



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΒΙΟΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

Εκτίμηση έκθεσης παιδιών προσχολικής και σχολικής ηλικίας σε αιωρούμενα σωματίδια

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΑΡΥΤΙΝΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

**ΤΣΑΓΓΑΡΗΣ ΣΩΚΡΑΤΗΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.**

ΑΘΗΝΑ
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2016

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή και Διευθυντή του Εργαστηρίου Βιορευστομηχανικής και Βιοϊατρικής Τεχνολογίας κ. Σωκράτη Τσαγγάρη για την ανάθεση της εργασίας και την συνεργασία που είχαμε καθ'όλη την διάρκεια της εκπόνησής της. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Χρήστο Χουσιάδα (Ερευνητή Α') Διευθυντή του Εργαστηρίου Θερμοϋδραυλικής Ανάλυσης και Πολυφασικών Ροών του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» για την παροχή του μοντέλου υπολογισμού της μεταφοράς και εναπόθεσης των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα, καθώς και για την επιστημονική και υλικοτεχνική στήριξη κατά την παραμονή μου στο εργαστήριο. Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στον Καθηγητή Ιωάννη Μπάρτζη και τη Δρ. Κρυσταλλία Καλημέρη του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, οι οποίοι μου παραχώρησαν τα δεδομένα των μετρήσεων έκθεσης στα σχολεία.

Επιπλέον, ιδιαίτερα θερμά θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Δρ. Δικαία Σαραγά του Εργαστηρίου Περιβαλλοντικών Ερευνών και τη Δρ. Μαρίκα Πηλού του Εργαστηρίου Θερμοϋδραυλικής Ανάλυσης και Πολυφασικών Ροών του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» για τη στενή συνεργασία καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας και την υποστήριξή τους ώστε να ολοκληρωθεί η εργασία. Τέλος, ευχαριστώ πολύ την Ευαγγελία για την υποστήριξή της σε όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εκτιμάται η συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα παιδιών σχολικής και προσχολικής ηλικίας. Στα πλαίσια του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος SINFONIE μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων εντός διαφορετικών αιθουσών διδασκαλίας σε δύο δημοτικά σχολεία και ένα νηπιαγωγείο στην πόλη της Κοζάνης. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε δύο περιόδους, θερμή και ψυχρή, για εύρος σωματιδίων από $0.23\mu m$ έως $20\mu m$. Τα δεδομένα έκθεσης εισήχθησαν σε αριθμητικό μοντέλο για τον υπολογισμό της δόσης στο αναπνευστικό σύστημα των μαθητών. Συγκεκριμένα, το μοντέλο υπολογίζει τον αριθμό των σωματιδίων που εναποτίθενται στις διάφορες περιοχές του αναπνευστικού συστήματος (εκτός-θώρακα, τραχειοβρογχική και κυψελιδική) ανά αναπνοή και λαμβάνει υπόψη τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων, της ανατομίας του πνεύμονα και της φυσιολογίας της αναπνοής. Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα του μοντέλου με τον χρόνο έκθεσης των παιδιών στα αιωρούμενα σωματίδια υπολογίστηκε η μέση ημερήσια δόση που δέχονται τα παιδιά σε κάθε σχολείο και κάθε εποχή.

Από τις πειραματικές καμπάνιες μέτρησης των αιωρούμενων σωματιδίων, προέκυψαν οι καμπύλες έκθεσης για κάθε αίθουσα. Η έκθεση των παιδιών αφορά κυρίως σωματίδια με διαμέτρους μεγαλύτερες του $1\mu m$. Πρόσθετα, η έκθεση παρουσιάζει διακυμάνσεις κατά την διάρκεια της σχολικής ημέρας που οφείλεται κυρίως στην επαναιώρηση των μεγαλύτερων σωματιδίων όταν τα παιδιά κινούνται μέσα στις αίθουσες.

Τα αποτελέσματα του υπολογιστικού μοντέλου δείχνουν αυξημένες συγκεντρώσεις των σωματιδίων στην εκτός-θώρακα περιοχή για όλα τα σχολικά κτήρια τόσο στην θερμή όσο και στην ψυχρή περίοδο. Οι αριθμοί των εναποτιθέμενων σωματιδίων σε τραχειοβρογχική και κυψελιδική περιοχή αποτελούνται κυρίως από μικρότερα σωματίδια, ωστόσο οι δόσεις είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με την εκτός-θώρακα περιοχή. Η μέση ημερήσια δόση την ψυχρή περίοδο είναι ανάλογη για όλα τα σχολεία, ενώ την θερμή περίοδο η δόση στο αναπνευστικό των νηπίων είναι υπερδιπλάσια αυτής των παιδιών του δημοτικού, επειδή τα δεύτερα περνούν το διάλειμμά τους εκτός της αίθουσας.

Abstract

The current thesis estimates the airborne particulate matter that is deposited on the respiratory tract of pre-school and school aged children. During the European research program SINPHONIE, measurements of the concentration of airborne particulate matter were carried out in different classrooms of two preliminary schools and one kindergarten at the city of Kozani. There were two periods of measurements, a warm and a cool season, for aerosols sizes ranging between 0.23 to 20 μm . These exposure data were then introduced into a mathematical model that estimates the dose in the respiratory system of the pupils. In particular, the model calculates the number of deposited particles per breath in the different regions of the respiratory tract (extrathoracic, tracheobronchial and alveolar) and takes into account the characteristics of the particles, the anatomy of the respiratory tract and the physiology of the breath. The results of the model were combined with the duration of exposure of children to the airborne particulate matter in order to calculate the average daily dose in the respiratory tract of the children in each school and for both periods of measurement.

The experimental campaigns for the measurement of airborne particulate matter gave us the exposure for each classroom. In all cases, children are mostly exposed to particles with diameters greater than 1 μm . In addition, exposure fluctuates during the day and this is mainly attributed to resuspension of the bigger (and heavier) particles when the children move around in the classroom.

The results of the computational model showed that in all cases the dose is higher in the extrathoracic region of the respiratory tract. The number of deposited particles in the tracheobronchial and alveolar regions consists mainly of particles of small diameters; however the dose there is much smaller than that in the extrathoracic region. The average daily dose is equivalent in all schools during the cold period, whereas during the warm period the dose in the kindergarten is more than double of that in the preliminary schools, because in the latter the children spend their break outside.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	3
Περίληψη.....	5
Abstract	7
1 Εισαγωγή	13
2 Αναπνευστικό σύστημα.....	15
2.1 Μορφολογία πνεύμονα.....	15
2.2 Αναπνοή.....	17
3 Θεωρία πολυφασικών ροών και αερολυμάτων	19
3.1 Αερολύματα	19
3.2 Βασικές έννοιες και ορισμοί.....	23
3.3 Αριθμός Stokes	23
3.4 Αραιές και πυκνές ροές	24
3.5 Μέγεθος σωματιδίων – Κατανομές.....	24
3.6 Εισπνεόμενο κλάσμα	26
3.7 Δυναμική αερολύματος.....	26
3.7.1 Εσωτερικές διεργασίες.....	29
3.7.2 Εξωτερικές διεργασίες ή μηχανισμοί εναπόθεσης.....	33
4 Μετρήσεις έκθεσης σε αιωρούμενα σωματίδια	41
4.1 Περιγραφή του προγράμματος SINPHONIE	41
4.2 Κριτήρια και επιλογή σχολικών κτιρίων	44
4.3 Κριτήρια και επιλογή σχολικών αιθουσών.....	47
4.4 Μεθοδολογία δειγματοληψίας	51

4.5	Πειραματικός εξοπλισμός για τη δειγματοληψία και τη μέτρηση των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων.....	53
5	Αποτελέσματα μετρήσεων.....	57
5.1	Διαγράμματα χρονοσειρών.....	57
6	Υπολογιστικό μοντέλο προσδιορισμού δόσης στο αναπνευστικό σύστημα.....	71
6.1	Μηχανισμοί εναπόθεσης.....	71
6.1.1	Βαρυτική καθίζηση.....	72
6.1.2	Μοριακή διάχυση.....	73
6.1.3	Αδρανειακή πρόσκρουση.....	74
6.1.4	Ηλεκτροστατική εναπόθεση.....	75
6.1.5	Τυρβώδης πρόσκρουση.....	76
6.1.6	Τυρβώδης διάχυση.....	76
6.1.7	Εναπόθεση λόγω στένωσης του αγωγού.....	77
6.1.8	Ταυτόχρονη εναπόθεση.....	77
6.2	Θωρακική περιοχή.....	78
6.3	Εκτός θώρακα περιοχή.....	80
6.3.1	Είσοδος μέσω ρινικής κοιλότητας.....	80
6.3.2	Είσοδος μέσω στοματικής κοιλότητας.....	81
6.4	Αρχικές – οριακές συνθήκες.....	82
6.5	Προσδιορισμός κλάσματος εναπόθεσης.....	83
7	Υπολογισμός δόσεων στο αναπνευστικό σύστημα.....	85
7.1	Δεδομένα εισόδου υπολογιστικού μοντέλου.....	85
7.1.1	Εισαγωγή έκθεσης.....	86
7.1.2	Εισαγωγή παραμέτρων φυσιολογίας και αναπνοής.....	87

7.1.3	Εισαγωγή χαρακτηριστικών μεγεθών πληθυσμού σωματιδίων	89
7.2	Αποτελέσματα υπολογιστικού μοντέλου	89
7.2.1	Διαγράμματα κλάσματος εναπόθεσης	90
7.2.2	Διαγράμματα αριθμού εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα ανα αναπνοή.	94
7.2.3	Διαγράμματα και πίνακες συνολικής εναπόθεσης σωματιδίων ανά ημέρα	100
8	Συμπεράσματα	109
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α		113
	Διαγράμματα ομαδοποιημένων διαμέτρων θερμής περιόδου.....	113
	Διαγράμματα ομαδοποιημένων διαμέτρων ψυχρής περιόδου	115
	Διαγράμματα ομαδοποιημένων διαμέτρων της χρονικής περιόδου διδασκαλίας μέσα στην τάξη θερμής περιόδου	117
	Διαγράμματα ομαδοποιημένων διαμέτρων της χρονικής περιόδου διδασκαλίας μέσα στην τάξη ψυχρής περιόδου.....	119
	Διαγράμματα μέσων τιμών και τυπικών αποκλίσεων θερμής περιόδου.....	121
	Διαγράμματα μέσων τιμών και τυπικών αποκλίσεων ψυχρής περιόδου	123
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....		125
	Διαγράμματα ανηγμένου αριθμού εναπόθεσης – Θερμή περίοδος.....	125
	Διαγράμματα ανηγμένου αριθμού εναπόθεσης – Ψυχρή περίοδος	127
	Διαγράμματα συνεισφοράς των σωματιδίων της κάθε τάξης μεγέθους στην ημερήσια δόση – Θερμή περίοδος	129
	Διαγράμματα συνεισφοράς των σωματιδίων της κάθε τάξης μεγέθους στην ημερήσια δόση – Ψυχρή περίοδος	131
	Πίνακας συνολικής ημερήσιας δόσης θερμής και ψυχρής περιόδου	134
	Βιβλιογραφία.....	135

1 Εισαγωγή

Η ποιότητα του αέρα σε σχολικές μονάδες και κατ' επέκταση η έκθεση των μαθητών σε ρύπους και αιωρούμενα σωματίδια είναι ένα ενεργό ερευνητικό πεδίο τουλάχιστον από τις αρχές της δεκαετίας του 1980. Οι Lannefors, H., Hansson H.C. (1980) ασχολήθηκαν με τις συγκεντρώσεις συγκεκριμένων ρύπων μέσα και στον περιβάλλοντα χώρο δημοτικών σχολείων προσπαθώντας να βρουν κάποια σχέση στις συγκεντρώσεις εσωτερικού και εξωτερικού χώρου. Στην συνέχεια οι Scheff, P.A. et al. (2000) μέτρησαν τις συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων και άλλων οργανικών αερολυμάτων σε σχολικό περιβάλλον για να πιστοποιήσουν τον συγκεκριμένο χώρο ως πρότυπο υγιή και καθαρού σχολείου όσον αφορά την ποιότητα του αέρα. Η εργασία των Braniš, M. et al. (2009) και ακολούθως αυτή των Buonanno, G. et al. (2012) εξετάζουν τις συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων σε σχολεία που βρίσκονταν στο κέντρο μεγάλων πόλεων και ειδικά τις ώρες που τα παιδιά εκτελούσαν σωματική άσκηση εντός του σχολείου. Τέλος των τελευταίο χρόνο γίνονται μετρήσεις σε σχολεία ώστε να επιβεβαιωθεί η συσχέτιση του περιβάλλοντα χώρου και της ποιότητας του αέρα της περιοχής με την ποιότητα του αέρα εντός των σχολείων (Viana et al., 2014; Amato et al., 2014; Kuo et al., 2014; Wang et al., 2014).

Όσον αφορά τον υπολογισμό της εναπόθεσης των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα των παιδιών οι Isaacs, K.K. et al. (2005) χρησιμοποίησαν ένα μαθηματικό μοντέλο για την εναπόθεση των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα αλλά μόνο για περιορισμένο φάσμα διαμέτρων σωματιδίων. Στην συνέχεια οι Golshahi, L. et al. (2012) κατασκευάζοντας ομοιώματα της εκτός-θώρακα περιοχής του αναπνευστικού συστήματος έκαναν προσομοίωση της αναπνοής με πολλές παραμέτρους με την βοήθεια των ομοιωμάτων και έτσι υπολόγισαν τον αριθμό εναποτιθέμενων σωματιδίων από 0.5 έως 5.3 μm . Ομοίως οι Zhou, Y. et al. (2014) χρησιμοποίησαν διάφορες μετρήσεις από ομοιώματα αναπνευστικού συστήματος διαφόρων ηλικιών για τον υπολογισμό της εναπόθεσης σωματιδίων από 2 έως 28 μm . Τέλος οι Patterson, R.F. et al. (2014) χρησιμοποίησαν ένα υπολογιστικό μοντέλο για να υπολογίσουν τα εναποτιθέμενα υπέρλεπτα σωματίδια (μικρότερα από 100 nm) στον αναπνευστικό σύστημα των παιδιών την ώρα που βρίσκονται στο σχολείο.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα ενός ευρωπαϊκού προγράμματος, στα πλαίσια του οποίου διενεργήθηκε μέτρηση των συγκεντρώσεων σωματιδίων διαφόρων διαμέτρων στον εσωτερικό χώρο σχολείων κατά την διάρκεια διεξαγωγής των μαθημάτων, ώστε να προσδιοριστεί η έκθεση των μαθητών σε αιωρούμενα σωματίδια. Τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων, δηλαδή η έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια, εισάγονται σε αριθμητικό μοντέλο ώστε να υπολογιστεί ο αριθμός των σωματιδίων που τελικά εναποτίθενται στις διάφορες περιοχές του αναπνευστικού συστήματος των μαθητών. Οι Isaacs, K.K., Martonen, T.B. (2005) χρησιμοποιώντας ένα μαθηματικό μοντέλο υπολόγισαν το κλάσμα εναπόθεσης σωματιδίων $1 - 3 \mu m$ στο αναπνευστικό σύστημα παιδιών για διάφορα επίπεδα σωματικής άσκησης. Οι Golshahi, L., Noga, M.L., Finlay, W.H. (2012) αφού κατασκεύασαν ένα ομοίωμα της στοματοφαρυγγικής περιοχής, το οποίο προήλθε από μαγνητικές τομογραφίες παιδιών $6 - 14$ ετών, στη συνέχεια με την χρήση ειδικής συσκευής δημιούργησαν τεχνητή ροή αερολυμάτων με μεγέθη σωματιδίων $0.5 - 5.3 \mu m$ και τέλος υπολόγισαν την εναπόθεση των σωματιδίων στο ομοίωμα. Ομοίως, οι Zhou, Y., Guo, M., Xi, J., Irshad, H., Cheng, Y.-S. (2014) μέτρησαν την εναπόθεση σωματιδίων εύρους $2 - 28 \mu m$ κάνοντας χρήση ομοιωμάτων της ρινικής κοιλότητας παιδιών. Τέλος, οι Patterson, R.F., Zhang, Q., Zheng, M., Zhu, Y. (2014) κάνοντας χρήση υπολογιστικού μοντέλου και έχοντας μετρήσεις υπέρλεπτων σωματιδίων $18 - 40 nm$ υπολόγισαν την εναπόθεση των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα παιδιών για 24 ωρη έκθεση σε σχολικό περιβάλλον.

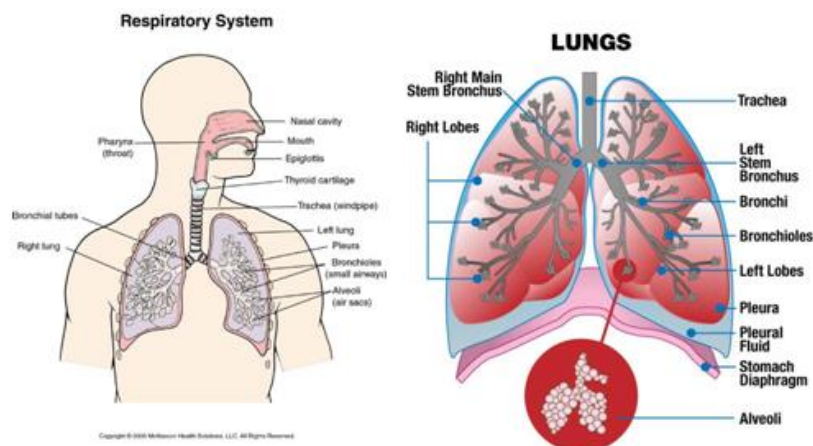
2 Αναπνευστικό σύστημα

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά κυρίως τον υπολογισμό της εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα. Η εναπόθεση σχετίζεται άμεσα με την μορφολογία του αναπνευστικού συστήματος καθώς και με την αναπνοή και τους παράγοντες που την επηρεάζουν. Για τον λόγο αυτό θεωρείται χρήσιμη μία αναφορά στην μορφολογία της αναπνευστικής οδού (respiratory tract) καθώς και η περιγραφή της αναπνοής.

2.1 Μορφολογία πνεύμονα

Ο εισπνεόμενος αέρας πριν την είσοδο του στους πνεύμονες διέρχεται αρχικά μέσα από το *ανώτερο αναπνευστικό σύστημα* (upper respiratory tract) ή *εκτός-θώρακα περιοχή* (extrathoracic region), το οποίο περιλαμβάνει την *ρινική κοιλότητα* (nasal cavity), το *λάρυγγα*, το *φάρυγγα* και το *στόμα*. Στην συνέχεια ακολουθεί η *θωρακική περιοχή*, η οποία αποτελείται από την *τραχεία* (trachea), τους *βρόγχους* (bronchi), τα *βρογχιόλια* (bronchioles) και τις *κυψελίδες* (alveoli). Στο επάνω μέρος της τραχείας βρίσκονται οι φωνητικές χορδές, οι οποίες έχουν σαν δευτερεύοντα ρόλο να εμποδίζουν την είσοδο της τροφής πέρα του φάρυγγα προς αυτήν. Η τραχεία μαζί με τους βρόγχους και τα βρογχιόλια (εκτός των αναπνευστικών βρογχιολίων που βρίσκονται στο κατώτερο τμήμα) αποτελούν την *τραχειοβρογχική περιοχή* (tracheobronchial region), ενώ τα αναπνευστικά βρογχιόλια και οι κυψελίδες αποτελούν την *κυψελιδική περιοχή* (alveolar region) ([Εικόνα 2.1](#) και [Εικόνα 2.2](#)).

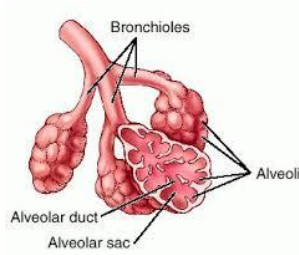
Η τραχεία έχει μήκος περίπου 11 cm και διάμετρο 2 - 2.5 cm και στο κατώτερο σημείο της χωρίζεται στους δύο κύριους βρόγχους, έναν για κάθε πνεύμονα. Στην συνέχεια οι βρόγχοι διακλαδίζονται, συνήθως διχοτομικά και με φθίνουσες διαστάσεις μέχρι να καταλήξουν στα βρογχιόλια και στην συνέχεια στους κυψελιδικούς πόρους. Κάθε πνευμονικός λοβός περιλαμβάνει 60 με 80 βρογχιόλια και το καθένα από αυτά 2 με 11 κυψελιδικούς πόρους, οι οποίοι είναι σάκοι με λεπτά τοιχώματα. Το συνολικό πλήθος των διακλαδώσεων των βρόγχων ποικίλει από 8 έως 25, με μέσο όρο 23, οι οποίες και χωρίζουν τους βρόγχους σε *γενιές*.



Εικόνα 2.1 Το ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα – Διακλαδωμένη δομή πνεύμονα

Το 80% περίπου του ολικού όγκου των πνευμόνων χρησιμεύει στην μεταφορά του αέρα από το περιβάλλον στις κυψελίδες και αποτελεί την *ζώνη σύνδεσης*. Η ζώνη σύνδεσης, ή σύστημα αγωγής, ξεκινά από την στοματική κοιλότητα και φτάνει μέχρι τα τελικά βρογχιόλια. Μετά τη ζώνη σύνδεσης ακολουθούν η *μεταβατική* και η *αναπνευστική ζώνη* των πνευμόνων. Η μεταβατική ζώνη αποτελείται από τα *αναπνευστικά βρογχιόλια* και τους *κυψελιδικούς πόρους*. Αναπνευστικά βρογχιόλια ονομάζονται μόνο τα πολύ λεπτά βρογχιόλια που προκύπτουν κατά την 17^η – 19^η διαίρεση των βρόγχων.

Στις διακλαδώσεις που δημιουργούνται στους κυψελιδικούς πόρους σχηματίζονται οι κυψελιδικοί σάκοι ή αεροθύλακες. Οι κυψελίδες σχηματίζονται ως προέκταση των αεροθυλάκων. Πρόκειται για κοιλότητες διαμέτρου περίπου 100 – 300 μm, οι οποίες περιλαμβάνουν τα τριχοειδή αγγεία, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Κάθε άνθρωπος έχει περίπου 300 εκατομμύρια κυψελίδες, με συνολική επιφάνεια περίπου τα 60 m². Η ανταλλαγή των αερίων γίνεται αποκλειστικά στις κυψελίδες.



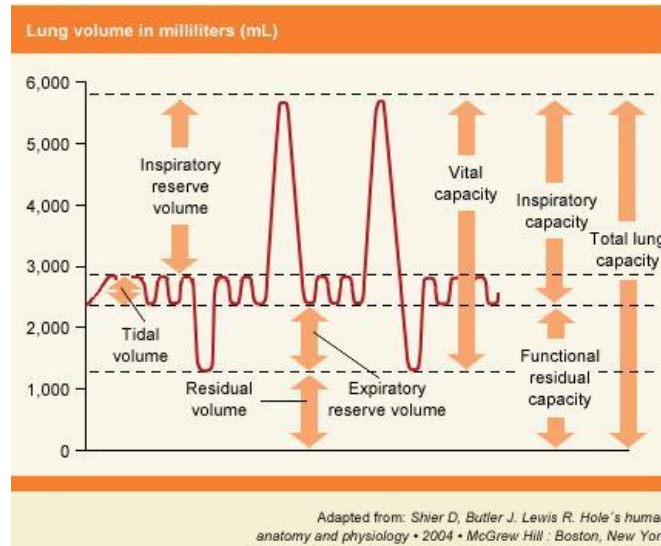
Εικόνα 2.2 Λεπτομέρεια κυψελίδων (είναι εμφανή και τα τριχοειδή αγγεία)

2.2 Αναπνοή

Αναπνοή ονομάζεται η ανταλλαγή αερίων μεταξύ οργανισμού και περιβάλλοντος, κατά την οποία προσλαμβάνεται οξυγόνο και αποβάλλεται διοξείδιο του άνθρακα. Η αναπνοή είναι μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία για την οποία χρησιμοποιούνται δύο συστήματα, ένα εξωτερικό και ένα εσωτερικό. Το εξωτερικό σύστημα είναι υπεύθυνο για την διατήρηση σταθερής συγκέντρωσης αερίων στο αίμα, σε μακροσκοπική κλίμακα, ενώ το εσωτερικό ρυθμίζει την κάθε αναπνοή ξεχωριστά με νευρολογικά σήματα. Κατά τη ρύθμιση διακρίνουμε δύο στάδια: ο έλεγχος του ρυθμού της αναπνοής και ο ολικός αερισμός των πνευμόνων, που εξαρτάται από το ρυθμό και το βάθος κάθε αναπνοής.

Βασικές παράμετροι της φυσιολογίας της αναπνοής είναι (Εικόνα 2.3):

- Ο αναπνεόμενος όγκος V_T (tidal volume), ο οποίος είναι της τάξεως των 500 cm^3 /ανά αναπνοή
- Η αναπνευστική συχνότητα f (breathing frequency) σε εισπνοές ανά λεπτό, από την οποία προκύπτει και η περίοδος αναπνοής T
- Η ολική πνευμονική χωρητικότητα TLC (total lung capacity), δηλαδή ο όγκος του αέρα που βρίσκεται εντός των πνευμόνων τη στιγμή της μέγιστης εισπνοής
- Ο υπολειπόμενος όγκος RV (residual volume), δηλαδή ο όγκος που παραμένει στους πνεύμονες μετά την μέγιστη εκπνοή
- Η ζωτική χωρητικότητα VC (vital capacity), δηλαδή ο μέγιστος όγκος αέρα που μπορεί να εκπνεύσει ένα άτομο μετά από μια μέγιστη εισπνοή
- Ο εισπνεόμενος όγκος αέρα IRV (inspiratory reserve volume), δηλαδή το κλάσμα του όγκου των πνευμόνων που καταλαμβάνεται κατά την εισπνοή
- Η λειτουργική υπολειπόμενη χωρητικότητα FRC (functional residual capacity), δηλαδή ο όγκος του αέρα που παραμένει συνεχώς εντός των πνευμόνων, ακόμα και μετά την εκπνοή.



Εικόνα 2.3 Τα κλάσματα όγκου του αέρα που εισέρχονται στους πνεύμονες

Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ενός κύκλου αναπνοής συνήθως εκφράζονται με την βοήθεια δύο παραμέτρων φυσιολογίας:

- Ο ρυθμός αερισμού B (ventilation rate) είναι ο ρυθμός ανανέωσης του αέρα στο αναπνευστικό σύστημα, δηλαδή $B = \frac{V_T}{T}$
- Η ογκομετρική παροχή αέρα \dot{V} (volumetric flow rate), που αντιστοιχεί στον εισπνεόμενο όγκο αέρα στη μονάδα του χρόνου και ορίζεται ως το πηλίκο του αναπνεόμενου όγκου με το χρόνο που διαρκεί η εισπνοή (συνήθως ο μισός χρόνος ενός κύκλου αναπνοής), $\dot{V} = \frac{V_T}{T/2}$.

Τα χαρακτηριστικά της αναπνοής εξαρτώνται από διάφορες παραμέτρους, όπως η ηλικία, το φύλο, το επίπεδο της σωματικής δραστηριότητας και την κατάσταση της υγείας του ατόμου. Στην παρούσα εργασία μπορεί κάποιος να αναγνωρίσει δύο ηλικιακές ομάδες: α) νήπια 4-5 ετών που φοιτούν στα νηπιαγωγεία, και β) παιδιά 6-11 ετών που φοιτούν στα δημοτικά σχολεία. Πρόσθετα, λαμβάνοντας υπόψη τις δραστηριότητες που εκτελούνται στα σχολεία θεωρούμε ότι τα νήπια βρίσκονται συνεχώς σε μια ήπια κίνηση, ενώ το πρόγραμμα στα δημοτικά περιλαμβάνει σαφώς ορισμένα διαστήματα όπου τα παιδιά κάθονται (ώρα μαθήματος) και διαστήματα ελαφριάς σωματικής άσκησης (διαλείμματα).

3 Θεωρία πολυφασικών ροών και αερολυμάτων

Ο όρος φάση αναφέρεται σε μια στερεή, υγρή ή αέρια κατάσταση της ύλης. Μια πολυφασική ροή αποτελεί τη ροή ενός μείγματος δύο ή περισσότερων φάσεων όπως π.χ. φυσαλίδες αερίων σε υγρά ή σταγόνες σε αέρια.

Στην παρούσα εργασία ενδιαφερόμαστε για τη διφασική ροή αέρα – στερεών σωματιδίων και σε αυτό το σύστημα θα επικεντρωθεί η περιγραφή του θεωρητικού υποβάθρου.

3.1 Αερολύματα

Ο όρος *αερόλυμα* (αέρας + διάλυμα) αναφέρεται στη διασπορά και αιώρηση μικρών, στερεών ή υγρών σωματιδίων σε αέριο, συνήθως αέρα. Τα αερολύματα μπορεί να είναι αποτελέσματα μετατροπής αερίων σε σωματίδια, αποσύνθεσης υγρών ή στερεών, επαναιώρησης σκόνης ή διάσπασης συσσωματωμάτων. Ανάλογα με την προέλευση ή και την περιοχή που τα συναντούμε, τα αερολύματα είναι γνωστά και ως καπνός (smoke), σκόνη (dust), αχλή (haze), αιθάλη (fume), ομίχλη (mist), φούμος (soot), ακόμα και βιολογική ύλη (ιοί, βακτήρια, μύκητες κτλ).

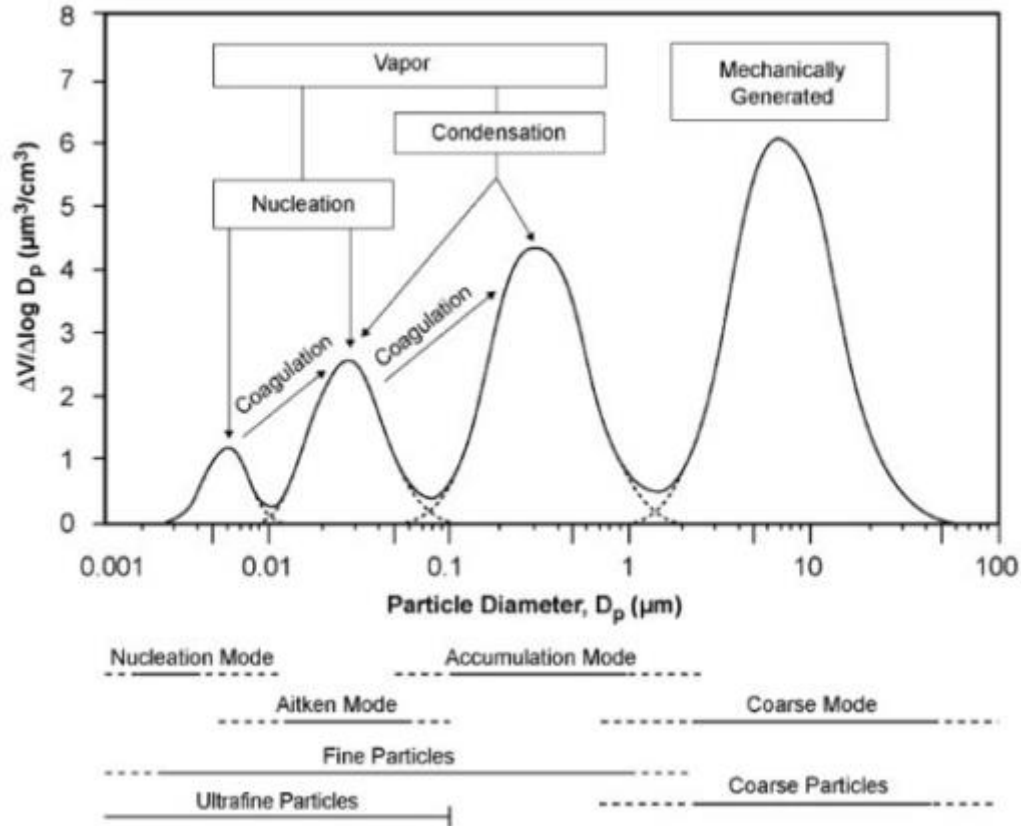
Χαρακτηριστικό των αερολυμάτων είναι η αρκετά διαλυμένη στερεή φάση (μάζα σωματιδίων συνήθως μικρότερη του 0.0001% της ολικής μάζας ή όγκου) καθώς και τα πολύ μικρού μεγέθους σωματίδια (κλίμακες τάξεις νανομέτρου μέχρι δεκάτου του χιλιοστού). Συνήθως χρησιμοποιούνται οι μονάδες του μικρομέτρου (μm) ή νανομέτρου (nm) για τη διάμετρο των σωματιδίων. Για αυτό το λόγο μπορούμε να θεωρήσουμε το αερόλυμα ως διφασικό σύστημα *μονής-σύζευξης*, δηλαδή να υποθέσουμε ότι το φέρον αέριο επιδρά στη σωματιδιακή φάση και όχι το αντίστροφο.

Ανάλογα με το μέγεθος, διακρίνουμε τα σωματίδια σε *χονδρόκοκκα* (coarse) $d_p > 2 \mu\text{m}$ ή $1 \mu\text{m}$ και *λεπτόκοκκα* (fine) $d_p < 2 \mu\text{m}$ ή $1 \mu\text{m}$. Παραδείγματα χονδρόκοκκων σωματιδίων είναι η αιωρούμενη λόγω ανέμων σκόνη στην ατμόσφαιρα, η βιολογική ύλη, η γύρη, ο καπνός και η στάχτη. Συνήθως, τα χονδρόκοκκα σωματίδια συναντώνται αιωρούμενα στην

ατμόσφαιρα αν και έχουν μικρότερο χρόνο ζωής (αιώρησης) από τα λεπτόκοκκα, λόγω βαρυτικής επικάθισης.

Τα λεπτόκοκκα σωματίδια χωρίζονται περαιτέρω σε αυτά που προέρχονται από *πυρηνοποίηση* (nucleation mode) και στα προερχόμενα από *συσσώρευση* (accumulation mode). Ο αριθμός των λεπτόκοκκων σωματιδίων είναι πολύ μεγαλύτερος από τον αριθμό των χονδρόκοκκων στην ατμόσφαιρα. Τα πυρηνοποιημένα σωματίδια δημιουργούνται στην ατμόσφαιρα μέσω των διαδικασιών μετατροπής αερίων σε στερεά, έχουν μικρό χρόνο ζωής καθώς καταλήγουν στην περιοχή συσσώρευσης λόγω συσσωμάτωσης. Στην περιοχή συσσώρευσης ανήκουν επίσης σωματίδια που προέρχονται από διαδικασίες καύσης και σωματίδια καπνού. Τα τελευταία σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα μέσω φωτοχημικών αντιδράσεων των πτητικών οργανικών ενώσεων και των οξειδίων του αζώτου υπό συνθήκες έντονης ηλιοφάνειας. Γενικότερα, τα προερχόμενα από συσσώρευση σωματίδια έχουν μεγαλύτερο χρόνο ζωής στην ατμόσφαιρα και συχνά δρουν ως πυρήνες συμπύκνωσης των νεφών. Η κατάληξη των σωματιδίων αυτών είναι συχνά σταγόνες βροχής ή άλλες μορφές υετού (υγρή εναπόθεση). Στην [Εικόνα 3.1](#) παρατηρούμε την κατανομή του ανηγμένου όγκου των διαφόρων σωματιδίων που αναφέραμε παραπάνω καθώς και τις διαδικασίες σχηματισμού τους.

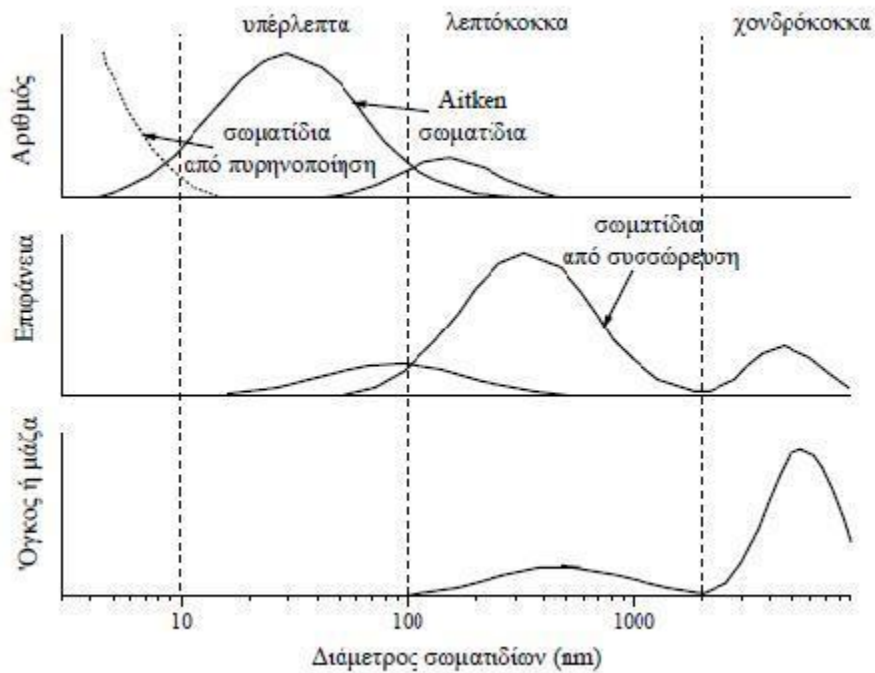
Τα πολύ μικρά σωματίδια, με διάμετρο μικρότερη από 100 nm καλούνται συνήθως *υπέρλεπτα* (ultrafine). Ειδικότερα, τα σωματίδια με διαμέτρους ανάμεσα σε 10 nm και 100 nm συχνά αναφέρονται ως σωματίδια *Aitken*. Προέρχονται συνήθως από ανάπτυξη ή συσσωμάτωση μικρότερων σωματιδίων και παράγονται από πηγές πρωτογενούς καύσης, όπως μηχανές αυτοκινήτων. Τα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 10 nm (nucleation mode) δημιουργούνται απευθείας από πυρηνοποίηση αερίων, όπως θειικό οξύ. Παρόλο που η μάζα τους είναι αμελητέα συγκρίνοντας με τη μάζα των μεγαλύτερων σωματιδίων, είναι σημαντικά καθώς δρουν ως πυρήνες για τα μεγάλα σωματίδια. Παράγονται τόσο από βιογενείς όσο και από ανθρωπογενείς εκπομπές και παρατηρούνται σε διαφορετικά περιβάλλοντα, όπως σε βιομηχανικές εκπομπές, δάση και παραλιακές ζώνες. Τα τελευταία χρόνια με την άνοδο της νανοτεχνολογίας, τα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 100 nm συχνά χαρακτηρίζονται ως νανο-σωματίδια (nanoparticles).



Εικόνα 3.1 Κατανομή αηγημένου όγκου σωματιδίων διαφόρων διαμέτρων

Τα πολύ μικρά σωματίδια, με διάμετρο μικρότερη από 100 nm καλούνται συνήθως *υπέρλεπτα* (ultrafine). Ειδικότερα, τα σωματίδια με διαμέτρους ανάμεσα σε 10 nm και 100 nm συχνά αναφέρονται ως σωματίδια *Aitken*. Προέρχονται συνήθως από ανάπτυξη ή συσσωμάτωση μικρότερων σωματιδίων και παράγονται από πηγές πρωτογενούς καύσης, όπως μηχανές αυτοκινήτων. Τα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 10 nm (nucleation mode) δημιουργούνται απευθείας από πυρηνοποίηση αερίων, όπως θειικό οξύ. Παρόλο που η μάζα τους είναι αμελητέα συγκρίνοντας με τη μάζα των μεγαλύτερων σωματιδίων, είναι σημαντικά καθώς δρουν ως πυρήνες για τα μεγάλα σωματίδια. Παράγονται τόσο από βιογενείς όσο και από ανθρωπογενείς εκπομπές και παρατηρούνται σε διαφορετικά περιβάλλοντα, όπως σε βιομηχανικές εκπομπές, δάση και παραλιακές ζώνες. Τα τελευταία χρόνια με την άνοδο της νανοτεχνολογίας, τα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 100 nm συχνά χαρακτηρίζονται ως νανο-σωματίδια (nanoparticles).

Στην [Εικόνα 3.2](#) απεικονίζονται οι παραπάνω κατηγορίες μεγέθους των σωματιδίων. Στο σχήμα δείχνουμε τις τυπικές κατανομές μεγέθους ως προς τον αριθμό, την επιφάνεια και τον όγκο ή μάζα. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι κατανομές μεγέθους του ίδιου αερολύματος ως προς διαφορετική ιδιότητα των σωματιδίων (αριθμός, επιφάνεια, όγκος ή μάζα) διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Αυτό οφείλεται στο ότι το αερόλυμα αποτελείται από σωματίδια των οποίων οι διάμετροι εκτείνονται σε αρκετές τάξεις μεγέθους. Κατά συνέπεια η επιφάνεια ή η μάζα ενός σωματιδίου στο αριστερό τμήμα της κατανομής μεγέθους (υπέρλεπτο σωματίδιο) είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη ενός χονδρόκοκκου σωματιδίου. Επομένως, είναι αναμενόμενο η μέγιστη τιμή της κατανομής μεγέθους ως προς την επιφάνεια, τη μάζα και τον όγκο να εντοπίζεται σε μεγαλύτερη διάμετρο σωματιδίων σε σχέση με την κατανομή σωματιδίων ως προς τον αριθμό.



Εικόνα 3.2 Κατανομή μεγέθους αιωρούμενων σωματιδίων ως προς τον αριθμό, την επιφάνεια και τον όγκο ή τη μάζα όπου διακρίνονται διαφορετικές κατηγορίες σωματιδίων που συχνά συναντώνται στο περιβάλλον

3.2 Βασικές έννοιες και ορισμοί

Διακρίνουμε τη *σωματιδιακή φάση* (dispersed phase) και το *φέρον ρευστό* (carrier fluid). Σημαντικό μέγεθος για τις πολυφασικές ροές είναι η *συγκέντρωση μάζας* (mass concentration) της σωματιδιακής φάσης, που δίνεται από την Εξίσωση (3.1):

$$C = \frac{\bar{\rho}_d}{\rho_c} \quad (3.1)$$

δηλαδή ο λόγος της μάζας της σωματιδιακής φάσης προς τη μάζα του φέροντος ρευστού στο μείγμα. Υπάρχουν και άλλοι ορισμοί για τη συγκέντρωση (πολλοί συγγραφείς χρησιμοποιούν δικά τους σύμβολα), όπως και ο παρακάτω συχνά χρησιμοποιούμενος ως συγκέντρωση:

$$Z = \frac{\dot{m}_d}{\dot{m}_c} \quad (3.2)$$

όπου λέγεται φορτίο (loading) και αποτελεί το λόγο της ροής μάζας της σωματιδιακής φάσης προς αυτή του φέροντος ρευστού.

3.3 Αριθμός Stokes

Άλλη πολύ σημαντική παράμετρος για τις πολυφασικές ροές είναι ο αδιάστατος αριθμός *Stokes*, που ορίζεται ως:

$$St = \frac{\tau_p}{\tau_f} \quad (3.3)$$

όπου τ_p ο χαρακτηριστικός χρόνος αντίδρασης της ορμής (ταχύτητας) του σωματιδίου και τ_f ο χαρακτηριστικός χρόνος του πεδίου ροής. Ο τ_p ονομάζεται *χρόνος χαλάρωσης* και αποτελεί το χρόνο που χρειάζονται τα σωματίδια για να αποκτήσουν την ταχύτητα της ροής καθώς αυτή μεταβάλλεται και ορίζεται ως $\tau_p = \rho_p d^2 / 18\mu_f$, όπου ρ_p η πυκνότητα των σωματιδίων, d η διάμετρός τους και μ_f η δυναμική συνεκτικότητα του ρευστού.

Από φυσικής σκοπιάς, για $St \ll 1$, δηλαδή όταν ο χρόνος αντίδρασης των σωματιδίων είναι αρκετά μικρότερος του χαρακτηριστικού χρόνου της ροής, τα σωματίδια έχουν τη δυνατότητα να προσαρμοσθούν γρήγορα στις μεταβολές της ροής. Αντιθέτως, για $St \gg 1$, τα

σωματίδια δεν προλαβαίνουν να ακολουθήσουν τις μεταβολές της ροής και τελικά δεν επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από αυτές (αδρανειακή επίδραση).

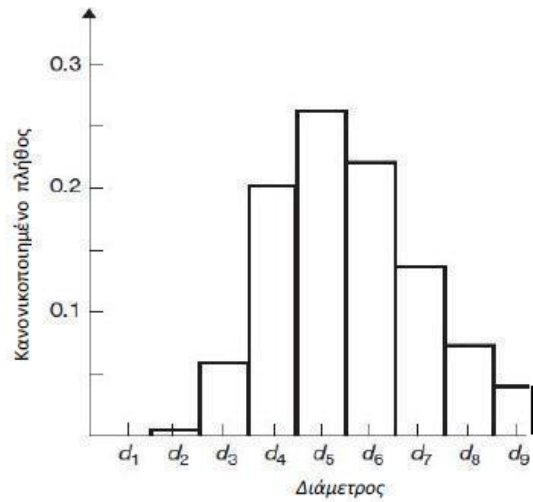
3.4 Αραιές και πυκνές ροές

Ένας τελευταίος διαχωρισμός μεταξύ πολυφασικών ροών μπορεί να γίνει σχετικά με το λόγο $\frac{\tau_p}{\tau_c}$, όπου τ_c ο μέσος χρόνος μεταξύ των συγκρούσεων των σωματιδίων. Έτσι, όταν ο λόγος αυτός είναι μεγαλύτερος της μονάδας έχουμε *αραιές ροές* (disperse flows), στις οποίες ο κύριος μηχανισμός μεταφοράς των σωματιδίων είναι η κίνηση του ρευστού, ενώ για τιμές μικρότερες της μονάδας έχουμε τις *πυκνές ροές* (dense flows), όπου επικρατούν οι κινήσεις λόγω συγκρούσεων των σωματιδίων μεταξύ τους.

3.5 Μέγεθος σωματιδίων – Κατανομές

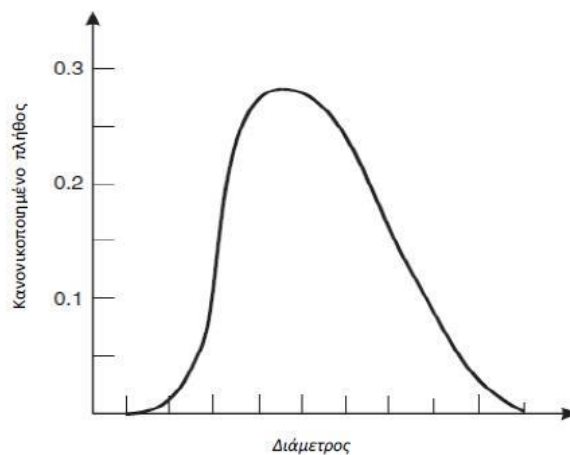
Το μέγεθος των σωματιδίων/σταγονιδίων αποτελεί σημαντικότερο παράμετρο για τη μελέτη των πολυφασικών ροών. Αφού ασχολούμαστε με πληθυσμούς μεγάλου αριθμού σωματιδίων, τα οποία δεν δύναται να έχουν το ίδιο μέγεθος, είναι απαραίτητη η χρήση εννοιών που προσδιορίζουν τη *διασπορά* και *κατανομή* μεγέθους. Έτσι, μια κατανομή σωματιδίων μπορεί να είναι *μονοδιάσπαρτη* (monodisperse), στις περιπτώσεις που η τυπική απόκλιση του πληθυσμού είναι μικρότερη του 10%, οπότε μπορούμε να θεωρήσουμε σωματίδια ενός μεγέθους και σε *πολυδιάσπαρτη* (polydisperse) στην αντίθετη περίπτωση.

Οι κατανομές των σωματιδίων χωρίζονται επίσης σε *συνεχείς* (continuous) και *διακριτές* (discrete). Στις διακριτές κατανομές, που συνήθως προκύπτουν από μετρήσεις (π.χ. φωτογραφικές μεθόδους), ο πληθυσμός χωρίζεται σε *τάξεις μεγέθους*, στις οποίες θεωρείται πληθυσμός σταθερού μεγέθους. Τα σωματίδια που εμπίπτουν σε κάθε τάξη καταμετρώνται και ο αριθμός τους διαιρείται με το σύνολο, έτσι προκύπτει το *ιστόγραμμα* διακριτής κατανομής όπως φαίνεται στην [Εικόνα 3.3](#).



Εικόνα 3.3 Ιστόγραμμα διακριτής κατανομής σωματιδίων

Αν το πλήθος των τάξεων τείνει στο άπειρο, τότε παίρνουμε τη συνεχή κατανομή (Εικόνα 3.4). Είναι προφανές ότι χρειαζόμαστε πολλές μετρήσεις και τάξεις μεγέθους ώστε να πάρουμε μια ικανοποιητική και ομαλή καμπύλη. Για αυτό το λόγο είναι απαραίτητος ένας συμβιβασμός ανάμεσα σε ακρίβεια και κόστος – οι συνεχείς κατανομές δε χρησιμοποιούνται, αντίθετα είναι συνήθης η χρήση διακριτών κατανομών, οι τιμές των οποίων θεωρούμε ότι ανήκουν πάνω στην καμπύλη μιας συνεχούς κατανομής.



Εικόνα 3.4 Ιστόγραμμα συνεχούς κατανομής σωματιδίων

Στην παρούσα εργασία ως «μέγεθος» εννοούμε την διάμετρο ενός σωματιδίου, το οποίο θεωρούμε ιδανικά σφαιρικό. Ωστόσο, στην περίπτωση που χρειάζεται να ληφθεί υπόψη η μη-σφαιρικότητα (λόγω σημαντικών τάσεων – δυνάμεων ή φυσικών διαδικασιών) εισάγεται ο ειδικός συντελεστής μεγέθους χ (dynamic shape factor), ο οποίος δίνει τη διάμετρο σφαίρας ίδιου όγκου με το σωματίδιο. Άλλες χαρακτηριστικές διαμέτροι που χρησιμοποιούνται είναι η διάμετρος *Stokes* και η *αεροδυναμική* διάμετρος. Σε αρκετές περιπτώσεις δε, αντί της διαμέτρου, χρησιμοποιείται ο όγκος του σωματιδίου, όπως για παράδειγμα όταν έχουμε συσσωμάτωση, αφού, σε αντίθεση με τη διάμετρο, παραμένει σταθερός.

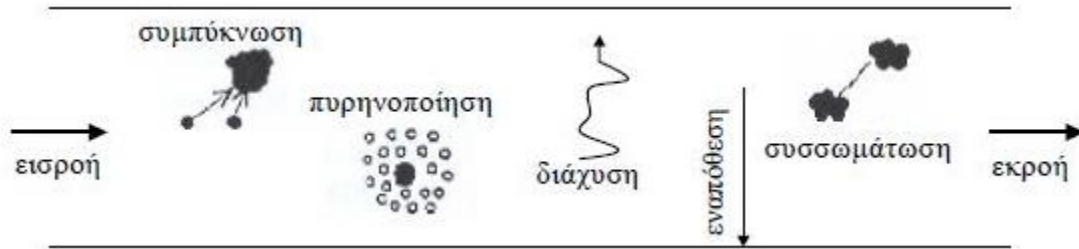
3.6 Εισπνεόμενο κλάσμα

Όσον αφορά τα εισπνεόμενα σωματίδια ορίζεται το μέγεθος *εισπνευσιμότητα* ή *εισπνεόμενο κλάσμα* *IF* (inhalability ή inhalable fraction) ως ο λόγος της συγκέντρωσης σωματιδίων του αέρα που εισπνέεται προς αυτή του περιβάλλοντος. Απώλειες στη συγκέντρωση αυτών των σωματιδίων σημειώνονται στις στροφές των γραμμών ροής στην είσοδο της αναπνευστικής οδού, λόγω αδράνειας. Γενικά, για σωματίδια διαμέτρου μικρότερης των $2 \mu m$ εισπνέεται το 100% του όγκου τους (δηλαδή $IF = 1$) ενώ για μεγαλύτερα σωματίδια το ποσοστό αυτό μειώνεται αρκετά. Ειδικές συνθήκες περιβάλλοντος δύνανται να μεταβάλλουν την τιμή του εισπνεόμενου κλάσματος, ενδεικτικά, για άνεμο χαμηλής έντασης εισπνέεται περίπου το 50% ενώ για ισχυρό άνεμο το ποσοστό μπορεί να ξεπεράσει ακόμα και το 100%.

3.7 Δυναμική αερολύματος

Σε χώρο στον οποίον αιωρείται πλήθος σωματιδίων, συμβαίνουν διαφορετικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους καθώς και μεταξύ του αερίου και της σωματιδιακής φάσης. Οι διαδικασίες αυτές ενεργούν ταυτόχρονα και καθορίζουν τη μεταφορά και τη μεταβολή των

χαρακτηριστικών (π.χ. μέγεθος, χημική σύσταση) της αιωρούμενης σωματιδιακής ύλης. Στην **Εικόνα 3.5** συνοψίζονται οι βασικοί μηχανισμοί δυναμικής των αιωρούμενων σωματιδίων.



Εικόνα 3.5 Διαδικασίες δυναμικής αερολύματος στο εσωτερικό ενός στοιχειώδους όγκου

Οι διεργασίες¹ που επηρεάζουν την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: στις *εσωτερικές* (internal) και στις *εξωτερικές* (external). Ως εσωτερικές χαρακτηρίζονται οι διαδικασίες που πραγματοποιούνται στο εσωτερικό ενός στοιχειώδους όγκου, όπως η *συσσωμάτωση* (coagulation), *συσσώρευση* (agglomeration), *διάσπαση* (fragmentation), και τις *μετατροπές αερίου-σε-στερεό* (gas-to-particle conversion), δηλαδή *συμπύκνωση* (condensation), *εξάτμιση* (evaporation) και *πυρηνοποίηση* (nucleation). Αντίθετα, οι εξωτερικές διαδικασίες προκαλούν μεταφορά των αιωρούμενων σωματιδίων προς τα όρια του στοιχειώδους όγκου και προκαλούν την εναπόθεση επί των επιφανειών. Τέτοιες διεργασίες είναι η *μεταφορά* (convection), *διάχυση* (diffusion), η κίνηση των σωματιδίων λόγω κλίσεων θερμοκρασίας, συγκέντρωσης και λοιπών μεγεθών του φέροντος αερίου και οι *δυνάμεις καθίζησης λόγω βαρύτητας* (sedimentation).

Στη συνέχεια θέλουμε μια αριθμητική αναπαράσταση συνεχών κατανομών μεγέθους. Έτσι διαιρούμε σε διαδοχικά *διαστήματα* (bins) και ο υπολογισμός του αριθμού των σωματιδίων σε κάθε διάστημα, που αποτελεί την *τμηματική* (sectional) αναπαράσταση μεγέθους σωματιδίων. Στο εσωτερικό κάθε διαστήματος η κατανομή μάζας θεωρείται

¹ Δεν αναφέρουμε εδώ τις χημικές αντιδράσεις που μπορεί να πραγματοποιούνται και είναι βασικός παράγοντας αλληλεπίδρασης του ρευστού με τα σωματίδια. Όταν απουσιάζουν αυτές, οι αναφερόμενες διεργασίες οφείλονται στη διαφορά συγκέντρωσης των δύο φάσεων. Για τα σωματίδια η συγκέντρωση αυτή υπολογίζεται στην επιφάνεια και είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και της πίεσης, ενώ για το φέρον ρευστό υπολογίζεται μακριά από το σωματίδιο και είναι ιδιότητα του ρευστού. Αν (ιδανικά) δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ αυτών των συγκεντρώσεων, τότε δεν έχουμε καμία διεργασία.

σταθερή, επομένως η κατανομή μεγέθους έχει την μορφή ιστογράμματος. Η ύπαρξη πολλών καναλιών αυξάνει την δυσκολία επίλυσης των εξισώσεων δυναμικής του αερολύματος. Ωστόσο για τμηματική προσέγγιση δίνεται η δυνατότητα μελέτης τυχαίας κατανομής μεγέθους σωματιδίων και αυξάνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων εάν επιλεγούν σωστά τα διαστήματα στα οποία διαιρείται το φάσμα.

Η γενική εξίσωση δυναμικής των σωματιδίων – ΓΕΔΣ (general dynamic equation – GDE) ή η εξίσωση ισορροπίας πληθυσμού (population balance equation) ενσωματώνει όλους τους μηχανισμούς που επηρεάζουν τη φυσική συμπεριφορά του αερολύματος και προσδιορίζει τη μεταβολή της συγκέντρωσης που προκαλείται από ταυτόχρονη επίδραση των μηχανισμών αυτών στα σωματίδια του αερολύματος. Επιλύοντας την εξίσωση για διαφορετικές αρχικές και οριακές συνθήκες, μπορούμε να προσδιορίσουμε τη χωρική και χρονική μεταβολή της συνάρτησης κατανομής μεγέθους του αερολύματος.

Οι διαδικασίες που επηρεάζουν την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, είναι η διάχυση, η συμπύκνωση υδρατμών, η συσσώματωση και η πυρηνοποίηση. Κατά συνέπεια, η ΓΕΔΣ σε μονοδιάστατη μορφή κατά μήκος της ροής, δίνεται παρακάτω:

$$\frac{\partial}{\partial t}(A_T n_i) = -\frac{\partial}{\partial x}(A_A u n_i) + \frac{\partial}{\partial x}\left(A_T D_i \frac{\partial n_i}{\partial x}\right) - V_{D_i} \Gamma n_i + \left(\frac{\partial}{\partial t}(A_T n_i)\right)_{growth} + \left(\frac{\partial}{\partial t}(A_T n_i)\right)_{coagulation} + \left(\frac{\partial}{\partial t}(A_T n_i)\right)_{nucleation} \quad (3.4)$$

όπου t είναι ο χρόνος, n_i η συγκέντρωση των σωματιδίων στο τμήμα i της κατανομής μεγέθους, u η ταχύτητα του ρευστού, D_i ο συντελεστής διάχυσης των σωματιδίων μεγέθους i , A_T και A_A η χρονικά μεταβαλλόμενη και η σταθερή κάθετη διατομή όλων των αεραγωγών του πνεύμονα αντίστοιχα σε απόσταση x από την είσοδο του αναπνευστικού συστήματος, Γ η περίμετρος των αεραγωγών ($\Gamma = \nu \pi d_T$) και V_{D_i} η ταχύτητα εναπόθεσης των σωματιδίων.

Η ταχύτητα του αέρα κατά μήκος της αναπνευστικής οδού προσδιορίζεται επιλύοντας την εξίσωση της συνέχειας στην παρακάτω μορφή:

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} = -\frac{\partial(A_A u)}{\partial x} \quad (3.5)$$

Ο μηχανισμός της πυρηνοποίησης δεν συμπεριλαμβάνεται στο μοντέλο αφού οι συνθήκες που απαιτούνται για την ενεργοποίησή του δεν παρατηρούνται στον ανθρώπινο πνεύμονα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία οι μηχανισμοί της συμπύκνωσης υδρατμών και συσσωμάτωσης δεν λαμβάνονται υπ όψιν στους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν. Ωστόσο παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά όλοι οι μηχανισμοί που επηρεάζουν τη φυσική συμπεριφορά του αερολύματος.

3.7.1 Εσωτερικές διεργασίες

Συσσωμάτωση - Συσσώρευση

Κατά την κίνηση τους, τα σωματίδια συγκρούονται μεταξύ τους με αποτέλεσμα τη δημιουργία σωματιδίων μεγαλύτερου μεγέθους. Το φαινόμενο αυτό λέγεται συσσωμάτωση και διακρίνεται από τη συσσώρευση για την οποία θα αναφερθούμε παρακάτω.

Οι βασικές αιτίες της κίνησης αυτής που προκαλεί τη συσσωμάτωση είναι η *διάχυση κατά Brown* (Brown diffusion), η οποία είναι εντονότερη για σωματίδια $d_p < 1\mu m$ και τότε το φαινόμενο είναι γνωστό και ως κατά *Smoluchowski*. Άλλος μηχανισμός συσσωμάτωσης είναι λόγω των διατμητικών τάσεων (shear-induced) που αναπτύσσονται καθώς τα σωματίδια εισέρχονται στις ανομοιομορφίες του ροϊκού πεδίου. Οι τελευταίες έχουν μεγαλύτερη επίδραση σε σωματίδια με $d_p < 2\mu m$.

Σε αερόλυμα που αποτελείται από σωματίδια διαφορετικού μεγέθους μέσα σε βαρυτικό πεδίο τα βαρύτερα σωματίδια κινούνται ταχύτερα από τα ελαφρύτερα, προλαβαίνοντάς τα με συνέπεια τη συσσωμάτωση. Η διαδικασία αυτή είναι σημαντική στην ατμόσφαιρα όπου οι σταγόνες της βροχής καθώς κατευθύνονται προς την επιφάνεια του εδάφους μπορεί να παρασύρουν αιωρούμενα σωματίδια. Η μορφή αυτή καλείται *βαρυτική συσσωμάτωση* (gravitational coagulation) και παρατηρείται συνήθως σε χονδρόκοκκα σωματίδια, δηλαδή της τάξεως των μερικών μικρομέτρων.

Επιπλέον εάν το ρευστό εκτελεί τυρβώδη κίνηση σε κάποιο σημείο του αναπνευστικού συστήματος, η συσσωμάτωση ενισχύεται από τον όρο της *τυρβώδους συσσωμάτωσης*

(turbulent coagulation). Το φαινόμενο παρατηρείται διότι τα σωματίδια που αιωρούνται σε τυρβώδη ροή βρίσκονται σε σχετική κίνηση μεταξύ τους λόγω φαινομένων αδράνειας και λόγω τυρβώδους διάχυσης. Ο πρώτος μηχανισμός οφείλεται στις μεγάλες διαφορές πυκνότητας μεταξύ ρευστού και σωματιδίου, με αποτέλεσμα τα σωματίδια να αδυνατούν να παρακολουθήσουν πιστά τις δινώδεις γραμμές ροής και να αναπτύσσουν αδρανειακή κίνηση. Η τυρβώδης συσσωμάτωση επηρεάζει κυρίως τα μεγαλύτερα σωματίδια με $d_p > 2\mu m$.

Η σύγκρουση και συσσωμάτωση των σωματιδίων οδηγεί σε μείωση του συνολικού αριθμού των σωματιδίων και σε αύξηση του μέσου μεγέθους που περιγράφονται από τη θεωρία που ακολουθεί (Seinfeld and Pandis, 1998; Hinds, 1999; Friedlander, 2000). Θεωρούμε ότι $N_{i,j}$ είναι ο αριθμός των συγκρούσεων που συμβαίνουν στη μονάδα του χρόνου και ανά μονάδα όγκου μεταξύ δύο τάξεων μεγέθους σωματιδίων με όγκους v_i και v_j . Υποθέτουμε ότι όλα τα σωματίδια είναι σφαιρικά, επομένως οι δείκτες i και j αντιπροσωπεύουν διαμέτρους σωματιδίων. Όταν δύο σωματίδια συγκρούονται, συσσωματώνονται αμέσως και δημιουργούν ένα τρίτο σωματίδιο με όγκο ίσο με το άθροισμα των αρχικών δύο. Εάν οι συγκεντρώσεις των σωματιδίων με όγκους v_i και v_j είναι n_i και n_j αντίστοιχα, ο ρυθμός των συγκρούσεων θα είναι:

$$N_{i,j} = \beta(v_i, v_j)n_i n_j \quad (3.6)$$

όπου $\beta(v_i, v_j)$ είναι μια συνάρτηση που ονομάζεται συντελεστής συσσωμάτωσης και η οποία εξαρτάται από τα μεγέθη των σωματιδίων που συγκρούονται και τις ιδιότητες του περιβάλλοντος μέσου, όπως θερμοκρασία, πίεση και τα χαρακτηριστικά του πεδίου ροής.

Οι μηχανισμοί συσσωμάτωσης είναι η συσσωμάτωση λόγω μοριακής διάχυσης, βαρύτητας και τυρβώδης συσσωμάτωσης. Κατά συνέπεια ο τελικός συντελεστής συσσωμάτωσης προκύπτει από συνδυασμό των επιμέρους συντελεστών. Όταν κάποιος μηχανισμός είναι σημαντικός, ενώ οι υπόλοιποι έχουν πολύ μικρότερη επίδραση στη συσσωμάτωση των σωματιδίων, το γραμμικό άθροισμα των συντελεστών είναι καλή προσέγγιση του συντελεστή συσσωμάτωσης. Αντίθετα, όταν οι φυσικοί μηχανισμοί είναι παρόμοιοι το γραμμικό άθροισμα των συντελεστών δε θεωρείται η καλύτερη μέθοδος. Για το λόγο αυτό οι Saffman and Turner (1956) πρότειναν την Εξίσωση (3.7) για το συντελεστή

συσσωμάτωσης β , θεωρώντας ως αλληλοεξαρτώμενους τους μηχανισμούς λόγω βαρύτητας και αδράνειας:

$$\beta = \beta_B + \sqrt{\beta_G^2 + \beta_{T1}^2 + \beta_{T2}^2} \quad (3.7)$$

Πειράματα και θεωρητικοί υπολογισμοί αποδεικνύουν ότι σε ορισμένες περιπτώσεις (π.χ. σωματίδια καύσης) τα συγκρουόμενα σωματίδια τείνουν να μη συσσωματώνονται, αλλά να δημιουργούν συναθροίσεις – σαν αλυσίδες – από πρωτογενή σωματίδια (agglomerates). Το μέγεθος των πρωτογενών σωματιδίων κυμαίνεται από μανόμετρα έως περίπου 0.1 μm και οι συναθροίσεις τους έχουν αεροδυναμική διάμετρο από 0.1 μm έως μερικά μικρόμετρα. Η διαδικασία αυτή καλείται *συσσώρευση* (agglomeration).

Υγροσκοπική ανάπτυξη – Συμπύκνωση

Όπως αναφέραμε παραπάνω, το μέγεθος των σωματιδίων είναι η σημαντικότερη φυσική ιδιότητα αυτών, καθώς επηρεάζει την εναπόθεση των εισπνεόμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα. Συνεπώς, οι παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν το μέγεθος των σωματιδίων θα πρέπει να μελετηθούν διεξοδικά. Το μέγεθος των σωματιδίων συχνά μεταβάλλεται λόγω απορρόφησης ή απώλειας μάζας από την επιφάνεια τους, γεγονός που οφείλεται στην συμπύκνωση ή εξάτμιση αντίστοιχα. Στις περιπτώσεις που το νερό ως υδρατμός είναι το συστατικό που μεταφέρεται στην επιφάνεια του σωματιδίου, η επακόλουθη μεταβολή του μεγέθους καλείται *υγροσκοπική* (hygroscopic). Για λόγους απλότητας, θεωρούμε αποκλειστικά υγροσκοπικές μεταβολές μεγέθους, δηλαδή θεωρούμε ότι το νερό μεταφέρεται στην επιφάνεια του σωματιδίου, εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά.

Ο μηχανισμός που ευθύνεται για την υγροσκοπική ανάπτυξη μπορεί να κατανοηθεί θεωρώντας μια διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ αέρα και νερού. Η συμπύκνωση υδρατμών λαμβάνει χώρα λόγω βαθμίδας συγκέντρωσης υδρατμού στον αέρα κοντά στην επιφάνεια της σταγόνας (Finlay, 2001). Κατά συνέπεια, ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει την υγροσκοπική ανάπτυξη είναι η συγκέντρωση μορίων υδρατμού στον αέρα κοντά στην διαχωριστική επιφάνεια αέρα νερού.

Η χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης κατά αριθμό λόγω συμπύκνωσης μπορεί να περιγραφεί μέσω της χρονικής μεταβολής της διαμέτρου του σωματιδίου όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial d_i} \left(\frac{dd_i}{dt} n_i \right) \quad (3.8)$$

Επομένως, αρκεί να υπολογιστεί η χρονική μεταβολή της διαμέτρου των σφαιρικών σωματιδίων, το οποίο επιτυγχάνεται μέσω της θεωρίας που περιγράφει τη διάχυση υδρατμών σε επιφάνεια σωματιδίου. Για ένα συγκεκριμένο σωματίδιο ο ρυθμός διάχυσης εξαρτάται από τη διαφορά μερικής πίεσης μεταξύ της επιφάνειας και του περιβάλλοντος. Η συμπύκνωση υδρατμών στην επιφάνεια του σωματιδίου προκαλεί έκλυση λανθάνουσας θερμότητας στο χώρο που περιβάλλει το σωματίδιο. Θεωρείται, όμως, ότι η σωματιδιακή ύλη ασκεί αμελητέα επιρροή στην περιβάλλουσα αέρια φάση. Αυτή είναι η συνήθης απλοποίηση που χρησιμοποιείται στη δοσιμετρία του εισπνεόμενου αερολύματος. Σημειώνεται ότι, σύμφωνα με το μοντέλο, πραγματοποιείται μόνο μεταφορά μάζας (δεν μεταφέρεται θερμότητα) μεταξύ της σωματιδιακής και της αέριας φάσης στο εσωτερικό του αναπνευστικού συστήματος του ανθρώπου. Η τελευταία υπόθεση βασίζεται στην εργασία των Finlay and Stapleton (1995), οι οποίοι εξέτασαν τη σύζευξη μεταφοράς θερμότητας και μάζας μεταξύ σωματιδίων και αερίου. Διαπιστώθηκε ότι η σύζευξη αυτών των φαινομένων μπορεί να παραβλεφθεί.

Πυρηνοποίηση

Πυρηνοποίηση είναι η διαδικασία στην οποία εμφανίζεται μια νέα φάση κατά τη διάρκεια μιας πρώτου βαθμού μετατροπή φάσης. Η διαδικασία αυτή ενεργοποιείται θερμικά και πραγματοποιείται μέσω μεγάλης εμβέλειας τοπικές διακυμάνσεις που φαίνονται σαν σταγόνες της νέας, ευσταθούς φάσης. Η δημιουργία του νέου σωματιδίου για να ενεργοποιηθεί απαιτεί την υπέρβαση ενός φράγματος πυρηνοποίησης. Σε δεδομένες θερμοδυναμικές συνθήκες (π.χ. σε σταθερή θερμοκρασία) η νέα συμπυκνωμένη φάση είναι ευσταθής σε σύγκριση με τη φάση ατμού (το χημικό δυναμικό της είναι μικρότερο), αλλά πρέπει να καταναλωθεί ελεύθερη ενέργεια για τη δημιουργία επιφάνειας μεταξύ των δύο φάσεων.

Η πυρηνοποίηση διακρίνεται σε *ομογενή* και *ετερογενή*. Ομογενής πυρηνοποίηση είναι ο σχηματισμός σωματιδίων από υπέρκορο ατμό χωρίς τη συμβολή πυρήνων συμπύκνωσης ή ιόντων. Η διαδικασία αυτή καλείται επίσης *αυτο-πυρηνοποίηση* (self-nucleation). Η ομογενής πυρηνοποίηση είναι σημαντική σε πολλά πεδία. Στην ατμόσφαιρα, η πυρηνοποίηση πάγου σε σταγόνες νερού ψυχωμένες κάτω του σημείου πάγου (supercooled) είναι ο κύριος μηχανισμός για το σχηματισμό νεφών θυσάνων (cirrus) στην ανώτερη τροπόσφαιρα. Επίσης, η δημιουργία νανοσωματιδίων στα καυσαέρια των μηχανών εσωτερικής καύσης πραγματοποιείται λόγω ομογενούς πυρηνοποίησης.

Στην περίπτωση που υπάρχει στερεό υπόστρωμα, για παράδειγμα ένα αιωρούμενο σωματίδιο, η επιφάνεια αυτού παρέχει μια επιφάνεια αλληλεπίδρασης επάνω στην οποία μπορεί να πυρηνοποιηθεί η νέα φάση. Αυτή είναι η περίπτωση της ετερογενούς πυρηνοποίησης. Η ετερογενής πυρηνοποίηση επάνω σε μη-διαλυτά σωματίδια συμβαίνει σε χαμηλότερα κλάσματα κορεσμού σε σύγκριση με την ομογενή πυρηνοποίηση. Στην ατμόσφαιρα όπου τα κλάσματα κορεσμού είναι χαμηλά, η πυρηνοποίηση είναι κυρίως ετερογενής σε ήδη υπάρχοντα σωματίδια, όπως για παράδειγμα σε πυρήνες συμπύκνωσης των νεφών (cloud condensation nuclei).

Η διαδικασία της πυρηνοποίησης δεν συμπεριλαμβάνεται στο χρησιμοποιούμενο αριθμητικό μοντέλο, καθώς δεν μπορεί να παρατηρηθεί στον ανθρώπινο πνεύμονα. Απαιτούνται πολύ υψηλές τιμές κλάσματος κορεσμού και θερμοκρασίας, συνεπώς πολύ διαφορετικές συνθήκες από αυτές που επικρατούν στο αναπνευστικό σύστημα.

3.7.2 Εξωτερικές διεργασίες ή μηχανισμοί εναπόθεσης

Εναπόθεση σωματιδίων

Εάν υποθεθεί ότι ένα σωματίδιο αιωρείται μέσα σε ρευστό, το οποίο μπορεί να είναι στάσιμο ή σε κίνηση, οι δυνάμεις που ασκούνται επάνω στο σωματίδιο προκαλούν την εναπόθεση αυτού, καθώς το αναγκάζουν να μεταναστεύσει από το ρευστό προς μια επιφάνεια, στην οποία εναποτίθεται.

Η δύναμη αντίστασης (οπισθέλκουσα) που ασκείται από το αέριο στο σωματίδιο δίνεται από τη Εξίσωση (3.9):

$$F_D = \frac{3\pi\mu_f u_p d_p}{C_C} \quad (3.9)$$

όπου μ_f η δυναμική συνεκτικότητα του ρευστού, u_p η ταχύτητα του σωματιδίου. Ο C_C είναι ο διορθωτικός όρος του *Cunningham* ή *συντελεστής ολίσθησης* (slip correction factor) και δίνεται από την Εξίσωση (3.10):

$$C_C = 1 + \frac{\lambda}{d_p} \left[2.34 + 1.05e^{(-0.39\frac{d_p}{\lambda})} \right] \quad (3.10)$$

όπου λ η ελευθέρα διαδρομή του αερίου (mean free path), δηλαδή η μέση απόσταση που διανύουν τα μόρια του ρευστού μέχρι να συγκρουστούν.

Σύμφωνα με την θεωρία του *Stokes*, η ροή μπορεί να θεωρηθεί συνεχής σε σχέση με αυτή των σωματιδίων. Ωστόσο, στην περίπτωση μικρών σωματιδίων, όταν η διάμετρος των σωματιδίων γίνεται συγκρίσιμη με το λ , η οπισθέλκουσα μειώνεται και ο C_C χρησιμοποιείται για να γίνει η διόρθωση αυτή. Ενδεικτικά, για σωματίδια διαμέτρου περίπου $1 \mu m$ η διόρθωση λόγω ολίσθησης είναι της τάξεως του 15%, ενώ για πάνω από $10 \mu m$ είναι αμελητέα.

Βαρυτική Καθίζηση

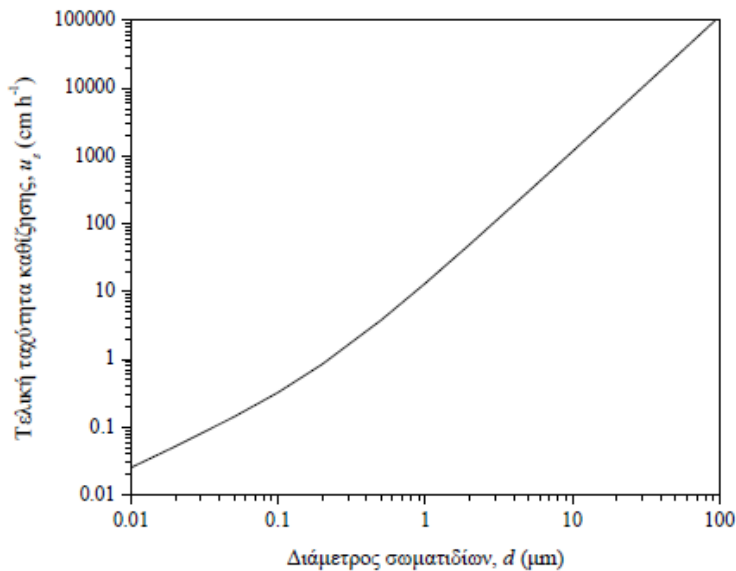
Η κίνηση ενός σωματιδίου, σε στάσιμο κυρίως ρευστό, οφείλεται στην επίδραση εξωτερικών δυνάμεων του πεδίου μέσα στο οποίο βρίσκεται το σωματίδιο, όπως είναι η βαρύτητα. Εάν υποθέσουμε ότι η μόνη δύναμη που ασκείται στο σωματίδιο είναι η δύναμη της βαρύτητας, το σωματίδιο μετά από κάποιο χρονικό διάστημα που καλείται *χρόνος προσαρμογής* (relaxation time) τ αποκτά μια σταθερή ταχύτητα που αντιστοιχεί στην *τελική ταχύτητα καθίζησης* u_s (terminal settling velocity). Για σφαιρικά, στάσιμα σωματίδια και $Re_p < 0.1$ η τελική ταχύτητα καθίζησης², όπως προκύπτει από το νόμο του *Stokes*, είναι

$$u_s = \frac{\rho d^2 C_C g}{18\mu_g} \quad (3.11)$$

² Ορίζεται ο αριθμός *Raynolds* της σωματιδιακής φάσης: $Re_p = \frac{d_p u_p}{\nu_f}$. Για ροές *Stokes* γύρω από σωματίδιο συνήθως είναι $Re_p \ll 1$

όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας και μ_g το ιξώδες του περιβάλλοντος ρευστού. Από την Εξίσωση (3.11) φαίνεται ότι η τελική ταχύτητα καθίζησης αυξάνεται σημαντικά με το μέγεθος του σωματιδίου, καθώς είναι ανάλογη του τετραγώνου της διαμέτρου. Τα αιωρούμενα σωματίδια αποκτούν πολύ γρήγορα την τελική ταχύτητα καθίζησης, συνεπώς θεωρώντας την ταχύτητα αυτή ως ταχύτητα της βαρυτικής καθίζησης προσεγγίζεται ικανοποιητικά ο μηχανισμός.

Στην **Εικόνα 3.6** παρουσιάζονται οι ταχύτητες καθίζησης σωματιδίων με διάμετρο από 10nm έως $100\mu\text{m}$ που αιωρούνται στον αέρα σε θερμοκρασία 298 K , όταν η πυκνότητα τους είναι 1 g cm^{-3} . Σωματίδια μεγαλύτερα από $10\mu\text{m}$ κατακάθονται με ταχύτητες μεγαλύτερες από 10 m h^{-1} , συνεπώς έχουν μικρούς χρόνους ζωής ως αιωρούμενα.



Εικόνα 3.6 Τελική ταχύτητα καθίζησης σωματιδίων στον αέρα σε θερμοκρασία 298 K συναρτήσει της διαμέτρου αυτών (Seinfeld and Pandis, 1998)

Μοριακή διάχυση

Αποτέλεσμα των τυχαίων συγκρούσεων των μορίων του ρευστού με τα αιωρούμενα σωματίδια είναι τα τελευταία να πραγματοποιούν ακανόνιστη κίνηση που ονομάζεται κίνηση *Brown*. Το μακροσκοπικό αποτέλεσμα της κίνησης *Brown* είναι η καθαρή μεταφορά των σωματιδίων από περιοχές υψηλής συγκέντρωσης σε περιοχές χαμηλής συγκέντρωσης. Η

διαδικασία αυτή καλείται μοριακή διάχυση. Η ροή των σωματιδίων (αριθμός σωματιδίων/ $m^2 \text{ sec}$) λόγω διάχυσης δίνεται από το νόμο του *Fick*:

$$J_p = -D_p \Delta n_p \quad (3.12)$$

Το μέγεθος που χαρακτηρίζει το συγκεκριμένο μηχανισμό είναι ο *συντελεστής μοριακής διάχυσης* D_p που υπολογίζεται από την Εξίσωση (3.13) *Stokes – Einstein*:

$$D_p = \frac{k_B T_f C_C}{3\pi\mu_f d_p} \quad (3.13)$$

με k_B τη σταθερά του *Boltzmann* και T_f η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ρευστού και C_C ο διορθωτικός όρος του *Cunningham* ή *συντελεστής ολίσθησης* (slip correction factor).

Όπως προκύπτει από την Εξίσωση (3.13), η μοριακή διάχυση είναι πιο σημαντική στα μικρά σωματίδια του αερολύματος, καθώς ο συντελεστής μοριακής διάχυσης είναι αντιστρόφως ανάλογος της διαμέτρου. Για να συγκριθούν οι δύο μηχανισμοί εναπόθεσης (καθίζηση λόγω βαρύτητας και μοριακή διάχυση) αναφέρουμε για παράδειγμα την επίδραση - τους στην κίνηση δύο σωματιδίων διαφορετικού μεγέθους, αλλά ίδιας πυκνότητας και σχήματος. Σε χρόνο ενός δευτερολέπτου ένα σωματίδιο διαμέτρου $0.2 \mu m$ διαχέεται σε απόσταση $20 \mu m$ και πέφτει κατά $4 \mu m$. Αντίθετα, ένα σωματίδιο διαμέτρου $2 \mu m$ στον ίδιο χρόνο διαχέεται 5 φορές λιγότερο από το προηγούμενο σωματίδιο ($4 \mu m$), ενώ πέφτει 50 φορές περισσότερο ($200 \mu m$) λόγω βαρύτητας.

Αδρανειακή πρόσκρουση

Το αιωρούμενο σωματίδιο είναι πιθανόν να μη μπορεί να ακολουθήσει την τροχιά του ρευστού, λόγω της αδράνειάς του. Σε καμπυλόγραμμη ροή, όπως για παράδειγμα σε ροή γύρω από μία επιφάνεια, οι τροχιές των σωματιδίων αποκλίνουν από τις γραμμές ροής του ρευστού και προσκρούουν στην επιφάνεια. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο σημαντικό για σωματίδια μεγαλύτερα από $1 \mu m$. Η εναπόθεση λόγω πρόσκρουσης είναι ο μηχανισμός που καθορίζει την απομάκρυνση μεγαλύτερων σωματιδίων σε συσκευές καθαρισμού αερίων, όπως φίλτρα και κυκλωνικοί διαχωριστές. Εισάγοντας τους διορθωτικούς συντελεστές C_C και χ μπορούμε να ορίσουμε ξανά τον χρόνο χαλάρωσης του σωματιδίου:

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2 C_C}{18\mu_f \chi} \quad (3.14)$$

δηλαδή το χρόνο που χρειάζεται ένα σωματίδιο, ξεκινώντας από την ηρεμία, να φτάσει την τελική ταχύτητα του ρευστού και τον αριθμό *Stokes*:

$$St = \frac{u_o \tau_p}{L} = \frac{\rho_p d_p^2 C_C u_o}{18\mu_f \chi L} \quad (3.15)$$

όπου u_o η χαρακτηριστική ταχύτητα και L το χαρακτηριστικό μήκος του πεδίου ροής.

Ηλεκτροστατική εναπόθεση

Τα περισσότερα αιωρούμενα σωματίδια μεταφέρουν κάποιο ηλεκτροστατικό φορτίο και μερικά μπορεί να παρουσιάσουν ιδιαίτερα φορτισμένα. Στην τελευταία περίπτωση η ηλεκτροστατική δύναμη μπορεί να είναι χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από τη δύναμη της βαρύτητας. Η φόρτιση των σωματιδίων μπορεί να προκύψει από προσκόλληση μικρών ιόντων, στατικό ηλεκτρισμό, φόρτιση που προκαλείται από θέρμανση σε σημείο που τα σωματίδια εκπέμπουν ιόντα ή ηλεκτρόνια, αυτοφόρτιση λόγω ραδιενεργής διάσπασης των συστατικών των σωματιδίων (Friedlander, 2000). Η φόρτιση από έκθεση σε ιόντα ίδιας πολικότητας καλείται *μονοπολική φόρτιση* (unipolar charging). Στην ατμόσφαιρα, τόσο τα θετικά όσο και τα αρνητικά ιόντα παράγονται από κοσμική ακτινοβολία και ραδιενεργές διάσπασης. Η έκθεση σε ιόντα μικτής πολικότητας προκαλεί *διπολική φόρτιση* (bipolar charging) των σωματιδίων.

Στον πνεύμονα δεν υπάρχει ηλεκτρικό φορτίο ακόμα και στην περίπτωση που το ανθρώπινο σώμα αποκτά κάποια διαφορά δυναμικού. Εν τούτοις, δύο ειδών δυνάμεις ασκούνται στα σωματίδια στο εσωτερικό του ανθρώπινου πνεύμονα λόγω ηλεκτροστατικού φορτίου. Η πρώτη δύναμη οφείλεται στο γεγονός ότι όταν ένα σωματίδιο με ηλεκτρικό φορτίο βρίσκεται κοντά σε γειωμένη επιφάνεια, όπως η επιφάνεια των αεραγωγών του πνεύμονα, δημιουργεί ένα κατά απόλυτη τιμή ίσης και αντίθετης πολικότητας φορτίο σε απόσταση αντιδιαμετρική ως προς το ίδιο με την επιφάνεια. Συνεπώς, το σωματίδιο υφίσταται *έλξη από φανταστικό φορτίο* (image charge attraction), κατά συνέπεια έλξη προς την επιφάνεια του πνεύμονα και εναπόθεση σε αυτήν. Η δεύτερη δύναμη εμφανίζεται όταν υπάρχει πυκνό και φορτισμένο αερόλυμα στο εσωτερικό του πνεύμονα. Το κάθε σωματίδιο θα δέχεται *δύναμη*

φορτισμένου χώρου (space charge force) από τα υπόλοιπα φορτισμένα σωματίδια του αερολύματος. Για παράδειγμα εάν τα σωματίδια που εισπνέονται έχουν ίδιας πολικότητας φορτίο, το καθένα θα απωθείται από το υπόλοιπο αερόλυμα με πιθανό αποτέλεσμα την εναπόθεση στα τοιχώματα του πνεύμονα (Bailey, 1997; Finlay, 2001).

Θερμοφόριση

Ας θεωρήσουμε ένα σωματίδιο που βρίσκεται μέσα σε ρευστό με βαθμίδα θερμοκρασίας. Γνωρίζουμε ότι τα μόρια ρευστού σε περιοχές υψηλότερης θερμοκρασίας έχουν μεγαλύτερη κινητική ενέργεια και μεγαλύτερη ορμή από τα αντίστοιχα μόρια σε χαμηλότερης θερμοκρασίας περιοχές. Επομένως τα μόρια που συγκρούονται με το σωματίδιο από τη «θερμή» πλευρά του σωματιδίου θα ασκούν μεγαλύτερη δύναμη από εκείνα που βρίσκονται στην «ψυχρή» πλευρά του σωματιδίου. Σαν αποτέλεσμα των παραπάνω δυνάμεων, το σωματίδιο αναμένεται να απομακρύνεται από τη θερμή περιοχή με κατεύθυνση προς τις ψυχρότερες περιοχές του ρευστού. Αυτή η φυσική περιγραφή της θερμοφόρισης είναι ακριβής σε μικρής διαμέτρου σωματίδια. Για μεγαλύτερα σωματίδια η διαδικασία γίνεται πιο πολύπλοκη. Στην περίπτωση αυτή η επιφάνεια του σωματιδίου και το στρώμα που την περιβάλλει αναπτύσσουν δευτερογενείς βαθμίδες θερμοκρασίας. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε δευτερογενή μακροσκοπική κίνηση του ρευστού από ψυχρότερες προς θερμότερες περιοχές κατά μήκος της επιφάνειας του σωματιδίου, προκαλώντας μια δύναμη στην ψυχρή κατεύθυνση.

Αξονική διάχυση

Η αξονική διάχυση εμφανίζεται όταν τα σωματίδια κινούμενα κατά μήκος της ροής του αέρα που τα μεταφέρει, διαχέονται υπό την επίδραση βαθμίδα συγκέντρωσης στο χώρο. Μεταφέρονται, δηλαδή, παράλληλα με την οριζόντια μεταφορά τους από περιοχές υψηλότερης σε περιοχές χαμηλότερης συγκέντρωσης. Συνεπώς, η συγκέντρωση των σωματιδίων μεταβάλλεται και λόγω της διάχυσης τους κατά τη μετατόπισή τους παράλληλα

με τον άξονα της ροής. Χαρακτηριστικά αναφέρεται η αξονική διάχυση ενός νέφους καπνού από τσιγάρο κατά τη μεταφορά στο εσωτερικό του πνεύμονα.

Όταν δεν πραγματοποιείται οριζόντια μεταφορά, η αξονική μεταφορά των σωματιδίων στους αεραγωγούς του πνεύμονα οφείλεται στη διάχυση λόγω κίνησης *Brown* αποκλειστικά. Η οριζόντια μεταφορά του αερολύματος στο εσωτερικό του αναπνευστικού συστήματος αλλάζει περιοδικά κατεύθυνση κατά τη διάρκεια της αναπνοής (εισπνοή – εκπνοή) και ως αποτέλεσμα δημιουργείται ένα πολύπλοκο προφίλ ροής σε συνδυασμό με μεγάλης έκτασης ανάμειξη ανάμεσα στον αέρα του εισπνέεται και στον αέρα που υπάρχει ήδη στον πνεύμονα. Οι Scherer et al.(1975) μέτρησαν πειραματικά αυτά τα φαινόμενα και την επίδραση τους στις πρώτες γενεές της γεωμετρίας του *Weibel* και πρότειναν έναν ενεργό συντελεστή αξονικής διάχυσης ώστε να λαμβάνεται υπόψη η ανάμειξη, όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια στην περίπτωση της εισπνοής και της εκπνοής αντίστοιχα

$$D = \begin{cases} D_B + 1.08 \cdot u \cdot d_T, & \text{για εισπνοή} \\ D_B + 0.37 \cdot u \cdot d_T, & \text{για εκπνοή} \end{cases} \quad (3.16)$$

Σημειώνεται ότι η παραπάνω έκφραση είναι εμπειρική και υπάρχει αβεβαιότητα ως προς την ικανότητα εφαρμογής της σε διαφορετικές περιοχές του αναπνευστικού συστήματος. Επιλέχθηκε για λόγους απλότητας και επειδή είναι σύμφωνη με την περιγραφή της γεωμετρίας κατά *Weibel* που χρησιμοποιούμε. Επίσης είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη στη βιβλιογραφία στις περιπτώσεις αξονικής διάχυσης σε πνεύμονα.

4 Μετρήσεις έκθεσης σε αιωρούμενα σωματίδια

4.1 Περιγραφή του προγράμματος SINPHONIE

Τα δεδομένα της παρούσας διπλωματικής εργασίας προέρχονται από το ευρωπαϊκό *SINPHONIE* (*Schools Indoor Pollution and Health: Observatory Network in Europe*) (Εικόνα 4.1), το οποίο και ανήκει στο Σχέδιο Δράσης της Ευρωπαϊκής ένωσης για το Περιβάλλον και την Υγεία για την περίοδο 2004 – 2010. Το *SINPHONIE* είναι ένα σύνθετο ερευνητικό πρόγραμμα που περιλαμβάνει τους τομείς της υγείας, του περιβάλλοντος, των συγκοινωνιών και των κλιματολογικών αλλαγών και αποσκοπεί στη βελτίωση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα στα σχολεία και στα νηπιαγωγεία.



Εικόνα 4.1 SINPHONIE – Schools Indoor Pollution and Health: Observatory Network in Europe

Στα πλαίσια του προγράμματος συμμετείχαν 38 ινστιτούτα περιβάλλοντος και υγείας από 25 ευρωπαϊκές χώρες όπως και φαίνεται στην Εικόνα 4.2, με κύριο στόχο τη μείωση και πρόληψη των νοσημάτων του αναπνευστικού που οφείλονται στη ρύπανση του αέρα του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος.

Με ιδιαίτερη έμφαση στα σχολεία και τους παιδικούς σταθμούς, το πρόγραμμα *SINPHONIE* θα καθορίσει κατευθυντήριες γραμμές για διορθωτικά μέτρα στο σχολικό περιβάλλον. Το *SINPHONIE* βασίζεται στην αντίληψη ότι το δικαίωμα των παιδιών να αναπνέουν καθαρό αέρα στα σχολεία είναι θεμελιώδους σημασίας για το δικαίωμα στην υγεία.

Στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου *SINPHONIE*, πραγματοποιήθηκαν μελέτες περιβάλλοντος και υγείας, τα αποτελέσματα των οποίων αναλύθηκαν, λαμβάνοντας υπόψη δεδομένα προηγούμενων μελετών, σε σχέση με το υπό μελέτη αντικείμενο. Αυτό θα οδηγήσει

μελλοντικά σε μια συνολική αξιολόγηση του κινδύνου και των επιπτώσεων της ποιότητας του εσωτερικού αέρα στο σχολικό περιβάλλον για την υγεία και την απόδοση των παιδιών.



Εικόνα 4.2 Συμμετέχουσες χώρες στο πρόγραμμα SINPHONIE

Το σχολικό περιβάλλον μπορεί να επηρεαστεί από μια σειρά παραγόντων, συμπεριλαμβανομένων της κυκλοφορίας οχημάτων, του είδους θέρμανσης που χρησιμοποιείται και τη μορφή του αερισμού (π.χ. φυσικός ή μηχανικός). Όλοι αυτοί οι παράγοντες έπρεπε να ληφθούν υπόψη, όταν αποφασίστηκε ο τόπος, ο χρόνος και η μέθοδος μέτρησης της ρύπανσης. Δεδομένου ότι το περιβάλλον ενός κτιρίου έχει σημαντικό αντίκτυπο στην ποιότητα του εσωτερικού αέρα, η τοποθεσία του σχολείου ήταν ένα ιδιαίτερο σημαντικό κριτήριο για την επιλογή των υπό μελέτη σχολείων. Η επιλογή έπρεπε, συνεπώς, να περιλαμβάνει σχολεία τόσο σε αστικές όσο και αγροτικές περιοχές, καθώς και σχολεία σε πράσινες περιοχές, μεγάλες οδικές αρτηρίες και βιομηχανικές ζώνες για να είναι δυνατή η σύγκριση.

Η μελέτη διεξήχθη κατά τη διάρκεια του χειμώνα 2011 (περίοδος με θέρμανση), καθώς το είδος θέρμανσης έχει σημαντική επίδραση στην ποιότητα του εσωτερικού αέρα, αλλά και κατά το φθινόπωρο 2012 (περίοδος χωρίς θέρμανση), όταν οι θερμοκρασίες ήταν σχετικά υψηλές και δεν υπήρχε η ανάγκη για θέρμανση των αιθουσών, έτσι ώστε να γίνει αξιόπιστη

ανάλυση των αποτελεσμάτων και να είναι δυνατή η εκτίμηση των εποχιακών αλλαγών (*seasonal variation*).

Με την ολοκλήρωση των μελετών σε όλες τις χώρες που έλαβαν μέρος, θα αναπτυχθούν κατευθυντήριες οδηγίες και συστάσεις για τους αρχιτέκτονες, τους διαχειριστές κτιρίων, τους μαθητές και το προσωπικό των σχολείων, με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα στα ευρωπαϊκά σχολεία.

Η διεξαγωγή του ερευνητικού προγράμματος πραγματοποιήθηκε την περίοδο μεταξύ Σεπτεμβρίου 2011 και Μαρτίου 2012. Ένας από τους τομείς έρευνας του προγράμματος ήταν ο Τομέας της Περιβαλλοντικής Επιτήρησης, ο οποίος περιελάμβανε τη μέτρηση φυσικών, χημικών και βιολογικών παραγόντων σε τρεις τάξεις του κάθε σχολείου που επιλέχθηκε. Συγκεκριμένα, μετρήθηκαν 17 φυσικές και χημικές παράμετροι, τόσο στον εσωτερικό, όσο και στον εξωτερικό αέρα. Επιπλέον, συλλέχθηκαν δείγματα από το περιβάλλον για τον καθορισμό μικροβίων και αλλεργιογόνων (σκόνη εσωτερικού αέρα κλπ.). Μετρήθηκαν, επίσης, ειδικοί δείκτες μικροβίων και μυκήτων στο σκόνη. Ο Πίνακας 1 παραθέτει τις 18 φυσικοχημικές παράμετροι που μετρήθηκαν και τα αναμενόμενα όρια των τιμών τους που καθορίστηκαν από το πρόγραμμα *SINPHONIE*.

Πίνακας 1 Οι 17 φυσικοχημικοί παράμετροι του SINPHONIE και το αναμενόμενο εύρος τιμών τους

Φυσικοχημική Παράμετρος	Αναμενόμενο Εύρος Τιμών
CO ₂	300 – 10.000 ppm
Ρυθμός Αερισμού	0 – 5 ACH
Θερμοκρασία	0 – 40 °C
Υγρασία	0 – 100 %
PM _{2.5}	0 – 150 µg/m ³
PM ₁₀	0 – 150 µg/m ³
Βενζόλιο	0 – 100 µg/m ³
Τριχλωροαιθυλένιο	0 – 250 µg/m ³
Τετραχλωροαιθυλένιο	0 – 250 µg/m ³
α-Πινένιο	0 – 500 µg/m ³
d-Λιμονένιο	0 – 1.000 µg/m ³
Ναφθαλένιο	0 – 100 µg/m ³
Φορμαλδεΰδη	0 – 100 µg/m ³
NO ₂	0 – 200 µg/m ³
O ₃	0 – 100 µg/m ³
Ραδόνιο	0 – 300 Bq/m ³
CO	0 – 100 ppm

Στα πλαίσια του προγράμματος *SINPHONIE* και συγκεκριμένα στη συλλογή δεδομένων μετρήσεων από τις πειραματικές καμπάνιες στα ελληνικά σχολεία εκπονήθηκε η διπλωματική εργασία των Λαζαρίδη Βασιλείου και Λέγκα Νικολάου (Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, 2014). Στοιχεία για την περιγραφή των πειραματικών καμπανιών, της μεθοδολογίας μετρήσεων και των πεδίων μελέτης προέρχονται από την συγκεκριμένη εργασία.

4.2 Κριτήρια και επιλογή σχολικών κτιρίων

Η επιλογή των σχολικών κτιρίων, στα οποία πραγματοποιήθηκε η δειγματοληψία, έγινε με βάση τα ακόλουθα κριτήρια, τα οποία θεσπίστηκαν από το πρόγραμμα *SINPHONIE*.

Κριτήρια τοποθεσίας (προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση του περιβάλλοντος χώρου)

- Αστική περιοχή / προάστιο
- Πράσινη ζώνη / Περιοχή αυξημένης κίνησης / Βιομηχανική ζώνη
- Χερσαία / Παραθαλάσσια περιοχή
- Βορράς / Νότος / Ανατολή / Δύση
- Κλιματολογικές συνθήκες

Κριτήρια αερισμού του κτιρίου (τύπος αερισμού)

- Φυσικός αερισμός
- Μηχανικός αερισμός
- Μεικτός αερισμός

Κατασκευαστικά κριτήρια

Τα σχολικά κτίρια επιλέχθηκαν με βάση τον τύπο, τις τεχνικές κατασκευής και την ηλικία τους, ώστε να είναι αντιπροσωπευτικά τις πλειοψηφίας των σχολικών κτιρίων της Ελλάδας. Επιπλέον, αποφασίστηκε η δειγματοληψία να γίνει στην πόλη της Κοζάνης, ώστε το

Εργαστήριο Τεχνολογίας Περιβάλλοντος, του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, όπου πραγματοποιήθηκαν οι εργαστηριακές αναλύσεις των δειγμάτων, να βρίσκεται σε κοντινή απόσταση από τον τόπο της δειγματοληψίας.

Η δειγματοληψία έλαβε χώρα σε 3 σχολεία, εκ των οποίων τα δύο βρίσκονται σε αστική περιοχή και το τρίτο σε προάστιο της πόλης όπως φαίνεται στην [Εικόνα 4.3](#), αναλογία η οποία καθορίστηκε από το πρόγραμμα *SINPHONIE*. Στη περίπτωση που δεν ήταν δυνατόν να εφαρμοστούν όλα τα παραπάνω κριτήρια, η επιλογή χώρου δειγματοληψίας έγινε, ώστε να πληρούνται όσο το δυνατόν περισσότερα από αυτά. Η πλειοψηφία των σχολικών κτιρίων στην Ελλάδα χρησιμοποιεί φυσικό αερισμό, σε αντίθεση με άλλες ευρωπαϊκές χώρες, όπου ο τύπος του αερισμού μπορεί να ποικίλει. Συνεπώς, το σύνολο των σχολικών κτιρίων που επιλέχθηκαν είχαν φυσικό αερισμό.



Εικόνα 4.3 Χάρτης Κοζάνης

- Σχολείο 1^ο

Σύμφωνα με τα παραπάνω κριτήρια, αρχικά επιλέχθηκε το Σχολείο 1 που είναι ένα δημόσιο δημοτικό σχολείο, το οποίο κατασκευάστηκε το 2008 και λειτουργεί μόνο κατά την πρωινή βάρδια. Καλύπτει συνολική έκταση $1026 m^2$ και χρησιμοποιείται από συνολικά 210 άτομα (μαθητές, διδάσκοντες, κ.α.). Το σχολείο έχει 11 αίθουσες διδασκαλίας στους 2 ορόφους του (ισόγειο, πρώτος όροφος), γυμναστήριο, αίθουσα καλλιτεχνικών, κυλικείο και 2 αίθουσες γραφείων (διδασκόντων και διευθυντή) και χώρο αποθήκευσης προϊόντων καθαρισμού. Επίσης, διαθέτει προαύλιο χώρο, ο οποίος χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια των διαλειμμάτων και της γυμναστικής. Το κτίριο βρίσκεται στην πόλη της Κοζάνης, σε περιοχή σχετικά απομακρυσμένη από το κέντρο της πόλης, αλλά με αυξημένη κίνηση οχημάτων και ελάχιστους χώρους πρασίνου σε κοντινή εμβέλεια. Επίσης βρίσκεται δίπλα σε χώρο στάθμευσης οχημάτων, καθώς επίσης και σε υπαίθρια έκταση με χόμα σε κατοικημένη περιοχή που δεν έχει διαμορφωθεί.

- Σχολείο 2^ο

Το σχολείο 2 είναι ένα δημόσιο νηπιαγωγείο, κατασκευασμένο το 2007, το οποίο λειτουργεί ως ολοήμερο αλλά και πρωινό. Η επιφάνεια του είναι $623 m^2$ και χρησιμοποιείται από 100 άτομα. Έχει έναν όροφο (ισόγειο), με 5 αίθουσες διδασκαλίας, η μια εκ των οποίων χρησιμοποιείται και ως κουζίνα, και χώρος φαγητού 1 γραφείο διδασκόντων. Ο προαύλιος χώρος του σχολείου χρησιμοποιείται μόνο κατά την περίοδο χωρίς θέρμανση, σε ώρες διαλειμάτων και σχολικών δραστηριοτήτων των μαθητών και περιλαμβάνει χώρο πρασίνου. Το κτίριο βρίσκεται κοντά στο κέντρο της Κοζάνης και δίπλα του υπάρχει αυξημένη κίνηση οχημάτων.

- Σχολείο 3^ο

Τέλος το σχολείο 3 είναι ολοήμερο δημοτικό σχολείο, το οποίο κατασκευάστηκε το 1997. Έχει συνολική επιφάνεια $1900 m^2$ και χρησιμοποιείται από 228 μαθητές και καθηγητές. Διαθέτει 13 αίθουσες διδασκαλίας, γυμναστήριο, κυλικείο, 2 αίθουσες γραφείων καθηγητών, αίθουσα τελετών και χώρο αργαστηρίου, στους 3 ορόφους του (ισόγειο, πρώτος και δεύτερος

όροφος). Το σχολείο έχει προαύλιο χώρο, με χώρο πρασίνου, ο οποίος χρησιμοποιείται κατά την διάρκεια των διαλειμμάτων και της γυμναστικής. Το κτίριο βρίσκεται σε μικρή σχετικά απόσταση από το κέντρο της Κοζάνης, ωστόσο σε τοποθεσία σχετικά αυξημένης βλάστησης και με ελάχιστη κίνηση οχημάτων.

4.3 Κριτήρια και επιλογή σχολικών αιθουσών

Ένας βασικός παράγοντας της επιτυχούς διεξαγωγής των μετρήσεων, ήταν η συνεργασία της διεύθυνσης, διδασκόντων και μαθητών με τους υπεύθυνους της δειγματοληψίας. Για αυτό το λόγο, προηγήθηκε η ενημέρωση τους για την όλη διαδικασία, πριν από την έναρξη των μετρήσεων. Όσον αφορά τα δημοτικά σχολεία, επιλέχθηκαν μαθητές των τάξεων της πέμπτης και έκτης δημοτικού και όχι μικρότερων, ώστε να είναι δυνατόν να ανταποκριθούν στις ερωτήσεις των ερωτηματολογίων του προγράμματος και να μπορούν να λάβουν μέρος στις σπιρομετρήσεις που διεξήχθησαν. Επιπλέον, προτιμήθηκαν αίθουσες με αρκετές διαφοροποιήσεις μεταξύ τους, όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 2, για παράδειγμα κάποιες αίθουσες είχαν τα παράθυρα στραμμένα σε δρόμο, ενώ άλλες στο προαύλιο του σχολείου. Στις συγκεκριμένες αίθουσες οι μαθητές είχαν μεγάλο χρόνο παραμονής καθ' όλη τη διάρκεια της εβδομάδας, αντιπροσωπεύοντας σε μεγάλο βαθμό το σύνολο των τάξεων του σχολείου. Επίσης, προτιμήθηκαν αίθουσες οι οποίες δεν είχαν βαφτεί πρόσφατα, ώστε τυχόν εκπομπές από τα υλικά βαφής να μην επηρεάσουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

- Αίθουσες Σχολείου 1

Σύμφωνα με τα παραπάνω κριτήρια, επιλέχθηκαν οι 3 αίθουσες του Σχολείου 1, στις οποίες πραγματοποιήθηκε η δειγματοληψία. Και οι 3 αίθουσες βρίσκονταν στο πρώτο όροφο του σχολείου. Οι τάξεις αερίζονταν με φυσικό αερισμό, με άνοιγμα των παραθύρων κατά την διάρκεια των διαλειμμάτων και κατά την περίοδο με θέρμανση γινόταν χρήση της τηλεθέρμανσης. Όλες οι αίθουσες διέθεταν λευκούς πίνακες με μαρκαδόρους με βάση το οινόπνευμα και έπιπλα κατασκευασμένα από κόντρα πλακέ και μέταλλο. Το δάπεδο καθαριζόταν με χλωρίνη και τα παράθυρα με καθαριστικά που περιείχαν αμμωνία μια φορά τη μέρα, το απόγευμα, μετά το πέρας των μαθημάτων.

Η Αίθουσα 1 έχει επιφάνεια $53.9 m^2$, συνολική επιφάνεια παραθύρων $9.95 m^2$ και χρησιμοποιούνται από 19 μαθητές για 5.5 ώρες ημερησίως κατά μέσο όρο. Τα παράθυρα της αίθουσας είναι στραμμένα προς την αυλή και το δρόμο. Η αίθουσα είχε βαφτεί 3 ή περισσότερα χρόνια πριν τη διεξαγωγή της δειγματοληψίας με υδατοδιαλυτή βαφή. Το δάπεδο καθαριζόταν με χλωρίνη και τα παράθυρα με καθαριστικά που περιείχαν αμμωνία μια φορά τη μέρα, το απόγευμα, μετά το πέρας των μαθημάτων.

Πίνακας 2 Γενικά χαρακτηριστικά των χώρων της δειγματοληψίας

		Αρ. Μαθητών	Ώρες χρήσης ανά ημέρα	Επιφ. δαπέδου (m^2)	Πυκνότητα μαθητών ($μαθ./m^2$)	Επιφ. ανά μαθητή ($m^2/μαθ.$)	Επιφάνεια Παραθύρ. (m^2)	Παράθυρα στραμμένα	Τοποθεσία Σχολείου
Σχολείο 1	Αίθουσα 1	19	5,5	53,9	0,35	2,84	9,95	Δρόμος – αυλή	Μακριά από το κέντρο της Κοζάνης, σε δρόμο μεγάλης κυκλοφορίας, κοντά σε αλάνα
	Αίθουσα 2	17	6	48,7	0,35	2,86	9,95	Δρόμος	
	Αίθουσα 3	16	5	43,5	0,37	2,72	9,94	Δρόμος	
Σχολείο 2	Αίθουσα 1	20	4	52,5	0,38	2,63	10	Δρόμος – αυλή	Κοντά στο κέντρο της πόλης, σε δρόμο μεγάλης κυκλοφορίας, διαθέτει μικρό χώρο πρασίνου
	Αίθουσα 2	23	4	64	0,36	2,78	15,5	Δρόμος – αυλή	
	Αίθουσα 3	16	8	73,6	0,22	4,6	20,63	Δρόμος	
Σχολείο 3	Αίθουσα 1	19	6	58,3	0,33	3,07	8,23	Αυλή	Κοντά στο κέντρο της πόλης, σε δρόμο μικρής κυκλοφορίας, μέσα σε περιοχή με πολλά δέντρα
	Αίθουσα 2	24	6	60,3	0,4	2,51	8,16	Αυλή	
	Αίθουσα 3	23	6	56,13	0,41	2,44	8,16	Αυλή	

Η Αίθουσα 2 έχει επιφάνεια $48.7 m^2$, επιφάνεια παραθύρων $9.95 m^2$ και χρησιμοποιούνταν από 17 μαθητές για 6 ώρες την ημέρα. Τα παράθυρα της αίθουσας είναι στραμμένα προς το δρόμο. Η αίθουσα είχε βαφτεί 3 ή περισσότερα χρόνια πριν τη δειγματοληψία με υδατοδιαλυτή βαφή. Το δάπεδο καθαριζόταν με χλωρίνη και τα παράθυρα με καθαριστικά που περιείχαν αμμωνία κάθε απόγευμα, μετά το μάθημα.

Η Αίθουσα 3 έχει επιφάνεια $43.5 m^2$, επιφάνεια παραθύρων $9.94 m^2$ και χρησιμοποιούνταν από 16 μαθητές για 5 ώρες καθημερινά, κατά μέσο όρο. Τα παράθυρα της αίθουσας είναι στραμμένα προς το δρόμο. Η αίθουσα είχε βαφτεί 1 ή 3 χρόνια πριν τη

διεξαγωγή της δειγματοληψίας. Το δάπεδο καθαριζόταν με χλωρίνη και τα παράθυρα με καθαριστικά που περιείχαν αμμωνία κάθε μεσημέρι, ανάμεσα στα μαθήματα.

- Αίθουσες Σχολείου 2

Όλες οι αίθουσες του Σχολείου 2 βρίσκονται στο ισόγειο του σχολείου, αερίζονται με φυσικό αερισμό και είχαν λευκούς πίνακες με μαρκαδόρους με βάση το οινόπνευμα και έπιπλα από κόντρα πλακέ, μέταλλο και πλαστικό. Κατά τη χειμερινή περίοδο γινόταν χρήση της τηλεθέρμανσης. Το δάπεδο καθαριζόταν με χλωρίνη και τα παράθυρα με καθαριστικά που περιείχαν αμμωνία, μια φορά τη μέρα, μετά το τέλος του μαθήματος. Οι αίθουσες του σχολείου είχαν βαφτεί 3 ή περισσότερα χρόνια πριν τη διεξαγωγή της δειγματοληψίας, με υδατοδιαλυτή βαφή και περιείχαν έπιπλα από ξύλο, κόντρα πλακέ, μέταλλο, υφάσματα και πλαστικό. Επιπρόσθετα, αφού το Σχολείο 2 είναι νηπιαγωγείο, στο χώρο υπήρχε μεγάλος αριθμός υλικών χειροτεχνίας και ζωγραφικής (μαρκαδόροι, κόλλες, νερομπογιές κ.α.), ενώ σε κάθε αίθουσα ήταν εγκατεστημένος νιπτήρας με σαπούνι, για το πλύσιμο των χεριών των παιδιών.

Η επιφάνεια της Αίθουσας 1 είναι $52.5 m^2$, με συνολική επιφάνεια παραθύρων $10 m^2$ και χρησιμοποιούταν από 20 μαθητές για 4 ώρες κατά μέσο όρο καθημερινά. Η αίθουσα έχει παράθυρα στραμμένα προς την αυλή του σχολείου και το δρόμο. Αεριζόταν με φυσικό αερισμό, με άνοιγμα παραθύρων σε κάθε διάλειμμα. Το δάπεδο είναι κατασκευασμένο από ξύλο και τα $16 m^2$ καλύπτονται από συνθετική μακέτα. Η αίθουσα βρισκόταν κοντά σε εκτυπωτή και φωτοτυπικό μηχάνημα.

Η επιφάνεια της Αίθουσας 1 είναι $52.5 m^2$, με συνολική επιφάνεια παραθύρων $10 m^2$ και χρησιμοποιούταν από 20 μαθητές για 4 ώρες κατά μέσο όρο καθημερινά. Η αίθουσα έχει παράθυρα στραμμένα προς την αυλή του σχολείου και το δρόμο. Αεριζόταν με φυσικό αερισμό, με άνοιγμα παραθύρων σε κάθε διάλειμμα. Το δάπεδο είναι κατασκευασμένο από ξύλο και τα $16 m^2$ καλύπτονται από συνθετική μακέτα. Η αίθουσα βρισκόταν κοντά σε εκτυπωτή και φωτοτυπικό μηχάνημα.

Η επιφάνεια της Αίθουσας 2 είναι $64 m^2$, με συνολική επιφάνεια παραθύρων $15.5 m^2$ και χρησιμοποιούταν από 23 μαθητές για 4 ώρες καθημερινά. Η αίθουσα έχει παράθυρα

στραμμένα προς την αυλή του σχολείου. Αεριζόταν με φυσικό αερισμό, ανοίγοντας τα παράθυρα 2 με 3 φορές την ημέρα. Το δάπεδο είναι κατασκευασμένο από ξύλο και τα $21 m^2$ καλύπτονται από συνθετική μακέτα. Η αίθουσα βρισκόταν κοντά σε εκτυπωτή και φωτοτυπικό μηχάνημα.

Η Αίθουσα 3 έχει εμβαδόν δαπέδου $73.6 m^2$ και συνολική επιφάνεια παράθυρων $20.63 m^2$. Κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας, η αίθουσα χρησιμοποιούταν από 16 μαθητές για 8 ώρες την ημέρα κατά μέσο όρο. Έχει παράθυρα στραμμένα προς το δρόμο και αεριζόταν με φυσικό αερισμό, ανοίγοντας τα παράθυρα σε κάθε διάλλειμα. Η Αίθουσα 3 έχει πλαστικό δάπεδο και τα $45 m^2$ καλύπτονται από συνθετική μοκέτα. Επιπλέον, η αίθουσα χρησιμοποιούταν κατά τις μεσημεριανές ώρες και ως χώρος κουζίνας και φαγητού.

- Αίθουσες Σχολείου 3

Οι αίθουσες του Σχολείου 3 στις οποίες πραγματοποιήθηκε η δειγματοληψία βρίσκονταν στον δεύτερο όροφο του σχολείου, αεριζόνταν με φυσικό αερισμό με το άνοιγμα των παραθύρων σε κάθε διάλλειμα και είχαν λευκούς πίνακες με μαρκαδόρους με βάση το οινόπνευμα και έπιπλα από κόντρα πλακέ και μέταλλο. Κατά την περίοδο χωρίς θέρμανση, οι αίθουσες θερμαίνονταν μέσω του συστήματος τηλεθέρμανσης. Το δάπεδο καθαριζόταν με χλωρίνη και τα παράθυρα με καθαριστικά που περιείχαν αμμωνία, καθημερινά, μετά το τέλος του μαθήματος, ενώ στο σχολείο γινόταν καθαριότητα μια φορά το τρίμηνο. Όλες οι αίθουσες στις οποίες έγινε η δειγματοληψία είναι στραμμένες προς τον προαύλιο χώρο του σχολείου.

Η Αίθουσα 1 έχει εμβαδόν $58.3 m^2$ και $8.23 m^2$ επιφάνεια παραθύρων. Η αίθουσα χρησιμοποιούταν από 19 μαθητές για 6 ώρες καθημερινά κατά την διάρκεια της δειγματοληψίας. Ο χώρος είχε βαφτεί 1 με 2 χρόνια πριν τη δειγματοληψία με υδατοδιαλυτή βαφή. Η αίθουσα καθαριζόταν μια φορά τη μέρα το απόγευμα μετά το τέλος των μαθημάτων ή το μεσημέρι ανάμεσα σε αυτά.

Η Αίθουσα 2 έχει εμβαδόν $60.2 m^2$ και $8.16 m^2$ επιφάνεια παραθύρων. Η αίθουσα χρησιμοποιούταν από 24 μαθητές για 6 ώρες καθημερινά κατά την διάρκεια της δειγματοληψίας. Ο χώρος είχε βαφτεί 3 ή περισσότερα χρόνια πριν τη δειγματοληψία με

αδιάβροχη βαφή. Η αίθουσα καθαριζόταν μια φορά τη μέρα το απόγευμα μετά το τέλος των μαθημάτων.

Η Αίθουσα 3 του σχολείου έχει εμβαδόν δαπέδου $56.13 m^2$ και $8.16 m^2$ επιφάνεια παραθύρων. Η αίθουσα χρησιμοποιούταν από 23 μαθητές για 6 ώρες καθημερινά κατά την διάρκεια της δειγματοληψίας. Ο χώρος είχε βαφτεί 3 ή περισσότερα χρόνια πριν τη δειγματοληψία με υδατοδιαλυτή βαφή. Η αίθουσα καθαριζόταν μια φορά τη μέρα το μεσημέρι ανάμεσα στα μαθήματα.

4.4 Μεθοδολογία δειγματοληψίας

Εφόσον ο φυσικός και ο χημικός χαρακτηρισμός του εσωτερικού περιβάλλοντος στο πρόγραμμα *SINPHONIE* επικεντρώνεται σε ουσίες οι οποίες προκαλούν χρόνια προβλήματα υγείας, εφαρμόστηκε δειγματοληψία μεγάλης χρονικής περιόδου (long term sampling). Για αυτό το λόγο η δειγματοληψία σε κάθε σχολείο κάλυψε ένα χρονικό διάστημα 5 ημερών (συγκεκριμένα όλη τη σχολική εβδομάδα, δηλαδή από το πρωί της Δευτέρας έως το απόγευμα της Παρασκευής, προκειμένου να τηρηθεί ένα ομοιόμορφο πρωτόκολλο δειγματοληψίας).

Τα εισπνεόμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.1, χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τα λεπτόκοκκα σωματίδια $PM_{2.5}$ και τα χονδρόκοκκα PM_{10} .

Ο αυτόματος αναλυτής μέτρησης συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων *Grimm 1.108* χρησιμοποιήθηκε για δειγματοληψίες 24 ωρών σε κάθε εξεταζόμενη αίθουσα, δηλαδή κάθε μέρα πραγματοποιούσε μετρήσεις σε διαφορετική αίθουσα.

Πιο συγκεκριμένα στις δύο καμπάνιες που πραγματοποιήθηκαν, μια την καλοκαιρινή και μια την χειμερινή περίοδο, για 14 και 12 ημέρες αντίστοιχα – όπου κάθε μέρα γινόταν δειγματοληψία σε διαφορετική πάντα αίθουσα – ελήφθησαν οι μετρήσεις σε ηλεκτρονική μορφή από την συσκευή, η οποία λειτουργούσε καθ' όλη την διάρκεια της μέρας και έπαιρνε δειγματοληψία μία φορά ανά λεπτό. Ο αυτόματος δειγματολήπτης *Grimm 1.108* ετίθετο σε λειτουργία κάθε πρωί λίγο πριν την έναρξη του μαθήματος αφού πρώτα είχε σταματήσει η λειτουργία της για ένα μικρό χρονικό διάστημα από την δειγματοληψία της προηγούμενης

ημέρας. Η συσκευή αναγνώριζε σωματίδια διαμέτρων από 0.23 μm έως 20 μm και τα ταξινομούσε σε συγκεντρωτικούς πίνακες ανά διάμετρο. Οι πίνακες αυτοί περιέχουν τις συγκεντρώσεις των σωματιδίων κάθε διακριτής διαμέτρου για κάθε στιγμή δειγματοληψίας (μια δειγματοληψία ανά λεπτό).

Οι Πίνακας 3 και Πίνακας 4 παρουσιάζουν αναλυτικά τις ημέρες δειγματοληψίας της κάθε καμπάνιας καθώς και το ακριβές κτήριο και αίθουσα που είναι τοποθετημένη η συσκευή:

Πίνακας 3 Πρόγραμμα δειγματοληψίας θερμής περιόδου

Καλοκαιρινή καμπάνια		
Ημ/νία	Κτήριο	
26/09/2011		Αίθουσα 2
27/09/2011		Αίθουσα 1
28/09/2011	Δημοτικό	Αίθουσα 3
29/09/2011	Σχολείο 1	Αίθουσα 2
30/09/2011		Αίθουσα 1
3/10/2011		Αίθουσα 2
4/10/2011		Αίθουσα 1
5/10/2011	Νηπιαγωγείο	Αίθουσα 3
6/10/2011		Αίθουσα 2
7/10/2011		Αίθουσα 1
10/10/2011		Αίθουσα 3
12/10/2011	Δημοτικό	Αίθουσα 2
13/10/2011	Σχολείο 3	Αίθουσα 1

Πίνακας 4 Πρόγραμμα δειγματοληψίας ψυχρής περιόδου

Χειμερινή καμπάνια		
Ημ/νία	Κτήριο	
23/1/2012		Αίθουσα 2
24/1/2012		Αίθουσα 1
25/1/2012	Νηπιαγωγείο	Αίθουσα 3
26/1/2012		Αίθουσα 2
27/1/2012		Αίθουσα 1
31/1/2012	Δημοτικό Σχολείο	Αίθουσα 1
1/2/2012	1	Αίθουσα 2
7/2/2012	Δημοτικό Σχολείο	Αίθουσα 1
10/2/2012	2	Αίθουσα 3

Οι τρεις τάξεις σε κάθε σχολείο και οι τρεις αίθουσες του νηπιαγωγείου επιλέχθηκαν βάσει των οδηγιών που δόθηκαν από το πρόγραμμα *SIMPSONIE* σχετικά με την επιλογή

αιθουσών, όπως αυτές αναλύθηκαν στην παράγραφο 4.3. Η μελέτη των εσωτερικών χώρων στις αίθουσες οργανώθηκε ταυτοχρόνως. Δεδομένου ότι ο βασικός σκοπός του προγράμματος *SINPHONIE* ήταν η εκτίμηση της έκθεσης των μαθητών και όχι η μέτρηση των εκπομπών συγκεκριμένων πηγών στον αέρα εσωτερικού χώρου, οι ακόλουθες κατευθυντήριες γραμμές ελήφθησαν υπόψη κατά την επιλογή της συγκεκριμένης τοποθεσίας της δειγματοληψίας μέσα στην αίθουσα (σε συμφωνία με το πρότυπο *ISO 16001 – 1*).

Το κέντρο ενός δωματίου θεωρήθηκε γενικά η καταλληλότερη τοποθεσία για δειγματοληψία. Η τοποθέτηση του δειγματολήπτη έγινε σε ύψος από 1 έως 1.5 μέτρο (περίπου στο ύψος της αναπνοής), ενώ αποφεύχθηκαν τα μέρη κοντά στον ήλιο και κοντά σε συστήματα θέρμανσης όπου υπάρχει αισθητή ξηρασία και κανάλια αερισμού.

Η θέση που επιλέχθηκε για την τοποθέτηση του δειγματολήπτη ήταν σε απόλυτη συμφωνία με τους κανόνες ασφαλείας της αίθουσας και δεν παρεμπόδιζε την ομαλή διεξαγωγή μαθημάτων. Κάθε σχολείο και τάξη αποτέλεσε ως εκ τούτου ένα μοναδικό περιβάλλον εσωτερικού χώρου.

4.5 Πειραματικός εξοπλισμός για τη δειγματοληψία και τη μέτρηση των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων

Ο υπολογισμός των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων μπορεί να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας μεθόδους ενεργητικής και παθητικής δειγματοληψίας, όπως επίσης και αυτόματη καταγραφή δεδομένων.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία συλλέχθηκαν από αυτόματο όργανο μέτρησης συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων της εταιρίας *Grimm*, περιγραφή της αρχής λειτουργίας του οποίου ακολουθεί παρακάτω .

Grimm particle size analyzer Model 1.108

Η συσκευή ανάλυσης μεγέθους σωματιδίων, *Grimm 1.108* η οποία φαίνεται στην [Εικόνα 4.4](#) είναι μια μικρή φορητή συσκευή που χρησιμοποιείται για τη συνεχή μέτρηση των σωματιδίων στον αέρα. Οι ποσότητες των σωματιδίων αναφέρονται σε 2 βασικά μεγέθη:

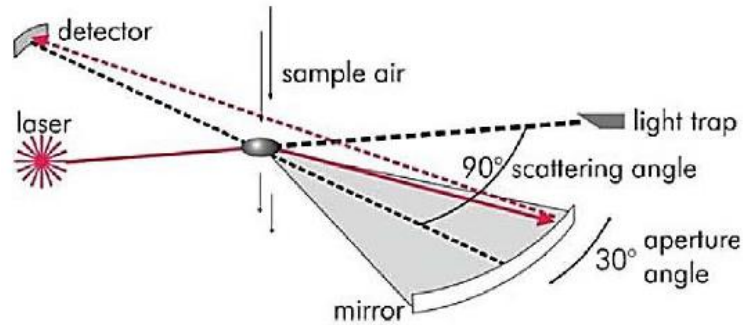
- Αριθμός σωματιδίων/λίτρο αέρα ή
- Μάζα σωματιδίων (μg)/λίτρο αέρα.

Το μοντέλο 1.108 χρησιμοποιεί την τεχνολογία διάχυσης φωτός για να προσδιοριστεί ο αριθμός των σωματιδίων, όπου ένα λέιζερ – ημιαγωγός λειτουργεί ως πηγή φωτός. Το σήμα, το οποίο διαχέεται από το σωματίδιο που περνάει μέσα από την ακτίνα λέιζερ, συλλέγεται υπό γωνία 90° από ένα κάτοπτρο και μεταφέρεται στη δίοδο – υποδοχέα. Έπειτα, το σήμα της διόδου, αφού ενισχυθεί, περνά από έναν πολυκάναλο ταξινομητή μεγέθους. Στη συνέχεια, ένας αναλυτής ύψους παλμού, ταξινομεί το σήμα που εκπέμπεται σε κάθε κανάλι.

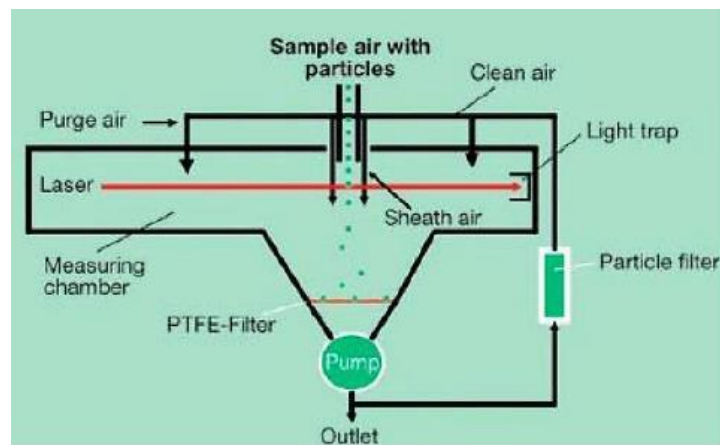


Εικόνα 4.4 Grimm 1.108

Ο αέρας του περιβάλλοντος προς ανάλυση, εισέρχεται με ρόφηση στη συσκευή, μέσω μιας εσωτερικής αντλίας, με ρυθμό 1,2 λίτρα/λεπτό. Το δείγμα περνάει από το θάλαμο μέτρησης με το λέιζερ, και συλλέγεται σε ένα φίλτρο πολυτετραφθοροαιθυλενίου (PTFE), 47 mm, το οποίο στη συνέχεια μπορεί να αναλυθεί βαρυμετρικά, για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη μέτρηση με λέιζερ (Εικόνα 4.5 και Εικόνα 4.6). Επιπλέον, μπορεί να γίνει χημική ανάλυση του δείγματος που επικάθισε στο φίλτρο. Η αντλία, επίσης, παράγει τον απαραίτητο αέρα, ο οποίος, φιλτράρεται, προκειμένου να καθαριστεί ο οπτικός θάλαμος, έτσι ώστε να διασφαλιστεί ότι καμία ποσότητα σωματιδιακής ύλης δεν έρχεται σε επαφή με τη συσκευή λέιζερ. Ο καθαρός αέρας που παράγεται χρησιμοποιείται και για τον έλεγχο της μηδενικής τιμής – αναφοράς, κατά την αυτόματη βαθμονόμηση του οργάνου.



Εικόνα 4.5 Οπτικό σύστημα μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων από το Grimm 1.108



Εικόνα 4.6 Ο θάλαμος μέτρησης του Grimm 1.108

Κατά την εκκίνηση κάθε μέτρησης, το όργανο πραγματοποιεί μια διαδικασία αυτοελέγχου, η οποία διαρκεί για περίπου 30 δευτερόλεπτα. Η πραγματική μέτρηση ξεκινά όταν η οθόνη εμφανίσει την τιμή της πρώτης μέτρησης. Τα επόμενα αποτελέσματα εμφανίζονται κάθε 6 δευτερόλεπτα. Τα δεδομένα πραγματικού χρόνου της συγκέντρωσης σωματιδιακής ύλης μεταφέρονται κάθε λεπτό στην αφαιρούμενη κάρτα μνήμης της συσκευής, μπορούν να μεταφερθούν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για περαιτέρω ανάλυση και είναι διαθέσιμα ανά διαστήματα 6 (*fast mode*) ή 60 δευτερολέπτων (*normal mode*).

Η συσκευή μπορεί να μετρήσει σωματίδια μεγέθους από $0,23 \mu m$ μέχρι $20 \mu m$ σε 14 κανάλια μεγέθους (*size channels*). Έχει εύρος μέτρησης σωματιδίων 1 έως 2.000.000 μετρήσεις ανά λίτρο αέρα, εύρος μέζας έως $100 mg$ ανά λίτρο αέρα και ευαισθησία 1 σωματίδιο ανά λίτρο αέρα. Ζυγίζει $2,4 kg$ και έχει διαστάσεις $24 \times 24 \times 6 cm$.

5 Αποτελέσματα μετρήσεων

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά μέρος των μετρήσεων του προγράμματος *SINPHONIE* οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν ως στοιχεία εισόδου για το αριθμητικό μοντέλο μετά από κατάλληλη επεξεργασία που περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο. Πρόκειται για τις μετρήσεις που έγιναν από τον αυτόματο δειγματολήπτη *Grimm 1.108*, ο οποίος μέτρησε τον αριθμό σωματιδίων διαφορετικών διαμέτρων στις αίθουσες των δύο σχολείων και του ενός νηπιαγωγείου.

Μετά το πέρας της δειγματοληψίας κάθε καμπάνιας, τα δεδομένα συλλέγονταν σε συγκεντρωτικούς πίνακες. Η μονάδα μέτρησης των δεδομένων, δηλαδή της συγκέντρωσης των σωματιδίων είναι σε *σωματίδια ανά κυβικό εκατοστό* ($\# particles/cm^3$). Από τους πίνακες αυτούς δημιουργήθηκαν:

- διαγράμματα χρονοσειρών (συγκέντρωση σωματιδίων συναρτήσει του χρόνου) είτε για ολόκληρη την ημέρα είτε για την χρονική περίοδο που τα παιδιά βρίσκονται μέσα στην αίθουσα διδασκαλίας,
- στατιστικά διαγράμματα μέσω τιμών και τυπικών αποκλίσεων της συγκέντρωσης των σωματιδίων κάθε διακριτής διαμέτρου και
- τρισδιάστατα διαγράμματα που απεικονίζουν τις συγκεντρώσεις των σωματιδίων συναρτήσει των διαφορετικών διαμέτρων και του χρόνου καθ' όλη την διάρκεια του μαθήματος στην αίθουσα διδασκαλίας.

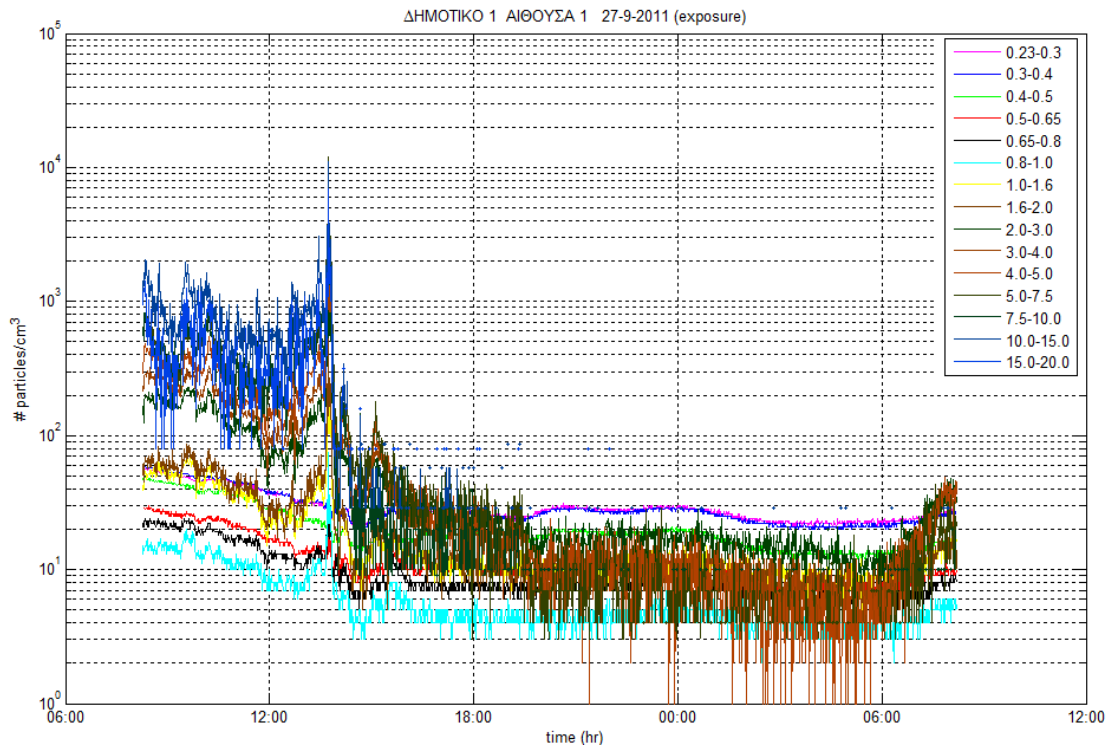
Αντιπροσωπευτικά διαγράμματα από κάθε περίπτωση παρατίθενται στη συνέχεια.

5.1 Διαγράμματα χρονοσειρών

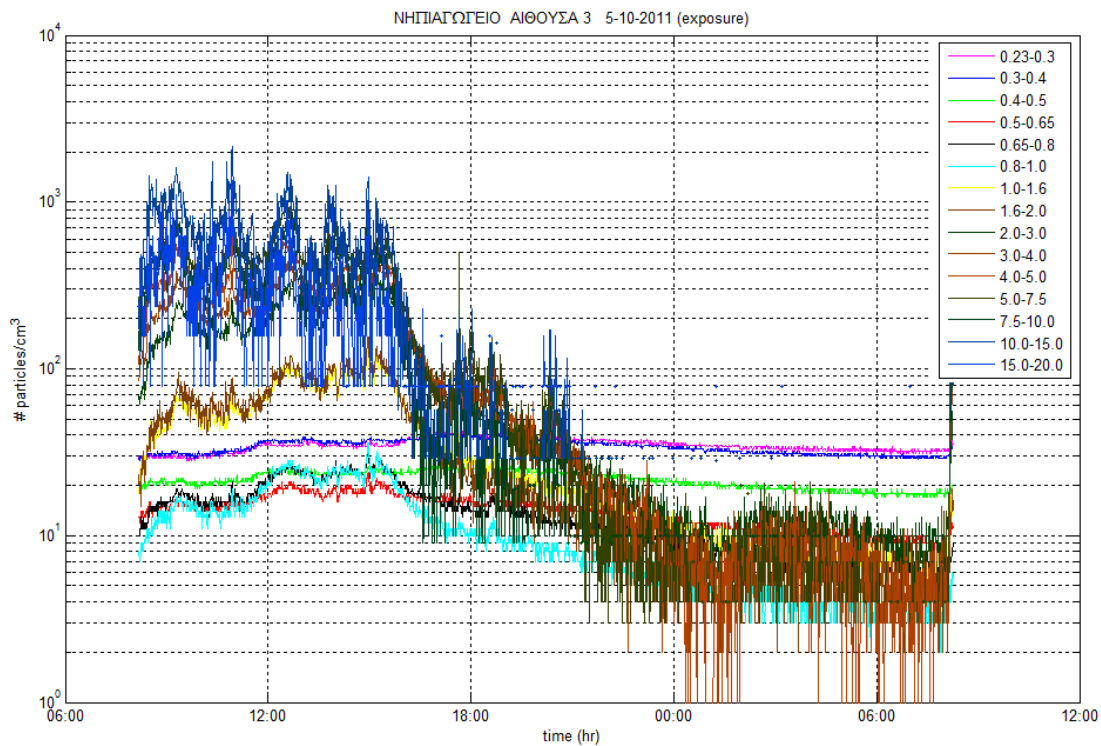
Θερμή περίοδος

Στα επόμενα διαγράμματα δίνεται η χρονική διακύμανση της συγκέντρωσης των σωματιδίων (στα 15 κανάλια μεγέθους) κατά τη διάρκεια μίας ημέρας στο Δημοτικό σχολείο 1, το Δημοτικό σχολείο 2 και το νηπιαγωγείο για την θερμή περίοδο. Και στις τρεις περιπτώσεις παρατηρούμε συνεχή διακύμανση της συγκέντρωσης κυρίως των σωματιδίων μεγαλύτερων

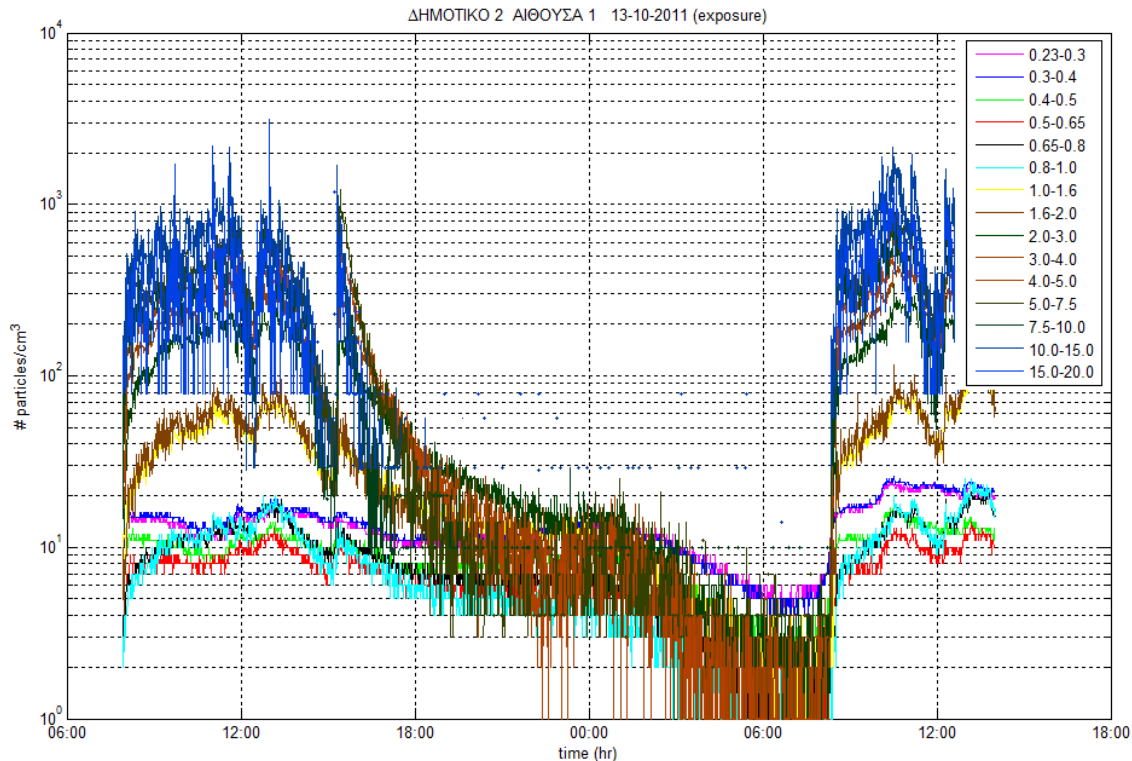
διαμέτρων γεγονός που οφείλεται στην κινητικότητα των μαθητών κατά την είσοδο και έξοδο αυτών από την αίθουσα (επαναίωση σκόνης).



Εικόνα 5.1 Διάγραμμα χρονοσειράς ολόκληρης ημέρας – Δημοτικό Σχολείο 1, Θερμή περίοδος



Εικόνα 5.2 Διάγραμμα χρονοσειράς ολόκληρης ημέρας – Νηπιαγωγείο, Θερμή περίοδος



Εικόνα 5.3 Διάγραμμα χρονοσειράς ολόκληρης ημέρας – Δημοτικό Σχολείο 2, Θερμή περίοδος

Χαρακτηριστικό παράδειγμα της επαναιώρησης της σκόνης (κυρίως μεγαλύτερης διαμέτρου σωματίδια) αποτελεί η απότομη αύξηση της συγκέντρωσης των σωματιδίων την στιγμή που πρώτη φορά εισέρχονται οι μαθητές μέσα στην αίθουσα (Εικόνα 5.1). Τις προηγούμενες ώρες, κατά την διάρκεια της νύχτας όπου κανείς δεν βρίσκεται μέσα στην αίθουσα, η συγκέντρωση των σωματιδίων μειώνεται με αργό ρυθμό.

Συγκρίνοντας τα σχολεία, στο δεύτερο δημοτικό σχολείο και στο νηπιαγωγείο παρατηρούνται διαφορές σε σχέση με το άλλο. Αρχικά ο αριθμός των μικρότερων σωματιδίων είναι μικρότερος από τα άλλα δύο σχολεία. Αυτό οφείλεται στο ότι το δημοτικό σχολείο αυτό βρίσκεται έξω από το κέντρο της πόλης και σε περιοχή που η κίνηση οχημάτων είναι πολύ μικρή, συνεπώς τα πολύ μικρά σωματίδια που είναι συνήθως προϊόντα καύσης έχουν αρκετά μικρότερη συγκέντρωση υποβάθρου στην περιοχή που βρίσκεται αυτό το σχολείο.

Κατά τη διάρκεια των ωρών που διεξάγονται τα μαθήματα παρατηρούνται μικρές αυξομειώσεις της συγκέντρωσης των σωματιδίων που οφείλονται στην κινητικότητα των μαθητών κατά την ώρα του διαλείμματος. Επιπλέον η μεγάλη και απότομη αύξηση στο τέλος του μαθήματος πιθανόν να οφείλεται στον καθαρισμό της αίθουσας και την επαναιώρηση της

σκόνης από τις επιφάνειες. Για τον λόγο αυτό παρατηρούμε τόσο απότομες μεταβολές στις μετρήσεις κατά την διάρκεια του καθαρισμού της αίθουσας.

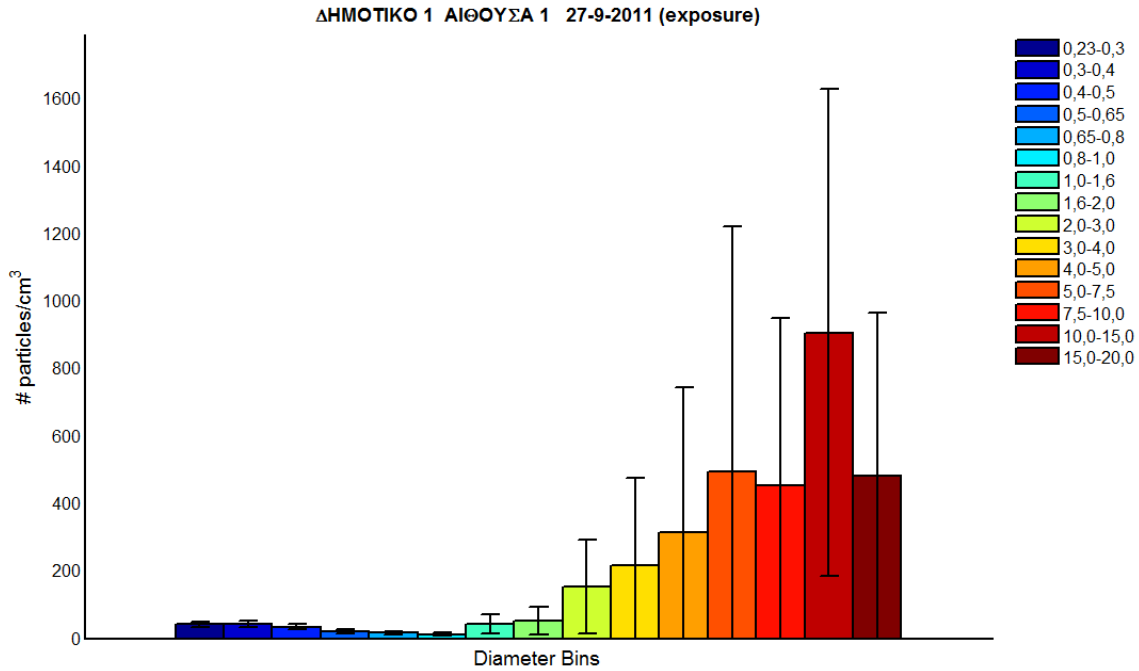
Για την περίπτωση του νηπιαγωγείου, παρατηρούνται συνεχείς διακυμάνσεις, κυρίως των μεγαλύτερων σωματιδίων οι οποίες είναι πιθανό να οφείλονται στην ύπαρξη της συνθετικής μοκέτας στο δάπεδο. Με την συνεχή κίνηση των παιδιών στον χώρο, αναστηκώνεται μεγαλύτερη ποσότητα σωματιδίων σε σχέση με την περίπτωση του γυμνού δαπέδου. Επιπλέον, το μεσημέρι η αίθουσα αυτή χρησιμοποιείται ως κουζίνα. Είναι γνωστό ότι δραστηριότητες που σχετίζονται με την μαγειρική προκαλούν την αύξηση των πολύ μικρών σωματιδίων μέσα στο χώρο. Πράγματι φαίνεται στο διάγραμμα ότι το μεσημέρι παρατηρούνται διάφορες αυξομειώσεις στις τιμές των πολύ μικρών σωματιδίων που δεν παρατηρούνταν την υπόλοιπη ημέρα. Μετά το πέρας της λειτουργίας του νηπιαγωγείου, παρατηρείται πτώση της συγκέντρωσης, κυρίως των μεγαλύτερων σωματιδίων (Εικόνα 5.2).

Τέλος, απότομες πτώσεις της συγκέντρωσης των σωματιδίων παρατηρήθηκαν στην περίπτωση του ανοίγματος των παραθύρων της διδακτικής αίθουσας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Εικόνα 5.3 όπου παρατηρείται αντίστοιχη πτώση στις 12 το μεσημέρι όπου και ανοίχτηκαν όλα τα παράθυρα για να αεριστεί η αίθουσα κατά το διάλειμμα. Παράλληλα, την ίδια χρονική περίοδο, παρατηρείται μία σταθερότητα στις τιμές των πολύ μικρών σωματιδίων. Τα αντίστοιχα διαγράμματα ομαδοποιημένων καναλιών μεγέθους (0.23-0.8, 0.8-4.0 και 4,0-20 μ m) δίνονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.

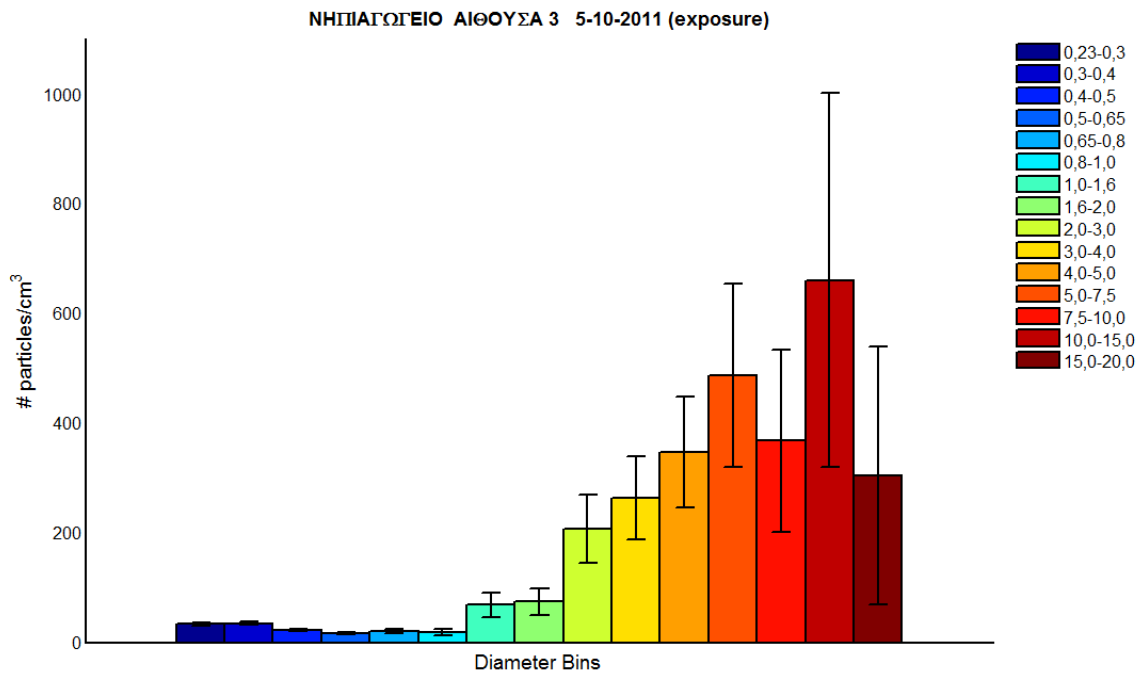
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις των συγκεντρώσεων των σωματιδίων κάθε διακριτής διαμέτρου για την χρονική διάρκεια που τα παιδιά βρίσκονταν μέσα στις αίθουσες διδασκαλίας. Όπως παρατηρείται (Εικόνα 5.4 – Εικόνα 5.6), η συγκέντρωση των μεγαλύτερων σωματιδίων υπερτερεί αυτής των μικρότερης διαμέτρου. Το εύρημα αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η κύρια πηγή σωματιδίων είναι η επαναιώρηση της σκόνης που έχει σχετιστεί στην βιβλιογραφία με εκπομπή σωματιδίων μεγάλης διαμέτρου (Luoma and Batterman, 2001).

Τα τρισδιάστατα διαγράμματα που παρουσιάζονται (Εικόνα 5.7 – Εικόνα 5.9), τα οποία απεικονίζουν την διακύμανση της συγκέντρωσης των σωματιδίων στα διάφορα κανάλια μεγέθους με το πέρας του χρόνου. Αυξομείωση της συγκέντρωσης των μεγαλύτερων καναλιών

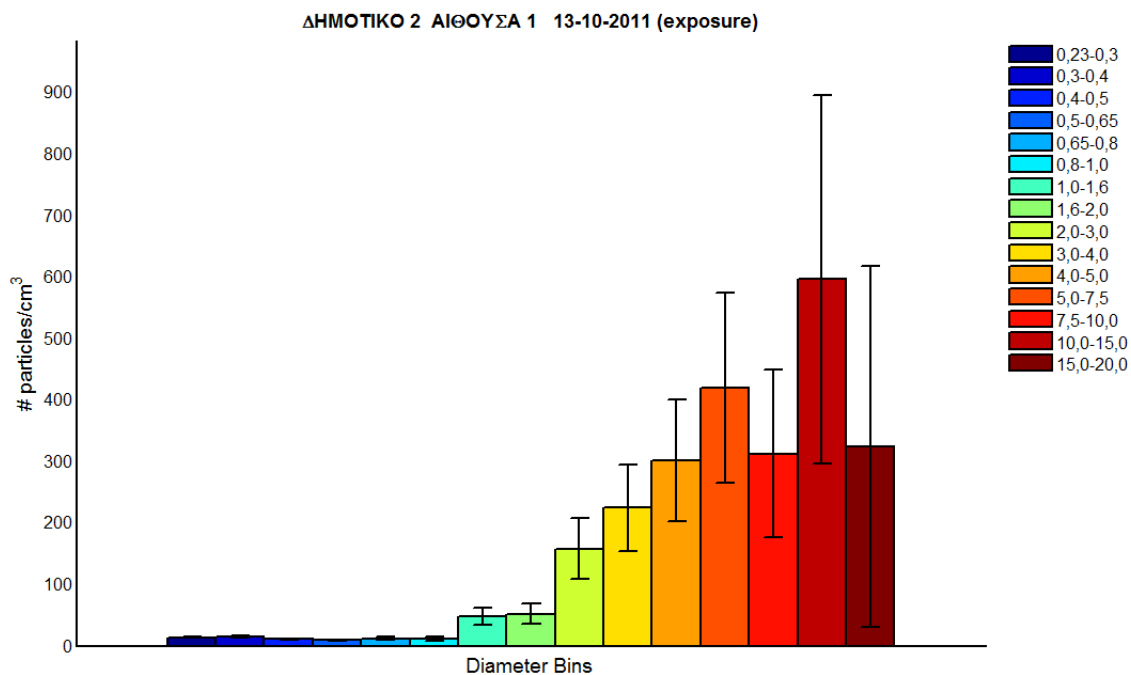
παρατηρείται κατά την διάρκεια της ημέρας καθώς η πηγή της επαναιώρησης εμφανίζεται καθ' όλη τη διάρκεια των διδακτικών ωρών (είσοδος-έξοδος μαθητών, παιχνίδι, άνοιγμα παραθύρων κλπ).



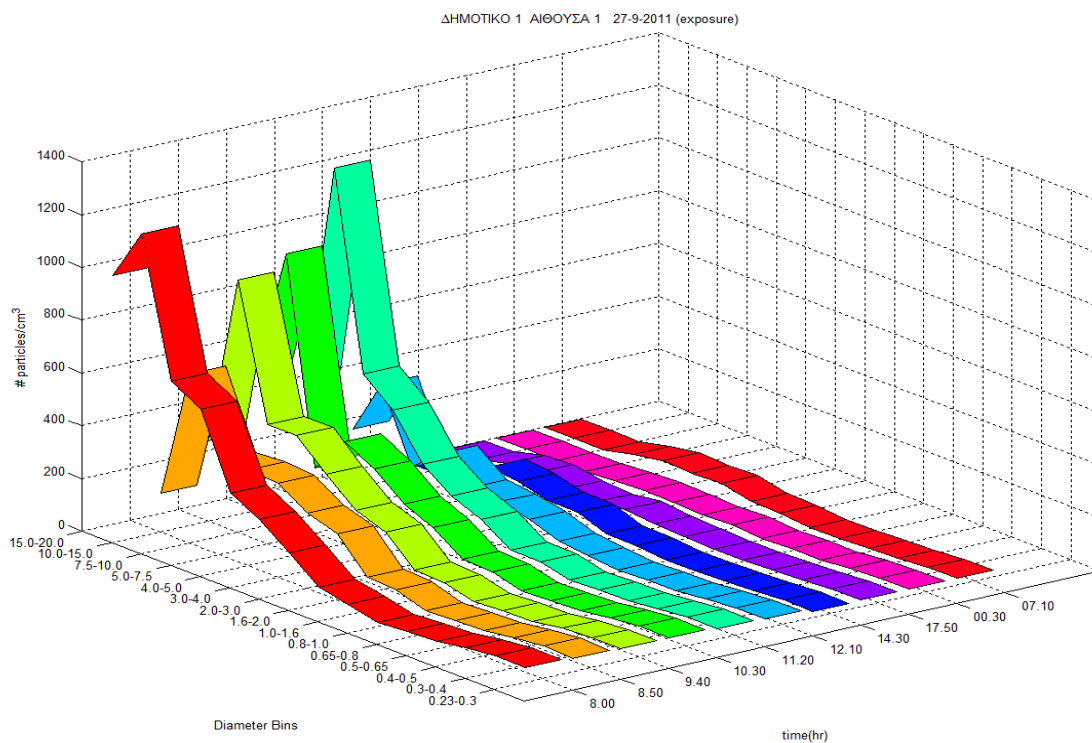
Εικόνα 5.4 Διάγραμμα μέσων τιμών και τυπικών αποκλίσεων ανά κανάλι μεγέθους – Δημοτικό Σχολείο 1, Θερμή περίοδος



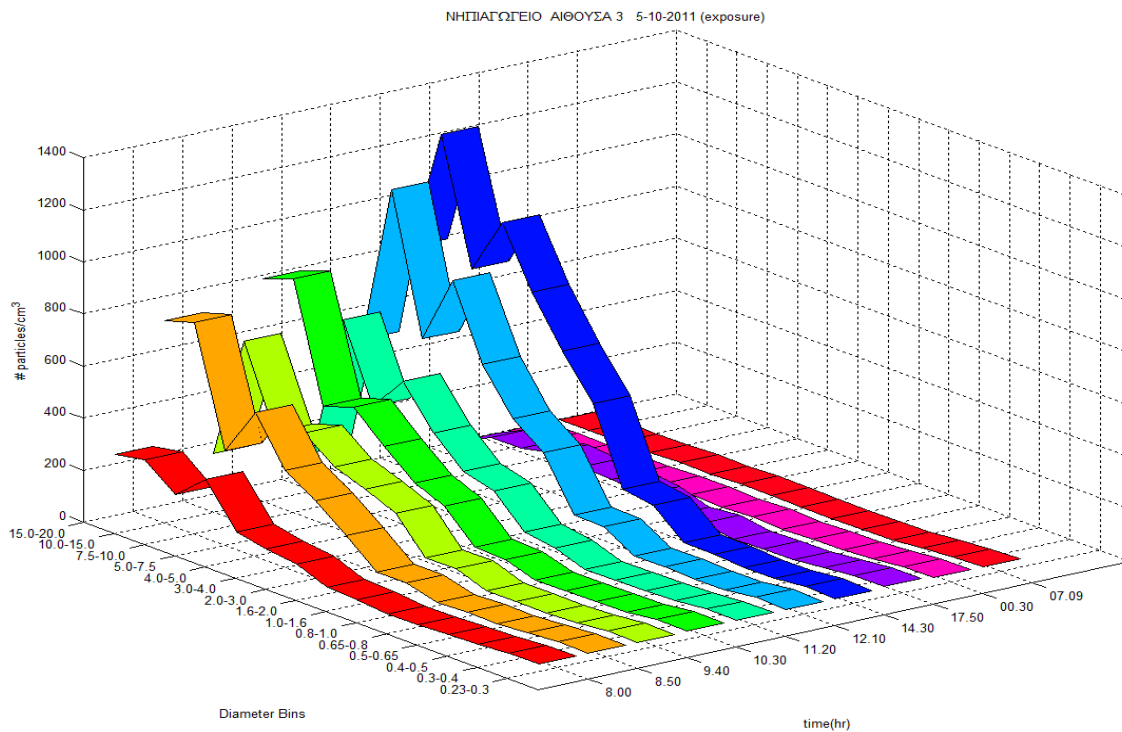
Εικόνα 5.5 Διάγραμμα μέσων τιμών και τυπικών αποκλίσεων ανά κανάλι μεγέθους – Νηπιαγωγείο, Θερμή περίοδος



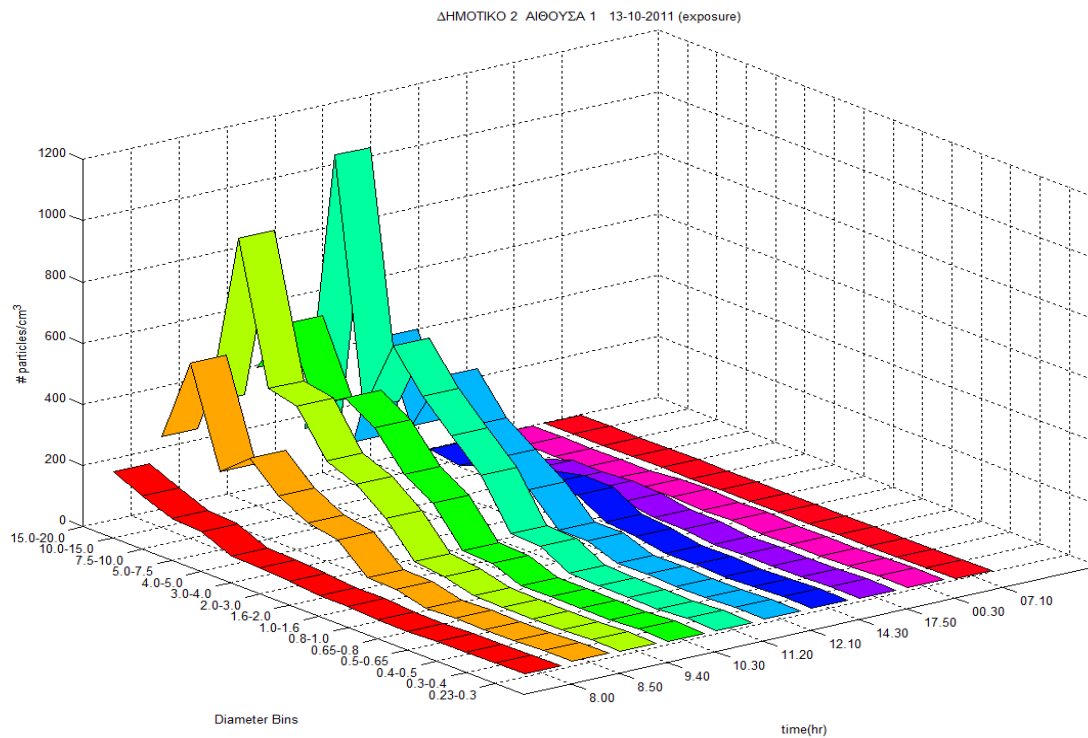
Εικόνα 5.6 Διάγραμμα μέσων τιμών και τυπικών αποκλίσεων ανά κανάλι μεγέθους – Δημοτικό Σχολείο 2, Θερμή περίοδος



Εικόνα 5.7 Τρισδιάστατο διάγραμμα συγκεντρώσεων – Δημοτικό Σχολείο 1, Θερμή περίοδος



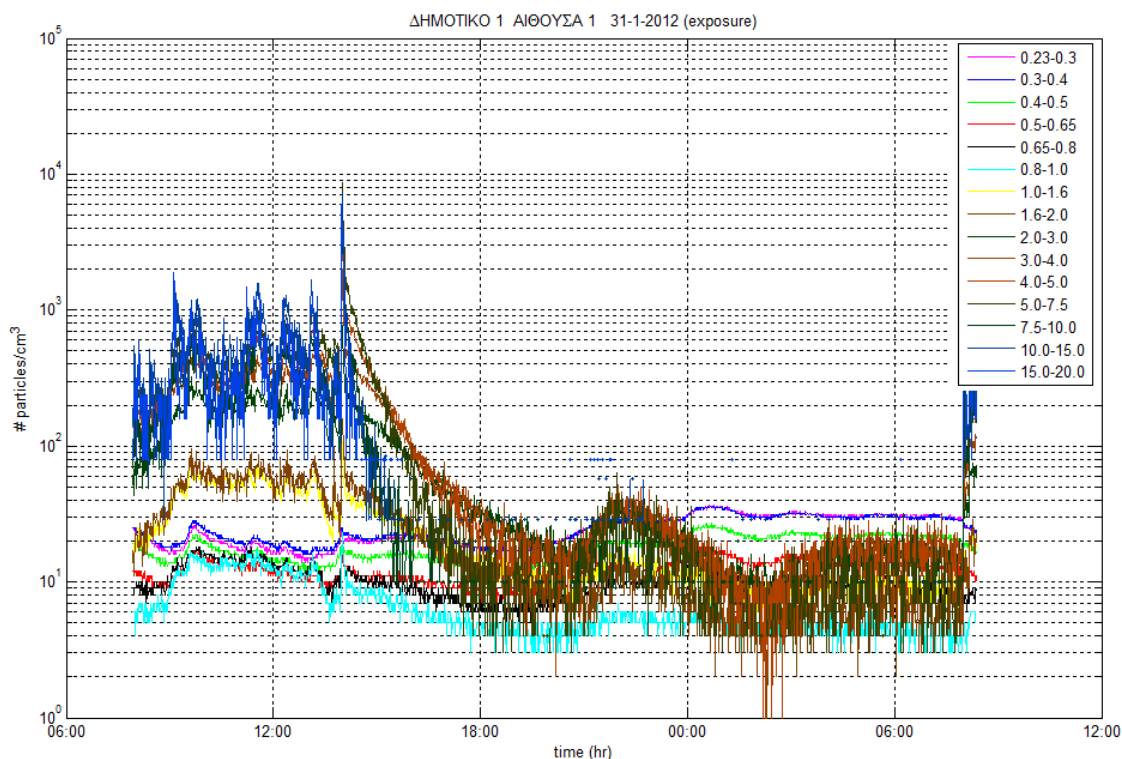
Εικόνα 5.8 Τρισδιάστατο διάγραμμα συγκεντρώσεων – Νηπιαγωγείο, Θερμή περίοδος



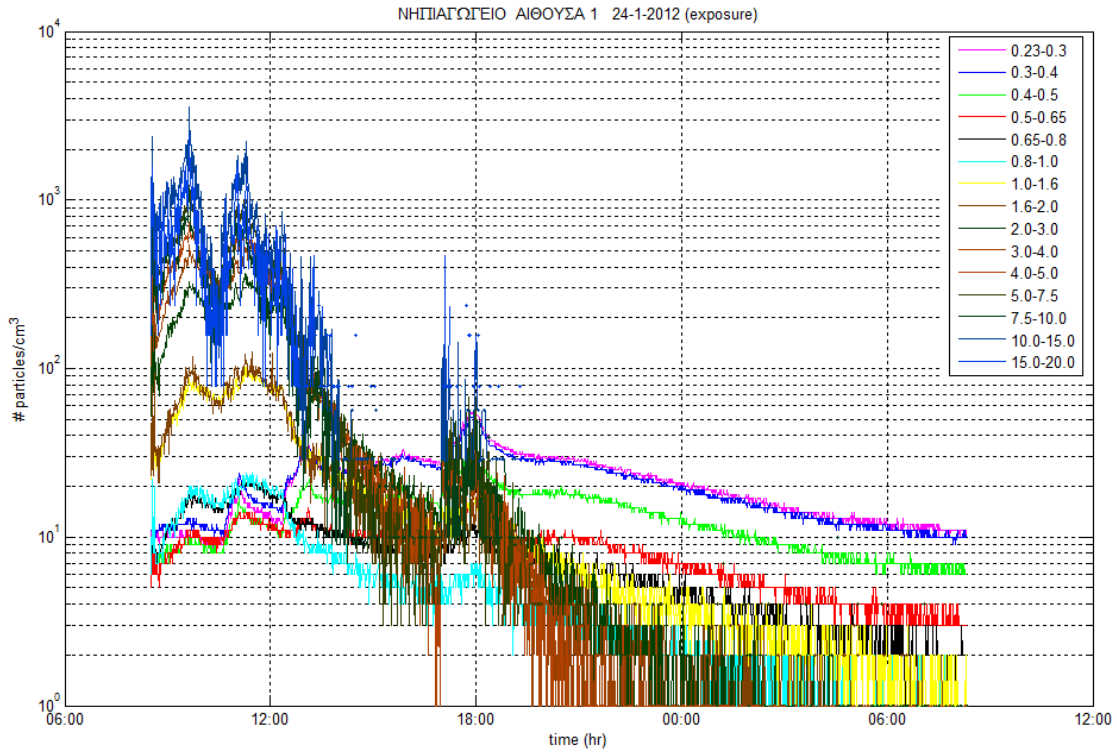
Εικόνα 5.9 Τρισδιάστατο διάγραμμα συγκεντρώσεων – Δημοτικό Σχολείο 2, Θερμή περίοδος

Ψυχρή περίοδος

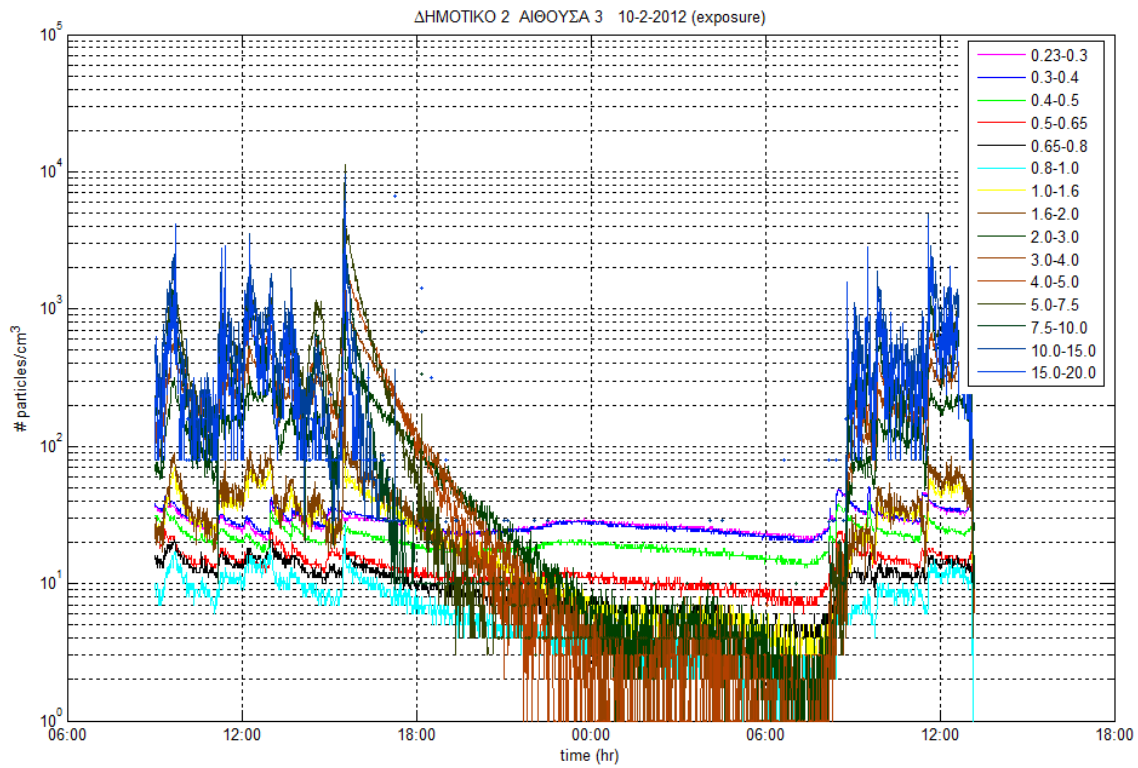
Στις Εικόνα 5.10 – Εικόνα 5.12 δίνεται η χρονική διακύμανση της συγκέντρωσης των σωματιδίων (στα 15 κανάλια μεγέθους) κατά τη διάρκεια μίας ημέρας στο Δημοτικό σχολείο 1, το Δημοτικό σχολείο 2 και το νηπιαγωγείο για την ψυχρή περίοδο. Και σε αυτή την περίπτωση, παρατηρούμε συνεχή διακύμανση της συγκέντρωσης κυρίως των σωματιδίων μεγαλύτερων διαμέτρων γεγονός που οφείλεται στην κινητικότητα των μαθητών κατά την είσοδο και έξοδο αυτών από την αίθουσα (επαναιώρηση σκόνης).



Εικόνα 5.10 Διάγραμμα χρονοσειράς ολόκληρης ημέρας – Δημοτικό Σχολείο 1, Ψυχρή περίοδος



Εικόνα 5.11 Διάγραμμα χρονοσειράς ολόκληρης ημέρας – Νηπιαγωγείο, Ψυχρή περίοδος

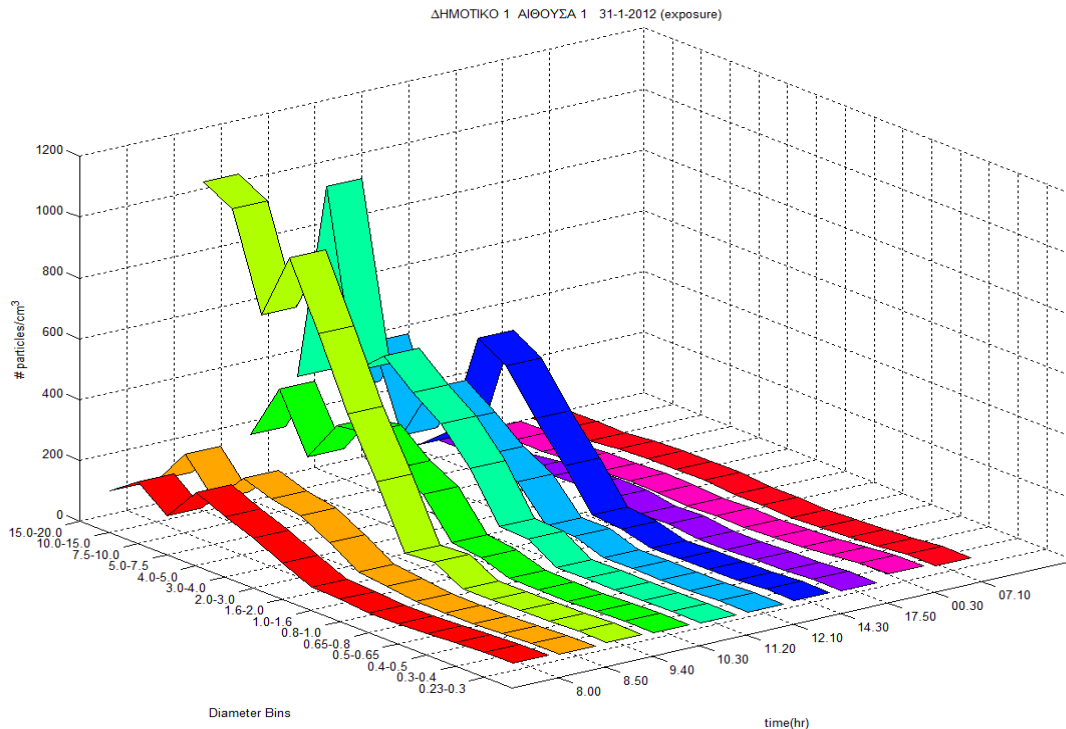


Εικόνα 5.12 Διάγραμμα χρονοσειράς ολόκληρης ημέρας – Δημοτικό Σχολείο 2, Ψυχρή περίοδος

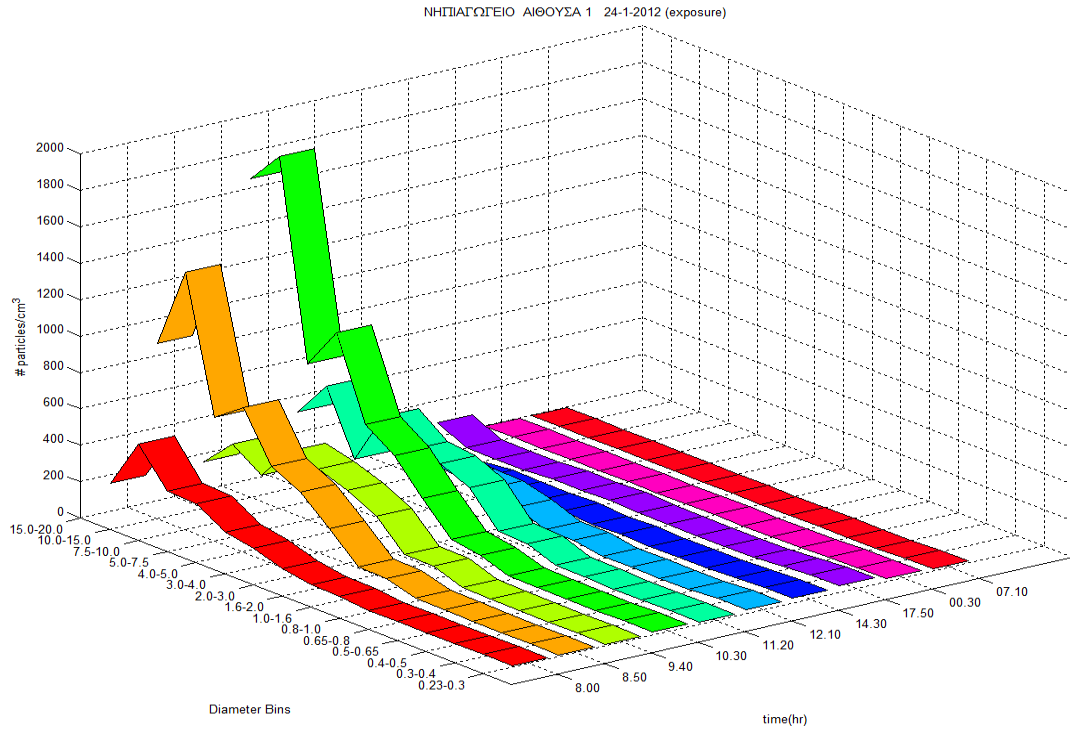
Τα αντίστοιχα διαγράμματα ομαδοποιημένων καναλιών μεγέθους (0.23-0.8, 0.8-4.0 και 4,0-20 μm) και μέσων τιμών - τυπικών αποκλίσεων δίνονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.

Συγκρίνοντας την εικόνα της διακύμανσης της συγκέντρωσης των σωματιδίων κατά τη διάρκεια των δύο περιόδων, παρατηρούνται εντονότερες διακυμάνσεις στα μικρότερα σωματίδια κατά την ψυχρή περίοδο. Αυτό οφείλεται πιθανόν στο ότι τα παιδιά κατά την χειμερινή περίοδο μένουν μέσα στην αίθουσα καθ' όλη την διάρκεια των μαθημάτων και επιπλέον λόγω καιρικών συνθηκών, τα παράθυρα της αίθουσας ήταν συνεχώς κλειστά.

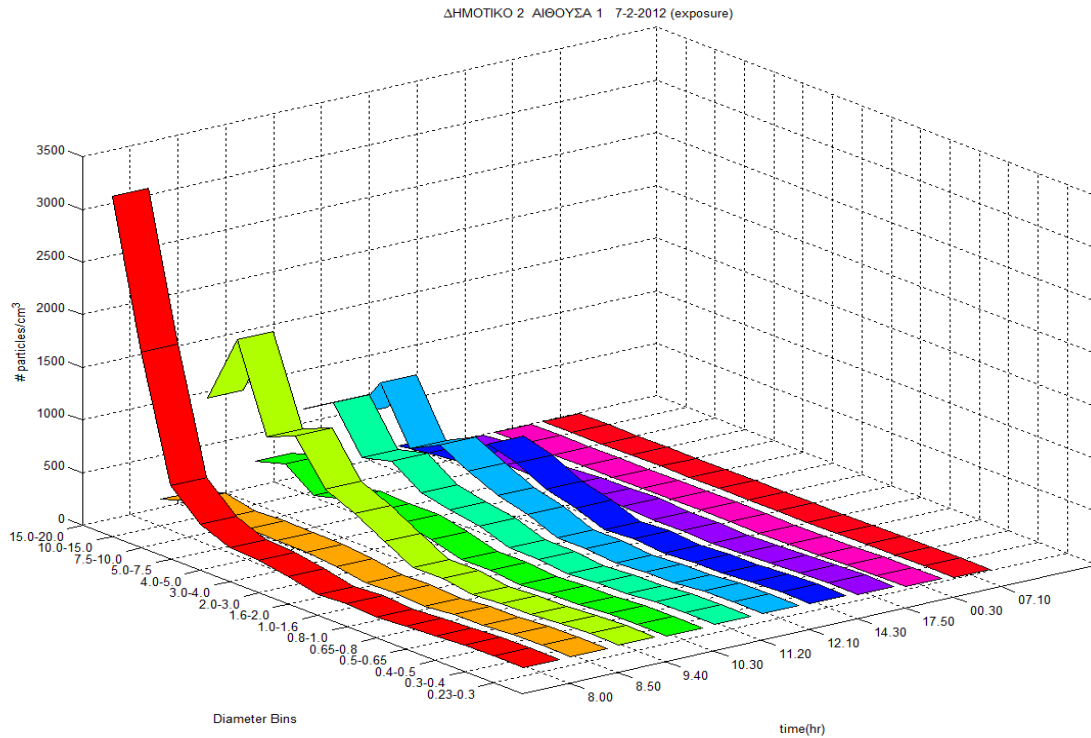
Στα τρισδιάστατα διαγράμματα (Εικόνα 5.13 – Εικόνα 5.15) παρουσιάζεται η διακύμανση της συγκέντρωσης των σωματιδίων στα διάφορα κανάλια μεγέθους με το πέρας του χρόνου. Αυξομείωση της συγκέντρωσης των μεγαλύτερων καναλιών παρατηρείται κατά την διάρκεια της ημέρας καθώς η πηγή της επαναιώρησης εμφανίζεται καθ' όλη τη διάρκεια των διδακτικών ωρών (είσοδος-έξοδος μαθητών, παιχνίδι, άνοιγμα παραθύρων κλπ).



Εικόνα 5.13 Τρισδιάστατο διάγραμμα συγκεντρώσεων – Δημοτικό Σχολείο 1, Ψυχρή περίοδος



Εικόνα 5.14 Τρισδιάστατο διάγραμμα συγκεντρώσεων – Νηπιαγωγείο, Ψυχρή περίοδος



Εικόνα 5.15 Τρισδιάστατο διάγραμμα συγκεντρώσεων – Δημοτικό Σχολείο 2, Ψυχρή περίοδος

Συνοψίζοντας, από τις μετρήσεις των αιωρούμενων σωματιδίων κατά τις δύο περιόδους δειγματοληψίας εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Σε όλα τα σχολεία ανεξαρτήτως εποχής η συγκέντρωση των σωματιδίων μεγαλύτερων διαμέτρων είναι περίπου μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή των μικρότερων σωματιδίων.
- Το κύριο γνώρισμα της συμπεριφοράς των μεγαλύτερων σωματιδίων είναι ότι εναποτίθενται πολύ γρηγορότερα (λόγω της μάζας τους) στις επιφάνειες της αίθουσας με αποτέλεσμα η συγκέντρωσή τους στον αέρα να αυξομειώνεται συνέχεια κατά την διάρκεια των μαθημάτων λόγω επαναιώρησης από τις δραστηριότητες των μαθητών ή την δραστηριότητα του καθαρισμού των αιθουσών. Η συγκέντρωση των μικρότερης διαμέτρου σωματιδίων (κυρίως <math><1\mu\text{m}</math>), δείχνει να μην επηρεάζεται σημαντικά από την κινητικότητα των μαθητών στην αίθουσα (πηγή επαναιώρησης) και φθίνει με το πέρασ του χρόνου, αφού έχει λήξει το διάστημα που οι αίθουσες είναι κατειλημμένες. Ανάμεσα στα τρία σχολεία η μόνη διαφορά που παρατηρήθηκε ήταν ότι οι συγκεντρώσεις των μικρότερων σωματιδίων στο δεύτερο δημοτικό σχολείο ήταν μικρότερες σε σχέση με τα άλλα δύο, γεγονός που οφείλεται στο ότι το σχολείο αυτό βρίσκεται έξω από το κέντρο της πόλης, με βλάστηση και ελάχιστη κίνηση οχημάτων.
- Οι διακυμάνσεις των μικρότερων σωματιδίων κατά την ψυχρή περίοδο παραμένουν το ίδιο σταθερές με εκείνες της θερμής περιόδου. Τα μικρότερα σωματίδια λόγω του βάρους τους δεν έχουν την ίδια συμπεριφορά με τα μεγαλύτερα σωματίδια. Η κύρια πηγή επαναιώρησης, δηλαδή η κινητικότητα των μαθητών στην αίθουσα, δεν επηρεάζει τις μετρούμενες συγκεντρώσεις των μικρότερων σωματιδίων. Η αιώρησή τους συνεχίζεται μετά το πέρασ των ωρών διδασκαλίας και η συγκέντρωσή τους φθίνει με σημαντικά μικρότερο ρυθμό σε σχέση με εκείνον των μεγαλύτερων σωματιδίων. Τυχαίες διακυμάνσεις που παρατηρούνται κατά την διάρκεια της ημέρας στα μικρότερα σωματίδια

πιθανόν οφείλονται στην χρήση χημικών για τον καθαρισμό της αίθουσας όπως η χλωρίνη και άλλα καθαριστικά με βάση την αμμωνία.

6 Υπολογιστικό μοντέλο προσδιορισμού δόσης στο αναπνευστικό σύστημα

Το αριθμητικό μοντέλο το οποίο χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την εργασία για την επεξεργασία των δεδομένων της δειγματοληψίας δημιουργήθηκε στα πλαίσια του διδακτορικού της **Μητσάκου Χριστίνας** *Ανάπτυξη αλγορίθμου για τον υπολογισμό της δυναμικής των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα.*

6.1 Μηχανισμοί εναπόθεσης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλύσουμε τον κάθε μηχανισμό εναπόθεσης προσδιορίζοντας την ταχύτητα εναπόθεσης στην ροή σε κάθε περίπτωση. Τα μοντέλα αναπνευστικής εναπόθεσης κατά *Euler* που έχουν αναπτυχθεί έως σήμερα περιγράφουν τον κάθε μηχανισμό με τη βοήθεια της ικανότητας εναπόθεσης σε μια γενιά – το κλάσμα της συγκέντρωσης που δεν εγκαταλείπει τη γενιά προς τη συγκέντρωση που εισέρχεται στη γενιά. Έτσι με τον υπολογισμό της ταχύτητας εναπόθεσης μπορεί να προσδιοριστεί η εναπόθεση σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος της αναπνευστικής οδού και όχι μόνο στο τέλος κάθε γενιάς.

Θεωρούμε την απλή περίπτωση μεταφοράς – εναπόθεσης (όλες οι άλλες διεργασίες αγνοούνται) σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης. Η γενική εξίσωση (6.1) γίνεται:

$$-\frac{d}{dx}(A_A u n) - V_D \Gamma n = 0 \quad (6.1)$$

Επιλύοντας τη διαφορική εξίσωση ως προς τη συγκέντρωση κατά αριθμό και ολοκληρώνοντας σε διάστημα L (π.χ. κατά μήκος ενός αεραγωγού), προκύπτει ότι η ικανότητα εναπόθεσης P_D είναι:

$$P_D = 1 - \exp\left(-\frac{V_D \Gamma L}{A_A u}\right) \quad (6.2)$$

Αντικαθιστώντας για κάθε μηχανισμό εναπόθεσης την ταχύτητα εναπόθεσης V_D και την αντίστοιχη περίμετρο του αεραγωγού Γ , υπολογίζεται η εναπόθεση η οφειλόμενη στο

συγκεκριμένο μηχανισμό χωρίς επίδραση από τις άλλες διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τη ροή του αερολύματος.

Πίνακας 5 Διαστάσεις του μορφολογικού μοντέλου (θεωρείται μέσος πνεύμονας ενήλικου άνδρα FRC=4800 ml)

Γενιά j	Αριθμός αεραγωγών ανά γενιά v_j	Διάμετρος d_{A_j} (cm)	Μήκος L_j (cm)	Γωνία βαρύτητας θ_j (deg)	Γωνία διχοτόμησης ϕ_j (deg)
0	1	1.8	12.0	0	0
1	2	1.22	4.76	20	33
2	4	0.83	1.90	31	34
3	8	0.56	0.76	43	22
4	16	0.45	1.27	39	20
5	32	0.35	1.07	39	18
6	64	0.28	0.90	40	19
7	128	0.23	0.76	36	22
8	256	0.186	0.64	39	28
9	512	0.154	0.54	45	22
10	1024	0.130	0.46	43	33
11	2048	0.109	0.39	45	34
12	4096	0.095	0.33	45	37
13	8192	0.082	0.27	60	39
14	16384	0.074	0.23	60	39
15	32768	0.066	0.20	60	51
16	65536	0.060	0.165	60	45
17	131072	0.054	0.141	60	45
18	262144	0.050	0.117	60	45
19	524288	0.047	0.099	60	45
20	1048576	0.045	0.083	60	45
21	2097152	0.043	0.070	60	45
22	4194304	0.041	0.059	60	45
23	8388608	0.041	0.050	60	45

6.1.1 Βαρυτική καθίζηση

Εάν θεωρηθεί ότι στο σωματίδιο δρα μόνο η δύναμη της βαρύτητας, η ταχύτητα εναπόθεσης θα είναι:

$$V_{D(sed)} = u_s \sin \theta \quad (6.3)$$

όπου η τελική ταχύτητα u_s δίνεται από την Εξίσωση (3.11). Η τελική ταχύτητα καθίζησης θεωρείται καλή προσέγγιση της ταχύτητας των σωματιδίων λόγω βαρυτικής καθίζησης, καθώς ο χρόνος προσαρμογής ταχύτητας των σωματιδίων με διαμέτρους από 0.01 έως 10 μm είναι πολύ μικρός (10^{-8} έως 10^{-4} s). Η γωνία βαρύτητας θ δίνεται από τα χαρακτηριστικά του μορφολογικού μοντέλου (Πίνακας 5). Ο όρος $\sin \theta$ περιλαμβάνεται στην εξίσωση (6.3) ώστε η ροή εναπόθεσης να ανάγεται στην προβολή της εσωτερικής επιφάνειας του αεραγωγού στο

οριζόντιο επίπεδο. Συνεπώς, η ικανότητα εναπόθεσης λόγω βαρυτικής καθίζησης προκύπτει με τη βοήθεια της εξίσωσης (6.2) ότι θα είναι:

$$P_{D (sed)} = 1 - \exp\left(-\frac{16\kappa}{3\pi}\right) \quad (6.4)$$

όπου η παράμετρος κ ορίζεται ως $\kappa = (3u_s L / 4ud) \sin \theta$. Οι Rich, J. (1972) και Wang C. S. (1975) μελέτησαν την ικανότητα εναπόθεσης σωματιδίων σε κυλινδρικούς αγωγούς στην περίπτωση στρωτής ροής. Οι Heyder, J. and Gebhart, J. (1977) απλοποίησαν τις σχέσεις των ανωτέρω μελετών με την προϋπόθεση ότι $u_s \sin \theta$, οπότε τελικά προέκυψε ότι:

$$P_{D (sed)} = \frac{2}{\pi} \left(2\kappa \sqrt{1 - \kappa^{2/3}} - \kappa^{1/3} \sqrt{1 - \kappa^{2/3}} + \sin^{-1} \kappa^{1/3} \right) \quad (6.5)$$

6.1.2 Μοριακή διάχυση

Η ταχύτητα εναπόθεσης λόγω διάχυσης *Brown* προσδιορίζεται από τη θεωρία μεταφοράς μάζας. Εκφράζεται σε όρους πάχους οριακού στρώματος, όπου σύμφωνα με την αναλογία μεταφοράς θερμότητας-μάζας ο αριθμός *Nusselt* αντικαθίσταται από τον αριθμό *Sherwood* – *Sh*. Έτσι η ταχύτητα εναπόθεσης προκύπτει από την Εξίσωση (6.6):

$$V_{D (dif)} = \frac{D_B Sh}{d_T} \quad (6.6)$$

Ο τοπικός αριθμός *Sherwood* – *Sh*, καθορίζεται συναρτήσει της απόστασης από την είσοδο του αεραγωγού ώστε να υπολογίζεται κατάλληλα η επίδραση του μήκους εισόδου (ανάπτυξης).

Τελικά η ικανότητα εναπόθεσης λόγω μοριακής διάχυσης υπολογίζεται από την Εξίσωση (6.7):

$$P_{D (dif)} = 1 - \exp(-6.462(x^+)^{2/3} + 0.7x^+) \quad (6.7)$$

όπου $x^+ = x/d_T Re Sc$ είναι το αδιάστατο μήκος και *Re*, *Sc* οι αριθμοί *Reynolds* και *Schmidt* αντίστοιχα.

Για το μηχανισμό της εναπόθεσης λόγω μοριακής διάχυσης για στρωτή ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς συνήθως εφαρμόζεται η θεωρητική Εξίσωση (6.8) του Ingham, D.B. (1975), δηλαδή:

$$P_{D (dif)} = 1 - \exp(-14.63x^+) - 0.097\exp(-89.22x^+) - 0.0325 \exp(-228x^+) - 0.0509\exp(-125.9(x^+)^{2/3}) \quad (6.8)$$

6.1.3 Αδρανειακή πρόσκρουση

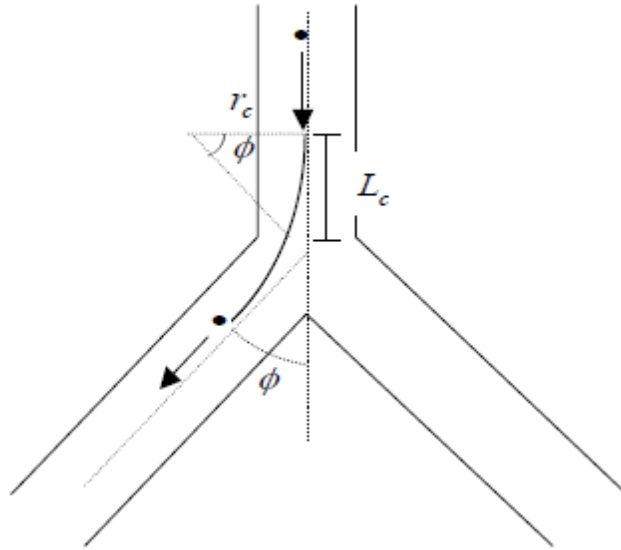
Η εναπόθεση λόγω αδρανειακής πρόσκρουσης (inertial impaction) προσδιορίζεται βάσει μίας απλοποιημένης ανάλυσης της καμπυλόγραμμης κίνησης στην περιοχή διακλάδωσης των αεραγωγών. Αν r_c είναι η ακτίνα καμπυλότητας των γραμμών ροής καθώς η ροή διαιρείται στους δύο θυγατρικούς αγωγούς, η φυγόκεντρος δύναμη που δρα πάνω στο αιωρούμενο σωματίδιο θα είναι mu^2/r_c , προκαλώντας συνεπώς μια ταχύτητα (drift velocity) ίση με tu^2/r_c . Η τελευταία παρασύρει τα σωματίδια εκτός της κατεύθυνσης της ροής με αποτέλεσμα την πρόσκρουση αυτών στα τοιχώματα του αγωγού. Συνεπώς η ταχύτητα αυτή μπορεί να θεωρηθεί σαν ταχύτητα εναπόθεσης για τον συγκεκριμένο μηχανισμό. Μπορεί λοιπόν να εκφραστεί ως $V_{D (imp)} = Stk'u$ όπου ο αριθμός *Stokes* Stk' ορίζεται βάσει της ακτίνας της κυκλικής κίνησης ($Stk' = tu/r_c = Stk d_T/r_c$). Με απλούς γεωμετρικούς υπολογισμούς, η ακτίνα r_c μπορεί να εκφραστεί ως $r_c = L_c/\varphi$, όπου φ είναι η γωνία διχοτόμησης (Πίνακας 5) σε ακτίνα και L_c το μήκος της καμπύλης ζώνης διχοτόμησης όπως φαίνεται στην [Εικόνα 6.1](#).

Το μήκος L_c μπορεί να περιγραφεί ως $L_c = 0.2L$, με βάση τη «φυσιολογικά πραγματική γεωμετρία (physiologically realistic bifurcation – PRB)» όπως προτείνεται από τους Heistracher, T. and Hofmann, W. (1995), όπου L το μήκος του αεραγωγού. Σύμφωνα με την περιγραφή *PRB* το 80% του μήκους του αεραγωγού είναι ευθύγραμμο και το τελευταίο 20% αποτελείται από την καμπύλη μεταβατικής ζώνης branching zone). Συνεπώς, η ταχύτητα εναπόθεσης εκφράζεται με την Εξίσωση (6.9):

$$V_{D (imp)} = \begin{cases} 0 & (\text{στο αρχικό } 80\% \text{ του αεραγωγού)} \\ Stk'u = Stku\varphi d_T/0.2L & (\text{στο τελευταίο } 20\% \text{ του αεραγωγού)} \end{cases} \quad (6.9)$$

Έτσι η ικανότητα εναπόθεσης υπολογίζεται από την Εξίσωση (6.9) με βάση την (6.2) προκύπτει:

$$P_{D (imp)} = 1 - \exp(-4\varphi Stk) \quad (6.10)$$



Εικόνα 6.1 Καμπυλόγραμμη κίνηση σε διακλάδωση αεραγωγών

6.1.4 Ηλεκτροστατική εναπόθεση

Όταν το εισπνεόμενο αερόλυμα αποτελείται από ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια, εφαρμόζεται η θεωρία του Yu, C.P. (1985). Στα ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια ασκούνται δύο δυνάμεις που προκαλούν την εναπόθεση αυτών στα τοιχώματα του πνεύμονα – η δύναμη ειδώλου (image force), που οφείλεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ του σωματιδίου και του τοιχώματος και η δύναμη φορτισμένου χώρου (space charge force), που οφείλεται στην άπωση των σωματιδίων με ομώνυμο φορτίο.

Η ικανότητα εναπόθεσης $P_{D (elec)}$ σύμφωνα με την παραπάνω θεωρία (Yu, 1985) είναι:

$$P_{D (elec)} = \left(\frac{8BL}{\pi \epsilon_0 d^3 u} \right)^{1/2} (q - q_c) \quad (6.11)$$

όπου η μηχανική κινητικότητα του σωματιδίου (particle mechanical mobility) B ορίζεται ως:

$$B = \frac{C_c}{3\pi \mu_g d} \quad (6.12)$$

όπου ϵ_0 η διηλεκτρική σταθερά του περιβάλλοντος μέσου, q το φορτίο ενός σωματιδίου και q_c το ελάχιστο φορτίο που απαιτείται ώστε να υπάρχει εναπόθεση, εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων και εκφράζεται σε μονάδες στοιχειώδους φορτίου e . Η ταχύτητα εναπόθεσης υπολογίζεται μέσω της ικανότητας εναπόθεσης από την Εξίσωση (6.2), οπότε και ισχύει:

$$V_D = A_A u \ln(1 - P_D)^{-1} / \Gamma L \quad (6.13)$$

Το ελάχιστο φορτίο για σωματίδιο διαμέτρου $0.3 \mu m$ είναι $12 e$, για σωματίδιο διαμέτρου $0.6 \mu m$ είναι $30 e$ και για σωματίδιο διαμέτρου $1 \mu m$ είναι $54 e$. Τέλος ορίζουμε το ποσοστό αύξησης της εναπόθεσης ΔP_D παρακάτω:

$$\Delta P_D = \frac{P_D - (P_{D(sed)} + P_{D(dif)} + P_{D(imp)})}{1 - (P_{D(sed)} + P_{D(dif)} + P_{D(imp)})} \quad (6.14)$$

6.1.5 Τυρβώδης πρόσκρουση

Η ταχύτητα εναπόθεσης λόγω τυρβώδους πρόσκρουσης $V_{D(tur-imp)}$ εκφράζεται με όρους της αδιάστατης σταθεράς χρόνου του σωματιδίου τ^+ ως ακολούθως (Drossinos Y. and Housiadas C., 2005):

$$V_{D(tur-imp)} = u^* \min[6 \times 10^{-4} \tau^{+2}, 0.1] \quad (6.15)$$

όπου u^* είναι η ταχύτητα τριβής που προσεγγίζεται μέσω του συντελεστή τριβής ως $u^* = u \sqrt{f_r / 2}$. Ο χρόνος προσαρμογής τ^+ προκύπτει από το νόμο του Stokes ($\tau^+ = m C_C / 3\pi \mu_g d$).

6.1.6 Τυρβώδης διάχυση

Στην τυρβώδη ροή, ο μοριακή διάχυση (λόγω της κίνησης *Brown*) είναι αμελητέα συγκρίνοντας με το μηχανισμό της τυρβώδους διάχυσης. Η ταχύτητα εναπόθεσης λόγω τυρβώδους διάχυσης προσεγγίζεται από τη Εξίσωση (6.16) των Wells, A.C. and Chamberlain, A.C. (1967), όπως προτείνεται στην εργασία των Malet et al.(2000) και παρουσιάζεται παρακάτω:

$$V_{D(tur-dif)} = 0.2 u^* S c_p^{-2/3} R e^{-1/8} \quad (6.16)$$

όπου $S c_p$ συμβολίζεται ο αριθμός *Schmidt* του σωματιδίου ($S c_p = \mu_g / \rho D_B$).

6.1.7 Εναπόθεση λόγω στένωσης του αγωγού

Στο σημείο της στένωσης μεταξύ της στοματικής κοιλότητας και του φάρυγγα το κλάσμα εναπόθεσης $P_{D(con)}$ προκύπτει χρησιμοποιώντας την εμπειρική Εξίσωση (6.17) των Muysshondt et al. (1996). Οι τελευταίοι ερευνητές προσδιόρισαν το κλάσμα $P_{D(con)}$ κατά τη διέλευση από αγωγό μεγάλης διαμέτρου d_i σε μικρότερης διαμέτρου αγωγό με διάμετρο d_o , ως εξής:

$$P_{D(con)} = \frac{1}{1 + \left(\frac{2Stk \left(1 - \left(\frac{d_o}{d_i} \right)^2 \right)}{3.14 \exp(-0.0185\theta)} \right)^{-1.24}} \quad (6.17)$$

όπου ο αριθμός *Stokes Stk* υπολογίζεται με βάση τον αγωγό μικρής διαμέτρου και η μέση ταχύτητα στον αγωγό μεγάλης διαμέτρου. Η γωνία θ αποτελεί τη μισή γωνία της στένωσης σε μοίρες. Η ταχύτητα εναπόθεσης προκύπτει με αντιστροφή της Εξίσωσης (6.2), όπως στην ηλεκτροστατική εναπόθεση.

6.1.8 Ταυτόχρονη εναπόθεση

Όταν δρουν ταυτόχρονα οι παραπάνω μηχανισμοί (βαρυτική καθίζηση, μοριακή διάχυση, αδρανειακή πρόσκρουση, ηλεκτροστατική εναπόθεση, τυρβώδης πρόσκρουση και διάχυση) υποθέτουμε ότι είναι μεταξύ τους ανεξάρτητοι. Με αυτήν την υπόθεση, η ταχύτητα εναπόθεσης των σωματιδίων μπορεί να ληφθεί ως το αλγεβρικό άθροισμα των επιμέρους ταχυτήτων όπως φαίνεται στην Εξίσωση (6.18):

$$V_D = V_{D(sed)} + V_{D(dif)} + V_{D(imp)} + V_{D(elec)} + V_{D(tur-imp)} + V_{D(tur-dif)} \quad (6.18)$$

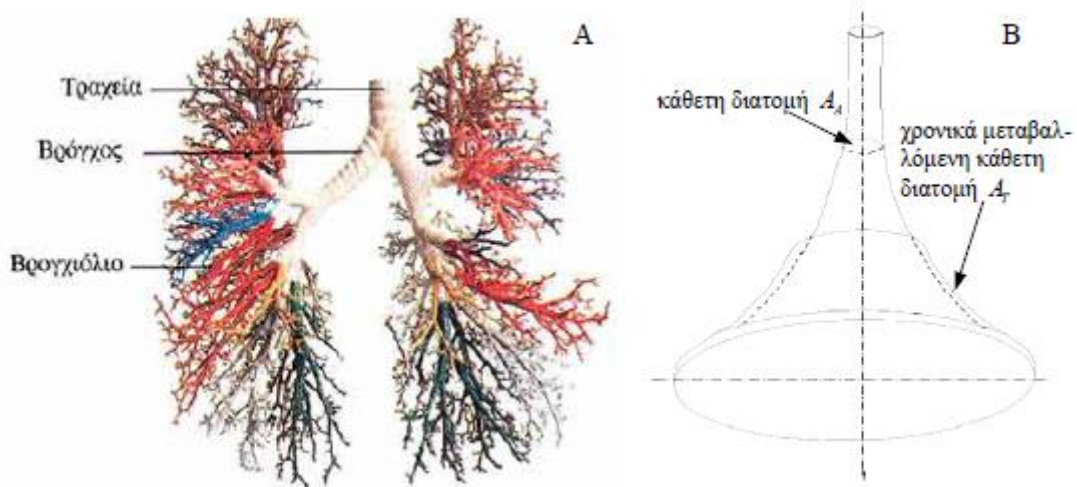
6.2 Θωρακική περιοχή

Η θωρακική περιοχή του αναπνευστικού συστήματος περιλαμβάνει την τραχεία, τους βρόγχους, τα βρογχιόλια και τις κυψελίδες. Η μορφολογία της θωρακικής περιοχής που χρησιμοποιεί το αριθμητικό μοντέλο είναι εκείνη του κλασικού μορφολογικού μοντέλου «Α» (Weibel, 1963) που αποτελεί το πιο καθιερωμένο και πλέον συνηθισμένο μορφολογικό σχήμα του ανθρώπινου πνεύμονα. Η περιγραφή της μορφολογίας εμπλουτίστηκε χρησιμοποιώντας για τον προσδιορισμό των γωνιών τα πιο πρόσφατα δεδομένα από το μοντέλο των Yeh, H.C. and Schum, G.M. (1980). Σύμφωνα με τα παραπάνω μοντέλα, το αναπνευστικό σύστημα είναι ένα σύστημα μεταφοράς αέρα με τη μορφή δέντρου αεραγωγών. Οι αεραγωγοί διακλαδίζονται και ταυτόχρονα διχοτομούνται ξεκινώντας από τη γενιά 0 – την τραχεία – και καταλήγοντας στη γενιά 23, που αντιπροσωπεύει τις πνευμονικές κυψελίδες. Το μοντέλο είναι συμμετρικό, επομένως ο αριθμός των αεραγωγών σε κάθε γενιά j είναι 2^j . Οι γενεές 0 έως 15 αποτελούν την τραχειοβρογχική (tracheobronchial) περιοχή, ενώ οι γενεές 16 έως 23 ανήκουν στην κυψελιδική (alveolar-interstitial ή acinar) περιοχή του πνεύμονα. Η τραχειοβρογχική περιοχή συχνά διακρίνεται σε δύο περιοχές: στην περιοχή των βρόγχων (bronchial) που περιλαμβάνει τις γενεές 0 έως 8 και στην περιοχή των βρογχιολίων (bronchiolar) που αποτελείται από τις γενεές 9 έως 15. Ξεκινώντας από την γενιά 16 (κυψελιδική περιοχή), οι αεραγωγοί γίνονται κυψελιδικοί και ο πνεύμονας διαστέλλεται και συστέλλεται κατά τη διάρκεια της αναπνοής. Τα χαρακτηριστικά του μορφολογικού μοντέλου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα και αναφέρονται και αναφέρονται σε πνεύμονα ενήλικου άνδρα με FRC ίσο με 4800 ml . Η γωνία βαρύτητας αποτελεί τη γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης του αεραγωγού και την κατακόρυφο. Η γωνία διχοτόμησης είναι η γωνία μεταξύ του αρχικού και του θυγατρικού αεραγωγού.

Το παραπάνω συμμετρικό μοντέλο έχει το πλεονέκτημα ότι είναι απλό αλλά παράλληλα επαρκές για την περιγραφή του αναπνευστικού συστήματος, χωρίς να απαιτεί λεπτομερή γνώση της διακλαδωμένης δομής του πνεύμονα. Από την άλλη μεριά, το μειονέκτημα της ανωτέρω περιγραφής είναι ότι μόνο μέσες συνθήκες μπορούν να προσομοιωθούν κατά μήκος της αναπνευστικής οδού. Δεν είναι δυνατή η διαφοροποίηση της εναπόθεσης μεταξύ των

αεροφόρων αγωγών που ανήκουν στην ίδια γενιά ακόμα και αν αντιστοιχούν σε εντελώς διαφορετικά σημεία του πνεύμονα (π.χ. σε διαφορετικούς λοβούς). Ωστόσο αυτό το μειονέκτημα δεν είναι πολύ περιοριστικό στην χρήση του μοντέλου διότι έχει αποδειχθεί ότι η επίδραση της ετερογενούς δομής του πνεύμονα στον υπολογισμό της μέσης εναπόθεσης δεν είναι σημαντική. Οι Yu, C.P. and Diu, C.K. (1982) υπολόγισαν την ολική και την τοπική εναπόθεση των εισπνεόμενων σωματιδίων στον πνεύμονα βασιζόμενοι σε διαφορετικά μορφολογικά μοντέλα. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι υπολογισμοί ολικής εναπόθεσης για διαφορετικές περιγραφές του πνεύμονα δε διαφέρουν σημαντικά. Οι διαφορές που παρατηρήθηκαν στην τοπική και ανά γενιά εναπόθεση είναι αισθητές, αλλά μέσα στη διασπορά λόγω ποικιλομορφίας ανάμεσα στους ανθρώπους. Επίσης, οι Asgharian et al. (2001) συνέκριναν προβλέψεις εναπόθεσης για 3 διαφορετικές γεωμετρίες πνεύμονα. Τα αποτελέσματά τους δείχνουν παρόμοια τοπική και ανά γενιά εναπόθεση για όλα τα μορφολογικά μοντέλα που εξέτασαν.

Η διαδρομή της ροής (flow path) περιγράφεται με τη βοήθεια του μοντέλου «τρομπέτα (trumpet)» για τον πνεύμονα στην [Εικόνα 6.2](#), που αποτελεί το πλέον κατάλληλο γεωμετρικό σχήμα στην εφαρμογή μονοδιάστατης ($1 - D$) υπολογιστικής προσέγγισης. Σύμφωνα με το μοντέλο, η επιφάνεια κάθετης διατομής της αναπνευστικής οδού αυξάνεται απότομα με την απόσταση από την είσοδο της τραχείας, διότι ισοδυναμεί με το άθροισμα των κάθετων διατομών όλων των αεραγωγών που ανήκουν στην ίδια γενιά.



Εικόνα 6.2 Α) Διακλαδωμένη δομή του πνεύμονα και Β) μοντέλο «τρομπέτα»

6.3 Εκτός θώρακα περιοχή

Η είσοδος του αερολύματος στον πνεύμονα πραγματοποιείται μέσω της ρινικής ή της στοματικής κοιλότητας. Η περιγραφή της ρινικής εισόδου αντιμετωπίστηκε εμπειρικά με τη βοήθεια της προσέγγισης *Lagrange*. Από την άλλη μεριά, η εκτός θώρακα περιοχή μέσω της στοματικής κοιλότητας περιγράφεται μηχανιστικά, λόγω της σπουδαιότητάς της σε ειδικές εφαρμογές (παροχή φαρμάκων με τη μορφή αερολύματος). Το φάρμακο – αερόλυμα χορηγείται στον άνθρωπο μέσω της στοματικής οδού (Yu et al., 1981; Stahlhofen et al., 1989), διότι η εναπόθεση σωματιδίων είναι μικρότερη συγκρίνοντας με τη ρινική οδό, συνεπώς στην πρώτη περίπτωση το εισπνεόμενο αερόλυμα προσεγγίζει την επιθυμητή περιοχή, τον πνεύμονα, με μικρότερες απώλειες.

6.3.1 Είσοδος μέσω ρινικής κοιλότητας

Η εκτός θώρακα περιοχή μέσω της ρινικής κοιλότητας περιγράφεται σαν μια πλασματική γενεά, η οποία προστίθεται στο μορφολογικό σχήμα πριν τη γενεά μηδέν (τραχεία). Σε αυτήν την περιοχή η εναπόθεση προσδιορίζεται από τις εμπειρικές συσχετίσεις του ICRP (1994) για τη ρινική αναπνοή. Συγκεκριμένα, το κλάσμα εναπόθεσης DP στην εκτός θώρακα περιοχή κατά τη διάρκεια εισπνοής και εκπνοής μέσω της ρινικής περιοχής είναι

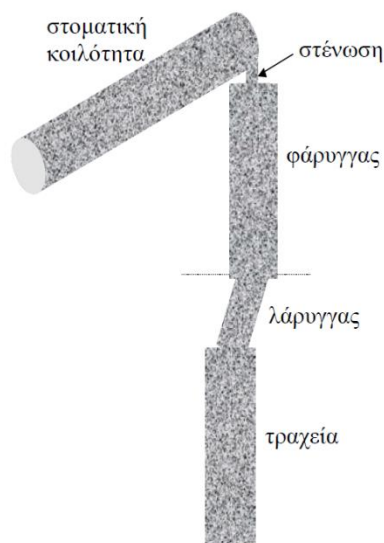
$$P_D = \sqrt{\left(1 - \exp\left(-3 \cdot 10^{-4}(d_{ae}\dot{V}_n)\right)\right)^2 + \left(1 - \exp\left(-18\left(D_B\dot{V}_n^{-\frac{1}{4}}\right)^{\frac{1}{2}}\right)\right)^2} + \sqrt{\left(1 - \exp\left(-5.5 \cdot 10^{-5}(d_{ae}\dot{V}_n)^{1.17}\right)\right)^2 + \left(1 - \exp\left(-15.1\left(D_B\dot{V}_n^{-\frac{1}{4}}\right)^{0.538}\right)\right)^2} \quad (6.19)$$

όπου \dot{V}_n η ογκομετρική παροχή αέρα κατά τη ρινική αναπνοή. Η μελέτη της φυσικής συμπεριφοράς του αερολύματος (υγροσκοπική συμπύκνωση, συσσωμάτωση) κατά τη

διέλευσή του από τη ρινική κοιλότητα πραγματοποιείται με τη βοήθεια της προσέγγισης κατά Lagrange. Το χρονικό διάστημα στο οποίο το αερόλυμα βρίσκεται στη ρινική περιοχή ισούται με το πηλίκο $V_{dead-space}(ET)/B$, όπου $V_{dead-space}(ET)$ είναι ο νεκρός χώρος (dead space) της εκτός θώρακα περιοχής, όπως ορίζεται στο ICRP (1994) (τυπική τιμή ενήλικου άνδρα = 50 ml).

6.3.2 Είσοδος μέσω στοματικής κοιλότητας

Το αερόλυμα εισέρχεται στον πνεύμονα μέσω της στοματικής κοιλότητας σε ειδικές περιπτώσεις, όπως κατά την παροχή φαρμάκων υπό τη μορφή αερολύματος ή σε συνθήκες απόφραξης της ρινικής κοιλότητας. Για την περιγραφή της αναπνευστικής οδού μέσω της στοματικής κοιλότητας – φάρυγγα – λάρυγγα, αναπτύχθηκε μία απλοποιημένη μορφή του γεωμετρικού μοντέλου των Stapleton et al. (2000). Στο παρόν μοντέλο όπως παρουσιάζεται στην [Εικόνα 6.3](#), η εναπόθεση προσεγγίζεται με τη βοήθεια ενός μονοδιάστατου σχήματος κατά Euler, το οποίο αποτελεί μία απλοποιημένη μορφή του γεωμετρικού μοντέλου των Stapleton παρόμοιου με αυτό που αναπτύσσεται για τη θωρακική περιοχή. Αυτό θα επιτρέψει τον εύκολο υπολογισμό της εναπόθεσης, καθώς και τη διερεύνηση της επίδρασης διαδικασιών αερολύματος, όπως η υγροσκοπική ανάπτυξη.



Εικόνα 6.3 Γεωμετρικό μοντέλο στοματικής κοιλότητας κατά Stapleton

Ο Πίνακας 6 συνοψίζει τις διαστάσεις του απλοποιημένου μορφολογικού σχήματος. Η διάμετρος εισόδου στη στένωση είναι η διάμετρος της στοματικής περιοχής, ενώ η διάμετρος εξόδου είναι 0.5 cm, που αντιστοιχεί στη μικρότερη διάμετρο της μεταβατικής ζώνης μεταξύ της στοματικής κοιλότητας και του φάρυγγα. Η γωνία της στένωσης λαμβάνεται ίση με 90°.

Πίνακας 6 Διαστάσεις του μορφολογικού μοντέλου της εκτός θώρακα περιοχής

	Διάμετρος (cm)	Μήκος (cm)	Γωνία βαρύτητας (deg)
Στοματική κοιλότητα	1.7	9	65
Φάρυγγας	1.2	4.2	0
Λάρυγγας	1.1	2	20

Η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα βασίζονται στους υπολογισμούς των Ferron et al. (1988). Σύμφωνα με την παραπάνω θεωρία, η θερμοκρασία και η υγρασία κατά μήκος της εκτός θώρακα διαδρομής υπολογίζονται με τη βοήθεια της αριθμητικής επίλυσης του προβλήματος μεταφοράς μάζας (υδρατμών) και θερμότητας. Οι τιμές των παραμέτρων που απαιτήθηκαν στη θεωρία (πάχος οριακού στρώματος, κατατομές θερμοκρασίας και υγρασίας στα τοιχώματα) επιλέχθηκαν ώστε να συμφωνούν με τα υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα της μέσης θερμοκρασίας και υγρασίας του αέρα κατά μήκος της ανώτερης περιοχής του αναπνευστικού συστήματος.

6.4 Αρχικές – οριακές συνθήκες

Η αρχική τιμή της συγκέντρωσης του αερολύματος σε όλο το πεδίο επίλυσης του μοντέλου είναι μηδέν ($t = 0, n_i = 0$). Οι οριακές συνθήκες πρέπει να οριστούν στην είσοδο και στο τέλος του αναπνευστικού συστήματος. Κατά την εισπνοή, η συγκέντρωση στην είσοδο του πνεύμονα θεωρείται δεδομένη, δηλαδή στο $x = 0$ και $0 < t < T/2$, $n_i = n_{i0}$ όπου T είναι η περίοδος του κύκλου αναπνοής. Κατά την εκπνοή, η βαθμίδα της συγκέντρωσης στην είσοδο θεωρείται ίση με μηδέν, δηλαδή στο $x = 0$ και $T/2 < t < T$, $\frac{\partial n_i}{\partial x} = 0$. Η τελευταία συνθήκη συστηματικά εφαρμόζεται σε διατομές εκροής, θεωρώντας μια ομαλή συνέχιση της ροής που

μεταφέρεται έξω από το πεδίο επίλυσης. Στο τέλος του αναπνευστικού συστήματος η ροή της μάζας είναι μηδέν (αδιαβατική συνθήκη). Επομένως, εφαρμόζεται πάλι η μηδενική βαθμίδα συγκέντρωσης, τόσο στην εισπνοή όσο και κατά την εκπνοή ($x = x_N$ και $0 < t < T, \frac{\partial n_i}{\partial x} = 0$).

6.5 Προσδιορισμός κλάσματος εναπόθεσης

Κλάσμα εναπόθεσης ονομάζουμε το ποσοστό των σωματιδίων που εναποτίθεται στην εξεταζόμενη γενιά του αναπνευστικού συστήματος ως προς τον συνολικό αριθμό των σωματιδίων που εισέρχονται στο αναπνευστικό σύστημα ανά αναπνοή. Το συνολικό κλάσμα εναπόθεσης για την τραχειοβρογχική και την κυψελιδική περιοχή του αναπνευστικού συστήματος για κάθε κλάση μεγέθους των σωματιδίων προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους κλασμάτων εναπόθεσης των αντίστοιχων γενεών. Αντίστοιχα, το άθροισμα του κλάσματος εναπόθεσης των τριών περιοχών για κάθε διακριτή διάμετρο μας δίνει το συνολικό κλάσμα εναπόθεσης αυτής της διαμέτρου.

Η επίλυση του συστήματος των Εξισώσεων (3.4) και (3.5), βάσει των οριακών και αρχικών συνθηκών της προηγούμενης παραγράφου, επιτρέπει τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων κατά αριθμό σε κάθε τμήμα της κατανομής n_i ως συνάρτηση του χρόνου κατά μήκος όλης της αναπνευστικής οδού, δηλαδή $n_i = n_i(x, t)$. Επομένως το μοντέλο επιτρέπει την παρακολούθηση των μεταβολών της συνάρτησης κατανομής των σωματιδίων στον ανθρώπινο πνεύμονα κατά τη διάρκεια του κύκλου αναπνοής. Το κλάσμα εναπόθεσης DF σε μια συγκεκριμένη περιοχή του πνεύμονα που έχει μήκος L_x (για παράδειγμα, κατά μήκος μιας γενιάς) ορίζεται ως το κλάσμα του αριθμού των σωματιδίων που εναποτίθενται στην περιοχή προς τον αριθμό των σωματιδίων που εισήλθαν στο αναπνευστικό σύστημα, συνεπώς:

$$DF = \frac{\sum_{i=1}^{v_B} \int_0^T \int_0^{L_x} n_i v_{D_i} \Gamma dx dt}{\sum_{i=1}^{v_B} \int_0^{T/2} n_{i0} A_{A_0} u_0 dt} \quad (6.20)$$

όπου A_{A_0} η επιφάνεια της κάθετης διατομής στην είσοδο του u_0 η ταχύτητα του αέρα στην είσοδο. Ο ολικός αριθμός των σωματιδίων που εναποτίθενται στον πνεύμονα κατά τη διάρκεια μιας αναπνοής υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τον αναπνεόμενο όγκο V_T και την

αναπνευστική συχνότητα f , όπως παριστάνεται στην Εξίσωση (6.21). Οι παράμετροι της φυσιολογίας καθορίζονται από το επίπεδο της φυσικής άσκησης, όπως ορίζονται από το ICRP (1994). Σε όρους μάζας m ή επιφάνειας s , χρησιμοποιούνται οι Εξισώσεις (6.20) και (6.21) τοποθετώντας $n_i m_i$ ή $n_i s_i$ στη θέση του n_i .

$$\text{Ολικός αριθμός} = DF \sum_i n_i \cdot V_T \cdot f \cdot t \quad (6.21)$$

Αναφορικά με τις αριθμητικές τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων αλλά και αναλυτικότερα στοιχεία σχετικά με τα μοντέλα που αναπαριστούν την δυναμική του αερολύματος και τους μηχανισμούς εναπόθεσης, περιγράφονται από την Mitsakou (2006).

7 Υπολογισμός δόσεων στο αναπνευστικό σύστημα

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται η διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων τα οποία προέρχονται από τις μετρήσεις που παρουσιάστηκαν στο [Κεφάλαιο 5](#), ωστόσο η μορφή στην οποία βρίσκονται δεν είναι συμβατή με το αριθμητικό μοντέλο επεξεργασίας των δεδομένων. Έτσι απαιτείται η μετατροπή τους σε μια μορφή που επιτρέπει την εισαγωγή τους στο αριθμητικό μοντέλο ως δεδομένα εισόδου. Τέλος, η μορφή τους θα πρέπει να είναι τέτοια που να επιτρέπει την μεταξύ του σύγκριση αφού θα έχουν επεξεργαστεί από το αριθμητικό μοντέλο.

Στην συνέχεια τα αποτελέσματα του αριθμητικού μοντέλου παρουσιάζονται με την μορφή διαγραμμάτων τα οποία αποτελούν το κύριο μέσο με το οποίο εξάγονται συμπεράσματα όσον αφορά τις συγκεντρώσεις των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα των παιδιών και στην συνέχεια πώς αυτές η συγκεντρώσεις μπορεί να συνδέονται με παραμέτρους όπως η φυσιολογία του πνεύμονα, το επίπεδο σωματικής άσκησης, η γεωγραφική θέση των σχολείων, εξωτερικοί παράγοντες (π.χ. ο καιρός) και εσωτερικοί παράγοντες (π.χ. παλαιότητα κτιρίων, εξαερισμός, ειδικές δραστηριότητες).

7.1 Δεδομένα εισόδου υπολογιστικού μοντέλου

Ο κώδικας υπολογισμού της εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα απαιτεί την εισαγωγή των δεδομένων έκθεσης, όπως επίσης και διαφόρων φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του πληθυσμού των σωματιδίων και των παραμέτρων της αναπνοής που αντιστοιχούν στην υπό εξέταση δραστηριότητα. Τα δεδομένα αυτά θα συζητηθούν στην συνέχεια.

7.1.1 Εισαγωγή έκθεσης

Για την εισαγωγή του πληθυσμού των σωματιδίων, στα οποία εκτίθενται οι μαθητές, στο υπολογιστικό μοντέλο θα πρέπει να λάβουμε υπόψη ένα βασικό χαρακτηριστικό του κώδικα, το οποίο είναι η μη επεξεργασία χρονοσειρών δεδομένων έκθεσης. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορούμε να εισάγουμε απευθείας τα δεδομένα από τις μετρήσεις, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο [Κεφάλαιο 5](#), ώστε να έχουμε την χρονική εξέλιξη της δόσης στο αναπνευστικό σύστημα. Εναλλακτικά, θα χρησιμοποιήσουμε μέσες τιμές έκθεσης για κάθε κλάση μεγέθους των σωματιδίων και, αντίστοιχα, θα λάβουμε τη μέση εναπόθεση σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα των μαθητών ανά αναπνοή που στη συνέχεια θα αναχθεί στη μέση ημερήσια δόση.

Ο υπολογισμός της μέσης έκθεσης για κάθε κλάση σωματιδίων γίνεται με βάση την Εξίσωση (7.1):

$$Mean\ Exp = \frac{\sum_{j=1}^m n_j \left(\frac{\sum_{i=1}^{n_j} Exp}{n_j} \right)}{\sum_{j=1}^m n_j} \quad (7.1)$$

όπου Exp είναι η στιγμιαία μέτρηση της συσκευής ανά λεπτό, m είναι ο αριθμός των διαφορετικών χρονικών διαστημάτων κατά τα οποία γνωρίζουμε ότι τα παιδιά βρίσκονται στην αίθουσα και εκτίθενται στα αιωρούμενα σωματίδια και n_j είναι ο αριθμός των λεπτών κάθε διαφορετικού χρονικού διαστήματος.

Για τον προσδιορισμό λοιπόν της μέσης έκθεσης, θα πρέπει να αναγνωρίσουμε τα διαστήματα έκθεσης των μαθητών στους μετρούμενους πληθυσμούς σωματιδίων. Στα νηπιαγωγεία τα διαστήματα που οι μαθητές περνούν εκτός της σχολικής αίθουσας είναι πολύ περιορισμένα σε σχέση με τον συνολικό χρόνο που δαπανούν τα νήπια στο σχολείο τόσο την χειμερινή όσο και την καλοκαιρινή περίοδο μετρήσεων. Επομένως, για τον υπολογισμό της μέσης έκθεσης λαμβάνεται υπόψη όλο το χρονικό διάστημα που τα νήπια βρίσκονται στο σχολείο.

Αντίθετα, στα δημοτικά σχολεία τα διαλείμματα είναι σαφώς χωρισμένα από το μάθημα. Ωστόσο, λόγω των συχνών έντονων καιρικών φαινομένων και των χαμηλών θερμοκρασιών που χαρακτηρίζουν την περιοχή όπου βρίσκονται τα σχολεία, τις περισσότερες μέρες του

χειμώνα τα παιδιά περνούν το διάλειμμα τους εντός της σχολικής αίθουσας. Δηλαδή για τα δημοτικά σχολεία έχουμε διαφορετικό τρόπο υπολογισμού της μέσης έκθεσης το χειμώνα και το καλοκαίρι: το καλοκαίρι για τον υπολογισμό χρησιμοποιούμε μόνο τα διαστήματα που τα παιδιά βρίσκονται στη σχολική αίθουσα, ενώ τον χειμώνα πρέπει να χρησιμοποιηθούν και τα διαστήματα των διαλειμμάτων.

Τελικά, στα δημοτικά σχολεία για την καλοκαιρινή καμπάνια έχουμε έναν μέσο όρο έκθεσης για κάθε διακριτή διάμετρο και για κάθε ημέρα της καμπάνιας, ενώ για την χειμερινή έχουμε δύο μέσους όρους έναν για την ώρα του διαλείμματος και έναν για την ώρα των μαθημάτων για κάθε διακριτή διάμετρο για κάθε ημέρα της καμπάνιας. Η ανάγκη για διαφορετικό υπολογισμό της μέσης έκθεσης την ώρα του μαθήματος και την ώρα του διαλείμματος οφείλεται στην φυσιολογία της αναπνοής και εξηγείται στην παράγραφο 7.1.2.

Ο Πίνακας 7 παρουσιάζει ένα ενδεικτικό παράδειγμα των δεδομένων έκθεσης όπως αυτά εισάγονται στο υπολογιστικό μοντέλου με τις μέσες συγκεντρώσεις σωματιδίων ανά κυβικό μέτρο ανά μέση διάμετρο σωματιδίων και για τα χρονικά διαστήματα του διαλείμματος και του μαθήματος μέσα στην τάξη. Τα συγκεκριμένα δεδομένα έκθεσης αφορούν στις μετρήσεις στην 2^η αίθουσα του δημοτικού σχολείου 1, την ημερομηνία 26-9-2011.

7.1.2 Εισαγωγή παραμέτρων φυσιολογίας και αναπνοής

Η δεύτερη ομάδα δεδομένων που χρειάζεται ο κώδικας μεταφοράς και εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα, αφορά στις παραμέτρους που περιγράφουν την φυσιολογία του εκτιθέμενου πληθυσμού και την χαρακτηριστικά της αναπνοής. Συγκεκριμένα, πρέπει να εισάγουμε τη λειτουργική υπολειπόμενη χωρητικότητα V_{FRC} των πνευμόνων, τον αναπνεόμενος όγκος αέρα V_T , και την περίοδο της αναπνοής T . Το πρώτο μέγεθος (V_{FRC}), εξαρτάται μόνο από την ηλικία του ατόμου, ενώ τα άλλα δύο (V_T και T) τόσο από την ηλικία όσο και από το επίπεδο της σωματικής άσκησης.

Πίνακας 7 Μέση χαρακτηριστική διάμετρος (3^η στήλη) ανά κλάση μεγέθους σωματιδίων και οι αντίστοιχες μέσες συγκεντρώσεις σωματιδίων στο περιβάλλον (μέση έκθεση) ανά κυβικό μέτρο αέρα για το διάλειμμα (4^η στήλη) και το μάθημα (5^η στήλη). Τα δεδομένα αφορούν στο σχολείο στην 2^η αίθουσα του δημοτικού σχολείου 1

α/α	Ελάχιστη διάμετρος (μm)	Μέγιστη διάμετρος (μm)	Μέση διάμετρος (m)	Μέση έκθεση (#particles/m ³)	
				Διάλειμμα	Μάθημα
1	0.23	0.3	2.65E-07	5.51E+07	5.39E+07
2	0.3	0.4	3.5E-07	5.32E+07	5.19E+07
3	0.4	0.5	4.5E-07	3.32E+07	3.25E+07
4	0.5	0.65	5.75E-07	1.92E+07	1.87E+07
5	0.65	0.8	7.25E-07	1.59E+07	1.55E+07
6	0.8	1	9.0E-07	1.13E+07	1.12E+07
7	1	1.6	1.3E-06	3.96E+07	3.87E+07
8	1.6	2	1.8E-06	4.74E+07	4.45E+07
9	2	3	2.5E-06	1.40E+08	1.32E+08
10	3	4	3.5E-06	1.97E+08	1.86E+08
11	4	5	4.5E-06	2.72E+08	2.51E+08
12	5	7.5	6.25E-06	4.33E+08	3.64E+08
13	7.5	10	8.75E-06	4.18E+08	3.08E+08
14	10	15	1.25E-05	8.27E+08	6.27E+08
15	15	20	1.75E-05	4.94E+08	3.34E+08

Με βάση τα χαρακτηριστικά των σχολείων, στα οποία διενεργήθηκε η καμπάνια μέτρησης, διακρίνουμε τις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Τα κύρια χαρακτηριστικά της φοίτησης στο νηπιαγωγείο είναι η συχνή εναλλαγή των εκπαιδευτικών δραστηριοτήτων, αλλά και η έμφυτη, αυξημένη κινητικότητα των παιδιών. Επομένως, θεωρούμε ότι τα νήπια βρίσκονται σε κατάσταση ελαφριάς άσκησης καθ' όλη την διάρκεια παραμονής τους στη σχολική αίθουσα.
- Στο δημοτικό σχολείο η πλειοψηφία των εκπαιδευτικών δραστηριοτήτων διενεργείται με τα παιδιά καθισμένα στα θρανία. Άρα κατά την διάρκεια του μαθήματος η κινητικότητα των παιδιών περιορίζεται σε αυτή των καθισμένων. Ωστόσο, κατά την διάρκεια των διαλειμμάτων κατά την χειμερινή περίοδο που τα παιδιά παραμένουν στην τάξη αλλά είναι πιο δραστήρια η κίνησή τους αντιστοιχεί σε αυτή της ελαφριάς άσκησης.

Το τελευταίο χαρακτηριστικό για τα δημοτικά σχολεία είναι και ο λόγος που χρειαζόμαστε διαφορετική μέση τιμή για τα διαλείμματα κατά την χειμερινή περίοδο

(παράγραφος 7.1.1): το διαφορετικό επίπεδο σωματικής άσκησης θα δώσει και διαφορετικά χαρακτηριστικά στον τρόπο επικάθισης των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα.

Ο Πίνακας 8 παρουσιάζει τον αναπνεόμενος όγκος V_T , την περίοδο της αναπνοής T και την λειτουργική υπολειπόμενη χωρητικότητα FRC σε συνάρτηση με την ηλικία και την σωματική δραστηριότητα των παιδιών (ICRP, 1994).

Πίνακας 8 Παράμετροι αναπνοής για νήπια (4-5 ετών) και παιδιά δημοτικού (6-11 ετών) για διάφορα επίπεδα σωματικής άσκησης (ICRP, 1994)

Ηλικία	Καθήμενοι			Ελαφριά σωματική άσκηση		
	V_t (m^3)	T (s)	FRC (m^3)	V_t (m^3)	T (s)	FRC (m^3)
4 - 5	$0.213 \cdot 10^{-3}$	2.4	$0.767 \cdot 10^{-3}$	0.244	1.538	$0.767 \cdot 10^{-3}$
6 - 11	$0.333 \cdot 10^{-3}$	3.157	$1.484 \cdot 10^{-3}$	0.583	1.875	$1.484 \cdot 10^{-3}$

7.1.3 Εισαγωγή χαρακτηριστικών μεγεθών πληθυσμού σωματιδίων

Για τα αιωρούμενα σωματίδια που εισέρχονται στο αναπνευστικό σύστημα υποθέσαμε ότι γνωρίζουμε την αεροδυναμική τους διάμετρο. Επιπλέον, λόγω ελλιπών στοιχείων για την ποιότητα του αέρα εντός των αιθουσών θεωρήθηκε πυκνότητα αέρα ίση με $1000 \text{ kg}/m^3$.

Τέλος, τα φαινόμενα της συσσωμάτωσης και της υγροποίησης δεν ελήφθησαν υπόψη λόγω ελλιπών στοιχείων όσον αφορά τα χαρακτηριστικά του αέρα ο οποίος εισέρχεται στο αναπνευστικό σύστημα.

7.2 Αποτελέσματα υπολογιστικού μοντέλου

Το υπολογιστικό μοντέλο προσδιορίζει το κλάσμα της εναπόθεσης (deposition fraction – DF) όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 6.5 καθώς και τον αριθμό των εναποτιθέμενων σωματιδίων ($N_a^{i,j}$) ανά γενιά και αναπνοή σε κάθε τμήμα του αναπνευστικού συστήματος και σε κάθε γενιά των πνευμόνων i για κάθε διακριτή διάμετρο σωματιδίων j .

Επιπλέον να σημειωθεί ότι στα ακόλουθα αποτελέσματα το αναπνευστικό σύστημα είναι χωρισμένο σε τρεις περιοχές: α) την εκτός θώρακα περιοχή (extrathoracic), β) την τραχειοβρογχική (tracheobronchial) περιοχή που περιλαμβάνει τις γενεές 0-16 του πνεύμονα και γ) την κυψελιδική περιοχή (alveolar) που περιλαμβάνει τις γενεές 17-23 του πνεύμονα.

7.2.1 Διαγράμματα κλάσματος εναπόθεσης

Το κλάσμα εναπόθεσης των σωματιδίων εξαρτάται από την φυσιολογία του πνεύμονα, τα χαρακτηριστικά της αναπνοής, αλλά και το μέγεθος και τα υπόλοιπα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των σωματιδίων. Ωστόσο, δεν εξαρτάται από τη συγκέντρωση των σωματιδίων. Επομένως στις περιπτώσεις που εξετάζουμε, τα κλάσματα εναπόθεσης είτε πρόκειται για τα επιμέρους κάθε περιοχής του αναπνευστικού συστήματος ή κατ' επέκταση για το συνολικό κλάσμα εξαρτώνται από την ηλικία των παιδιών, το επίπεδο σωματικής άσκησης και την διάμετρο των σωματιδίων. Στην περίπτωση των δύο δημοτικών σχολείων – όπου οι μετρήσεις έχουν γίνει για τις ίδιες διαμέτρους σωματιδίων – τα παιδιά που εκτίθενται στα αιωρούμενα σωματίδια εντός των αιθουσών έχουν την ίδια ηλικία και επίπεδο σωματικής άσκησης έτσι στα διαγράμματα του κλάσματος εναπόθεσης που ακολουθούν υπάρχει ένα διάγραμμα που αντιπροσωπεύει το κλάσμα εναπόθεσης στο αναπνευστικό σύστημα των παιδιών για τα δύο δημοτικά σχολεία μαζί με το διάγραμμα για τα παιδιά του νηπιαγωγείου.

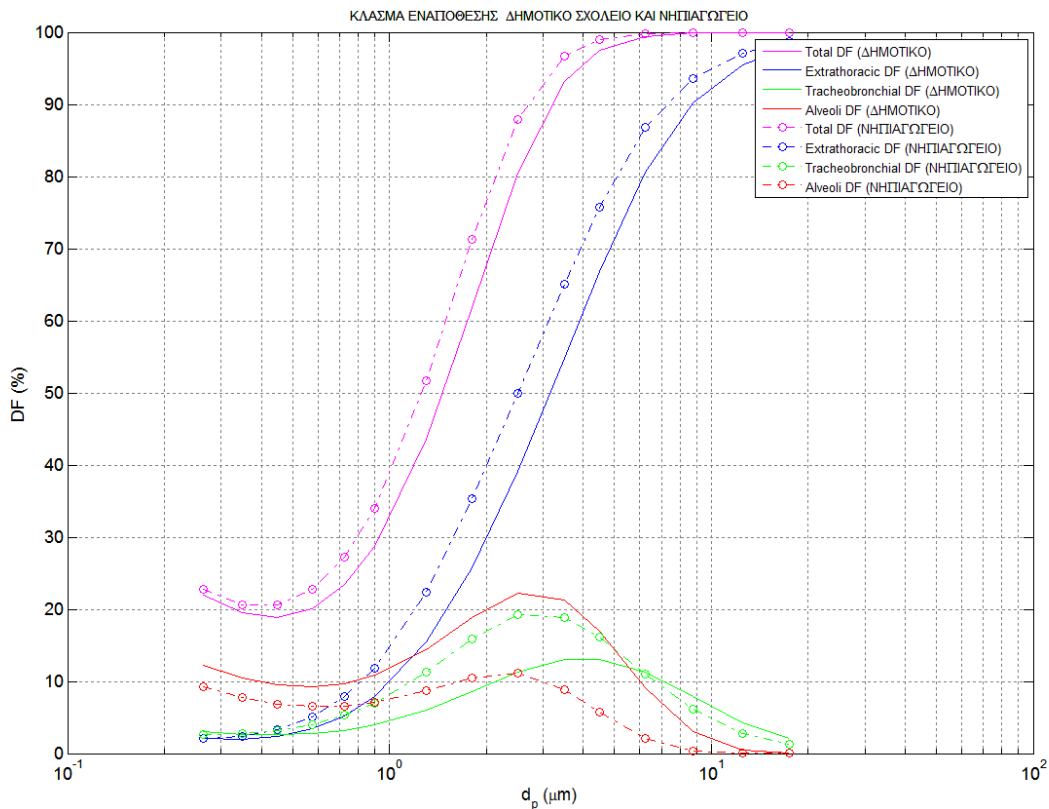
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα του κλάσματος εναπόθεσης για την θερμή και την ψυχρή περίοδο.

Θερμή περίοδος

Στην [Εικόνα 7.1](#) παρατηρούμε ότι οι καμπύλες του κλάσματος εναπόθεσης που αφορούν τα παιδιά των δημοτικών σχολείων και του νηπιαγωγείου διαφέρουν αρκετά. Αυτό είναι λογικό εφ' όσον γνωρίζουμε ότι μεταβάλλονται οι παράμετροι τόσο της φυσιολογίας του αναπνευστικού συστήματος όταν πρόκειται για παιδιά διαφορετικής ηλικίας, όσο και της αναπνοής σε διαφορετικά επίπεδα άσκησης. Η σημαντικότερη διαφορά που παρατηρείται

είναι οι μεγαλύτερες τιμές στην εκτός θώρακα και τραχειοβρογχική περιοχή των παιδιών του νηπιαγωγείου και κυψελιδική περιοχή των παιδιών του δημοτικού σχολείου. Στα παιδιά μικρότερης ηλικίας (νηπιαγωγείου) τα σωματίδια δυσκολεύονται περισσότερο στο να καταφέρουν να διεισδύσουν στην κυψελιδική περιοχή. Ο μεγαλύτερος αριθμός των σωματιδίων συσσωρεύεται στην εκτός-θώρακα και τραχειοβρογχική περιοχή, γεγονός που οφείλεται στη στένωση των διατομών της αναπνευστικής οδού, αλλά και στην αύξηση της ταχύτητας του εισπνεόμενου αερολύματος που οδηγεί σε συχνότερες συγκρούσεις των σωματιδίων με τα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού.

Η μορφή των διαγραμμάτων ωστόσο και για τα τρία σχολεία είναι κοινή. Τα λεπτόκοκκα σωματίδια ($< 1\mu m$) εναποτίθενται κυρίως στη κυψελιδική και τραχειοβρογχική περιοχή, ενώ τα χονδρόκοκκα σωματίδια ($> 1\mu m$) εναποτίθενται κυρίως στην εκτός θώρακα περιοχή του αναπνευστικού συστήματος.

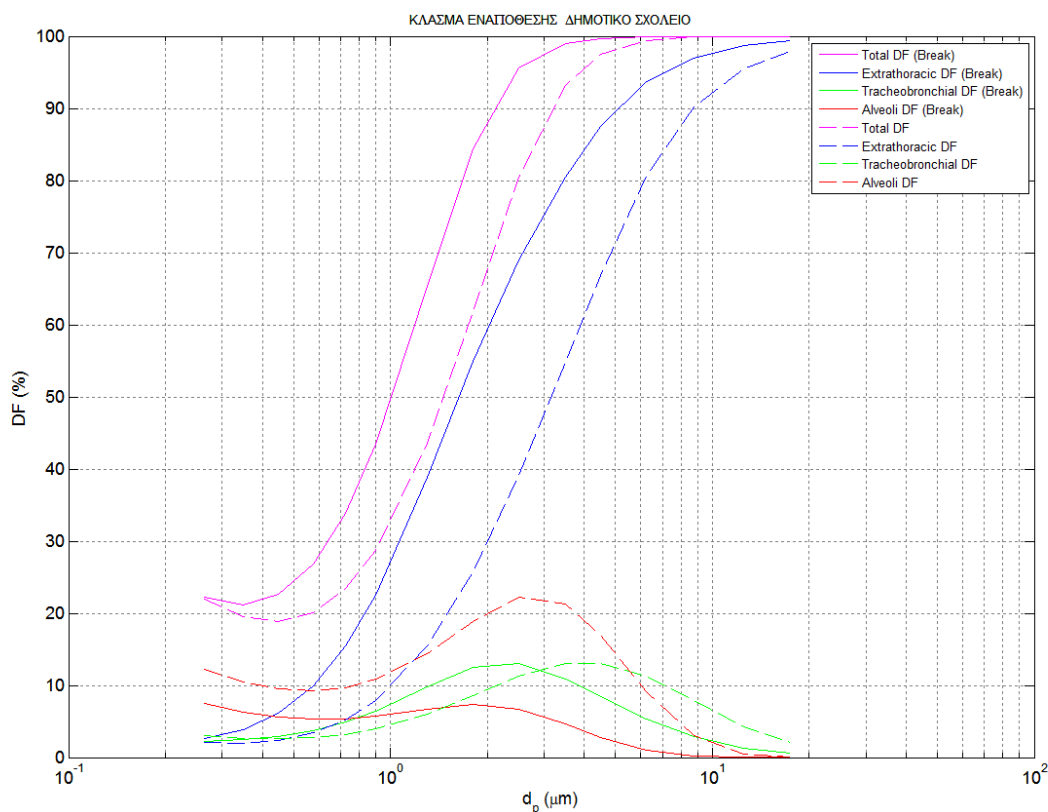


Εικόνα 7.1 Διάγραμμα κλάσματος εναπόθεσης - Δημοτικά σχολεία και Νηπιαγωγείο, Θερμή περίοδος

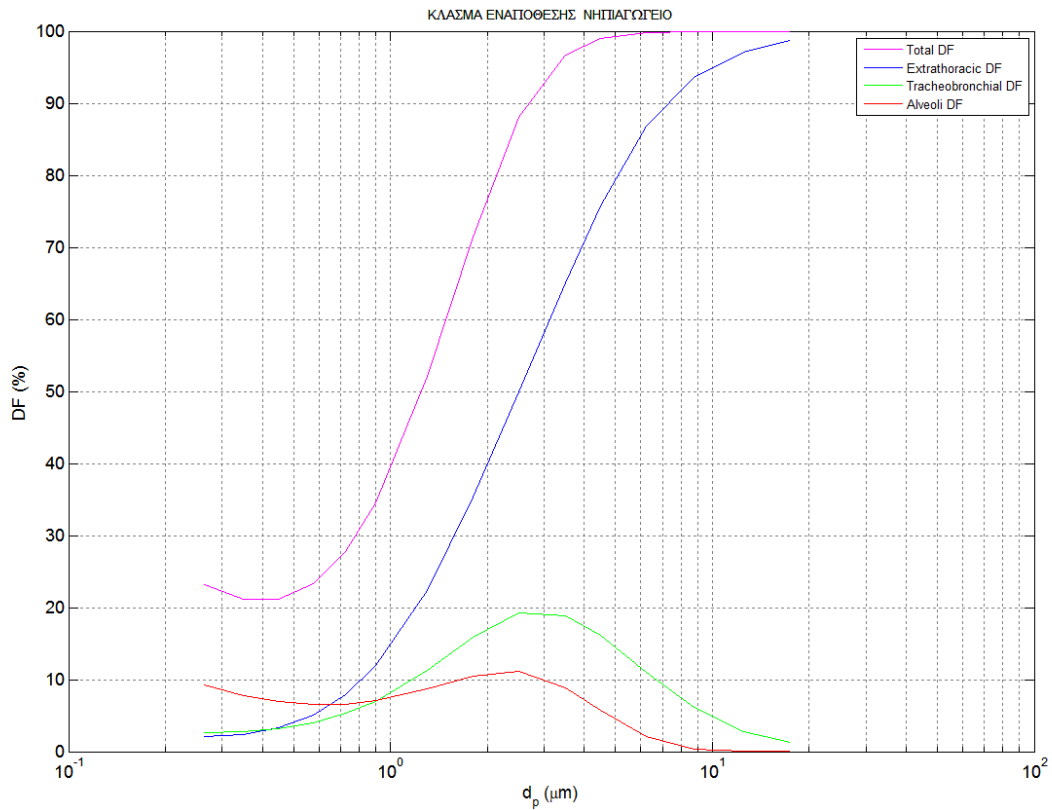
Ψυχρή περίοδος

Στο διάγραμμα που αφορά την ψυχρή περίοδο για τα δημοτικά σχολεία (Εικόνα 7.2) υπάρχουν δύο καμπύλες εναπόθεσης για κάθε ξεχωριστή περιοχή του αναπνευστικού συστήματος, μία που αντιπροσωπεύει την περίοδο της διδασκαλίας και μία την περίοδο του διαλείμματος. Αυτό συμβαίνει λόγω της αλλαγής των φυσιολογικών παραμέτρων της αναπνοής μεταξύ των δύο καταστάσεων – το μάθημα γίνεται με τους μαθητές καθιστούς, ενώ ελαφριά άσκηση θεωρείται πιο πιθανή για το διάστημα του διαλείμματος. Τα διαγράμματα που αφορούν το κλάσμα εναπόθεσης στα δύο δημοτικά σχολεία είναι και εδώ ίδια μεταξύ τους αφού αφορούν παιδιά της ίδιας ηλικίας με κοινές όλες τις παραμέτρους που αφορούν το αναπνευστικό σύστημα και την αναπνοή, αλλά και τα χαρακτηριστικά του αερολύματος.

Οι διαφορές στις καμπύλες που αφορούν το κλάσμα εναπόθεσης για το διάλειμμα και το μάθημα οφείλονται στις διαφορετικές παραμέτρους που εισάγονται λόγω της αλλαγής της σωματικής άσκησης κατά την ώρα του διαλλείματος μέσα στην αίθουσα.



Εικόνα 7.2 Διάγραμμα κλάσματος εναπόθεσης - Δημοτικό Σχολείο, Ψυχρή περίοδος



Εικόνα 7.3 Διάγραμμα κλάσματος εναπόθεσης – Νηπιαγωγείο, Ψυχρή περίοδος

Η κύρια διαφορά που παρατηρείται είναι η αύξηση του κλάσματος εναπόθεσης στην εκτός θώρακα περιοχή για τα μικρότερα σωματίδια κατά την διάρκεια του διαλείματος ενώ παρατηρείται μείωση του κλάσματος εναπόθεσης των μεγαλύτερων σωματιδίων στην κυψελιδική περιοχή. Κατά την διάρκεια του διαλείματος τα παιδιά βρίσκονται σε κατάσταση ελαφριάς σωματικής άσκησης γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη συχνότητα αναπνοών σε σχέση με τη ώρα της διδασκαλίας. Η αύξηση της συχνότητας αναπνοής συνεπάγεται σε περισσότερες και μικρότερες σε διάρκεια αναπνοές, αλλά και μεγαλύτερη ταχύτητα του εισερχόμενου αέρα στο αναπνευστικό σύστημα με αποτέλεσμα να υπάρχουν αυξημένες πιθανότητες σύγκρουσης των σωματιδίων με τα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού γεγονός που είναι εντονότερο κυρίως στην εκτός-θώρακα περιοχή.

7.2.2 Διαγράμματα αριθμού εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα ανά αναπνοή

Τα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζουν τον αριθμό εναποτιθέμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα ανά αναπνοή ανηγμένο στη μέση λογαριθμική διάμετρο του μεγέθους των σωματιδίων. Αυτό βοηθάει στη σύγκριση των αποτελεσμάτων διότι οι διάφορες κλάσεις μεγέθους των σωματιδίων που εξετάζονται δεν έχουν το ίδιο εύρος. Η Εξίσωση (7.2) που υπολογίζει την μέση λογαριθμική διάμετρο είναι:

$$d_{\log} = \left| \log \left(\frac{d_{\min}}{d_{\max}} \right) \right| \quad (7.2)$$

όπου d_{\min} και d_{\max} είναι η μέγιστη και ελάχιστη διάμετρος αντίστοιχα για κάθε διαφορετικό κανάλι δειγματοληψίας.

Επιπλέον επισημαίνεται ότι τα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζουν τον μέσο όρο του ανηγμένου – στη λογαριθμική διάμετρο – αριθμού εναποτιθέμενων σωματιδίων, ο οποίος προκύπτει από το σύνολο των ημερών όπου πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία σε κάθε σχολείο. Επομένως, τα στοιχεία των παρακάτω διαγραμμάτων αποτελούν χαρακτηριστικό γνώρισμα για το κάθε σχολείο.

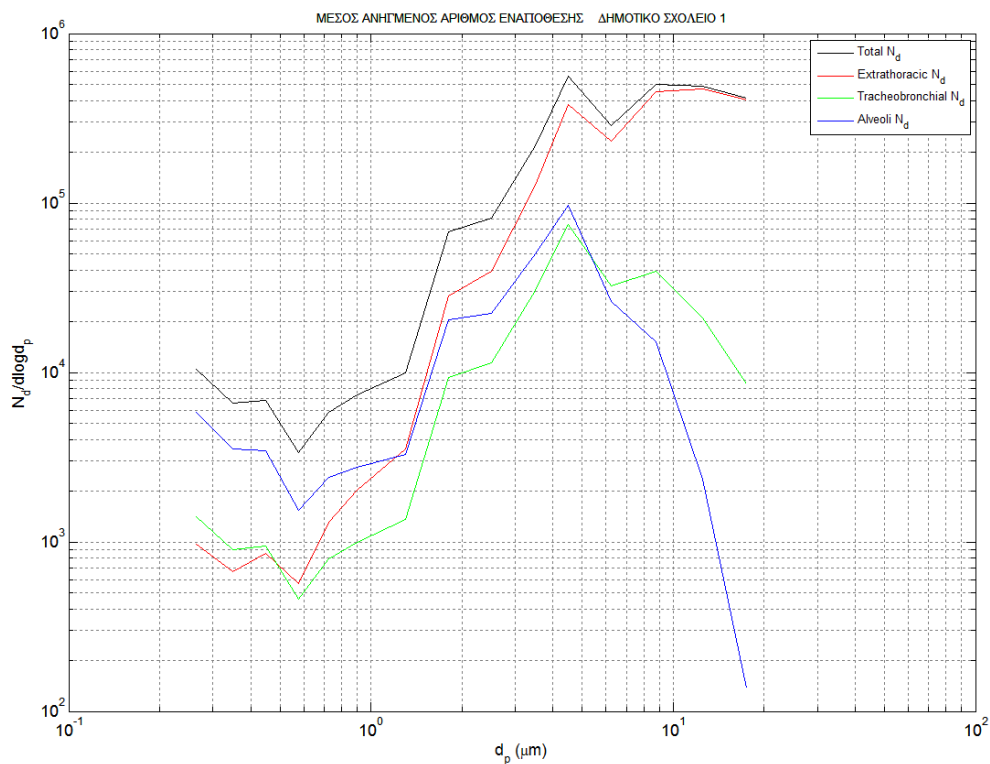
Τα διαγράμματα που αφορούν τα καθημερινά αποτελέσματα του ανηγμένου αριθμού εναπόθεσης στις αίθουσες του κάθε σχολείου βρίσκονται αναλυτικά στο [ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β](#).

Θερμή περίοδος

Στην [Εικόνα 7.4](#) φαίνεται ο αριθμός των εναποτιθέμενων σωματιδίων (ανά αναπνοή) ανά μέγεθος συνολικά και σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος για το Δημοτικό Σχολείο 1. Τα μεγαλύτερα σωματίδια όσο κατευθύνονται προς το εσωτερικό του αναπνευστικού συστήματος λόγω του μεγέθους τους προσκολλούνται πολύ ευκολότερα στα τοιχώματα των αεραγωγών (αδρανειακή πρόσκρουση). Αντίθετα, τα μικρότερα σωματίδια λόγω μικρής αδράνειας παρασύρονται από το ρεύμα αέρα χωρίς να προσκρούουν στα τοιχώματα της ανώτερης αναπνευστικής οδού. Έτσι τα μικρότερα σωματίδια έχουν αυξημένες πιθανότητες να καταλήξουν στις τελευταίες γενιές του αναπνευστικού συστήματος. Ο μέγιστος αριθμός εναποτιθέμενων σωματιδίων παρατηρείται περίπου στην διάμετρο των $5\mu m$ είναι

κοινό για όλες τις περιοχές του αναπνευστικού. Για την εκτός-θώρακα περιοχή η εναπόθεση παραμένει υψηλή και για μεγαλύτερα σωματίδια, ενώ για τις τραχειοβρογχική και κυψελιδική περιοχές η εναπόθεση μειώνεται αισθητά.

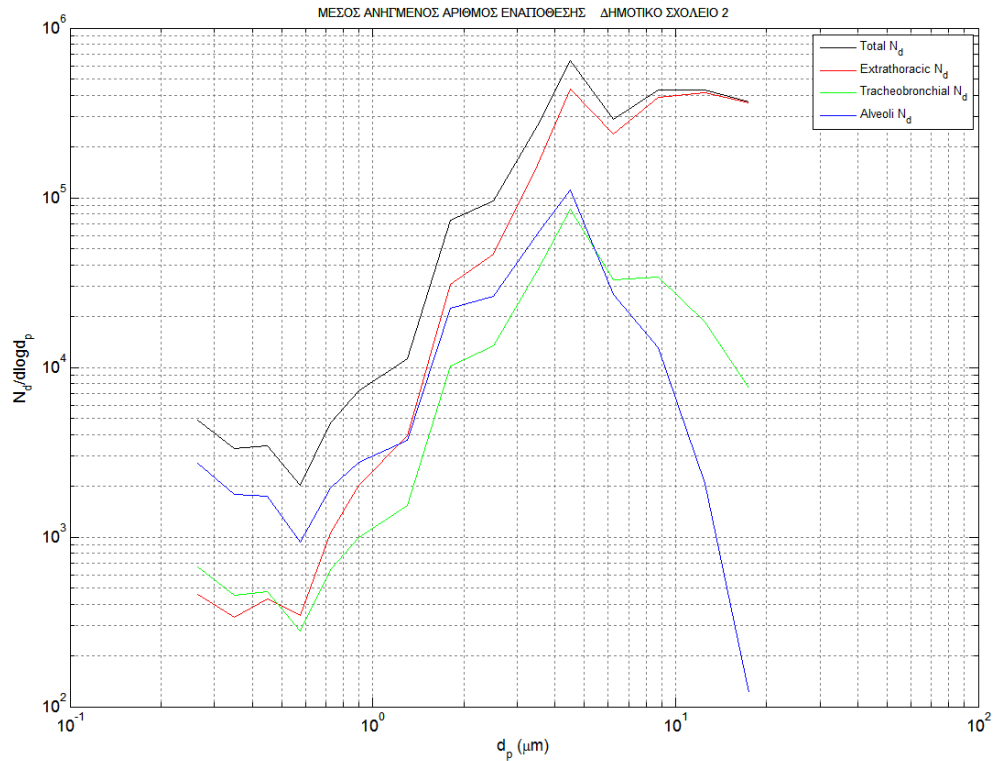
Τα διαγράμματα των δημοτικών σχολείων διαφέρουν ελάχιστα στις θέσεις που παρουσιάζουν μέγιστες τιμές (Εικόνα 7.4 και Εικόνα 7.5). Αυτό που παρατηρείται επίσης είναι ότι έχουν πανομοιότυπη μορφή στο τρόπο με τον οποίο κατανέμεται ο αριθμός των σωματιδίων στις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος. Αυτό οφείλεται στα κοινά χαρακτηριστικά και παραμέτρους που ισχύουν για τα παιδιά των δύο δημοτικών σχολείων.



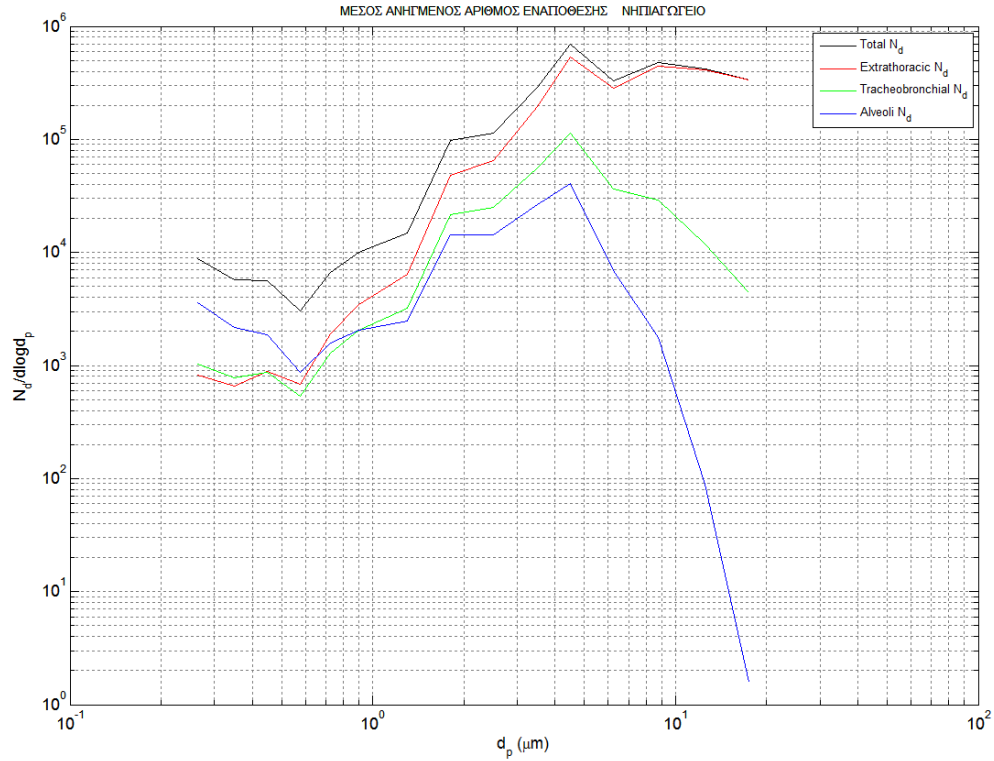
Εικόνα 7.4 Διάγραμμα μέσου αριθμού εναπόθεσης σωματιδίων – Δημοτικό Σχολείο 1, Θερμή περίοδος

Στην Εικόνα 7.6 φαίνεται ο αριθμός των εναποτιθέμενων σωματιδίων (ανά αναπνοή) ανά μέγεθος συνολικά και σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος για το Νηπιαγωγείο. Η κύρια διαφορά που παρατηρείται σε σχέση με τα διαγράμματα των δημοτικών σχολείων είναι το σημείο όπου ο αριθμός των εναποτιθέμενων σωματιδίων στην τραχειοβρογχική περιοχή γίνεται μεγαλύτερος από εκείνων στην κυψελιδική περιοχή. Στα διαγράμματα των δημοτικών σχολείων η αλλαγή συμβαίνει περίπου για σωματίδια διαμέτρου 6μm ενώ στο νηπιαγωγείο

στην διάμετρο των $0.9\mu m$. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μικρότερη εναπόθεση σωματιδίων στην κυψελιδική περιοχή του αναπνευστικού συστήματος από σωματίδια $0.9\mu m$ και άνω για τα παιδιά του νηπιαγωγείου και από σωματίδια $6\mu m$ και άνω για τα παιδιά του δημοτικού σχολείου.



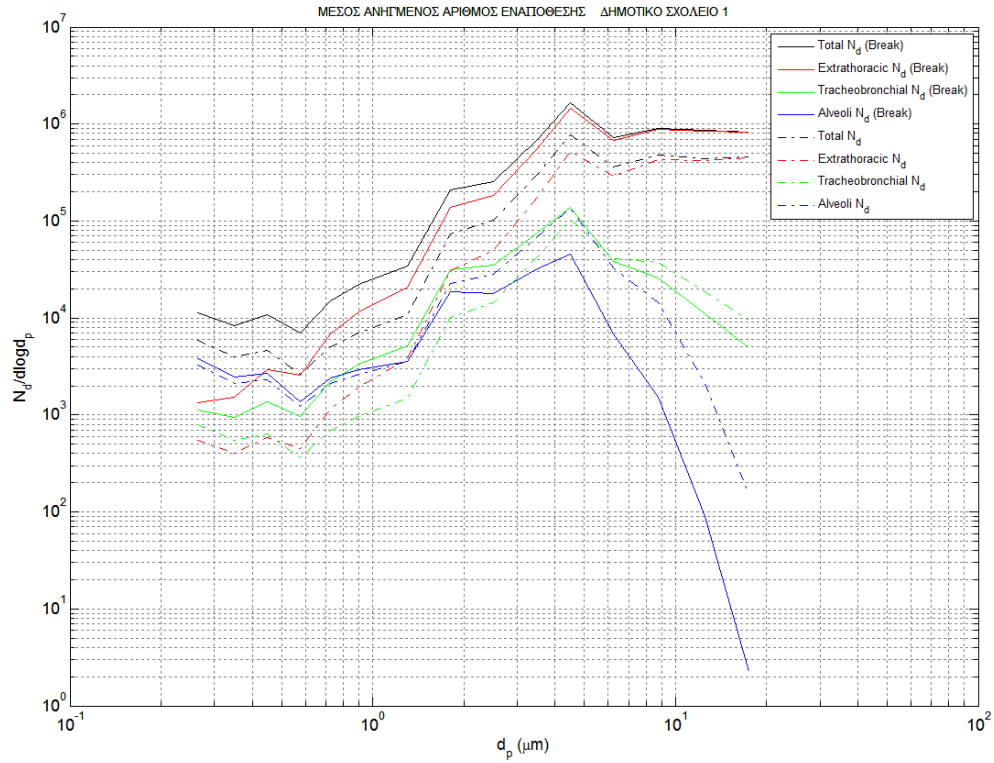
Εικόνα 7.5 Διάγραμμα μέσου αριθμού εναπόθεσης σωματιδίων – Δημοτικό Σχολείο 2, Θερμή περίοδος



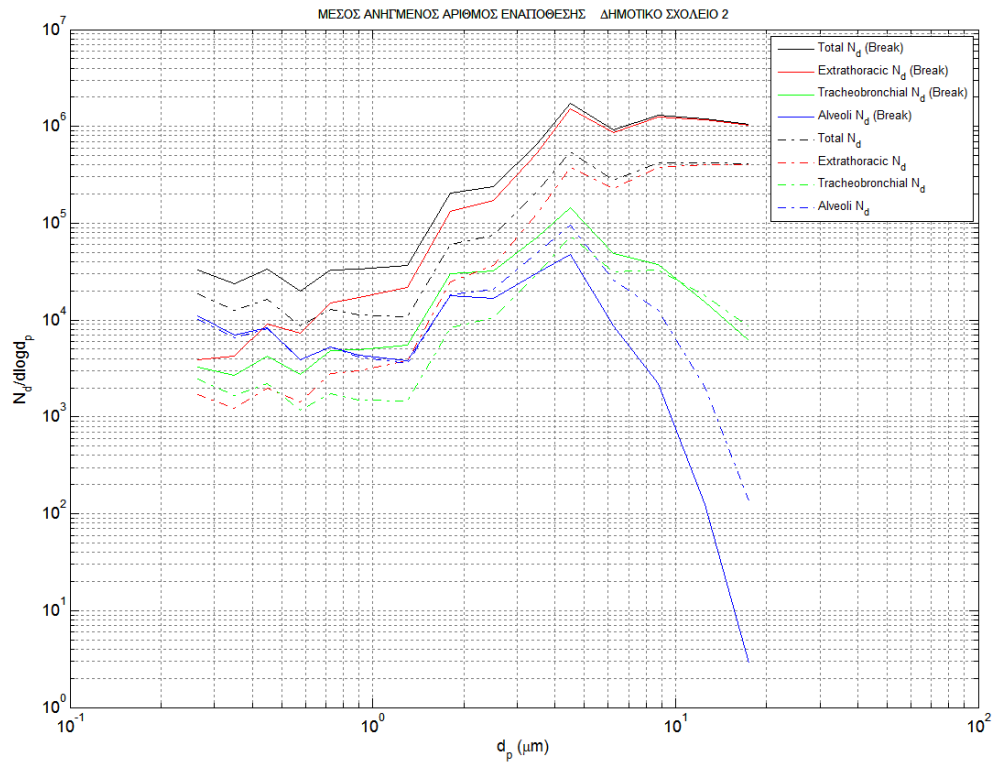
Εικόνα 7.6 Διάγραμμα μέσου αριθμού εναπόθεσης σωματιδίων – Νηπιαγωγείο, Θερμή περίοδος

Ψυχρή περίοδος

Τα διαγράμματα του μέσου αριθμού εναπόθεσης σωματιδίων (ανά αναπνοή) της ψυχρής περιόδου που αφορούν τα δύο δημοτικά σχολεία παρουσιάζουν δύο καμπύλες για κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος: μια για την ώρα του μαθήματος και μια για το διάλειμμα (Εικόνα 7.7 και Εικόνα 7.8). Η κύρια διαφορά ανάμεσα στις καμπύλες που αφορούν το μάθημα και αυτές του διαλείμματος παρατηρείται στην εκτός θώρακα περιοχή, όπου η εναπόθεση των σωματιδίων κατά την διάρκεια του διαλείμματος είναι μεγαλύτερη από εκείνη της περιόδου διδασκαλίας, γεγονός που οφείλεται στο αυξημένο επίπεδο σωματικής άσκησης στην πρώτη περίπτωση. Αντίθετα στο εσωτερικό του πνεύμονα δεν παρατηρείται το ίδιο φαινόμενο.

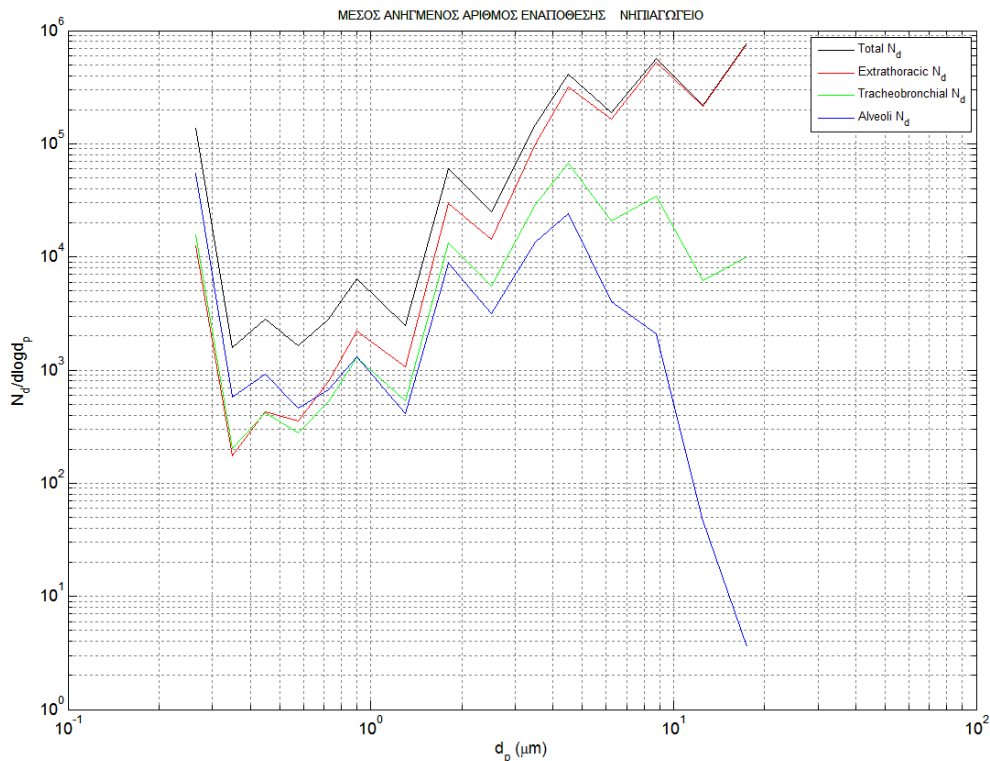


Εικόνα 7.7 Διάγραμμα μέσου αριθμού εναπόθεσης σωματιδίων – Δημοτικό Σχολείο 1, Ψυχρή περίοδος



Εικόνα 7.8 Διάγραμμα μέσου αριθμού εναπόθεσης σωματιδίων – Δημοτικό Σχολείο 2, Ψυχρή περίοδος

Παρατηρούμε ότι και στα δύο δημοτικά σχολεία η συνολική εναπόθεση ανά αναπνοή στο διάλειμμα είναι μεγαλύτερη από ότι αυτή κατά την διάρκεια του μαθήματος. Συγκεκριμένα, βρίσκουμε ότι η εναπόθεση στην εκτός-θώρακα περιοχή είναι μεγαλύτερη σε όλο το φάσμα των διαμέτρων την ώρα του διαλείμματος, η εναπόθεση στην τραχειοβρογχική περιοχή είναι μεγαλύτερη μέχρι περίπου την διάμετρο των $10\mu m$ την ώρα του διαλείμματος και η εναπόθεση στην κυψελιδική περιοχή είναι σχεδόν ίδια μέχρι την διάμετρο των $2\mu m$, ενώ μετά τα $2\mu m$ η εναπόθεση την ώρα του διαλείμματος είναι μικρότερη στην κυψελιδική περιοχή. Όσον αφορά την τραχειοβρογχική και την κυψελιδική περιοχή η αλλαγή που παρατηρείται στα $10\mu m$ και $2\mu m$ αντίστοιχα οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την διάρκεια του διαλείμματος η εντονότερη αναπνοή που εκτελούν τα παιδιά έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας εισρόφηση του αέρα στα αναπνευστικό σύστημα, με αποτέλεσμα τα συχνότερες συγκρούσεις σωματιδίων στα τοιχώματα των αεραγωγών. Έτσι τα σωματίδια εναποτίθενται ευκολότερα στην εκτός-θώρακα και τραχειοβρογχική περιοχή εξαιτίας του μηχανισμού της αδρανειακής πρόσκρουσης.



Εικόνα 7.9 Διάγραμμα μέσου αριθμού εναπόθεσης σωματιδίων – Νηπιαγωγείο, Ψυχρή περίοδος

Όπως και στο αντίστοιχο διάγραμμα της θερμής περιόδου για το Νηπιαγωγείο, έτσι και στην ψυχρή περίοδο η εναπόθεση των σωματιδίων στην τραχειοβρογχική περιοχή είναι μεγαλύτερη από την διάμετρο $0,9\mu m$ (Εικόνα 7.9), γεγονός που ενισχύει την πεποίθηση ότι η συγκεκριμένη συμπεριφορά οφείλεται στην μορφολογία του αναπνευστικού συστήματος και στις παραμέτρους φυσιολογίας των παιδιών του νηπιαγωγείου.

7.2.3 Διαγράμματα και πίνακες συνολικής εναπόθεσης σωματιδίων ανά ημέρα

Στα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάστηκαν στοιχεία που αφορούν την εναπόθεση σωματιδίων ανά αναπνοή. Στην συνέχεια παρατίθενται διαγράμματα και πίνακες, τα οποία παρουσιάζουν το ποσοστό των εναποτιθέμενων σωματιδίων κάθε διαφορετικού εύρους διαμέτρων στο σύνολο των εναποτιθέμενων σωματιδίων και το ποσοστό εναποτιθέμενων σωματιδίων για κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος στο σύνολο των εναποτιθέμενων σωματιδίων σε όλη την διάρκεια έκθεσης των παιδιών στον συγκεκριμένο χώρο, αλλά και οι συνολικές μέσες ημερήσιες δόσεις.

Η χρονική διάρκεια έκθεσης είναι το άθροισμα των χρονικών περιόδων όπου τα παιδιά βρίσκονται εντός της αίθουσας για μάθημα για τους υπολογισμούς που αφορούν στην θερμή περίοδο, ενώ συμπεριλαμβάνουν και την διάρκεια του διαλείμματος στους υπολογισμούς που αφορούν στην ψυχρή περίοδο αφού τα παιδιά παραμένουν στην τάξη. Με αυτό τον τρόπο προκύπτει η συνολική μέση ημερήσια δόση σε κάθε περίπτωση.

Αν ο συνολικός αριθμός των εναποτιθέμενων σωματιδίων ανά αναπνοή στο αναπνευστικό σύστημα είναι $N_d^{i,j}$, σε κάθε γενιά των πνευμόνων i και για κάθε διακριτή διάμετρο σωματιδίων j , τότε η ημερήσια δόση προκύπτει από την Εξίσωση (7.3):

$$Daily\ Dose = \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m N_d^{i,j} \right] \frac{t_{exp}}{T} \quad (7.3)$$

όπου t_{exp} είναι ο συνολικός χρόνος έκθεσης των παιδιών στα αιωρούμενα σωματίδια και T η περίοδος της αναπνοής (Πίνακας 8).

Στην περίπτωση της ψυχρής περιόδου όπου υπάρχουν διαφορετικά $N_d^{i,j}$ για τις χρονικές περιόδους διαλείμματος και μαθήματος, η Εξίσωση (7.1) παίρνει την μορφή:

$$Daily\ Dose = \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m N_{d,(break)}^{i,j} \right] \frac{t_{exp,(break)}}{T_{(break)}} + \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m N_d^{i,j} \right] \frac{t_{exp}}{T} \quad (7.4)$$

όπου $t_{exp,(break)}$ είναι ο συνολικός χρόνος έκθεσης των παιδιών στα αιωρούμενα σωματίδια και $T_{(break)}$ η περίοδος της αναπνοής κατά την διάρκεια του διαλείμματος.

Τα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζουν το ποσοστό όλων των σωματιδίων κάθε διακριτού εύρους διαμέτρων στο σύνολο των σωματιδίων που έχουν εναποτεθεί στο αναπνευστικό σύστημα κατά την διάρκεια της χρονικής περιόδου όπου τα παιδιά βρίσκονται εντός της αίθουσας.

Σε όλα τα διαγράμματα και πίνακες που ακολουθούν, οι τιμές για κάθε σχολείο που παρουσιάζονται αποτελούν τον μέσο όρο όλων των ημερών που πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στο συγκεκριμένο κτήριο. Έτσι οι τιμές αποτελούν μια μέση εικόνα για όλο το σχολείο.

Ο Πίνακας 9 παρουσιάζει τις μέσες ημερήσιες δόσεις ανά σχολικό κτήριο δηλαδή τις μέσες τιμές όλων των ημερών που πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και για όλες τις αίθουσες του σχολικού κτηρίου αθροιστικά για όλο τον πληθυσμό των σωματιδίων.

Πίνακας 9 Μέση ημερήσια δόση σε αριθμό σωματιδίων ανά σχολείο και περίοδο

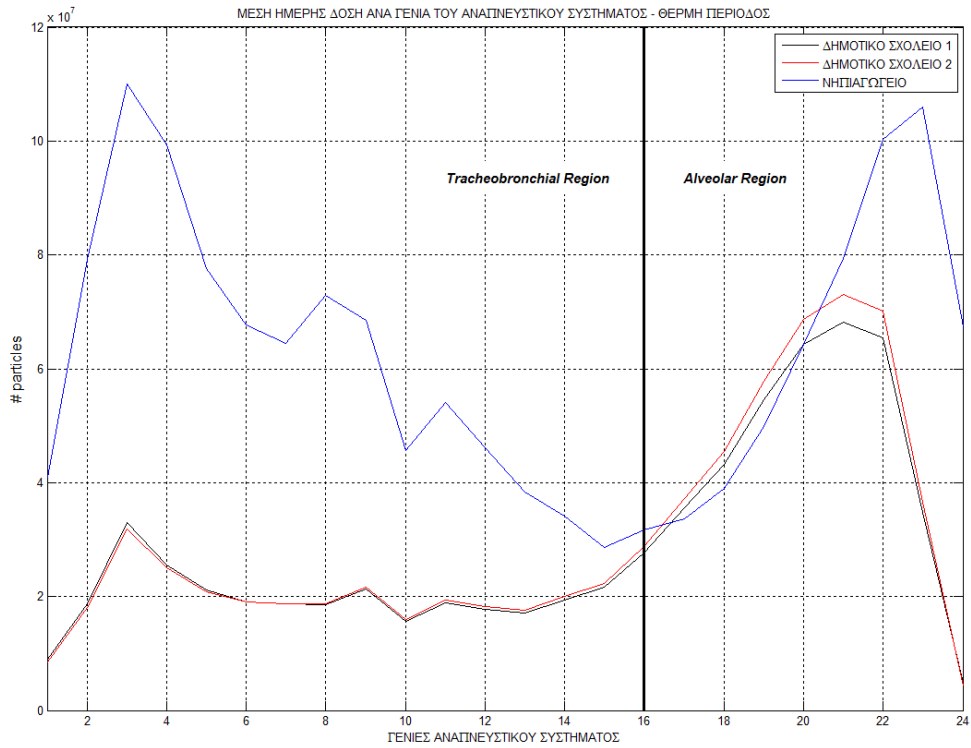
	Μέση ημερήσια δόση θερμή περίοδος [# σωματιδίων]	Μέση ημερήσια δόση ψυχρή περίοδος [# σωματιδίων]
Δημοτικό Σχολείο 1	3,84E+09	8,36E+09
Δημοτικό Σχολείο 2	3,65E+09	6,92E+09
Νηπιαγωγείο	9,32E+09	7,95E+09

Παρόλο που ο αριθμός των εναποτιθέμενων σωματιδίων ανά αναπνοή είναι αντίστοιχα (Εικόνα 7.4 - Εικόνα 7.6), η μέση ημερήσια δόση στο νηπιαγωγείο είναι υπερδιπλάσια της δόσης στα δημοτικά σχολεία κατά την θερμή περίοδο. Αυτό ενδεχομένως οφείλεται στο ότι τα νήπια περνούν όλη την σχολική μέρα εντός της αίθουσας αλλά σε κατάσταση ελαφράς σωματικής άσκησης, επομένως η συχνότητα αναπνοής τους είναι αυξημένη. Καθώς τόσο τα

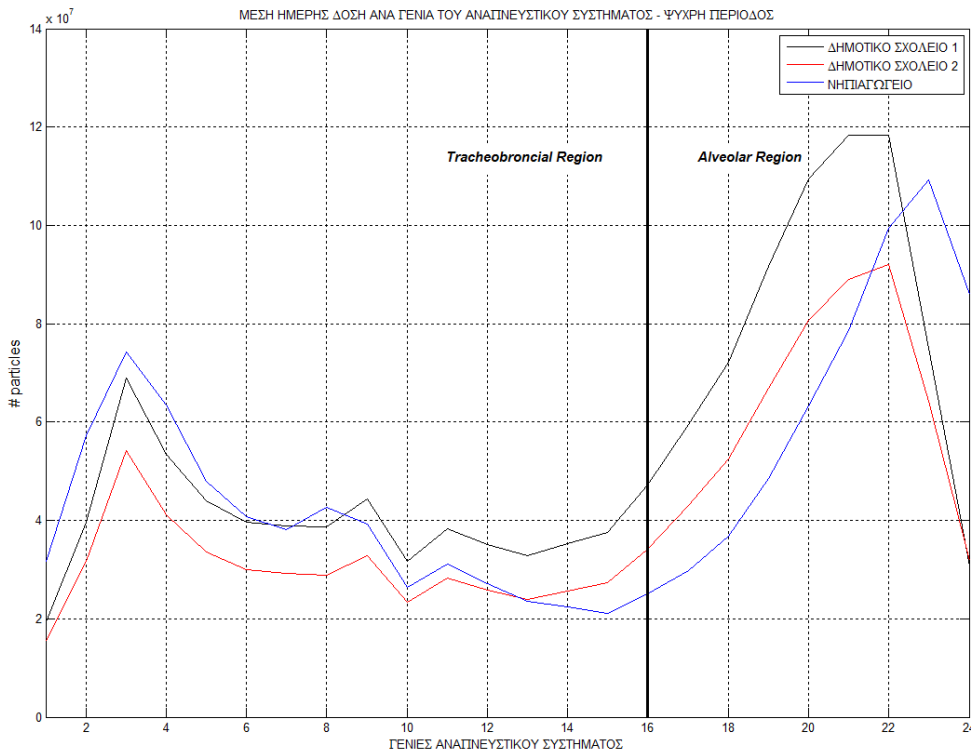
νήπια όσο και τα παιδιά του δημοτικού βρίσκονται περίπου τέσσερις ώρες μέσα στις σχολικές αίθουσες, αυτό σημαίνει ότι τα νήπια συνολικά θα πάρουν περισσότερες αναπνοές στο ίδιο διάστημα από ότι τα μεγαλύτερα παιδιά.

Κατά την ψυχρή περίοδο, όπου και τα παιδιά του δημοτικού περνούν το διάλειμμά τους μέσα στην αίθουσα, η διαφορά ανάμεσα στα δημοτικά σχολεία και το νηπιαγωγείο μειώνεται. Η σημαντική αύξηση της ημερήσιας δόσης στα δημοτικά σχολεία οφείλεται στο γεγονός ότι ο πρόσθετος χρόνος που περνούν τα παιδιά στην τάξη για το διάλειμμα (περίπου 40-50 λεπτά), υπολογίζεται με αυξημένο επίπεδο άσκησης, οπότε και με αυξημένη συχνότητα αναπνοής.

Τα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζουν τον μέσο συνολικό αριθμό εναποτιθέμενων σωματιδίων ανά γενιά του αναπνευστικού συστήματος (θωρακικής περιοχής) για κάθε σχολείο ([Εικόνα 7.10](#) και [Εικόνα 7.11](#)). Έτσι δίνεται μια ακριβέστερη εικόνα για τους μέσους συνολικούς αριθμούς εναπόθεσης των σωματιδίων σε κάθε τμήμα της θωρακικής περιοχής του αναπνευστικού συστήματος. Τα διαγράμματα παρουσιάζουν ένα κοινό γνώρισμα ως προς την μορφή τους: παρατηρείται ένα μέγιστο στην 3^η γενιά του πνεύμονα, το οποίο σχετίζεται με την απότομη μείωση της διατομής και την ύπαρξη διακλαδώσεων καθώς τα σωματίδια κατευθύνονται προς το εσωτερικό του πνεύμονα. Πολλά σωματίδια μεγαλύτερων διαμέτρων όταν συναντήσουν στένωση διατομής ή διακλάδωση στην αναπνευστική οδό αδυνατούν λόγω της αδράνειάς τους να αλλάξουν κατεύθυνση, με αποτέλεσμα να συγκρούονται και να εναποτίθενται στα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού. Μεταξύ των γενιών 21 και 23 παρατηρείται ακόμα μία περιοχή μεγίστου. Η μεγάλη συγκέντρωση σωματιδίων σε αυτή την περιοχή σχετίζεται με το γεγονός ότι βρισκόμαστε στο τελευταίο κομμάτι της διαδρομής που μπορούν να διανύσουν τα αιωρούμενα σωματίδια μέσα στον πνεύμονα. Έτσι όσα σωματίδια – κυρίως μικρότερων διαμέτρων – έχουν καταφέρει να φτάσουν στις τελευταίες γενιές του πνεύμονα εναποτίθενται στις τελευταίες γενιές της κυψελιδικής περιοχής όπου πλέον η διατομές των αγωγών είναι κατά πολύ μικρότερες σε σχέση με τους υπόλοιπους αγωγούς της κυψελιδικής περιοχής.



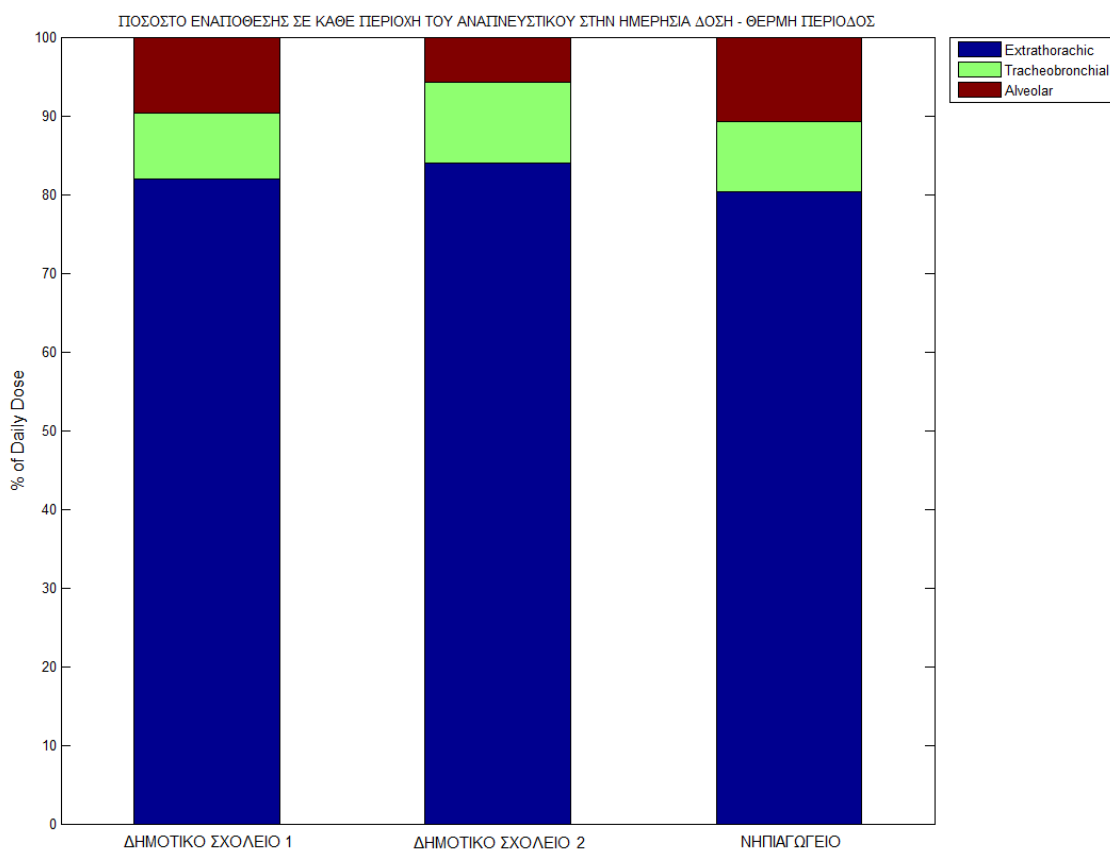
Εικόνα 7.10 Κατανομή μέσης ημερήσιας δόσης στις γενιές του πνεύμονα - Θερμή περίοδος



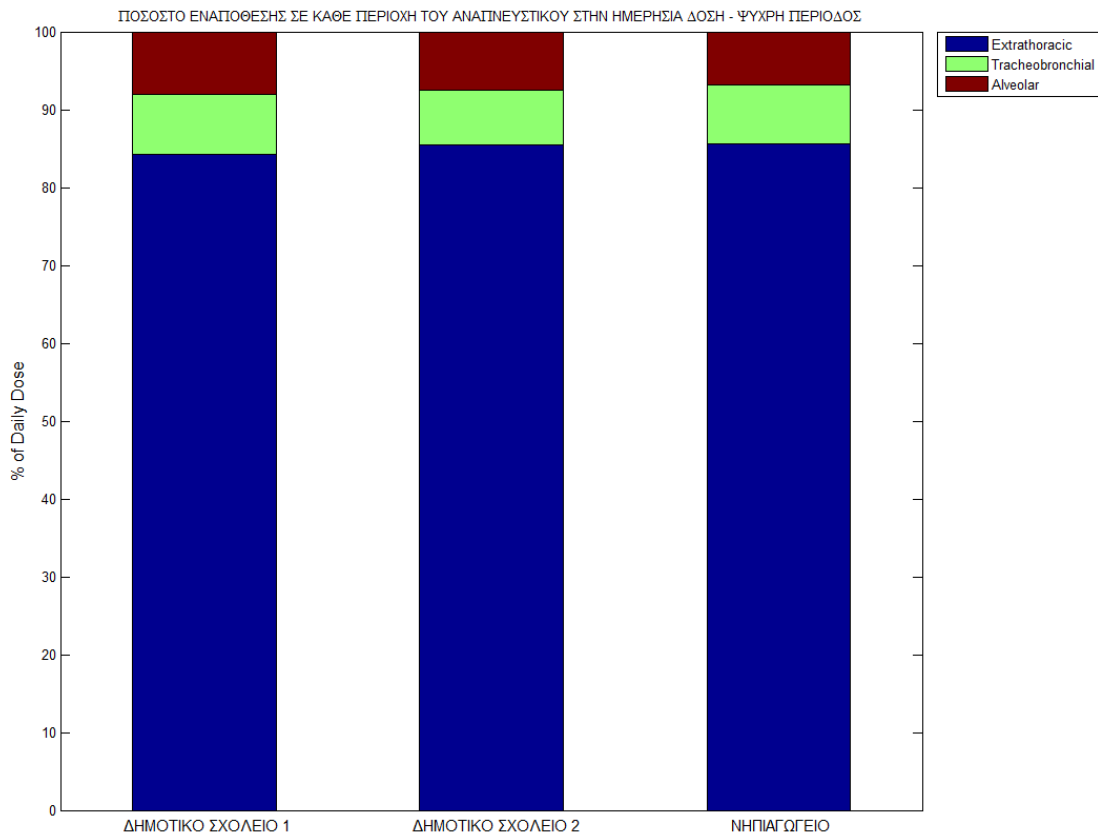
Εικόνα 7.11 Κατανομή μέσης ημερήσιας δόσης στις γενιές του πνεύμονα - Ψυχρή περίοδος

Για την ψυχρή περίοδο (Εικόνα 7.11) οι καμπύλες για όλα τα σχολεία παρουσιάζουν τα ίδια ποιοτικά χαρακτηριστικά, παρόλο που ποσοτικά διαφέρουν ελαφρά. Αντίθετα, την θερμή περίοδο (Εικόνα 7.10) η καμπύλη που αντιστοιχεί στο Νηπιαγωγείο διαφέρει και ποιοτικά από αυτές των δύο δημοτικών σχολείων. Συμπεραίνουμε ότι η αυξημένη μέση ημερήσια δόση για τα νήπια σε αυτή την περίπτωση (Πίνακας 9), επιβαρύνει κυρίως το ανώτερο αναπνευστικό σύστημα των νηπίων (γενιές 0-14).

Τα παραπάνω συμπεράσματα ενισχύονται και από την κατανομή της μέσης ημερήσιας δόσης στις διάφορες περιοχές του αναπνευστικού συστήματος (Εικόνα 7.12 και Εικόνα 7.13). Στα διαγράμματα αυτά φαίνεται ακόμα πιο ξεκάθαρα ότι η εναπόθεση των σωματιδίων γίνεται κυρίως στην εκτός-θώρακα περιοχή σε ποσοστό που ξεπερνά το 80%. Το υπόλοιπο περίπου 20% της ημερήσιας δόσης εισέρχεται στα θωρακικά τμήματα του αναπνευστικού συστήματος και στις περισσότερες περιπτώσεις σχεδόν μοιράζεται μεταξύ της τραχειοβρογχικής και της κυψελιδικής περιοχής.

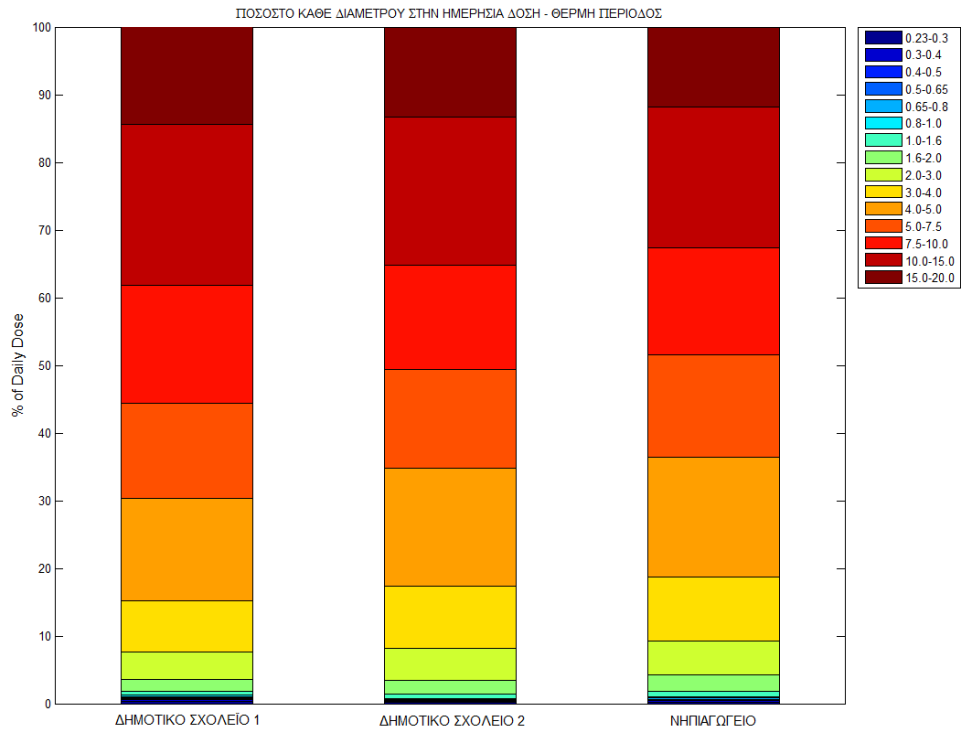


Εικόνα 7.12 Κατανομή μέσης ημερήσιας δόσης στις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος – Θερμή περίοδος

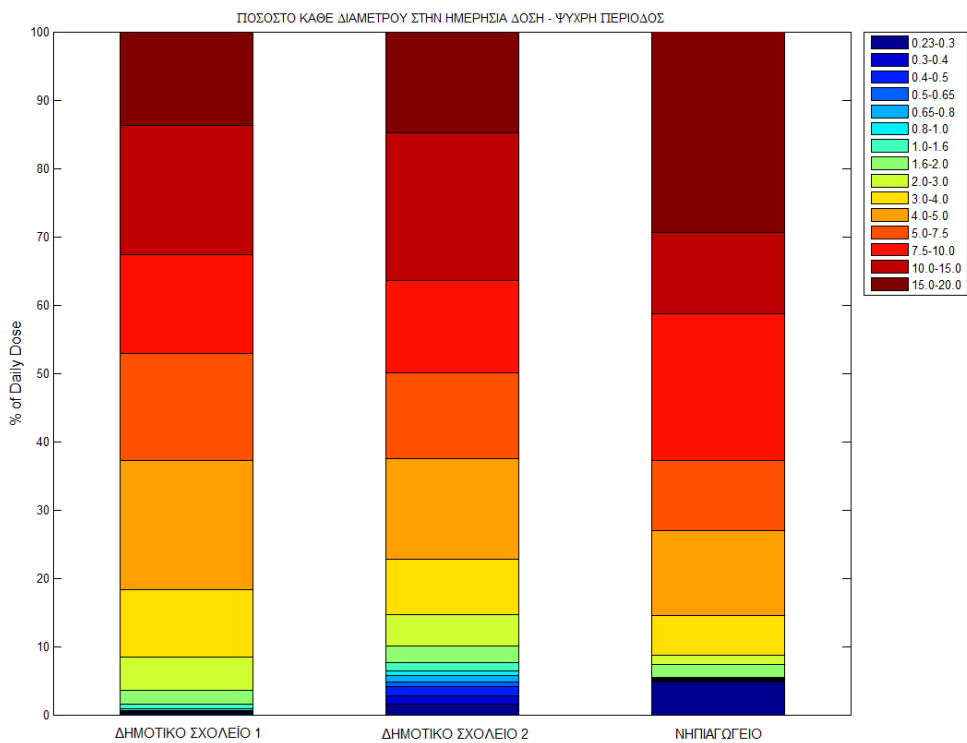


Εικόνα 7.13 Κατανομή μέσης ημερήσιας δόσης στις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος – Ψυχρή περίοδος

Οι Εικόνα 7.14 και Εικόνα 7.15 παρουσιάζουν την συνεισφορά κάθε μεγέθους σωματιδίων στη συνολική ημερήσια δόση για την θερμή και την ψυχρή περίοδο, αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι και στις δύο περιόδους μέτρησης, τα σωματίδια μεγέθους μέχρι $3.0 \mu m$ συνεισφέρουν αθροιστικά λιγότερο από 15% στη συνολική μέση ημερήσια δόση, ενώ τα μεγάλα σωματίδια ($>7.5 \mu m$) συνεισφέρουν ως και 60% στη μέση ημερήσια δόση. Επιπλέον παρατηρούνται μικρές αλλαγές στα ποσοστά των διαφορετικών διαμέτρων από αίθουσα σε αίθουσα που είναι πιθανόν να σχετίζονται με την γεωμετρία της αίθουσας, την κατάσταση της ατμόσφαιρας, τον εξαερισμό και την δραστηριότητα των παιδιών μέσα σε κάθε αίθουσα. Αυτό φαίνεται ακόμα πιο ξεκάθαρα στα αντίστοιχα διαγράμματα, τα οποία παρουσιάζουν το ποσοστό συνεισφοράς κάθε διαμέτρου στην ημερήσια δόση για κάθε αίθουσα ξεχωριστά, στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.



Εικόνα 7.14 Συνεισφορά κάθε τάξης μεγέθους σωματιδίων στην μέση ημερήσια δόση – Θερμή περίοδος



Εικόνα 7.15 Συνεισφορά κάθε τάξης μεγέθους σωματιδίων στην μέση ημερήσια δόση – Ψυχρή περίοδος

Τέλος, ο Πίνακας 10 παρουσιάζει το συνολικό κλάσμα εναπόθεσης για κάθε σχολείο, δηλαδή το ποσοστό των σωματιδίων που εναποτέθηκαν στο αναπνευστικό σύστημα σε σχέση με το σύνολο των σωματιδίων που εισέπνευσαν τα παιδιά για την χρονική διάρκεια βρισκόνταν στις αίθουσες για μάθημα ή διάλειμμα. Το συνολικό κλάσμα εναπόθεσης υπολογίζεται από την Εξίσωση (6.21) στην παράγραφο 6.5.

Πίνακας 10 Συνολικό κλάσμα εναπόθεσης θερμής και ψυχρής περιόδου για κάθε κτήριο

	Συνολικό κλάσμα εναπόθεσης θερμή περίοδος	Συνολικό κλάσμα εναπόθεσης ψυχρή περίοδος
Δημοτικό Σχολείο 1	92,40%	94,57%
Δημοτικό Σχολείο 2	93,34%	91,41%
Νηπιαγωγείο	93,86%	84,17%

Επειδή όπως είδαμε η έκθεση των παιδιών σε όλες τις περιπτώσεις αφορούσε σε σωματίδια μεγαλύτερων διαμέτρων, το συνολικό κλάσμα εναπόθεσης είναι πολύ υψηλό, αλλά όπως παρουσιάζουν οι Εικόνα 7.12 και Εικόνα 7.13 τη μεγαλύτερη επιβάρυνση δέχεται η εκτός θώρακα περιοχή.

Τέλος, επισημαίνεται ότι στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β, παρατίθενται αντίστοιχα διαγράμματα και πίνακες με τους υπολογισμούς που αφορούν σε κάθε αίθουσα ξεχωριστά όλων το σχολικών κτηρίων και για τις δύο περιόδους μετρήσεων.

8 Συμπεράσματα

Σκόπος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η εκτίμηση της συγκέντρωσης των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα παιδιών σχολικής και προσχολικής ηλικίας. Βάσει του ευρωπαϊκού προγράμματος SINFONIE πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις αιωρούμενων σωματιδίων εύρους $0.23\mu m$ έως $20\mu m$ σε δύο δημοτικά σχολεία και ένα νηπιαγωγείο. Σε κάθε σχολικό κτήριο επιλέγονταν συγκεκριμένες αίθουσες όπου πραγματοποιούνταν οι μετρήσεις σε δύο περιόδους, θερμή και ψυχρή. Στην συνέχεια οι μετρήσεις των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων εισήχθησαν ως δεδομένα στο αριθμητικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του διδακτορικού της Χρ.Μητσάκου (2006), ώστε να υπολογιστεί ο αριθμός των σωματιδίων που εναποτίθενται στο αναπνευστικό σύστημα των παιδιών. Το αριθμητικό μοντέλο υπολογίζει τον αριθμό το σωματιδίων που εναποτίθενται σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος (εκτός-θώρακα, τραχειοβρογχική και κυψελιδική περιοχή) ανά αναπνοή. Μετά από επεξεργασία τα αποτελέσματα του αριθμητικού μοντέλου παρουσιάζουν τις συνολικές ημερήσιες δόσης για κάθε σχολείο και πως αυτές κατανέμονται στις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος.

Από την επεξεργασία των δεδομένων έκθεσης τα οποία ελήφθησαν κατά την διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων, παρατηρούμε ότι κατά τις δύο περιόδους δειγματοληψίας:

- Η συγκέντρωση των σωματιδίων με διαμέτρους μεγαλύτερων του $1\mu m$ είναι περίπου μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή των μικρότερων σωματιδίων σε όλα τα σχολεία και ανεξάρτητα από εποχής.
- Η μόνη διαφορά ανάμεσα στα σχολεία ήταν ότι οι συγκεντρώσεις των μικρότερων σωματιδίων στο Δημοτικό Σχολείο 2 ήταν μικρότερες σε σχέση με τα άλλα δύο, γεγονός που οφείλεται στο ότι το σχολείο αυτό βρίσκεται έξω από το κέντρο της πόλης, με βλάστηση και ελάχιστη κίνηση οχημάτων.
- Η συγκέντρωση των σωματιδίων μεγαλύτερων του $1\mu m$ παρουσιάζει διακυμάνσεις εντός της ημέρας. Τα σωματίδια αυτά λόγω μεγέθους καθιζάνουν γρήγορα όταν δεν υπάρχει κίνηση στην αίθουσα, αλλά στις περιόδους κίνησης

των μαθητών επαναιωρούνται στην αίθουσα και συνεισφέρουν στην έκθεση των μαθητών.

- Οι διακυμάνσεις των μικρότερων σωματιδίων κατά την ψυχρή περίοδο παραμένουν το ίδιο σταθερές με εκείνες της θερμής περιόδου. Τα μικρότερα σωματίδια λόγω του βάρους τους δεν έχουν την ίδια συμπεριφορά με τα μεγαλύτερα σωματίδια. Η κύρια πηγή επαναιώρησης, δηλαδή η κινητικότητα των μαθητών στην αίθουσα, δεν επηρεάζει τις μετρούμενες συγκεντρώσεις των μικρότερων σωματιδίων. Η αιώρησή τους συνεχίζεται μετά το πέρας των ωρών διδασκαλίας και η συγκέντρωσή τους φθίνει με σημαντικό μικρότερο ρυθμό σε σχέση με εκείνον των μεγαλύτερων σωματιδίων. Τυχαίες διακυμάνσεις που παρατηρούνται κατά την διάρκεια της ημέρας στα μικρότερα σωματίδια πιθανόν οφείλονται στην χρήση χημικών για τον καθαρισμό της αίθουσας όπως η χλωρίνη και άλλα καθαριστικά με βάση την αμμωνία.

Τα αποτελέσματα του υπολογιστικού μοντέλου σχετικά με την εναπόθεση σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα, κατέδειξαν τα ακόλουθα σχετικά με την επικάθιση των σωματιδίων ανά αναπνοή:

- Το κοινό γνώρισμα σε όλες τις περιπτώσεις είναι η αυξημένη συγκέντρωση των σωματιδίων στην εκτός-θώρακα περιοχή του αναπνευστικού συστήματος. Αυτό οφείλεται στη σύνθεση του αερολύματος κυρίως από μεγάλα σωματίδια ($\gg 1\mu m$). Τα μεγαλύτερα σωματίδια λόγω αυξημένης αδράνειας είναι πιθανότερο να συγκρουστούν με τις επιφάνειες του ρινικού τοιχώματος καθώς εισέρχονται στην αναπνευστική οδό και να εναποτεθούν εκεί.
- Η δόση στην τραχειοβρογχική και κυψελιδική περιοχή είναι πολύ χαμηλότερες και αποτελούνται κυρίως από σωματίδια μικρότερων διαμέτρων. Τα σωματίδια μικρότερων διαμέτρων λόγω της μικρότερης αδράνειας που τα χαρακτηρίζει ακολουθούν ευκολότερα το ρεύμα αέρα εντός της αναπνευστικής οδού με αποτέλεσμα να έχουν αυξημένες πιθανότητες να ξεπεράσουν την εκτός-θώρακα περιοχή και να φθάσουν βαθύτερα στον πνεύμονα.

- Τα νήπια σε σχέση με τα παιδιά του δημοτικού σχολείου παρουσιάζουν αυξημένο κλάσμα εναπόθεσης στην εκτός-θώρακα και τραχειοβρογχική περιοχή, ενώ τα κλάσματα εναπόθεσης στην κυψελιδική περιοχή είναι μικρότερα. Αυτό σημαίνει ότι τα σωματίδια εναποτίθενται κυρίως στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα με αποτέλεσμα να μειώνεται ο αριθμός των σωματιδίων που καταλήγουν στην κυψελιδική περιοχή.
- Το επίπεδο σωματικής άσκησης επηρεάζει τόσο την συχνότητα αναπνοής όσο και την ταχύτητα με την οποία ο αέρας εισέρχεται εντός της αναπνευστικής οδού. Μεγαλύτερη ταχύτητα αέρα σημαίνει αυξημένη πιθανότητα συγκρούσεων των σωματιδίων με τα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού. Επομένως, σωματίδια που πιθανόν θα έφθαναν βαθύτερα εντός του πνεύμονα πλέον είναι πιθανότερο να εναποτεθούν στην εκτός-θώρακα περιοχή. Η εναπόθεση στην εκτός-θώρακα και τραχειοβρογχική περιοχή είναι αυξημένη για παιδιά τα οποία εκτελούσαν εντονότερη σωματική άσκηση.
- Τα αποτελέσματα για την ψυχρή περίοδο που αφορούν στην ώρα του διαλείμματος για τα παιδιά του δημοτικού και όλο το διάστημα για τα νήπια, μπορούν να μας δώσουν μια εικόνα για την επίδραση της ηλικίας στο κλάσμα εναπόθεσης αφού και στις δύο περιπτώσεις υποθέσαμε ότι τα παιδιά βρίσκονται σε κατάσταση ελαφριάς σωματικής άσκησης. Συγκεκριμένα, προκύπτει ότι το κλάσμα εναπόθεσης στην εκτός-θώρακα περιοχή είναι μεγαλύτερο για τα παιδιά του δημοτικού σχολείου, ενώ η εναπόθεση στην τραχειοβρογχική και κυψελιδική περιοχή είναι μεγαλύτερη για τα νήπια. Φαίνεται ότι το αναπνευστικό σύστημα των μεγαλύτερων σε ηλικία παιδιών είναι πιο ικανό στο να δεσμεύει τα αιωρούμενα σωματίδια στην εκτός-θώρακα περιοχή ώστε να μην καταλήγουν στον πνεύμονα.

Όσον αφορά τη συνολική μέση ημερήσια δόση στο αναπνευστικό σύστημα παρατηρήσαμε τα ακόλουθα:

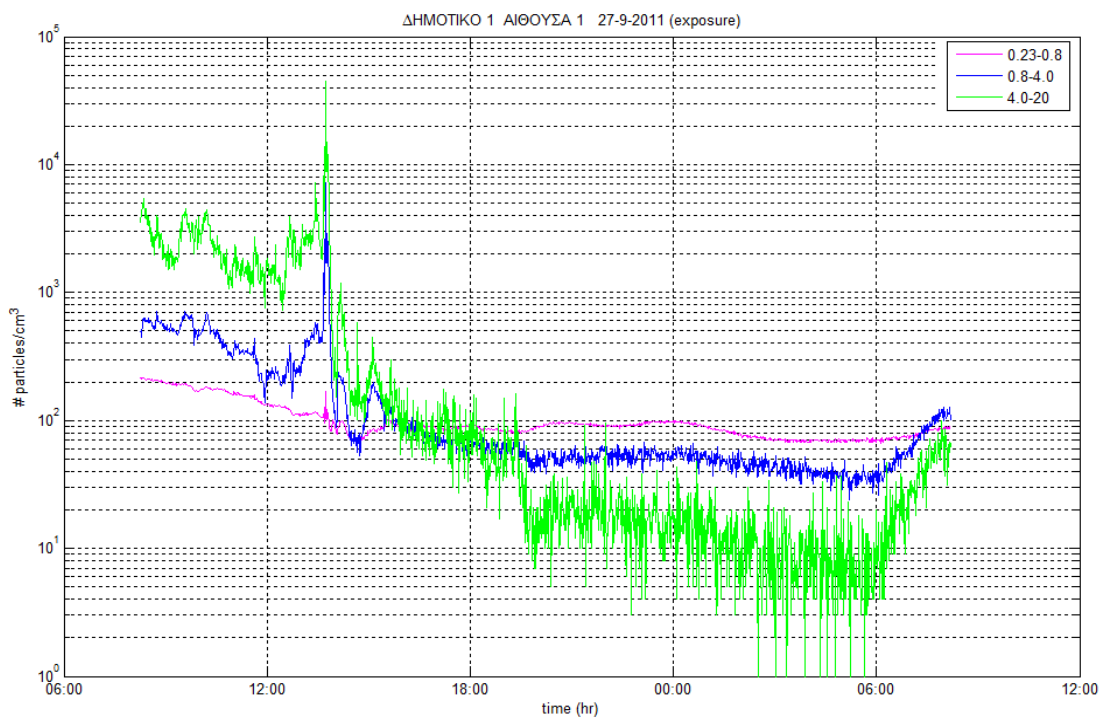
- Η μέση ημερήσια δόση στα νήπια είναι υπερδιπλάσια της δόσης των παιδιών δημοτικού κατά την θερμή περίοδο, γεγονός που αποδίδεται στο αυξημένο επίπεδο σωματικής άσκησης αλλά και στην διάρκεια παραμονής τους στην αίθουσα.
- Στην ψυχρή περίοδο όπου και τα παιδιά του δημοτικού βρίσκονται όλη την ώρα στις αίθουσες, οι μέσες ημερήσιες δόσεις είναι ανάλογες για όλα τα σχολεία.
- Η κατανομή της δόσης στις γενιές του πνεύμονα παρουσιάζει ένα τοπικό μέγιστο στην Τρίτη γενιά, το οποίο σχετίζεται με την απότομη μείωση της διατομής των αεραγωγών και τις διακλαδώσεις που οδηγεί σε αυξημένη εναπόθεση των σωματιδίων.
- Τουλάχιστον το 80% της ημερήσιας δόσης επιβαρύνει την εκτός-θώρακα περιοχή, που οφείλεται στο ότι η έκθεση αφορά κυρίως μεγάλα σωματίδια ($\gg 1\mu m$).
- Περισσότερο από το 95% της ημερήσιας δόσης οφείλεται στα σωματίδια με διάμετρο ($\gg 1\mu m$).

Η εργασία θα μπορούσε να βελτιωθεί αν είχαμε περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των σωματιδίων, για παράδειγμα την πυκνότητα τους ή την τάση τους να συσσωματώνονται, καθώς αυτά επηρεάζουν τον τρόπο που τα σωματίδια κινούνται και επικάθονται στο αναπνευστικό σύστημα. Μελλοντικά, το μοντέλο εναπόθεσης των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα θα μπορούσε να συνδυαστεί και με άλλα μοντέλα, για παράδειγμα φαρμακοκινητικής, ώστε να προσδιοριστούν οι δόσεις τόσο στο αναπνευστικό σύστημα όσο και σε παρακείμενους ιστούς που οφείλονται σε μακροχρόνια έκθεση στα αιωρούμενα σωματίδια. Τέλος, ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας με τοξικολογικά δεδομένα θα μας βοηθούσε να εξάγουμε συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των σωματιδίων στην υγεία των παιδιών.

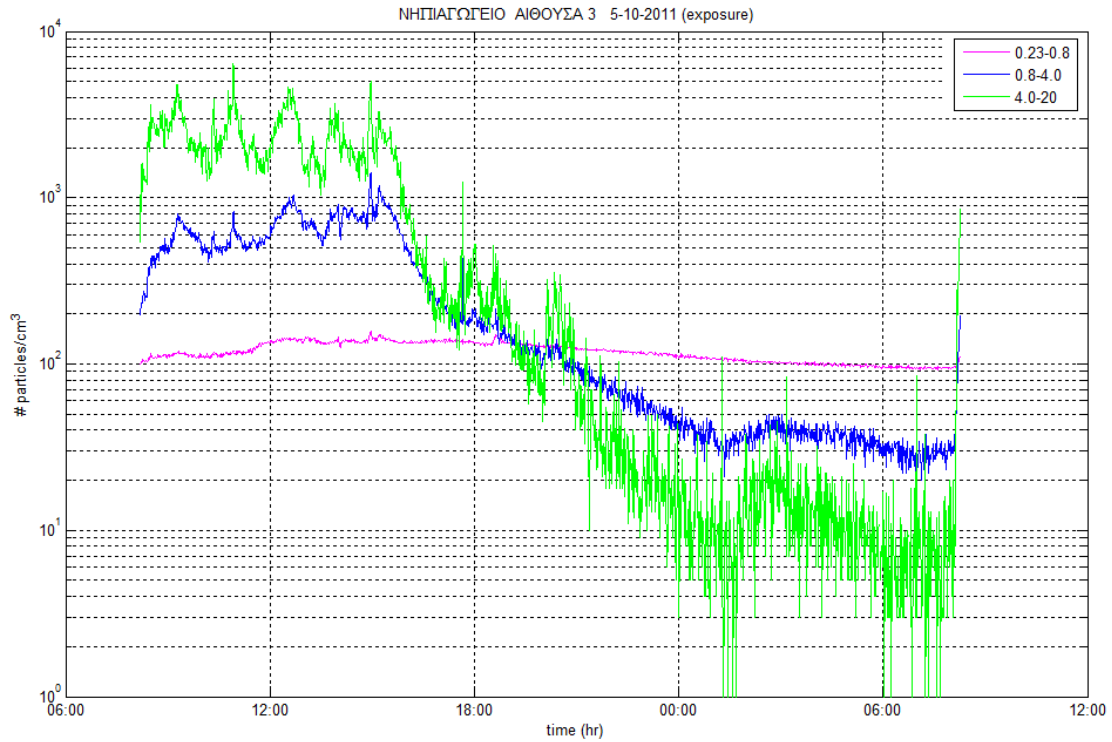
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται λεπτομέρειες σχετικά με τις πειραματικές μετρήσεις εντός των σχολικών αιθουσών.

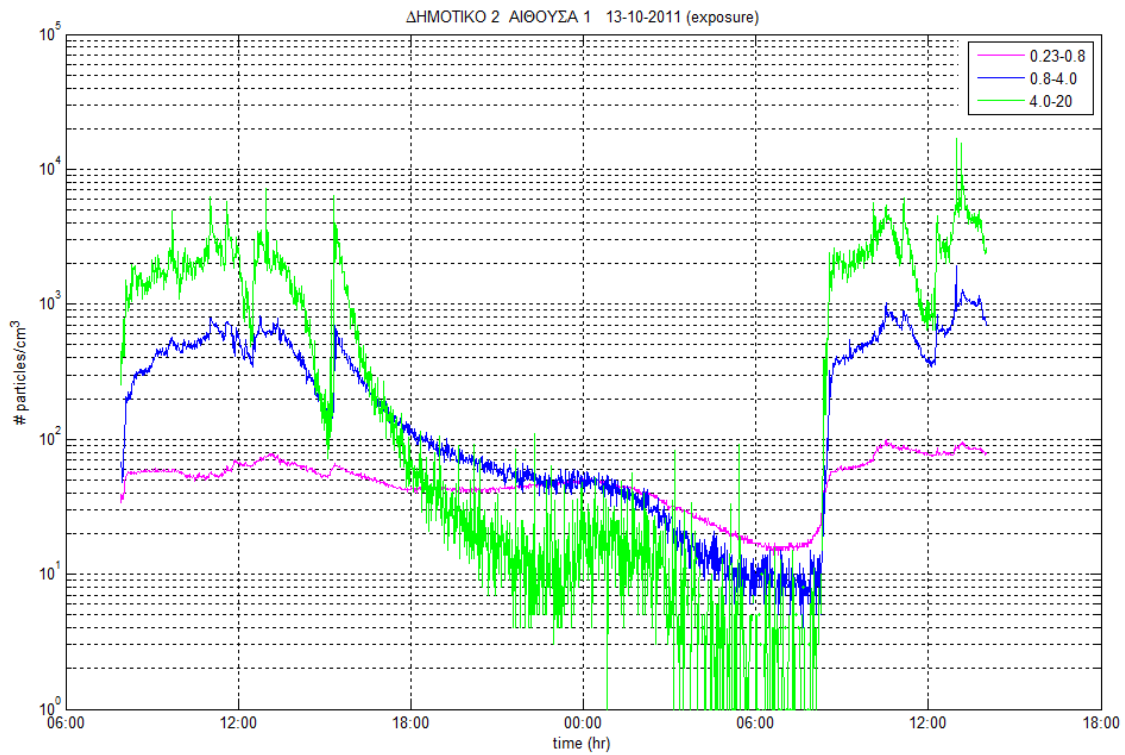
Διαγράμματα ομαδοποιημένων διαμέτρων θερμής περιόδου



Εικόνα Α.1 Διάγραμμα χρονοσειράς αθροισμένων διαμέτρων - Δημοτικό Σχολείο 1, Θερμή περίοδος

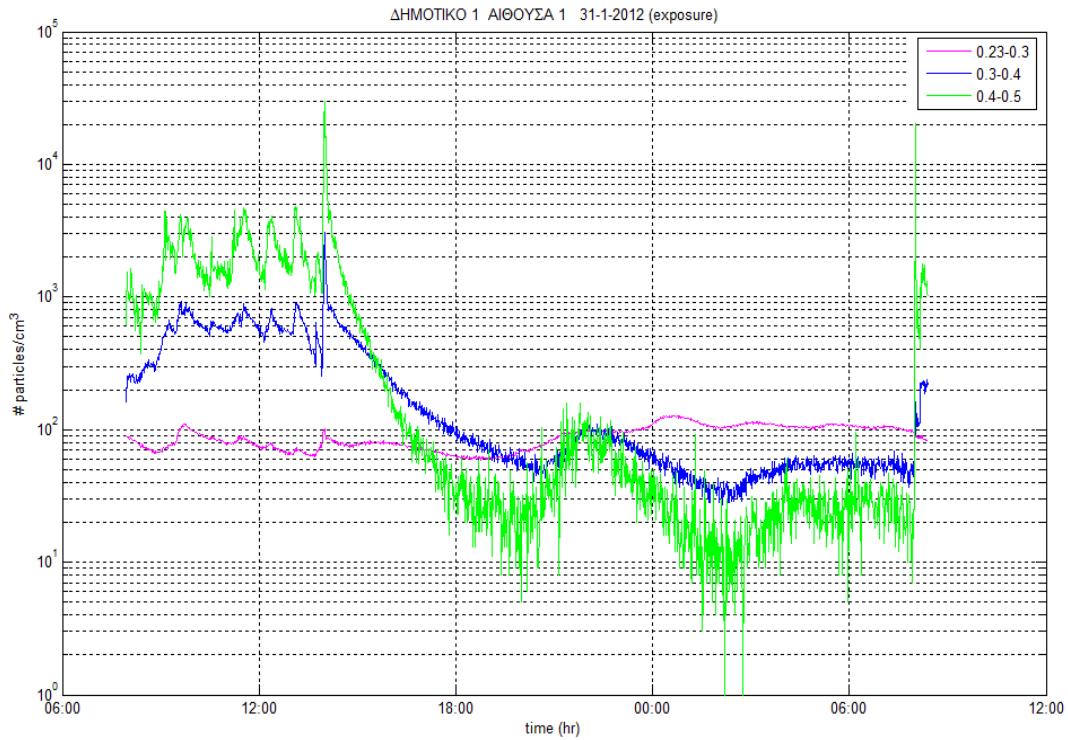


Εικόνα Α.2 Διάγραμμα χρονοσειράς αθροισμένων διαμέτρων – Νηπιαγωγείο, Θερμή περίοδος

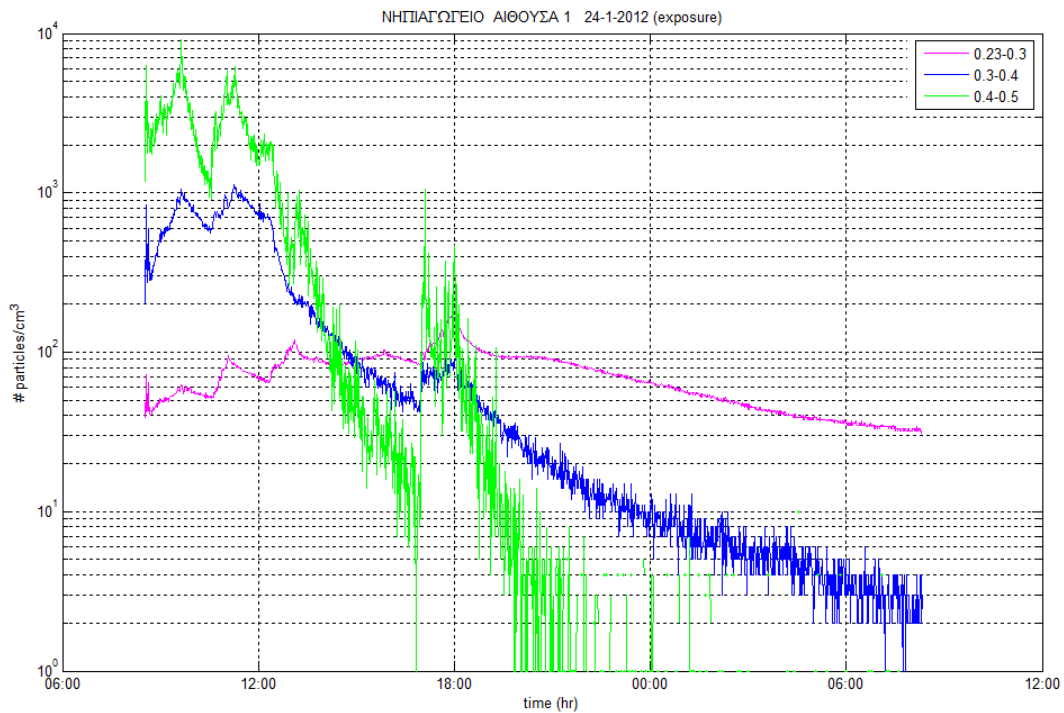


Εικόνα Α.3 Διάγραμμα χρονοσειράς αθροισμένων διαμέτρων - Δημοτικό Σχολείο 2, Θερμή περίοδος

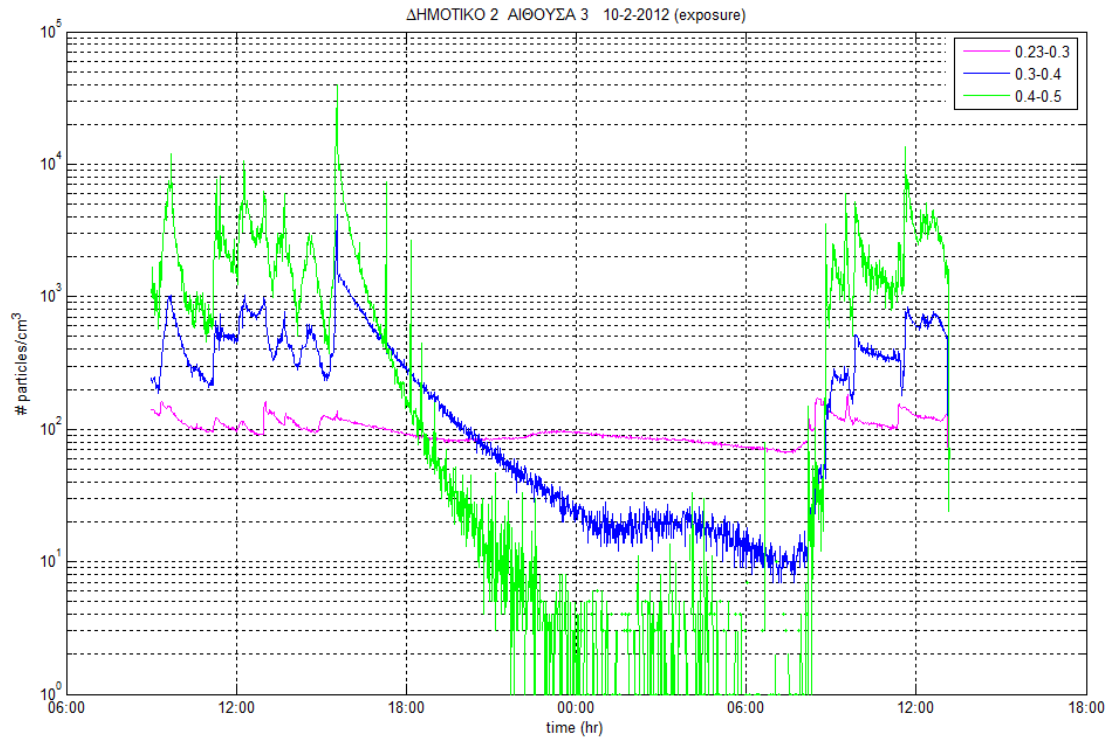
Διαγράμματα ομαδοποιημένων διαμέτρων ψυχρής περιόδου



Εικόνα Α.4 Διάγραμμα χρονοσειράς αθροισμένων διαμέτρων - Δημοτικό Σχολείο 1, Ψυχρή περίοδος

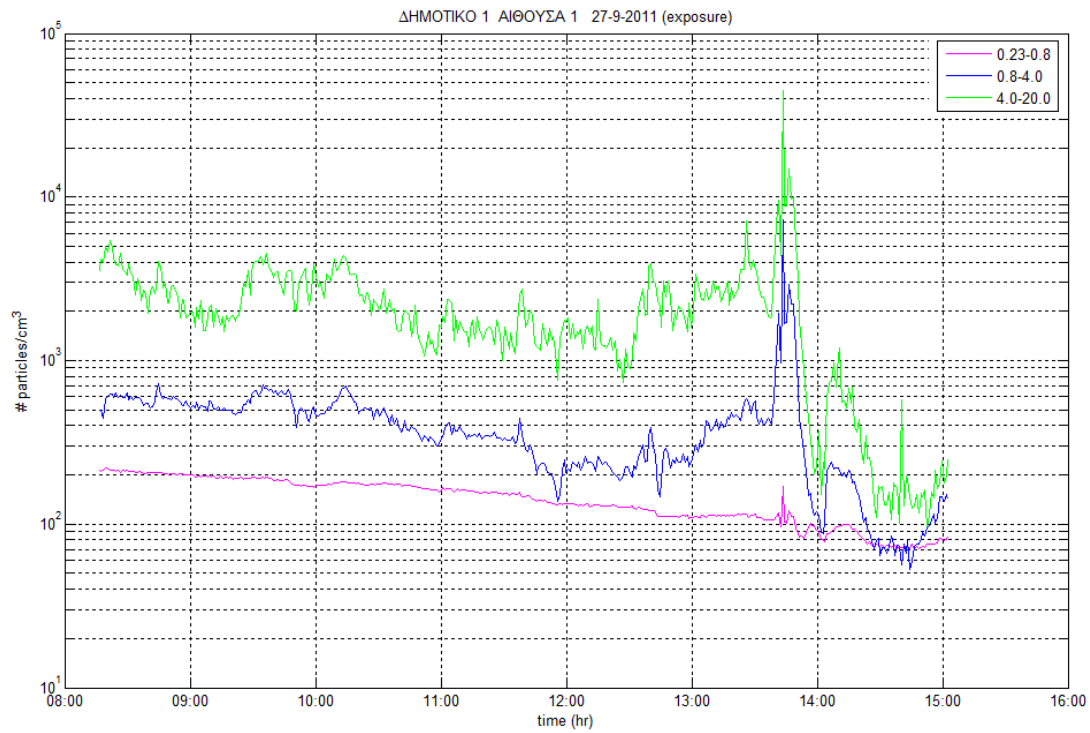


Εικόνα Α.1 Διάγραμμα χρονοσειράς αθροισμένων διαμέτρων - Νηπιαγωγείο, Ψυχρή περίοδος

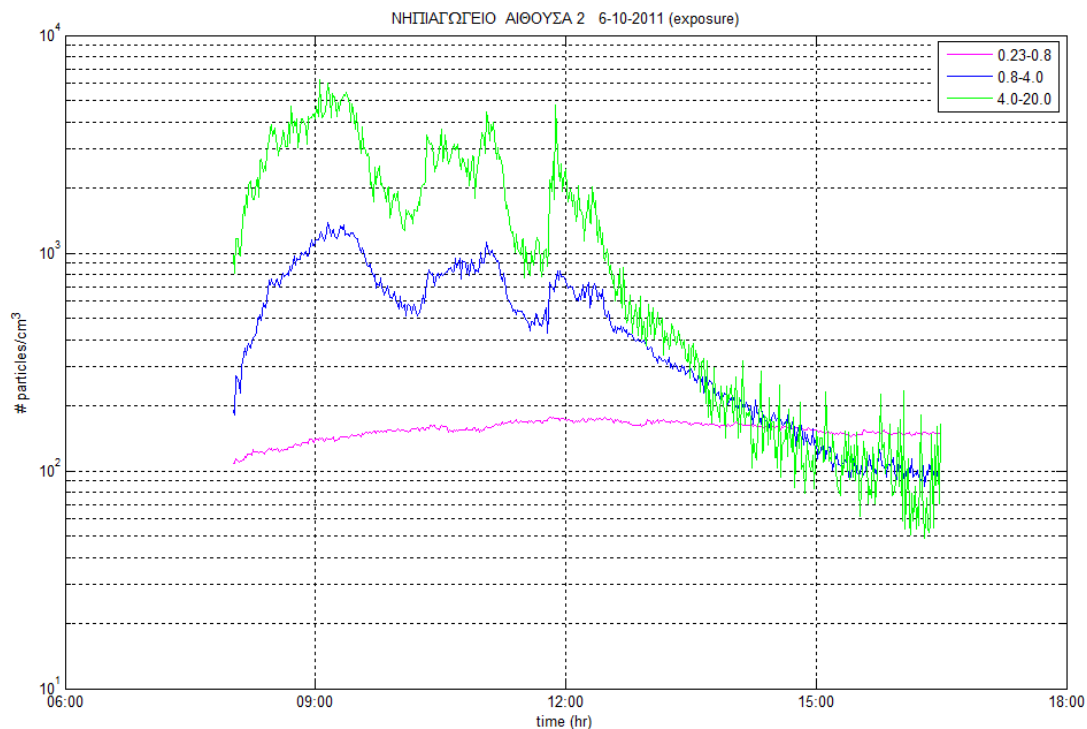


Εικόνα Α.2 Διάγραμμα χρονοσειράς αθροισμένων διαμέτρων - Δημοτικό Σχολείο 2, Ψυχρή περίοδος

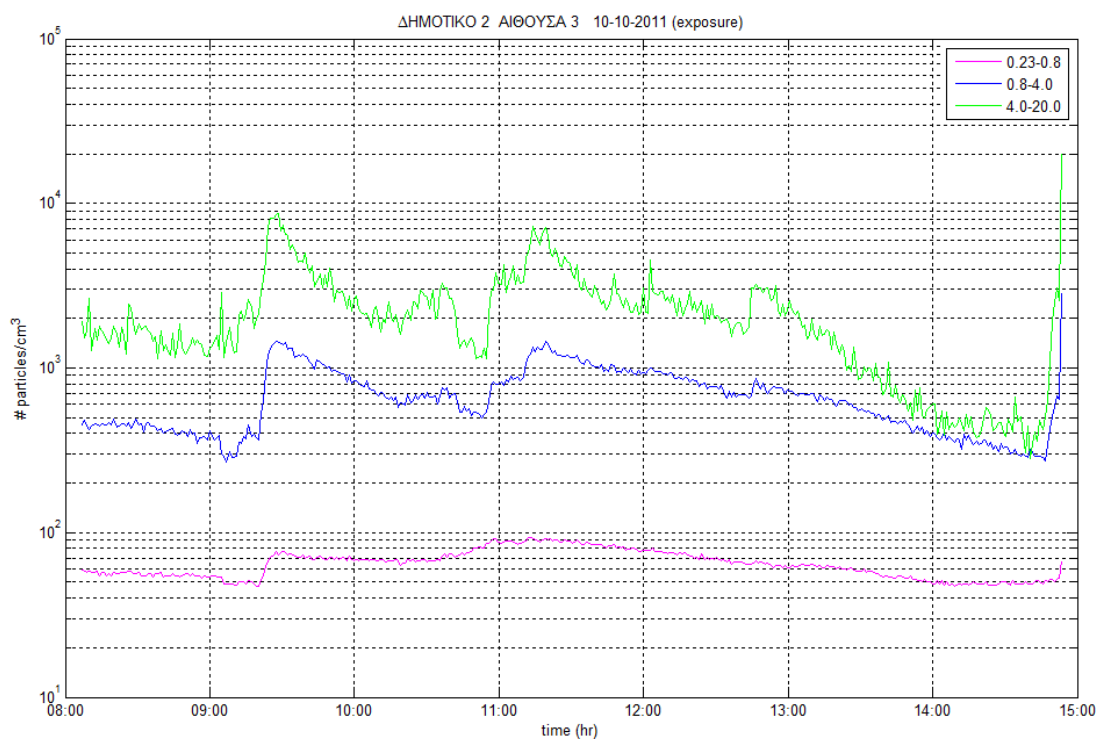
Διαγράμματα ομαδοποιημένων διαμέτρων της χρονικής περιόδου διδασκαλίας μέσα στην τάξη θερμής περιόδου



Εικόνα Α.3 Διάγραμμα χρονοσειράς αθροισμένων διαμέτρων κατά την διάρκεια διδασκαλίας - Δημοτικό Σχολείο 1, Θερμή περίοδος

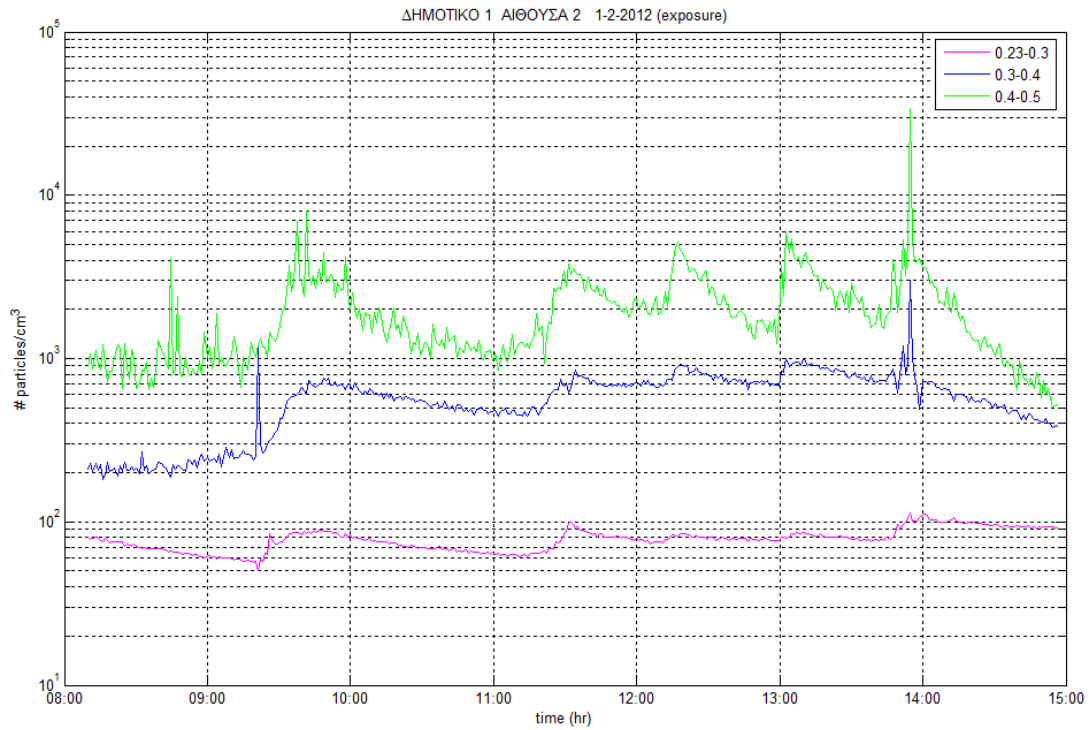


Εικόνα Α.4 Διάγραμμα χρονοσειράς αθροισμένων διαμέτρων κατά την διάρκεια διδασκαλίας – Νηπιαγωγείο, Θερμή περίοδος

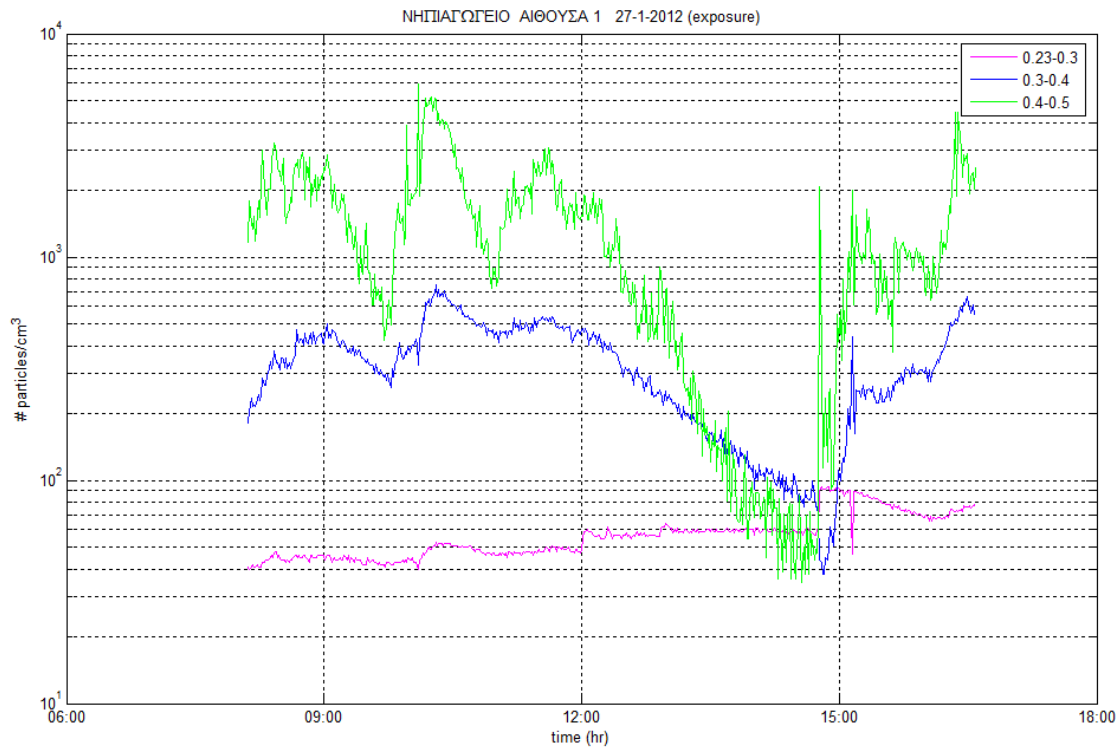


Εικόνα Α.5 Διάγραμμα χρονοσειράς αθροισμένων διαμέτρων κατά την διάρκεια διδασκαλίας - Δημοτικό Σχολείο 2, Θερμή περίοδος

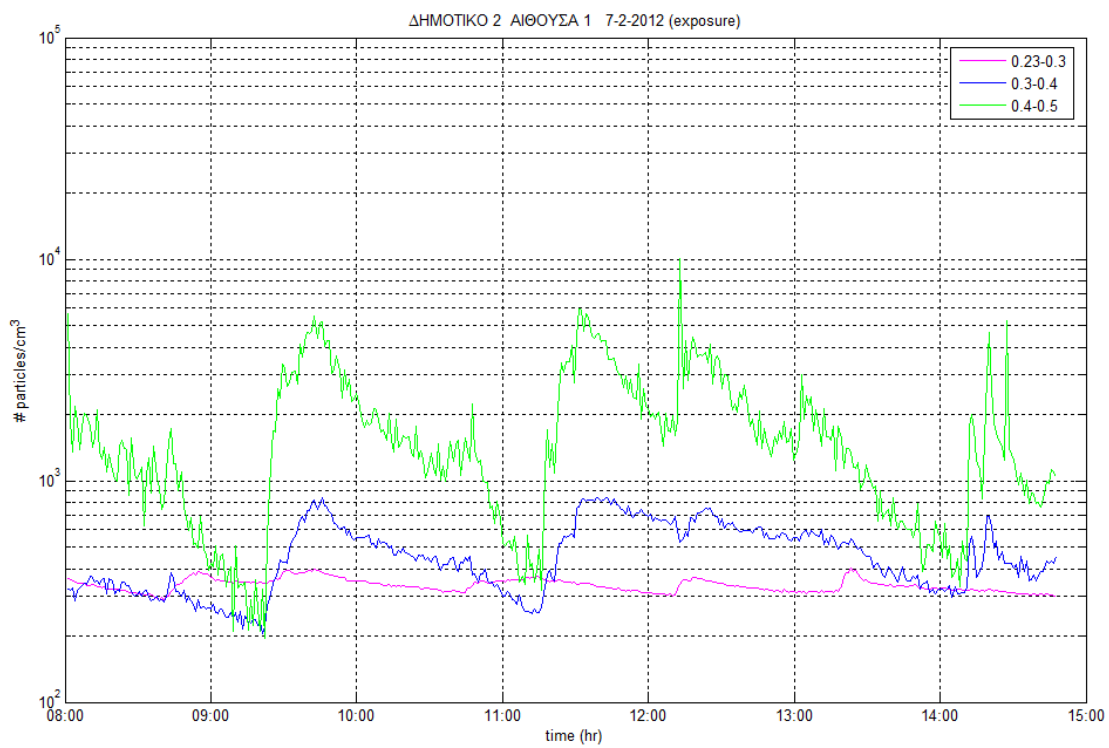
Διαγράμματα ομαδοποιημένων διαμέτρρων της χρονικής περιόδου διδασκαλίας μέσα στην τάξη ψυχρής περιόδου



Εικόνα Α.6 Διάγραμμα χρονοσειράς αθροισμένων διαμέτρρων κατά την διάρκεια διδασκαλίας - Δημοτικό Σχολείο 1, Ψυχρή περίοδος

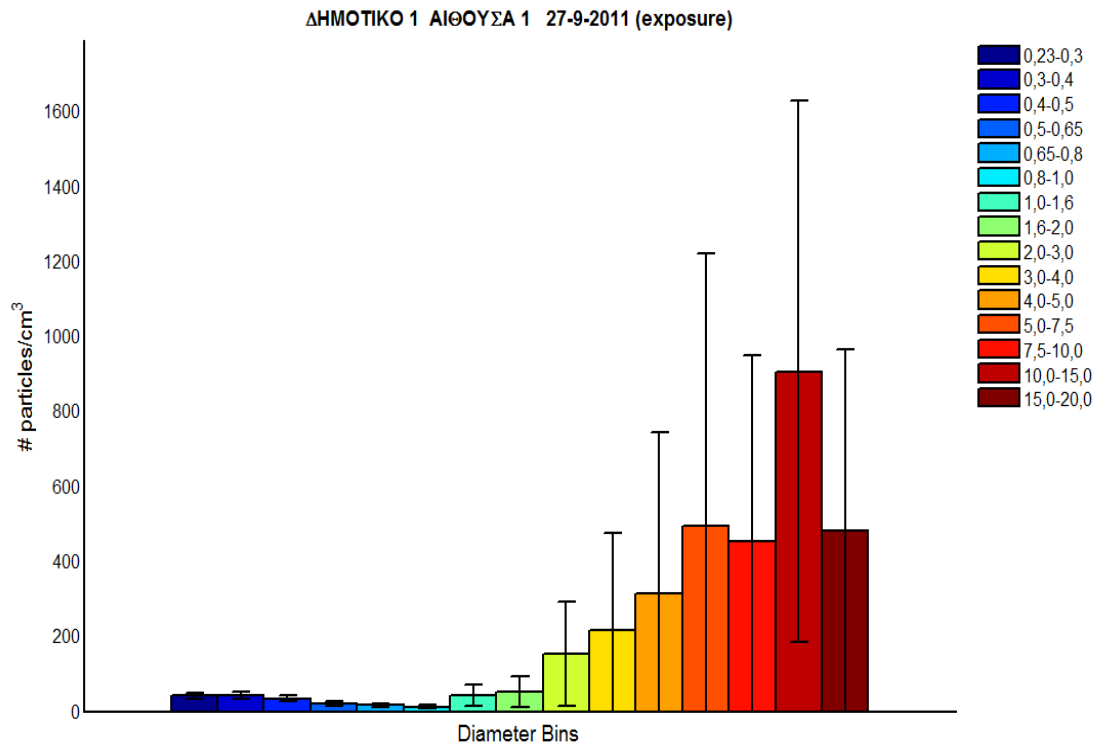


Εικόνα Α.7 Διάγραμμα χρονοσειράς αθροισμένων διαμέτρων κατά την διάρκεια διδασκαλίας - Νηπιαγωγείο, Ψυχρή περίοδος

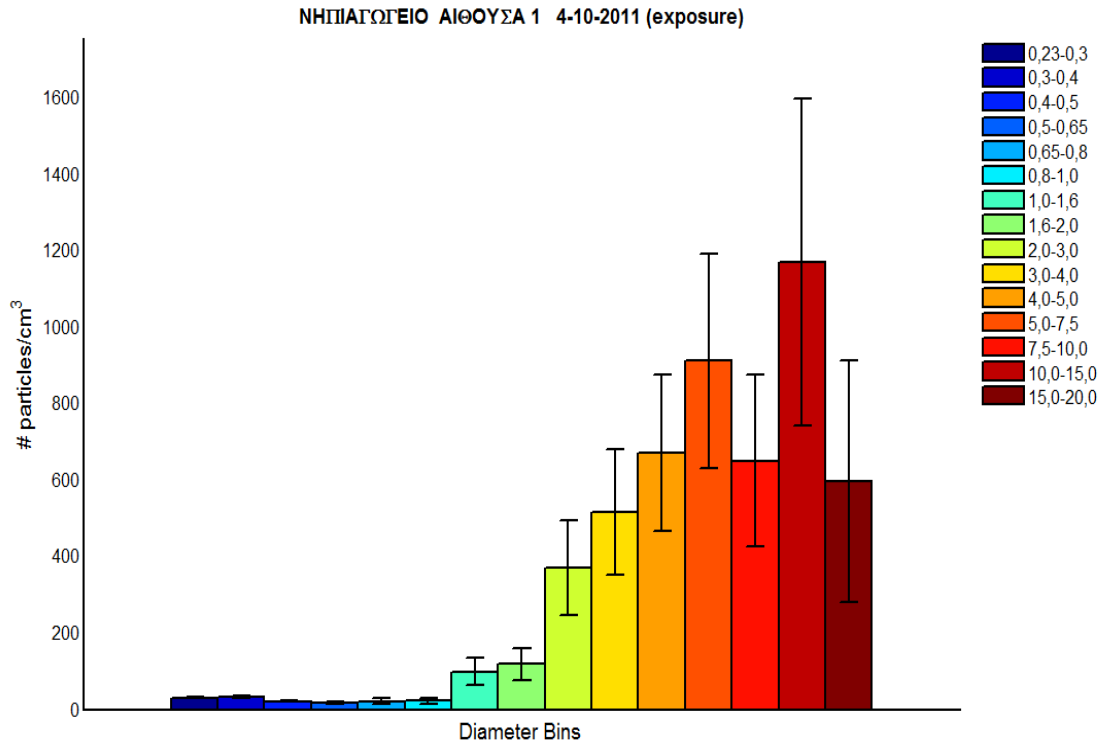


Εικόνα Α.8 Διάγραμμα χρονοσειράς αθροισμένων διαμέτρων κατά την διάρκεια διδασκαλίας - Δημοτικό Σχολείο 2, Ψυχρή περίοδος

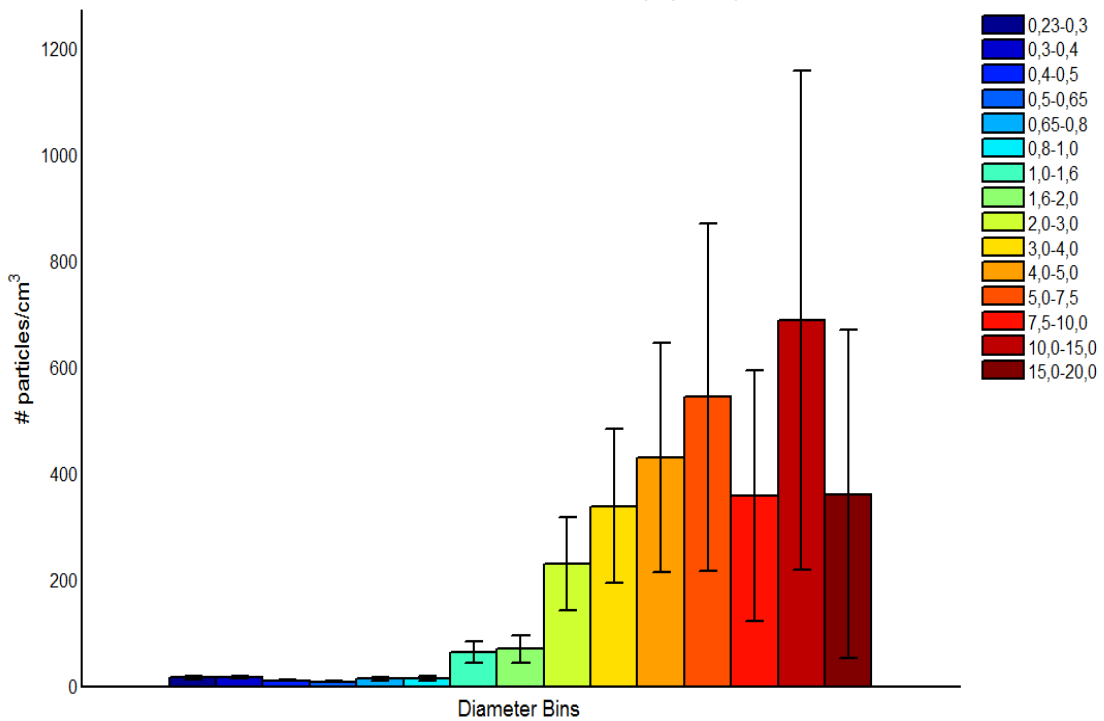
Διαγράμματα μέσω των τιμών και τυπικών αποκλίσεων θερμής περιόδου



Εικόνα Α.9 Διάγραμμα μέσω των τιμών και τυπικών αποκλίσεων ανά κανάλι μεγέθους - Δημοτικό Σχολείο 1, Θερμή περίοδος

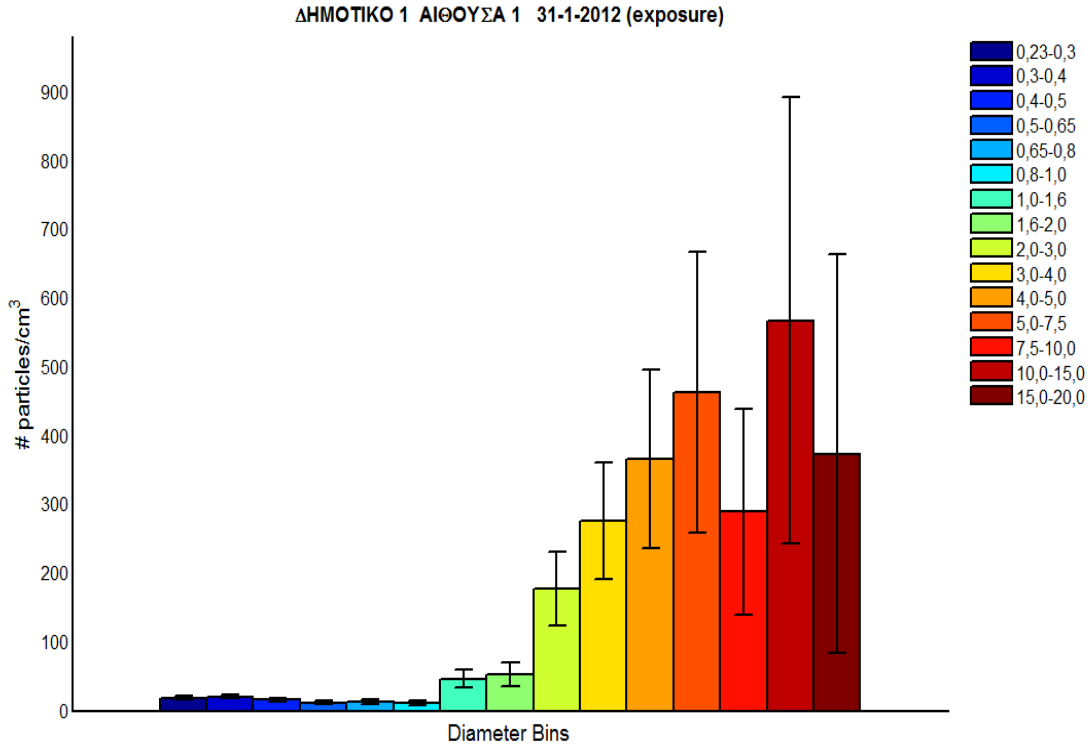


Εικόνα Α.10 Διάγραμμα μέσων τιμών και τυπικών αποκλίσεων ανά κανάλι μεγέθους – Νηπιαγωγείο, Θερμή περίοδος
ΔΗΜΟΤΙΚΟ 2 ΑΙΘΟΥΣΑ 3 10-10-2011 (exposure)

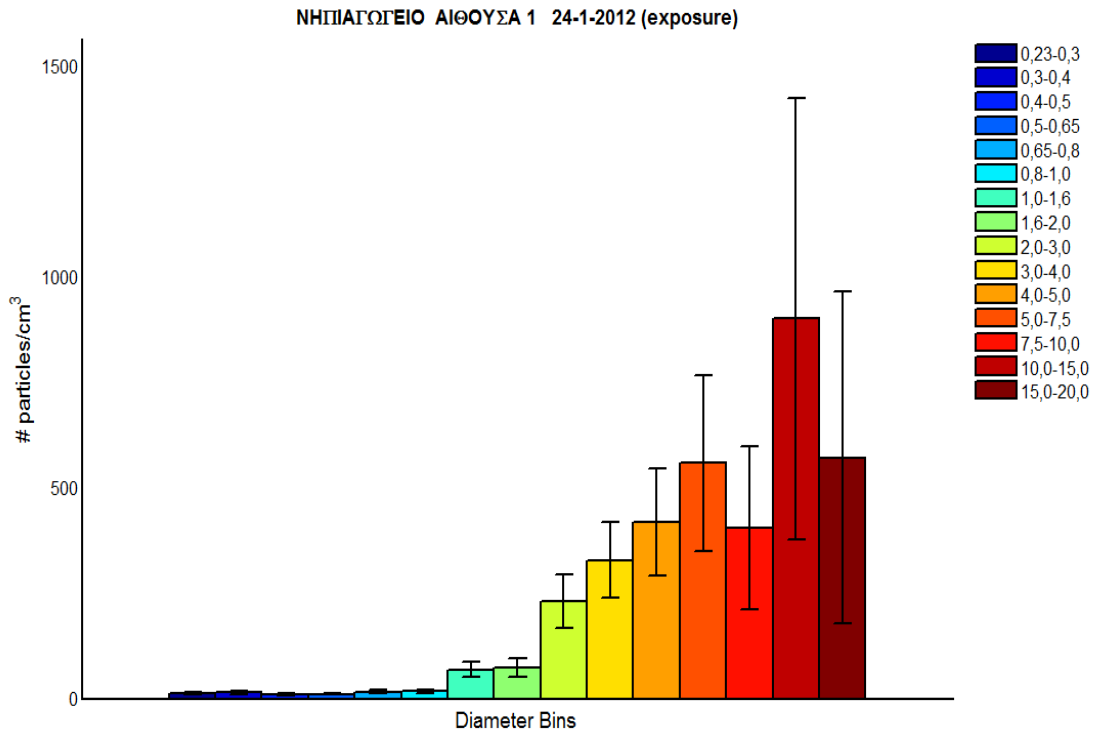


Εικόνα Α.11 Διάγραμμα μέσων τιμών και τυπικών αποκλίσεων ανά κανάλι μεγέθους – Δημοτικό Σχολείο 2, Θερμή περίοδος

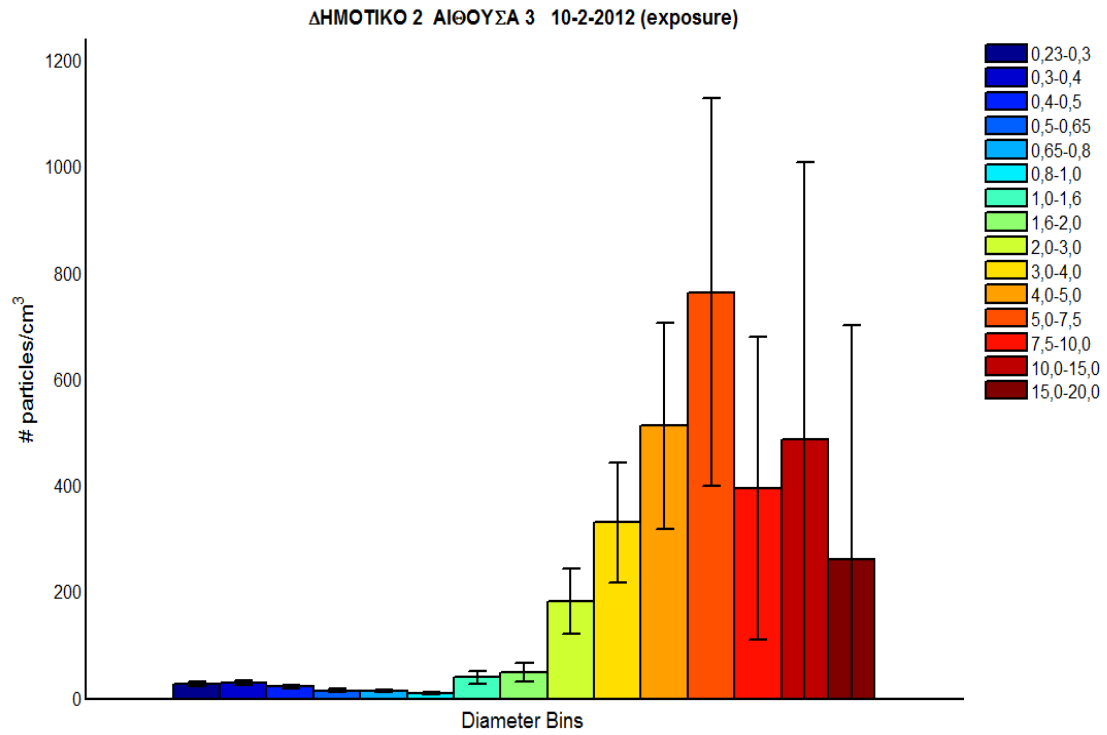
Διαγράμματα μέσω των τιμών και τυπικών αποκλίσεων ψυχρής περιόδου



Εικόνα Α.12 Διάγραμμα μέσω των τιμών και τυπικών αποκλίσεων ανά κανάλι μεγέθους - Δημοτικό Σχολείο 1, Ψυχρή περίοδος



Εικόνα Α.13 Διάγραμμα μέσω των τιμών και τυπικών αποκλίσεων ανά κανάλι μεγέθους - Νηπιαγωγείο, Ψυχρή περίοδος

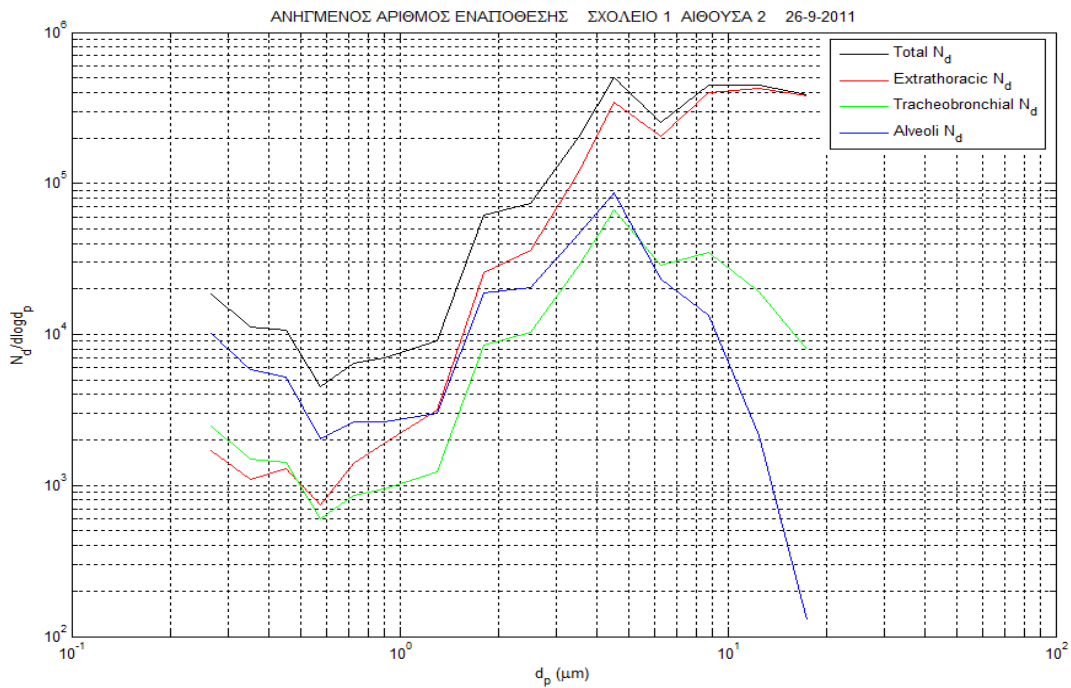


Εικόνα Α.14 Διάγραμμα μέσων τιμών και τυπικών αποκλίσεων ανά κανάλι μεγέθους - Δημοτικό Σχολείο 2, Ψυχρή περίοδος

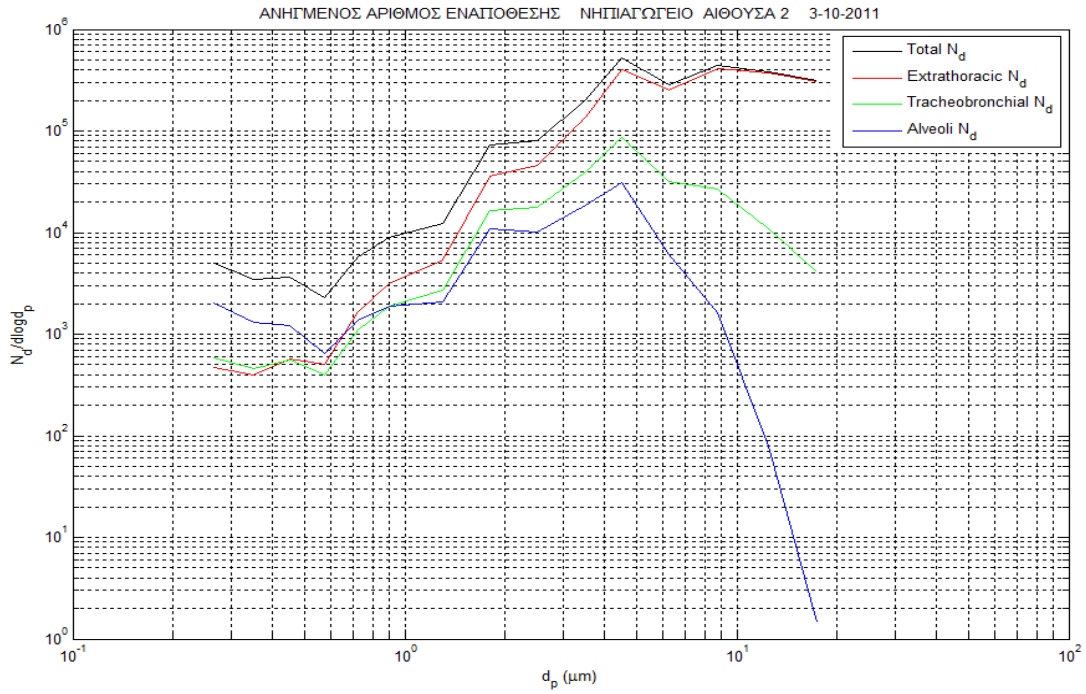
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται επιπρόσθετα διαγράμματα που αφορούν στον υπολογισμό της εναπόθεσης στο αναπνευστικό σύστημα. Παρουσιάζονται αποτελέσματα αντίστοιχα της παραγράφου 7.2 για κάθε μέρα/αίθουσα για όλα τα σχολεία αναλυτικά.

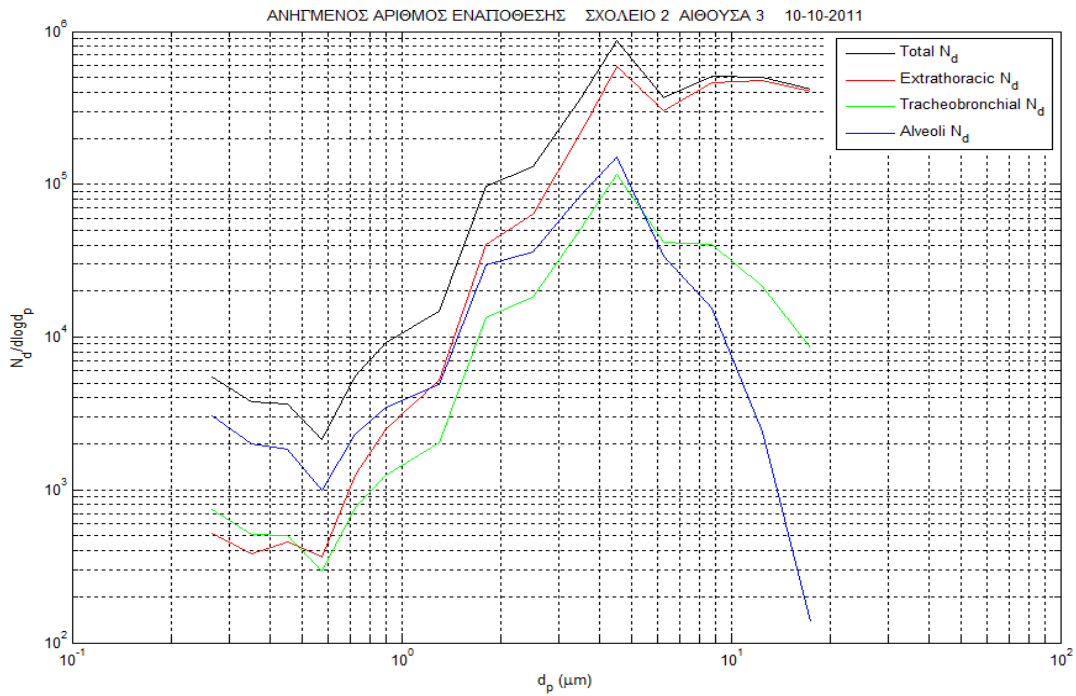
Διαγράμματα ανηγμένου αριθμού εναπόθεσης - Θερμή περίοδος



Εικόνα Β.1 Ανηγμένος αριθμός εναπόθεσης σωματιδίων - Δημοτικό Σχολείο 1, Θερμή περίοδος

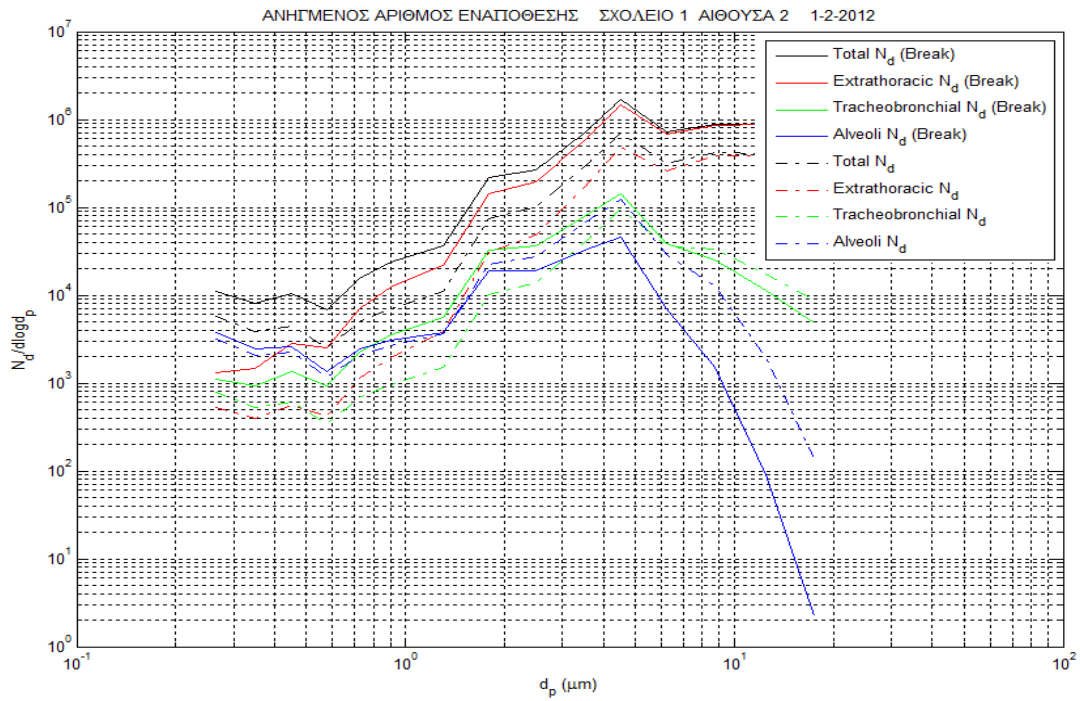


Εικόνα Β.2 Ανηγμένος αριθμός εναπόθεσης σωματιδίων – Νηπιαγωγείο, Θερμή περίοδος

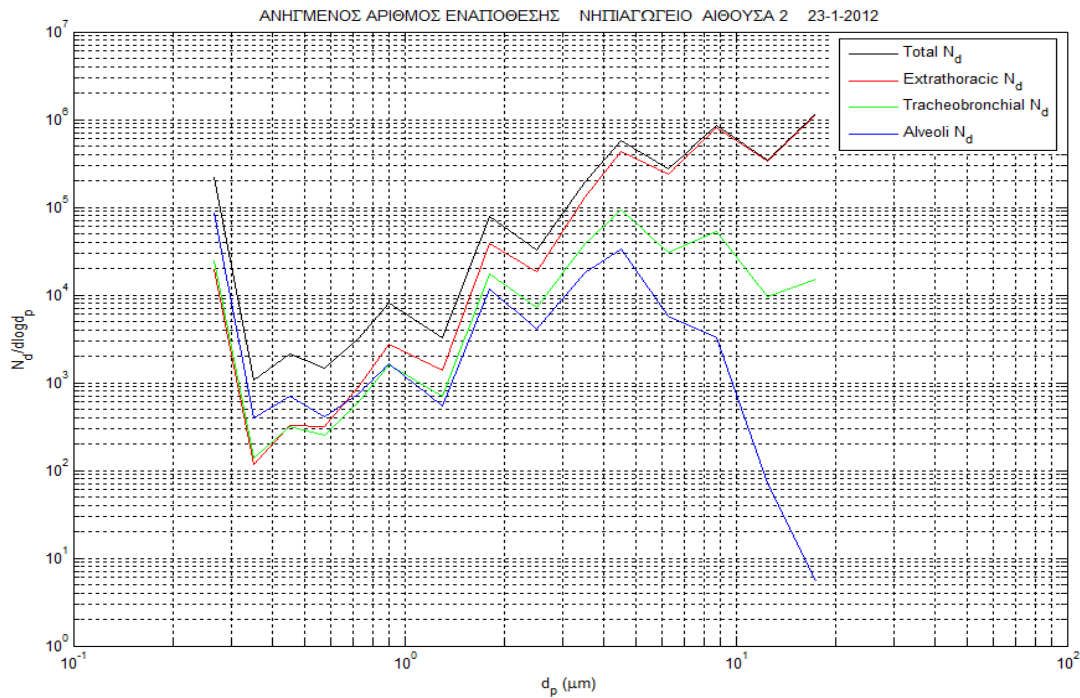


Εικόνα Β.3 Ανηγμένος αριθμός εναπόθεσης σωματιδίων - Δημοτικό Σχολείο 2, Θερμή περίοδος

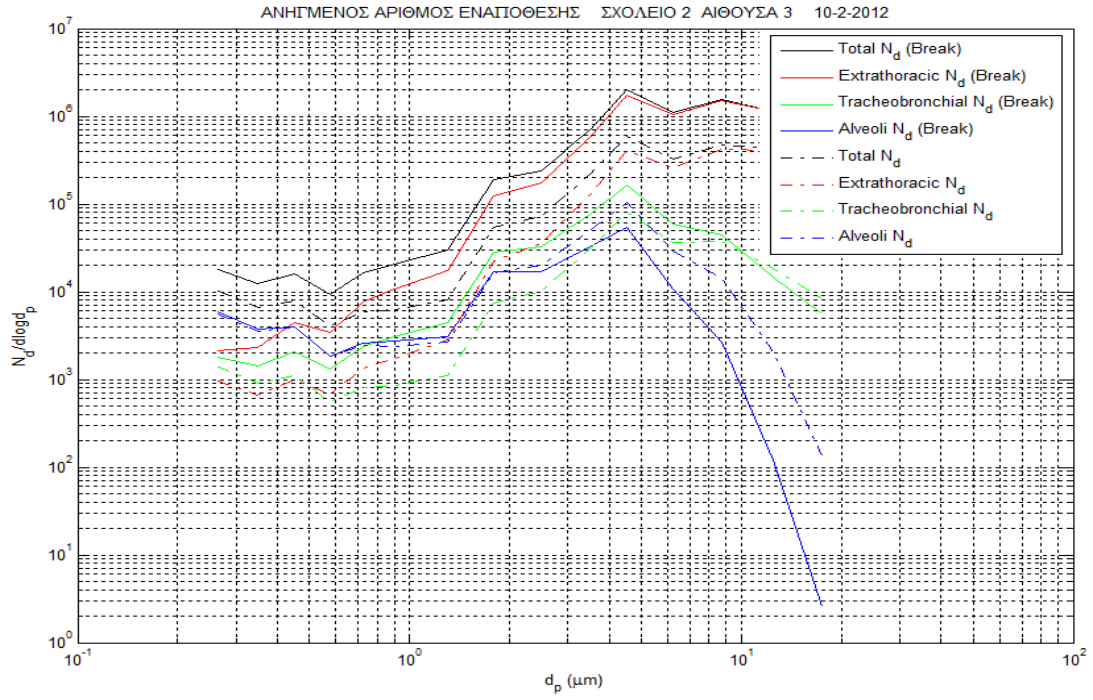
Διαγράμματα ανηγμένου αριθμού εναπόθεσης - Ψυχρή περίοδος



Εικόνα Β.4 Ανηγμένος αριθμός εναπόθεσης σωματιδίων – Δημοτικό Σχολείο 1, Ψυχρή περίοδος

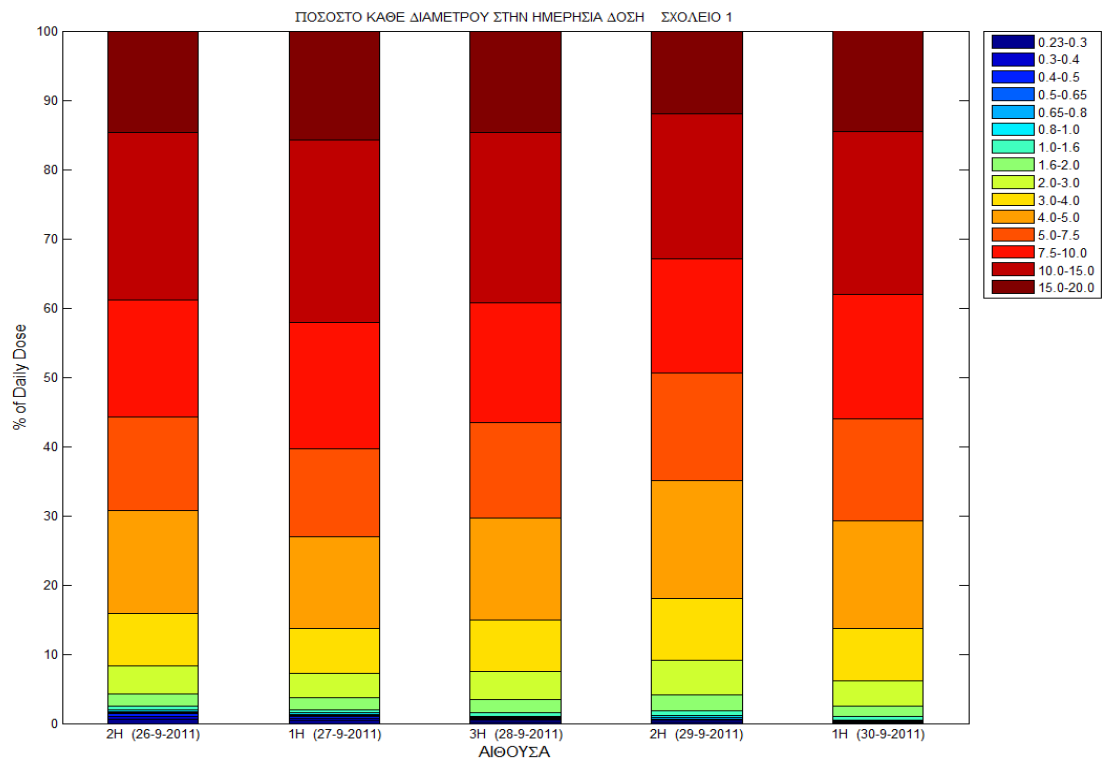


Εικόνα Β.5 Ανηγμένος αριθμός εναπόθεσης σωματιδίων - Νηπιαγωγείο, Ψυχρή περίοδος

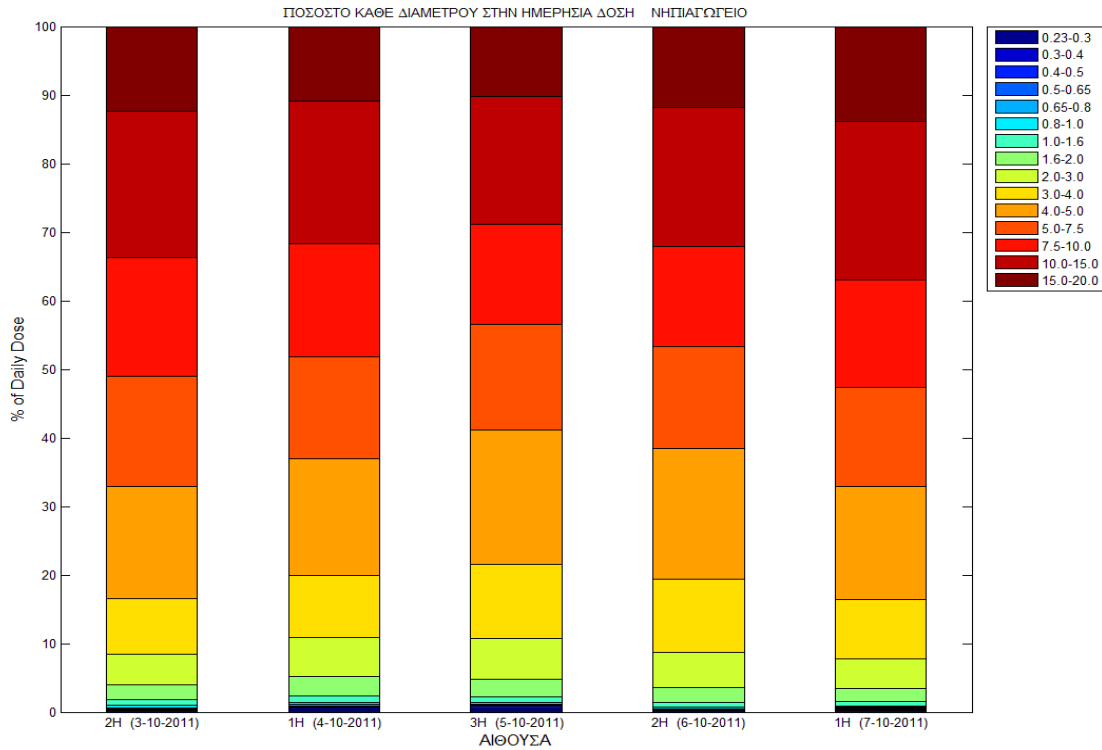


Εικόνα Β.6 Ανηγμένος αριθμός εναπόθεσης σωματιδίων - Δημοτικό Σχολείο 2, Ψυχρή περίοδος

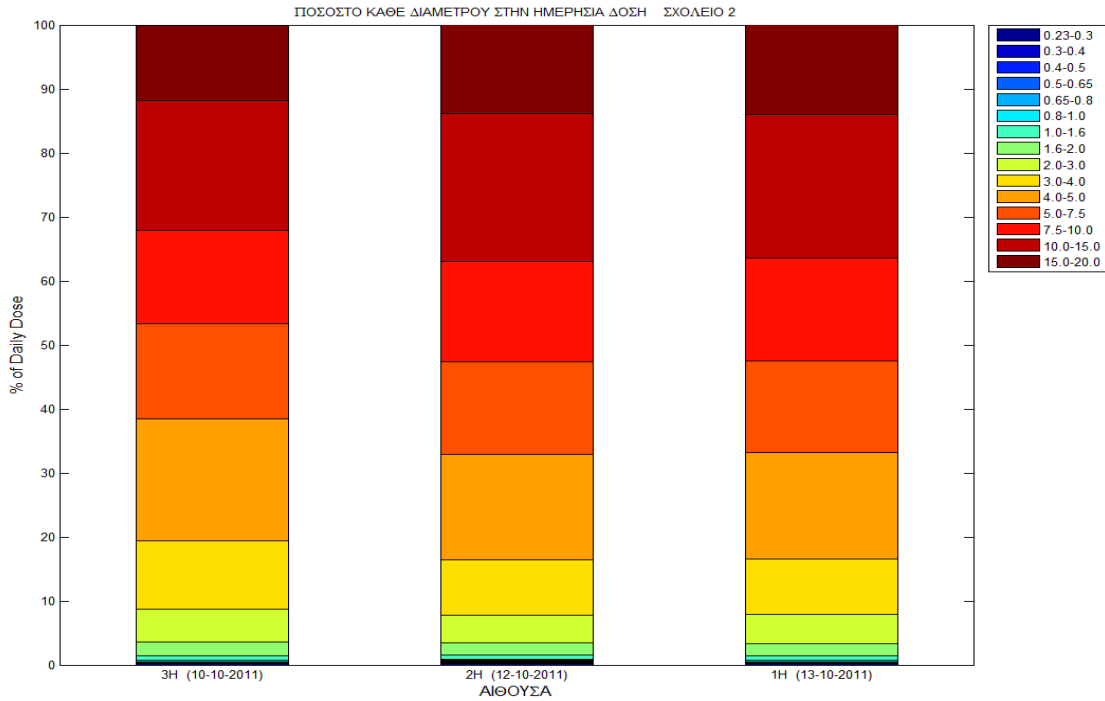
Διαγράμματα συνεισφοράς των σωματιδίων της κάθε τάξης μεγέθους στην ημερήσια δόση – Θερμή περίοδος



Εικόνα Β.7 Συνεισφορά των σωματιδίων κάθε τάξης μεγέθους στην ημερήσια δόση – Δημοτικό Σχολείο 1, Θερμή περίοδος

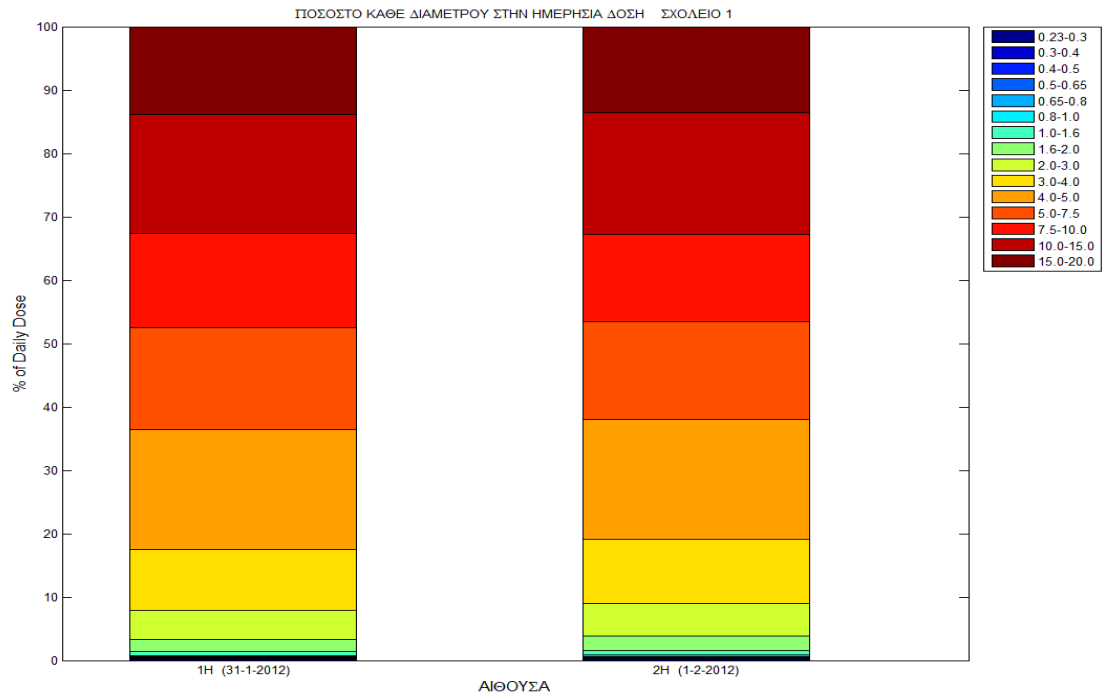


Εικόνα Β.8 Συνεισφορά των σωματιδίων κάθε τάξης μεγέθους στην ημερήσια δόση – Νηπιαγωγείο, Θερμή περίοδος

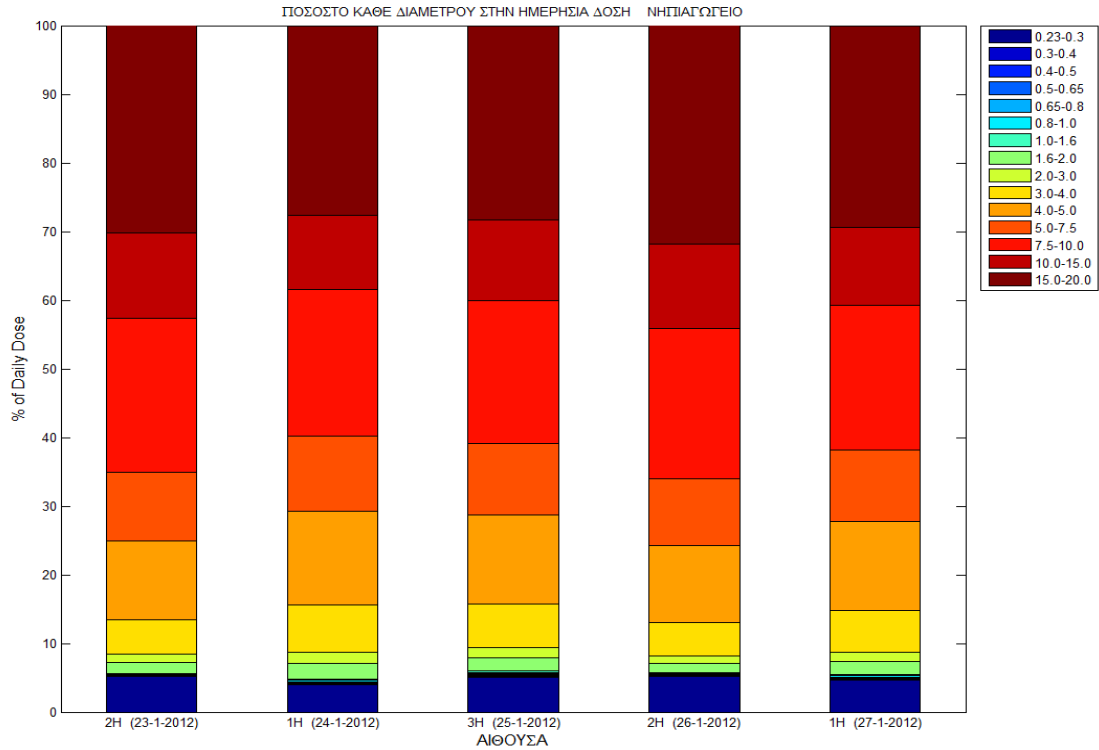


Εικόνα Β.9 Συνεισφορά των σωματιδίων κάθε τάξης μεγέθους στην ημερήσια δόση – Δημοτικό Σχολείο 2, Θερμή περίοδος

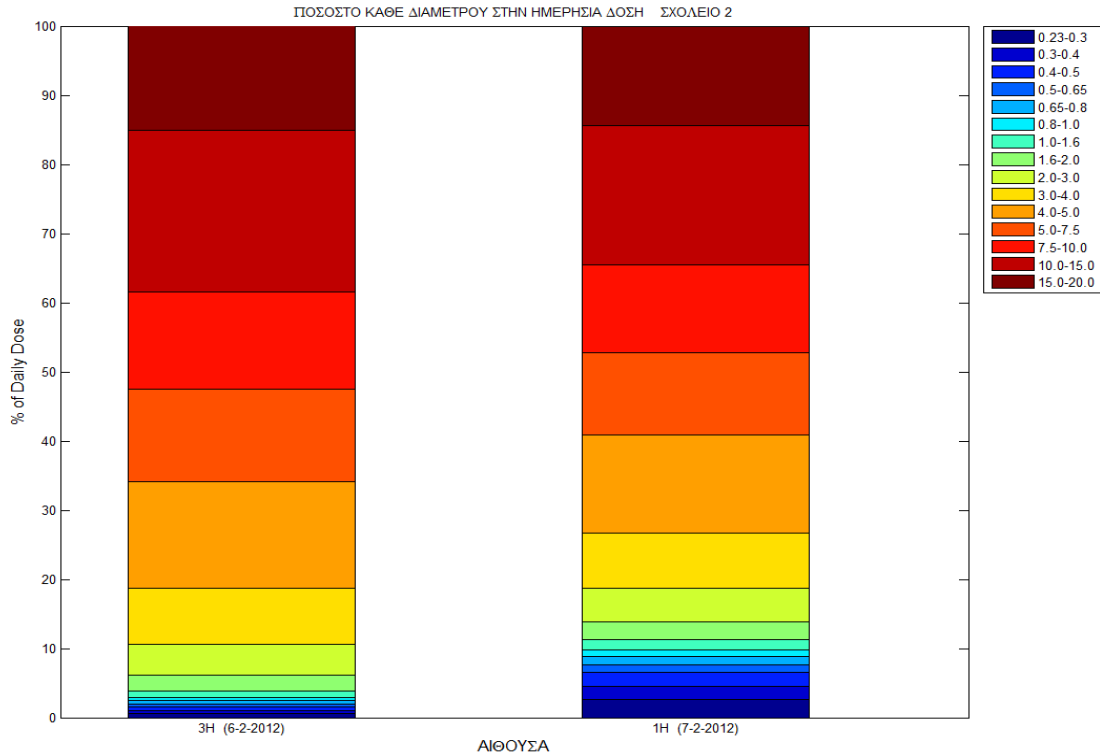
Διαγράμματα συνεισφοράς των σωματιδίων της κάθε τάξης μεγέθους στην ημερήσια δόση – Ψυχρή περίοδος



Εικόνα Β.10 Συνεισφορά των σωματιδίων κάθε τάξης μεγέθους στην ημερήσια δόση – Δημοτικό Σχολείο 1, Ψυχρή περίοδος



Εικόνα Β.11 Συνεισφορά των σωματιδίων κάθε τάξης μεγέθους στην ημερήσια δόση – Νηπιαγωγείο, Ψυχρή περίοδος



Εικόνα Β.12 Συνεισφορά των σωματιδίων κάθε τάξης μεγέθους στην ημερήσια δόση – Δημοτικό Σχολείο 2, Ψυχρή περίοδος

Πίνακας συνολικής ημερήσιας δόσης θερμής και ψυχρής περιόδου

Πίνακας Β1 Συνολική ημερήσια δόση ανά ημέρα και ανά σχολείο - Θερμή περίοδος

	Ημ/νία	Αριθμός σωματιδίων ημερήσιας δόσης θερμής περιόδου
Δημοτικό Σχολείο 1	26/9/2011	3,66E+09
	27/9/2011	4,14E+09
	28/9/2011	3,50E+09
	29/9/2011	3,42E+09
	30/9/2011	4,49E+09
Νηπιαγωγείο	3/10/2011	6,80E+09
	4/10/2011	1,16E+10
	5/10/2011	1,27E+10
	6/10/2011	7,90E+09
	7/10/2011	7,56E+09
Δημοτικό Σχολείο 2	10/10/2011	4,74E+09
	12/10/2011	2,50E+09
	13/10/2011	3,72E+09

Πίνακας Β2 Συνολική ημερήσια δόση ανά ημέρα και ανά σχολείο - Ψυχρή περίοδος

	Ημ/νία	Αριθμός σωματιδίων ημερήσιας δόσης ψυχρής περιόδου
Δημοτικό Σχολείο 1	31/1/2012	7,86E+09
	1/2/2012	8,86E+09
Νηπιαγωγείο	23/1/2012	1,04E+10
	24/1/2012	7,45E+09
	25/1/2012	9,43E+09
	26/1/2012	7,43E+09
	27/1/2012	5,05E+09
Δημοτικό Σχολείο 2	7/2/2012	5,85E+09
	10/2/2012	7,99E+09

Βιβλιογραφία

- Amato, F., Rivas, I., Viana, M., Moreto, T., Bouso, L., Reche, C., και συν. (2014). Sources of indoor and outdoor PM_{2.5} concentrations in primary schools. *Science of the Total Environment*, 757-765.
- Asgharian, B., Hofmann, W., & Bergmann, R. (2001). Particle Deposition in a Multiple-Path Model of the Human Lung. *Aerosol Science and Technology*, 332-339.
- Bailey, A. (1997). The inhalation and deposition of charged particles within the human lung. *J. Electrostat.*, 42, 25-32.
- Branis, M., Safranek, J., & Hytychova, A. (2009). Exposure of children to airborne particulate matter of different size fractions during indoor physical education at school. *Building and Environment*, 1246-1252.
- Buonanno, G., Fuoco, F. C., Marini, S., & Stabile, L. (2012). Particle resuspension in school gyms during physical activities. *Aerosol and Air Quality Research*, 803-813.
- Drossinos, Y., & Housiadas, C. (2005). *Aerosol flows in Multiphase flow haandbook*. Florida.
- Ferron, G. A., Kreyling, W. G., & Haider, B. (1988). Inhalation of salt aerosol-particles 2. Growth and deposition in the human respiratory tract. *J. Aerosol Sci.*, 19, 611-631.
- Finlay, W. (2001). *The mechanics of inhaled pharmaceutical aerosols: An introduction*. London: Academic Press.
- Finlay, W., & Stapleton, K. (1995). The effect on regional lung deposition of coupled heat and mass transfer hygroscopic droplets and their surrounding phase. *J. Aerosol Sci.*, 26, 655-670.
- Friedlander, S. (2000). *Smoke, dust, haze: Fundamentals of aerosol dynamics*. Oxford: Oxford university press.
- Golshahi, L., Noga, M. L., & Finlay, W. H. (2012). Deposition of inhaled micrometer-sized particles in oropharyngeal airway replicas of children at constant flow rates. *Journal of Aerosol Science*, 21-31.
- Heistracher, T., & Hofmann, W. (1995). Physiologically realistic models of bronchial airway bifurcations. *J. Aerosol Sci.*, 26, 497-509.

- Heyder, J., & Gebhart, J. (1977). Gravitational deposition of particles from laminar aerosol flow through inclined circular tubes. *J. Aerosol Sci.*, *8*, 289-295.
- Hinds, W. (1999). *Aerosol technology: properties, behaviour, and measurement of airborne particles*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- ICRP. (1994). Human respiratory tract model for radiological protection. *Technical report ICRP publication 66, International Commission on Radiological Protection*.
- Ingham, D. B. (1975). Diffusion of aerosols from a stream flowing through a cylindrical tube. *J. Aerosol Sci.*, *6*, 125-132.
- Isaacs, K. K., & Martonen, T. B. (2005). Particle deposition in children's lungs: Theory and experiment. *Journal of Aerosol Medicine: Deposition, Clearance, and Effects in the Lung*, 337-353.
- Lannefors, H., & Hansson, H. C. (1980). Indoor/outdoor elemental concentration relationships at a nursery school. *Nuclear instruments and methods*, 441-444.
- Luoma, M., & Batterman, S. A. (2001). Characterization of particulate emissions from occupant activities in offices. *Indoor Air - International Journal of Indoor Air Quality and Climate* *11*, 35-48.
- Malet, J., Alloul, L., Michielsen, N., Boulaud, D., & Renoux, A. (2000). Deposition of nanosized particles in cylindrical tubes under laminar and turbulent flow conditions. *J. Aerosol Sci.*, *14*, 335-348.
- Muyshondt, A., McFarland, A. R., & Anard, N. K. (1996). Deposition of aerosol particles in contraction fittings. *Aerosol Sci.*, *24*, 205-216.
- Patterson, R. F., Zhang, Q., Zheng, M., & Zhu, Y. (2014). Particle deposition in respiratory tracts of school-aged children. *Aerosol and Air Quality Research*, 64-73.
- Pich, J. (1972). Theory of gravitational deposition of particles from laminar flow in channels. *J. Aerosol Sci.*, *3*, 351-361.
- Pilou, M. (2012). *Investigation of interactions between particles and flowing biofluids*. Athens.
- Saffman, P., & Turner, J. (1956). On the collision of drops in turbulent clouds. *J. Fluid Mech.*, *1*, 16-30.

- Scheff, P. A., Paulius, V. K., Curtis, L., & Conroy, L. M. (2000). Indoor air quality in a middle school, part II: Development of emission factors for particulate matter and bioaerosols. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 835-842.
- Schrerer, P., Shendalman, L., Greene, N., & Bouhuys, A. (1975). Measurement and axial diffusivities in a model of the bronchial airways. *J. Appl. Physiol.*, 38, 719-723.
- Seinfeld, J., & Pandis, S. (1998). *Atmospheric chemistry and physics*. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Stahlhofen, W., Rudolf, G., & James, A. C. (1989). Intercomparison of experimental regional aerosol deposition data. *J. Aerosol Med.*, 2, 285-308.
- Stapleton, K. W., Guentsch, E., Hoskinson, M. K., & Finlay, W. H. (2000). On the suitability of k-epsilon turbulence modelling for aerosol deposition in the mouth and throat: A comparison with experiment. *J. Aerosol Sci.*, 31, 739-749.
- Vianna, M., Rivas, I., Querol, X., Alastuey, A., Alvarez-Pedrerol, M., Bouso, L., και συν. (2014). *Partitioning of trace elements and metals between quasi-ultrafine, accumulation and coarse aerosols in indoor and outdoor air in schools*. Barcelona.
- Vianna, M., Rivas, I., Querol, X., Alastuey, A., Sunyer, J., Alvarez-Pedrerol, M., και συν. (2014). Indoor/outdoor relationships and mass closure of quasi-ultrafine, accumulation and coarse particles in Barcelona schools. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4459-4472.
- Wang, C. S. (1975). Gravitational deposition of particles from laminar flows in channels. *J. Aerosol Sci.* 6, 191-204.
- Wang, J., Lai, S., Ke, Z., Zhang, Y., Yin, S., & Zheng, J. (2014). Exposure assessment, chemical characterization and source identification of PM_{2.5} for school children and industrial downwind residents in Guangzhou, China. *Environmental Geochemistry and Health*, 385-397.
- Weibel, E. R. (1963). *Morphometry of human lungs*. Springer-Verlaag, Berlin.
- Wells, A. C., & Chamberlain, A. C. (1967). Transport of small particles to vertical surfaces. *Brit. J. Appl. Phys.* 18, 1793-1799.
- Yeh, H. C., & Schum, G. M. (1980). Models of human lung airways and their application to inhaled particle deposition. *Bulletin of Mathematical Biology*, 461-480.

- Yu, C. P. (1985). Theories of electrostatic lung deposition of inhaled aerosols. *Ann. Occup. Hyg.* 29, 219-227.
- Yu, C. P., & Diu, C. K. (1982). Total and regional deposition of inhaled aerosols in humans. *Journal of Aerosol Science*, 599-609.
- Yu, C. P., Diu, C. K., & Soong, T. T. (1981). Statistical analysis of aerosol deposition in nose and mouth. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 42, 726-733.
- Zhou, Y., Guo, M., Xi, J., Irshad, H., & Cheng, Y. S. (2014). Nasal deposition in infants and children. *Journal of Aerosol Medicine and Pulmonary Drug Delivery*, 110-116.
- Αντωνόπουλος, Β. (2011). Υπολογιστική μελέτη ροής ρευστού με σωματίδια σε διακλάδωση με μεθοδολογία Euler. Αθήνα.
- Λαζαρίδης, Β., & Λέγκας, Ν. (2013). Αξιολόγηση εσωτερικών και εξωτερικών χώρων του σχολικού περιβάλλοντος και συγκεκριμένα χαρακτηρισμός των σχολικών κτιρίων, φυσικές και χημικές μετρήσεις. Κοζάνη.
- Μητσάκου, Χ. (2006). Ανάπτυξη αλγορίθμου για τον υπολογισμό της δυναμικής των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα. Αθήνα.