1,RESTIME,BLOODS)

C
C      Returns the retention of polydisperse or monodisperse aerosol
C      particles in each region of the respiratory tract
C
C
        real x,y,max,min,y1,x1,NUM
        INTEGER i,pra,TIMEAA,ENDTIMEAA,RF,stepperday,hday,J,K
        REAL*8 SG,DAE,SHAPE,DENS,AL,BBI,BB,ET2,ET2_sur,ET_seq,LNet,BB_gel,
        $BB_sol,BB_seq,BBI_gel,BBI_sol,BBI_seq,AL_,AL_T,LNth,INVC(15,15),
        $EIGENVEC(15,15),EIGENVAL(15),ET2_surF_O,ET_seqF_O,LNetF_O,BB_gelF_
        $O,BB_solF_O,BB_seqF_O,BBI_gelF_O,BBI_solF_O,BBI_seqF_O,ALF_O,BLOOD
        $,AL_TF_O,LNthF_O,step,DP,P,EKTH,RET(12,10080),RET1(12,10080),fm(10
        $),RETS(12,10080),RETS1(12,10080),RESTIME,SUMP,BLOODS

        DO K=1,12
            DO J=1,10080
                RET(K,J)=0.0D0
                RET1(K,J)=0.0D0
            ENDDO
        ENDDO

        IF(Sg.EQ.1.0D0) THEN
            CALL CLEARtrac1(DAE,SHAPE,DENS,TIMEAA,ENDTIMEAA,AL,BBI,BB,ET2,
            $ET2_sur,ET_seq,LNet,BB_gel,BB_sol,BB_seq,BBI_gel,BBI_sol,BBI_seq,
            $AL_,AL_T,LNth,INVC,EIGENVEC,EIGENVAL,RF,stepperday,hday,RET,RET1,R
            $ESTIME,BLOODS)
        ELSE

            NUM=10
            pra=NUM
C            max=2.0d0*DAE*Sg
C            min=dae/(2.0d0*Sg)

            max=DAE+4.0D0*SG
            min=dae-4.0D0*Sg

            if(min.lt.1E-3) THEN
                min=0.001D0
            END IF

            step=(max-min)/(num)

            ET2_sur=0.0D0
            ET_seq=0.0D0
            LNet=0.0D0
            BB_gel=0.0D0
            BB_sol=0.0D0
            BB_seq=0.0D0
            BBI_gel=0.0D0
            BBI_sol=0.0D0
            BBI_seq=0.0D0
            AL_=0.0D0
            AL_T=0.0D0
            LNth=0.0D0
            BLOODS=0.0D0

```

```

SUMP=0.0D0

do I=1,NUM
    EKTH=min+(i-1)*(max-min)/pra
    DP=ekth
    CALL CLEARtrac1(DP,SHAPE,DENS,TIMEAA,ENDTIMEAA,AL,BBI,BB,
$ET2,ET2_surF_O,ET_seqF_O,LNetF_O,BB_gelF_O,BB_solF_O,BB_seqF_O,
$BBI_gelF_O,BBI_solF_O,BBI_seqF_O,ALF_O,AL_TF_O,LNthF_O,INVC,
$EIGENVEC,EIGENVAL,RF,stepperday,hday,RETS,RETS1,RESTIME,BLOOD)
C    Calculate amount of particles with diameters less than DP...
        x=(log(dp*(1.0D0/dae)))/(2.0D0*0.5D0)/log(Sg)
        call errorfunction(x,y)
c    ...using the cumulative log-normal distribution function (FM)
        FM(i)=0.5+0.5*y

        if(i.eq.1) then
            p=fm(i)
        else
            p=fm(i)-fm(i-1)
        endif
        if(p.lt.0.0D0) p=0.0D0
        ET2_sur=ET2_sur+ET2_surF_O*p
        ET_seq=ET_seq+ET_seqF_O*p
        LNet=LNet+LNetF_O*p
        BB_gel=BB_gel+BB_gelF_O*p
        BB_sol=BB_sol+BB_solF_O*p
        BB_seq=BB_seq+BB_seqF_O*p
        BBI_gel=BBI_gel+BBI_gelF_O*p
        BBI_sol=BBI_sol+BBI_solF_O*p
        BBI_seq=BBI_seq+BBI_seqF_O*p
        AL_=AL_+ALF_O*p
        AL_T=AL_T+AL_TF_O*p
        LNth=LNth+LNthF_O*p
        BLOODS=BLOODS+BLOOD*p
        SUMP=SUMP+p
        DO K=1,12
            DO J=1,10080
                RET(K,J)=RET(K,J)+RETS(K,J)*P
                RET1(K,J)=RET1(K,J)+RETS1(K,J)*P
            ENDDO
        ENDDO
    enddo

    IF(SUMP.LT.1.0D0) THEN
        ET2_sur=ET2_sur*(1.0D0/SUMP)
        ET_seq=ET_seq*(1.0D0/SUMP)
        LNet=LNet*(1.0D0/SUMP)
        BB_gel=BB_gel*(1.0D0/SUMP)
        BB_sol=BB_sol*(1.0D0/SUMP)
        BB_seq=BB_seq*(1.0D0/SUMP)
        BBI_gel=BBI_gel*(1.0D0/SUMP)
        BBI_sol=BBI_sol*(1.0D0/SUMP)
        BBI_seq=BBI_seq*(1.0D0/SUMP)
        AL_=AL_*(1.0D0/SUMP)
        AL_T=AL_T*(1.0D0/SUMP)
        LNth=LNth*(1.0D0/SUMP)
        BLOODS=BLOODS*(1.0D0/SUMP)
        DO K=1,12
            DO J=1,10080
                RET(K,J)=RET(K,J)*(1.0D0/SUMP)
                RET1(K,J)=RET1(K,J)*(1.0D0/SUMP)
            ENDDO
        ENDDO
    ENDIF

c    write(1689,'(5F10.4)') DP,sump,min,max,dp+step
endif

RETURN
END

C~~~~~
C~~~~~

```

```

C~~~~~

      SUBROUTINE OSLO(INDAYS,INDATADAY, FRC, VET, VBB, VBP, D0, D9, B_RE
      $AD, VT_READ,V_READ, D16)

C
C      Returns the dose and retention of particles in the respiratory tract
C      for variable exposure scenarios using the activity patterns given
C      in the Manual
C

      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
      PARAMETER (IHOURL=24)

      INTEGER N1,N2,i,day,hour,RF,COUNTLIGHT,COUNTSLEEP,j,fj,ENDS,
      $COUNTSIT,COUNTHEAVY,COUNTMIF,COUNTMIC,COUNTMOF,COUNTMOC,COUNTAIR,
      $TIMEAA,ENDTIMEAA,CLASS,DAYS,DATADAY,clear,stepperday,IHOURS,HDAY
      REAL*8 dens,shape,FN,FRC, VET, VBB, VBP, D0, D9, B, VT, V, D16,sig
      $mal,sigma2,fifty1,fifty2,CONCINF,CONCINC,CONCOUTF,CONCOUTC,AIRVELO
      $CITYOUT,SUMMTMAS,FRACTION,SUMAIRVELOCITY,SUMCONCINF,SUMCONCOUTF,SU
      $MCONCINC,SUMCONCOUTC,SUMEXERCISE,MEANAIRVELOCITY,MEANCONCINF,MEANC
      $ONCOUTF,MEANCONCINC,MEANCONCOUTC,MEANEXERCISE,EXERCISE,DAE,ET1,ET2
      $,BB,bbI,Al,DTOT,ET11,ET22,BBB,bbII,All,DTOTT,FN_READ,Sg,B_READ,
      $VT_READ, V_READ,TOTAL_DOSEFI,TOTAL_DOSECI,TOTAL_DOSEFO,
      $TOTAL_DOSECO,INVC(15,15),EIGENVEC(15,15),EIGENVAL(15),

!
      $MEANET1_DOSEO,MEANET2_DOSEO,MEANBB_DOSEO,MEANBBI_DOSEO,
      $MEANAL_DOSEO,MEANTOTAL_DOSEO,MEANET1_DOSEI,MEANET2_DOSEI,
      $MEANBB_DOSEI,MEANBBI_DOSEI,MEANAL_DOSEI,MEANTOTAL_DOSEI,MTMAS(8),

!
      $U,DAILYET1_DOSEFI,DAILYET2_DOSEFI,DAILYBB_DOSEFI,DAILYBBI_DOSEFI,
      $DAILYAL_DOSEFI,DAILYTOTAL_DOSEFI,DAILYET1_DOSECI,DAILYET2_DOSECI
      $,DAILYBB_DOSECI,DAILYBBI_DOSECI,DAILYAL_DOSECI,DAILYTOTAL_DOSECI,D
      $AILYET1_DOSEI,DAILYET2_DOSEI,DAILYBB_DOSEI,DAILYBBI_DOSEI,DAILYAL_
      $DOSEI,DAILYTOTAL_DOSEI,DAILYET1_DOSEFO,DAILYET2_DOSEFO,DAILYBB_DOS
      $EFO,DAILYBBI_DOSEFO,DAILYAL_DOSEFO,DAILYTOTAL_DOSEFO,DAILYET1_DOSE
      $CO,DAILYET2_DOSECO,DAILYBB_DOSECO,DAILYBBI_DOSECO,DAILYAL_DOSECO,D
      $AILYTOTAL_DOSECO,DAILYET1_DOSEO,DAILYET2_DOSEO,DAILYBB_DOSEO,DAILY
      $BBI_DOSEO,DAILYAL_DOSEO,DAILYTOTAL_DOSEO,SET2_surF_O,ET2_surF_O,SE
      $T_seqF_O,ET_seqF_O,SLNetF_O,LNetF_O,SBB_gelF_O, BB_gelF_O,SBB_solF
      $_O, BB_solF_O,SBB_seqF_O,BB_seqF_O,SBBI_gelF_O,BBI_gelF_O,SBBI_sol
      $F_O,BBI_solF_O,SBBI_seqF_O,BBI_seqF_O,SALF_O,ALF_O,SAL_TF_O,AL_TF_
      $O,SLNthF_O,LNthF_O,SET2_surF_I,ET2_surF_I,SET_seqF_I,ET_seqF_I,SLN
      $etF_I,LNetF_I,SBB_gelF_I,BB_gelF_I,SBB_solF_I,BB_solF_I,SBB_seqF_I
      $,BB_seqF_I,SBBI_gelF_I,BBI_gelF_I,SBBI_solF_I,BBI_solF_I,SBBI_seqF
      $_I,BBI_seqF_I,SALF_I,ALF_I,SAL_TF_I,AL_TF_I,SLNthF_I,LNthF_I,DET2_
      $$surF_O,DET_seqF_O,DLNetF_O,DBB_gelF_O,DBB_solF_O,DBB_seqF_O,DBBI_g
      $elF_O,DBBI_solF_O,DBBI_seqF_O,DALF_O,DAL_TF_O,DLNthF_O,DET2_surF_I
      $,DET_seqF_I,DLNetF_I,DBB_gelF_I,DBB_solF_I,DBB_seqF_I,DBBI_gelF_I,
      $DBBI_solF_I,DBBI_seqF_I,DALF_I,DAL_TF_I,DLNthF_I,SET2_surC_O,ET2_s
      $urC_O,SET_seqC_O,ET_seqC_O,SLNetC_O,LNetC_O,SBB_gelC_O, BB_gelC_O,
      $$SBB_solC_O, BB_solC_O,SBB_seqC_O,BB_seqC_O,SBBI_gelC_O,BBI_gelC_O,
      $$SBBI_solC_O,BBI_solC_O,SBBI_seqC_O,BBI_seqC_O,SALC_O,ALC_O,SAL_TC_
      $O,AL_TC_O,SLNthC_O,LNthC_O,SET2_surC_I,ET2_surC_I,SET_seqC_I,ET_se
      $qC_I,SLNetC_I,LNetC_I,SBB_gelC_I,BB_gelC_I,SBB_solC_I,BB_solC_I,SB
      $B_seqC_I,BB_seqC_I,SBBI_gelC_I,BBI_gelC_I,SBBI_solC_I,BBI_solC_I,
      $$SBBI_seqC_I,BBI_seqC_I,SALC_I,ALC_I,SAL_TC_I,AL_TC_I,SLNthC_I,
      $LNthC_I,DET2_surC_O,DET_seqC_O,DLNetC_O,DBB_gelC_O,DBB_solC_O,
      $DBB_seqC_O,DBBI_gelC_O,DBBI_solC_O,DBBI_seqC_O,DALC_O,DAL_TC_O,
      $DLNthC_O,DET2_surC_I,DET_seqC_I,DLNetC_I,DBB_gelC_I,DBB_solC_I,
      $DBB_seqC_I,DBBI_gelC_I,DBBI_solC_I,DBBI_seqC_I,DALC_I,DAL_TC_I,
      $DLNthC_I,S,ET1_DOSEI,ET2_DOSEI,BB_DOSEI,BBI_DOSEI,AL_DOSEI,TOTAL_D
      $OSEI,ET1_DOSEO,ET2_DOSEO,BB_DOSEO,BBI_DOSEO,AL_DOSEO,TOTAL_DOSEO,
      $AET1_DOSEFO,AET2_DOSEFO,ABB_DOSEFO,ABBI_DOSEFO,AAL_DOSEFO,ATOTAL_D
      $OSEFO,AET1_DOSEFI,AET2_DOSEFI,ABB_DOSEFI,ABBI_DOSEFI,AAL_DOSEFI,AT
      $OTAL_DOSEFI,AET1_DOSECO,AET2_DOSECO,ABB_DOSECO,ABBI_DOSECO,AAL_DOS
      $ECO,ATOTAL_DOSECO,AET1_DOSECI,AET2_DOSECI,ABB_DOSECI,ABBI_DOSECI,A
      $AL_DOSECI,ATOTAL_DOSECI,ET2_FO,BB_FO,BBI_FO,AL_FO,ET2_FI,BB_FI,BBI
      $_FI,AL_FI,ET2_CO,BB_CO,BBI_CO,AL_CO,ET2_CI,BB_CI,BBI_CI,AL_CI,RETF
      $_OT(12,10080),RETF_O(12,10080),RETF_IT(12,10080),RETF_I(12,10080),
      $RETC_OT(12,10080),RETC_O(12,10080),RETC_IT(12,10080),RETC_I(12,100
      $80),KDAY,INDAYS,INDATADAY,MEION,RET1F_OT(12,10080),RET1F_O(12,1008
      $0),RET1F_IT(12,10080),RET1F_I(12,10080),RET1C_OT(12,10080),RET1C_O
      $(12,10080),RET1C_IT(12,10080),RET1C_I(12,10080),RESTIME,STOPS,BLOO
      $DF_O,BLOODF_I,BLOODC_O,BLOODC_I,SBLOODF_O,SBLOODF_I,SBLOODC_O,SBLO
      $ODC_I,DBLOODF_O,DBLOODF_I,DBLOODC_O,DBLOODC_I,SUMDOSEO,SUMDOSEI

```

```
character infile*12,STARTDATE*9,STARTHOUR*10,ENDDATE*10,ENDHOUR*11
$,acceptit,x,INFILE1*16,our(24),x3
```

```
LOGICAL DAF(16)
```

```
real*8, allocatable:: ET1_DOSEFI(:, :), ET2_DOSEFI(:, :), BB_DOSEFI(:, :),
$, BBI_DOSEFI(:, :), AL_DOSEFI(:, :), ET1_DOSEFO(:, :), ET2_DOSEFO(:, :),
$, BB_DOSEFO(:, :), BBI_DOSEFO(:, :), AL_DOSEFO(:, :), ET1_DOSECI(:, :), ET2
$_DOSECI(:, :), BB_DOSECI(:, :), BBI_DOSECI(:, :), AL_DOSECI(:, :), ET1_DOS
$ECO(:, :), ET2_DOSECO(:, :), BB_DOSECO(:, :), BBI_DOSECO(:, :), AL_DOSECO(
$, :, :), RFS(:, :), DAEFINE(:, :), DAECOARSE(:, :), SGFINE(:, :), SGCOARSE(:, :)
```

```
data our/'1','2','3','4','5','6','7','8','9','10','11','12','13',
'$14','15','16','17','18','19','20','21','22','23','24'/'
```

```
DO I=1,12
  DO J=1,10080
    RETC_IT(I,J)=0.0D0
    RET1C_IT(I,J)=0.0D0
    RETF_IT(I,J)=0.0D0
    RET1F_IT(I,J)=0.0D0
    RETC_OT(I,J)=0.0D0
    RET1C_OT(I,J)=0.0D0
    RETF_OT(I,J)=0.0D0
    RET1F_OT(I,J)=0.0D0
```

```
  ENDDO
```

```
ENDDO
```

```
FN_READ=-1
DO WHILE (FN_READ.LT.0d0 .OR. FN_READ.GT.1d0)
  WRITE(*,1)
  READ(*,*) FN_READ
```

```
END DO
```

```
PRINT*
```

```
dens=0
```

```
DO WHILE(dens.LE.0d0)
  WRITE(*,2)
  read(*,*) dens
```

```
END DO
```

```
PRINT*
```

```
shape=-1
```

```
DO WHILE(shape.LT.0d0. OR. shape.GT.2d0)
  WRITE(*,3)
  read(*,*) shape
```

```
END DO
```

```
PRINT*
```

```
OPEN(UNIT=3,FILE='FOROSLODOSE.TXT')
```

```
PRINT*, 'GIVE INPUT FILE (EXPOSURE DATA):'
READ(*,'(A16)') INFILE1
PRINT*
```

```
open(unit=800,file=INFILE1,status='old')
open(unit=900,file='ResultsDose.txt')
open(UNIT=1000,FILE='AverageResultsDose.txt')
open(unit=1001,file='DailySumDose.txt')
open(unit=1002,file='checkinput.txt')
OPEN(UNIT=1004,file='RetentionFINE_indoors.txt')
open(unit=1005,file='RetentionCOARSE_indoors.txt')
open(unit=1006,file='RetentionTOTAL_indoors.txt')
OPEN(UNIT=1007,file='RetentionFINE_outdoors.txt')
open(unit=1008,file='RetentionCOARSE_outdoors.txt')
open(unit=1009,file='RetentionTOTAL_outdoors.txt')
```

```
WRITE(900,6)
write(900,61)
WRITE(1000,7)
WRITE(1001,8)
```

```
infile=' '
DO WHILE(infile.eq.' ')
  WRITE(*,5)
  read(*,*) infile
```

```
END DO
```

```
print*
```

```

DAYS=INT(ROUND(IN DAYS,0))
DATADAY=INT(ROUND(IN DATADAY,0))
IF((IN DAYS-DAYS).GT.0.0D0) DAYS=DAYS+1
IF((IN DATADAY-DATADAY).GT.0.0D0) DATADAY=DATADAY+1

```

```

ALLOCATE(ET1_DOSEFI(IHOUR,DAYS),ET2_DOSEFI(IHOUR,DAYS),BB_DOSEFI(I
$HOUR,DAYS),BBI_DOSEFI(IHOUR,DAYS),AL_DOSEFI(IHOUR,DAYS),ET1_DOSEF
$O(IHOUR,DAYS),ET2_DOSEFO(IHOUR,DAYS),BB_DOSEFO(IHOUR,DAYS),BBI_DOS
$EFO(IHOUR,DAYS),AL_DOSEFO(IHOUR,DAYS),ET1_DOSECI(IHOUR,DAYS),ET2_D
$OSEC(IHOUR,DAYS),BB_DOSECI(IHOUR,DAYS),BBI_DOSECI(IHOUR,DAYS),AL_
$DOSECI(IHOUR,DAYS),ET1_DOSECO(IHOUR,DAYS),ET2_DOSECO(IHOUR,DAYS),B
$B_DOSECO(IHOUR,DAYS),BBI_DOSECO(IHOUR,DAYS),AL_DOSECO(IHOUR,DAYS),
$RFS(IHOUR,DAYS),DAEFINE(DAYS),DAECOARSE(DAYS),SGFINE(DAYS),SGCOARS
$E(DAYS))

```

```

SUMDOSEO=0.0D0
SUMDOSEI=0.0D0

```

```

DO day=1,DAYS
  SUMMTMAS=0.0D0
  SUMAIRVELOCITY=0.0D0
  SUMCONCINF=0.0D0
  SUMCONCOUTF=0.0D0
  SUMCONCINC=0.0D0
  SUMCONCOUTC=0.0D0
  SUMEXERCISE=0.0D0
  COUNTLIGHT=0
  COUNTSLEEP=0
  COUNTSIT=0
  COUNTHEAVY=0
  COUNTMI=0
  COUNTMO=0

```

```

DAILYET1_DOSEFI=0.0D0
DAILYET2_DOSEFI=0.0D0
DAILYBB_DOSEFI=0.0D0
DAILYBBI_DOSEFI=0.0D0
DAILYAL_DOSEFI=0.0D0
DAILYTOTAL_DOSEFI=0.0D0
DAILYET1_DOSECI=0.0D0
DAILYET2_DOSECI=0.0D0
DAILYBB_DOSECI=0.0D0
DAILYBBI_DOSECI=0.0D0
DAILYAL_DOSECI=0.0D0
DAILYTOTAL_DOSECI=0.0D0
DAILYET1_DOSEI=0.0D0
DAILYET2_DOSEI=0.0D0
DAILYBB_DOSEI=0.0D0
DAILYBBI_DOSEI=0.0D0
DAILYAL_DOSEI=0.0D0
DAILYTOTAL_DOSEI=0.0D0
DAILYET1_DOSEFO=0.0D0
DAILYET2_DOSEFO=0.0D0
DAILYBB_DOSEFO=0.0D0
DAILYBBI_DOSEFO=0.0D0
DAILYAL_DOSEFO=0.0D0
DAILYTOTAL_DOSEFO=0.0D0
DAILYET1_DOSECO=0.0D0
DAILYET2_DOSECO=0.0D0
DAILYBB_DOSECO=0.0D0
DAILYBBI_DOSECO=0.0D0
DAILYAL_DOSECO=0.0D0
DAILYTOTAL_DOSECO=0.0D0
DAILYET1_DOSEO=0.0D0
DAILYET2_DOSEO=0.0D0
DAILYBB_DOSEO=0.0D0
DAILYBBI_DOSEO=0.0D0
DAILYAL_DOSEO=0.0D0
DAILYTOTAL_DOSEO=0.0D0

```

```

IF(DAY.LE.DATADAY) THEN !=====
  print*, '-----'
  write(*, '(a4,i2)') 'DAY:', day

```

```

CALL GRAPH(N1,infile,day,MTMAS)
write(*,'(A3,I2)') 'N1:',N1
N2=8
!
write(*,'(A3,I2)') 'N2:',N2

DO I=1,N2
    SUMMTMAS=SUMMTMAS+MTMAS(I)
ENDDO

IF(SUMMTMAS.NE.0) THEN
    print*
    PRINT*, 'PLEASE CHECK IF N1 IS ACCEPTED'
    PRINT*, 'ACCEPT N1? (Y/N) '
    READ(*,'(A1)') ACCEPTIT
    IF(ACCEPTIT.NE.'Y'.AND.ACCEPTIT.NE.'y') THEN
        PRINT*, 'GIVE NEW N1:'
        READ(*,'(I1)') N1
        write(*,'(A3,I2)') 'N1:',N1
    ELSE
        CONTINUE
    ENDIF

    IF(N1.NE.0) THEN

c      Calculate distribution parameters
        call
masses(N1,N2,MTMAS,fifty1,fifty2,sigma1,sigma
$2,fraction)
c      Calculate deposition of fine mode
        daefine(DAY)=round(fifty1,4)
        Sgfine(DAY)=round(sigma1,4)
c      Calculate deposition of coarse mode
        daecoarse(DAY)=round(fifty2,4)
        Sgcoarse(DAY)=round(sigma2,4)

        WRITE(3,'(5E12.4)')

DAEFINE,SGFINE,DAECOARSE,SGCOA
$RSE,FRACTION

        ELSE
            SUMMTMAS=0.0D0
        ENDIF
    ENDIF

    IF(DAY.LT.DAYS) THEN
        IHOURS=IHOUR
    ELSE
        MEION=INDAYS-DAYS
c      PRINT*,MEION
        IF(MEION.EQ.0.0D0) THEN
            IHOURS=IHOUR
        ELSE
            IF(MEION.LT.0.0D0.AND.INDAYS.LT.1.0D0) MEION=INDAYS
            IF(MEION.LT.0.0D0.AND.INDAYS.GT.1.0D0) MEION=1+INDAYS-
$DAYS
            IHOURS=INT(ROUND((MEION*24.0D0),0))
        ENDIF
    ENDIF

C-----CONTINUOUS DAILY DOSE-----

DO hour=1,IHOURS

    READ(800,'(A9,A10,A10,A11,f11.2,3f13.2,f10.2,f12.2)') START
$DATE,STARTHOUR,ENDDATE,ENDHOUR,CONCINF,CONCINC,CONCOUTF,CONCOUTC,A
$IRVELOCITYOUT,EXERCISE
    write(1002,'(A9,A10,A10,A11,f11.2,3f13.2,f10.2,f12.2)') ST
$ARTDATE,STARTHOUR,ENDDATE,ENDHOUR,CONCINF,CONCINC,CONCOUTF,CONCOUT
$C,AIRVELOCITYOUT,EXERCISE

    IF(AIRVELOCITYOUT.LT.0) AIRVELOCITYOUT=-1.0D0*AIRVELOCITYOUT
    IF(AIRVELOCITYOUT.NE.9999.99D0) THEN
        SUMAIRVELOCITY=SUMAIRVELOCITY+AIRVELOCITYOUT
    ELSE

```

```

COUNTAIR=COUNTAIR+1
ENDIF

IF (CONCOUTF.EQ.9999.99D0) COUNTMOF=COUNTMOF+1
IF (CONCOUTC.EQ.9999.99D0) COUNTMOC=COUNTMOC+1
IF (CONCINF.EQ.9999.99D0) COUNTMIF=COUNTMIF+1
IF (CONCINC.EQ.9999.99D0) COUNTMIC=COUNTMIC+1

SUMEXERCISE=SUMEXERCISE+EXERCISE

IF (EXERCISE.EQ.0.45D0) then
COUNTSLEEP=COUNTSLEEP+1
endif

IF (EXERCISE.EQ.1.50D0) then
COUNTLIGHT=COUNTLIGHT+1
endif
IF (EXERCISE.EQ.0.54D0) then
COUNTSIT=COUNTSIT+1
endif
IF (EXERCISE.EQ.3D0) then
COUNTHEAVY=COUNTHEAVY+1
endif

IF ((AIRVELOCITYOUT.NE.9999.99D0).AND.(EXERCISE.NE.9999.99D0).AND.
$(SUMMTMAS.NE.0.0D0)) THEN

C***** OUTDOOR dose *****

B=B_READ
VT=VT_READ
V=V_READ
RF=20
FN=FN_READ

C FINE DOSE OUTDOORS
IF ((CONCOUTF.NE.9999.99D0).AND.(CONCOUTF.GE.0.0D0)) THEN

SUMCONCOUTF=SUMCONCOUTF+CONCOUTF
DAE=DAEFINE(DAY)
SG=SGFINE(DAY)
CALL POLYDISPERSE2(FRC, VET, VBB, VBP, D0, D9, B, VT, V,
$D16, FN, dens, shape, AIRVELOCITYOUT, dae, ET1, ET2, BB, bbI, Al, DTOT, Sg)

ET1_DOSEFO(HOUR, DAY)=B*CONCOUTF*fraction*ET1*0.01D0
ET2_DOSEFO(HOUR, DAY)=B*CONCOUTF*fraction*ET2*0.01D0
BB_DOSEFO(HOUR, DAY)=B*CONCOUTF*fraction*BB*0.01D0
bbI_DOSEFO(HOUR, DAY)=B*CONCOUTF*fraction*bbI*0.01D0
AL_DOSEFO(HOUR, DAY)=B*CONCOUTF*fraction*Al*0.01D0
TOTAL_DOSEFO=B*CONCOUTF*fraction*DTOT*0.01D0

ELSE
ET1_DOSEFO(HOUR, DAY)=0.0D0
ET2_DOSEFO(HOUR, DAY)=0.0D0
BB_DOSEFO(HOUR, DAY)=0.0D0
bbI_DOSEFO(HOUR, DAY)=0.0D0
AL_DOSEFO(HOUR, DAY)=0.0D0
TOTAL_DOSEFO=0.0D0
ENDIF

C COARSE DOSE OUTDOORS
IF ((CONCOUTC.NE.9999.99D0).AND.(CONCOUTC.GE.0.0D0)) THEN
SUMCONCOUTC=SUMCONCOUTC+CONCOUTC
DAE=DAECOARSE(DAY)
SG=SGCOARSE(DAY)
CALL POLYDISPERSE2(FRC, VET, VBB, VBP, D0, D9, B, VT, V,
$D16, FN, dens, shape, AIRVELOCITYOUT, dae, ET11, ET22, BBB, bbII, All,
$DTOTT, Sg)

ET1_DOSECO(HOUR, DAY)=B*CONCOUTC*(1-fraction)*ET11*0.01D0
ET2_DOSECO(HOUR, DAY)=B*CONCOUTC*(1-fraction)*ET22*0.01D0
BB_DOSECO(HOUR, DAY)=B*CONCOUTC*(1-fraction)*BBB*0.01D0
bbII_DOSECO(HOUR, DAY)=B*CONCOUTC*(1-fraction)*bbII*0.01D0

```

```

        AL_DOSECO (HOUR, DAY) = B * CONCOUTC * (1 - fraction) * All * 0.01D0
        TOTAL_DOSECO = B * CONCOUTC * (1 - fraction) * DTOT * 0.01D0
    ELSE
        ET1_DOSECO (HOUR, DAY) = 0.0D0
        ET2_DOSECO (HOUR, DAY) = 0.0D0
        BB_DOSECO (HOUR, DAY) = 0.0D0
        BBI_DOSECO (HOUR, DAY) = 0.0D0
        AL_DOSECO (HOUR, DAY) = 0.0D0
        TOTAL_DOSECO = 0.0D0
    ENDIF

C      TOTAL PARTICLES DOSE OUTDOORS
        ET1_DOSEO = ET1_DOSEFO (HOUR, DAY) + ET1_DOSECO (HOUR, DAY)
        ET2_DOSEO = ET2_DOSEFO (HOUR, DAY) + ET2_DOSECO (HOUR, DAY)
        BB_DOSEO = BB_DOSEFO (HOUR, DAY) + BB_DOSECO (HOUR, DAY)
        BBI_DOSEO = BBI_DOSEFO (HOUR, DAY) + BBI_DOSECO (HOUR, DAY)
        AL_DOSEO = AL_DOSEFO (HOUR, DAY) + AL_DOSECO (HOUR, DAY)
        TOTAL_DOSEO = TOTAL_DOSEFO + TOTAL_DOSECO

    ELSE
C      COUNTMO = COUNTMO + 1
        ET1_DOSEFO (HOUR, DAY) = 0.0d0
        ET2_DOSEFO (HOUR, DAY) = 0.0d0
        BB_DOSEFO (HOUR, DAY) = 0.0d0
        BBI_DOSEFO (HOUR, DAY) = 0.0d0
        AL_DOSEFO (HOUR, DAY) = 0.0d0
        TOTAL_DOSEFO = 0.0d0
        ET1_DOSECO (HOUR, DAY) = 0.0d0
        ET2_DOSECO (HOUR, DAY) = 0.0d0
        BB_DOSECO (HOUR, DAY) = 0.0d0
        BBI_DOSECO (HOUR, DAY) = 0.0d0
        AL_DOSECO (HOUR, DAY) = 0.0d0
        TOTAL_DOSECO = 0.0d0
        ET1_DOSEO = 0.0d0
        ET2_DOSEO = 0.0d0
        BB_DOSEO = 0.0d0
        BBI_DOSEO = 0.0d0
        AL_DOSEO = 0.0d0
        TOTAL_DOSEO = 0.0d0
    ENDIF

c***** INDOOR dose (0 air velocity is considered)*****
    IF ((EXERCISE.NE.9999.99D0).AND.(SUMMTMAS.NE.0.0D0)) THEN

        B = EXERCISE
        IF (B.EQ.1.5) THEN
            VT = 1250.0D0
            V = 833.0D0
            RF = 20
            FN = 1.0D0
            !LIGHT EXERCISE
        ELSE IF (B.EQ.0.45D0) THEN
            VT = 625.0D0
            V = 250.0D0
            RF = 12
            FN = 1.0D0
            !SLEEP
        ELSE IF (B.EQ.0.54D0) THEN
            VT = 750.0D0
            V = 300.0D0
            RF = 12
            FN = 1.0D0
            !SITTING
        ELSE
            B = 3.0D0
            VT = 1923.0D0
            V = 1667.0D0
            RF = 26
            FN = 0.5D0
            !HEAVY EXERCISE
        ENDIF

        RFS (HOUR, DAY) = RF
        U = 0.0D0

C      FINE DOSE INDOORS
        IF ((CONCINF.NE.9999.99D0).AND.(CONCINF.GE.0.0D0)) THEN
            SUMCONCINF = SUMCONCINF + CONCINF
            DAE = DAEFINE (DAY)
            SG = SGFINE (DAY)
            CALL POLYDISPERSE2 (FRC, VET, VBB, VBP, D0, D9, B, VT, V,

```



```

$D16, FN, dens, shape, u, DAE, ET1, ET2, BB, bbI, Al, DTOT, Sg)
    ET1_DOSEFI (HOUR, DAY) = B*CONCINF*fraction*ET1*0.01D0
    ET2_DOSEFI (HOUR, DAY) = B*CONCINF*fraction*ET2*0.01D0
    BB_DOSEFI (HOUR, DAY) = B*CONCINF*fraction*BB*0.01D0
    BBI_DOSEFI (HOUR, DAY) = B*CONCINF*fraction*BBI*0.01D0
    AL_DOSEFI (HOUR, DAY) = B*CONCINF*fraction*AL*0.01D0
    TOTAL_DOSEFI = B*CONCINF*fraction*DTOT*0.01D0
ELSE
    ET1_DOSEFI (HOUR, DAY) = 0.0D0
    ET2_DOSEFI (HOUR, DAY) = 0.0D0
    BB_DOSEFI (HOUR, DAY) = 0.0D0
    BBI_DOSEFI (HOUR, DAY) = 0.0D0
    AL_DOSEFI (HOUR, DAY) = 0.0D0
    TOTAL_DOSEFI = 0.0D0
ENDIF

C      COARSE DOSE INDOORS
      IF ((CONCINC.NE.9999.99D0) .AND. (CONCINC.GE.0.0D0)) THEN
          SUMCONCINC = SUMCONCINC + CONCINC
          DAE = DAECOARSE (DAY)
          SG = SGCOARSE (DAY)
          CALL POLYDISPERSE2 (FRC, VET, VBB, VBP, D0, D9, B, VT, V,
$D16, FN, dens, shape, u, DAE, ET11, ET22, BBB, bbII, All, DTOTT, Sg)
          ET1_DOSECI (HOUR, DAY) = B*CONCINC*(1-fraction)*ET11*0.01D0
          ET2_DOSECI (HOUR, DAY) = B*CONCINC*(1-fraction)*ET22*0.01D0
          BB_DOSECI (HOUR, DAY) = B*CONCINC*(1-fraction)*BBB*0.01D0
          BBI_DOSECI (HOUR, DAY) = B*CONCINC*(1-fraction)*BBI*0.01D0
          AL_DOSECI (HOUR, DAY) = B*CONCINC*(1-fraction)*ALL*0.01D0
          TOTAL_DOSECI = B*CONCINC*(1-fraction)*DTOTT*0.01D0
      ELSE
          ET1_DOSECI (HOUR, DAY) = 0.0D0
          ET2_DOSECI (HOUR, DAY) = 0.0D0
          BB_DOSECI (HOUR, DAY) = 0.0D0
          BBI_DOSECI (HOUR, DAY) = 0.0D0
          AL_DOSECI (HOUR, DAY) = 0.0D0
          TOTAL_DOSECI = 0.0D0
      ENDIF

C      TOTAL PARTICLES DOSE INDOORS
      ET1_DOSEI = ET1_DOSEFI (HOUR, DAY) + ET1_DOSECI (HOUR, DAY)
      ET2_DOSEI = ET2_DOSEFI (HOUR, DAY) + ET2_DOSECI (HOUR, DAY)
      BB_DOSEI = BB_DOSEFI (HOUR, DAY) + BB_DOSECI (HOUR, DAY)
      BBI_DOSEI = BBI_DOSEFI (HOUR, DAY) + BBI_DOSECI (HOUR, DAY)
      AL_DOSEI = AL_DOSEFI (HOUR, DAY) + AL_DOSECI (HOUR, DAY)
      TOTAL_DOSEI = TOTAL_DOSEFI + TOTAL_DOSECI

      ELSE
C      COUNTMI = COUNTMI + 1
      ET1_DOSEFI (HOUR, DAY) = 0.0d0
      ET2_DOSEFI (HOUR, DAY) = 0.0d0
      BB_DOSEFI (HOUR, DAY) = 0.0d0
      BBI_DOSEFI (HOUR, DAY) = 0.0d0
      AL_DOSEFI (HOUR, DAY) = 0.0d0
      TOTAL_DOSEFI = 0.0d0
      ET1_DOSECI (HOUR, DAY) = 0.0d0
      ET2_DOSECI (HOUR, DAY) = 0.0d0
      BB_DOSECI (HOUR, DAY) = 0.0d0
      BBI_DOSECI (HOUR, DAY) = 0.0d0
      AL_DOSECI (HOUR, DAY) = 0.0d0
      TOTAL_DOSECI = 0.0d0
      ET1_DOSEI = 0.0d0
      ET2_DOSEI = 0.0d0
      BB_DOSEI = 0.0d0
      BBI_DOSEI = 0.0d0
      AL_DOSEI = 0.0d0
      TOTAL_DOSEI = 0.0d0
      ENDIF

      WRITE (900, ' (A9,A10,A10,A11,36E16.4) ' ) STARTDATE, STARTHOUR,
$ENDDATE, ENDDHOUR, ET1_DOSEFI (HOUR, DAY), ET2_DOSEFI (HOUR, DAY), BB_DOSEFI
$I (HOUR, DAY), BBI_DOSEFI (HOUR, DAY), AL_DOSEFI (HOUR, DAY), TOTAL_DOSEFI,
$ET1_DOSECI (HOUR, DAY), ET2_DOSECI (HOUR, DAY), BB_DOSECI (HOUR, DAY), BBI_
$DOSECI (HOUR, DAY), AL_DOSECI (HOUR, DAY), TOTAL_DOSECI, ET1_DOSEI, ET2_DO
$SEI, BB_DOSEI, BBI_DOSEI, AL_DOSEI, TOTAL_DOSEI, ET1_DOSEFI (HOUR, DAY), E

```

```
$T2_DOSEFO (HOUR, DAY), BB_DOSEFO (HOUR, DAY), BBI_DOSEFO (HOUR, DAY), AL_DO
$SEFO (HOUR, DAY), TOTAL_DOSEFO, ET1_DOSECO (HOUR, DAY), ET2_DOSECO (HOUR, D
$AY), BB_DOSECO (HOUR, DAY), BBI_DOSECO (HOUR, DAY), AL_DOSECO (HOUR, DAY), T
$OTAL_DOSECO, ET1_DOSEO, ET2_DOSEO, BB_DOSEO, BBI_DOSEO, AL_DOSEO, TOTAL_
$DOSEO
```

C SUM DOSES FOR EACH DAY

```
IF (SUMMTMAS.NE.0) THEN
```

```
DAILYET1_DOSEFI=DAILYET1_DOSEFI+ET1_DOSEFI (HOUR, DAY)
DAILYET2_DOSEFI=DAILYET2_DOSEFI+ET2_DOSEFI (HOUR, DAY)
DAILYBB_DOSEFI=DAILYBB_DOSEFI+BB_DOSEFI (HOUR, DAY)
DAILYBBI_DOSEFI=DAILYBBI_DOSEFI+BBI_DOSEFI (HOUR, DAY)
DAILYAL_DOSEFI=DAILYAL_DOSEFI+AL_DOSEFI (HOUR, DAY)
DAILYTOTAL_DOSEFI=DAILYTOTAL_DOSEFI+TOTAL_DOSEFI
```

```
DAILYET1_DOSECI=DAILYET1_DOSECI+ET1_DOSECI (HOUR, DAY)
DAILYET2_DOSECI=DAILYET2_DOSECI+ET2_DOSECI (HOUR, DAY)
DAILYBB_DOSECI=DAILYBB_DOSECI+BB_DOSECI (HOUR, DAY)
DAILYBBI_DOSECI=DAILYBBI_DOSECI+BBI_DOSECI (HOUR, DAY)
DAILYAL_DOSECI=DAILYAL_DOSECI+AL_DOSECI (HOUR, DAY)
DAILYTOTAL_DOSECI=DAILYTOTAL_DOSECI+TOTAL_DOSECI
```

```
DAILYET1_DOSEI=DAILYET1_DOSEI+ET1_DOSEI
DAILYET2_DOSEI=DAILYET2_DOSEI+ET2_DOSEI
DAILYBB_DOSEI=DAILYBB_DOSEI+BB_DOSEI
DAILYBBI_DOSEI=DAILYBBI_DOSEI+BBI_DOSEI
DAILYAL_DOSEI=DAILYAL_DOSEI+AL_DOSEI
DAILYTOTAL_DOSEI=DAILYTOTAL_DOSEI+TOTAL_DOSEI
```

```
DAILYET1_DOSEFO=DAILYET1_DOSEFO+ET1_DOSEFO (HOUR, DAY)
DAILYET2_DOSEFO=DAILYET2_DOSEFO+ET2_DOSEFO (HOUR, DAY)
DAILYBB_DOSEFO=DAILYBB_DOSEFO+BB_DOSEFO (HOUR, DAY)
DAILYBBI_DOSEFO=DAILYBBI_DOSEFO+BBI_DOSEFO (HOUR, DAY)
DAILYAL_DOSEFO=DAILYAL_DOSEFO+AL_DOSEFO (HOUR, DAY)
DAILYTOTAL_DOSEFO=DAILYTOTAL_DOSEFO+TOTAL_DOSEFO
```

```
DAILYET1_DOSECO=DAILYET1_DOSECO+ET1_DOSECO (HOUR, DAY)
DAILYET2_DOSECO=DAILYET2_DOSECO+ET2_DOSECO (HOUR, DAY)
DAILYBB_DOSECO=DAILYBB_DOSECO+BB_DOSECO (HOUR, DAY)
DAILYBBI_DOSECO=DAILYBBI_DOSECO+BBI_DOSECO (HOUR, DAY)
DAILYAL_DOSECO=DAILYAL_DOSECO+AL_DOSECO (HOUR, DAY)
DAILYTOTAL_DOSECO=DAILYTOTAL_DOSECO+TOTAL_DOSECO
```

```
DAILYET1_DOSEO=DAILYET1_DOSEO+ET1_DOSEO
DAILYET2_DOSEO=DAILYET2_DOSEO+ET2_DOSEO
DAILYBB_DOSEO=DAILYBB_DOSEO+BB_DOSEO
DAILYBBI_DOSEO=DAILYBBI_DOSEO+BBI_DOSEO
DAILYAL_DOSEO=DAILYAL_DOSEO+AL_DOSEO
DAILYTOTAL_DOSEO=DAILYTOTAL_DOSEO+TOTAL_DOSEO
```

```
ENDIF
```

```
ENDDO !HOUR
```

```
WRITE (1001, ' (A9,A10,36E16.4) ' ) STARTDATE, ENDDATE, DAILYET1_DOS
$EFI, DAILYET2_DOSEFI, DAILYBB_DOSEFI, DAILYBBI_DOSEFI, DAILYAL_DOSEFI,
$DAILYTOTAL_DOSEFI, DAILYET1_DOSECI, DAILYET2_DOSECI, DAILYBB_DOSECI, D
$AILYBBI_DOSECI, DAILYAL_DOSECI, DAILYTOTAL_DOSECI, DAILYET1_DOSEI, DAI
$LYET2_DOSEI, DAILYBB_DOSEI, DAILYBBI_DOSEI, DAILYAL_DOSEI, DAILYTOTAL_
$DOSEI, DAILYET1_DOSEFO, DAILYET2_DOSEFO, DAILYBB_DOSEFO, DAILYBBI_DOSE
$FO, DAILYAL_DOSEFO, DAILYTOTAL_DOSEFO, DAILYET1_DOSECO, DAILYET2_DOSEC
$O, DAILYBB_DOSECO, DAILYBBI_DOSECO, DAILYAL_DOSECO, DAILYTOTAL_DOSECO,
$DAILYET1_DOSEO, DAILYET2_DOSEO, DAILYBB_DOSEO, DAILYBBI_DOSEO, DAILYAL
$_DOSEO, DAILYTOTAL_DOSEO
```

C-----AVERAGE DAILY DOSE-----

```
IF (SUMMTMAS.NE.0) THEN
```

```
MEANAIRVELOCITY=1.0D0*SUMAIRVELOCITY/ (IHOURS-COUNTAIR)
```

```

MEANCONCINF=1.0D0*SUMCONCINF/(IHOURS-COUNTMIF)
MEANCONCOUTF=1.0D0*SUMCONCOUTF/(IHOURS-COUNTMOF)
MEANCONCINC=1.0D0*SUMCONCINC/(IHOURS-COUNTMIC)
MEANCONCOUTC=1.0D0*SUMCONCOUTC/(IHOURS-COUNTMOC)
MEANEXERCISE=1.0D0*SUMEXERCISE/IHOURS
AET1_DOSEFI=0.0D0
AET2_DOSEFI=0.0D0
ABB_DOSEFI=0.0D0
ABBI_DOSEFI=0.0D0
AAL_DOSEFI=0.0D0
ATOTAL_DOSEFI=0.0D0

AET1_DOSECI=0.0D0
AET2_DOSECI=0.0D0
ABB_DOSECI=0.0D0
ABBI_DOSECI=0.0D0
AAL_DOSECI=0.0D0
ATOTAL_DOSECI=0.0D0

c***** OUTDOOR dose *****
      B=B_READ
      VT=VT_READ
      V=V_READ
      RF=20
      FN=FN_READ

      DAE=DAEFINE(DAY)
      SG=SGFINE(DAY)
      CALL POLYDISPERSE2(FRC,VET,VBB, VBP,D0,D9,B,VT,V,D16,FN,
$dens,shape,MEANAIRVELOCITY,DAE,ET1,ET2,BB,bbI,Al,DTOT,Sg)

      DAE=DAECOARSE(DAY)
      SG=SGCOARSE(DAY)
      CALL POLYDISPERSE2(FRC,VET,VBB,VBP,D0,D9,B,VT,V,D16,FN,dens,
$shape,MEANAIRVELOCITY,DAE,ET11,ET22,BBB,bbII,All,DTOTT,Sg)

C      FINE DOSE OUTDOORS
      AET1_DOSEFO=IHOURS*B*MEANCONCOUTF*fraction*ET1*0.01D0
      AET2_DOSEFO=IHOURS*B*MEANCONCOUTF*fraction*ET2*0.01D0
      ABB_DOSEFO=IHOURS*B*MEANCONCOUTF*fraction*BB*0.01D0
      ABBI_DOSEFO=IHOURS*B*MEANCONCOUTF*fraction*bbI*0.01D0
      AAL_DOSEFO=IHOURS*B*MEANCONCOUTF*fraction*Al*0.01D0
      ATOTAL_DOSEFO=IHOURS*B*MEANCONCOUTF*fraction*DTOT*0.01D0

C      COARSE DOSE OUTDOORS
      AET1_DOSECO=IHOURS*B*MEANCONCOUTC*(1-fraction)*ET11*0.01D0
      AET2_DOSECO=IHOURS*B*MEANCONCOUTC*(1-fraction)*ET22*0.01D0
      ABB_DOSECO=IHOURS*B*MEANCONCOUTC*(1-fraction)*BBB*0.01D0
      ABBI_DOSECO=IHOURS*B*MEANCONCOUTC*(1-fraction)*bbII*0.01D0
      AAL_DOSECO=IHOURS*B*MEANCONCOUTC*(1-fraction)*All*0.01D0
      ATOTAL_DOSECO=IHOURS*B*MEANCONCOUTC*(1-fraction)*DTOTT*0.01D0

C      TOTAL PARTICLES DOSE OUTDOORS
      MEANET1_DOSEO=AET1_DOSEFO+AET1_DOSECO
      MEANET2_DOSEO=AET2_DOSEFO+AET2_DOSECO
      MEANBB_DOSEO=ABB_DOSEFO+ABB_DOSECO
      MEANBBI_DOSEO=ABBI_DOSEFO+ABBI_DOSECO
      MEANAL_DOSEO=AAL_DOSEFO+AAL_DOSECO
      MEANTOTAL_DOSEO=ATOTAL_DOSEFO+ATOTAL_DOSECO

c***** INDOOR dose (0 air velocity is considered)*****

      U=0.0D0
      IF(COUNTLIGHT.NE.0) THEN                                !LIGHT EXERISE
          B=1.5D0
          VT=1250.0D0
          V=833.0D0
          RF=20
          FN=FN_READ

C      FINE
          DAE=DAEFINE(DAY)
          SG=SGFINE(DAY)
          CALL POLYDISPERSE2(FRC, VET, VBB, VBP, D0, D9, B, VT,
$V, D16,FN,dens,shape,u,DAE,ET1,ET2,BB,bbI,Al,DTOT,Sg)
C      COARSE
          DAE=DAECOARSE(DAY)

```

```

        SG=SGCOARSE (DAY)
        CALL POLYDISPERSE2 (FRC, VET, VBB, VBP, D0, D9, B, VT,
$V, D16, FN, dens, shape, u, DAE, ET11, ET22, BBB, bbI, All, DTOT, Sg)
        AET1_DOSEFI= (0.01d0*COUNTLIGHT/IHOURS)*ET1
        AET2_DOSEFI= (0.01d0*COUNTLIGHT/IHOURS)*ET2
        ABB_DOSEFI= (0.01d0*COUNTLIGHT/IHOURS)*BB
        ABBI_DOSEFI= (0.01d0*COUNTLIGHT/IHOURS)*bbI
        AAL_DOSEFI= (0.01d0*COUNTLIGHT/IHOURS)*Al
        ATOTAL_DOSEFI= (0.01d0*COUNTLIGHT/IHOURS)*DTOT

        AET1_DOSECI= (0.01d0*COUNTLIGHT/IHOURS)*ET11
        AET2_DOSECI= (0.01d0*COUNTLIGHT/IHOURS)*ET22
        ABB_DOSECI= (0.01d0*COUNTLIGHT/IHOURS)*BBB
        ABBI_DOSECI= (0.01d0*COUNTLIGHT/IHOURS)*bbII
        AAL_DOSECI= (0.01d0*COUNTLIGHT/IHOURS)*All
        ATOTAL_DOSECI= (0.01d0*COUNTLIGHT/IHOURS)*DTOTT

    ENDIF

    IF (COUNTSLEEP.NE.0) THEN                                !SLEEP
        B=0.45D0
        VT=625.0D0
        V=250.0D0
        RF=12
        FN=FN_READ
C        FINE
        DAE=DAEFINE (DAY)
        SG=SGFINE (DAY)
        CALL POLYDISPERSE2 (FRC, VET, VBB, VBP, D0, D9, B, VT,
$V, D16, FN, dens, shape, u, DAE, ET1, ET2, BB, bbI, Al, DTOT, Sg)
C        COARSE
        DAE=DAECOARSE (DAY)
        SG=SGCOARSE (DAY)
        CALL POLYDISPERSE2 (FRC, VET, VBB, VBP, D0, D9, B, VT,
$V, D16, FN, dens, shape, u, DAE, ET11, ET22, BBB, bbII, All, DTOT, Sg)

        AET1_DOSEFI=AET1_DOSEFI+ (0.01d0*COUNTSLEEP/IHOURS)*ET1
        AET2_DOSEFI=AET2_DOSEFI+ (0.01d0*COUNTSLEEP/IHOURS)*ET2
        ABB_DOSEFI=ABB_DOSEFI+ (0.01d0*COUNTSLEEP/IHOURS)*BB
        ABBI_DOSEFI=ABBI_DOSEFI+ (0.01d0*COUNTSLEEP/IHOURS)*bbI
        AAL_DOSEFI=AAL_DOSEFI+ (0.01d0*COUNTSLEEP/IHOURS)*Al
        ATOTAL_DOSEFI=ATOTAL_DOSEFI+ (0.01d0*COUNTSLEEP/IHOURS)*DTOT

        AET1_DOSECI=AET1_DOSECI+ (0.01d0*COUNTSLEEP/IHOURS)*ET11
        AET2_DOSECI=AET2_DOSECI+ (0.01d0*COUNTSLEEP/IHOURS)*ET22
        ABB_DOSECI=ABB_DOSECI+ (0.01d0*COUNTSLEEP/IHOURS)*BBB
        ABBI_DOSECI=ABBI_DOSECI+ (0.01d0*COUNTSLEEP/IHOURS)*bbII
        AAL_DOSECI=AAL_DOSECI+ (0.01d0*COUNTSLEEP/IHOURS)*All
        ATOTAL_DOSECI=ATOTAL_DOSECI+ (0.01d0*COUNTSLEEP/IHOURS)*DTOTT
    ENDIF

    IF (COUNTSIT.NE.0) THEN                                !SIT
        B=0.54D0
        VT=750.0D0
        V=300.0D0
        RF=12
        FN=FN_READ
C        FINE
        DAE=DAEFINE (DAY)
        SG=SGFINE (DAY)
        CALL POLYDISPERSE2 (FRC, VET, VBB, VBP, D0, D9, B, VT,
$V, D16, FN, dens, shape, u, DAE, ET1, ET2, BB, bbI, Al, DTOT, Sg)
C        COARSE
        DAE=DAECOARSE (DAY)
        SG=SGCOARSE (DAY)
        CALL POLYDISPERSE2 (FRC, VET, VBB, VBP, D0, D9, B, VT,
$V, D16, FN, dens, shape, u, DAE, ET11, ET22, BBB, bbII, All, DTOT, Sg)

        AET1_DOSEFI=AET1_DOSEFI+ (0.01d0*COUNTSIT/IHOURS)*ET1
        AET2_DOSEFI=AET2_DOSEFI+ (0.01d0*COUNTSIT/IHOURS)*ET2
        ABB_DOSEFI=ABB_DOSEFI+ (0.01d0*COUNTSIT/IHOURS)*BB
        ABBI_DOSEFI=ABBI_DOSEFI+ (0.01d0*COUNTSIT/IHOURS)*bbI
        AAL_DOSEFI=AAL_DOSEFI+ (0.01d0*COUNTSIT/IHOURS)*Al
        ATOTAL_DOSEFI=ATOTAL_DOSEFI+ (0.01d0*COUNTSIT/IHOURS)*DTOT

```

```

      AET1_DOSECI=AET1_DOSECI+(0.01d0*COUNTSIT/IHOURS)*ET11
      AET2_DOSECI=AET2_DOSECI+(0.01d0*COUNTSIT/IHOURS)*ET22
      ABB_DOSECI=ABB_DOSECI+(0.01d0*COUNTSIT/IHOURS)*BBB
      ABBI_DOSECI=ABBI_DOSECI+(0.01d0*COUNTSIT/IHOURS)*bbII
      AAL_DOSECI=AAL_DOSECI+(0.01d0*COUNTSIT/IHOURS)*All
      ATOTAL_DOSECI=ATOTAL_DOSECI+(0.01d0*COUNTSIT/IHOURS)*DTOTT

ENDIF

      IF (COUNTHEAVY.NE.0) THEN                                !HEAVY EXERCISE
          B=3.0D0
          VT=1923.0D0
          V=1667.0D0
          RF=26
          FN=0.5D0

C          FINE
          DAE=DAEFINE (DAY)
          SG=SGFINE (DAY)
          CALL POLYDISPERSE2 (FRC, VET, VBB, VBP, D0, D9, B, VT,
$V, D16, FN, dens, shape, u, DAE, ET1, ET2, BB, bbI, Al, DTOT, Sg)
C          COARSE
          DAE=DAECOARSE (DAY)
          SG=SGCOARSE (DAY)
          CALL POLYDISPERSE2 (FRC, VET, VBB, VBP, D0, D9, B, VT,
$V, D16, FN, dens, shape, u, DAE, ET1, ET2, BBB, bbII, All, DTOTT, Sg)
          AET1_DOSEFI=AET1_DOSEFI+(0.01d0*COUNTHEAVY/IHOURS)*ET1
          AET2_DOSEFI=AET2_DOSEFI+(0.01d0*COUNTHEAVY/IHOURS)*ET2
          ABB_DOSEFI=ABB_DOSEFI+(0.01d0*COUNTHEAVY/IHOURS)*BB
          ABBI_DOSEFI=ABBI_DOSEFI+(0.01d0*COUNTHEAVY/IHOURS)*bbII
          AAL_DOSEFI=AAL_DOSEFI+(0.01d0*COUNTHEAVY/IHOURS)*Al
          ATOTAL_DOSEFI=ATOTAL_DOSEFI+(0.01d0*COUNTHEAVY/IHOURS)*DTOT

          AET1_DOSECI=AET1_DOSECI+(0.01d0*COUNTHEAVY/IHOURS)*ET11
          AET2_DOSECI=AET2_DOSECI+(0.01d0*COUNTHEAVY/IHOURS)*ET22
          ABB_DOSECI=ABB_DOSECI+(0.01d0*COUNTHEAVY/IHOURS)*BBB
          ABBI_DOSECI=ABBI_DOSECI+(0.01d0*COUNTHEAVY/IHOURS)*bbII
          AAL_DOSECI=AAL_DOSECI+(0.01d0*COUNTHEAVY/IHOURS)*All
          ATOTAL_DOSECI=ATOTAL_DOSECI+(0.01d0*COUNTHEAVY/IHOURS)*DTOTT

ENDIF

C      FINE DOSE INDOORS
      AET1_DOSEFI=IHOURS*MEANEXERCISE*MEANCONCINF*fraction*AET1_DOSEFI
      AET2_DOSEFI=IHOURS*MEANEXERCISE*MEANCONCINF*fraction*AET2_DOSEFI
      ABB_DOSEFI=IHOURS*MEANEXERCISE*MEANCONCINF*fraction*ABB_DOSEFI
      ABBI_DOSEFI=IHOURS*MEANEXERCISE*MEANCONCINF*fraction*ABBI_DOSEFI
      AAL_DOSEFI=IHOURS*MEANEXERCISE*MEANCONCINF*fraction*AAL_DOSEFI
      ATOTAL_DOSEFI=IHOURS*MEANEXERCISE*MEANCONCINF*fraction*ATOTAL_DOSE
$FI

C      COARSE DOSE INDOORS
      AET1_DOSECI=IHOURS*MEANEXERCISE*MEANCONCINC*(1-fraction)*AET1_DOSE
$CI
      AET2_DOSECI=IHOURS*MEANEXERCISE*MEANCONCINC*(1-fraction)*AET2_DOSE
$CI
      ABB_DOSECI=IHOURS*MEANEXERCISE*MEANCONCINC*(1-fraction)*ABB_DOSECI
      ABBI_DOSECI=IHOURS*MEANEXERCISE*MEANCONCINC*(1-fraction)*ABBI_DOSE
$CI
      AAL_DOSECI=IHOURS*MEANEXERCISE*MEANCONCINC*(1-fraction)*AAL_DOSECI
      ATOTAL_DOSECI=IHOURS*MEANEXERCISE*MEANCONCINC*(1-fraction)*ATOTAL_
$DOSECI

C      TOTAL PARTICLES DOSE INDOORS
      MEANET1_DOSEI=AET1_DOSEFI+AET1_DOSECI
      MEANET2_DOSEI=AET2_DOSEFI+AET2_DOSECI
      MEANBB_DOSEI=ABB_DOSEFI+ABB_DOSECI
      MEANBBI_DOSEI=ABBI_DOSEFI+ABBI_DOSECI
      MEANAL_DOSEI=AAL_DOSEFI+AAL_DOSECI
      MEANTOTAL_DOSEI=ATOTAL_DOSEFI+ATOTAL_DOSECI

      ELSE
          AET1_DOSEFO=0.0D0

```

```

AET2_DOSEFO=0.0D0
ABB_DOSEFO=0.0D0
ABBI_DOSEFO=0.0D0
AAL_DOSEFO=0.0D0
ATOTAL_DOSEFO=0.0D0
AET1_DOSECO=0.0D0
AET2_DOSECO=0.0D0
ABB_DOSECO=0.0D0
ABBI_DOSECO=0.0D0
AAL_DOSECO=0.0D0
ATOTAL_DOSECO=0.0D0
MEANET1_DOSEO=0.0D0
MEANET2_DOSEO=0.0D0
MEANBB_DOSEO=0.0D0
MEANBBI_DOSEO=0.0D0
MEANAL_DOSEO=0.0D0
MEANTOTAL_DOSEO=0.0D0
AET1_DOSEFI=0.0D0
AET2_DOSEFI=0.0D0
ABB_DOSEFI=0.0D0
ABBI_DOSEFI=0.0D0
AAL_DOSEFI=0.0D0
ATOTAL_DOSEFI=0.0D0
AET1_DOSECI=0.0D0
AET2_DOSECI=0.0D0
ABB_DOSECI=0.0D0
ABBI_DOSECI=0.0D0
AAL_DOSECI=0.0D0
ATOTAL_DOSECI=0.0D0
MEANET1_DOSEI=0.0D0
MEANET2_DOSEI=0.0D0
MEANBB_DOSEI=0.0D0
MEANBBI_DOSEI=0.0D0
MEANAL_DOSEI=0.0D0
MEANTOTAL_DOSEI=0.0D0
ENDIF
WRITE(1000,'(A9,A10,36E16.4)') STARTDATE,ENDDATE,AET1_DOSEFI,A
$ET2_DOSEFI,ABB_DOSEFI,ABBI_DOSEFI,AAL_DOSEFI,ATOTAL_DOSEFI,AET1_DO
$SECI,AET2_DOSECI,ABB_DOSECI,ABBI_DOSECI,AAL_DOSECI,ATOTAL_DOSECI,M
$EANET1_DOSEI,MEANET2_DOSEI,MEANBB_DOSEI,MEANBBI_DOSEI,MEANAL_DOSEI
$,MEANTOTAL_DOSEI,AET1_DOSEFO,AET2_DOSEFO,ABB_DOSEFO,ABBI_DOSEFO,AA
$L_DOSEFO,ATOTAL_DOSEFO,AET1_DOSECO,AET2_DOSECO,ABB_DOSECO,ABBI_DOS
$ECO,AAL_DOSECO,ATOTAL_DOSECO,MEANET1_DOSEO,MEANET2_DOSEO,MEANBB_DO
$SEO,MEANBBI_DOSEO,MEANAL_DOSEO,MEANTOTAL_DOSEO
ELSE !!!!!!!TIME AFTER FINAL EXPOSURE>0
DO HOUR=1,IHOUR
ET1_DOSEO=0.0d0
ET2_DOSEO=0.0d0
BB_DOSEO=0.0d0
BBI_DOSEO=0.0d0
AL_DOSEO=0.0d0
TOTAL_DOSEO=0.0d0
ET1_DOSEI=0.0d0
ET2_DOSEI=0.0d0
BB_DOSEI=0.0d0
BBI_DOSEI=0.0d0
AL_DOSEI=0.0d0
TOTAL_DOSEI=0.0d0
ENDDO
ENDIF
SUMDOSEO=SUMDOSEO+DAILYTOTAL_DOSEO-DAILYET1_DOSEO
SUMDOSEI=SUMDOSEI+DAILYTOTAL_DOSEI-DAILYET1_DOSEI
ENDDO !DAY
PRINT*
CCCC CLEARANCE CCCCCC
C-----
OPEN(UNIT=412,FILE='412.TXT')
OPEN(UNIT=413,FILE='413.TXT')
C OPEN(UNIT=414,FILE='412C.TXT')
C OPEN(UNIT=415,FILE='413C.TXT')

```

```

      X3=' '
      DO WHILE ((X3.NE.'Y') .AND. (X3.NE.'N') .AND. (X3.NE.'y')
$.AND. (X3.NE.'n'))
        WRITE(*,*) 'CONTINUE WITH CLEARANCE? (Y/N)'
        read(*,'(A1)') X3
c        print*,x1
        clear=IACHAR(X3)
      END DO

      IF (CLEAR.EQ.89 .OR. CLEAR.EQ.121) THEN

DET2_surF_O = 0.0D0
DET_seqF_O = 0.0D0
DLNetF_O = 0.0D0
DBB_gelF_O = 0.0D0
DBB_solF_O = 0.0D0
DBB_seqF_O = 0.0D0
DBBI_gelF_O = 0.0D0
DBBI_solF_O = 0.0D0
DBBI_seqF_O = 0.0D0
DALF_O = 0.0D0
DAL_TF_O = 0.0D0
DLNthF_O = 0.0D0
DBLOODF_O = 0.0D0

DET2_surF_I = 0.0D0
DET_seqF_I = 0.0D0
DLNetF_I = 0.0D0
DBB_gelF_I = 0.0D0
DBB_solF_I = 0.0D0
DBB_seqF_I = 0.0D0
DBBI_gelF_I = 0.0D0
DBBI_solF_I = 0.0D0
DBBI_seqF_I = 0.0D0
DALF_I = 0.0D0
DAL_TF_I = 0.0D0
DLNthF_I = 0.0D0
DBLOODF_I = 0.0D0

DET2_surC_O = 0.0D0
DET_seqC_O = 0.0D0
DLNetC_O = 0.0D0
DBB_gelC_O = 0.0D0
DBB_solC_O = 0.0D0
DBB_seqC_O = 0.0D0
DBBI_gelC_O = 0.0D0
DBBI_solC_O = 0.0D0
DBBI_seqC_O = 0.0D0
DALC_O = 0.0D0
DAL_TC_O = 0.0D0
DLNthC_O = 0.0D0
DBLOODC_O = 0.0D0

DET2_surC_I = 0.0D0
DET_seqC_I = 0.0D0
DLNetC_I = 0.0D0
DBB_gelC_I = 0.0D0
DBB_solC_I = 0.0D0
DBB_seqC_I = 0.0D0
DBBI_gelC_I = 0.0D0
DBBI_solC_I = 0.0D0
DBBI_seqC_I = 0.0D0
DALC_I = 0.0D0
DAL_TC_I = 0.0D0
DLNthC_I = 0.0D0
DBLOODC_I=0.0D0

PRINT*
X=''
DO WHILE (X.NE.'F' .AND. X.NE.'f' .AND. X.NE.'S' .AND. X.NE.'s')
  PRINT*, 'GIVE PARTICLE ABSORPTION BEHAVIOR CLASS (F/
$(S):'

```

```

      READ(*,'(A1)') X
END DO
CLASS=IACHAR(X)

c      print*, 'stepperday?'
c      read(*,'(I4)') stepperday
      stepperday=1440      !/min

C      ABSORPTION PARAMETERS FOR TYPE F, M, S PARTICLES
      IF(CLASS.EQ.70 .OR. CLASS.EQ.102) THEN
          S=100.0D0      !/stepperday
      ELSE
          S=0.0001D0      !/stepperday
      END IF

      CALL solve_dif_clear(INVC,EIGENVEC,EIGENVAL,S,stepperday)

      PRINT*, ' DAY HOUR'

      RESTIME=1.0D0/S

      do day=1,DAYS

C      INITIALISE DAYILY VALUES
      SET2_surF_O=0.0D0
      SET_seqF_O=0.0D0
      SLNetF_O=0.0D0
      SBB_gelF_O=0.0D0
      SBB_solF_O=0.0D0
      SBB_seqF_O=0.0D0
      SBBI_gelF_O=0.0D0
      SBBI_solF_O=0.0D0
      SBBI_seqF_O=0.0D0
      SALF_O=0.0D0
      SAL_TF_O=0.0D0
      SLNthF_O=0.0D0
      SBLOODF_O=0.0D0

      SET2_surF_I=0.0D0
      SET_seqF_I=0.0D0
      SLNetF_I=0.0D0
      SBB_gelF_I=0.0D0
      SBB_solF_I=0.0D0
      SBB_seqF_I=0.0D0
      SBBI_gelF_I=0.0D0
      SBBI_solF_I=0.0D0
      SBBI_seqF_I=0.0D0
      SALF_I=0.0D0
      SAL_TF_I=0.0D0
      SLNthF_I=0.0D0
      SBLOODF_I=0.0D0

      SET2_surC_O=0.0D0
      SET_seqC_O=0.0D0
      SLNetC_O=0.0D0
      SBB_gelC_O=0.0D0
      SBB_solC_O=0.0D0
      SBB_seqC_O=0.0D0
      SBBI_gelC_O=0.0D0
      SBBI_solC_O=0.0D0
      SBBI_seqC_O=0.0D0
      SALC_O=0.0D0
      SAL_TC_O=0.0D0
      SLNthC_O=0.0D0
      SBLOODC_O=0.0D0

      SET2_surC_I=0.0D0
      SET_seqC_I=0.0D0
      SLNetC_I=0.0D0
      SBB_gelC_I=0.0D0
      SBB_solC_I=0.0D0
      SBB_seqC_I=0.0D0
      SBBI_gelC_I=0.0D0
      SBBI_solC_I=0.0D0
      SBBI_seqC_I=0.0D0

```



```

SALC_I=0.0D0
SAL_TC_I=0.0D0
SLNthC_I=0.0D0
SBLOODC_I=0.0D0
C    INITIALISE DAYILY VALUES FINISHED

      IF(DAY.LT.DAYS) THEN
        IHOURLS=IHOURL
      ELSE
        MEION=INDAYS-DAYS
        IF (MEION.EQ.0.0D0) THEN
          IHOURLS=IHOURL
        ELSE
          IF (MEION.LT.0.0D0.AND.INDAYS.LT.1.0D0) MEION=INDAYS
          IF (MEION.LT.0.0D0.AND.INDAYS.GT.1.0D0) MEION=1+INDAYS-
$DAYS
          IHOURLS=INT(ROUND( (MEION*24.0D0),0) )
        ENDIF
      ENDIF

      do hour=1,IHOURLS

        DO I=1,12
          DO J=1,10080
            RETF_O(I,J)=0.0D0
            RET1F_O(I,J)=0.0D0
            RETC_O(I,J)=0.0D0
            RET1C_O(I,J)=0.0D0

            RETF_I(I,J)=0.0D0
            RET1F_I(I,J)=0.0D0

            RETC_I(I,J)=0.0D0
            RET1C_I(I,J)=0.0D0
          ENDDO
        ENDDO

        TIMEAA=INT((1.0d0/ihour)*stepperday)
        ENDTIMEAA=INT((DAYS-DAY)*stepperday+(IHOURLS-HOUR+1)*1.0d0*
$stepperday/IHOURL)
      c    if(indays.ge.1.0d0) then
      c      hday=int(((day-1)*ihour+hour-1)*(1.0d0*stepperday/ihour))
      c    else
      c      hday=0
      c    endif

      write(*,'(i4,i5)') DAY,HOUR

C      ****    OUTDOOR CLEARANCE    ****

C      FINE PARTICLES

      RF=20

      ET2_FO=1.0d0*ET2_DOSEFO(HOUR,DAY)/(RF*60.0D0)    !60MIN/H
      BB_FO=1.0d0*BB_DOSEFO(HOUR,DAY)/(RF*60.0D0)
      BBI_FO=1.0d0*BBI_DOSEFO(HOUR,DAY)/(RF*60.0D0)
      AL_FO=1.0d0*AL_DOSEFO(HOUR,DAY)/(RF*60.0D0)

      ET2_CO=1.0d0*ET2_DOSECO(HOUR,DAY)/(RF*60.0D0)
      BB_CO=1.0d0*BB_DOSECO(HOUR,DAY)/(RF*60.0D0)
      BBI_CO=1.0d0*BBI_DOSECO(HOUR,DAY)/(RF*60.0D0)
      AL_CO=1.0d0*AL_DOSECO(HOUR,DAY)/(RF*60.0D0)

      IF((ET2_FO.NE.0.0D0).AND.(BB_FO.NE.0.0D0).AND.(BBI_FO.NE.0
$.0D0).AND.(AL_FO.NE.0.0D0)) THEN

        RF=20
        DAE=DAEFINE(DAY)
        SG=SGFINE(DAY)

        CALL POLYDISP_CLEAR(DAE,SHAPE,DENS,TIMEAA,ENDTIMEAA,AL
$_FO,BBI_FO,BB_FO,ET2_FO,ET2_surF_O,ET_seqF_O,LNetF_O,BB_gelF_O,BB_
$solF_O,BB_seqF_O,BBI_gelF_O,BBI_solF_O,BBI_seqF_O,ALF_O,AL_TF_O,LN
$thF_O,INVC,EIGENVAL,RF,stepperday,SG,hday,RETF_O,RET1F_O,
$RESTIME,BLOODF_O)

```

```

DAF(1)=ISNAN(AL_FO)
DAF(2)=ISNAN(BBI_FO)
DAF(3)=ISNAN(BB_FO)
DAF(4)=ISNAN(ET2_FO)
DAF(5)=ISNAN(ET2_surF_O)
DAF(6)=ISNAN(ET_seqF_O)
DAF(7)=ISNAN(LNetF_O)
DAF(8)=ISNAN(BB_gelF_O)
DAF(9)=ISNAN(BB_solF_O)
DAF(10)=ISNAN(BB_seqF_O)
DAF(11)=ISNAN(BBI_gelF_O)
DAF(12)=ISNAN(BBI_solF_O)
DAF(13)=ISNAN(BBI_seqF_O)
DAF(14)=ISNAN(ALF_O)
DAF(15)=ISNAN(AL_TF_O)
DAF(16)=ISNAN(LNthF_O)

DO I=1,16
    IF (DAF(I).EQ..TRUE.) THEN
        PRINT*, I, 'IS NaN'
        STOP
    ELSE
        CONTINUE
    ENDIF
ENDDO

ELSE

    ET2_surF_O=0.0D0
    ET_seqF_O=0.0D0
    LNetF_O=0.0D0
    BB_gelF_O=0.0D0
    BB_solF_O=0.0D0
    BB_seqF_O=0.0D0
    BBI_gelF_O=0.0D0
    BBI_solF_O=0.0D0
    BBI_seqF_O=0.0D0
    ALF_O=0.0D0
    AL_TF_O=0.0D0
    LNthF_O=0.0D0
    BLOODF_O=0.0D0

ENDIF

close(15)

SET2_surF_O = SET2_surF_O + ET2_surF_O
SET_seqF_O = SET_seqF_O + ET_seqF_O
SLNetF_O = SLNetF_O + LNetF_O
SBB_gelF_O = SBB_gelF_O + BB_gelF_O
SBB_solF_O = SBB_solF_O + BB_solF_O
SBB_seqF_O = SBB_seqF_O + BB_seqF_O
SBBI_gelF_O = SBBI_gelF_O + BBI_gelF_O
SBBI_solF_O = SBBI_solF_O + BBI_solF_O
SBBI_seqF_O = SBBI_seqF_O + BBI_seqF_O
SALF_O = SALF_O + ALF_O
SAL_TF_O = SAL_TF_O + AL_TF_O
SLNthF_O = SLNthF_O + LNthF_O
SBLOODF_O = SBLOODF_O + BLOODF_O

DO I=1,12
    DO J=1,10080
        RETF_OT(I,J)=RETF_OT(I,J)+RETF_O(I,J)
        RET1F_OT(I,J)=RET1F_OT(I,J)+RET1F_O(I,J)
    ENDDO
ENDDO

C      COARSE PARTICLES
      IF((ET2_CO.NE.0.0D0).AND.(BB_CO.NE.0.0D0).AND.(BBI_CO.NE.0
$.0D0).AND.(AL_CO.NE.0.0D0)) THEN

          RF=20
          DAE=DAECOARSE(DAY)
          SG=SGCOARSE(DAY)

```

```

CALL POLYDISP_CLEAR(DAE,SHAPE,DENS,TIMEAA,ENDTIMEAA,AL
$_CO,BBI_CO,BB_CO,ET2_CO,ET2_surC_O,ET_seqC_O,LNetC_O,BB_gelC_O,BB_
$solC_O,BB_seqC_O,BBI_gelC_O,BBI_solC_O,BBI_seqC_O,ALC_O,AL_TC_O,LN
$thC_O,INVC,EIGENVEC,EIGENVAL,RF,stepperday,SG,hday,RETC_O,RET1C_O,
$RESTIME,BLOODC_O)

DAF(1)=ISNAN(AL_CO)
DAF(2)=ISNAN(BBI_CO)
DAF(3)=ISNAN(BB_CO)
DAF(4)=ISNAN(ET2_CO)
DAF(5)=ISNAN(ET2_surC_O)
DAF(6)=ISNAN(ET_seqC_O)
DAF(7)=ISNAN(LNetC_O)
DAF(8)=ISNAN(BB_gelC_O)
DAF(9)=ISNAN(BB_solC_O)
DAF(10)=ISNAN(BB_seqC_O)
DAF(11)=ISNAN(BBI_gelC_O)
DAF(12)=ISNAN(BBI_solC_O)
DAF(13)=ISNAN(BBI_seqC_O)
DAF(14)=ISNAN(ALC_O)
DAF(15)=ISNAN(AL_TC_O)
DAF(16)=ISNAN(LNthC_O)

DO I=1,16
    IF(DAF(I).EQ..TRUE.) THEN
        PRINT*, I, 'IS NaN'
        STOP
    ELSE
        CONTINUE
    ENDIF
ENDDO

ELSE

    ET2_surC_O=0.0D0
    ET_seqC_O=0.0D0
    LNetC_O=0.0D0
    BB_gelC_O=0.0D0
    BB_solC_O=0.0D0
    BB_seqC_O=0.0D0
    BBI_gelC_O=0.0D0
    BBI_solC_O=0.0D0
    BBI_seqC_O=0.0D0
    ALC_O=0.0D0
    AL_TC_O=0.0D0
    LNthC_O=0.0D0
    BLOODC_O=0.0D0

ENDIF

SET2_surC_O = SET2_surC_O + ET2_surC_O
SET_seqC_O = SET_seqC_O + ET_seqC_O
SLNetC_O = SLNetC_O + LNetC_O
SBB_gelC_O = SBB_gelC_O + BB_gelC_O
SBB_solC_O = SBB_solC_O + BB_solC_O
SBB_seqC_O = SBB_seqC_O + BB_seqC_O
SBBI_gelC_O = SBBI_gelC_O + BBI_gelC_O
SBBI_solC_O = SBBI_solC_O + BBI_solC_O
SBBI_seqC_O = SBBI_seqC_O + BBI_seqC_O
SALC_O = SALC_O + ALC_O
SAL_TC_O = SAL_TC_O + AL_TC_O
SLNthC_O = SLNthC_O + LNthC_O
SBLOODC_O = SBLOODC_O + BLOODC_O

DO I=1,12
    DO J=1,10080
        RETC_OT(I,J)=RETC_OT(I,J)+RETC_O(I,J)
        RET1C_OT(I,J)=RET1C_OT(I,J)+RET1C_O(I,J)
    ENDDO
ENDDO

C      IF(HOUR.EQ.1) THEN
C          DO J=1,120
C              WRITE (412, '(12e11.4)') ((RETF_O(I,J)+RETC_O(I,J)),I=1,12)

```

```

C          ENDDO
C      ELSE
C          DO J=1,120
C              WRITE (413,'(12e11.4)') ((RETF_O(I,J)+RETC_O(I,J)),I=1,12)
C          ENDDO
C      ENDIF

C      ****      INDOOR CLEARANCE      ****

C      FINE PARTICLES

      RF=RFS(HOUR, DAY)
      ET2_FI=1.0d0*ET2_DOSEFI(HOUR, DAY)/(RF*60.0D0)
      BB_FI=1.0d0*BB_DOSEFI(HOUR, DAY)/(RF*60.0D0)
      BBI_FI=1.0d0*BBI_DOSEFI(HOUR, DAY)/(RF*60.0D0)
      AL_FI=1.0d0*AL_DOSEFI(HOUR, DAY)/(RF*60.0D0)
      ET2_CI=1.0d0*ET2_DOSECI(HOUR, DAY)/(RF*60.0D0)
      BB_CI=1.0d0*BB_DOSECI(HOUR, DAY)/(RF*60.0D0)
      BBI_CI=1.0d0*BBI_DOSECI(HOUR, DAY)/(RF*60.0D0)
      AL_CI=1.0d0*AL_DOSECI(HOUR, DAY)/(RF*60.0D0)

      IF((ET2_FI.NE.0.0D0).AND.(BB_FI.NE.0.0D0).AND.(BBI_FI.NE.0
$.0D0).AND.(AL_FI.NE.0.0D0)) THEN

          RF=RFS(HOUR, DAY)
          DAE=DAEFINE(DAY)
          SG=SGFINE(DAY)

          CALL POLYDISP_CLEAR(DAE, SHAPE, DENS, TIMEAA, ENDTIMEAA, AL
$_FI, BBI_FI, BB_FI, ET2_FI, ET2_surF_I, ET_seqF_I, LNetF_I, BB_gelF_I, BB
$_solF_I, BB_seqF_I, BBI_gelF_I, BBI_solF_I, BBI_seqF_I, ALF_I, AL_TF_I, LN
$_thF_I, INVC, EIGENVEC, EIGENVAL, RF, stepperday, SG, hday, RETF_I, RETlF_I,
$RESTIME, BLOODF_I)

          DAF(1)=ISNAN(AL_FI)
          DAF(2)=ISNAN(BBI_FI)
          DAF(3)=ISNAN(BB_FI)
          DAF(4)=ISNAN(ET2_FI)
          DAF(5)=ISNAN(ET2_surF_I)
          DAF(6)=ISNAN(ET_seqF_I)
          DAF(7)=ISNAN(LNetF_I)
          DAF(8)=ISNAN(BB_gelF_I)
          DAF(9)=ISNAN(BB_solF_I)
          DAF(10)=ISNAN(BB_seqF_I)
          DAF(11)=ISNAN(BBI_gelF_I)
          DAF(12)=ISNAN(BBI_solF_I)
          DAF(13)=ISNAN(BBI_seqF_I)
          DAF(14)=ISNAN(ALF_I)
          DAF(15)=ISNAN(AL_TF_I)
          DAF(16)=ISNAN(LNthF_I)

          DO I=1,16
              IF(DAF(I).EQ..TRUE.) THEN
                  PRINT*, I, 'IS NaN'
                  STOP
              ELSE
                  CONTINUE
              ENDIF
          ENDDO

      ELSE

          ET2_surF_I=0.0D0
          ET_seqF_I=0.0D0
          LNetF_I=0.0D0
          BB_gelF_I=0.0D0
          BB_solF_I=0.0D0
          BB_seqF_I=0.0D0
          BBI_gelF_I=0.0D0
          BBI_solF_I=0.0D0
          BBI_seqF_I=0.0D0
          ALF_I=0.0D0

```

```

        AL_TF_I=0.0D0
        LNthF_I=0.0D0
        BLOODF_I=0.0D0
ENDIF

SET2_surF_I = SET2_surF_I + ET2_surF_I
SET_seqF_I = SET_seqF_I + ET_seqF_I
SLNetF_I = SLNetF_I + LNetF_I
SBB_gelF_I = SBB_gelF_I + BB_gelF_I
SBB_solF_I = SBB_solF_I + BB_solF_I
SBB_seqF_I = SBB_seqF_I + BB_seqF_I
SBBI_gelF_I = SBBI_gelF_I + BBI_gelF_I
SBBI_solF_I = SBBI_solF_I + BBI_solF_I
SBBI_seqF_I = SBBI_seqF_I + BBI_seqF_I
SALF_I = SALF_I + ALF_I
SAL_TF_I = SAL_TF_I + AL_TF_I
SLNthF_I = SLNthF_I + LNthF_I
SBLOODF_I=SBLOODF_I+BLOODF_I

DO I=1,12
    DO J=1,10080
        RETF_IT(I,J)=RETF_IT(I,J)+RETF_I(I,J)
        RET1F_IT(I,J)=RET1F_IT(I,J)+RET1F_I(I,J)
    ENDDO
ENDDO

C      COARSE PARTICLES
      IF((ET2_CI.NE.0.0D0).AND.(BB_CI.NE.0.0D0).AND.(BBI_CI.NE.0
$.0D0).AND.(AL_CI.NE.0.0D0)) THEN

          RF=RFS(HOUR, DAY)
          DAE=DAECOARSE(DAY)
          SG=SGCOARSE(DAY)

          CALL POLYDISP_CLEAR(DAE, SHAPE, DENS, TIMEAA, ENDTIMEAA, AL
$_CI, BBI_CI, BB_CI, ET2_CI, ET2_surC_I, ET_seqC_I, LNetC_I, BB_gelC_I, BB
$_solC_I, BB_seqC_I, BBI_gelC_I, BBI_solC_I, BBI_seqC_I, ALC_I, AL_TC_I, LN
$_thC_I, INVC, EIGENVEC, EIGENVAL, RF, stepperday, SG, hday, RETC_I, RET1C_I,
$RESTIME, BLOODC_I)

          DAF(1)=ISNAN(AL_CI)
          DAF(2)=ISNAN(BBI_CI)
          DAF(3)=ISNAN(BB_CI)
          DAF(4)=ISNAN(ET2_CI)
          DAF(5)=ISNAN(ET2_surC_I)
          DAF(6)=ISNAN(ET_seqC_I)
          DAF(7)=ISNAN(LNetC_I)
          DAF(8)=ISNAN(BB_gelC_I)
          DAF(9)=ISNAN(BB_solC_I)
          DAF(10)=ISNAN(BB_seqC_I)
          DAF(11)=ISNAN(BBI_gelC_I)
          DAF(12)=ISNAN(BBI_solC_I)
          DAF(13)=ISNAN(BBI_seqC_I)
          DAF(14)=ISNAN(ALC_I)
          DAF(15)=ISNAN(AL_TC_I)
          DAF(16)=ISNAN(LNthC_I)

          DO I=1,16
              IF(DAF(I).EQ..TRUE.) THEN
                  PRINT*, I, 'IS NaN'
                  STOP
              ELSE
                  CONTINUE
              ENDIF
          ENDDO

      ELSE

          ET2_surC_I=0.0D0
          ET_seqC_I=0.0D0
          LNetC_I=0.0D0
          BB_gelC_I=0.0D0
          BB_solC_I=0.0D0

```

```

        BB_seqC_I=0.0D0
        BBI_gelC_I=0.0D0
        BBI_solC_I=0.0D0
        BBI_seqC_I=0.0D0
        ALC_I=0.0D0
        AL_TC_I=0.0D0
        LNthC_I=0.0D0
        BLOODC_I=0.0D0
    ENDIF

    SET2_surC_I = SET2_surC_I + ET2_surC_I
    SET_seqC_I = SET_seqC_I + ET_seqC_I
    SLNetC_I = SLNetC_I + LNetC_I
    SBB_gelC_I = SBB_gelC_I + BB_gelC_I
    SBB_solC_I = SBB_solC_I + BB_solC_I
    SBB_seqC_I = SBB_seqC_I + BB_seqC_I
    SBBI_gelC_I = SBBI_gelC_I + BBI_gelC_I
    SBBI_solC_I = SBBI_solC_I + BBI_solC_I
    SBBI_seqC_I = SBBI_seqC_I + BBI_seqC_I
    SALC_I = SALC_I + ALC_I
    SAL_TC_I = SAL_TC_I + AL_TC_I
    SLNthC_I = SLNthC_I + LNthC_I
    SBLOODC_I=SBLOODC_I+BLOODC_I

    DO I=1,12
        DO J=1,10080
            RETC_IT(I,J)=RETC_IT(I,J)+RETC_I(I,J)
            RET1C_IT(I,J)=RET1C_IT(I,J)+RET1C_I(I,J)
        ENDDO
    ENDDO

C      ELSE
C      DO J=1,120
C          WRITE (414,'(12e11.4)') ((RETF_I(I,J)+RETC_I(I,J)),I=1
C      $,12)
C      ENDDO
C
    ENDDO !HOUR

    IF(DAY.EQ.1) THEN
        DO J=1,2880
            WRITE (412,'(12e11.4)') ((RETF_IT(I,J)+RETC_IT(I,J)),I=1,12)
        ENDDO
C      DO J=1,1440
C          WRITE (412,'(12e11.4)') ((RET1F_IT(I,J)+RET1C_IT(I,J)),I=1,1
C      $2)
C      ENDDO
    ELSE IF(DAY.EQ.2) THEN
        DO J=1441,2880
            WRITE (413,'(12e11.4)') ((RETF_IT(I,J)+RETC_IT(I,J)),I
$=1,12)
        ENDDO
    ENDIF

    DET2_surF_O = SET2_surF_O + DET2_surF_O
    DET_seqF_O = SET_seqF_O + DET_seqF_O
    DLNetF_O = SLNetF_O + DLNetF_O
    DBB_gelF_O = SBB_gelF_O + DBB_gelF_O
    DBB_solF_O = SBB_solF_O + DBB_solF_O
    DBB_seqF_O = SBB_seqF_O + DBB_seqF_O
    DBBI_gelF_O = SBBI_gelF_O + DBBI_gelF_O
    DBBI_solF_O = SBBI_solF_O + DBBI_solF_O
    DBBI_seqF_O = SBBI_seqF_O + DBBI_seqF_O
    DALF_O = SALF_O + DALF_O
    DAL_TF_O = SAL_TF_O + DAL_TF_O
    DLNthF_O = SLNthF_O + DLNthF_O
    DBLOODF_O= SBLOODF_O + DBLOODF_O

    DET2_surF_I = SET2_surF_I + DET2_surF_I
    DET_seqF_I = SET_seqF_I + DET_seqF_I
    DLNetF_I = SLNetF_I + DLNetF_I
    DBB_gelF_I = SBB_gelF_I + DBB_gelF_I
    DBB_solF_I = SBB_solF_I + DBB_solF_I

```

```

        DBB_seqF_I = SBB_seqF_I + DBB_seqF_I
        DBBI_gelF_I = SBBI_gelF_I + DBBI_gelF_I
        DBBI_solF_I = SBBI_solF_I + DBBI_solF_I
        DBBI_seqF_I = SBBI_seqF_I + DBBI_seqF_I
        DALF_I = SALF_I + DALF_I
        DAL_TF_I = SAL_TF_I + DAL_TF_I
        DLNthF_I = SLNthF_I + DLNthF_I
        DBLOODF_I = SBLOODF_I + DBLOODF_I

        DET2_surC_O = SET2_surC_O + DET2_surC_O
        DET_seqC_O = SET_seqC_O + DET_seqC_O
        DLNetC_O = SLNetC_O + DLNetC_O
        DBB_gelC_O = SBB_gelC_O + DBB_gelC_O
        DBB_solC_O = SBB_solC_O + DBB_solC_O
        DBB_seqC_O = SBB_seqC_O + DBB_seqC_O
        DBBI_gelC_O = SBBI_gelC_O + DBBI_gelC_O
        DBBI_solC_O = SBBI_solC_O + DBBI_solC_O
        DBBI_seqC_O = SBBI_seqC_O + DBBI_seqC_O
        DALC_O = SALC_O + DALC_O
        DAL_TC_O = SAL_TC_O + DAL_TC_O
        DLNthC_O = SLNthC_O + DLNthC_O
        DBLOODC_O = SBLOODC_O + DBLOODC_O

        DET2_surC_I = SET2_surC_I + DET2_surC_I
        DET_seqC_I = SET_seqC_I + DET_seqC_I
        DLNetC_I = SLNetC_I + DLNetC_I
        DBB_gelC_I = SBB_gelC_I + DBB_gelC_I
        DBB_solC_I = SBB_solC_I + DBB_solC_I
        DBB_seqC_I = SBB_seqC_I + DBB_seqC_I
        DBBI_gelC_I = SBBI_gelC_I + DBBI_gelC_I
        DBBI_solC_I = SBBI_solC_I + DBBI_solC_I
        DBBI_seqC_I = SBBI_seqC_I + DBBI_seqC_I
        DALC_I = SALC_I + DALC_I
        DAL_TC_I = SAL_TC_I + DAL_TC_I
        DLNthC_I = SLNthC_I + DLNthC_I
        DBLOODC_I = SBLOODC_I + DBLOODC_I

    ENDDO !DAY

    WRITE(1004,4)
    WRITE(1005,4)
    WRITE(1006,4)
    WRITE(1007,4)
    WRITE(1008,4)
    WRITE(1009,4)
    WRITE(1004,41)
    WRITE(1005,41)
    WRITE(1006,41)
    WRITE(1007,41)
    WRITE(1008,41)
    WRITE(1009,41)

    STOPS=INDAYS*STEPPERDAY-INT(INDAYS*STEPPERDAY)
    IF(STOPS.GT.0.0D0) THEN
        ENDS=INT(INDAYS*STEPPERDAY)+1
    ELSE
        ENDS=INT(INDAYS*STEPPERDAY)
    ENDIF

    DO J=1,ENDS
        KDAY=1.0D0*J/STEPPERDAY
        fj=j-10080.0d0
        IF (J.LE.10080) THEN
            write(1004,'(13E16.4)') KDAY,(RETF_IT(I,J),I=1,12)
            write(1005,'(13E16.4)') KDAY,(RETC_IT(I,J),I=1,12)
            write(1006,'(13E16.4)') KDAY,((RETF_IT(I,J)+RETC_IT(I,J)
$)),I=1,12)

            write(1007,'(13E16.4)') KDAY,(RETF_OT(I,J),I=1,12)
            write(1008,'(13E16.4)') KDAY,(RETC_OT(I,J),I=1,12)
            write(1009,'(13E16.4)') KDAY,((RETF_OT(I,J)+RETC_OT(I,J)
$)),I=1,12)

        ELSE IF(FJ.LE.10080) THEN
            write(1004,'(13E16.4)') KDAY,(RET1F_IT(I,fJ),I=1,12)
            write(1005,'(13E16.4)') KDAY,(RET1C_IT(I,fJ),I=1,12)

```

```

write(1006,'(13E16.4)') KDAY,((RET1F_IT(I,fJ)+RET1C_IT(I
$,fJ)),I=1,12)
write(1007,'(13E16.4)') KDAY,(RET1F_OT(I,fJ),I=1,12)
write(1008,'(13E16.4)') KDAY,(RET1C_OT(I,fJ),I=1,12)
write(1009,'(13E16.4)') KDAY,((RET1F_OT(I,fJ)+RET1C_OT(I
$,fJ)),I=1,12)
ENDIF
ENDDO

print*
print*, '*-----*'
PRINT*, '| MATERIAL RETAINED IN EACH REGION (ug) |'
print*, '*-----*'
PRINT*
PRINT*, 'FOR OUTDOOR EXPOSURE'
PRINT*, '-----'
WRITE(*,*) 'ET2_sur ',DET2_surF_O+DET2_surC_O
WRITE(*,*) 'ET_seq ', DET_seqF_O+DET_seqC_O
WRITE(*,*) 'LNet ', DLNetF_O+DLNetC_O
WRITE(*,*) 'BB_gel ', DBB_gelF_O+DBB_gelC_O
WRITE(*,*) 'BB_sol ', DBB_solF_O+DBB_solC_O
WRITE(*,*) 'BB_seq ', DBB_seqF_O+DBB_seqC_O
WRITE(*,*) 'BBI_gel ', DBBI_gelF_O+DBBI_gelC_O
WRITE(*,*) 'BBI_sol ', DBBI_solF_O+DBBI_solC_O
WRITE(*,*) 'BBI_seq ', DBBI_seqF_O+DBBI_seqC_O
WRITE(*,*) 'AI ', DALF_O+DALC_O
c WRITE(*,*) 'AL_Total', DAL_TF_O+DAL_TC_O
WRITE(*,*) 'LNth ', DLNthF_O+DLNthC_O
WRITE(*,*) 'GI Tract', DAL_TF_O+DAL_TC_O
WRITE(*,*) 'Blood ', DBLOODF_O+DBLOODC_O
WRITE(*,*) 'Sum ',DET2_surF_O+DET2_surC_O+DET_seqF_O+DET_seqC
$_O+DLNetF_O+DLNetC_O+DBB_gelF_O+DBB_gelC_O+DBB_solF_O+DBB_solC_O+D
$BB_seqF_O+DBB_seqC_O+DBBI_gelF_O+DBBI_gelC_O+DBBI_solF_O+DBBI_solC
$_O+DBBI_seqF_O+DBBI_seqC_O+DALF_O+DALC_O+DLNthF_O+DLNthC_O+DAL_TF_
$_O+DAL_TC_O+DBLOODF_O+DBLOODC_O
WRITE(*,*) 'DOSE ',SUMDOSEO

PRINT*
PRINT*, 'FOR INDOOR EXPOSURE'
PRINT*, '-----'
WRITE(*,*) 'ET2_sur ', DET2_surF_I+DET2_surC_I
WRITE(*,*) 'ET_seq ', DET_seqF_I+DET_seqC_I
WRITE(*,*) 'LNet ', DLNetF_I+DLNetC_I
WRITE(*,*) 'BB_gel ', DBB_gelF_I+DBB_gelC_I
WRITE(*,*) 'BB_sol ', DBB_solF_I+DBB_solC_I
WRITE(*,*) 'BB_seq ', DBB_seqF_I+DBB_seqC_I
WRITE(*,*) 'BBI_gel ', DBBI_gelF_I+DBBI_gelC_I
WRITE(*,*) 'BBI_sol ', DBBI_solF_I+DBBI_solC_I
WRITE(*,*) 'BBI_seq ', DBBI_seqF_I+DBBI_seqC_I
WRITE(*,*) 'AI ', DALF_I+DALC_I
c WRITE(*,*) 'AL_Total', DAL_TF_I+DAL_TC_I
WRITE(*,*) 'LNth ', DLNthF_I+DLNthC_I
WRITE(*,*) 'GI Tract', DAL_TF_I+DAL_TC_I
WRITE(*,*) 'Blood ', DBLOODF_I+DBLOODC_I
WRITE(*,*) 'Sum ',DET2_surF_I+DET2_surC_I+DET_seqF_I+DET_seqC
$_I+DLNetF_I+DLNetC_I+DBB_gelF_I+DBB_gelC_I+DBB_solF_I+DBB_solC_I+D
$BB_seqF_I+DBB_seqC_I+DBBI_gelF_I+DBBI_gelC_I+DBBI_solF_I+DBBI_solC
$_I+DBBI_seqF_I+DBBI_seqC_I+DALF_I+DALC_I+DLNthF_I+DLNthC_I+DAL_TF_
$_I+DAL_TC_I+DBLOODF_I+DBLOODC_I
WRITE(*,*) 'DOSE ',SUMDOSEI

endif !clearance

1 FORMAT(' GIVE FRACTION BREATHED THROUGH NOSE:')
2 FORMAT(' GIVE PARTICLE DENSITY:')
3 FORMAT(' GIVE PARTICLE SHAPE FACTOR:')

c4 FORMAT(' DAY ET2_sur ET_seq BB
c $_gel BB_sol BB_seq bb_gel bb_s
c $sol bb_seq Al Total_Al LNth
c $ LNet')

4 FORMAT(' DAY ET2_sur ET_seq BB
$_gel BB_sol BB_seq bb_gel bb_s

```



```

$ol          bb_seq          Al          GI Tract          LNth
$          LNet')

41  FORMAT('          -----          -----          -----          -----
$-----          -----          -----          -----          -----
$-----          -----          -----          -----          -----
$--          -----')

5      format(' GIVE INFILE (BERNER DATA):')

6      FORMAT('STARTDATE  STARTHOUR  ENDDATE          ENDOUR          ET1_DOSEFI
$      ET2_DOSEFI          BB_DOSEFI          BBI_DOSEFI          AL_DOSEFI
$ TOTAL_DOSEFI          ET1_DOSECI          ET2_DOSECI          BB_DOSECI
$BBI_DOSECI          AL_DOSECI          TOTAL_DOSECI          ET1_DOSEI          ET
$2_DOSEI          BB_DOSEI          BBI_DOSEI          AL_DOSEI          TOTAL
$ DOSEI          ET1_DOSEFO          ET2_DOSEFO          BB_DOSEFO          BBI_DO
$SEFO          AL_DOSEFO          TOTAL_DOSEFO          ET1_DOSECO          ET2_DOSE
$CO          BB_DOSECO          BBI_DOSECO          AL_DOSECO          TOTAL_DOSECO
$O          ET1_DOSEO          ET2_DOSEO          BB_DOSEO          BBI_DOSEO
$      AL_DOSEO          TOTAL_DOSEO')

61  FORMAT('-----          -----          -----          -----          -----
$          -----          -----          -----          -----
$          -----          -----          -----          -----
$-----          -----          -----          -----          -----
$-----          -----          -----          -----          -----
$-----          -----          -----          -----          -----
$-----          -----          -----          -----          -----
$--          -----          -----          -----          -----
$-          -----          -----          -----          -----
$          -----          -----          -----          -----
$          -----          -----          -----          -----')

7      FORMAT(' STARTDATE  ENDDATE          ET1_DOSEFI          ET2_DOSEFI          B
$B_DOSEFI          BBI_DOSEFI          AL_DOSEFI          TOTAL_DOSEFI          ET1
$ DOSECI          ET2_DOSECI          BB_DOSECI          BBI_DOSECI          AL_DO
$SECI          TOTAL_DOSECI          MEANET1_DOSEI          MEANET2_DOSEI          MEANBB_D
$OSEI          MEANBBI_DOSEI          MEANAL_DOSEI          MEANTOTAL_DOSEI          ET1_DOSEF
$O          ET2_DOSEFO          BB_DOSEFO          BBI_DOSEFO          AL_DOSEFO
$      TOTAL_DOSEFO          ET1_DOSECO          ET2_DOSECO          BB_DOSECO
$      BBI_DOSECO          AL_DOSECO          TOTAL_DOSECO          MEANET1_DOSEO M
$EANET2_DOSEO          MEANBB_DOSEO          MEANBBI_DOSEO          MEANAL_DOSEO          MEAN
$TOTAL_DOSEO')

8      FORMAT(' STARTDATE  ENDDATE          DAILYET1_DOSEFI          DAILYET2_DOSEFI          DAI
$LYBB_DOSEFI          DAILYBBI_DOSEFI          DAILYAL_DOSEFI          DAILYTOTAL_DOSEFI          DAIL
$YET1_DOSECI          DAILYET2_DOSECI          DAILYBB_DOSECI          DAILYBBI_DOSECI          DAILYAL
$ DOSECI          DAILYTOTAL_DOSECI          DAILYET1_DOSEI          DAILYET2_DOSEI          DAILYBB_
$DOSEI          DAILYBBI_DOSEI          DAILYAL_DOSEI          DAILYTOTAL_DOSEI          DAILYET1_DO
$SEFO          DAILYET2_DOSEFO          DAILYBB_DOSEFO          DAILYBBI_DOSEFO          DAILYAL_DOSEFO
$      DAILYTOTAL_DOSEFO          DAILYET1_DOSECO          DAILYET2_DOSECO          DAILYBB_DOSECO
$DAILYBBI_DOSECO          DAILYAL_DOSECO          DAILYTOTAL_DOSECO          DAILYET1_DOSEO          DA
$ILYET2_DOSEO          DAILYBB_DOSEO          DAILYBBI_DOSEO          DAILYAL_DOSEO          DAIL
$YTOTAL_DOSEO')

      RETURN
      END

C~~~~~
C~~~~~
C~~~~~

      SUBROUTINE CREATEFORAVERAGE(DAYS)

c      Creates the continuous exposure input file for subroutine Oslo
c      from daily average exposure data

      INTEGER DAYS,I,DAY,line
      REAL*8 EXERCISE(24)
      CHARACTER HOUR(24)*7,INFILE*15

      REAL*8, ALLOCATABLE :: MEANVEL(:),CONC1F(:),CONC1C(:),CONC2F(:),
      $CONC2C(:)
      CHARACTER, ALLOCATABLE :: DATES(:)*9
      ALLOCATE(DATES(DAYS),MEANVEL(DAYS),CONC1F(DAYS),CONC1C(DAYS),CONC2
      $F(DAYS),CONC2C(DAYS))

      PRINT*,'GIVE INFILE NAME WITH AVERAGE DAILY DATA:'

```

```

      READ(*,'(A15)') INFILE

      OPEN(UNIT=632,FILE=INFILE,STATUS='OLD')
      DO LINE=1,DAYS
        READ(632,'(A8,5F8.4)') DATES(LINE),CONC1F(LINE),CONC1C(LINE),
$CONC2F(LINE),CONC2C(LINE),MEANVEL(LINE)
      ENDDO

      DATA HOUR/'0:00:00','1:00:00','2:00:00','3:00:00','4:00:00',
$'5:00:00','6:00:00','7:00:00','8:00:00','9:00:00','10:00:00',
$'11:00:00','12:00:00','13:00:00','14:00:00','15:00:00','16:00:00',
$'17:00:00','18:00:00','19:00:00','20:00:00','21:00:00','22:00:00',
$'23:00:00'/

      DATA EXERCISE/0.45,0.45,0.45,0.45,0.45,0.45,0.45,1.50,1.50,1.50,1.
$50,1.50,1.50,1.50,1.50,1.50,1.50,0.54,0.54,0.54,0.54,0.54,0.54,
$0.45/

      OPEN(UNIT=821,FILE='AV_INPUT.TXT')

      DO DAY=1,DAYS
        DO I=1,24
          IF(I.LT.24) THEN
            write(821,'(A9,A10,A10,A11,f11.2,3f13.2,f10.2,f12.2)')
$DATES(DAY),HOUR(I),DATES(DAY),HOUR(I+1),CONC1F(DAY),CONC1C(DAY),CO
$N2F(DAY),CONC2C(DAY),MEANVEL(DAY),EXERCISE(I)
          ELSE
            IF(DAY.LT.DAYS) THEN

              write(821,'(A9,A10,A10,A11,f11.2,3f13.2,f10.2,f12.
$2)') DATES(DAY),HOUR(I),DATES(DAY+1),HOUR(1),CONC1F(DAY),CONC1C(DA
$Y),CONC2F(DAY),CONC2C(DAY),MEANVEL(DAY),EXERCISE(I)
            ELSE

              write(821,'(A9,A10,A10,A11,f11.2,3f13.2,f10.2,f12.
$2)') DATES(DAY),HOUR(I),DATES(DAY),HOUR(1),CONC1F(DAY),CONC1C(DAY)
$ ,CONC2F(DAY),CONC2C(DAY),MEANVEL(DAY),EXERCISE(I)
            ENDF
          ENDF
        ENDDO
      ENDDO

      CLOSE(821)

      PRINT*
      PRINT*,'*****THE EXPOSURE DATA INPUT FILE IS AV_INPUT.TXT*****'
      PRINT*
      PRINT*

      RETURN
      END

C~~~~~
C~~~~~
C~~~~~

      subroutine solve_dif_clear(INVC,EIGENVEC,EIGENVAL,S,stepperday)

C
C      Solves the system of differential equations for the retention
C      of particles in each region
C
C      PATHWAYS      FROM      TO
C-----|
C-----INITIAL STATE-----|
C      1:      m1,4      A11      bb1      |
C      2:      m2,4      A12      bb1      |
C      3:      m3,4      A13      bb1      |
C      4:      m3,10     A13      LNth     |
C      5:      m4,7      bb1      BB1      |
C      6:      m5,7      bb2      BB1      |
C      7:      m6,10     bbseq     LNth     |
C      8:      m7,11     BB1      ET2      |
C      9:      m8,11     BB2      ET2      |
C      10:     m9,10     BBseq     LNth     |

```

```

C      11:      m11,14  ET2      Gitract |
C      12:      m12,13  ETseq    LNet   |
C      13:      m10,15  LNth     Blood  |
C      14:      m13,15  LNet     Blood  |
C      15:      Blood                      |
C      _____|

      USE IMSL

      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (D-K,O-Z)
      PARAMETER (N=15, LDA=N, LDEVEC=N)

      INTEGER I,J,ILINE,stepperday
      COMPLEX EVAL(N), EVEC(LDEVEC,N)
      REAL A(LDA,N)
      REAL*8 EIGENVEC(N,N),EIGENVAL(N),INVC(N,N),C(N,N),ARATE(12),S

C      Define values of A: IN Y'=AY

      DO I=1,N
         DO J=1,N
            A(I,J)=0.0D0
         END DO
      END DO

      OPEN(UNIT=10,FILE='ARATE.TXT',STATUS='OLD')
      DO ILINE=1,12
         READ(10,*) ARATE(ILINE)
      ENDDO
      close(10)

C      INITIAL VALUES FOR F*C=B-----
C      Y=E(C*EVEC*EXP(EVAL*T)) WHERE B=Y AND F=EVEC*EXP(EVAL*T)

      A(1,1)=-ARATE(1)-S
      A(2,2)=-ARATE(2)-S
      A(3,3)=-ARATE(3)-S
      A(4,4)=-ARATE(4)-S
      A(5,5)=-ARATE(5)-S
      A(6,6)=-ARATE(6)-S
      A(7,7)=-ARATE(7)-S
      A(8,8)=-ARATE(8)-S
      A(9,9)=-ARATE(9)-S
      A(11,11)=-ARATE(10)-S
      A(12,12)=-ARATE(11)-S
      A(10,10)=0.0d0-S
      A(13,13)=0.0d0-S
      A(14,14)=0.0D0
      A(4,1)=ARATE(1)
      A(4,2)=ARATE(2)
      A(4,3)=ARATE(3)
      A(7,4)=ARATE(4)
      A(7,5)=ARATE(5)
      A(10,3)=ARATE(12) !0.00002
      A(10,6)=ARATE(6)
      A(10,9)=ARATE(9)
      A(11,7)=ARATE(7)
      A(11,8)=ARATE(8)
      A(13,12)=ARATE(11)
      A(14,11)=ARATE(10)
      do i=1,13
         A(15,i)=0.0d0+S
      enddo

      do i=1,n
         do j=1,n
            a(i,j)=(1.0D0/stepperday)*a(i,j) !1440min/day
         enddo
      enddo

C      Find eigenvalues and vectors of A
      CALL EVCRG (N, A, LDA, EVAL, EVEC, LDEVEC)
C      CALL UMACH (2, NOU)
C      CALL WRRCN ('EVAL', 1, N, EVAL, 1, 0)
C      CALL WRRCN ('EVEC', N, N, EVEC, LDEVEC, 0)

```

```

c      pause
      DO I=1,N
          EIGENVAL(I)=REAL(EVAL(I))
          DO J=1,N
              EIGENVEC(I,J)=REAL(EVEC(I,J))
          END DO
      END DO

C      FIND Y=F(...,K)*EXP(X(K)*T)
      write(500,*) 'EIGENvalues'
      write(500,*) (eigenval(i), i=1,n)
      write(500,*) '***'
      write(500,*) (exp(eigenval(i)),i=1,n)
      write(500,*) 'EIGENVECTORS'
      DO I=1,N
          WRITE(500,'(15F8.4)') (EIGENVEC(I,J), J=1,N)
      ENDDO

C      FIND Y=F(...,K)*EXP(X(K)*T)

      DO I=1,N
          DO J=1,N
              C(I,J)=EIGENVEC(I,J)*(DEXP(EIGENVAL(J))**0.0D0) !0 is the time
c      when the initial values are the deposited
          ENDDO
      ENDDO

      CALL INVERSE(C,N,INVC)

      RETURN
      END

C~~~~~
C~~~~~
C~~~~~

      SUBROUTINE INVERSE(A,N,INVA)
C
C      Returns the inverse matrix INVA of a matrix A
C
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)

      REAL*8 A(N,N), INVA(N,N), B(N,2*N), DUMMY, C(N,2*N)
      INTEGER N, I, J, K, Q, Q1(N), q2(N), lala, lalas

      DO I=1,N
          DO J=1,N
              B(I,J)=A(I,J)
          END DO
      END DO

      DO I=1,N
          DO J=N+1,2*N
              IF(I.EQ.(J-N)) THEN
                  B(I,J)=1.0D0
              ELSE
                  B(I,J)=0.0D0
              END IF
          END DO
      END DO

      DO I=1,N
          DO J=1,2*N
              C(I,J) =0.0D0
          END DO
      END DO

      q=0

      do i=1,n

```

```

        q1(i)=0
        q2(i)=0
        do j=1,n
            if(b(i,j).ne.0) then
                q=1
                lala=j
            else
                q=0
            endif
            q1(i)=q1(i)+q
        enddo

        do j=1,n
            if(b(j,i).ne.0) then
                q=1
                lalas=j
            else
                q=0
            endif
            q2(i)=q2(i)+q
        enddo

        if(q1(i).eq.1) then
            do k=1,2*n
                c(lala,k)=b(i,k)
            enddo
        endif

        if(q2(i).eq.1) then
            do k=1,2*n
                c(i,k)=b(lalas,k)
                b(lalas,k)=0.0D0
            enddo
        endif

    enddo

do i=1,n
    if(q1(i).eq.1) then
        do k=1,2*n
            b(i,k)=0.0D0
        enddo
    endif
enddo

10 do i=1,n
    if(c(i,i).eq.0) then
        do j=1,n
            if(b(j,i).ne.0) then
                do k=1,2*n
                    c(i,k)=b(j,k)
                    b(j,k)=0.0D0
                end do
            endif
        end do
    endif
end do

DO I=1,N
    DO J=1,2*N
        B(I,J)=C(I,J)
    END DO
END DO

C
DO K=1,N
    DUMMY=B(K,K)
    DO J=1,2*N
        if(dummy.ne.0) then
            B(K,J)=B(K,J)/DUMMY
        else
            print*, 'dummy 0'
            print*, k
        end if
    end do
end do

```

```

                                stop
                                endif
                                END DO

                                DO I=1,N
                                    IF (I.NE.K) THEN
                                        DUMMY=B (I,K)
                                        DO J=1, 2*N
                                            B (I,J)=B (I,J) -DUMMY*B (K,J)
                                        END DO
                                    ENDIF
                                END DO
                                END DO

                                DO I=1,N
                                    DO J=N+1, 2*N
                                        INVA (I,J-N)=B (I,J)
                                    END DO
                                END DO

                                RETURN
                                END

C~~~~~
C~~~~~
C~~~~~

subroutine errorfunction(ka,yi)

c      Derived from Numerical Recipes in Fortran

real ka,yi

if(ka.lt.0) then
    yi=(-1)*erf((-1)*ka)
else
    yi=erf(ka)
endif
return
end

FUNCTION erf(x)
REAL erf,x
C      USES gammp
c      Returns the error function erf(x).
REAL gammp
if(x.lt.0.)then
    erf=-gammp(.5,x**2)
else
    erf=gammp(.5,x**2)
endif
return
END

FUNCTION gammp(a,x)
REAL a,gammp,x
C      USES gcf,gser
C      Returns the incomplete gamma function P(a; x).
REAL gammcf,gamser,gln

if(x.lt.0.or.a.le.0.) pause 'bad arguments in gammp'
if(x.lt.a+1.)then !Use the series representation.
    call gser(gamser,a,x,gln)
    gammp=gamser
else !Use the continued fraction representation
    call gcf(gammcf,a,x,gln)
    gammp=1.-gammcf !and take its complement.
endif
return
END

```

```

      FUNCTION gammq(a,x)
      REAL a,gammq,x
C USES gcf,gser
C Returns the incomplete gamma function Q(a; x) . 1 ? P(a; x).
      REAL gammcf,gamser,gln
      if(x.lt.0..or.a.le.0.) pause 'bad arguments in gammq'
      if(x.lt.a+1.)then !Use the series representation
        call gser(gamser,a,x,gln)
        gammq=1.-gamser !and take its complement.
      else !Use the continued fraction representation.
        call gcf(gammcf,a,x,gln)
        gammq=gammcf
      endif
      return
      END

      SUBROUTINE gser(gamser,a,x,gln)
      INTEGER ITMAX
      REAL a,gamser,gln,x,EPS
      PARAMETER (ITMAX=100,EPS=3.e-7)
C USES gammln. Returns the incomplete gamma function P(a; x)
C evaluated by its series representation as gamser.
C Also returns lnΓ(a) as gln

      INTEGER n
      REAL ap,del,sum,gammln
      gln=gammln(a)
      if(x.le.0.)then
        if(x.lt.0.)pause 'x < 0 in gser'
        gamser=0.
        return
      endif
      ap=a
      sum=1./a
      del=sum
      do n=1,ITMAX
        ap=ap+1.
        del=del*x/ap
        sum=sum+del
        if(abs(del).lt.abs(sum)*EPS)goto 1
      enddo
      pause 'a too large, ITMAX too small in gser'

1     gamser=sum*exp(-x+a*log(x)-gln)
      return
      END

      SUBROUTINE gcf(gammcf,a,x,gln)
      INTEGER ITMAX
      REAL a,gammcf,gln,x,EPS,FPMIN
      PARAMETER (ITMAX=100,EPS=3.e-7,FPMIN=1.e-30)
C USES gammln.Returns the incomplete gamma function
C Q(a; x) evaluated by its continued fraction representation
C as gammcf. Also returns lnΓ(a) as gln.
C Parameters: ITMAX is the maximum allowed number of iterations
C             EPS is the relative accuracy
C             FPMIN is a number near the smallest representable
C             floating-point number

      INTEGER i
      REAL an,b,c,d,del,h,gammln
      gln=gammln(a)
      b=x+1.-a
      c=1./FPMIN
      d=1./b
      h=d
      do i=1,ITMAX !Iterate to convergence.
        an=-i*(i-a)
        b=b+2.
        d=an*d+b
        if(abs(d).lt.FPMIN)d=FPMIN
        c=b+an/c
        if(abs(c).lt.FPMIN)c=FPMIN
        d=1./d
        del=d*c
        h=h*del

```

```

        if(abs(del-1.)<.lt.EPS)goto 1
    enddo

    pause 'a too large, ITMAX too small in gcf'
1   gammcf=exp(-x+a*log(x)-gln)*h !Put factors in front.
    return
    END

    FUNCTION gammln(xx)
    REAL gammln,xx
    INTEGER j
    DOUBLE PRECISION ser,stp,tmp,x,y,cof(6)
    SAVE cof,stp
    DATA cof,stp/76.18009172947146d0,-86.50532032941677d0,
$   24.01409824083091d0,-1.231739572450155d0,.1208650973866179d-2,
$   -.5395239384953d-5,2.5066282746310005d0/
    x=xx
    y=x
    tmp=x+5.5d0
    tmp=(x+0.5d0)*dlog(tmp)-tmp
    ser=1.000000000190015d0
    do j=1,6
    y=y+1.d0
    ser=ser+cof(j)/y
    enddo
    gammln=tmp+dlog(stp*ser/x)
    return
    END

C~~~~~
C~~~~~
C~~~~~

```